

# 船体構造の破壊管理制御設計指針

第 169 研究部会

船体構造の破壊管理制御設計に関する研究

昭和 58 年 6 月

社 団 法 人

日 本 造 船 研 究 協 会



## まえがき 三菱

本報で紹介する“船体構造の破壊管理制御設計指針”は、日本造船研究協会第169研究部会において、検討・作成された。しかしながら、本設計指針作成の緒は、第153研究部会 船殻破壊強度検討小委員会（略称 SF 小委員会：Ship design based on Fracture mechanics 小委員会）（昭和50年10月に設置が決議され、昭和51年度に活動した）の活動に遡る。すなわち、昭和50年10月から昭和56年3月までの約5ヶ年半に及ぶ、委員諸氏の努力により作成されたものである。

第153研究部会 SF小委員会の活動方針は、“破壊力学による安全性検討を船殻設計の一つの criteria と考え、疲労および脆性破壊の発生、伝播、停止などすべての因子を包含し、設計手法の総合的なフローによる case study を試み、問題点を抽出・収集する”ことにあった。この SF 小委員会で検討・企画・立案された方針が、第169研究部会に引き継がれたわけである。

第169研究部会には、

第1幹事会：亀裂損傷の評価を旨とした船殻局部構造の破壊強度試算、  
船体構造の破壊管理制御設計指針の整理・作成 担当

第2幹事会：船体構造の破壊管理制御設計確立に必要な構造要素強度に関する基礎的研究 担当

の二つの幹事会が設置され、昭和52年4月から昭和56年3月までの4ヶ年間にわたる熱心な活動・努力によって、本“船体構造の破壊管理制御設計指針”が完成したのである。

なお、本設計指針の作成は、船殻設計関係者と破壊力学研究者の密接な協力と相互啓蒙によって、はじめて成し遂げられたものである。

破壊力学をはじめとする諸技術の日進月歩の急速な発展状況から、いわゆる“破壊管理制御設計”は、今後 日常 船殻設計業務の中に広く浸透して行くであろう。

関連報告書：日本造船研究協会研究資料 No.267-2 (昭.52.3), No.297 (昭.53.3),

No.315 (昭.54.3), No.326 (昭.55.3), No.337 (昭.56.3)

## 第169 研究部会委員名簿 (敬称略・五十音順)

|     |    |              |    |               |  |
|-----|----|--------------|----|---------------|--|
| 部会長 | 金沢 | 武 (東京大学)     |    |               |  |
| 幹事  | 町田 | 進 (東京大学)     | 矢島 | 浩 (三菱重工業)     |  |
|     | 渡辺 | 昌建 (三菱重工業)   |    |               |  |
| 委員  | 青木 | 真一 (川崎製鉄)    | 青木 | 満 (神戸製鋼所)     |  |
|     | 浅野 | 浩三 (日本鋼管)    | 池田 | 一夫 (神戸製鋼所)    |  |
|     | 石橋 | 敬男 (佐野安船渠)   | 板垣 | 浩 (横浜国立大学)    |  |
|     | 岩城 | 秀夫 (日本海事協会)  | 後川 | 理 (石川島播磨重工業)  |  |
|     | 大浦 | 啓義 (佐世保重工業)  | 大野 | 章 (新日本製鉄)     |  |
|     | 大橋 | 延夫 (川崎製鉄)    | 尾川 | 宜之 (日本鋼管)     |  |
|     | 片岡 | 繁夫 (長崎大学)    | 川野 | 始 (三菱重工業)     |  |
|     | 川原 | 正吉 (日本鋼管)    | 栗田 | 義之 (日本鋼管)     |  |
|     | 黒川 | 常夫 (長崎大学)    | 古賀 | 敏昭 (住友金属工業)   |  |
|     | 阪井 | 大輔 (三菱重工業)   | 酒井 | 啓一 (石川島播磨重工業) |  |
|     | 酒井 | 栄 (山下新日本汽船)  | 酒戸 | 恒男 (住友重機械工業)  |  |
|     | 佐藤 | 邦彦 (大阪大学)    | 沢柳 | 政弘 (三井造船)     |  |
|     | 鈴木 | 省輔 (函館ドック)   | 恒成 | 利康 (川崎重工業)    |  |
|     | 富吉 | 勉之 (川崎重工業)   | 豊貞 | 雅宏 (日立造船)     |  |
|     | 豊田 | 政男 (大阪大学)    | 中田 | 宜久 (三井造船)     |  |
|     | 長田 | 光洋 (大阪造船所)   | 新村 | 豊 (東京大学)      |  |
|     | 半沢 | 貢 (新日本製鉄)    | 樋口 | 道之助 (横浜国立大学)  |  |
|     | 松村 | 裕之 (川崎重工業)   | 三村 | 宏 (新日本製鉄)     |  |
|     | 宮田 | 隆司 (名古屋大学)   | 村田 | 征一郎 (日立造船)    |  |
|     | 山口 | 雄三 (住友重機械工業) | 吉田 | 靖夫 (石川島播磨重工業) |  |
|     | 渡辺 | 孫也 (住友金属工業)  |    |               |  |

## 第169 研究部会第1 幹事会委員名簿

|   |   |   |   |   |             |   |   |   |              |
|---|---|---|---|---|-------------|---|---|---|--------------|
| 主 | 在 | 渡 | 辺 | 昌 | 建 (三菱重工業)   |   |   |   |              |
| 幹 | 事 | 青 | 木 |   | 満 (神戸製鋼所)   | 茂 | 野 | 皓 | 三 (日本鋼管)     |
|   |   | 池 | 田 | 一 | 夫 (神戸製鋼所)   | 板 | 垣 |   | 浩 (横浜国立大学)   |
|   |   | 岩 | 城 | 秀 | 夫 (日本海事協会)  | 後 | 川 |   | 理 (石川島播磨重工業) |
|   |   | 尾 | 川 | 宜 | 之 (日本鋼管)    | 川 | 野 |   | 始 (三菱重工業)    |
|   |   | 川 | 原 | 正 | 言 (日本鋼管)    | 奥 | 田 | 義 | 之 (日本鋼管)     |
|   |   | 阪 | 井 | 大 | 輔 (三菱重工業)   | 酒 | 井 | 啓 | 一 (石川島播磨重工業) |
|   |   | 酒 | 戸 | 恒 | 男 (住友重機械工業) | 沢 | 柳 | 政 | 弘 (三井造船)     |
|   |   | 恒 | 成 | 利 | 康 (川崎重工業)   | 富 | 吉 | 烈 | 之 (川崎重工業)    |
|   |   | 豊 | 貞 | 雅 | 宏 (日立造船)    | 豊 | 田 | 政 | 男 (大阪大学)     |
|   |   | 中 | 田 | 宣 | 久 (三井造船)    | 樋 | 口 | 道 | 之助 (横浜国立大学)  |
|   |   | 町 | 田 |   | 進 (東京大学)    | 松 | 村 | 裕 | 之 (川崎重工業)    |
|   |   | 三 | 村 |   | 宏 (新日本製鉄)   | 宮 | 田 | 隆 | 司 (名古屋大学)    |
|   |   | 村 | 田 | 征 | 一郎 (日立造船)   | 矢 | 島 |   | 浩 (三菱重工業)    |
|   |   | 山 | 口 | 雄 | 三 (住友重機械工業) |   |   |   |              |

## 第169 研究部会第2 幹事会委員名簿

|   |   |   |   |   |              |   |   |   |             |
|---|---|---|---|---|--------------|---|---|---|-------------|
| 主 | 在 | 町 | 田 |   | 進 (東京大学)     |   |   |   |             |
| 幹 | 事 | 青 | 木 |   | 満 (神戸製鋼所)    | 茂 | 野 | 皓 | 三 (日本鋼管)    |
|   |   | 片 | 岡 | 繁 | 夫 (長崎大学)     | 川 | 野 |   | 始 (三菱重工業)   |
|   |   | 川 | 原 | 正 | 言 (日本鋼管)     | 奥 | 田 | 義 | 之 (日本鋼管)    |
|   |   | 酒 | 井 | 啓 | 一 (石川島播磨重工業) | 酒 | 戸 | 恒 | 男 (住友重機械工業) |
|   |   | 沢 | 柳 | 政 | 弘 (三井造船)     | 恒 | 成 | 利 | 康 (川崎重工業)   |
|   |   | 豊 | 貞 | 雅 | 宏 (日立造船)     | 豊 | 田 | 政 | 男 (大阪大学)    |
|   |   | 新 | 村 |   | 豊 (東京大学)     | 半 | 沢 |   | 貢 (新日本製鉄)   |
|   |   | 三 | 村 |   | 宏 (新日本製鉄)    | 矢 | 島 |   | 浩 (三菱重工業)   |

## 第169 研究部会討議参加者

|   |   |   |              |   |   |   |                |
|---|---|---|--------------|---|---|---|----------------|
| 飯 | 野 |   | 暢 (石川島播磨重工業) | 岩 | 永 |   | 寛 (住友金属工業)     |
| 茅 | 沼 | 秀 | 高 (三井造船)     | 賀 | 田 | 和 | 夫 (川崎重工業)      |
| 寺 | 本 | 徳 | 郎 (筑波大学)     | 立 | 石 |   | 勝 (日立造船)       |
| 萩 | 原 | 行 | 人 (新日本製鉄)    | 豊 | 福 | 正 | 継 (日本鋼管)       |
| 平 | 田 | 隆 | 明 (三菱重工業)    | 林 |   | 誠 | 二郎 (石川島播磨重工業)  |
| 藤 | 田 | 高 | 弘 (日本鋼管)     | 福 | 岡 | 哲 | 二 (三井造船)       |
| 松 | 島 | 義 | 男 (石川島播磨重工業) | 三 | 輪 |   | 茂 (日立造船情報システム) |
| 山 | 本 |   | 聡 (日本鋼管)     | 吉 | 成 | 仁 | 志 (東京大学)       |

| 目次                                          | 頁  |
|---------------------------------------------|----|
| 1. 破壊管理制御と本指針について ----- 日立                  | 1  |
| 1.1 破壊管理制御と本指針について -----                    | 1  |
| 1.2 破壊管理制御設計の流れ図 -----                      | 5  |
| 2. 破壊力学解析の解説 -----                          | 9  |
| 2.1 線形破壊力学と脆性破壊の取り扱い方 ----- 東大 (筑波大, 名古屋大)  | 9  |
| 2.1.1 破壊力学とは -----                          | 9  |
| 2.1.2 応力拡大係数, $K$ -----                     | 10 |
| 2.1.3 脆性破壊への適用と破壊靱性試験 -----                 | 12 |
| 2.2 非線形破壊力学と脆性破壊の取り扱い方 ----- 東大 (筑波大, 名古屋大) | 13 |
| 2.2.1 CODとCOD試験 -----                       | 13 |
| 2.2.2 CODの算定 -----                          | 15 |
| 2.2.3 J積分 -----                             | 16 |
| 2.2.4 破壊パラメータの選択 -----                      | 17 |
| 2.3 脆性破壊伝播停止の取り扱い方 ----- 東大 (筑波大, 名古屋大)     | 18 |
| 2.3.1 脆性破壊伝播のエネルギー論的条件 -----                | 18 |
| 2.3.2 静的取り扱い -----                          | 20 |
| 2.3.3 動的取り扱い -----                          | 22 |
| 2.4 疲労亀裂伝播の取り扱い方 ----- 東大 (筑波大, 名古屋大)       | 24 |
| 2.4.1 疲労亀裂伝播速度則 -----                       | 24 |
| 2.4.2 亀裂の進展経路の選択則 -----                     | 28 |
| 2.4.3 表面亀裂の形状変化 -----                       | 29 |
| 2.5 欠陥評価法 ----- 東大 (筑波大, 名古屋大)              | 30 |
| 2.5.1 溶接欠陥の安全性評価の考え方 -----                  | 30 |
| 2.5.2 脆性破壊発生に対する溶接欠陥の許容判定基準 -----           | 31 |
| 2.6 破壊力学解析の標準的手順 ----- 三菱                   | 33 |
| 参考文献 -----                                  | 36 |
| 3. 計算手法の便覧 -----                            | 43 |
| 3.1 破壊力学解析の詳細 ----- 佐重                      | 43 |
| 3.2 計算対象範囲の設定 ----- 三菱                      | 43 |

|                               |    |     |
|-------------------------------|----|-----|
| 3.3 破壊形態と外荷重(作用応力)            | 石橋 | 44  |
| 3.4 構造要素などにおける内力の簡易評価法        | 住重 | 46  |
| 3.5 基本要素のK値                   | 三菱 | 47  |
| 3.6 亀裂の進展径路の選択則               | 日立 | 50  |
| 参考文献                          |    | 59  |
| 4. 基本要素のK値解析の例                |    | 95  |
| 4.1 基本要素①のK値解析                | 石橋 | 95  |
| 4.1.1 計算モデル                   |    | 95  |
| 4.1.2 計算方法                    |    | 95  |
| 4.1.3 計算結果                    |    | 97  |
| 4.2 基本要素②のK値解析                | 川重 | 97  |
| 4.2.1 基本要素                    |    | 97  |
| 4.2.2 計算モデル                   |    | 97  |
| 4.2.3 計算case                  |    | 98  |
| 4.2.4 計算結果                    |    | 98  |
| 4.3 基本要素③のK値解析 — 構造的不連続部のK値 — | 住重 | 100 |
| 4.3.1 目的                      |    | 100 |
| 4.3.2 荷重と構造                   |    | 100 |
| 4.3.3 計算方法及び計算結果              |    | 103 |
| 4.3.4 K値の表示式                  |    | 104 |
| 4.3.5 むすび                     |    | 105 |
| 4.4 基本要素④のK値解析                |    | 105 |
| 4.4.1 計算モデル                   | 金田 | 105 |
| 4.4.2 応力分布についての解析             |    | 107 |
| 4.4.3 等価K値の算定                 |    | 108 |
| 4.5 スチフナエンド部の表面亀裂のK値解析        | 石橋 | 109 |
| Appendix: $M_k$ の求め方          |    | 111 |
| 参考文献                          |    | 115 |

|                                               |           |
|-----------------------------------------------|-----------|
| 5. 材料定数の便覧(材料特性値, 物性値の便覧)                     | 139       |
| 5.1 疲労亀裂の伝播特性に関するもの                           | 鋼鉄 139    |
| 5.1.1 疲労亀裂伝播速度則                               | 139       |
| 5.1.2 疲労亀裂伝播特性をあらわす定数 $C, m$                  | 141       |
| 5.1.3 疲労亀裂伝播下限界条件                             | 143       |
| 5.1.4 腐食環境下の疲労亀裂伝播                            | 144       |
| 5.1.5 複数亀裂の成長と合体結合                            | 145       |
| 5.1.6 ランダム荷重下の疲労亀裂伝播                          | 146       |
| 5.2 脆性亀裂の発生特性に関するもの                           | 147       |
| 5.2.1 破壊靱性値( $K_{IC}$ 値及び $\delta_c$ 値)の温度依存性 | NK 147    |
| 5.2.2 破壊靱性に影響をおよぼす因子                          | 石橋・神鋼 155 |
| 5.2.3 シャルピー試験結果からの破壊靱性値の推定法                   | 阪本 170    |
| 5.3 脆性亀裂の伝播停止特性に関するもの                         | 178       |
| 5.3.1 伝播停止特性値(破壊靱性 $K_{IC}$ 値)の温度依存性          | NK 178    |
| 5.3.2 伝播停止特性(破壊靱性)に影響を及ぼす因子                   | 鋼鉄 180    |
| 5.3.3 シャルピー試験結果からの伝播停止特性値(破壊靱性値)の推定法          | 新田 190    |
| 5.3.4 クラックアレスター能力の評価例                         | 三菱 192    |
| 参考文献                                          | 195       |
| 6. 各種モデル化に基づく破壊力学解析の手順                        | 日立 278    |
| 6.1 まえがき                                      | 278       |
| 6.2 破壊力学解析を行なうにあたっての初期応力値の設定                  | 279       |
| 6.3 初期欠陥寸法の設定                                 | 280       |
| 6.4 疲労亀裂伝播則における $C, m$ 値の設定                   | 281       |
| 6.5 等価応力係数について                                | 283       |
| 6.6 $K_{IC}$ 値の推定                             | 288       |
| 6.7 疲労亀裂伝播経路の設定                               | 292       |
| 6.8 船殻構造部材の $K$ 値推定式                          | 298       |
| 6.9 亀裂伝播寿命の推定                                 | 307       |
| 参考文献                                          | 309       |
| Appendix: 構造部材の $K$ 値推定について                   | 317       |

|                                  |     |     |
|----------------------------------|-----|-----|
| 7. 破壊力学の応用例                      | 石 播 | 326 |
| 7.1 60型タンカーの横強度部材・局部強度部材の疲労強度の検討 |     | 326 |
| 7.1.1 緒言                         |     | 326 |
| 7.1.2 解析方法                       |     | 326 |
| 7.1.3 応力解析                       |     | 327 |
| 7.1.4 破壊強度解析                     |     | 330 |
| 7.1.5 結言                         |     | 332 |
| 7.2 タンカーの Bottom trans. 損傷の検討    | 田 立 | 354 |
| 7.2.1 実船解析の目的                    |     | 354 |
| 7.2.2 供試船の損傷履歴                   |     | 354 |
| 7.2.3 損傷部材の応力解析                  |     | 355 |
| 7.2.4 亀裂伝播解析結果と実船の損傷との比較         |     | 358 |
| 参考文献                             |     | 362 |
| 7.3 外板および隔壁板の疲労破壊強度の検討           | 石 播 | 377 |
| 7.3.1 目的                         |     | 377 |
| 7.3.2 検討方法                       |     | 377 |
| 7.3.3 疲労破壊強度の計算                  |     | 378 |
| 7.3.4 適用例                        |     | 379 |
| 参考文献                             |     | 379 |
| 7.4 船艀タンク外板の振動による亀裂損傷の検討         |     | 384 |
| 7.4.1 目的                         |     | 384 |
| 7.4.2 亀裂伝播寿命                     |     | 384 |
| 7.4.3 すみ肉付近の応力                   |     | 384 |
| 7.4.4 損傷解析                       |     | 384 |
| 7.4.5 むすび                        |     | 384 |
| 7.5 バルクキャリアの内底板ナックル部損傷の検討        | 川 重 | 389 |
| 7.5.1 目的                         |     | 389 |
| 7.5.2 損傷の概要                      |     | 389 |

|       |                                         |       |     |
|-------|-----------------------------------------|-------|-----|
| 7.5.3 | 応力解析                                    | ----- | 389 |
| 7.5.4 | 疲労強度解析                                  | ----- | 391 |
| 7.5.5 | 表面亀裂伝播解析                                | ----- | 392 |
| 7.5.6 | 考察                                      | ----- | 395 |
| 7.5.7 | 結言                                      | ----- | 396 |
|       | 参考文献                                    | ----- | 396 |
| 7.6   | CAR CARRIERのDECK BEAM END BRACKET 損傷の検討 | 三井    | 410 |
| 7.6.1 | 目的                                      | ----- | 410 |
| 7.6.2 | 損傷の概要                                   | ----- | 410 |
| 7.6.3 | 応力解析                                    | ----- | 410 |
| 7.6.4 | 亀裂伝播解析                                  | ----- | 410 |
| 7.6.5 | 考察                                      | ----- | 411 |
| 7.6.6 | 結言                                      | ----- | 412 |
| 7.7   | 木材運搬船の船側構造損傷の検討                         | 三井    | 416 |
| 7.7.1 | まえがき                                    | ----- | 416 |
| 7.7.2 | 解析手順                                    | ----- | 416 |
| 7.7.3 | 解析結果とその考察                               | ----- | 417 |
| 7.7.4 | まとめ                                     | ----- | 418 |
|       | 参考文献                                    | ----- | 418 |
| 7.8   | 破壊力学の適用による許容欠陥寸法の算定                     | 三井    | 424 |
| 7.8.1 | まえがき                                    | ----- | 424 |
| 7.8.2 | 解析手順                                    | ----- | 424 |
| 7.8.3 | 表面亀裂の貫通寿命を支配するパラメータ                     | ----- | 425 |
| 7.8.4 | 標準条件における解析結果                            | ----- | 427 |
| 7.8.5 | 標準条件以外の場合における許容欠陥寸法,許容応力,貫通寿命の推定方法      | ----- | 428 |
| 7.8.6 | あとがき                                    | ----- | 430 |
|       | 参考文献                                    | ----- | 431 |

|                                   |       |     |
|-----------------------------------|-------|-----|
| 7.9 疲労寿命推定マニュアルの検討                | 三菱 長船 | 446 |
| 7.9.1 はじめに                        |       | 446 |
| 7.9.2 疲労寿命推定マニュアル                 |       | 446 |
| 7.9.3 マニュアルの解説および理論的根拠            |       | 449 |
| 7.9.4 マニュアルの近似K値の精度について           |       | 456 |
| 7.9.5 マニュアルの適用例                   |       | 459 |
| 7.9.6 まとめ                         |       | 462 |
| 参考文献                              |       | 464 |
| 7.10 海洋構造物HT60溶接継手の脆性破壊に対する安全性の評価 | 金田    | 477 |
| 7.10.1 目的                         |       | 477 |
| 7.10.2 HT60溶接継手の破壊靱性値             |       | 477 |
| 7.10.3 許容欠陥寸法パラメータ $\bar{a}$      |       | 477 |
| 7.10.4 溶接継手における許容欠陥寸法             |       | 478 |
| 7.10.5 結論                         |       | 479 |
| 7.11 靱性を考慮した船殻材選定の考え方             | 三菱    | 485 |
| 7.11.1 目的                         |       | 485 |
| 7.11.2 材料選定の基本的な考え方               |       | 486 |
| 7.11.3 K概念を適用した材質選定の考え方           |       | 486 |
| 7.11.4 COD概念を適用した材質選定の考え方         |       | 492 |
| 7.11.5 まとめ                        |       | 497 |
| 参考文献                              |       | 498 |
| 8. 破壊力学解析の詳細解析実例集                 | 三菱 他  | 514 |
| 8.1I ダブルハル構造部の試計算(その1)            |       | 514 |
| 8.1I.1 目的                         |       | 514 |
| 8.1I.2 試計算対象構造物と外荷重条件             |       | 514 |
| 8.1I.3 亀裂進展挙動の解析                  |       | 514 |
| 8.1I.4 疲労亀裂伝播速度と残余寿命              |       | 515 |
| 8.1I.5 縁亀裂をもつ半無限板による解との比較         |       | 515 |
| 8.1I.6 試計算結果の検討および考察              |       | 516 |

|                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 8.1Ⅰ.7 まとめ                                                                        | 516 |
| 参考文献                                                                              | 517 |
| 8.1Ⅱ ダブルハル構造部の試計算(その2)<br>— 直交交差部材に近接する亀裂の伝播挙動の解析 —                               | 529 |
| 8.1Ⅱ.1 目的                                                                         | 529 |
| 8.1Ⅱ.2 試計算対象構造物と外荷重条件                                                             | 529 |
| 8.1Ⅱ.3 直交交差部材近傍での亀裂伝播挙動の解析                                                        | 529 |
| 8.1Ⅱ.4 直交交差部材近傍での亀裂伝播径路の推定                                                        | 529 |
| 8.1Ⅱ.5 試計算結果の検討および考察                                                              | 530 |
| 8.1Ⅱ.6 まとめ                                                                        | 530 |
| 参考文献                                                                              | 530 |
| 8.2 サイドフレーム下端と内底板交差部のソフトウ周辺                                                       | 542 |
| 8.2.1 目的                                                                          | 542 |
| 8.2.2 構造モデルと外力系                                                                   | 542 |
| 8.2.3 試計算結果                                                                       | 542 |
| 8.2.4 まとめ                                                                         | 545 |
| 参考文献                                                                              | 546 |
| 8.3Ⅰ 外板とロンジ材との接合部にあるスカラップ <sup>o</sup> 周辺(その1)<br>— スカラップ <sup>o</sup> から伝播する亀裂 — | 561 |
| 8.3Ⅰ.1 目的                                                                         | 561 |
| 8.3Ⅰ.2 計算対象構造と作用荷重                                                                | 561 |
| 8.3Ⅰ.3 計算                                                                         | 561 |
| 8.3Ⅰ.4 検討および考察                                                                    | 563 |
| 8.3Ⅰ.5 まとめ                                                                        | 563 |
| 参考文献                                                                              | 563 |
| 8.3Ⅱ 外板とロンジ材との接合部にあるスカラップ <sup>o</sup> 周辺(その2)<br>— 縦通部材のモデル化とK値 —                | 571 |
| 8.3Ⅱ.1 目的                                                                         | 571 |

|                                              |     |
|----------------------------------------------|-----|
| 8.3Ⅱ.2 計算例                                   | 571 |
| 8.3Ⅱ.3 計算結果および考察                             | 571 |
| 8.3Ⅱ.4 まとめ                                   | 572 |
| 参考文献                                         | 572 |
| 8.4Ⅰ 外板とロンジ材との接合部周辺(その1)<br>— 交差部隅肉溶接近傍の亀裂 — | 576 |
| 8.4Ⅰ.1 目的                                    | 576 |
| 8.4Ⅰ.2 亀裂が骨から皮に進入する際の挙動の検討                   | 577 |
| 8.4Ⅰ.3 デッキプレート中の長い亀裂に対する防撓板の効果               | 581 |
| 8.4Ⅰ.4 まとめ                                   | 582 |
| 参考文献                                         | 583 |
| Appendix: 図8.4Ⅰ.4の算出過程                       | 584 |
| 8.4Ⅱ 外板とロンジ材との接合部周辺(その2)<br>— 面外一様圧を受ける場合 —  | 600 |
| 8.4Ⅱ.1 目的                                    | 600 |
| 8.4Ⅱ.2 試算の内容と考察                              | 600 |
| 8.4Ⅱ.3 簡易的な方法の検討                             | 602 |
| 8.4Ⅱ.4 まとめ                                   | 604 |
| AppendixⅠ: 亀裂を含むロンジの分担荷重推定                   | 605 |
| AppendixⅡ: 亀裂を含む梁の撓み計算(ロンジ相持ち効果を考慮)          | 607 |
| AppendixⅢ: T断面梁の亀裂を含む断面での等価バネ係数とK値算定         | 609 |
| 参考文献                                         | 612 |
| 8.5 クロスタイとサイドロンジ接合部周辺                        | 627 |
| 8.5.1 目的                                     | 627 |
| 8.5.2 計算対象構造と荷重条件                            | 627 |
| 8.5.3 亀裂進展挙動の解析                              | 627 |
| 8.5.4 疲労亀裂伝播寿命                               | 629 |
| 8.5.5 まとめ                                    | 630 |
| 参考文献                                         | 630 |

## 1. 破壊管理制御と本指針について

### 1.1 破壊管理制御と本指針について

#### 〔本指針作成の背景〕

最近における鋼構造物の構造設計の一つの特徴として設計手法の一貫した理論化が挙げられる。外力の統計的な把握やその外力に対する応力の精密計算はいうまでもなく、今日においては許容応力の設定法も見直されて、各種の strength criteria に対応した安全性が論議されようとしている。

鋼構造物の損傷例に着目すると、亀裂の発生例は損傷事故件数の半数以上を占め、その発生防止は設計時に考慮されなければならない重要課題と考えられる。しかし亀裂の中には大損傷に結びつくと思われ、亀裂が発生して年月を経ているにもかかわらずそれ程進行していないものなど種々のものが存在し、これら亀裂自体に対する評価も見逃せない重要な検討項目と考えられる。

このような破壊現象に対し、従来の構造設計手法では古典的概念に基づき損傷解析による許容応力の逆算といった形で破壊防止の思想が間接的、定性的に考慮されているに過ぎなかった。

#### 〔亀裂破壊評価の重要性について〕

ところで船体構造や橋梁構造などは立体的な防撓物構造よりなり、亀裂発生源となる応力集中箇所は非常に多い。その応力集中源も構造的な不連続によるものあるいは溶接に起因する欠陥など複雑に存在する。さらにはその溶接長も膨大であり、全長にわたり非破壊検査で check されるものではない。

このような巨大な構造物に対して亀裂の発生を完全に防止することは技術的あるいは経済的観点より非現実的であり、亀裂そのものの評価を行ない、その亀裂が大損傷あるいは機能喪失につながる場合は、その発生源に対して重点的に対策を施すのが現実的な対応であると思われる。したがって亀裂そのものの評価は安全性確保の上で是非とも必要であると考えられる。

## 〔破壊管理制御設計の概念〕

この亀裂そのものの評価は、近年急速に発展しつつある破壊力学(fracture mechanics)の理論を駆使して達成できるものと期待される。破壊力学は本来内在する諸欠陥から発生した亀裂が伝播して行く過程を追跡し、ある大きさに成長した亀裂が<sup>Catastrophic</sup>カタストロフィックな破壊としての脆性破壊に結びつくか否かまで究明して行く、<sup>突然の大変動、急変</sup>いわば疲労亀裂伝播と脆性破壊発生、伝播、停止という分野を包含した破壊現象をより直接的、定量的に取扱おうとするものである。そして構造物に対する欠陥評価から、材質、工作、検査補修などの諸基準と応力規制といった設計へのフィードバックを行なうのが破壊力学の本筋である。

## 〔破壊管理制御設計への指向〕

このような思想に立脚した破壊力学の概念は、外力および構造のシンプルスのため、すでに圧力容器の設計などに適用され、規格化されて安全性評価のcriteriaとして活用されている。造船においてもこの手法を船体構造に適用して行く道が開かれていることは世界的な通念となりつつあり、IMCOが1975年、人命の安全と自然環境保護を最終目標にLNG船、LPG船などに対して制定した

“The Code for The Construction and Equipment of Ships Carrying  
Liquefied Gases in Bulk”

においても、疲労亀裂発生のみならず破壊力学解析による安全性確認の要求が盛り込まれている。このような思想は今後各種構造物に適用拡大していくものと思われる。

## 〔破壊管理制御設計とは？〕

このような思想は、材料および構造にはその製造過程で不可避免的に欠陥が導入されるものとの考えから出発しており、成長しつつある亀裂の存在が検出・探知される以前に機能喪失の許容限界の大きさに成長しないように設計し管理することを要求するものである。すなわち、限度以下の亀裂発生や成長を許容するが、常に

構造物の残余強度を把握しながら、構造物の安全性を確保し機能を全うさせる考え方、つまり破壊管理制御の考え方への指向である。

#### 〔本指針作成にあたっての問題点の抽出〕

しかし、船体構造や橋梁構造などは立体的な防撓物構造よりなる非常に複雑な不静定構造物であり、しかも作用する外力系はランダムな統計量であるため誘起される応力も統計的取扱いを必要とする。このような複雑な力学的環境条件下の複雑な構造に対し、破壊力学による design criteria を厳密に確立することは容易でない。そこで指針作成を目標にして、船殻構造に的を絞り、種々の構造要素をとりだして case study を行ない、過去の損傷実績との対比をもとに問題点の抽出を行なった。その結果、最大の問題点の一つは直交交差部材近傍における疲労亀裂の伝播経路と、その亀裂の  $K$  値を求めることであった。

#### 〔本指針作成の過程〕

したがって 船殻構造に特有の直交交差部材近傍の亀裂伝播挙動を調査すると同時に、船殻構造要素を種々のパターンに分類し、その  $K$  値を求めることに主眼をおいた研究を実施した。さらにこれらの結果を使用して再度損傷解析を行ない、合理的な計算手法を導く努力が繰返し行なわれた。また case study において抽出された問題点には高応力作用箇所に欠陥が存在する場合の脆性破壊発生強度、脆性亀裂の伝播停止強度を船殻構造にどのように適用させるかということも含まれ、これらの研究も精力的に実施された。また船殻設計者が使用することを考慮して、船殻材料の破壊に関する特性値の調査、整備も行なった。

上記の研究結果に基づき、本指針作成にあたり設計すなわち工学レベルの道具に供するには複雑すぎる事柄については、部材と力学的条件の有り得る範囲を算入することにより適切な簡略化を計ると同時に、簡略法を提示し、破壊力学手法による実構造物中の亀裂問題の処理方法を検討し、損傷実績との対比を行ない、改良を繰返した。

### 〔本指針の内容について〕

本指針は上記研究結果を集大成し、かつ船殻設計者の便に供することを念頭に入れ、船殻設計者と破壊力学研究者が協力して、破壊力学に馴染みのない設計者にとっても利用できるよう配慮したものである。したがって 2 章では破壊力学の一般的事柄の説明を行ない、3 章では船殻構造に破壊力学を適用するための手法に重点をおいた。そして 4 章では船殻構造における  $K$  値の計算例を示し、3 章で求められないような複雑な構造の  $K$  値を求める場合の参考に供するようにした。さらに 5 章においては疲労亀裂伝播および脆性破壊に対する物性値の実績ならびに、その物性値に影響を与える因子を船殻材料に主眼をおいて整備した。一方、6 章においては設計で通常行なわれる程度の応力解析結果から、亀裂の寿命を予測する簡易手法を示した。そして 7 章では 6 章の結果を使用あるいは発展させて損傷解析あるいは具体的な亀裂破壊強度の検討例を示した。さらに 8 章では簡易計算によらずに case study を実施した例を示し、設計への参考になるよう配慮した。

### 〔むすび〕

立体的な防撓物構造のような非常に複雑な不静定構造物の亀裂破壊に対する設計指針は、本指針が世界で初めてのものであり、完成された指針でないことはいうまでもない。当然理論的に不備な箇所が随処に指摘されるであろう。この箇所についてはある種の工学的判断を持ち込まざるを得なかった。しかし、あえて亀裂の発生からカタストロフィクな破壊にいたるまでの強度計算手法を本指針で提案したのは、例証を今後さらに蓄積し豊富にすることにより、本指針の見直しが出来、より理論的に整備された指針に発展させるための試金石となることを期待するからである。今後さらにこれらを発展させ、材質、工作、検査補修などの諸基準や応力規制のより合理的な設定などに反映できるようになることを期待したい。

## 1.2 破壊管理制御設計の流れ図

破壊管理制御設計を行なうにあたっては、船体に作用する波浪外力の解析から、構造部材の破壊力学解析に至る広汎な解析が必要である。つまり

- (1) 波浪そのものの特性に関する統計的評価
- (2) 波浪外力および部材応力の波に対する応答計算
- (3) 構造全体あるいは部材の遭遇応力(最大期待値, 頻度分布など)に関する統計的評価
- (4) 部材レベルでの疲労亀裂発生および伝播, 脆性亀裂の発生, 伝播および停止に関する疲労発生強度解析と破壊力学的検討
- (5) 上記(4)の結果に基づく, 設計, 現場工作および検査, 補修の各種評価基準, 規格値に対する継続的見直し検討

など一連の評価, 検討を一貫した総合的手順で行なう必要がある。

図1.1は破壊管理制御設計の将来の設計内容の流れに関するビジョンのなものであり, 各項目それぞれにおいて複雑多岐にわたる因子が未解決のまま残されており, 不明確な問題点が多いことも事実である。

しかし 図中左側の外力評価 → 応力解析〔上記(1)→(3)にいたる過程〕にいたる解析は, 大型計算機の出現と, 波浪の計測資料の整備等によりある程度信頼できる結果が得られるようになってきた。

この(1)→(3)にいたる過程の計算によって変動応力, 静的応力を得る方法は設計者にとっては馴染みの深い事柄なのでここでは簡単にその方法について述べるにとどめる。すなわち,

破壊力学解析においては構造部材に作用する応力分布を与える必要があり, 応力分布としては変動応力成分と静応力成分を求めておく必要がある。前者の変動応力成分を求める手法としては, 従来から行なわれている二乗和平方根法と, 最近行なわれるようになってきた total system analysis 法とがある。すなわち二乗和平方根法は応力を誘起する要因(例えば, 縦曲げモーメント, 水圧,

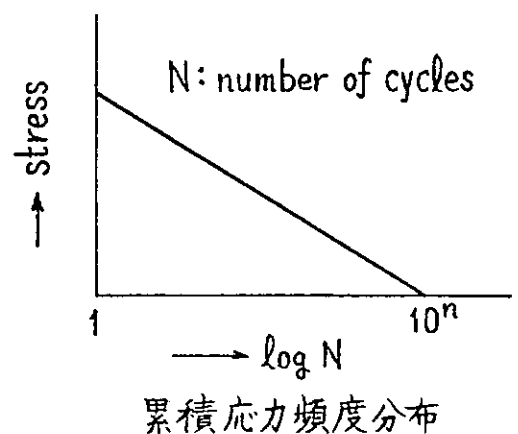
各方向成分加速度等)間の相関がないとして、いいかえれば互いに統計的に独立として、二乗和平方根法に基づき最大期待値を求めるものである。一方 total system analysis 法は応力を誘起する要因間の相関を考慮し、波浪外力から応力解析にいたるまでを一貫したものとして取扱い、応力の応答関数を求め、これに統計的処理を施して最大期待値を求めるものである。この total system analysis 法は膨大な計算を必要とし、最近の大型計算機の出現により解析可能となったものである。

したがって 後者の total system analysis 法によれば、部材に作用する変動応力成分をかなり精度良く求めることができるが、計算に膨大な時間を要する。一方二乗和平方根法は total system analysis 法に比して精度はおちるが、かなり合理的な値を得ていることも事実である。上記いずれの手法を採用するかは、対象となる船に要求される安全性の程度等により決定しなければならないが、total system analysis 法を採用する場合の安全率の算入は、二乗和平方根法による場合の安全率より当然低く設定してしかるべきと考えられる。

上記いずれの方法を採用するにしても、種々の超過確率レベルの応力期待値が計算できるので、これらの結果より変動応力成分の累積頻度分布が得られる。しかし、これまでの多くの計算結果から 1 超過確率レベルの応力期待値が得られていれば、応力累積頻度分布は片対数直線(右図参照)で表わしても実用的には良いようである。

上記応力解析結果をもとに、応力が高く  
なる箇所に初期欠陥を設定し、その亀裂の  
伝播経路ならびに亀裂伝播寿命を逐一計算

し、脆性破壊発生を引き起こす可能性があるか否かを逐一計算することになる。また、一度脆性破壊が生ずると判定されたならば、その亀裂がどの長さで停止するのかを計算することになる。この計算は亀裂の成長過程にあわせて、厳密には逐一



応力解析から計算していかねばならない。(ただし応力解析から計算することは膨大な計算を必要とするので、これをいかに省略するかが工学上必要となる。この手法については本指針で後に記述する。)当然のことながら疲労亀裂伝播寿命は変動応力がその寿命決定の主要因であるし、脆性破壊は瞬間的現象であるので安全性評価という観点からは最大期待値レベルの応力が作用することを考慮にいれて計算されなければならない。

これら一連の計算により亀裂寿命が求まることになる。ある部材については亀裂が板厚を貫通するまでの寿命が充分長いことが必要であろうし、またある部材については万一脆性破壊が発生しても、その亀裂がカタストロフィクな破壊につながらないよう考慮する必要がある。すなわちどの範囲までの破壊を考慮するかは設計思想の問題であり、当然部材毎にその評価法が異なってしかるべきである。これらの計算結果と損傷実績との対比を行なうことは必要不可欠のことであるが、この対比結果を考慮に入れた上で、これらの計算結果から許容応力の見直しや、材料選定基準など、より合理的に検討できるようになると考えられる。

現状の船殻設計の各種カテゴリーが、破壊力学による亀裂の追跡による各種成果によってより合理的に将来検討されるであろう流れを図1.2に示す。

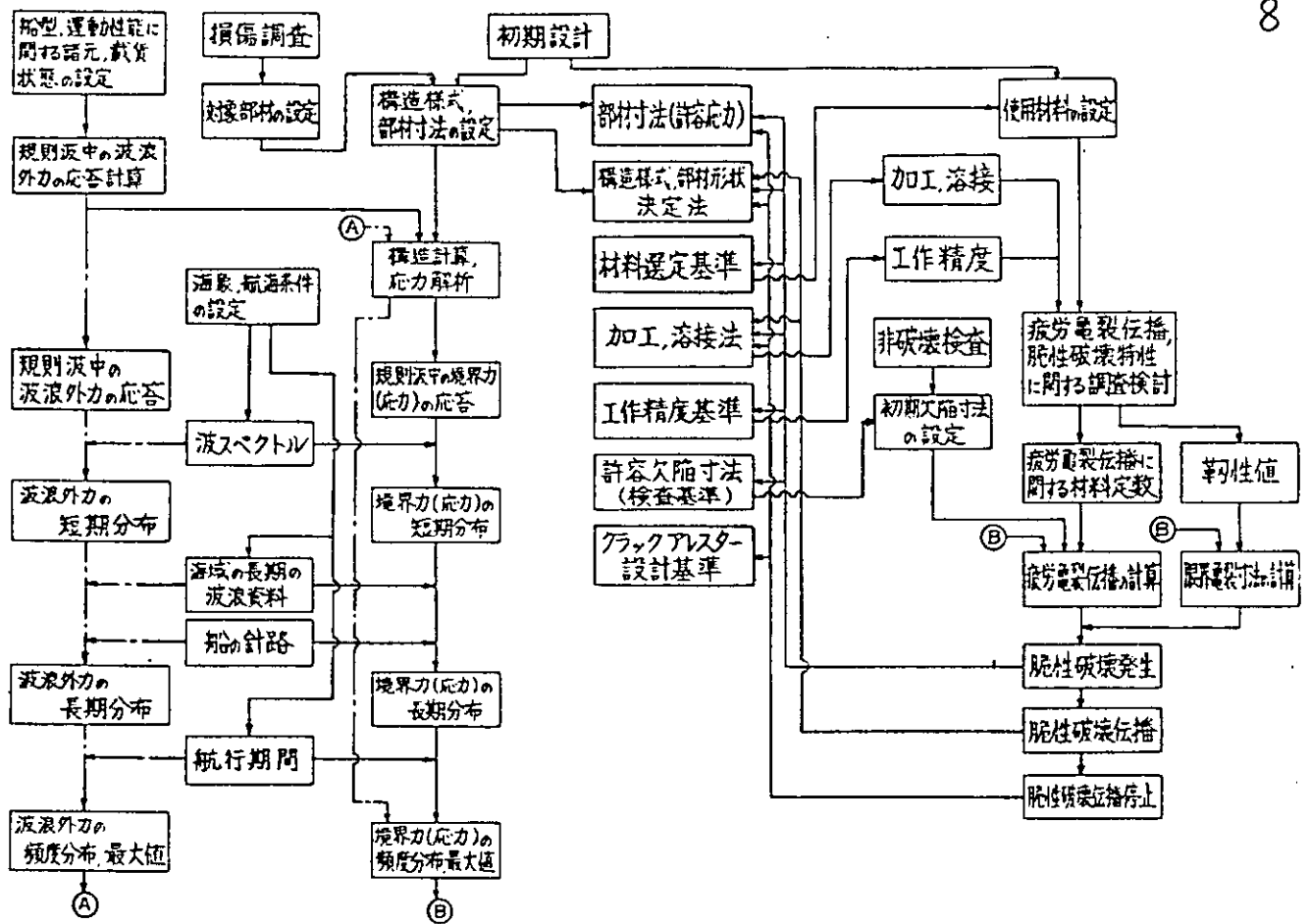


図1.1 船体破壊管理制御設計のフローチャート

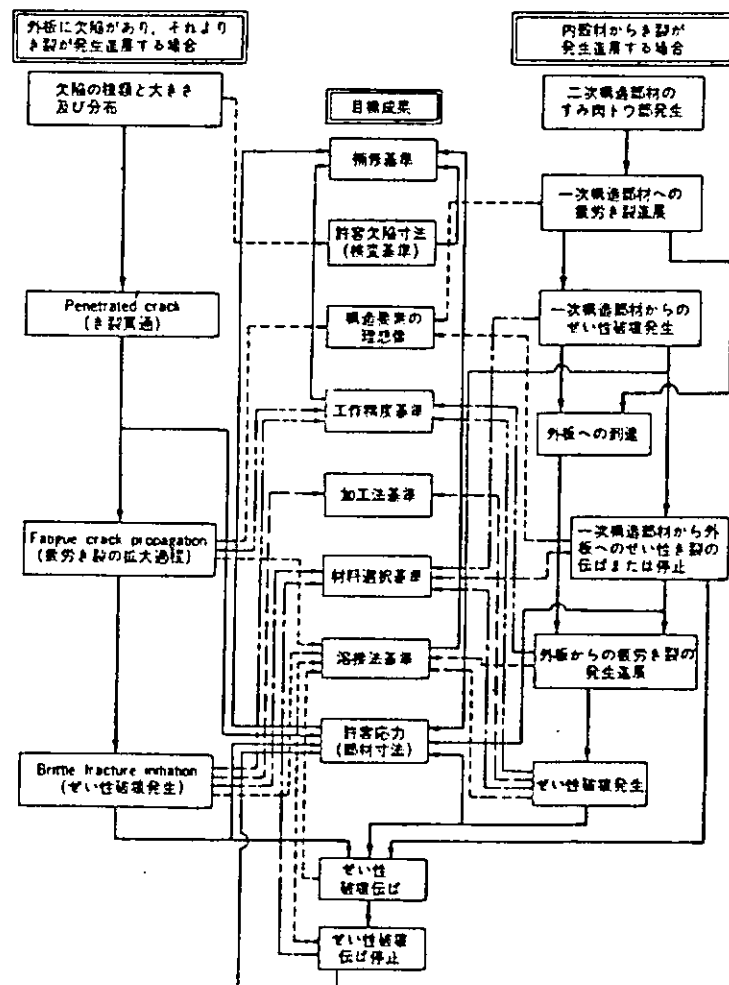


図1.2 船殻破壊強度検討フローチャート

## 2. 破壊力学解析の解説

### 2.1 線形破壊力学と脆性破壊の取り扱い方

#### 2.1.1 破壊力学とは

破壊力学と総称される学問分野の内容は多岐にわたるものであるが、ひとことでいえば欠陥もしくは亀裂の存在を前提として、連続体力学的解析を基礎に破壊という物理現象を単一の力学パラメータによって定量的に記述する工学的方法論といってよい。具体的には図2.1.1に示すような3つの情報量を定量的に結びつけ、材料や構造物を強度上安全に使用するための手段を提供するものである。

古典的な強度設計においては破壊に対する安全性は材料の降伏点や引張り強さのような単純な材料強度特性を基準として、これと応力解析を結びつけるといった形で考慮されているが、大形構造物においては各種溶接欠陥、亀裂などの存在は避けられないものであり、そのような応力集中源がある場合には公称応力による強度評価は全く意味を失う。鋭い亀裂が存在すると応力、ひずみは亀裂端に集中し、降伏点よりはるかに低い公称応力でも亀裂が拡大する。さらに重要なことは、亀裂の存在により無欠陥材では起こり得ないような破壊形態、たとえば脆性破壊が起こり得るようになるという事実である。その場合、公称応力でなく亀裂端の局所的な応力あるいはひずみが破壊を支配する力学パラメータとしてとるという考え方もあり得るが、亀裂端の応力、ひずみを評価するには個々の場合について極めて煩雑な弾塑性解析を必要とし、精度も期待できない。破壊力学はこの亀裂端の応力、ひずみの状態を一義的に表わし、しかも算定が比較的容易な力学パラメータを用いて破壊現象を表現し定量化しようとするものである。破壊力学の特徴は、破壊を支配する亀裂端近傍の応力、ひずみを単一の力学パラメータで代表させるという“亀裂の力学”にあり、従来の亀裂や欠陥を有しない場合の応力解析と相まって一つの力学体系を構成するものである。

### 2.1.2 応力拡大係数, $K$

亀裂を有する物体に力が作用すると、亀裂の先端には著しい応力とひずみの集中が起こる。亀裂の変形様式には図2.1.2に示すような3つの基本型がある。実際の構造物で最も重要なのは開口型(モードI)である。

亀裂先端が無限に鋭いものとし、材料が塑性変形を起こさない(弾性亀裂)とすると、亀裂端近傍の応力は、図2.1.3に示す座標系に対し一般に次のような形に表わすことができる(モードIの場合)<sup>1)</sup>。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_y &= \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \tau_{xy} &= \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \\ \sigma_z &= \nu (\sigma_x + \sigma_y) \quad : \text{平面ひずみ} \\ &= 0 \quad : \text{平面応力} \\ \tau_{xz} &= \tau_{yz} = 0 \end{aligned} \right\} \text{----- (2.1.1)}$$

他のモードの場合も同様に

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \text{----- (2.1.2)}$$

で表わされ、亀裂端近傍での応力は  $\frac{1}{\sqrt{r}}$  の特異性を有している。 $K$ (応力 $\times\sqrt{\text{長さ}}$ の次元をもつ)は、亀裂先端の特異性の強さ、すなわち応力、ひずみの集中の度合(応力集中係数ではないことに注意)を表わす応力場パラメータとしての意味を持ち、外力(公称応力)、亀裂長さ、弾性体の形状の関数である。 $K$ が定めれば亀裂端の応力は  $r, \theta$  のみの関数であり  $K$  に対して一義的に定まることになる。したがってこの  $K$  を破壊を支配する力学パラメータとしてとるという考えが成り立つ。しかし、以上は亀裂の弾性学的モデルの上での話であって、実際の構造材料では亀裂端に塑性変形を生じて応力 $\times$ ひずみは有限の値となり、(2.1.1)式でもはや表わすことはできない。ところが塑性変形領域が亀裂の寸法に比して極めて小さい

場合(小規模降伏), 周囲の弾性応力場についてはやはり(2.1.1), (2.1.2)式が成立する<sup>2)</sup>。塑性域内の応力, ひずみは周囲の弾性応力場によって特徴づけられているはずであり, したがって弾性応力場を規定している $K$ は間接的にせよ亀裂先端の応力場を一義的に規定するパラメータとなっている。すなわち小規模降伏という制約条件下ではあるが, 形状・寸法や外力が異なっても $K$ の値が同じならば亀裂先端部の応力, ひずみは同じであるということができる。

$K$ 値のもつもう一つの重要な物理的意義は, 亀裂進展のエネルギー論との関連である。破壊を亀裂進展に伴って解放されるひずみエネルギーと亀裂進展に要するエネルギーとの平衡関係で不安定破壊現象を説明したのが Griffith の理論<sup>3)</sup>であるが,  $K$ は亀裂進展に伴う弾性エネルギー解放率(亀裂の単位長さの拡大によって解放されるエネルギー) $G$ と一定の関係にあり,

$$G = \frac{(1-\nu^2)K^2}{E} \text{ ----- (2.1.3)}$$

という簡単な関係にある。

このような意味から, 亀裂の弾性解析から得られる $K$ の値は亀裂の拡大(破壊)に直接関係する力学パラメータとみなすことができ, stress intensity factor (応力拡大係数)と呼ばれる。破壊を支配する力学量として $K$ 値を採用する考え方は一般に線形破壊力学(linear fracture mechanics)と呼ばれ, その適用対象は低応力下(小規模降伏下)での破壊現象に限定されるが, データも豊富で大きな実用的成果をあげている。線形破壊力学は米国で体系化され, 主として航空・宇宙関係の材料の脆性破壊発生, 疲労亀裂の進展, 応力腐食割れなどに適用され発展してきた。

線形破壊力学に基づいて実際の構造物の破壊挙動を推定する場合, 構造物中の亀裂について破壊パラメータである $K$ 値を知る必要がある。 $K$ の値は亀裂の弾性解から求められるが, 一般に解析的に求めることは困難な場合が多く, 電子計算機を用いた数値解法によらなければならない場合が多い。構造物の破壊管理制御において最も労力を費やせざるを得ない部分であるが, 最近では種々のケースに

について解析がなされ<sup>4),5),6)</sup> 利用し易い形の近似式で一般化されているものも少なくない (3. 計算手法の便覧, 3.5 基本要素のK値 参照)。ここでは最も単純な場合のK値の例をあげるにとどめる (図 2.1.4 参照)。

### 2.1.3 脆性破壊への適用と破壊靱性試験

脆性破壊の破壊条件は, Kに対応する材料の破壊特性値(破壊靱性)を $K_c$ として

$$K \geq K_c \text{ ----- (2.1.4)}$$

という形で表わされる。破壊パラメータ K が限界値  $K_c$  に達したとき破壊が起こるとするもので, この K と  $K_c$  の関係は塑性降伏現象を応力  $\sigma$  (力学パラメータ) と降伏点  $\sigma_y$  (材料特性値) を用いて  $\sigma \geq \sigma_y$  と記述するのと良く似ている。破壊靱性  $K_c$  は材料組織に敏感で, 鋼種が同じであっても熱処理, 成分が違えば大きく異なることも珍しくなく, 個々の材料について, K の値が既知の単純な形状の試験片を用いて実際に脆性破壊試験を行ない, 破壊時の K を  $K_c$  とすることにより求められている。また破壊靱性(後述する  $\delta_c, J_c$  も含めて)は厳密な意味で真の材料定数ではなく, 一般に温度, ひずみ速度, 亀裂先端の鋭さ, 応力 3 軸度(試験片板厚など), 応力・ひずみ履歴, 雰囲気などに依存する。

破壊靱性の板厚効果は亀裂端の応力 3 軸度の変化に起因するか, ある程度以上の板厚で下限値をとる。この下限値を平面ひずみ破壊靱性と呼び, 特に  $K_{Ic}$  という表示をする。  $K_{Ic}$  を求めるための試験法は ASTM (American Society for Testings and Materials) によって規格化されており (ASTM E399)<sup>7)</sup>, 平面ひずみ破壊靱性の条件が次のように定められている。

$$B(\text{板厚}) \geq 2.5 (K_c / \sigma_y)^2 \text{ ----- (2.1.5)}$$

ここで,  $\sigma_y$  : 材料の降伏点

(2.1.5) 式の関係を満足するような試験片板厚で得られた  $K_c$  が  $K_{Ic}$  とみなされる。

(2.1.5) 式の右辺は塑性域の大きさに比例する量であるので, ASTM-E399 では

(2.1.5) 式の板厚 B を亀裂長さ  $a$  に置き換えた式によって小規模降伏条件をも

規定している。

強度に比べ靱性の低い超高張力鋼や一部のアルミ合金、チタン合金では比較的小型の試験片で  $K_{Ic}$  を得ることができるが、溶接構造用鋼では極低温を除いて  $K_{Ic}$  を求めることは一般に不可能である。そこで一般の溶接構造用鋼では実際に使用される板厚での靱性が評価されればよいとの立場から破壊靱性試験では原厚試験が行なわれている。また溶接構造用鋼の脆性破壊発生はかなりの塑性変形を伴う場合が多く、小規模降伏条件を満足するには幅数百 mm の大型試験片を必要とするのが通常である。

## 2.2 非線形破壊力学と脆性破壊の取り扱い方

### 2.2.1 COD と COD 試験

$K$  値を破壊のパラメータとする考え方は、亀裂先端の塑性域の大きさが亀裂寸法に比べ十分小さい場合に限り有力な概念となり得るのであるが、通常の構造用鋼では破壊発生に先立ち、上記の意味において無視できぬ程度の塑性変形を生じる場合が多い。

このため材料力学的感覚に基づく概念として、塑性変形の結果生じる亀裂端部での塑性開口変位 (crack opening displacement, COD) が塑性領域の力学的状態を第 1 近似的に特徴づけるパラメータになりはしないかという考え方があつた。各種モデルに基づく解析によれば COD ( $\delta$  という記号を用いることが多い) と  $K$  値の間には、次のような関係があることが知られている。

$$\delta \approx \frac{K^2}{E \sigma_Y} \text{-----} (2.2.1)$$

ここで、 $E$  : 材料の弾性率

$\sigma_Y$  : 材料の降伏点

小規模降伏下ではこのように COD,  $\delta$  と  $K$  は 1 対 1 の対応関係にあり、破壊条件としての COD クライテリオン ( $\delta \geq \delta_c$ ) は線形破壊力学におけるそれと全く同じ意味になる。塑性変形が大きい場合は  $K$  は意味を失うが、その場合も

$\delta$ は亀裂端の応力，ひずみの状態を規定するパラメータとして有効であるとする考え方がCOD概念である。Wells<sup>8)</sup>，Bilby，Cottrell，Swindenら<sup>9)</sup>によってこのCOD説が提唱されて以来，上記の小規模降伏におけるKとの関係をよりどころとして，溶接構造用鋼の脆性破壊発生を主な対象として英国，日本などで大規模な共同研究<sup>10),11)</sup>が行なわれ，その工学的有効性が検証されてきた。英国，日本においては溶接構造物中の溶接欠陥など各種欠陥の破壊力学的許容判定基準を生みだすにまで至っている。

脆性破壊発生に対する材料の抵抗値， $\delta_c$ は， $K_c$ の場合と同様，鋭い切欠き（先端半径0.1 mm以下）あるいは疲労予亀裂を有する試験片を実際に破壊させて求める。試験片は3点曲げ試験片が一般に用いられている。亀裂端のCOD， $\delta$ は，実測することも不可能ではないが，通常は試験片表面での亀裂開口変位 $V_g$ を測定し，これを $\delta$ に換算する方法をとっている。この換算式はいくつか提案されているが，基本的には図2.2.1に示すように試験片が亀裂端から $(W-a)/r$ の位置にある回転中心の回りを剛体変形するとの仮定に基づいている。ここでは英国でBritish Standardとして規格化されているCOD試験法(BS5762)<sup>12)</sup>で定められている方法を紹介しておく。

$$\delta = \frac{K^2(1-\nu^2)}{2\sigma_Y E} + \frac{0.4(W-a)V_p}{0.4W+0.6a+z} \text{----- (2.2.2)}$$

ここでKは荷重から算定される応力拡大係数， $V_p$ は $V_g$ の塑性成分である。BS5762では試験片として3点曲げ試験のみを採用し，疲労予亀裂を導入することを要求している。

限界COD， $\delta_c$ は $K_c$ と同様，温度，歪速度，試験片板厚などに依存するので，COD試験もまた実際の構造物が受ける環境をできるだけ再現した状態で行なわなければならない。

### 2.2.2 CODの算定

破壊パラメータとして $\delta$ を採用する場合、 $\delta$ の値を亀裂寸法、外力、降伏応力などの関数として求めることが必要となる。そこでDugdale<sup>13)</sup>-Barenblatt<sup>14)</sup>モデル(DBモデル)がしばしば用いられる。DBモデルの概念図を図2.2.2に示す。半長 $a$ の亀裂先端に長さ $\rho$ の塑性域を持つ弾塑性亀裂を $(a + \rho)$ の半長の弾性亀裂に置換え、塑性域を結合力が降伏応力 $\sigma_Y$ で亀裂の開口に抵抗する領域と考えるのである。 $\rho$ の大きさはA点における外力による特異性と亀裂を閉じようとする $\sigma_Y$ による特異性とは打ち消し合っ、亀裂線上の応力分布が図2.2.2の下図のようになるという条件から定まる。DBモデルはこのように弾性亀裂の問題に帰着せしめた単純で巧みな模型ではあるが、歪硬化を考慮していないなど、実際の弾塑性亀裂との対応については議論も多い。しかし、CODを定式化した手続きによって計算することができるという、当面の設計的立場からの要請にある程度こたえるものであり、実験的にもほぼ妥当な値を与えることが示されている。

DBモデルによる $\delta$ の解析的表示は作用応力 $\sigma$ が降伏点以下の場合にのみ得られるが、溶接残留応力場、構造的応力集中によって塑性降伏している歪集中場などCOD概念の威力を最も発揮しうる領域中の亀裂には適用できない。溶接欠陥などの各種欠陥は上記のような状況下に存在していることが少なくないと思われるので、設計的立場からは応力の総和が降伏点に達し、歪が降伏歪を越えているような状態での亀裂の変形挙動を知ることが望まれる。このような要求にこたえるものとして、作用歪と $\delta$ の関係を与える簡便式が提案されている<sup>15)~17)</sup>。

$$\delta/e_Y a = C(e/e_Y) \text{-----} (2.2.3)$$

ここで $e$ は作用歪、 $e_Y$ は降伏歪で $C$ は定数である。この $\delta$ 算定式は、亀裂を間にはさんで適当な標点距離をとった時の変位と $\delta$ とがほぼ

比例関係にあることを利用したもので、 $C$ の値としていくつか提案されているが、これは部材本来の機能として何を要求するか、どの程度の領域の変形能を要求するかといった設計上の立場の相違によるものである。

### 2.2.3 J積分

CODとならぶもう一つの有力な弾塑性パラメータとしてJ積分<sup>18)</sup>がある。Griffithの破壊理論では、亀裂進展時のポテンシャルエネルギー減少率（亀裂の拡大により系から解放され、亀裂拡大に必要な仕事に変換されるエネルギーの割合）という概念が重要な役割を果たしているが、Riceはこれを一般化して、次のような径路によらないJ積分と呼ばれる線積分表示を得た。

$$J = \int_{\Gamma} (W dy - T \frac{\partial u}{\partial x} ds) \text{ ----- (2.2.4)}$$

ここに $\Gamma$ は、図2.2.3に示すような、亀裂下面から亀裂端を回り上面に至る任意の積分径路（径路に沿う長さ $S$ ）、 $W$ は歪エネルギー密度、 $T$ と $u$ は $\Gamma$ 上の応力及び変位ベクトルである。

(2.2.4)式で定義されるJ積分の径路独立性は、応力と歪の間に一義的な関係があれば、即ち弾性体が全ひずみ理論にしたがう弾塑性体であれば一般的に成立する。線形弾性の場合は

$$J = G \text{ ----- (2.2.5)}$$

であり、非線形であっても弾性であればJは亀裂進展時のポテンシャルエネルギー減少率という物理的意味をもつ。<sup>19)</sup> 塑性変形によって非線形となる場合は、上記の意味は失われるが、亀裂端に生ずる応力や歪の特異性を表わすパラメータとなっていることが示されている。

脆性破壊に対しては、その破壊条件は $K, \delta$ の場合と同様、 $J \geq J_c$

で表わされ、 $J_c$ を求めるための破壊靱性試験も、 $K_{Ic}$  試験、COD試験と基本的には変わらない。深い切欠きを有する試験片については、試験片の荷重—荷重点変位曲線から $J$ を算定する簡易評価式が与えられており、<sup>20)</sup> 3点曲げ試験片の場合 図2.2.4に示すように荷重—荷重点変位曲線下の面積を $U$ として次式で近似的に与えられる。

$$J = \frac{2U}{Bb} \text{-----} (2.2.6)$$

一般の場合は径路独立性を利用して(2.2.4)式によって $J$ 値を算定することになるが、個々のケースについて有限要素法などの弾塑性解析を行なわねばならず、この点が $J$ 積分応用の大きな妨げとなっている。

#### 2.2.4 破壊パラメータの選択

以上、現在の破壊力学で用いられている力学パラメータとその脆性破壊への適用について概説した。脆性破壊に限らず、ほとんどすべての破壊現象に破壊力学は適用しうるが、小規模降伏という条件が満足されている限り、線形破壊力学の適用が可能であり、そうでない場合にはじめてCODあるいは $J$ を用いることになる。その選択は、対象とする破壊現象、材料、構造部材あるいは試験片の寸法、亀裂あるいは欠陥の寸法の組み合わせによって異なってくる。

破壊力学的手法が工学的に有効であるためには、これまで述べてきたように次の条件を満たすものでなければならない。

- (1) 亀裂端近傍の力学情報を単一のパラメータによって表示しうる。
- (2) 採用されたパラメータによって記述できる材料特性が存在し、材料試験によってその特性を決定することができる。
- (3) 採用されたパラメータが外力、亀裂寸法、部材形状の関数として解析的に表示され、しかも比較的容易に算定できる。

これらの条件をほぼ満足し体系化されているのは $K$ を採用する線形破壊

力学のみであり、CODは(3)に関して多くの努力が払われているものの未だ十分でない。

溶接構造用鋼の脆性破壊発生に関しては、対象とする構造部材、亀裂寸法が比較的大きいものであれば、力学パラメータとして $K$ を採用し、小型試験による靱性評価はCODあるいは $J$ で行なうというのが現実的な対応であると思われる。この場合、 $\delta_c$ 、 $J_c$ を $K_c$ に換算する必要があり、次式によって換算が可能である。

$$\delta_c = \alpha \frac{K_c^2}{E \sigma_Y} \quad , \quad J_c = \frac{(1-\nu^2) K_c^2}{E} \quad \text{-----} \quad (2.2.7)$$

$\alpha$ の値は材料によって0.3~1.0の値をとるようであるが、 $\alpha=1$ とすれば $K_c$ のほぼ安全側の推定となる。CODと $J$ の破壊パラメータとしての有効性にはほとんど差はみられない。CODに関しては実績も豊富で欠陥評価などに既に应用されているが、 $J$ は $K$ 値との関係が明確であることから小型試験による $K_c$ 、 $K_{Ic}$ の推定の手段として用いられることが多い。

## 2.3 脆性破壊伝播停止の取り扱い方

### 2.3.1 脆性破壊伝播のエネルギー-論的条件

脆性破壊は通常の設計応力程度の応力場中を進行し、巨視的に見れば近似的に弾性的な挙動と見なしうる場合が多い。したがって亀裂伝播の力学的取扱いに線形破壊力学的概念が近似的に適用できる。そしてこれまでのところエネルギー条件でこれを捉えようとする立場がとられている。亀裂伝播に係するエネルギーとしては(i)ひずみエネルギー $U$  (ii)運動エネルギー $T$ 、(iii)外力仕事 $W$ 、(iv)亀裂先端の変形や破壊により散逸される材料の破壊エネルギー $D$ の4つを考えることができる。

亀裂の進展に対する各エネルギーの変化率で考えると、上記4つのエネルギー成分を単位板厚当りの量で考え、亀裂長さを $a$ とするとエネルギー保存則から次式が成立つ。

$$\frac{dW}{da} - \frac{dU}{da} - \frac{dT}{da} = \frac{d\Phi}{da} \text{-----} (2.3.1)$$

上式で左辺は亀裂進展に伴って力学系から供給されるエネルギー率で、いわば、亀裂を進展させようとする原動力(亀裂進展力)という意味の量であり、右辺は材料が破壊する際に不可逆的に散逸するエネルギー率で、材料の破壊伝播に対する抵抗力にあたる。

前者を $G$ 、後者を $R$ で表わすと、亀裂伝播中は次式が成立する。

$$G = R \text{-----} (2.3.2)$$

(2.3.2)式が成り立たなくなり、

$$G < R \text{-----} (2.3.3)$$

となると、亀裂は停止すると考えるのである。クラックアレスターは $G$ を小さくするか、 $R$ を大きくするか、あるいは両者により(2.3.3)式の条件を実現するものである。

材料の抵抗力 $R$ を直接求めることは困難であるので、亀裂の伝播および停止の実験を行い、亀裂速度や伝播中の外力の仕事を実測して $G$ を弾性力学により計算することによって、(2.3.2)式より間接的に求めざるを得ない。鋼の場合、 $R$ は少なくとも温度、亀裂速度に依存するものと考えられているが、原理的には $R$ がその影響因子の関数として分っていれば、与えられた力学系の境界条件(負荷条件)の下で(2.3.1)式を解けば亀裂の挙動が予測できることになる。しかしそれでは与えられた構造物の力学的条件や材料特性ごとに複雑な動的解析をやらねばならず、実際問題として困難が多い。

実用上は大胆な仮定の下に何らかの近似と単純化によって取扱うことが必要となり、いくつかの取扱い方が提案されている。以下にその基礎事項の概要を述べるが、具体的詳細は5章3節に述べられている。

### 2.3.2 静的取り扱い

動的効果を一切無視すると(2.3.1)式は伝播中においては

$$\frac{dW}{da} - \frac{dU}{da} > \frac{dD}{da} \text{ ----- (2.3.4)}$$

であり、停止時は

$$\frac{dW}{da} - \frac{dU}{da} = \left( \frac{dD}{da} \right)_a \text{ ----- (2.3.5)}$$

となる。ここで  $\left( \frac{dD}{da} \right)_a$  は停止時(亀裂速度=0)の材料抵抗値を表わす。(2.3.5)式左辺は、静的ひずみエネルギー解放率を意味す線形破壊力学で用いられる応力拡大係数を用いることにすると、(2.3.5)式の条件は次式のように表わされる。

$$K = K_{ca} \text{ ----- (2.3.6)}$$

脆性破壊伝播停止特性試験として、我が国では一般に認められているものに温度勾配型二重引張試験や温度勾配型 ESSO 試験がある。両者に本質的な違いはないので、二重引張試験について説明すると図2.3.1に示すように、低温にした亀裂発生部から強制的に発生させられた脆性亀裂が、一様引張応力を加えられた亀裂伝播部に突入する。亀裂伝播部は発生部側が低温となるように温度勾配を与えておく。亀裂伝播抵抗力は温度と共に上昇するので、亀裂が進展するに従って抵抗力が大きくなり、ついにはこれが亀裂進展力を上まわって、ある温度のところで停止する。このような亀裂停止現象に対して上述の静的取扱いを適用すると、亀裂停止点で(2.3.6)式が成立したものと考え、左辺を計算してこれをその温度に対応する停止靱性値とみなして実験データを整理すると、試験条件の違いがあっても材料ごとにほぼ固有の値が得られ、しかもその温度依存性は次式のような形に近似できる(図2.3.2)。

$$K_{ca} = K_{0a} \exp(-T_{0a}/T) \text{ ----- (2.3.7)}$$

(2.3.6)式左辺の計算には、伝播部入口の側縁を対称軸として、現実の伝播

部(幅 $B$ )とその鏡像を接合した全幅 $2B$ の充分長い仮想的引張試験片において、中央部に生じた脆性亀裂が一様応力 $\sigma$ のもとに対称的に幅方向に伝播して全長 $2a$ で停止したという現象と同等であると考え、よく用いられている次の近似式を用いる。

$$K_a = \sigma \left\{ 2B \tan(\pi a/2B) \right\}^{1/2} \text{-----} (2.3.8)$$

(2.3.6)式左辺の計算をもう少し厳密にやる場合には、長手方向の試験片の寸法を考えに入れた片側切欠試験片の変位形の荷重を加えた $K$ 値を用い、試験機等の剛性を実測して図2.3.3に示すような系のように考え、亀裂進展に伴う荷重の低下を考慮する方法もある。<sup>21)</sup> 試験片の相対的長さが短い場合には(2.3.8)式との差が大きくなる。

このようにして材料の亀裂伝播停止靱性値 $K_a$ が温度 $T$ の関数として求められると、構造物の応力 $\sigma$ のとき伝播した長さ $2a$ の亀裂の停止温度は、簡単のため無限板と考えて、

$$\sigma \sqrt{\pi a} = K_a \text{-----} (2.3.9)$$

と、(2.3.7)式を組合せて算定すればよい。あるいは $G$ と $T$ が与えられれば、(2.3.7)式と(2.3.9)式から阻止し得る伝播亀裂長さが求まる。

しかし、1971年頃から行なわれた超広幅試験片(幅1.5~2.4m)による長大亀裂の伝播停止試験の結果は、それまでの標準試験片(幅0.4~0.5m)における静的取扱いをそのまま拡張適用することは困難であることを示すものであった。<sup>22)</sup> すなわち、長大亀裂の停止温度は標準試験から得られた $K_{ca}$ から(2.3.7)式、(2.3.9)式を用いて算定される値よりかなり低温側にずれる、あるいは長大亀裂伝播停止実験での $\sigma$ と停止温度において得られた伝播亀裂長さは、標準試験の $K_{ca}$ から算出される停止亀裂長さよりはるかに大きいという結果が得られた。

この原因は、亀裂伝播中の荷重条件の変化や動的効果が考慮されていないためと推論され、前者については静的取扱いによる考慮がなされたが、

依然として上記の困難は満足のいく解決をみなかった。<sup>23)</sup>そこで当面の実用的解決として、長大亀裂の実験結果と標準試験の結果の $K_{ca}$ 値が合うように、実際の伝播長大亀裂をその実効値がもっと小さいと考える有効亀裂長さの概念が導入された。<sup>24)</sup> 実験から得られた有効亀裂長さ( $a_{eff}$ )を図2.3.4に示す。すなわち、構造物に長大な亀裂が伝播することを想定した場合の停止挙動は、(2.3.9)式の実際の亀裂長さ $a$ の代りに図2.3.4の $a_{eff}$ を用いて推定することができる。

上記は一様引張応力が作用する場合であるが、スティフナー型アレスターがあったり、溶接残留応力が存在したりするような単純な応力状態でない場合は、亀裂長さだけに有効性を考えるのは一般性に欠ける。そこで、亀裂先端の力学的状態を表わす $K$ 値に上述と同様な有効値の概念を導入する方がより一般性が高い。超広幅の混成型アレスター試験などからこれを求めた結果は図2.3.5のようである。<sup>23)</sup>したがって、与えられた構造物の条件の下に亀裂進展を想定し、その時の静的計算により $K$ 値を求め、(2.3.6)式左辺の $K$ の代りに図2.3.5による有効 $K$ 値 $K_{eff}$ をとることにより亀裂停止挙動を推定できることになる。

### 2.3.3 動的取り扱い

動的取扱いは、動的効果を入れて(2.3.1)式あるいは(2.3.2)式をくくことにより亀裂の挙動を推定することに相当する。

しかし、現在までのところこれを任意の力学系について比較的簡単に扱うのは困難で、特殊な場合を除き一般には数値計算に依らざるを得ない。

動的取扱いを行なうためには、とにかく材料抵抗値 $R$ の特性が分っていないければならない。二重引張試験片や二重片持梁試験片(DCB型試験片)を用いた脆性破壊伝播試験を行ない、亀裂伝播速度を

実測し、これらを用いて亀裂伝播中の系のエネルギー変化、すなわち(2.3.1)式左辺を数値計算や簡単なモデルによる計算によって算定することにより、刻々の動的平衡を追跡して右边に当る材料抵抗値を間接的に求めることができる。このようにして求められた材料抵抗値は、一般に亀裂速度( $v$ )と温度( $T$ )に依存する量であり、船体構造用鋼(A級鋼)について求められた例を図2.3.6に示す。<sup>25)</sup>ここで材料抵抗値は次式によりK値の次元に変換した値であり、これは動的破壊靱性値 $K_D$ と呼ばれている。

$$K_D(v, T) = \sqrt{\frac{E}{1-\nu^2} \cdot \frac{dD}{da}} = \sqrt{\frac{E}{1-\nu^2}} R \text{ ----- (2.3.10)}$$

ただし、 $E$  : ヤング率

$\nu$  : ポアソン比

このようにして材料抵抗値が亀裂速度、温度の関数として与えられると、原理的には任意の力学系に対し亀裂伝播中の荷重条件、温度分布を与えることにより(2.3.1)式を解くことによって亀裂伝播挙動を定めることができることになるが、一般にはいちいち面倒な数値計算により刻々と亀裂の進展を追跡していかなくてはならない。

亀裂が充分広い板の中を伝播すると考えることができる場合、すなわち境界その他からの応力波の反射が走行亀裂先端に力学的影響を及ぼさない(あるいは及ぼす以前の現象)場合には、簡易的取扱いが可能となる。このような場合の動的K値は一般に次式でかける。<sup>26)</sup>

$$K(a, v) = k(v) K_s(a) \text{ ----- (2.3.11)}$$

ここで

$K(a, v)$  : 亀裂長さ $a$ 、亀裂速度 $v$ に依存する動的K値

$K_s(a)$  : 亀裂長さに依存する静的K値

$k(v)$  : 亀裂速度 $v$ に依存する亀裂長さに依らぬ係数で、 $v=0$ で1から $v$ と共に減少し、Rayleigh波速度で0となる。

さらに、この動的K値と動的エネルギー解放率(2.3.1)式又は(2.3.2)式左辺は次式の形(平面歪のとき)にかける。

$$G(a, v) = \frac{1-v^2}{E} A(v) \cdot K^2(a, v) \text{-----} (2.3.12)$$

ここに  $A(v)$  は亀裂長さに依存せず  $v=0$  で1,  $v$  と共に単調に増大し, Rayleigh波速度で発散する。(2.3.2)式に(2.3.10)式と(2.3.12)式を代入すると、次式の亀裂運動方程式が得られる。

$$A(v) \cdot k^2(v) \cdot K_s(a) = K_D(v, T) \text{-----} (2.3.13)$$

ここに  $A(v) \cdot k^2(v)$  は亀裂速度  $v$  の関数で、動的エネルギー解放率の静的なそれに対する比であり、簡単な形で近似的に表わすことができ、(2.3.13)式は次のようにかける。

$$K_s(a) = K_D(v, T) \cdot \left(1 - \frac{v}{v_R}\right)^{-\frac{1}{2}} \text{-----} (2.3.14)$$

ここで  $v_R$  は Rayleigh 波速度である。

したがって、応力波の反射による影響の無視し得るような条件下では、 $K_D$  が求まっていれば任意の温度分布、亀裂速度での(2.3.14)式右辺が求まるので、静的K値  $K_s(a)$  を計算すれば、(2.3.14)式を図式的に解いて  $a$  と  $v$  との関係が求められ、これを積分すれば  $a$  が時間の関数として亀裂の運動が定められることになる。

## 2.4 疲労亀裂伝播の取り扱い方

本節では疲労亀裂伝播の取扱いに関する基礎的手順のみを概説するが詳細については3.6, 5.1, 6の各項に述べられている。

### 2.4.1 疲労亀裂伝播速度則

破壊力学では、一般に疲労亀裂伝播速度は亀裂先端の応力拡大係数の変動幅により規定されると考えられる。

疲労亀裂伝播速度については、さまざまな実験式又は理論式が提案されているが、今日最も広く諸解析に用いられているものはParisによる次のような伝播則である。

$$da/dN = C(\Delta K)^m \text{ ----- (2.4.1)}$$

$da/dN$  : 亀裂伝播速度

$\Delta K$  : 応力拡大係数の変動幅

$C, m$  : 材料定数

材料の亀裂伝播特性が $C, m$ の2つの定数により表わされることとなる。しかし、実験解析が進むにつれて(2.4.1)式からはずれた伝播挙動も数多く観測され、次のようなさまざまな因子の影響を考慮に入れた諸修正式が提案されている。

(i) 平均応力又は応力比

(ii)  $\Delta K$ の下限界, 上限界

(iii) 環境, 雰囲気

(iv) 荷重繰返し速度, 波形

(v) その他

通常の大気中での疲労亀裂伝播については(i), (ii)が主たる検討対象とされている。腐食環境中では(iii), (iv)が大きな問題となり、今日においても諸研究が進行中である。

(i)に挙げた平均応力の影響については、次式の形で表わされることが多い。

$$da/dN = C \cdot f(R) \cdot (\Delta K)^m \text{ ----- (2.4.2)}$$

$R$  : 応力比

ここで、 $f(R)$ は

$$f(R) = (1 + C_1 R)^{m_1} / (1 - C_2 R)^{m_2} \text{ ----- (2.4.3)}$$

$C_1, C_2, m_1, m_2$  : 定数

$\Delta K$ の下限界についてもさまざまな実験式が提案されているけれども、多くの実験データを統一的に説明するのは困難であり、実用的にはむしろ疲労亀裂伝播が起るための $\Delta K$ の下限界の存在そのものが大きな意味を持っている。それ故、下限界条件は(2.4.1)式に示したParis則と合わせて、次のように表現されることが多い。

$$da/dN = \begin{cases} C(\Delta K)^m & : \Delta K > \Delta K_{th} \\ 0 & : \Delta K \leq \Delta K_{th} \end{cases} \text{----- (2.4.4)}$$

腐食環境下の疲労亀裂伝播については、5.1.4項に示すようにさまざまな注意が必要である。荷重繰返し速度や応力波形の影響は腐食環境下で大きく表われるから、設計又は安全性評価において十分な配慮が必要である。

伝播速度則には数多くの提案式があるが実用面では(2.4.1)式又は(2.4.4)式が用いられることが多い。これは平均応力その他の諸因子の影響を統一的に表わす簡便な式が得にくいことに合わせて、現実の構造物では平均応力その他各因子についての正確な推定が困難であることによる。

すなわち、亀裂伝播速度式そのものは簡単な形に置き、諸因子の影響によるデータの変動は $C$ ,  $m$ などの定数を安全側の値に設定する立場が実用的設計への応用には都合がよい。

定数 $C$ と $m$ とは比較的良好な相関関係があり、また $m$ と材料の降伏点の間には弱い相関があるとされているがこれらの具体的説明は5.1.2項に述べられている。

疲労亀裂伝播速度則を積分すれば、応力繰返し数 $N$ と亀裂寸法 $a$ との関係が得られる。(2.4.1)式中の $\Delta K$ は、一般に次のように置くことができる。

$$\Delta K = \Delta \sigma \cdot f(a) \cdot g(a) \sqrt{\pi a} \text{----- (2.4.5)}$$

ここで、

$\Delta\sigma$  : 外荷重に対応する公称応力変動範囲

$f(a)$  : 無次元の形状係数

$g(a)$  : 亀裂伝播線上の応力分布に対応する係数

(2.4.1)式, (2.4.5)式より,

$$\int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{\{\sqrt{\pi a} \cdot f(a) \cdot g(a)\}^m} = C \int_0^N (\Delta\sigma)^m dN \text{ ----- (2.4.6)}$$

ただし、

$a_0$  : 初期亀裂寸法

$a_f$  : 最終亀裂寸法

$N$  : 全繰返し数

となって、左辺は亀裂寸法のみの関数となり、右辺は応力繰返しの特性により定まる。一定応力振幅の場合は、 $f(a)$ ,  $g(a)$  が与えられれば(2.4.6)式より  $a$  と  $N$  との関係が求められる。

ランダム荷重の場合は、過大荷重により亀裂速度が遅くなるという遅延効果を見捨てるならば、繰返し応力の頻度分布が与えられれば、その応力の発生順序に関係なく、全期間の応力が作用した後において、右辺の値はある一定値となる。無論左辺は応力の頻度分布には無関係な一定値となる。したがって応力頻度分布が与えられれば、一定応力振幅が  $N$  回作用して最終亀裂寸法が同じになるような等価応力振幅  $\Delta\sigma_{eq}$  が、

$$(\Delta\sigma_{eq})^m N = \int_0^N (\Delta\sigma)^m dN \text{ ----- (2.4.7)}$$

により定義でき、これによりランダム荷重を一定応力振幅の場合に置き換えて考えることができる。

## 2.4.2 亀裂の進展径路の選択則

平板中の貫通亀裂にモードI(引裂き型)の負荷がかかる場合は、そのまま亀裂はその延長方向に進む。

混合モードの負荷の場合の亀裂径路については、次のようないくつかの説がある。

(i)  $\sigma_\theta$  最大説

(ii) 歪エネルギー解放率最大説

(iii) 歪エネルギー密度ファクタ最大説

このうち最も算定しやすいのは、亀裂先端に極座標原点をとったとき、亀裂先端近傍の周方向垂直応力が最大の方角に進むと考える(i)の $\sigma_\theta$ 最大説である。(ii),(iii)は(i)といくらか異なる解を与えるが、実験のバラツキから考えると、(i)で実用的に十分な解が求められる。

モードI,IIに対する応力拡大係数 $K_I, K_{II}$ が与えられると、 $\sigma_\theta$ 最大の条件式は次式により与えられ、予想亀裂進展方向が定まる。

$$K_I \sin \theta + K_{II} (3 \cos \theta - 1) = 0 \text{ ----- (2.4.8)}$$

$\theta$  : 存在する亀裂の延長方向と実際に亀裂が進展する方向との角度差

亀裂のない平板についての応力解が得られれば、最大の引張主応力に垂直な方向をトレースすることにより、亀裂径路の第1近似解が得られる。

更に、亀裂径路の推定精度を高めるには、亀裂の入った応力解を得て、径路決定を行なう必要がある。

亀裂が直交交差部材に進入するか、又はこれに沿って伝播するかの選択条件に関する解析は、現時点で最も困難な課題の1つに数えられ、必ずしも一般性を持った解が得られていない。

2, 3の実験結果から選択則を見出す努力がなされているが、その

詳細については3.6節を参照されたい。

亀裂の応力拡大係数が十分な精度で求められれば, Paris則と $\sigma_0$ 最大説とだけで全ての亀裂伝播径路が決定されるものと考えられる。しかし, 直交部材を含んだ複雑な形態・形状の亀裂については, 応力拡大係数の計算そのものが困難となることが多く, 何らかの簡易計算式とそれぞれの場合に合った径路選択又は形状変化則の設定が有用となる。いずれも今後の諸研究・諸解析にまつところが多い。

### 2.4.3 表面亀裂の形状変化

表面亀裂は, その初期形状と応力負荷形式との2つにより, その形状変化が支配される。

単純な半楕円形表面亀裂の形状変化については, 次のような一連の実験式が得られている。

$$\left. \begin{aligned} A &= 0.98 + 0.07 \Delta\sigma_b / (\Delta\sigma_m + \Delta\sigma_b) \\ B &= 0.06 + 0.94 \Delta\sigma_b / (\Delta\sigma_m + \Delta\sigma_b) \end{aligned} \right\} \text{-----} (2.4.9)$$

$\Delta\sigma_m, \Delta\sigma_b$ : 応力変動幅の引張成分, 曲げ成分

として, 亀裂半長 $a$ , 亀裂深さ $b$ , それらの初期値を $a_0, b_0$ とし板厚を $t$ とする。

$a_0 \geq b_0 / (A - B b_0/t)$  のとき

$$a^n - \frac{b^n}{(A - B b/t)^n} = a_0^n - \frac{b_0^n}{(A - B b_0/t)^n} = \text{const} \text{----} (2.4.10)$$

$a_0 \leq b_0 / (A - B b_0/t)$  のとき

$$a^n (A - B b/t)^n - b^n = a_0^n (A - B b_0/t)^n - b_0^n = \text{const} \text{---} (2.4.11)$$

ここで,  $n$ はParis則の指数 $m$ より $n = m/2 + 1$ として求める。

一般には $b$ について亀裂伝播速度則を用いて繰返し数との関係を求め, 上式より板表面長さを推定するという手順を踏む。

## 2.5 欠陥評価法

### 2.5.1 溶接欠陥の安全性評価の考え方

製作時又は使用中に各種検査により発見された欠陥に対し、それが許容しうるものであるか否かを判定するには、何らかの客観的基準が必要であることはいうまでもない。このような判定基準には、“品質管理基準”と“機能適合性評価基準”とも呼ぶべき2つのカテゴリを考えることができる。

前者は溶接構造物の品質をある水準以上に保つためのものであり、判定基準の内容は単純で“判定作業は容易でなくてはならず、そこで要求される品質の水準は経験に基づいた多分に任意性の高いものにならざるを得ない。設定される水準は結果的に大幅な安全しろが見込まれてお一般的にかなり安全側の判定となるものである。

それに対して後者は、欠陥を含む構造要素の使用条件を十分考慮に入れて、より緻密な評価の上に成立つ判断に基づくものであり、判定作業は前者に比べ複雑となるが、不必要な過大品質の度合を極力少なくする、より経済性の高い判定基準といえることができる。構造物としての機能が失われない範囲では欠陥を許容するという、この種の判定基準が生まれてきたのは、溶接構造物における溶接欠陥の存在が避けられないものであり、それほど危険でない欠陥の補修によって新たな発見しにくい有害な欠陥を生じたり、溶接部の著しい材質劣化を招くこともあり得るということ、非破壊検査の能力から考えてむしろある程度の溶接欠陥は常に存在していると考えなければいけない場合が多い、といった認識が背景となっている。

気孔、スラグ巻き込みなど欠陥の先端がそれほど鋭くなく応力集中が小さい欠陥は、疲労亀裂などの発生源とはなっても脆性破壊の直接の発生源とはならないであろう。溶込み不足、融合不良あるいは割れ

など、平面的な欠陥でも脆性破壊など構造物の機能が失われる限界寸法以下であれば許容されてよいはずである。各種欠陥の構造部材の破壊・破損に及ぼす影響の定量的評価は、欠陥種別に応じてその有害度を判定し、疲労、応力腐食割れ、クリープなどによる亀裂の進展に関する情報と不安定脆性破壊に対する抵抗値（破壊靱性）とから破壊力学を用いて行なうことが可能である。

破壊には、前述したように多様な種類があり、破壊力学の適用に際しては、使用される材料と、どのような破壊現象を対象とするかにより、適切な破壊パラメータと破壊条件を選択する必要が生じてくる。

もちろん材料及び構造部材の力学的・化学的環境、使用温度などからどのような破壊現象が起こり得るかを事前に把握しておくことが重要なのはいうまでもない。また破壊力学パラメータにより定義された材料の破壊特性値、特に破壊靱性は、温度、歪速度、板厚などに強く依存するので、実際の条件になるべく近い状態で求めなければならない。その際、破壊試験片は想定する欠陥部位の材質に従って、母材、溶接金属、溶接融合線、熱影響部などに切欠先端が位置するように製作されねばならないことはいうまでもない。図2.5.1に溶接欠陥からの脆性破壊、または疲労亀裂進展後に脆性破壊に転化する場合の欠陥評価プロセスの例を示す。この例では欠陥の限界寸法を脆性破壊に対する寸法にとっているが、構造物の種類、破損時の危険度によって別の条件が優先される場合もあろう。

## 2.5.2 脆性破壊発生に対する溶接欠陥の許容判定基準

破壊力学を導入した欠陥評価の手法はいろいろ提案されているが、<sup>27)28)</sup>ここでは日本溶接協会の“脆性破壊発生に対する溶接欠陥の許容判定基準”（WES 2805）<sup>16)</sup>をごく簡単に紹介する。この基準の背景には

本破壊管理制御指針と全く同じ認識があるが、基準そのものは“欠陥評価の指針”ともいうべき画一化、簡略化されたものであって、細部については技術者の判断に委ねられる部分も多い。

この基準は、破壊の形態としては脆性破壊を対象とし、繰返し荷重をうける場合には疲労による亀裂の進展を考慮しているが、その他の破壊形態については触れていない。また評価の対象となる欠陥は、溶込み不足、割れなどの平面的欠陥のみである。

評価手順は、先ず非破壊検査で得られた欠陥像を板厚貫通欠陥、楕円もしくは円状の表面欠陥及び内部欠陥の3つのタイプに分類することから始まる。複数欠陥の場合には、その相互作用を考慮し、表面あるいは内部欠陥(埋没欠陥)は、板表面の自由縁境界の影響をも考慮して欠陥寸法を標準化する。次にそれらの欠陥寸法を破壊力学的に等価な2次元の板厚貫通亀裂の長さ、すなわち等価欠陥寸法 $a$ に換算、一元化する。繰返し荷重をうける構造物では、設定した繰返し数における亀裂進展量を、欠陥の3つのタイプに応じてParis則、 $da/dN = C(\Delta K)^m$ を基礎とした式により算定した後、等価欠陥寸法を決定する。

次に欠陥存在部位の作用応力、溶接残留応力の有無、継手形状、等価欠陥寸法から破壊パラメータ $\delta$ を算定する。脆性破壊のクライテリオンとしてCOD説をとる関係から応力値はすべて歪相当の力学量に換算される。作用応力は引張応力成分 $\sigma_t$ と曲げ応力成分 $\sigma_b$ に分けられ、曲げ応力に関しては欠陥のタイプ、位置によって定められた定数をかけて考慮すべき歪値 $e_1$ を決定する。溶接残留応力が存在する場合は、欠陥のタイプ、溶接線方向との位置関係、突合せ継手か、隅肉継手かにより定められている定数を用いて、降伏歪の何%という形で残留応力の寄与分 $e_2$ を算定する。さらに各種継手について与えられている算定式を用いて歪集中率を算定し、継手の形状不連続による歪集中寄与分 $e_3$ を求める。

破壊パラメータ $\delta$ は $e = e_1 + e_2 + e_3$ として $\delta = 3.5 e \bar{\alpha}$ で与えられる。

破壊靱性 $\delta_c$ は原則として欠陥部位の材質についてのCOD試験から求めることが要求されている。試験板厚は原厚にとり、3本の試験結果の最低値をとる。止むを得ない場合には、Vノッチシャルピー試験のみから安全側の $\delta_c$ の推定値を求めることも許されている。

判定は破壊パラメータ $\delta$ と破壊靱性 $\delta_c$ の大小で決定され、 $\delta < \delta_c$ であれば、その欠陥は脆性破壊発生に関して許容される。図2.5.2にその流れ図を示す。

## 2.6 破壊力学解析の標準的手順

一般に、破壊力学による電裂強度計算という場合の計算内容ないしフローは、図2.6.1に例示するようなものである。ただし、図2.6.1では疲労電裂の伝播や脆性電裂の発生などを評価する指標として、いわゆるK概念を想定している。船殻部材の電裂強度計算のかなりの部分はK概念が適用可能であると考えられているが、部分的には他の破壊力学パラメータを導入した評価も必要となる。

図2.6.1は計算の流れに対する一般的な例であるが、個々の場合には、検討対象部材や電裂形状に応じて、この中の特定の計算プロセスが重要度を増し、他の部分は相当の簡略化・近似化を施すのが通例である。すなわち、鋼板の片面に生じた表面電裂が板厚を貫通して内容物の漏洩を起すか否かという状態を判断基準とする場合、すなわち“機能不全”をこの状態と想定した場合、また内殻材から進展した電裂が外板を破り海水流入が始まる状況を考える場合、あるいはブラケットのような補強部材が破断して補強効果を喪失する状態を考える場合等々に応じて、計算フローにおけるポイントの置き方が異なってくる。概略的には、表面電裂の板厚貫通までの寿命やその電裂形状を重視する場合と、板厚貫通後の電裂の伝播寿命や伝播経路、あるいは

脆性破壊に移行する時期にポイントを置く場合とに大別できると考えられる。

ところで“機能不全”としてどのような状態を想定すべきかは、部材の種類・重要度あるいは船殻そのものの用途や社会的要請などにも左右され、全く設計的選択に委ねられる性質のものである。しかし、破壊力学検討を実施し得る技術的レベルや、板骨構造の集積である船殻の設計に破壊管理制御の考え方を適用するうえでの種々の問題点からの制約もあって、実際上の見地から想定し得る“機能不全”はおおよそ限られている。したがって、フェイルセーフ的に許容し得るか否かの評価(critical assessment)も、以下に示すような幾つかのパターンに分類できる。ただし、判断基準を定めるに際しては、電裂強度計算だけでなく、例えば漏洩ガス検知精度や検査点検精度などのような他の要素技術が関連する場合もある。

- ① 隔壁などの1次部材やブラケットなどの2次部材に生じた電裂が疲労電裂として伝播し始めた場合、不安定的拡大を起す以前に(あるいは内力平衡を失って次の大規模損壊を誘う以前に)点検察知できるか否か、もしくは停留化するか否か。さらには、予定された船令に達するか否か。
- ② 構造的応力集中部や平板中の疲労電裂が脆性破壊に移行した場合、アレスト性能の優れた鋼板の存在や構造的にアレスト能力のある板交差部の存在、あるいは応力や温度の恵まれた条件などにより、大規模破壊を誘発しない位置で停止するか否か。
- ③ 表面欠陥から発生した電裂が板厚を貫通し内容物が漏洩し始めた場合、電裂の不安定的拡大による内容物の大量流出を起す以前にこの状態が検知できるか否か。
- ④ 内構材などの欠陥から生じた電裂が外板部に達して板厚を貫通するような場合、海水流入による荷物汚損あるいは荷物流出などを起す以前にこの状態を点検察知できるか否か。

などである。

このうち③の判断基準に比較的近い考え方を合否基準として用い、方形独立

タンク方式低温型LPG船のタンクに leak before failure の考え方 ("タイプ B" としての評価) が成り立っているか否かの評価法を検討した, 日本造船研究協会 RR3M 委員会の検討流れ図を, 図 2.6.2 に示す。<sup>29)</sup>

上述の亀裂強度計算や機能不全に対する考え方は, その船舶が円滑に機能を果たす上で根幹となる部材に適用できるだけでなく, 2 次的部材も含めて広く船殻部材一般にも適用することができる。また実際にこの種の検討を加えることにより, 許容応力に対し明瞭な意味付けをしたり, 材料選択の基本的考え方を平易に, しかも応用展開の効くものにし得る。また点検のインターバルも含めた欠陥評価システムや, 航行中の補修・補強の応急対策も指針化して, 信頼性の高い破壊管理制御を遂行し得る可能性がある。

## 参考文献

- 1) G.R. Irwin, Trans. ASME, J. Appl. Mech., 24 (1957), p.361
- 2) F.A. McClintock and G.R. Irwin, ASTM STP 381 (1965), p.87
- 3) A.A. Griffith, Phil. Trans. Roy. Soc., 221 (1920), p.163
- 4) H. Tada, P. Paris and G.R. Irwin, The Stress Analysis of Cracks Handbook, Del Research Corporation (1973)
- 5) G.C. Sih, Handbook of Stress Intensity Factors for Researchers and Engineers, Lehigh Univ. (1974)
- 6) 石田, き裂の弾性解析と応力拡大係数, 破壊力学と材料強度講座2, 培風館 (1976)
- 7) American Society for Testings and Materials, Standard Test Method for Plane Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, ASTM E399-78

## その他 破壊力学全般の参考書として

- 岡村弘之, 線形破壊力学入門, 破壊力学と材料強度講座1, 培風館 (1976).
  - Broek, D., Elementary Engineering Fracture Mechanics, Noordhoff Int. Pub. (1974).
  - Knett, J. F., Fundamentals of Fracture Mechanics, Butterworths (1973).
  - Liebowitz, H. (ed.), Fracture, 1~7, Academic Press (1968)
- 8) A.A. Wells, Brit. Weld. J., 10 (1963), p.563
  - 9) B.A. Bilby, A.H. Cottrell and K.H. Swinden, Proc. Roy. Soc., A272 (1963), p.304
  - 10) R.W. Nichols, et al., Practical Fracture Mechanics for Structural Steel, Chapman & Hall (1969)

- 11) 日本溶接協会 鉄鋼部会 技術委員会 TM委員会, 脆性破壊発生特性に基づく鋼板の材質判定規準の確立に関する共同研究 — TM委員会共同研究総合報告書 — (昭.50.11)
- 12) British Standards Institution, Standard Method for Crack Opening Displacement (COD) Testing (BS 5762) (1978)
- 13) D.S. Dugdale, J. Mech. Phys. Solids, 8 (1960), p.100
- 14) G.I. Barenblatt, Advances in Applied Mechanics, 7 (1962), Academic Press.
- 15) F.M. Burdekin and M.G. Dawes, Practical Appl. of Fracture Mechanics to Pressure Vessel Technology, The Inst. Mech. Engrs., London (1971), p.28
- 16) 日本溶接協会, 脆性破壊発生に対する溶接欠陥の許容判定基準 (WES 2805) (1976)
- 17) 佐藤, 豊田, 伊藤, 切欠材の全面降伏後の切欠先端近傍の変形挙動と overall strain, 日本造船学会論文集 第142号 (昭.52.12)
- 18) J.R. Rice, Trans. ASME, J. Appl. Mech., 35 (1968), p.379
- 19) J.R. Rice, Fracture (ed. H. Liebowitz), vol. II (1968), p.191
- 20) J.R. Rice, P.C. Paris and J.G. Merkle, ASTM STP 536 (1973), p.231

その他破壊靱性全般の参考書として

- ・金沢, 越賀, 脆性破壊 2, 破壊力学と材料強度講座 8, 培風館 (1977)
- 21) 金沢, 町田, 矢島, 青木, 脆性破壊伝播停止特性におよぼす法効果および荷重条件の影響, 日本造船学会論文集 第130号 (昭.46.12)
  - 22) 日本造船研究協会 第101研究部会, 巨大船の脆性破壊防止対策に関する研究報告書, 研究資料 No.108 (昭.45.3)
  - 23) 町田, 青木, クラックアレスターに関する基礎的研究(第7報) — 長大クラックの阻止とアレスターの設計について —, 日本造船学会論文集 第131号 (昭.47.6)
  - 24) 木原, 金沢, 池田, 前中, 木下, 永元, 矢島, クラックアレスターの有効性について (第1報), 造船協会論文集 第122号 (昭.42.12)

- 25) 寺本, 町田, 金沢, 高速クラックの動的様相に関する研究(第4報) — 応力波の影響について —, 日本造船学会論文集 第146号 (昭.54.12)
- 26) L. B. Freund, J. Mech. Phys. Solids, Vol. 20 (1972), Vol. 21 (1973)
- 27) Proposed Assessment Methods for Flaws with Respect to Failure by Brittle Fracture, IIW Doc. X-749-74, Weld. in the World, 13, No. 1/2 (1975)
- 28) British Standards Institution, Draft Standard Rules for the Derivation of Acceptance Levels for Defects in Fusion Welded Joint (1976)
- 29) 日本造船研究協会第3基準研究部会, 危険物の特性および運搬船の特殊設備に関する調査研究, 研究資料 No. 68R (昭.53.3) および研究資料 No. 78R (昭.54.3)

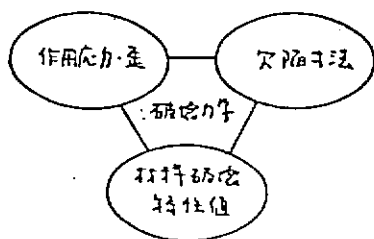


図2.1.1 破壊力学の構成

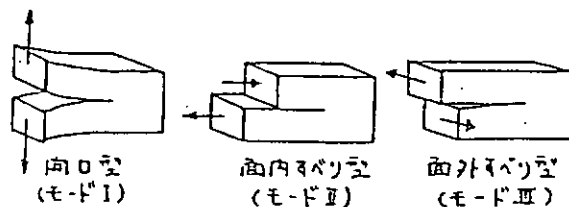


図2.1.2 き裂変形の基本型

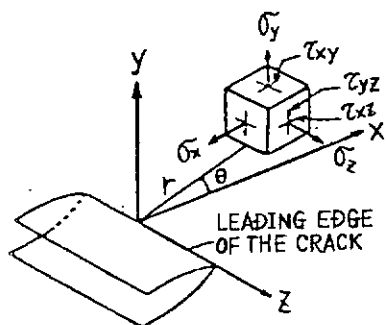


図2.1.3 き裂端近傍の座標系と応力成分

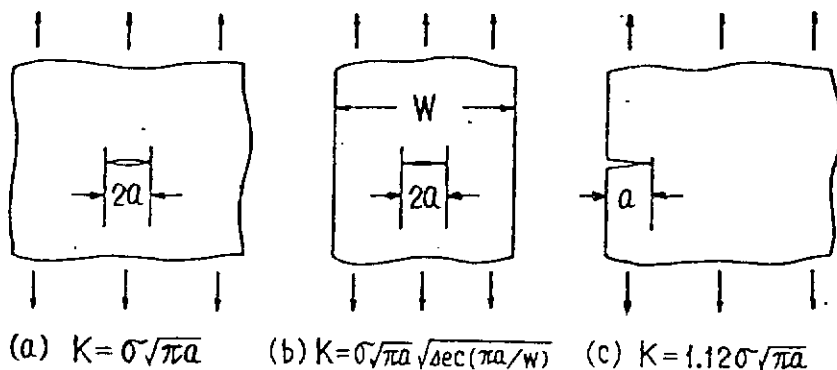


図2.1.4 K値の例

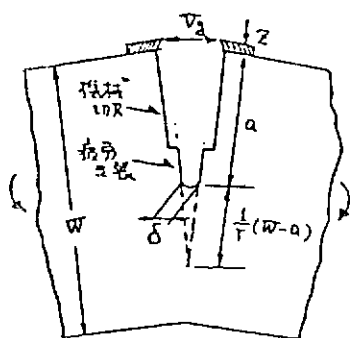


図2.2.1 曲げ試験片の変形

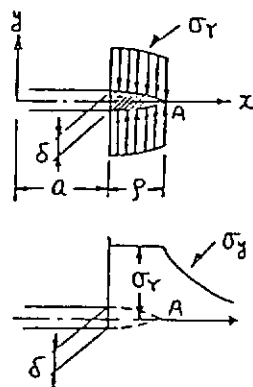


図2.2.2 DBモデル

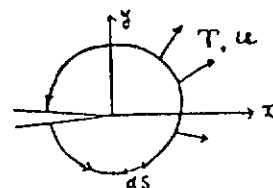


図2.2.3 J積分

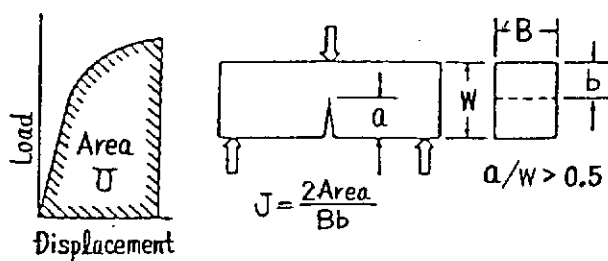


図2.2.4 三点曲げ試験片におけるJ値の簡易評価

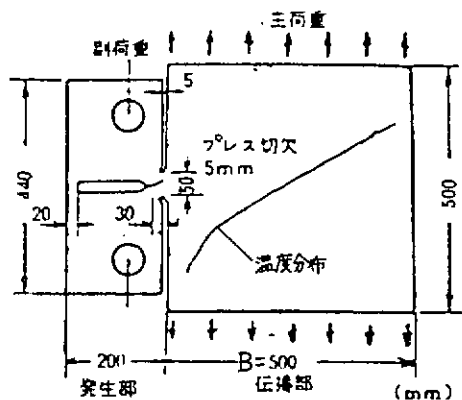
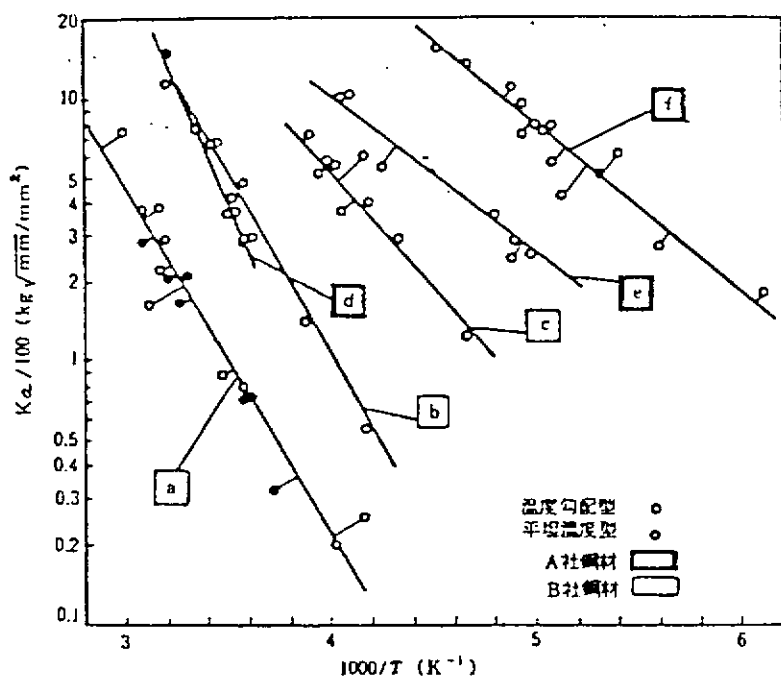


図2.3.1 温度勾配型二重引張試験



- a: S25C, 圧延のまま, 30mm 厚, B = 250mm  
 b: ABS-クラスC, 焼準, 45mm 厚, B = 250mm  
 c: HT60, 焼入焼もどし, 30mm 厚, B = 250mm  
 d: SS41, 圧延のまま, 20mm 厚, B = 500mm  
 e: HT60, 焼入焼もどし, 20mm 厚, B = 500mm  
 f: HT80, 焼入焼もどし, 20mm 厚, B = 500mm

図2.3.2 二重引張試験による裂伝播停止靱性値Kaの温度依存性

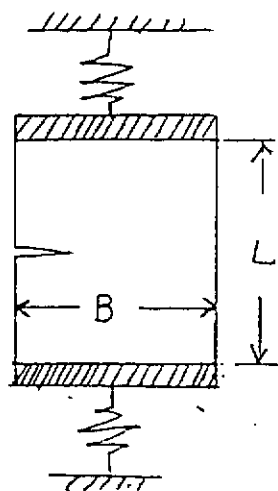


図2.3.3 脆性き裂伝播試験の模型化

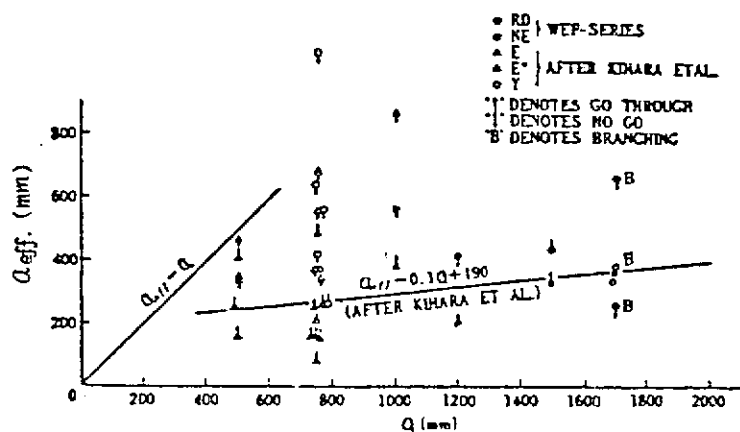


図2.3.4 有効き裂長さ

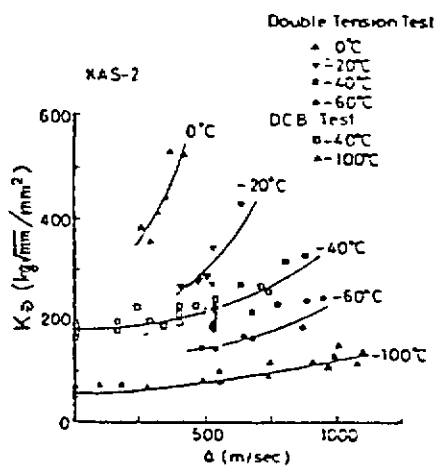


図2.3.6 造船用軟鋼(A級鋼)の動的破壊靱性値の実測例

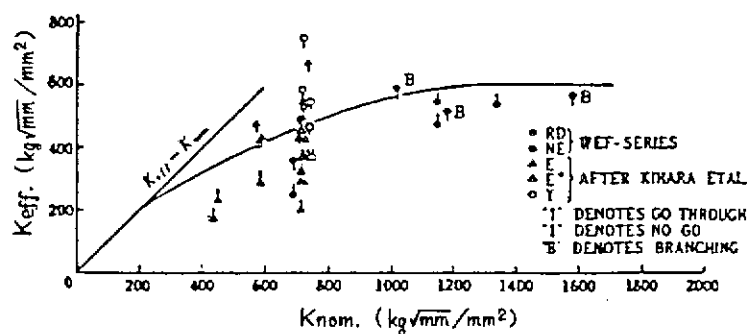


図2.3.5 有効K値

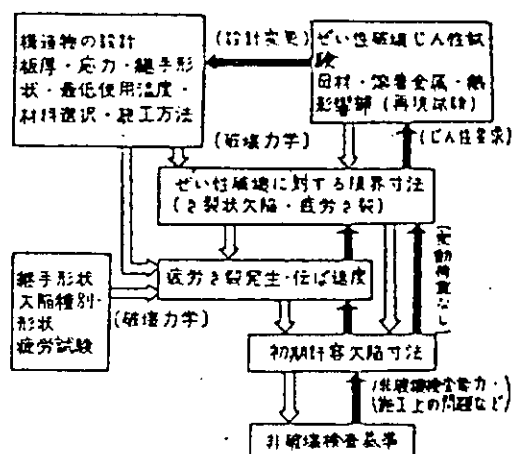


図 2.5.1 溶接欠陥評価の概念図

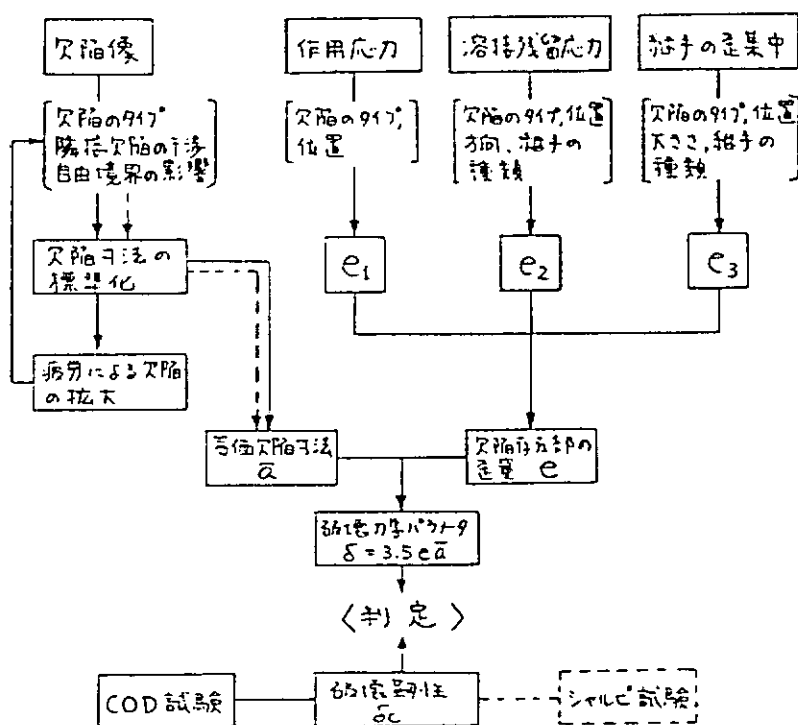


図 2.5.2 欠陥評価手順 (WES 2805)

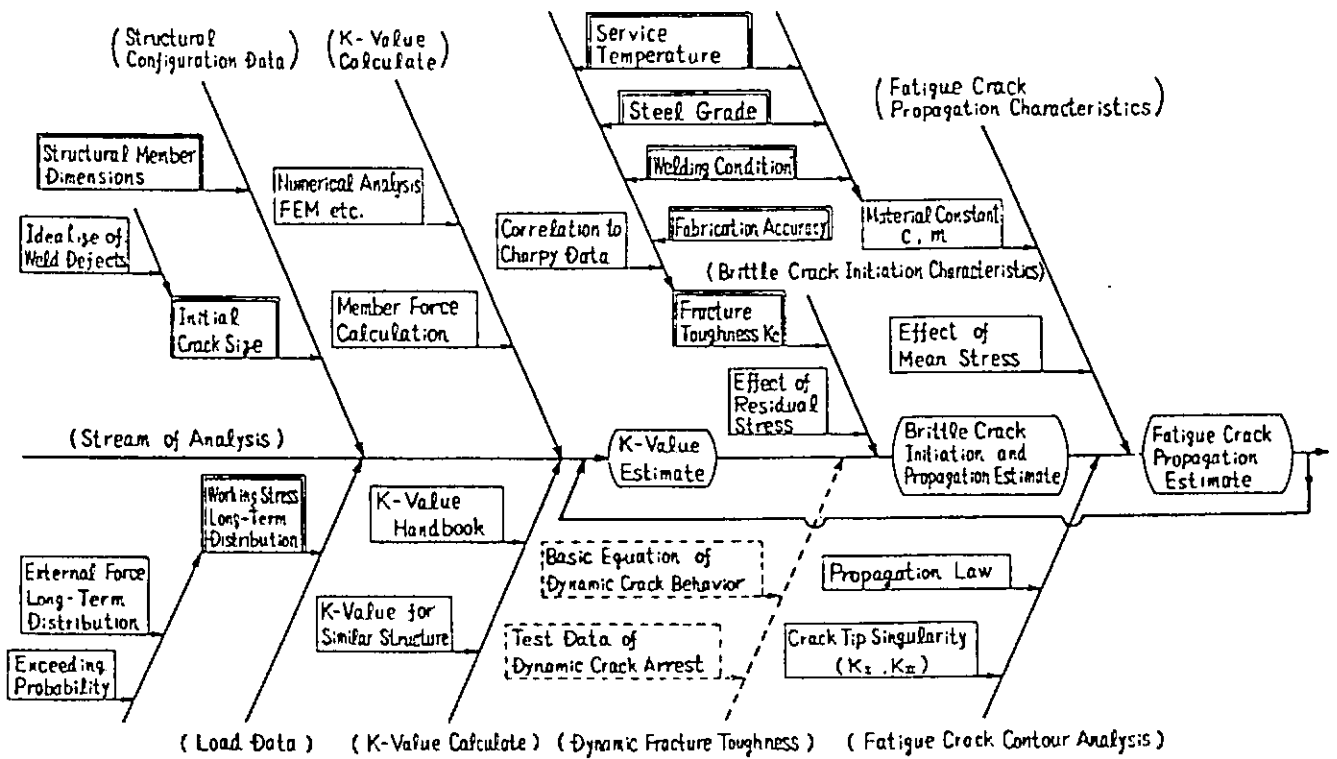
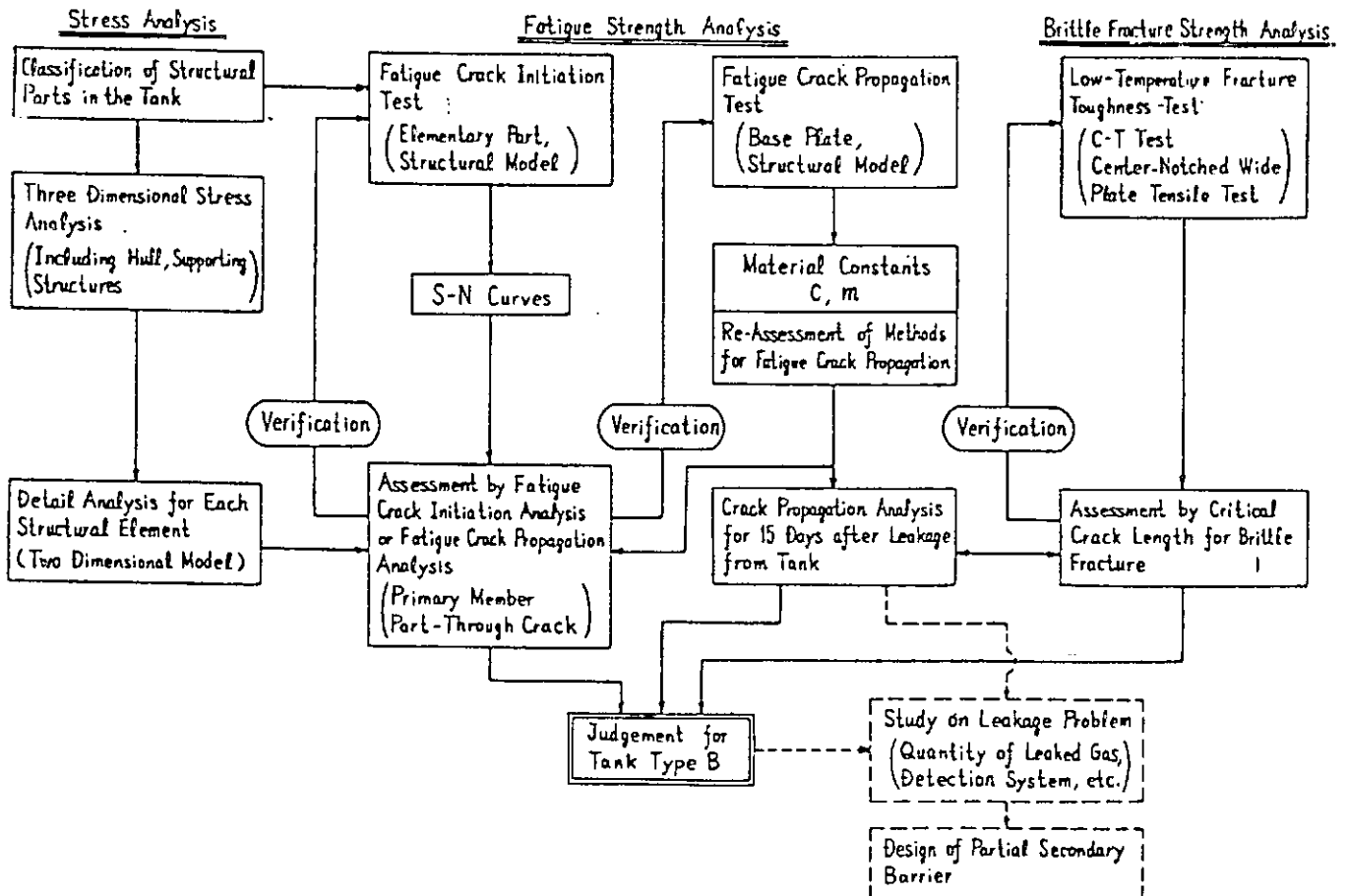


図 2.6.1 破壊力学解析の流れ図

図 2.6.2 方形独立タンク方式低温型LPG船に関するタイプBとしての評価についての流れ図<sup>29)</sup>

### 3 計算手法の便覧

#### 3.1 破壊力学解析の詳細

船殻構造の形状と載荷状態が厳密解と一致する場合には各種のハンドブックと近似式によってK値を求めることができる。それ以外の場合には電子計算機による有限要素解析が一般である。

K値解析を有限要素法で行なうとき、適用有限要素プログラム、K値の数値解析上のアルゴリズム、構造物のモデル化の相違が重複して精度に影響する。SR169部会昭和53年報告ではこの点を調査した。

図3.1.1の隅肉溶接継手のルート部のK値有限要素計算を6種類の方法で実施し、表3.1.1の代表的な結果を得た。要約すると、直接法、重ね合せ法、特異要素法等からなるこれらの計算方法においてはK値の違いでは高々10%で、亀裂進展径路ではほぼ一定であった。これらの事柄から実際の要素分割要領であると、有限要素法を破壊力学解析に適用し亀裂伝播寿命を推定することは実用上効果のあるものと考えられた。

#### 3.2 計算対象範囲の設定

破壊力学的検討を行なう場合、検討対象の(力学的)境界条件は、亀裂が船殻のごとき大形板骨構造の中に存在しているという点に対応したものでなければならない。従って、検討対象範囲の大きさを小さくし過ぎると、亀裂の進展に伴う対象部分の境界力変化(応力再配分)を考慮できず、通常、実際よりも厳しすぎる寿命予測をすることになる。

また、検討対象範囲が大きすぎると計算規模がそれだけ大きくなり、手数や費用が嵩む。

このような点に対応する現実的な処理法として、検討対象範囲を亀裂形態(疲労亀裂の(発生)伝播および不安定亀裂の発生・伝播・停止)に応じて使い分けることが考えられる。すなわち、亀裂の進展に

よる境界力変動が相対的に小さくなるよう検討対象範囲を相応の大きさに広げることである。これにより比較的単純な(力学的)境界条件の計算で良好なモデル化ができる。

以上の考え方に立って、対象構造をその大きさの観点から部分構造・構造要素・部材要素・基本要素の4レベルに分け、表3.2.1に示すように亀裂形態との対応を設定した。ただし、同表は検討対象範囲の境界力を変化させないで扱い得る構造レベルと亀裂形態との関係を目安的に示すものであって絶対的なものではない。

部分構造・構造要素・部材要素・基本要素の4レベルは、対象範囲の大きさや境界力メッシュに応じて分けられた。

最も詳細な分類レベルである基本要素は、主に疲労亀裂や脆性亀裂の発生現象を検討する際のモデルであり、表3.2.2に示すように比較的種類は少数である。

部分構造・構造要素・部材要素の分類例を、SR153 SF小委員会の成果<sup>1)</sup>を踏まえて、幾つかの船種に対して示す。

オイルタンカーについて：図3.2.1および表3.2.3(a)～表3.2.3(c)

バルクキャリアについて：図3.2.2および表3.2.4(a)～表3.2.4(f)

コンテナ船について：図3.2.3および表3.2.5(a)～表3.2.5(f)

表3.2.3～表3.2.5中の部材要素欄に記入した②-Ⓐ等の記号は、相当する表3.2.2の基本要素の種類を示している。また備考欄には本指針中の関連する節を示した。

### 3.3 破壊形態と外荷重(作用応力)

一般船舶の船体に作用する外荷重の種類と性質および対象部材を示すと、表3.3.1のようになる。

静水中荷重は主に貨物またはバラストの積付条件に応じて決まるが、

実際の航海ではかなり変動する。

波浪外力, sloshing (慣性力) は海洋波による定常状態の低サイクル変動荷重であり, 船体に直接作用するものは波浪外力であり, 船体運動によるタンク (船倉) 内の荷重は sloshing (液体) または慣性力 (固体) である。さらに, 波に起因する荷重には衝撃的に作用する slamming と船体固有振動数と共振した場合の springing とがある。

船体振動, 局部振動の起振源は主機, プロペラなどであり, 振動数は対象部材により異なる。熱応力は一般船舶の場合は気温と海水温度差などにより生じる。残留応力は溶接部に生じる溶接による束縛応力である。

なお, 表3.3.1 に示す荷重の外に, 平水中を航行する船自身の作る波による荷重, 青波の打込み水による荷重, 進水時荷重, docking 時荷重, 衝突荷重, 座礁, 風圧などが考えられる。

次に, 外荷重と破壊様式 (疲労破壊, 脆性破壊) との関係を縦強度部材, 横強度部材 および二次部材について示すと, 図3.3.1 のようになる。

疲労破壊を検討する場合は, 主に応力振幅とその繰返し数が必要であり, 正確には平均応力の影響も考慮する必要がある。

それに対し, 脆性破壊を検討する場合は, 最大応力が必要となるので, 平均応力にランダム変動荷重の場合は変動応力の最大期待値を求める。何種類かの荷重による変動応力が同時に作用する場合は, 疲労破壊の検討では, 荷重速度の異なる変動応力の重ね合せの効果を, 脆性破壊の検討では変動応力の位相差を考慮する必要があるが, これらの手法は確立されておらず何らかの簡便法が使われる。

上記の荷重の中で, 荷重の大きさ, 分布を定量的に評価できるものは少ないが, 静水中荷重と波浪荷重による疲労亀裂伝播と脆性亀裂の検討に用いる荷重 (応力) は, 一般に次のようにモデル化される。

変動応力成分の超過確率分布型は、波浪荷重をその源とする場合には、SR90などの研究により、対数直線分布と近似表現できることが分かっている。従って、静水中荷重も考慮すると図3.3.2のようにモデル化できる。

$$Q = 10^{-A} \text{-----} (3.3.1)$$

ここで、

$$A = 8 \times \frac{\sigma_a}{\sigma_{a,max}}$$

$Q$  : 超過確率レベル ( $0 < Q \leq 1$ )

$\sigma_a$  : 超過確率レベルが  $Q$  である変動応力

$\sigma_{a,max}$  :  $Q = 10^{-8}$  に対応する変動応力

疲労亀裂伝播の検討にはこの分布型より応力振幅と繰返し数を求める。また、脆性亀裂の検討では、検討の際の安全率(ないしは想定海象状態)に対応する超過確率レベル  $Q$  を設定する必要がある。通常、船令20年として応力の全繰返し数を  $1 \times 10^8$  回と考えて、その逆数  $Q = 1 \times 10^{-8}$  を検討レベルとする。

従って、採用すべき応力値は  $\sigma_s + \sigma_a$  ( $Q = 10^{-8}$ ) である。

### 3.4 構造要素などにおける内力の簡易評価法

船体を弾性体として厳密に取り扱うと、内力は船の種類と作用荷重の種類に応じて変わり、内力の量的評価方法も要求される精度とともに異なり統一的手法がないかのように見える。

本項では船級規則にも採用されている梁理論の考え方に沿って、内力を部材に作用する断面力として考え、断面力による公称応力の求め方を整理する。公称応力は構造部分に作用する応力自身である場合とそうでなく見掛けの応力である場合も有るので、内力を簡易評価するとき、表3.4.1構造部分間の力の伝達要領に留意することが必要である。

同表に船殻に作用する外力が船体全体の重量と平衡するに至るまでの過程が分類されている。船殻構造の特長として局部強度系においては貨物の種類が荷重の載荷要領に大きく表われる。一方、横強度・縦強度系については、静水中、波浪中の水圧と同様に貨物を取扱う場合が多い。

簡易評価方法としては、局部強度系に対しては各種の構造力学ハンドブックが整備されて、それを参照すると良い[表3.4.2中の(1),(2)]。縦強度・横強度については電算による各種の計算が設計途中で実施されるため、それを参考とするのが普通である。要求される精度により、船級協会規則とその解説書[表3.4.2中の(3)~(7)]に従い、荷重と解説書内の近似式を用いることも便法の一つである。

### 3.5 基本要素のK値

3.2節で記した構造レベル分類のうちの基本要素については、境界条件が比較的単純であり、また介在する寸法や形状条件が限られている。従って、逐一個別の(有限要素法などによる)K値計算を実行しなくても、K値算定式の便覧を参照して評価できるものがある。

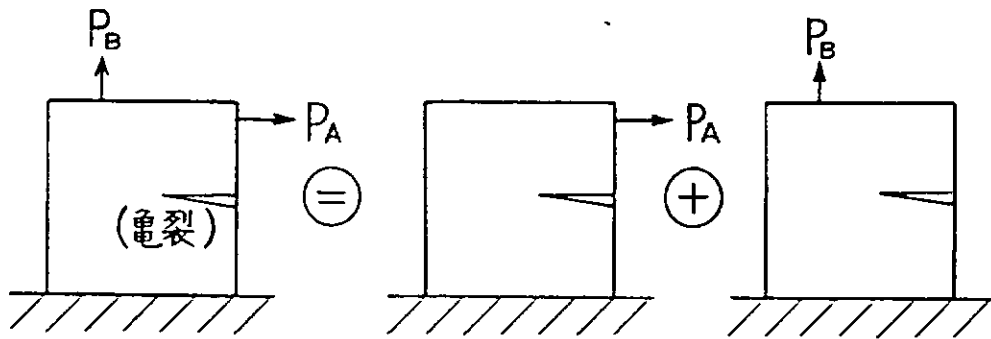
本節では、これらK値算定式の代表的なものについて収録する。

|                      |                             |
|----------------------|-----------------------------|
| 帯板中の亀裂 -----         | 表3.5.1                      |
| 無限板(半無限板)中の亀裂 -----  | 表3.5.2                      |
| 平板中の(半楕円形)表面亀裂 ----- | 表3.5.3 および<br>図3.5.1~図3.5.8 |
| 隅肉余盛部の亀裂 -----       |                             |
| 防撓パネル中の亀裂 -----      | 表3.5.4 および図3.5.9            |

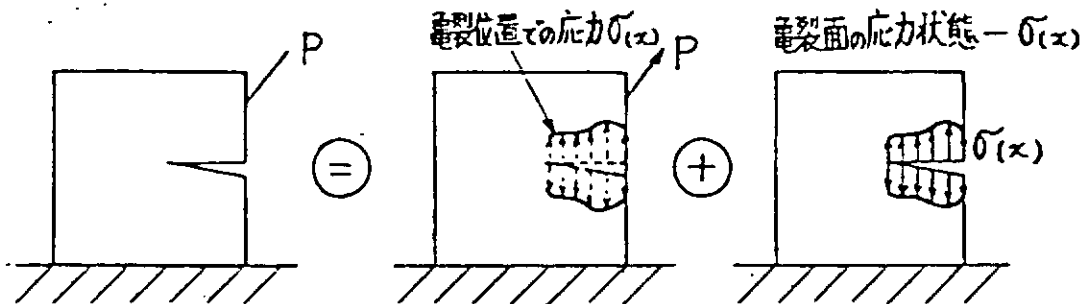
ここに収録された問題以外で理論解析的にK値表示式が得られている問題も多い。それらの検索のためにK値便覧ハンドブックのリストを表3.5.5に示す。

また、 $K$ 値は第2章で説明されているように、弾性理論でのパラメータであるから、一般に重ね合わせの原理が成立する。

したがって、複数の荷重が働く問題の $K$ 値は、それぞれ単独の荷重が働く問題を加え合わせて求めることができる。



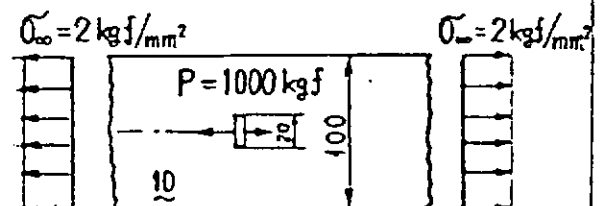
また、亀裂が無い場合の仮想亀裂位置での応力分布があらかじめ求められれば、亀裂面にこれと逆向きの応力を働かせた問題から $K$ 値を算定することができる。



以下に、使用例を掲げる。

(使用例.A)

右図の如く、幅100mm、板厚10mmの帯板の中央に、長さ20mmの貫通亀裂があって、遠方荷重 $\sigma_\infty$ と亀裂面集中荷重 $P$ が同時に働く時の $K$ 値を求める。



重ね合わせの原理より、 $K = K_\sigma$  (遠方荷重によるもの) +  $K_P$  (集中力によるもの) となる。

表3.5.1の上欄より,  $K_{\sigma} = 2\sqrt{\pi \times (20/2)} \times F\left(\frac{20/2}{100/2}\right) = 11.48$

$$\therefore F\left(\frac{10}{50}\right) = \left\{1 - 0.025(0.2)^2 + 0.06(0.2)^4\right\} \sqrt{\sec\left(\frac{\pi}{2} \times 0.2\right)} = 1.024$$

表3.5.1の下欄より,  $K_p = \frac{(1000/10)}{\sqrt{\pi \times (20/2)}} \times F\left(\frac{20/2}{100/2}\right) = 18.71$

$$\therefore F = (1.297 - 0.297 \cos(\frac{\pi}{2} \times 0.2)) \times \sqrt{(\pi \times 0.2) / \sin(\pi \times 0.2)} = 1.049$$

であるから

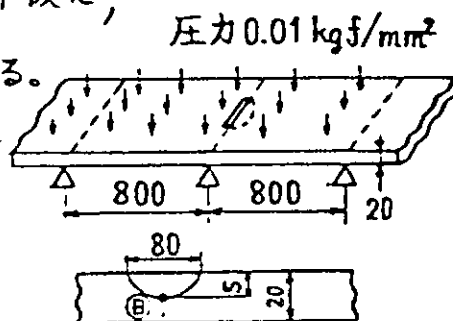
$$K = 11.48 + 18.71 = 30.19 \text{ kgf}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$$

となる。

### (使用例.B)

右図の如く, 800mm 間隔でsupportされた厚さ10mmの平板に,  
右図中の様な表面亀裂が有る場合の点③でのK値を求める。

表面亀裂の存在による応力再配分を算定することは  
相当に煩雑であるが, 亀裂無しの場合に仮想  
亀裂位置に作用する応力は単純に評価できる。



すなわち, 仮に純曲げを受けると考えて梁理論を適用すると, 曲げ応力  $\sigma_{\text{bend}}$  は次の値となる。

$$\sigma_{\text{bend}} = \frac{0.01 \times (800)^2}{12} \bigg/ \frac{(20)^2}{6} = 8.00 \text{ kgf/mm}^2$$

従って, 亀裂が無い場合の応力分布すなわち純曲げ応力  $\sigma_b$  を直接亀裂面に外圧として働かせた時のK値として, 表3.5.3(a)の1)より次の値が求まる。

$$K = M_B \times \left\{ 8.00 \times \sqrt{\pi \times 5.00} / 1.023 \right\} = 28.03 \text{ kgf}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$$

$$\rightarrow \text{図3.5.2 (中の多項式) より } M_B = 0.9049$$

より厳密には, この様な面外圧問題の場合には, 撓みに伴って生ずる上記の曲げ応力によるK値成分の外に, 亀裂面に直接に外圧が作用することによる成分( $K^*$ )も僅かながら付加する必要がある。しかし, これは一般に微小である場合が多い。本例題では, 次の値である。

$$K^* = 1.2653 \times \left\{ 0.01 \times \sqrt{\pi \times 5.00} / 1.025 \right\} = 0.049 \text{ kgf}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2 \ll 28.03$$

$$\rightarrow \text{図3.5.1 (中の多項式) より。}$$

## (使用例.C)

右図に示す寸法条件下の load-carrying fillet weld の余盛  
止端部にある十分長いアンダーカット状の亀裂(深さ2mm)のK値を求める。

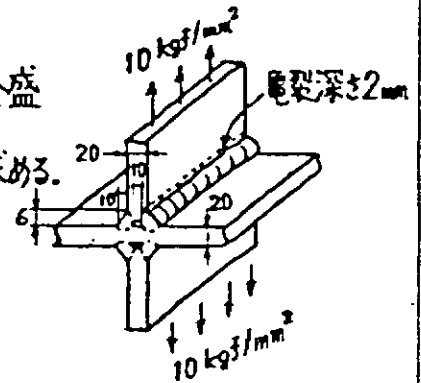


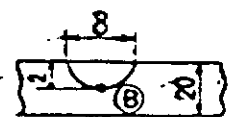
表3.5.3(b)の5)の余盛止端 crack に対するK値

評価式を用いる。

$$\left\{ \begin{array}{l} 2t = 20^{\text{mm}} \\ 2C = 10^{\text{mm}} \\ a = 2^{\text{mm}} \\ H = 10^{\text{mm}} \\ F = 6^{\text{mm}} \\ \sigma_{\infty} = 10 \text{ kgf/mm}^2 \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \frac{C}{t} = \frac{10/2}{20/2} = 0.500 \\ \frac{a}{t} = \frac{2}{20/2} = 0.200 \\ \frac{H}{F} = \frac{10}{6} = 1.67 \\ \frac{F}{t} = \frac{6}{20/2} = 0.600 \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} R \doteq 2.03 \times 1.26 - 1 \doteq 1.56 \\ \alpha = 0.0909 \\ M_t = 1.14 \\ K_0 = 25.5 \end{array} \right\} \Rightarrow \therefore K = 29.1 \text{ kgf}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$$

## (使用例.D)

(使用例.C)の load-carrying fillet weld の余盛止端部にある  
亀裂が半楕円形の表面亀裂であって、右図の寸法のときの最奥点



⑧のK値を求める。

上記の2次元K値に、表3.5.3(a)の2)の $D\left(\frac{b}{t}, \frac{b}{a}\right)$ 値を乗ずる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{b}{t} = \frac{2}{20} = 0.100 \\ \frac{b}{a} = \frac{2}{8/2} = 0.500 \end{array} \right\} \Rightarrow \text{図3.5.3からの読みとりにより, } D\left(\frac{b}{t}, \frac{b}{a}\right) = 0.77$$

$$\Rightarrow \therefore K = 22.4 \text{ kgf}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$$

3.5節に関する参考文献は表3.5.6に一覧する。

## 3.6 亀裂の進展経路の選択則

平板中を亀裂が伝播する場合の経路選択則には、(1)  $\sigma_{\theta}$  最大説<sup>2), 3)</sup>、  
(2) 歪エネルギー解放率最大説<sup>4)</sup>、(3) 歪エネルギー密度ファクター最  
小説<sup>5), 6)</sup>がある。これらの説から推定される亀裂伝播経路はいく  
ぶん異なった結果を与える。しかし、疲労亀裂伝播に関する樋口  
らの実験<sup>7)</sup>、脆性破壊に関する上田ら<sup>8)</sup>、および酒井らの実験によ

ると、 $\sigma_0$ 最大説で実用上充分な精度で亀裂伝播経路が推定できるものと考えられる。 $\sigma_0$ 最大説は以下のように与えられる。

$$K_I \sin \theta + K_{II} (3 \cos \theta - 1) = 0 \text{ ----- (3.6.1)}$$

ただし

$\theta$  : 亀裂先端における亀裂の接線方向と亀裂伝播方向とのなす角

$K_I, K_{II}$  : モード I および II の応力拡大係数

構造物中の亀裂伝播経路を推定するために上式を使用するとなると、逐一、亀裂の成長にあわせて応力解析から出発し、 $K_I, K_{II}$  値を求めていかねばならず、設計段階でこのような膨大な計算をすることは非現実的であろう。8章における *case study* では、上式を使用して求められる亀裂伝播経路と、亀裂を含む材料の構造解析で得られる主応力に垂直に亀裂が伝播するとして求めた経路の比較を行っている。この検討結果では、両者の経路は比較的良く一致している。これらの結果から、対象としている亀裂と異なる他の亀裂の成長により、対象とする材料の応力分布が変化しないかぎり、(たとえば、ウェブスチフナーが切断されて、スロット周辺の応力が変化するような場合を除いて)、主応力に垂直に亀裂が伝播すると考えても大きな誤りは生じないと考えられる。したがって、上記のことを考慮して以下のように平板中の伝播経路を設定する。

[設定1] 平板中を伝播する亀裂は、亀裂ましの部材の最大主応力に垂直に伝播する。

ただし疲労亀裂の場合は変動応力成分の主応力、脆性亀裂の場合は(最大期待値の応力成分+静荷重成分)に対する主応力とする。

上記は平板中の亀裂の伝播経路に用いるものであるが、この亀裂が直交交差部材近傍に達した後、直交交差部材とのすみ肉溶接部に沿うか、直交交差部材に進入するかが問題となろう。疲労亀裂伝播試験結果によると、平板中の亀裂が直交交差部材に達し、その後すみ肉溶接部を沿うという現象は、連続的に亀裂が伝播していくのではなく、亀裂が直交交差部材に接近するにつれて、すみ肉溶接ルート部近傍の応力が上昇し、ルート部より疲労亀裂が発生・伝播し、この亀裂が平板部からの亀裂の伝播を防ぐ結果生じるものであることが判明してきている。

すなわち、平板中の亀裂と、すみ肉溶接に沿う亀裂は別個のものであり、外観上連続して亀裂が伝播しているように見えるにすぎないと思われる。したがって、脆性亀裂の伝播経路と、疲労亀裂のそれとは当然異なると考えられる。すなわち、平板中を脆性亀裂が直交交差部材に向かって突入してきた時、直交交差部材に達する以前で停止しないうえに、すみ肉溶接ルート部からの亀裂の発生・伝播は期待できないから、たとえ直交交差部材が存在

しても、すみ肉のど部と横切って、直交交差部材に亀裂が突入するものと思われる。

一方、疲労亀裂の場合、上述したように複雑な現象を呈している。したがって、すみ肉溶接部に沿うか直交交差部材に進入していくかを厳密に判定するためには、直交交差部材に亀裂が接近してくることによって生ずるすみ肉溶接部の応力再配分を考慮し、すみ肉溶接部からの疲労亀裂の発生(通常はルート部からの亀裂)寿命を求め、さらにすみ肉溶接部に沿う亀裂の伝播寿命を求め、これと直交交差部材に接近してくる疲労亀裂の寿命を比較しなければならぬ。

しかしながら、このような取扱いを行なう適当な工学的手段は現時点ではみいだせない。また、たとえ上記の取扱いができたとしても、設計段階においてこのような解析を行なうことは現実には不可能である。したがって、これまでの実験結果をふまえて設計段階において亀裂経路を判定する何らかの工学的判断手法を提示する必要がある。

このような観点から、本委員会で行なわれた実験結果、および、SR153 委員会で行なわれた実験結果を整理・解析した。その結果は、本委員会の昭和55年度報告第4.3.4項に示されている。その結果をふまえて、直交交差部材に達した疲労亀裂のその後の進路を以下のように設定する。

## 【設定2】(疲労亀裂について)

平板中を伝播してきた板厚貫通亀裂が直交交差部材に達した後、亀裂は以下のような経路をとる。すなわち直交交差部材近傍の平板の最大主応力と直交交差部材とのなす角 $\theta$ (図3.6.1参照)により以下のように設定する。

- ①  $0^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$  のとき : 直交交差部材に進入する。
- ① }  $15^\circ < \theta < 25^\circ$  のとき : 直交交差部材に進入、あるいはすみ肉溶接部に沿う。(どちらの経路に進むのがより危険か、あるいは機能喪失につながるかを考慮して、その方向に亀裂伝播経路を設定する。)
- ② }  $25^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$  のとき : すみ肉溶接部に沿う

ただし *load carrying type* のすみ肉溶接部では進路を変えずに直交交差部材へ進入する。

上記の設定はこれまでの実験結果より大胆に設定したものであり、平板の亀裂の有無に関係なく、すみ肉溶接ルート部から疲労亀裂が発生するような部材では、直交交差部材に進入することは考えられないし、また平板の亀裂の伝播寿命が極端に短い(すなわち平板中の亀裂発生点と直交交差部材とが近接している)場合は、すみ肉溶接に沿うことなく直交交差部材へ進入することも考えられる。

したがって平板の亀裂がさらに成長した場合、すぐに機能喪失に

つながると判断される場合は上記設定にこだわらず、安全側の評価となる様亀裂の径路をさだめることが現時点では必要である。

脆性亀裂が直交交差部材の前方で停止しないと判断される場合は、上述のような現象は生じないと考えられるから、以下の設定を行なう。

[設定3] 《脆性亀裂について》

直交交差部材の有無に関係なく、[設定1]のように亀裂は伝播する。また直交交差部材中に進入した亀裂も同様に取扱う。

一方、すみ肉溶接に沿って伝播する亀裂(平板からすみ肉溶接部へと径路を変えて一旦すみ肉溶接に沿った亀裂も含む)が、その後すみ肉溶接部を逸れることも考えられる。この現象に関する検討は、本委員会の昭和55年度報告、第4.3.5項に示されている。すなわち亀裂径路の設定にあたり以下の計算をあらかじめしておく。

すみ肉溶接に沿う亀裂長を $2a_1$ とし、BからAの方に亀裂が伝播する(図3.6.2参照)とし、すみ肉溶接に沿う各応力成分から以下の $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5$ を求める。

まず、すみ肉溶接部に沿う亀裂に作用するせん断応力(図3.6.2(a)参照)を

$$\tau(x_1) = \sum_{n=0}^4 C_n x_1^n \text{ ----- (3.6.2)}$$

ただし、

$x_1$ : 平板部の亀裂が直交交差部材に達した場所  
(ここではB点)を原点とする座標

$C_n$ : 応力分布を表わす定数

とおき、以下の $K_1$ を求める。

$$K_1 = \sum_{n=0}^4 \frac{1}{2} C_n^* a_1^{n+1} / \sqrt{\pi a_1} \text{ ----- (3.6.3)}$$

ただし

$$\left. \begin{aligned} C_0^* &= C_0 - C_1 a_1 + C_2 a_1^2 - C_3 a_1^3 + C_4 a_1^4 \\ C_1^* &= C_1 - 2C_2 a_1 + 3C_3 a_1^2 - 4C_4 a_1^3 \\ C_2^* &= C_2 - 3C_3 a_1 + 6C_4 a_1^2 \\ C_3^* &= C_3 - 4C_4 a_1 \\ C_4^* &= C_4 \\ \hat{k}_0 &= \pi \\ \hat{k}_1 &= \hat{k}_2 = \frac{\pi}{2} \\ \hat{k}_3 &= \hat{k}_4 = \frac{3}{8} \pi \end{aligned} \right\} \text{-----} (3.6.4)$$

次に以下の $K_p$ を求める。

$$K_p = 0.89 K_{a_2} \sqrt{\frac{a_2}{\pi(a_2 + 2a_1)(1 - \xi^2)}} [1 + (1 - \xi^2)(0.2945 - 0.3912\xi^2 + 0.7685\xi^4 - 0.9942\xi^6 + 0.5094\xi^8)] \text{-----} (3.6.5)$$

ただし

$$\xi = 0.85 a_2 / (a_2 + 2a_1)$$

$K_{a_2}$  : 平板中の亀裂が直交交差部材へ達した時点での $K$ 値

$a_2$  : 平板中の亀裂長さ

この $K_p$ 値を使用して、以下の $K_2, K_3$ を求める。(図3.6.2(b)参照)

$$\left. \begin{aligned} K_2 &= K_p \cos \theta \\ K_3 &= K_p \sin \theta \end{aligned} \right\} \text{-----} (3.6.6)$$

次にすみ肉溶接に沿う亀裂に作用する垂直応力 $\sigma(x_1)$ (図3.6.2(c)参照)を

$$\sigma(x_1) = \sum_{n=0}^4 \tilde{C}_n x_1^n \text{-----} (3.6.7)$$

ただし

$\tilde{C}_n$  : 応力分布を表わす定数

とおき、以下の $K_4$ を求める。

$$K_4 = \sum_{n=0}^4 \hat{k}_n \tilde{C}_n^* a_1^{n+1} / \sqrt{\pi a_1} \text{-----} (3.6.8)$$

ただし

$$\begin{aligned}
 \tilde{C}_0^* &= \tilde{C}_0 - \tilde{C}_1 a_1 + \tilde{C}_2 a_1^2 - \tilde{C}_3 a_1^3 + \tilde{C}_4 a_1^4 \\
 \tilde{C}_1^* &= \tilde{C}_1 - 2\tilde{C}_2 a_1 + 3\tilde{C}_3 a_1^2 - 4\tilde{C}_4 a_1^3 \\
 \tilde{C}_2^* &= \tilde{C}_2 - 3\tilde{C}_3 a_1 + 6\tilde{C}_4 a_1^2 \\
 \tilde{C}_3^* &= \tilde{C}_3 - 4\tilde{C}_4 a_1 \\
 \tilde{C}_4^* &= \tilde{C}_4 \\
 \hat{k}_0 &= \pi \\
 \hat{k}_1 &= \hat{k}_2 = \frac{\pi}{2} \\
 \hat{k}_3 &= \hat{k}_4 = \frac{3}{8}\pi
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} \tilde{C}_0^* &= \tilde{C}_0 - \tilde{C}_1 a_1 + \tilde{C}_2 a_1^2 - \tilde{C}_3 a_1^3 + \tilde{C}_4 a_1^4 \\ \tilde{C}_1^* &= \tilde{C}_1 - 2\tilde{C}_2 a_1 + 3\tilde{C}_3 a_1^2 - 4\tilde{C}_4 a_1^3 \\ \tilde{C}_2^* &= \tilde{C}_2 - 3\tilde{C}_3 a_1 + 6\tilde{C}_4 a_1^2 \\ \tilde{C}_3^* &= \tilde{C}_3 - 4\tilde{C}_4 a_1 \\ \tilde{C}_4^* &= \tilde{C}_4 \\ \hat{k}_0 &= \pi \\ \hat{k}_1 &= \hat{k}_2 = \frac{\pi}{2} \\ \hat{k}_3 &= \hat{k}_4 = \frac{3}{8}\pi \end{aligned}} \right\} \text{----- (3.6.9)}$$

最後に亀裂先端A点に作用している, すみ肉溶接線に垂直な応力 $\sigma_n$  [(3.6.7)式で $x_1=2a_1$ とした値に相当する.]と, すみ肉溶接に作用しているせん断応力 $\tau_n$  [(3.6.2)式で $x_1=2a_1$ とした値に相当する.]より

$$K_5 = (\sigma_n + \tau_n) \sqrt{(t_1 + 2Le) \tan \frac{\pi a}{t_1 + 2Le}} \quad \text{----- (3.6.10)}$$

ただし,

$t_1$ : 平板部の板厚

$Le$ : すみ肉溶接脚長

$2a$ : すみ肉溶接末溶接部の長さ

以上の $K_1 \sim K_5$ を使用して, 疲労亀裂伝播径路を以下のように設定する。

#### [設定4] 《疲労亀裂について》

すみ肉溶接部に沿って伝播している亀裂のその後の径路は,

$(K_1 + K_2) / (K_3 + K_4 + K_5) \geq 2.1$  のとき: 亀裂前方の最大主応力の法線方向に亀裂が逸れる。

$(K_1 + K_2) / (K_3 + K_4 + K_5) \leq 1.9$  のとき: すみ肉溶接部に沿って亀裂は伝播しつづける。

$2.1 > (K_1 + K_2) / (K_3 + K_4 + K_5) > 1.9$  のとき : 上記のいずれかとなる。

(どちらの径路がより危険か、あるいは機能喪失につながるかを考慮して、その方向に径路を設定する。

上記の結果は数少ない実験結果をもとに決定したものであり、まだまだ検討を要する箇所が残っている。今後、より合理的な判定基準を導出するためにさらに多くの実験が必要と思われる。

また直交交差部材に進入した亀裂は表面亀裂状に伝播し、直交交差部材の裏面に達する。直交交差部材に進入してから直交交差部材を貫通するまでは、亀裂が板表面に対し斜めに伝播していく場合でも、垂直に伝播したと仮想的に考える。この区間は構造全体から考えると非常に短いため、後の亀裂伝播径路を大きく変えることはないと判断でき、さらには安全側の評価という観点から下記のように設定する。

#### [設定5]

直交交差部材に進入した亀裂は、直交交差部材を横切るまでは直交交差部材の板表面に対して垂直に伝播し、裏面のすみ肉溶接部を横切り、裏面の平板部に伝播していく。

以上の設定1～5によって亀裂伝播径路を一応推定することができる。亀裂伝播径路については上述のように研究も少なく、特に直交交差部材を含むような複雑な構造要素については非常に難しい問題が存在する。そのため一般的な形であるいは理論的な形で、これらを評価することは現状ではできない。

しかしながら、上記設定によって損傷実績を解析した場合、7章に示すようにほぼ妥当な結果を与えているようである。

## 参考文献

- 1) 日本造船研究協会 第153研究部会, 厚鋼板大入熱溶接継手の脆性破壊強度および疲労強度に関する研究報告書 II, 研究資料 No. 267-2 (昭.52.3)
- 2) F. Erdogan and G.C. Sih, On the Crack Extension in Plates under Plane Loading and Transverse Shear, Trans. ASME, Jour. Basic Eng., 85D (1963), p.519
- 3) J.G. Williams and P.D. Ewing, Fracture under Complex Stress of the Angled Crack Problem, Int. Jour. Fract. Mech., 8 (1972), p.441
- 4) G.C. Sih, Some Basic Problems in Fracture Mechanics and New Concepts, Eng. Fract. Mech., 5 (1973), p.365
- 5) G.P. Anderson, V.L. Ruggles and G. Stibor, Use of Finite Element Computer Programs in Fracture Mechanics, Int. Jour. Fract. Mech., Vol. 7, No. 1 (1971), p.63
- 6) R.J. Nuismer, An Energy Release Rate Criterion for Mixed Mode Fractures, Int. Jour. Fract., 11 (1975), p.245
- 7) 樋口, 川原, 近藤, 栗原, 2次元き裂の進展シミュレーション, 日本造船学会論文集 第139号 (昭.51.6), p.221
- 8) 上田, 池田, 矢尾, 青木, 吉江, 白倉, ニ方向荷重下での脆性破壊発生特性, 日本造船学会論文集 第139号 (昭.51.6), p.240
- 9) 酒井, 阪野, 混合モード状態における脆性破壊発生に関する考察, 日本造船学会論文集 第139号 (昭.51.6), p.257

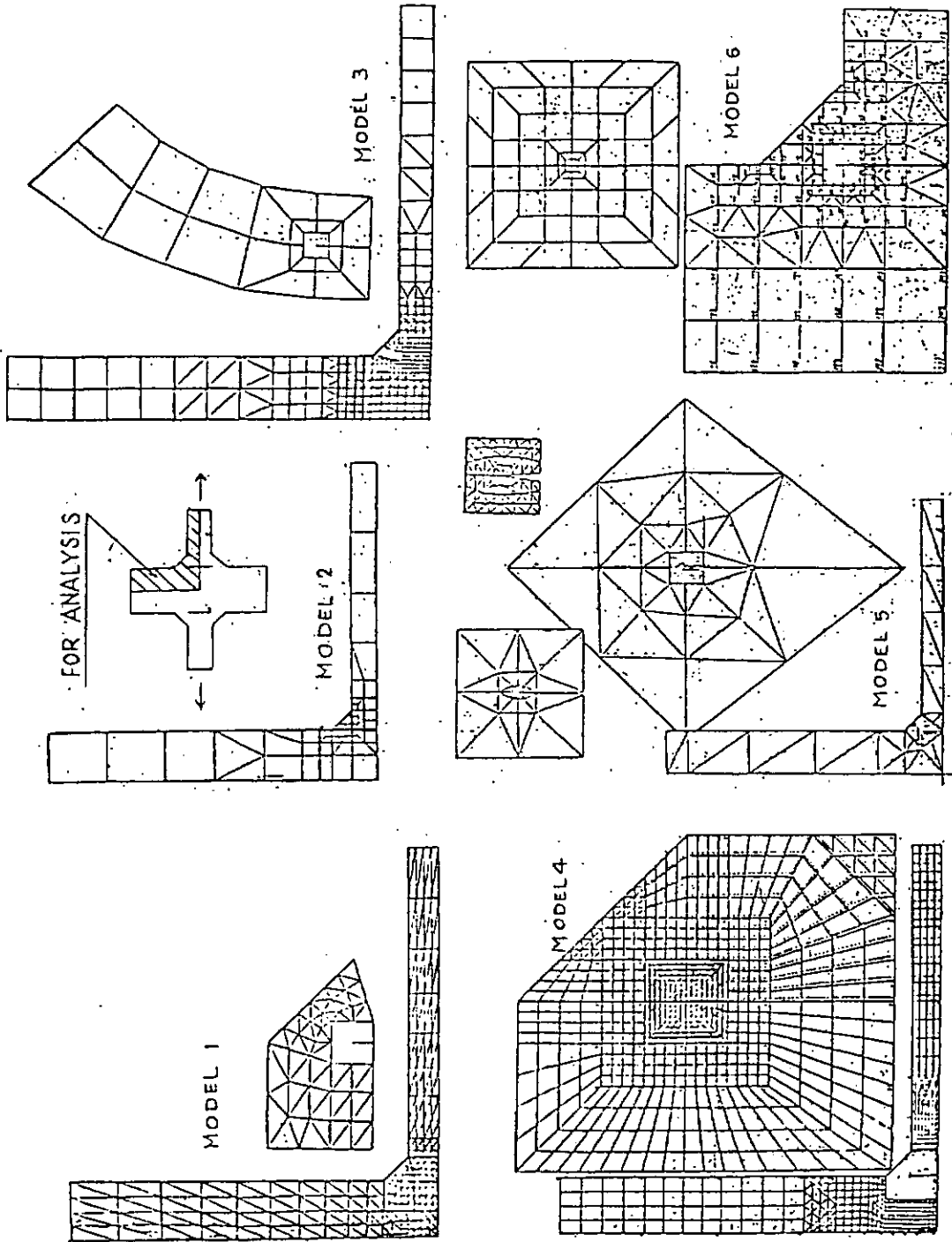
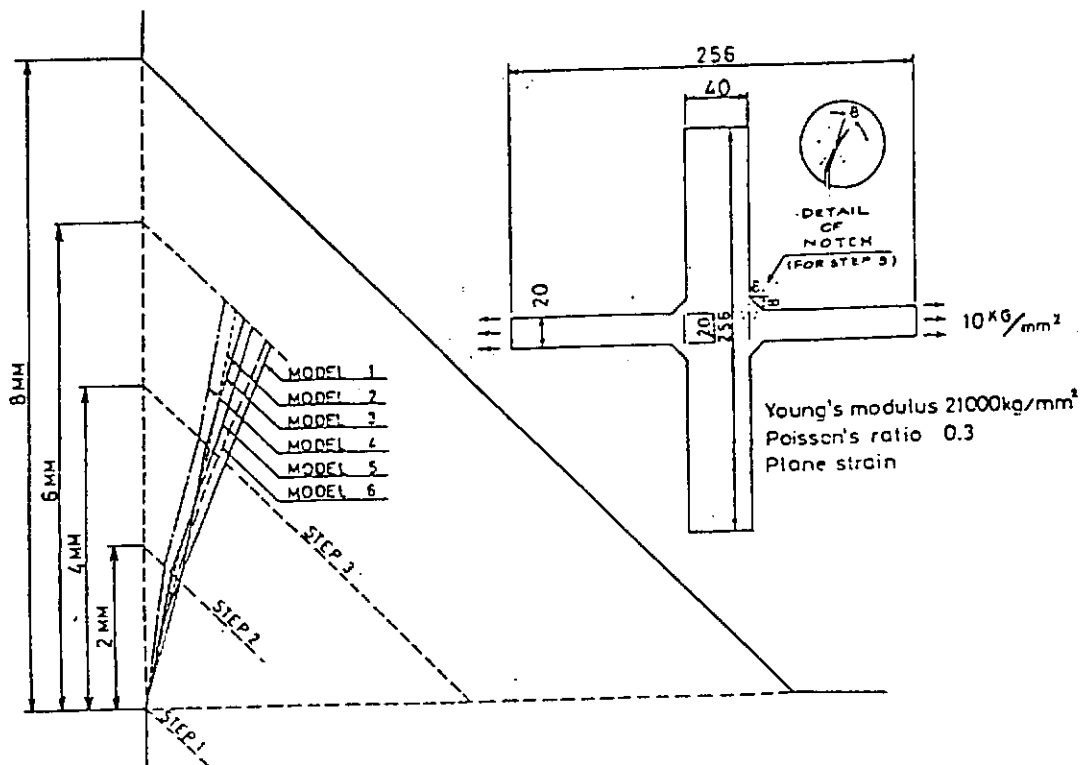


図 3.1.1 各種計算モデル

表3.1.1 各種計算結果の比較

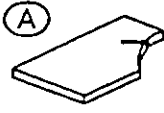
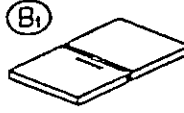
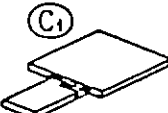
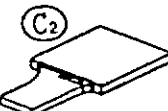
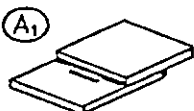
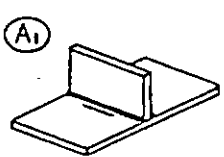
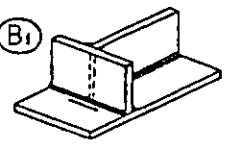
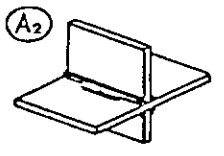
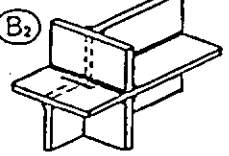
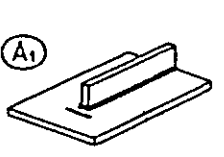
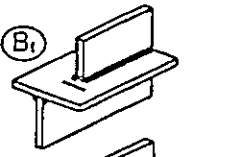
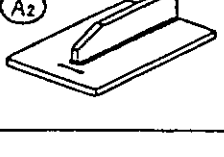
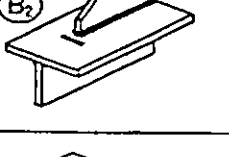
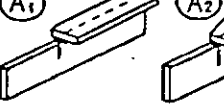
| 計算<br>モデル | 理論解析                  |                             |                   | STEP 1            |                      |                    | STEP 2            |                      |                    | STEP 3            |                      |                    |
|-----------|-----------------------|-----------------------------|-------------------|-------------------|----------------------|--------------------|-------------------|----------------------|--------------------|-------------------|----------------------|--------------------|
|           | 有限要素                  |                             | K値の<br>求め方        | $K_I$<br>KG/MM/MM | $K_{II}$<br>KG/MM/MM | $\theta$<br>DEGREE | $K_I$<br>KG/MM/MM | $K_{II}$<br>KG/MM/MM | $\theta$<br>DEGREE | $K_I$<br>KG/MM/MM | $K_{II}$<br>KG/MM/MM | $\theta$<br>DEGREE |
|           | 先端の特性                 | 周辺の要素                       |                   |                   |                      |                    |                   |                      |                    |                   |                      |                    |
| MODEL 1   | WALSH<br>の要素          | 定歪型<br>3角形                  | 特異要素              | 56.3              | 9.04                 | -17.4              | 71.1              | -2.87                | -4.61              | 95.1              | -0.52                | 0.63               |
| MODEL 2   | アイソパ<br>ナトリック<br>の特異性 | アイソパ<br>ナトリック<br>要素         | 特異要素              | 54.2              | 6.80                 | -13.9              | 78.8              | 1.85                 | -2.67              | 109.9             | -5.63                | 5.84               |
| MODEL 3   | WALSH<br>の要素          | PIAN<br>4角形                 | 特異要素              | 56.2              | 9.36                 | -18.0              | 71.6              | -4.17                | 6.63               | 93.5              | 6.27                 | -7.61              |
| MODEL 4   | 特異性<br>なし             | PIAN<br>4角形と<br>定歪型<br>3角形  | 解析解<br>との重ね<br>合せ | 59.6              | 4.80                 | -9.1               | 80.1              | -1.6                 | 2.30               | 104.1             | 4.50                 | -4.90              |
| MODEL 5   | 特異性<br>なし             | 定歪型<br>3角形                  | 直接法               | 52.5              | 7.20                 | -15.2              | 68.2              | 1.7                  | -2.89              | 89.5              | 3.70                 | -4.72              |
| MODEL 6   | 特異性<br>なし             | PIANの<br>4角形と<br>定歪型<br>3角形 | 解析解<br>との重ね<br>合せ | 56.3              | 6.83                 | -13.3              | 79.1              | 4.79                 | -6.86              | 116.1             | -2.01                | 1.99               |



| 分類の<br>破壊様式 |    | 部分構造 | 構造要素 | 部材要素 | 基本要素 |
|-------------|----|------|------|------|------|
| 疲労亀裂        | 発生 | —    | —    | —    | ◎    |
|             | 伝播 | —    | ○    | ◎    | ○    |
|             | 停止 | —    | ◎    | ◎    | —    |
| 脆性不安定亀裂     | 発生 | —    | —    | ◎    | ◎    |
|             | 伝播 | ○    | ◎    | ○    | —    |
|             | 停止 | ◎    | ◎    | —    | —    |

◎：主たる検討対象となるもの  
○：問題となる可能性のあるもの

表 3.2.2 基本要素の種類

| 区分                             | 概形                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 備考                                                            |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| ①<br>母材(板中)部<br>および<br>突合継手部   |   <br>  | (B <sub>1</sub> ) については<br>3.5 節を参照                           |
| ②<br>ラップ継手部<br>および<br>板厚不連続部   |                                                                                                                                                                        |                                                               |
| ③<br>T 継手部<br>および<br>十字継手部     |  <br>                                                                                | (A <sub>1</sub> ) および (A <sub>2</sub> )<br>については 3.5 節<br>を参照 |
| ④<br>スファインド部<br>方スファインド部<br>など |  <br>                                                                                | (A <sub>1</sub> ), (B <sub>1</sub> ) につい<br>ては 4 章を参照         |
| ⑤<br>スライブ-エンド<br>部 など          |                                                                                                                                                                                                                                                            | (A <sub>1</sub> ) については<br>4 章を参照                             |

(注) —：亀裂を示す

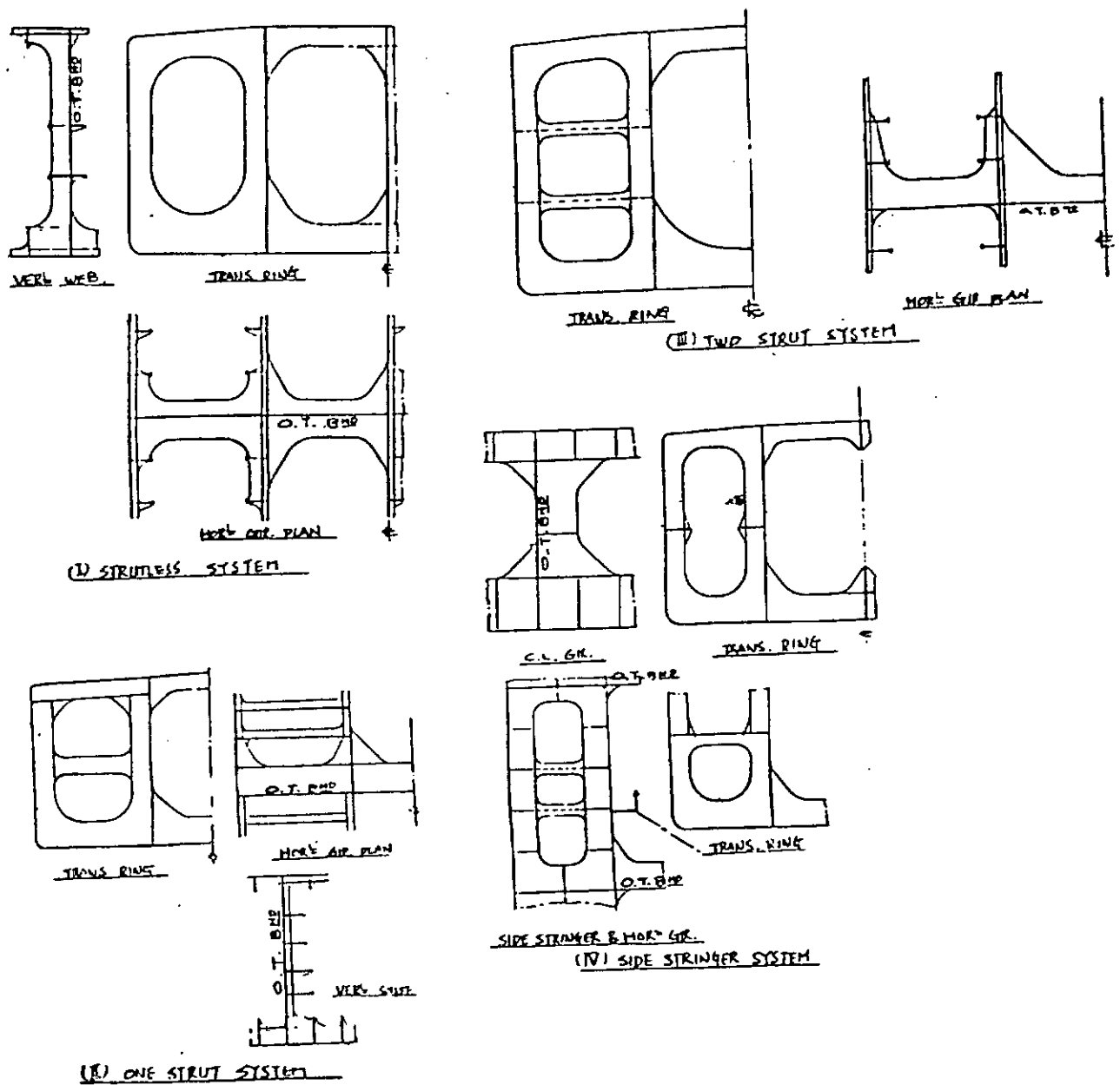


図3.2.1 オイルタンカーの構造分類 (その1)



表3.2.3(b) オイルタンカーの構造分類 (その3)

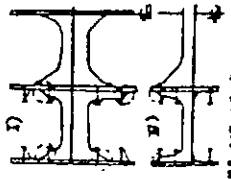
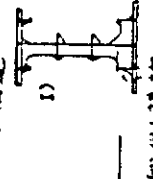
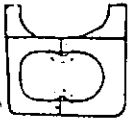
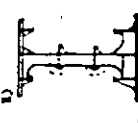
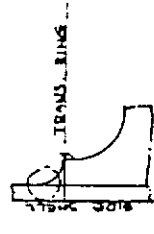
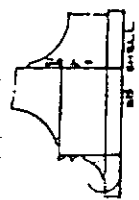
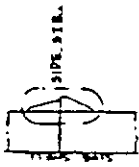
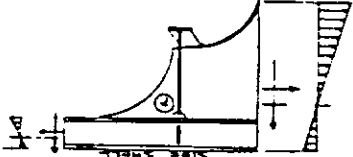
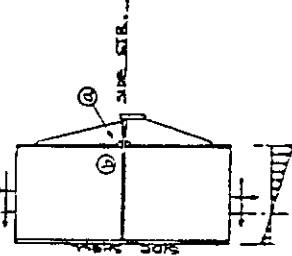
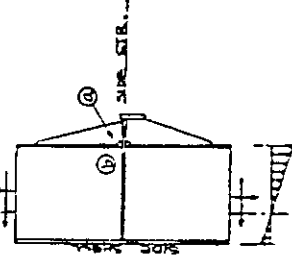
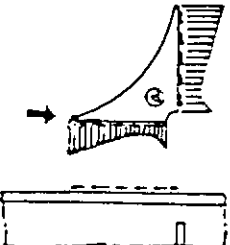
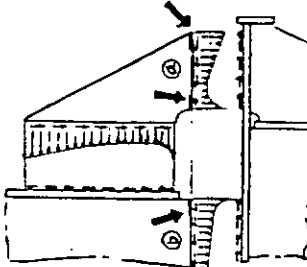
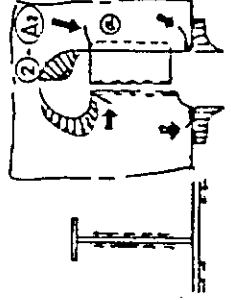
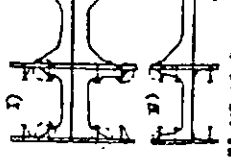
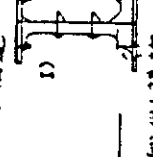
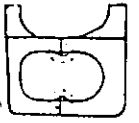
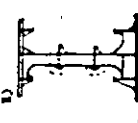
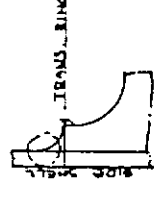
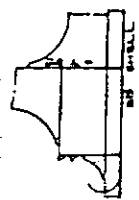
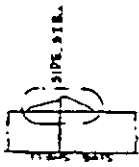
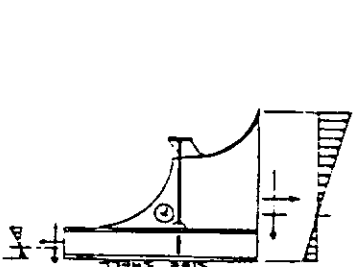
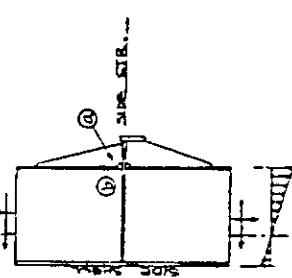
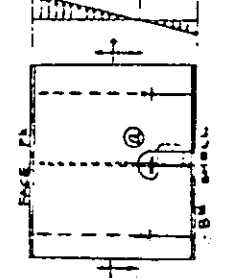
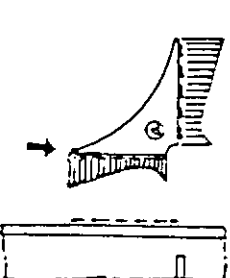
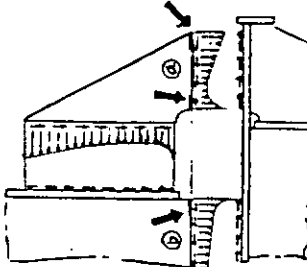
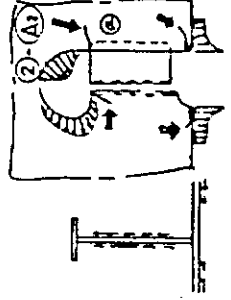
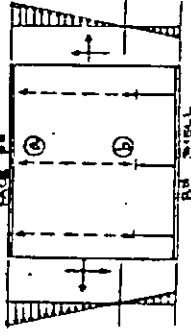
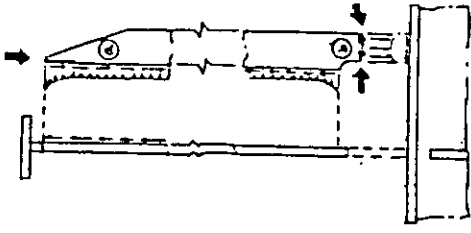
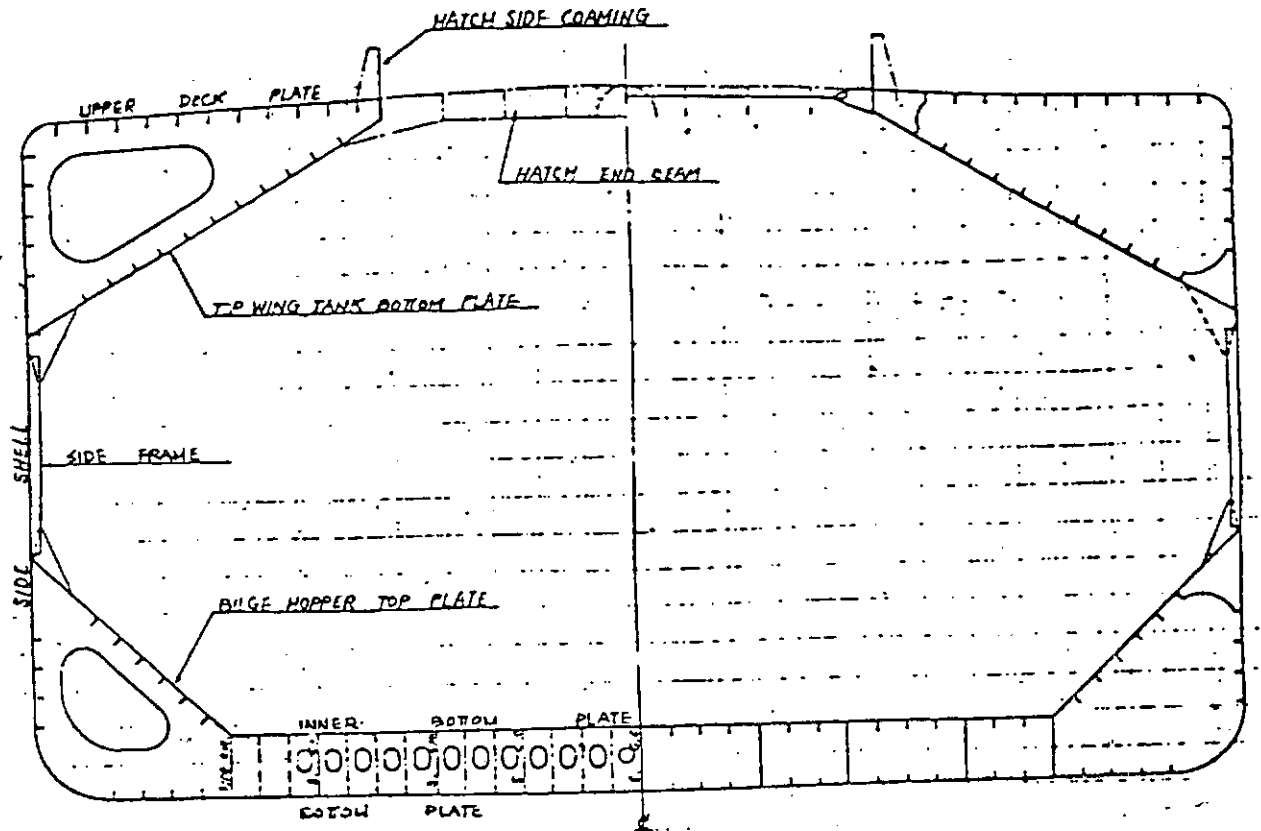
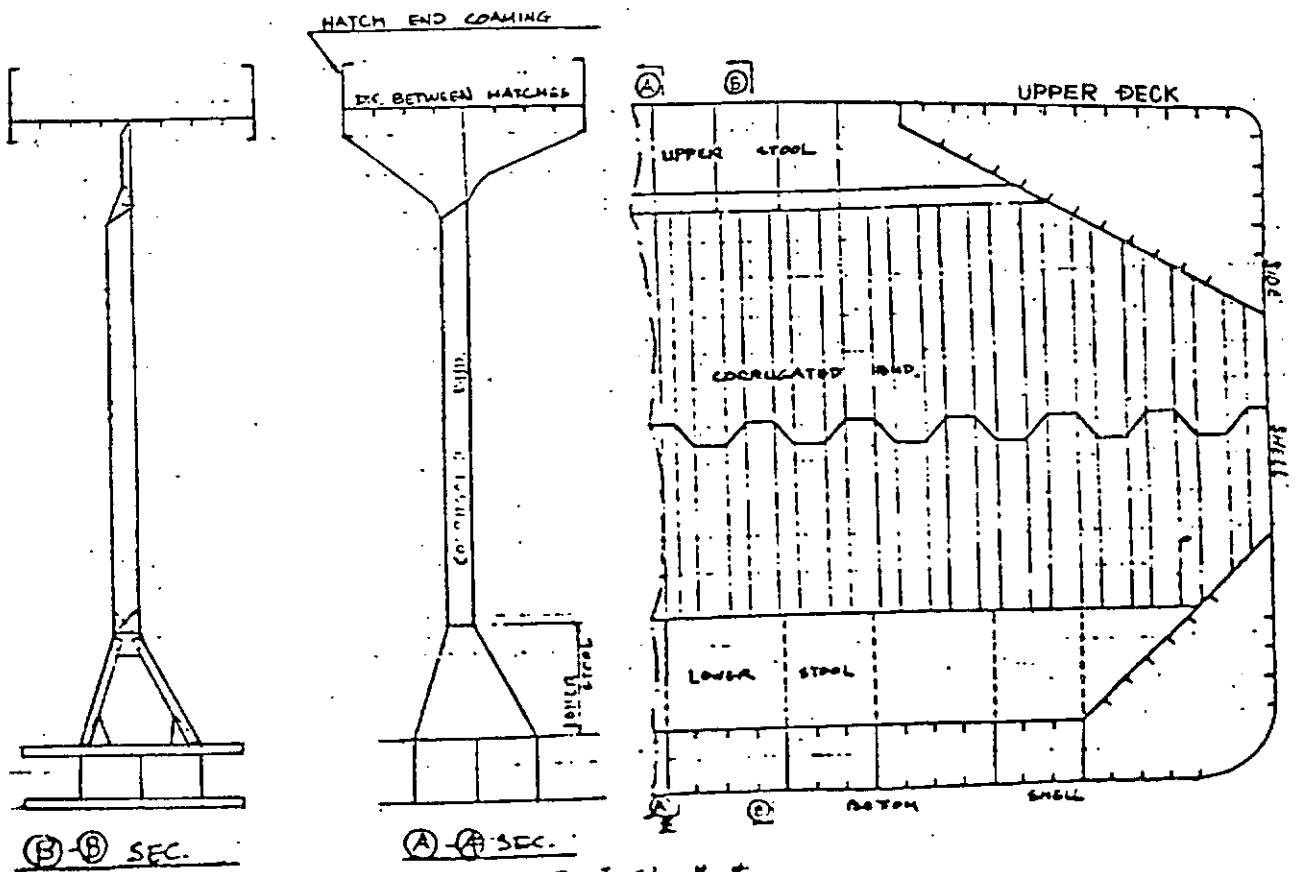
| 対象構造                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 部分構造                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 構造要素<br>(油艀と内部たけー概略表示)                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 部材要素<br>(局部たけ表示—たけ要素—)                                                                                                                                                                                                                                         | 備考 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 水平横たけ構造<br><br>縦たけ構造<br><br>船体側横たけ<br><br>縦たけ構造<br> | 水平横たけ端部耐板<br><br>縦たけ端部耐板<br><br>船体側横たけと水平たけとの交叉部<br> | <br>水平横たけ端部耐板<br><br>船体側横たけと水平たけとの交叉部<br>      | <br><br> |    |
| 甲板横たけ<br><br>船底横たけ<br><br>船体側横たけ<br><br>縦たけ構造<br>   | 甲板横たけ<br><br>船底横たけ<br><br>船体側横たけ<br>                 | <br>甲板横たけのロール貫通スロット<br><br>船底横たけのロール貫通スロット<br> | <br><br> |    |

表3.2.3(C) オイルタンカーの構造分類 (その4)

| 対象構造                       | 部分構造                                 | 構造要素<br>(注別カと内記カの一般記を示)<br>例. 船体構造の防浸材等                                            | 部材要素<br>(局部応力表示一応力表示一)                                                            | 備考 |
|----------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 甲板構造<br>船名構造<br>船側構造<br>堅固 | 甲板構造<br>船名構造<br>船側構造<br>堅固<br>※の防浸材等 |  |  |    |



中央横断面



横置筒型構造

図3.2.2 バルクキャリアーの構造分類 (その1)

表3.2.4(a) バルクキャリアーの構造分類(その2)

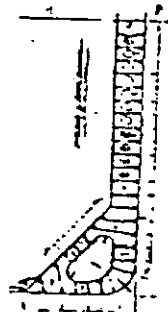
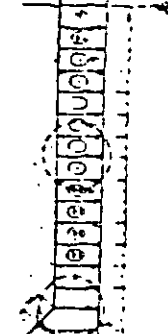
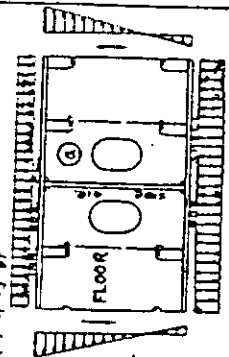
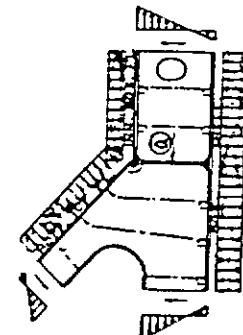
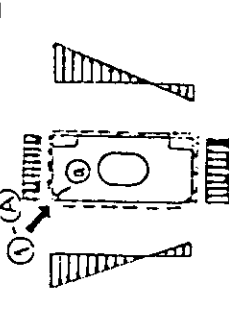
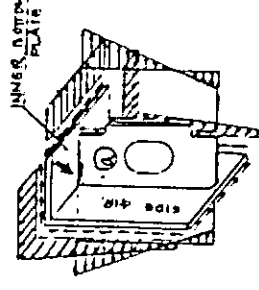
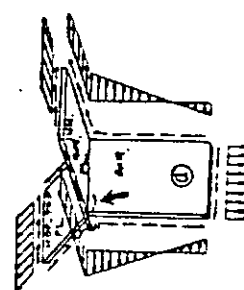
| 対象構造                                                                                                             | 部分構造                                                                                              | 構造要素<br>(境界カと内部カの一般表示)<br>(1) 基礎部                                                                                                                                                          | 部材要素<br>(局部カと一般カの表示)<br>(2) 基礎部                                                                                                                                                                                                                        | 基本要素・荷重                                                                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| <p>I. 鉛倉部構造<br/>1. 工重部構造</p>  | <p>りー銀工重部</p>  |  <p>(2) 水→パ→セの交換部</p>  |    | <p>基本要素・荷重</p> <p>①: 疲劣電圧と想定箇所<br/>②: 基本要素番号<br/>8.1節参照</p> <p>7.5節参照</p> |



表3.2.4(C) バルクキャリアーの構造分類 (その4)

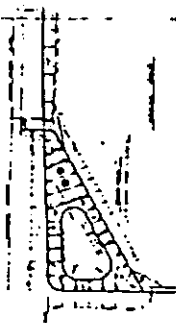
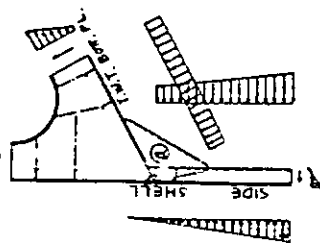
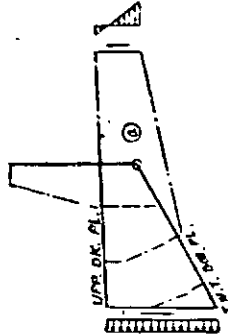
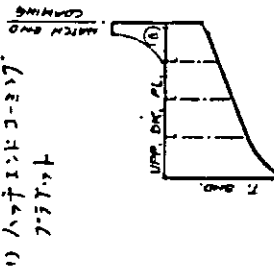
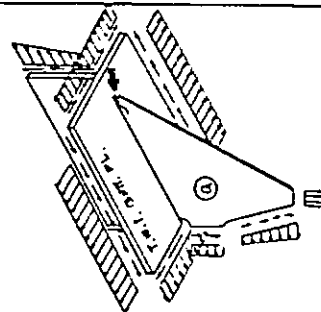
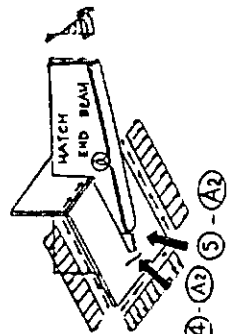
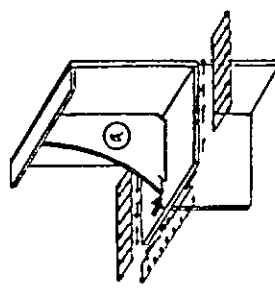
| 対象構造                                                                                               | 部分構造                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 構造要素<br>(地盤と内部たか一般の表示)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 部材要素<br>(局部たか表示—たか集中—)                                                                                                                                                                                                                                   | 基本要素・荷重 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| <p>3. 甲板構造</p>  | <p>2) 上甲板</p>  <p>1) ハッチ開口甲板部</p>  <p>2) ハッチコ-トング</p>  | <p>(1) サイドフレームのエンドブラケット</p>  <p>(1) ハッチエンドビームエンド</p>  <p>(1) ハッチエンドコ-トング<br/>フ-テクト</p>  |    |         |

表3.2.4 (d) バルグキャリヤーの構造分類 (その5)

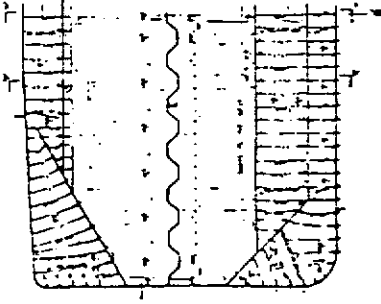
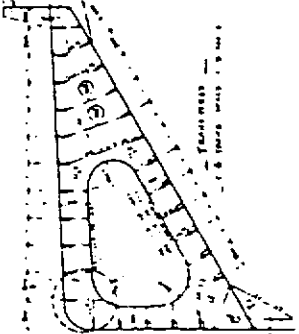
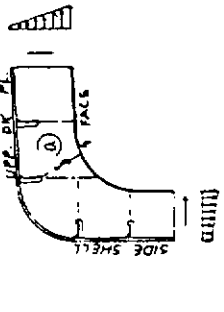
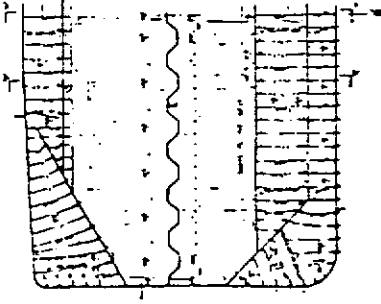
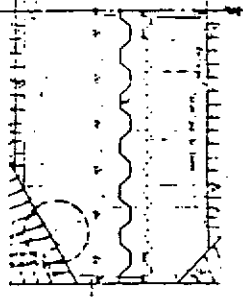
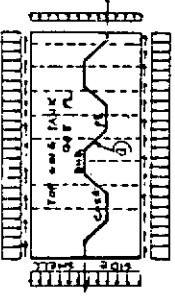
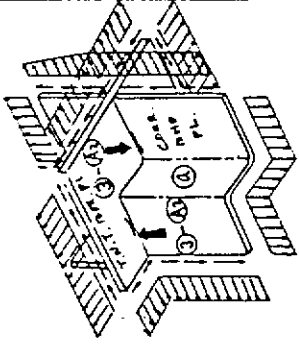
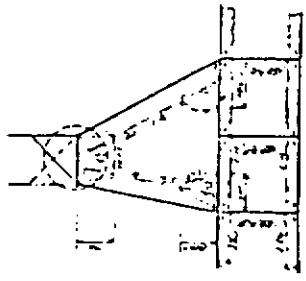
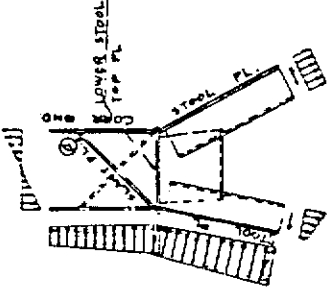
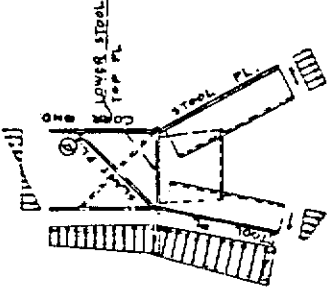
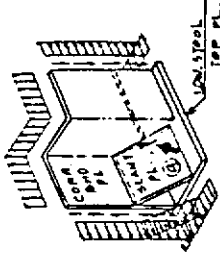
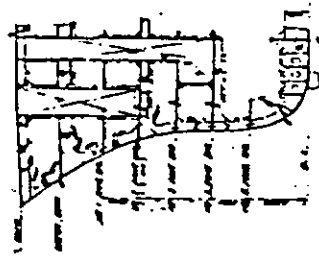
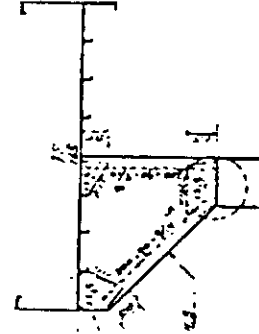
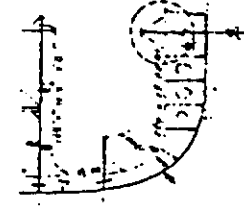
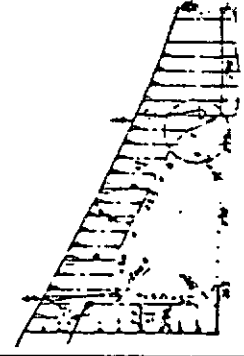
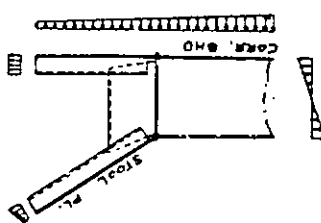
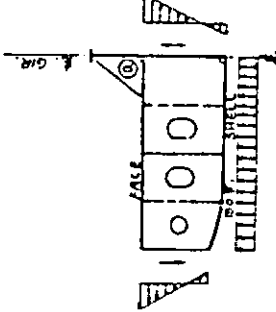
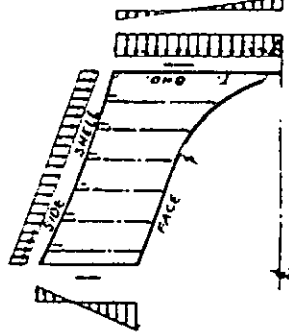
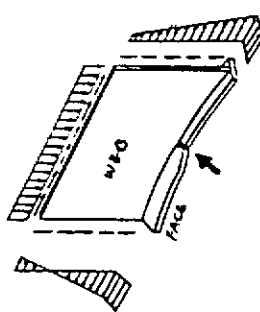
| 対象構造                                                                                                      | 部分構造                                                                                                         | 構造要素<br>(境界カと内部材カ一般の表示)                                                                                | 切取要素<br>(局部応力表示一カカサ一)                                                               | 基本要素・荷重 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| <p>4 隔壁構造</p>         | <p>3). トップウエッジ</p>        | <p>(1) トップエッジ</p>    |    |         |
| <p>1 隔壁構造</p>         | <p>1) 波形隔壁部</p>          | <p>(1). トップウエッジ</p>  |    |         |
| <p>2) ストール (下部)</p>  | <p>(2) 波形隔壁とスローバース部</p>  |                    |  |         |

表3.2.4(e) バルクキャリアーの構造分類 (その6)

| 対象構造                                                                                                | 部分構造                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 構造要素<br>(主材と内材の配置を示す)                                                                                                                                                                                                                                            | 抑圧要素<br>(局部応力要素 - 応力集中 -)                                                                                                  | 基本要素・荷重                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| <p>Ⅱ. 船首部構造</p>  | <p>2). ストール(上部)</p> <br><p>1) 船底構造</p> <br><p>2) 船側構造</p>  | <br><br> | <p>1, 2). (a) 1/10/7/735.1.4<br/>RV</p>  | <p>8.3 節参照<br/>8.4 節参照</p> |



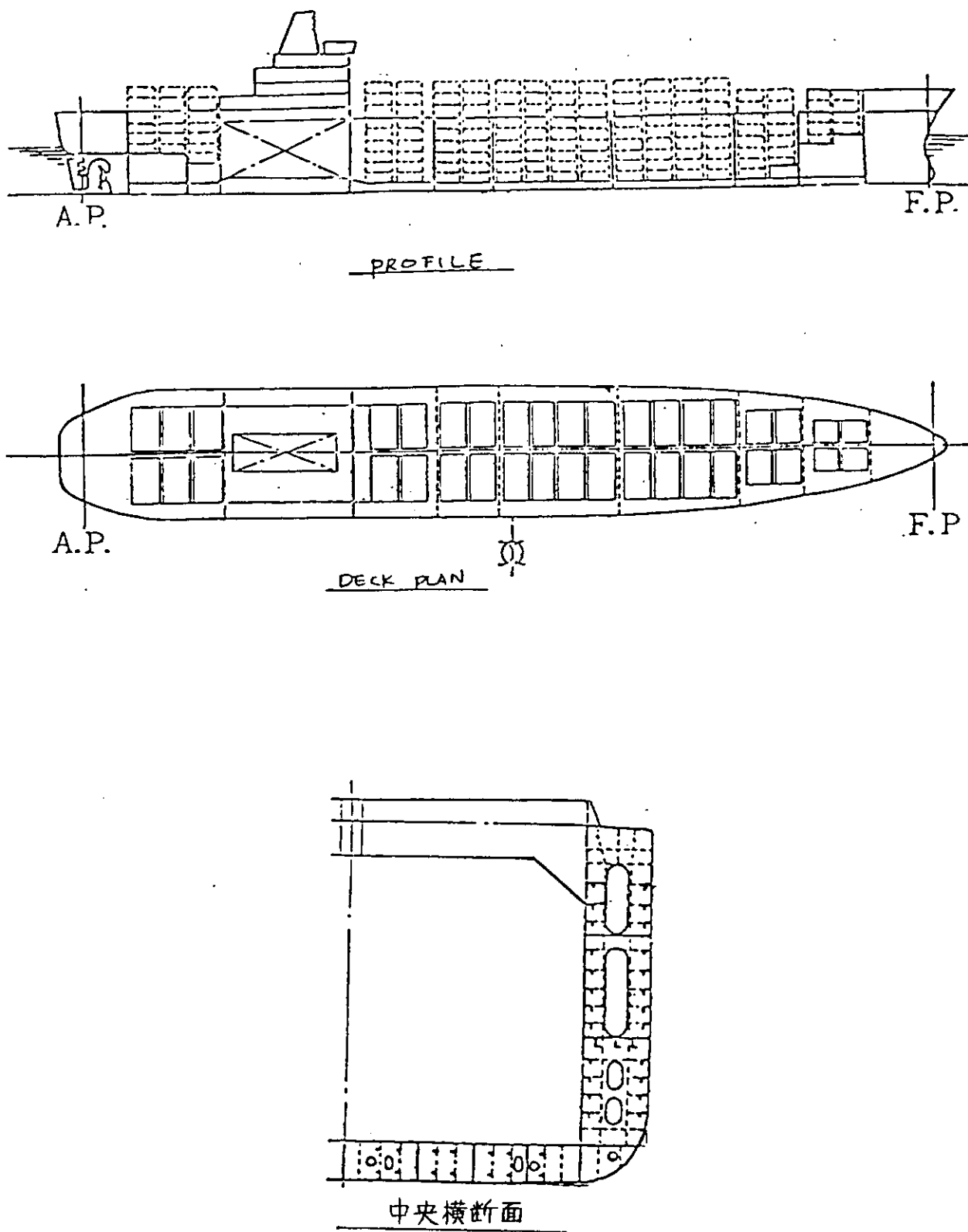


図3.2.3 コンテナ船の構造分類 (その1)

表3.2.5(Q) コンテナ船の構造分類(その2)

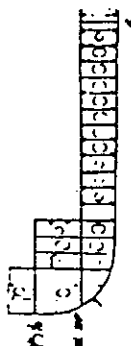
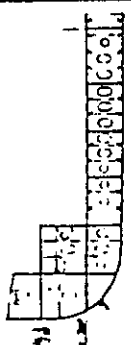
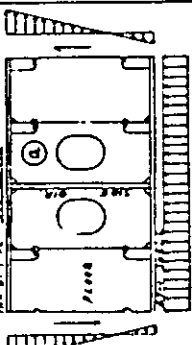
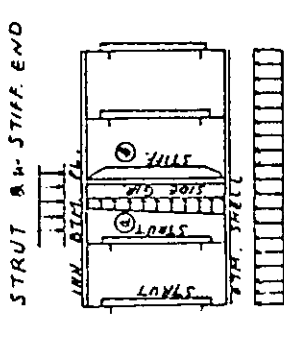
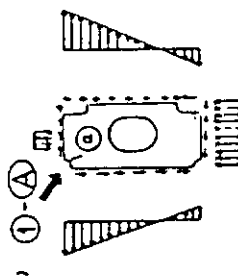
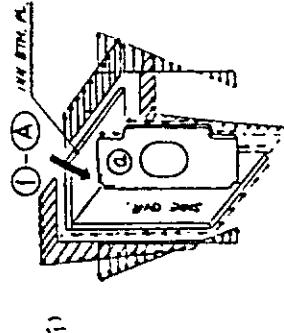
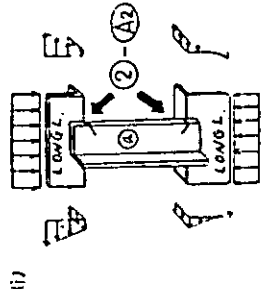
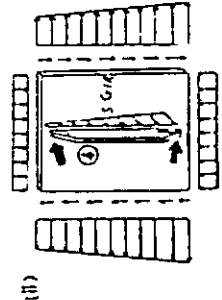
| 対象構造                                                                                                                | 部分構造                                                                                                 | 構造要素<br>(境界力:内郭をカ一製切要素)                                                                                                                                                                                          | 部系要素<br>(局部能力表示一応力集中一)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 丙 号                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| <p>I. 船艙部構造</p> <p>1. 二重底構造</p>  | <p>1) 一般二重底部</p>  | <p>平行部</p> <br> <p>STRUT AND STIFF. END</p> | <p>(i) ①-A</p>  <p>(ii) ①-A</p>  <p>(i) ②-A</p>  <p>(ii) ②-A</p>  | <p>8.1節参照</p> <p>4章参照</p> |

表3.2.5 (b) コンテナ船の構造分類 (その3)

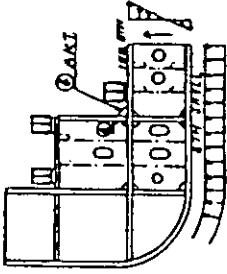
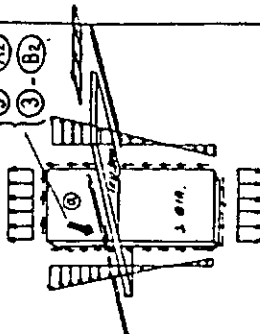
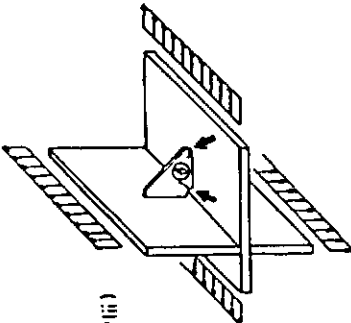
| 対象構造 | 部分構造 | 構造要素<br>(船外カマ内船カマ一別列要素)                                                                             | 部材要素<br>(内船カマ表示一船カマ中一)                                                                                                                                                                                                | 備考 |
|------|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
|      |      |  <p>デッキ部との結合部</p> |  <p>(i) 平行部への例示<br/>③-A2<br/>③-B2</p>  <p>(iii)</p> |    |

表3.2.5(C) コンテナ船の構造分類 (その4)

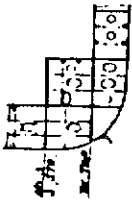
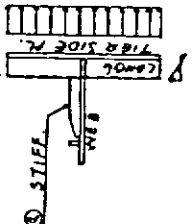
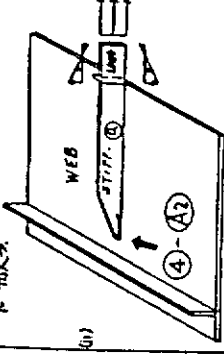
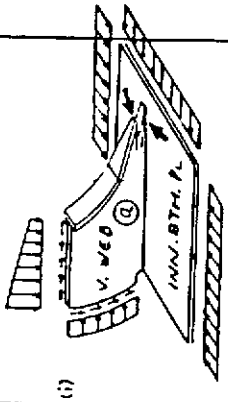
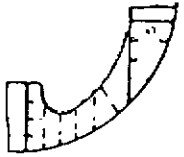
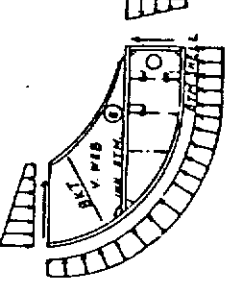
| 対象構造               | 部分構造                                                                                           | 構造要素<br>(境界力と内部モーメント要素)                                                                                                                                      | 主要要素<br>(荷重伝達系 - 応力集中 -)                                                                                                                                                                                                                     | 備考                           |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| 2 船側構造<br>二重底構造と舷側 | 2) ビルジ部<br> | <br>STIFF. の SNIP END                                                      | (1) SIDE GIRTH STIFF. は 平行部<br>に 設け<br><br>(2) 平行部とビルジ部<br>との 結合部 上 付設<br> | 4章参照<br><br>7.5節参照<br>7.6節参照 |
|                    |             | TIER TOP PL & LONG. BMD との 結合部 原<br>BKT<br><br>VERTICAL WEB の BKT TOE<br> |                                                                                                                                                                                                                                              |                              |

表3.2.5(d) コンテナ船の構造分類(その5)

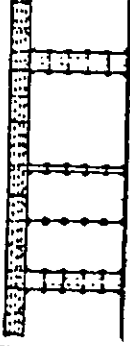
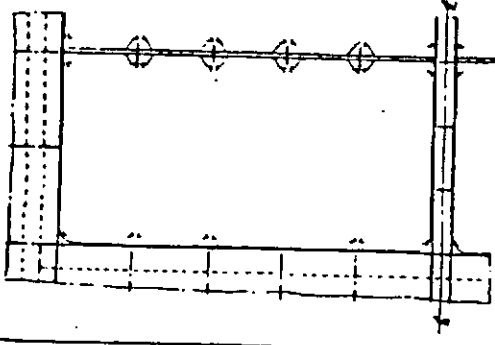
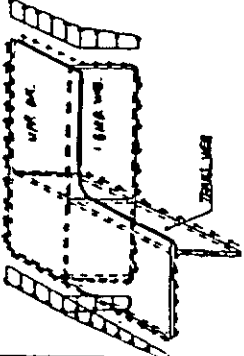
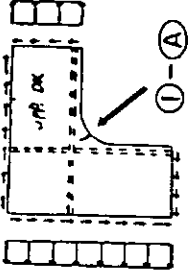
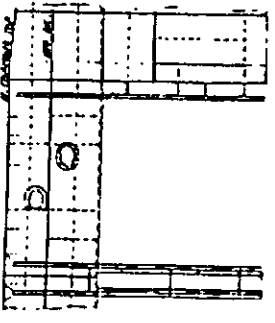
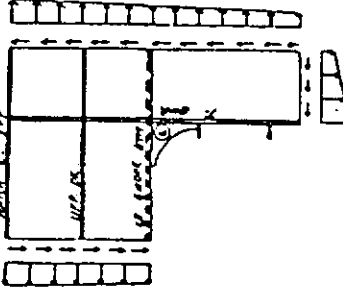
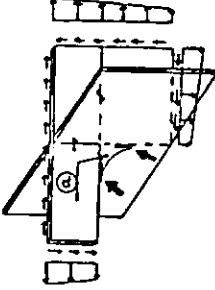
| 対象構造                                                                                               | 部分構造                                                                                                           | 構造要素<br>(構造要素の一部分を示す)                                                                                           | 部材要素<br>(部材要素を示す - 集中部 -)                                                           | 備考 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <p>3. 甲板構造</p>  | <p>1) HATCH OPENING</p>     | <p>HATCH OPENING CORNER</p>   |    |    |
|                                                                                                    | <p>2) CR. DK. GIRDER</p>  | <p>CR. DK. GIRDER 下部部材</p>  |  |    |

表3.2.5(e) コンテナ船の構造分類(その6)

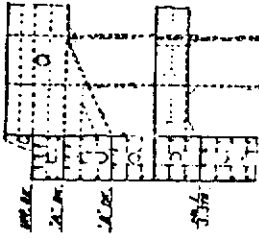
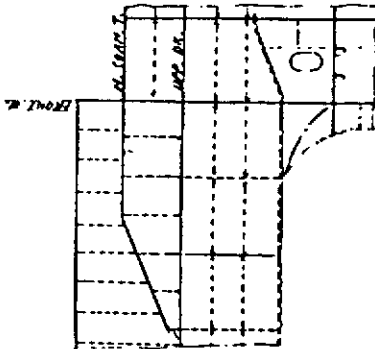
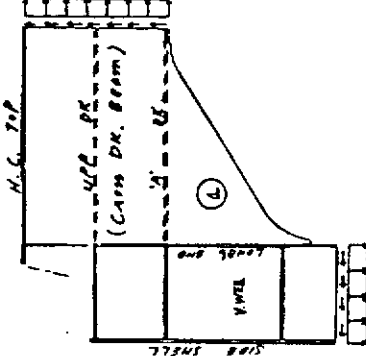
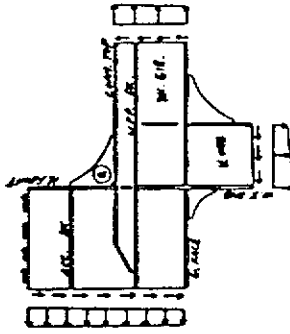
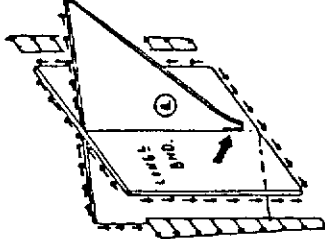
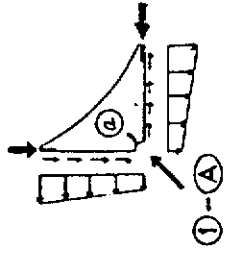
| 対象構造 | 部分構造                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 構造要素<br>(境界力と内部応力の取組要素)                                                                                                                                                | 部材要素<br>(内部応力の表示 - 応力集中 -)                                                                                                                                           | 備考 |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
|      | <p>3) CROSS DECK BEAM と横側桁の組合せ部。</p>  <p>4) HOUSE FRONT &amp; MATH SIDE COAM.<br/>A U' DECK LONG GIR. との組合せ部。</p>  |   |   |    |

表3.2.5(f) コンテナ船の構造分類 (その7)

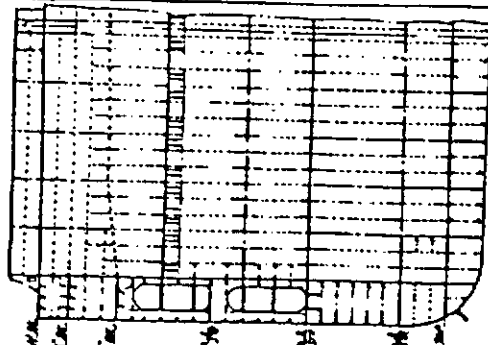
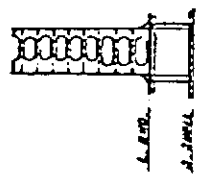
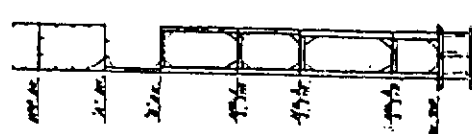
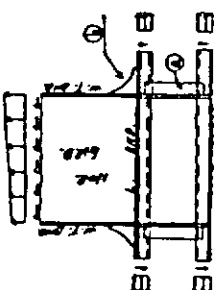
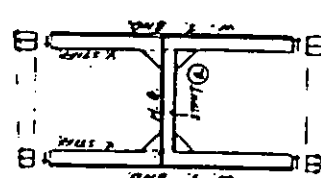
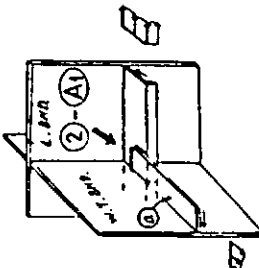
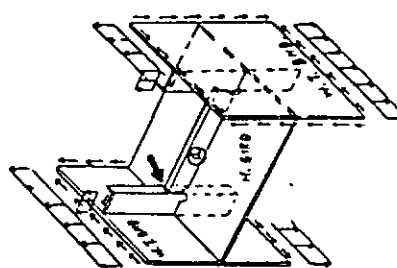
| 対象構造                                                                                                                                 | 部分構造                                                                                                                                                                                                                              | 構造要素<br>(境界力・内部応力・拘束)                                                                                                                                                  | 部材要素<br>(拘束力表示・応力集中)                                                                                                                                                                                                                                         | 備考 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <p>4. 隔壁構造</p> <p>FRIS 4 W.T. &amp; O.T. BND</p>  | <p>1) ADDITIONAL GIRDER</p>  <p>2) ORDINARY STIFFENER</p>  |   |  <p>⑤ 13 3. 甲板構造 4) H. Front 2<br/>H. side Gearing 5) Deck Long. G.<br/>2. 板金部 1. 板金</p>  |    |

表3.3.1 外荷重の種類

|     |               | 荷重の性質    |          |            | 荷重速度 |     |    | 20年間の<br>繰返し数    | 主たる対象部材   |           |      |
|-----|---------------|----------|----------|------------|------|-----|----|------------------|-----------|-----------|------|
|     |               | 一定<br>荷重 | 一定<br>変動 | 2-74<br>変動 | 低周波  | 高周波 | 衝撃 |                  | 縦強度<br>部材 | 横強度<br>部材 | 二次部材 |
| 平水中 | 静水中荷重         | ○        | ○        |            | ○    |     |    | 300~400          | ○         | ○         |      |
| 波浪中 | 波浪外力          |          |          | ○          | ○    |     |    | $10^7 \sim 10^8$ | ○         | ○         |      |
|     | Sloshing(横揺れ) |          |          | ○          | ○    |     | ○  |                  |           | ○         |      |
|     | Slamming      |          |          | ○          |      |     | ○  | $\sim 10^6$      | ○         | ○         | ○    |
|     | Springing     |          | ○        |            |      | ○   |    |                  | ○         |           |      |
| 振動  | 船体振動          |          | ○        |            |      | ○   |    |                  | ○         |           |      |
|     | 局部振動          |          | ○        |            |      | ○   |    |                  |           | ○         | ○    |
| その他 | 熱応力           | ○        | ○        |            | ○    |     |    | $10^4$           | ○         |           | ○    |
|     | 残留応力          | ○        |          |            |      |     |    |                  |           |           | ○    |

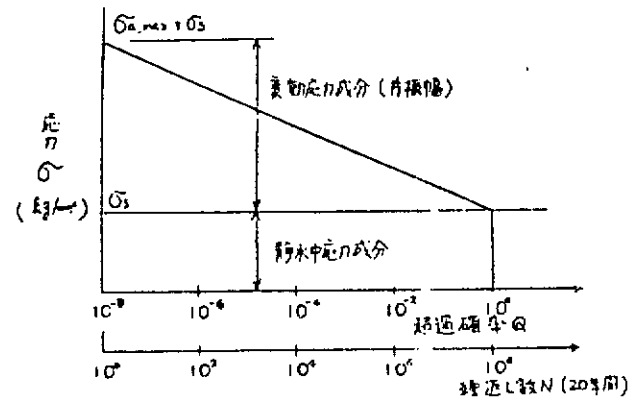
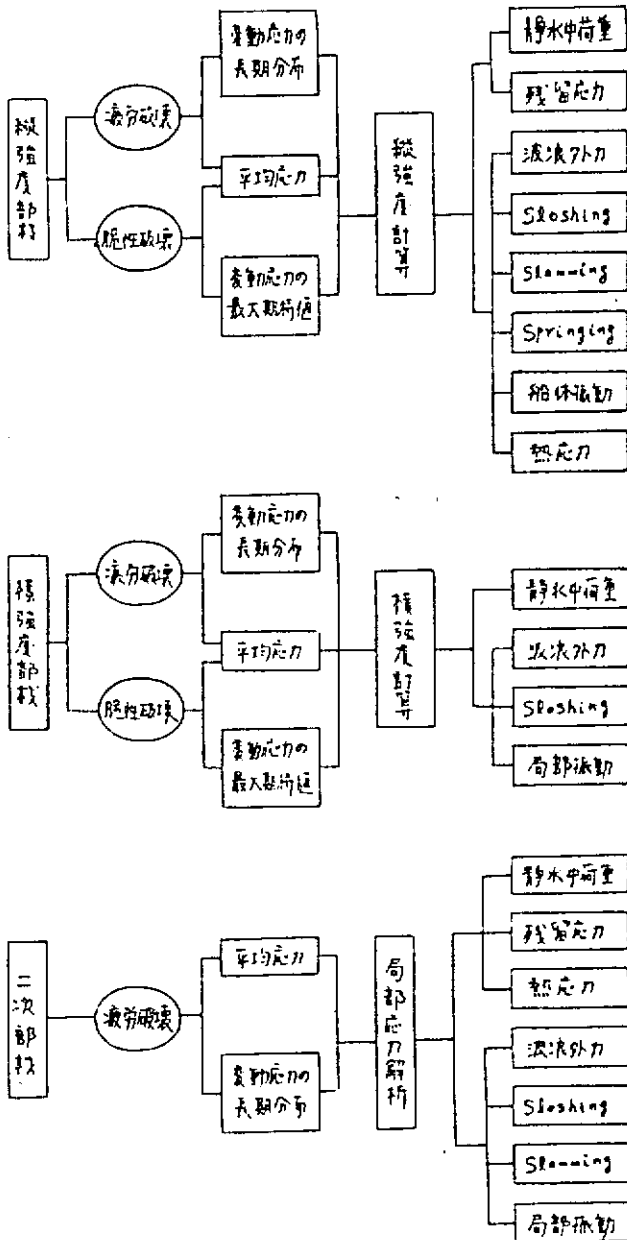


図3.3.2 荷重（応力）のモデル化

図3.3.1 破壊様式と外荷重の関係

表3.4.1 構造要素と力の伝達要領

| 大区分   | 段階 | 構造要素                             | 力の伝達要領                   |                   | 簡易評価方法                           |
|-------|----|----------------------------------|--------------------------|-------------------|----------------------------------|
|       |    |                                  | 荷重                       | 支持要領、支持構造         |                                  |
| 局部強度系 | 1  | 外板<br>隔壁板<br>肘板、結合部<br>その他各部強度材  | 等分布、集中力<br>帯分布 荷重        | 防撓材、桁のウェブ材        | 帯板、板曲げ理論、ハンドブック等例多い。<br>梁理論      |
|       | 2  | 板付防撓材<br>小 骨                     | 板から受ける分布、<br>集中荷重        | 桁、隔壁板             | 梁理論 ハンドブック等例多い。                  |
| 横強度系  | 3  | 桁 材<br>2 重底構造<br>船側構造<br>甲板構造    | 防撓材から受ける集中力<br>板から受ける分布力 | 桁相持ち<br>外板・隔壁板の面内 | 船種により異なる骨組理論<br>立体的解析も一部実施されている。 |
|       | 4  | 外 板<br>隔 壁                       | 桁から受ける板の面内力<br>桁構造方式と    | 系全体の平衡<br>自由/自由端  | 接剪断力の修正<br>縦強度と構造配置の結合           |
| 縦強度系  | 5  | 上甲板、船底外板側<br>外板、縦通隔壁板、<br>その他縦通材 | 外板・隔壁板から受ける力<br>自重・積荷    | 系全体の平衡<br>自由/自由端  | 縦強度計算書を参考とする。                    |

表3.4.2 出版書籍

| 番号  | 資料名                                                                                                         | 発行所                 | 著 者      | 発行年月          | 備 考                                                  |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------|---------------|------------------------------------------------------|
| (1) | 船体構造力学                                                                                                      | 海 文 堂               | 寺沢一雄監修   | 昭和49年5月<br>初版 |                                                      |
| (2) | 造船設計便覧 (第3版)                                                                                                | 海 文 堂               | 関西造船協会   | 昭和51年2月       | 第4編船殻 p51s~58s                                       |
| (3) | 鋼船規則集                                                                                                       | 日本海事協会              | 日本海事協会   | 昭和54年         |                                                      |
| (4) | 鋼船規則集検査要領                                                                                                   | 同 上                 | 同 上      | 同 上           |                                                      |
| (5) | S53年度版鋼船規則及び検査要領の改正点の解説                                                                                     | 日本海事協会<br>会誌 No.165 |          | Oct. 1978     |                                                      |
| (6) | LNG船規準(超低温式液化ガスタンク船規準)                                                                                      |                     | 日本海事協会   | 昭和48年         |                                                      |
| (7) | Code for the Construction And Equipment of Ships Carrying Liquefied Gas in Bulk, Annex VI of MSC.1/Circ.119 |                     | IMCO     |               | Inter-Governmental Marine Consultative Organization. |
| (8) | 同上 液化ガスばら積船構造設備規則(案) 仮訳                                                                                     | 日本造船研究協会            | 第3基準研究部会 | 昭和50年6月       |                                                      |

表3.5.1 帯板中の亀裂先端K値の例

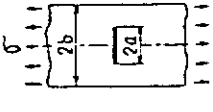
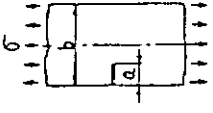
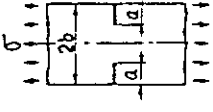
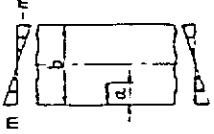
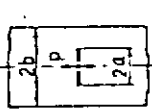
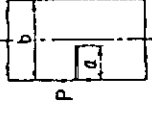
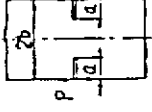
|  | 亀裂を含む帯板の引張り                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 亀裂を含む帯板の曲げ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 帯板中の亀裂に集中力が働く場合                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  $K = \sigma \sqrt{\pi a} F\left(\frac{a}{b}\right)$ $F\left(\frac{a}{b}\right) = \left[1 - 0.045\left(\frac{a}{b}\right)^2 + 0.06\left(\frac{a}{b}\right)^4\right] \times \sqrt{\sec \frac{\pi a}{2b}}$  $K = \sigma \sqrt{\pi a} F\left(\frac{a}{b}\right)$ $F\left(\frac{a}{b}\right) = \sqrt{\frac{2b}{a}} \tan \frac{\pi a}{2b} \times \left\{ \frac{0.75 + 1.2 \pi \left(\frac{a}{b}\right)^2 + 0.27 \left(1 - \sin \frac{\pi a}{2b}\right)}{\cos \frac{\pi a}{2b}} \right\}$  $K = \sigma \sqrt{\pi a} F\left(\frac{a}{b}\right)$ $F\left(\frac{a}{b}\right) = \left(1 + 0.122 \cos^4 \frac{\pi a}{2b}\right) \times \sqrt{\frac{2b}{a} \tan \frac{\pi a}{2b}}$ |  $K = m \sqrt{\pi a} F\left(\frac{a}{b}\right)$ $F\left(\frac{a}{b}\right) = \frac{\sqrt{2b} \tan \frac{\pi a}{2b}}{\sqrt{a}} \cdot \frac{0.773 + 0.117 \left(1 - \sin \frac{\pi a}{2b}\right)}{\cos \frac{\pi a}{2b}}$  $K = \frac{2P}{\sqrt{\pi a}} F\left(\frac{a}{b}\right)$ $F\left(\frac{a}{b}\right) = \frac{2P}{\sqrt{\pi a}} F\left(\frac{a}{b}\right)$ $F\left(\frac{a}{b}\right) = \left(1 - 0.717 + 0.717 \cos \frac{\pi a}{2b}\right) \times \sqrt{\frac{\pi a}{b} / \sin \frac{\pi a}{b}}$  $K = \frac{2P}{\sqrt{\pi a}} F\left(\frac{a}{b}\right)$ $F\left(\frac{a}{b}\right) = \left(\frac{a}{b}\right)^{\frac{332}{10}} \left(\frac{1}{b}\right)^{\frac{1}{10}} \left(\frac{a}{b}\right) \times \sqrt{\frac{\pi a}{b} / \sin \frac{\pi a}{b}}$ |  $K = \frac{P}{\sqrt{\pi a}} F\left(\frac{a}{b}\right)$ $F\left(\frac{a}{b}\right) = \left(1 - 0.717 + 0.717 \cos \frac{\pi a}{2b}\right) \times \sqrt{\frac{\pi a}{b} / \sin \frac{\pi a}{b}}$  $K = \frac{2P}{\sqrt{\pi a}} F\left(\frac{a}{b}\right)$ $F\left(\frac{a}{b}\right) = \left(\frac{a}{b}\right)^{\frac{332}{10}} \left(\frac{1}{b}\right)^{\frac{1}{10}} \left(\frac{a}{b}\right) \times \sqrt{\frac{\pi a}{b} / \sin \frac{\pi a}{b}}$  $K = \frac{2P}{\sqrt{\pi a}} F\left(\frac{a}{b}\right)$ $F\left(\frac{a}{b}\right) = \left(1 + 0.122 \cos^4 \frac{\pi a}{2b}\right) \times \sqrt{\frac{2b}{a} \tan \frac{\pi a}{2b}}$ |

表3.5.2 無限板(半無限板)中の亀裂先端のK値

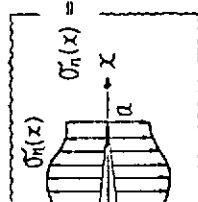
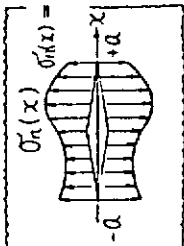
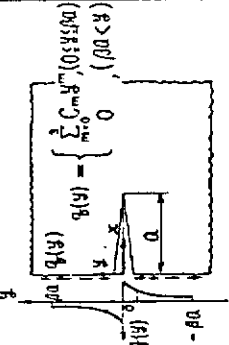
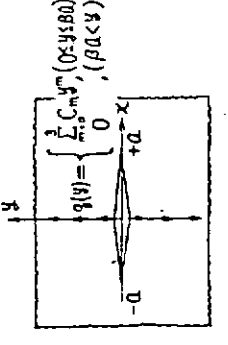
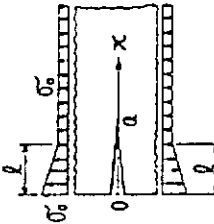
| 亀裂周辺境界条件      | K 値                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                        |                        |                 |        |        |             |             |             |         |                        |                        |                        |   |                        |                        |                        |        |                        |                        |                        |   |                        |                        |       |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------|-----------------|--------|--------|-------------|-------------|-------------|---------|------------------------|------------------------|------------------------|---|------------------------|------------------------|------------------------|--------|------------------------|------------------------|------------------------|---|------------------------|------------------------|-------|
| 内圧を受ける縁亀裂     | $K_I = \sum_{m=0}^{\infty} k_m C_m(a)^m / \sqrt{\pi a}$ <div></div> <table><tr><th>m</th><th>k_m</th></tr><tr><td>0</td><td>1.1215</td></tr><tr><td>1</td><td>0.6829</td></tr><tr><td>2</td><td>0.5255</td></tr><tr><td>3</td><td>0.4410</td></tr><tr><td>4</td><td>0.3868</td></tr></table>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | m                      | k_m                    | 0               | 1.1215 | 1      | 0.6829      | 2           | 0.5255      | 3       | 0.4410                 | 4                      | 0.3868                 |   |                        |                        |                        |        |                        |                        |                        |   |                        |                        |       |
| m             | k_m                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                        |                        |                 |        |        |             |             |             |         |                        |                        |                        |   |                        |                        |                        |        |                        |                        |                        |   |                        |                        |       |
| 0             | 1.1215                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                        |                        |                 |        |        |             |             |             |         |                        |                        |                        |   |                        |                        |                        |        |                        |                        |                        |   |                        |                        |       |
| 1             | 0.6829                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                        |                        |                 |        |        |             |             |             |         |                        |                        |                        |   |                        |                        |                        |        |                        |                        |                        |   |                        |                        |       |
| 2             | 0.5255                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                        |                        |                 |        |        |             |             |             |         |                        |                        |                        |   |                        |                        |                        |        |                        |                        |                        |   |                        |                        |       |
| 3             | 0.4410                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                        |                        |                 |        |        |             |             |             |         |                        |                        |                        |   |                        |                        |                        |        |                        |                        |                        |   |                        |                        |       |
| 4             | 0.3868                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                        |                        |                 |        |        |             |             |             |         |                        |                        |                        |   |                        |                        |                        |        |                        |                        |                        |   |                        |                        |       |
| 内圧を受ける電裂      | $K_I = \sum_{m=0}^{\infty} k_m C_m(a)^m / \sqrt{\pi a}$ <div></div> <table><tr><th>m</th><th>k_m for (K_I)+a</th><th>k_m for (K_I)-a</th></tr><tr><td>0</td><td>1.0000</td><td>1.0000</td></tr><tr><td>1</td><td>0.5000</td><td>-0.5000</td></tr><tr><td>2</td><td>0.5000</td><td>0.5000</td></tr><tr><td>3</td><td>0.3750</td><td>-0.3750</td></tr><tr><td>4</td><td>0.3750</td><td>0.3750</td></tr></table>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | m                      | k_m for (K_I)+a        | k_m for (K_I)-a | 0      | 1.0000 | 1.0000      | 1           | 0.5000      | -0.5000 | 2                      | 0.5000                 | 0.5000                 | 3 | 0.3750                 | -0.3750                | 4                      | 0.3750 | 0.3750                 |                        |                        |   |                        |                        |       |
| m             | k_m for (K_I)+a                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | k_m for (K_I)-a        |                        |                 |        |        |             |             |             |         |                        |                        |                        |   |                        |                        |                        |        |                        |                        |                        |   |                        |                        |       |
| 0             | 1.0000                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 1.0000                 |                        |                 |        |        |             |             |             |         |                        |                        |                        |   |                        |                        |                        |        |                        |                        |                        |   |                        |                        |       |
| 1             | 0.5000                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | -0.5000                |                        |                 |        |        |             |             |             |         |                        |                        |                        |   |                        |                        |                        |        |                        |                        |                        |   |                        |                        |       |
| 2             | 0.5000                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 0.5000                 |                        |                 |        |        |             |             |             |         |                        |                        |                        |   |                        |                        |                        |        |                        |                        |                        |   |                        |                        |       |
| 3             | 0.3750                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | -0.3750                |                        |                 |        |        |             |             |             |         |                        |                        |                        |   |                        |                        |                        |        |                        |                        |                        |   |                        |                        |       |
| 4             | 0.3750                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 0.3750                 |                        |                 |        |        |             |             |             |         |                        |                        |                        |   |                        |                        |                        |        |                        |                        |                        |   |                        |                        |       |
| 分布剪断力を受ける縁亀裂  | $K_I = \sum_{m=0}^{\infty} k_m C_m(a)^m / \sqrt{\pi a}$ in plane stress <div></div> <table><tr><th>m</th><th colspan="3">in plane stress</th></tr><tr><th></th><th><math>\beta=0.5</math></th><th><math>\beta=1.0</math></th><th><math>\beta=2.0</math></th></tr><tr><td>0</td><td><math>4.16 \times 10^{-1}</math></td><td><math>7.881 \times 10^{-1}</math></td><td>1.451</td></tr><tr><td>1</td><td><math>1.042 \times 10^{-1}</math></td><td><math>4.033 \times 10^{-1}</math></td><td>1.335</td></tr><tr><td>2</td><td><math>3.475 \times 10^{-2}</math></td><td><math>2.662 \times 10^{-1}</math></td><td>1.687</td></tr><tr><td>3</td><td><math>1.304 \times 10^{-2}</math></td><td><math>1.981 \times 10^{-1}</math></td><td>2.441</td></tr></table>                                                                                       | m                      | in plane stress        |                 |        |        | $\beta=0.5$ | $\beta=1.0$ | $\beta=2.0$ | 0       | $4.16 \times 10^{-1}$  | $7.881 \times 10^{-1}$ | 1.451                  | 1 | $1.042 \times 10^{-1}$ | $4.033 \times 10^{-1}$ | 1.335                  | 2      | $3.475 \times 10^{-2}$ | $2.662 \times 10^{-1}$ | 1.687                  | 3 | $1.304 \times 10^{-2}$ | $1.981 \times 10^{-1}$ | 2.441 |
| m             | in plane stress                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                        |                        |                 |        |        |             |             |             |         |                        |                        |                        |   |                        |                        |                        |        |                        |                        |                        |   |                        |                        |       |
|               | $\beta=0.5$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | $\beta=1.0$            | $\beta=2.0$            |                 |        |        |             |             |             |         |                        |                        |                        |   |                        |                        |                        |        |                        |                        |                        |   |                        |                        |       |
| 0             | $4.16 \times 10^{-1}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | $7.881 \times 10^{-1}$ | 1.451                  |                 |        |        |             |             |             |         |                        |                        |                        |   |                        |                        |                        |        |                        |                        |                        |   |                        |                        |       |
| 1             | $1.042 \times 10^{-1}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | $4.033 \times 10^{-1}$ | 1.335                  |                 |        |        |             |             |             |         |                        |                        |                        |   |                        |                        |                        |        |                        |                        |                        |   |                        |                        |       |
| 2             | $3.475 \times 10^{-2}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | $2.662 \times 10^{-1}$ | 1.687                  |                 |        |        |             |             |             |         |                        |                        |                        |   |                        |                        |                        |        |                        |                        |                        |   |                        |                        |       |
| 3             | $1.304 \times 10^{-2}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | $1.981 \times 10^{-1}$ | 2.441                  |                 |        |        |             |             |             |         |                        |                        |                        |   |                        |                        |                        |        |                        |                        |                        |   |                        |                        |       |
| 分布力を受ける電裂     | $K_I = \sum_{m=0}^{\infty} k_m C_m(a)^m / \sqrt{\pi a}$ in plane stress <div></div> <table><tr><th>m</th><th colspan="3">in plane stress</th></tr><tr><th></th><th><math>\beta=0.5</math></th><th><math>\beta=1.0</math></th><th><math>\beta=2.0</math></th></tr><tr><td>0</td><td><math>1.609 \times 10^{-1}</math></td><td><math>3.202 \times 10^{-1}</math></td><td><math>5.844 \times 10^{-1}</math></td></tr><tr><td>1</td><td><math>4.019 \times 10^{-2}</math></td><td><math>1.594 \times 10^{-1}</math></td><td><math>5.488 \times 10^{-1}</math></td></tr><tr><td>2</td><td><math>1.350 \times 10^{-2}</math></td><td><math>1.057 \times 10^{-1}</math></td><td><math>7.016 \times 10^{-1}</math></td></tr><tr><td>3</td><td><math>5.068 \times 10^{-3}</math></td><td><math>2.897 \times 10^{-1}</math></td><td>1.022</td></tr></table> | m                      | in plane stress        |                 |        |        | $\beta=0.5$ | $\beta=1.0$ | $\beta=2.0$ | 0       | $1.609 \times 10^{-1}$ | $3.202 \times 10^{-1}$ | $5.844 \times 10^{-1}$ | 1 | $4.019 \times 10^{-2}$ | $1.594 \times 10^{-1}$ | $5.488 \times 10^{-1}$ | 2      | $1.350 \times 10^{-2}$ | $1.057 \times 10^{-1}$ | $7.016 \times 10^{-1}$ | 3 | $5.068 \times 10^{-3}$ | $2.897 \times 10^{-1}$ | 1.022 |
| m             | in plane stress                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                        |                        |                 |        |        |             |             |             |         |                        |                        |                        |   |                        |                        |                        |        |                        |                        |                        |   |                        |                        |       |
|               | $\beta=0.5$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | $\beta=1.0$            | $\beta=2.0$            |                 |        |        |             |             |             |         |                        |                        |                        |   |                        |                        |                        |        |                        |                        |                        |   |                        |                        |       |
| 0             | $1.609 \times 10^{-1}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | $3.202 \times 10^{-1}$ | $5.844 \times 10^{-1}$ |                 |        |        |             |             |             |         |                        |                        |                        |   |                        |                        |                        |        |                        |                        |                        |   |                        |                        |       |
| 1             | $4.019 \times 10^{-2}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | $1.594 \times 10^{-1}$ | $5.488 \times 10^{-1}$ |                 |        |        |             |             |             |         |                        |                        |                        |   |                        |                        |                        |        |                        |                        |                        |   |                        |                        |       |
| 2             | $1.350 \times 10^{-2}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | $1.057 \times 10^{-1}$ | $7.016 \times 10^{-1}$ |                 |        |        |             |             |             |         |                        |                        |                        |   |                        |                        |                        |        |                        |                        |                        |   |                        |                        |       |
| 3             | $5.068 \times 10^{-3}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | $2.897 \times 10^{-1}$ | 1.022                  |                 |        |        |             |             |             |         |                        |                        |                        |   |                        |                        |                        |        |                        |                        |                        |   |                        |                        |       |
| 帯板に分布力を受ける縁亀裂 | <div></div> <p>[a ≤ b のとき]<br/> <math>K = \{1.1215 K - 0.6829 (K-1) \frac{a}{b}\} \sigma_0 \sqrt{\pi a}</math></p> <p>[a &lt; a のとき]<br/> <math>K = \{1.1215 + 0.138 (K-1) (\frac{a}{b} + 0.06255 \frac{a^2}{b^2})\} \sigma_0 \sqrt{\pi a}</math></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                        |                        |                 |        |        |             |             |             |         |                        |                        |                        |   |                        |                        |                        |        |                        |                        |                        |   |                        |                        |       |

表3.5.3(a) 平板中の(半楕円形)表面電裂先端および隅肉余盛部の電裂先端のK値(その1)

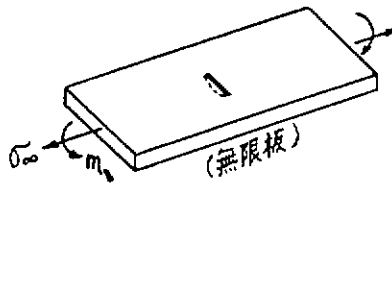
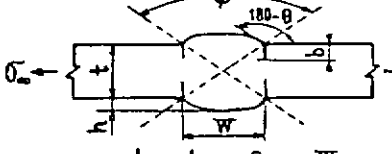
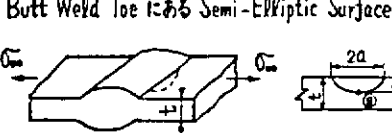
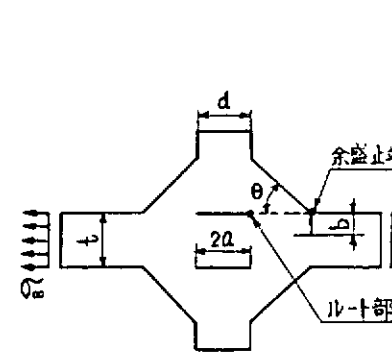
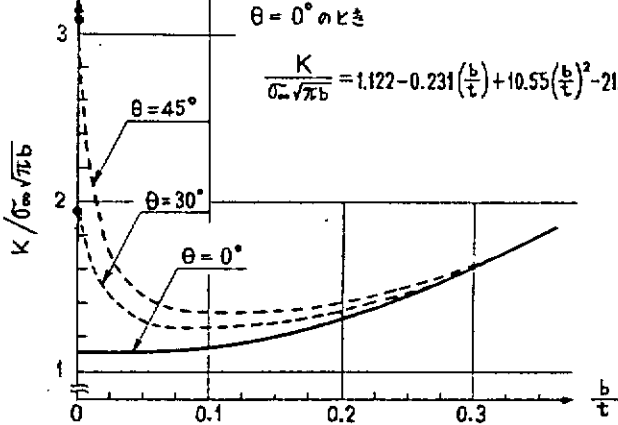
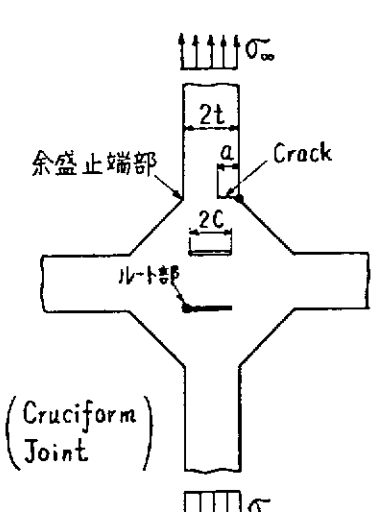
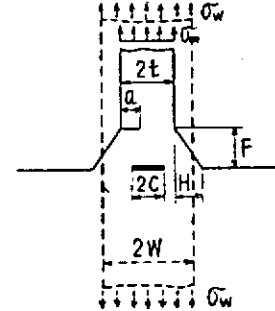
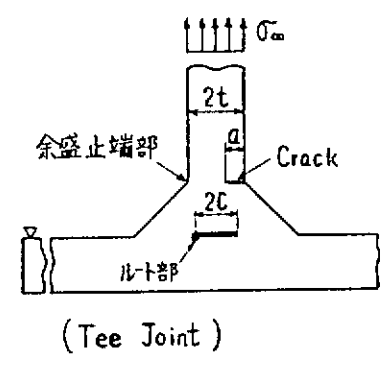
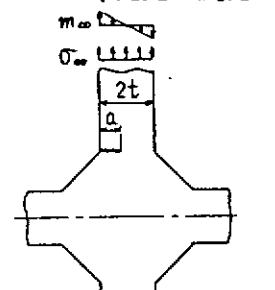
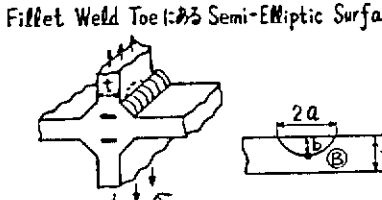
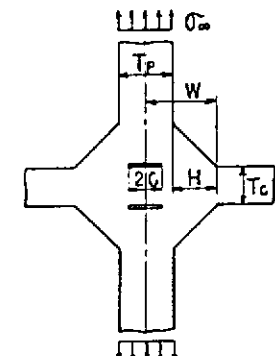
|                               | Configuration                                                                                                                                                                                                    | K-value Formula (i) denotes data source in Table 3.5.6                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |         |                                 |        |         |                                 |  |  |   |   |   |   |   |   |   |        |        |         |        |        |         |   |        |       |       |        |       |       |   |        |         |        |        |        |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|---------------------------------|--------|---------|---------------------------------|--|--|---|---|---|---|---|---|---|--------|--------|---------|--------|--------|---------|---|--------|-------|-------|--------|-------|-------|---|--------|---------|--------|--------|--------|
| Uniform Plate                 |  <p>(無限板)</p> <p>(半楕円形の表面電裂)</p>                                                                                                | (1) 引張り $K_{\text{引}}/(\sigma_m \sqrt{\pi b}/E(k^2)) = M_K$ , 図示(および実験式化)されている → 図 3.5.1<br>曲げ $K_{\text{曲}}/(\sigma_m \sqrt{\pi b}/E(k^2)) = M_A$ , 図示(および実験式化)されている → 図 3.5.2<br>$K_{\text{曲}}/(\sigma_m \sqrt{\pi b}/E(k^2)) = M_B$ , 図示(および実験式化)されている → 図 3.5.2<br>(2) $K_{\text{引}} = \{K_1\}_{\phi=0} \dots \left\{ \begin{array}{l} K_{\text{引}}/(\sigma_m \sqrt{\pi b}/a) \text{ および } K_{\text{引}}/(\sigma_m \sqrt{\pi b}/a) \rightarrow \text{図 3.5.3} \\ K_{\text{引}}/(\sigma_m \sqrt{\pi b}/a) \text{ および } K_{\text{引}}/(\sigma_m \sqrt{\pi b}/a) \rightarrow \text{図 3.5.4} \end{array} \right.$<br>ここで $K_1 = (\sigma_m + m_m H) \sqrt{\pi b/a} \cdot F$<br>$Q = 1 + 1.464 \left(\frac{b}{a}\right)^{1.65}$<br>$F = \{M_1 + M_2 \left(\frac{b}{a}\right)^2 + M_3 \left(\frac{b}{a}\right)^4\} f_{\phi} g$<br>$M_1 = 1.13 - 0.09 \left(\frac{b}{a}\right)$ , $M_2 = -0.54 + \frac{0.89}{0.2 + \frac{b}{a}}$<br>$M_3 = 0.5 - \frac{1.0}{0.65 + \frac{b}{a}} + 14 \left(1.0 - \frac{b}{a}\right)^{24}$<br>$g = 1 + \{0.1 + 0.35 \left(\frac{b}{a}\right)^2\} (1 - \sin \phi)^2$<br>$f_{\phi} = \left\{ \left(\frac{b}{a}\right)^2 \cos^2 \phi + \sin^2 \phi \right\}^{\frac{1}{2}}$<br>$H = H_1 + (H_2 - H_1) \cdot (\sin \phi)^p$<br>$p = 0.2 + \left(\frac{b}{a}\right) + 0.6 \left(\frac{b}{a}\right)$ , $H_1 = 1 - 0.34 \left(\frac{b}{a}\right) - 0.11 \left(\frac{b}{a}\right) \left(\frac{b}{a}\right)$<br>$H_2 = 1 + \left(\frac{b}{a}\right) \{-1.22 - 0.12 \left(\frac{b}{a}\right)\} + \left(\frac{b}{a}\right)^2 \{0.55 - 1.05 \left(\frac{b}{a}\right)^{0.75} + 0.47 \left(\frac{b}{a}\right)^{1.5}\}$<br>である。(適用範囲 $\frac{b}{a} \leq 1$ , $\frac{b}{a} \leq 0.8$ である。) |         |                                 |        |         |                                 |  |  |   |   |   |   |   |   |   |        |        |         |        |        |         |   |        |       |       |        |       |       |   |        |         |        |        |        |
|                               | 2次元解から3次元問題の解を推定する際の補正係数 $D\left(\frac{b}{a}, \frac{b}{a}\right)$                                                                                                                                                | 上記(2)の結果を用いて算定<br>$D\left(\frac{b}{a}, \frac{b}{a}\right)$ の図示 → 図 3.5.5<br>$D\left(\frac{b}{a}, \frac{b}{a}\right) = 1.0 + \alpha_1 \sqrt{\frac{b}{a}} + \alpha_2 \left(\frac{b}{a}\right) + \alpha_3 \left(\frac{b}{a}\right)^2$<br>$\alpha_1 = \beta_{10} + \beta_{11} \left(\frac{b}{a}\right) + \beta_{12} \left(\frac{b}{a}\right)^2$<br>$\alpha_2 = \beta_{20} + \beta_{21} \left(\frac{b}{a}\right) + \beta_{22} \left(\frac{b}{a}\right)^2$<br>$\alpha_3 = \beta_{30} + \beta_{31} \left(\frac{b}{a}\right) + \beta_{32} \left(\frac{b}{a}\right)^2$ <table border="1" data-bbox="1068 767 1436 900"><tr><th rowspan="2">i \ j</th><th colspan="3"><math>\beta_{ij}</math> (in plate tension)</th><th colspan="3"><math>\beta_{ij}</math> (in plate bending)</th></tr><tr><th>0</th><th>1</th><th>2</th><th>0</th><th>1</th><th>2</th></tr><tr><td>1</td><td>0.5401</td><td>-3.967</td><td>-0.3045</td><td>0.5519</td><td>-4.037</td><td>-0.9891</td></tr><tr><td>2</td><td>-1.070</td><td>3.250</td><td>1.692</td><td>-1.018</td><td>2.327</td><td>3.611</td></tr><tr><td>3</td><td>0.1838</td><td>-0.2628</td><td>-1.056</td><td>0.1397</td><td>0.4434</td><td>-2.118</td></tr></table>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | i \ j   | $\beta_{ij}$ (in plate tension) |        |         | $\beta_{ij}$ (in plate bending) |  |  | 0 | 1 | 2 | 0 | 1 | 2 | 1 | 0.5401 | -3.967 | -0.3045 | 0.5519 | -4.037 | -0.9891 | 2 | -1.070 | 3.250 | 1.692 | -1.018 | 2.327 | 3.611 | 3 | 0.1838 | -0.2628 | -1.056 | 0.1397 | 0.4434 |
| i \ j                         | $\beta_{ij}$ (in plate tension)                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |         | $\beta_{ij}$ (in plate bending) |        |         |                                 |  |  |   |   |   |   |   |   |   |        |        |         |        |        |         |   |        |       |       |        |       |       |   |        |         |        |        |        |
|                               | 0                                                                                                                                                                                                                | 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 2       | 0                               | 1      | 2       |                                 |  |  |   |   |   |   |   |   |   |        |        |         |        |        |         |   |        |       |       |        |       |       |   |        |         |        |        |        |
| 1                             | 0.5401                                                                                                                                                                                                           | -3.967                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | -0.3045 | 0.5519                          | -4.037 | -0.9891 |                                 |  |  |   |   |   |   |   |   |   |        |        |         |        |        |         |   |        |       |       |        |       |       |   |        |         |        |        |        |
| 2                             | -1.070                                                                                                                                                                                                           | 3.250                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 1.692   | -1.018                          | 2.327  | 3.611   |                                 |  |  |   |   |   |   |   |   |   |        |        |         |        |        |         |   |        |       |       |        |       |       |   |        |         |        |        |        |
| 3                             | 0.1838                                                                                                                                                                                                           | -0.2628                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | -1.056  | 0.1397                          | 0.4434 | -2.118  |                                 |  |  |   |   |   |   |   |   |   |        |        |         |        |        |         |   |        |       |       |        |       |       |   |        |         |        |        |        |
| Butt Weld                     |  <p>前提: <math>\frac{h}{W} = \frac{1}{2} \tan \frac{\theta}{2}</math>, <math>\frac{W}{t} = \tan \frac{\phi}{2}</math></p>       | (3) $K = \sqrt{\pi b} \left\{ 1.1 \sigma - \int_0^b f\left(\frac{x}{b}\right) \frac{d\sigma}{dx} \cdot dx \right\}$<br>$f\left(\frac{x}{b}\right) = 0.8 \left(\frac{x}{b}\right) + 0.04 \left(\frac{x}{b}\right)^2 + 0.352 \times 10^{-5} \exp(11.18 \frac{x}{b})$<br>$\frac{\sigma}{\sigma_m} = b_0 + b_1 \left(\frac{x}{b}\right) + b_2 \left(\frac{x}{b}\right)^2 + b_3 \left(\frac{x}{b}\right)^3 + b_4 \left(\frac{x}{b}\right)^4$<br>$\sigma$ : 電裂先端位置の応力<br>$x$ : 余盛止端からの距離<br>$b_0 \sim b_4$ : 余盛形状による定まる定数 → 図 3.5.6                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |         |                                 |        |         |                                 |  |  |   |   |   |   |   |   |   |        |        |         |        |        |         |   |        |       |       |        |       |       |   |        |         |        |        |        |
|                               | Butt Weld Toe にある Semi-Elliptic Surface Crack                                                                                                                                                                    |  <p><math>K_{\text{引}} = D\left(\frac{b}{a}, \frac{b}{a}\right) \cdot \sqrt{\pi b} \left\{ 1.1 \sigma - \int_0^b f\left(\frac{x}{b}\right) \frac{d\sigma}{dx} \cdot dx \right\}</math><br/>ここに, <math>D\left(\frac{b}{a}, \frac{b}{a}\right)</math>: 前記(2)の多項式または 図 3.5.5 で与えられる値<br/><math>f\left(\frac{x}{b}\right)</math>: 上記(3)に同じ<br/><math>\sigma</math>: 上記(3)に同じ</p> である。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |         |                                 |        |         |                                 |  |  |   |   |   |   |   |   |   |        |        |         |        |        |         |   |        |       |       |        |       |       |   |        |         |        |        |        |
| Non Load-Carrying Fillet Weld |  <p>for <math>\theta = 45^\circ</math> <math>d/t = 1.00</math><br/><math>\theta = 30^\circ</math> <math>d/t = 1.73</math></p> | (4),(12) $\frac{K}{\sigma_m \sqrt{\pi b}}$ vs. $\frac{b}{t}$ の関係の Graphic 表示<br>$\theta = 0^\circ$ のとき<br>$\frac{K}{\sigma_m \sqrt{\pi b}} = 1.122 - 0.231 \left(\frac{b}{t}\right) + 10.55 \left(\frac{b}{t}\right)^2 - 21.70 \left(\frac{b}{t}\right)^3 + 33.19 \left(\frac{b}{t}\right)^4$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |         |                                 |        |         |                                 |  |  |   |   |   |   |   |   |   |        |        |         |        |        |         |   |        |       |       |        |       |       |   |        |         |        |        |        |
|                               | Fillet Weld Toe にある Semi-Elliptic Surface Crack                                                                                                                                                                  |  <p>(7) (ル-ト部のK値に対して) <math>K/(\sigma_m \sqrt{\pi a})</math> vs. <math>\frac{2a}{d}</math> → 図 3.5.7(a),(b)<br/>(余盛止端Crackに対して) <math>K/(\sigma_m \sqrt{\pi b})</math> vs. <math>\frac{b}{t}</math> → 図 3.5.7(c)</p> <p>(余盛止端の Surface Crack に対して)</p> <p><math>K = D\left(\frac{b}{a}, \frac{b}{a}\right) \times [K]_{\frac{b}{a}=0}</math><br/>ここに, <math>D\left(\frac{b}{a}, \frac{b}{a}\right)</math>: 前記(2)の多項式または 図 3.5.5 で与えられる値<br/><math>[K]_{\frac{b}{a}=0}</math>: 上欄(4),(12),(7)で与えられる2次元K値</p> である。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |         |                                 |        |         |                                 |  |  |   |   |   |   |   |   |   |        |        |         |        |        |         |   |        |       |       |        |       |       |   |        |         |        |        |        |

表3.5.3 (b) 平板中の(半楕円形)表面電裂先端および隅肉余盛部の電裂先端のK値 (その2)

| Configuration                                                                                                                             | K-value Formula (i) denotes data source in Table 3.5.6                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>(Cruciform Joint)</p>                                | <p>(5) (ルト部のK値に対して)</p>  <p>破線の帯板に近似する。</p> $\begin{cases} \sigma_w = \frac{t}{W} \sigma_\infty \\ W = t + \lambda H \\ \text{ただし, } \lambda = \begin{cases} 1 & (0 \leq \frac{H}{F} < 0.5) \\ 1.35 - 0.7 \frac{H}{F} & (0.5 \leq \frac{H}{F} < 1.5) \\ 0.3 & (1.5 \leq \frac{H}{F}) \end{cases} \end{cases}$ <p>である。</p> $K = \sigma_w \sqrt{\pi C} \sqrt{\left(\frac{2W}{\pi C}\right) \tan\left(\frac{\pi C}{2W}\right)}$ <p>(余盛止端Crackに対して)</p> $K = K_0 M_t$ <p>ただし,</p> $\begin{cases} K_0 = \sigma_\infty \sqrt{\pi a} \cdot \sqrt{\left(\frac{2t}{\pi a}\right) \tan\left(\frac{\pi a}{2t}\right)} \\ M_t = 1 + \alpha f_2 \\ \alpha = \frac{1}{1 + 50\left(\frac{a}{t}\right)} \\ f_2 = \left(1 + 0.8 \sqrt{\frac{H}{F}}\right) \left\{1 + 0.48 \left(\frac{C}{t}\right)^2 + 0.32 \left(\frac{C}{t}\right)^4\right\} - 1 \end{cases}$ <p>とする。</p>                                                                                                                                       |
|  <p>(Tee Joint)</p>                                    | <p>(6) (ルト部のK値に対して)</p> <p>上記と同じく帯板に近似するが、(常に<math>\lambda=1</math>として)</p> $W = t + H$ <p>と置く扱いもある。</p> <p>(7) (ルト部のK値に対して)</p> <p>Cruciform Joint の場合 <math>K/(\sigma_\infty \sqrt{\pi C}) \rightarrow</math> 図 3.5.8 (a)</p> <p>Tee Joint の場合 <math>K/(\sigma_\infty \sqrt{\pi C}) \rightarrow</math> 図 3.5.8 (b)~(f)</p> <p>(8) (余盛止端Crackに対して)</p>  $K = \sigma_\infty \sqrt{\pi a} f_A\left(\frac{a}{t}\right) + m_\infty \sqrt{\pi a} f_B\left(\frac{a}{t}\right)$ <p>ただし,</p> $\begin{cases} f_A\left(\frac{a}{t}\right) = 1.69 e^{-41.5 \frac{a}{t}} + 1.48 \\ f_B\left(\frac{a}{t}\right) = 4.08 e^{-34.3 \frac{a}{t}} - 2.83 e^{-41.5 \frac{a}{t}} + 1.0 \end{cases}$ <p>とする。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <p>Fillet Weld Toeにある Semi-Elliptic Surface Crack</p>  | <p>(9), (10), (11) (ルト部のK値に対して)</p>  $K = \sigma_\infty \sqrt{\pi a} \sec \sqrt{\frac{\pi a}{2W}} \cdot \frac{A_1 + A_2 \frac{a}{W}}{1 + \frac{2H}{T_P}}$ <p>ただし,</p> $\begin{cases} A_1 = 0.528 + 3.287 \left(\frac{H}{T_P}\right) - 4.361 \left(\frac{H}{T_P}\right)^2 + 3.696 \left(\frac{H}{T_P}\right)^3 \\ \quad - 1.874 \left(\frac{H}{T_P}\right)^4 + 0.415 \left(\frac{H}{T_P}\right)^5 \\ A_2 = 0.218 + 2.717 \left(\frac{H}{T_P}\right) - 10.171 \left(\frac{H}{T_P}\right)^2 + 13.122 \left(\frac{H}{T_P}\right)^3 \\ \quad - 7.755 \left(\frac{H}{T_P}\right)^4 + 1.783 \left(\frac{H}{T_P}\right)^5 \\ \text{for } 0.2 < \left(\frac{H}{T_P}\right) < 1.2 \end{cases}$ <p>とする。</p> <p>(余盛止端のSurface Crackに対して)</p> $K_{\oplus} = D\left(\frac{b}{t}, \frac{b}{a}\right) \times (K)_{\oplus=0}$ <p>ここに,</p> <p><math>D\left(\frac{b}{t}, \frac{b}{a}\right)</math> ..... 前記 (2) の99式又は 図 3.5.5 で与えられる値</p> <p><math>(K)_{\oplus=0}</math> ..... 上欄 (5) ~ (11) で与えられる2次元K値である。</p> |

Load-Carrying Fillet Weld

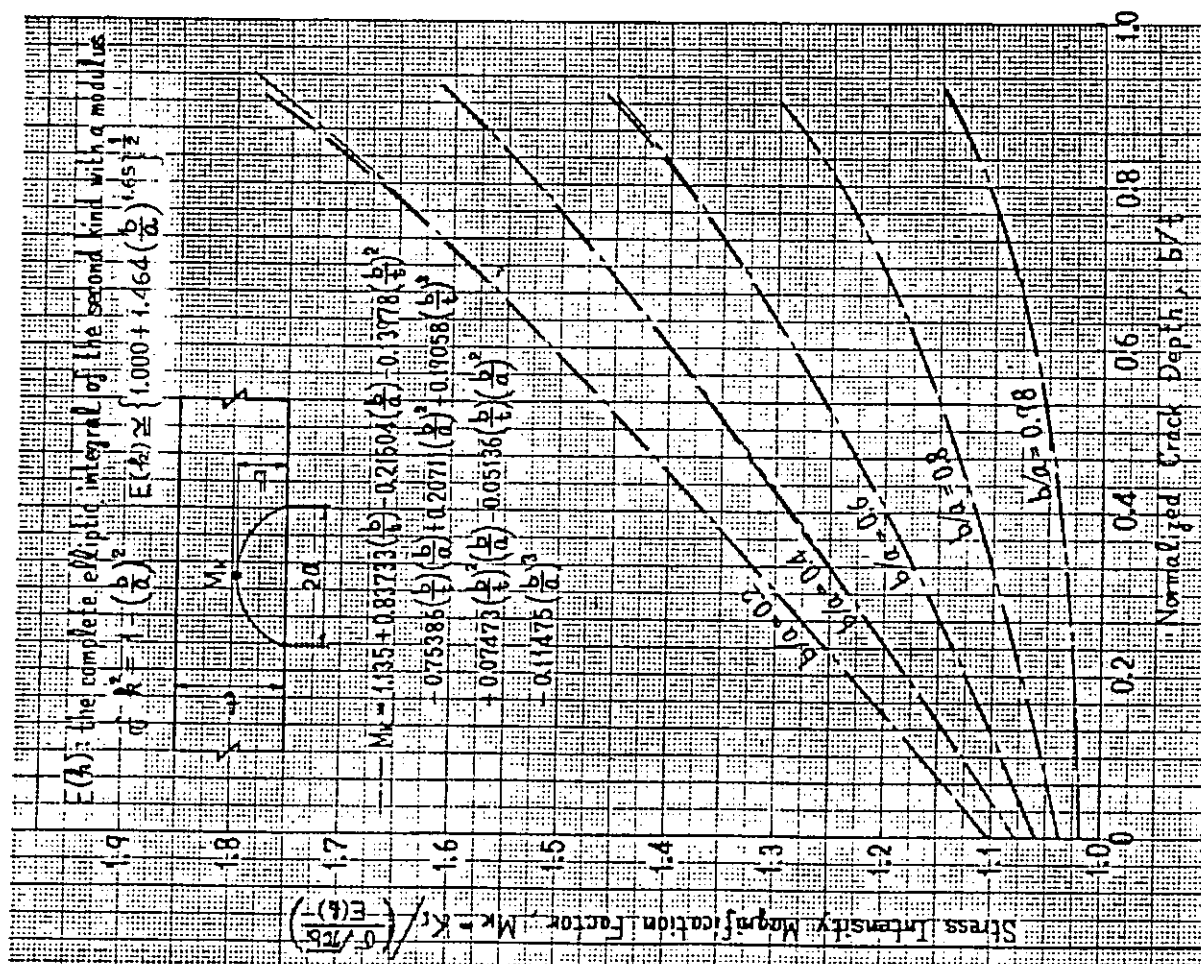


FIG 3.5.1 Stress intensity magnification factor at maximum crack depth of surface flawed tension plate<sup>(1)</sup>

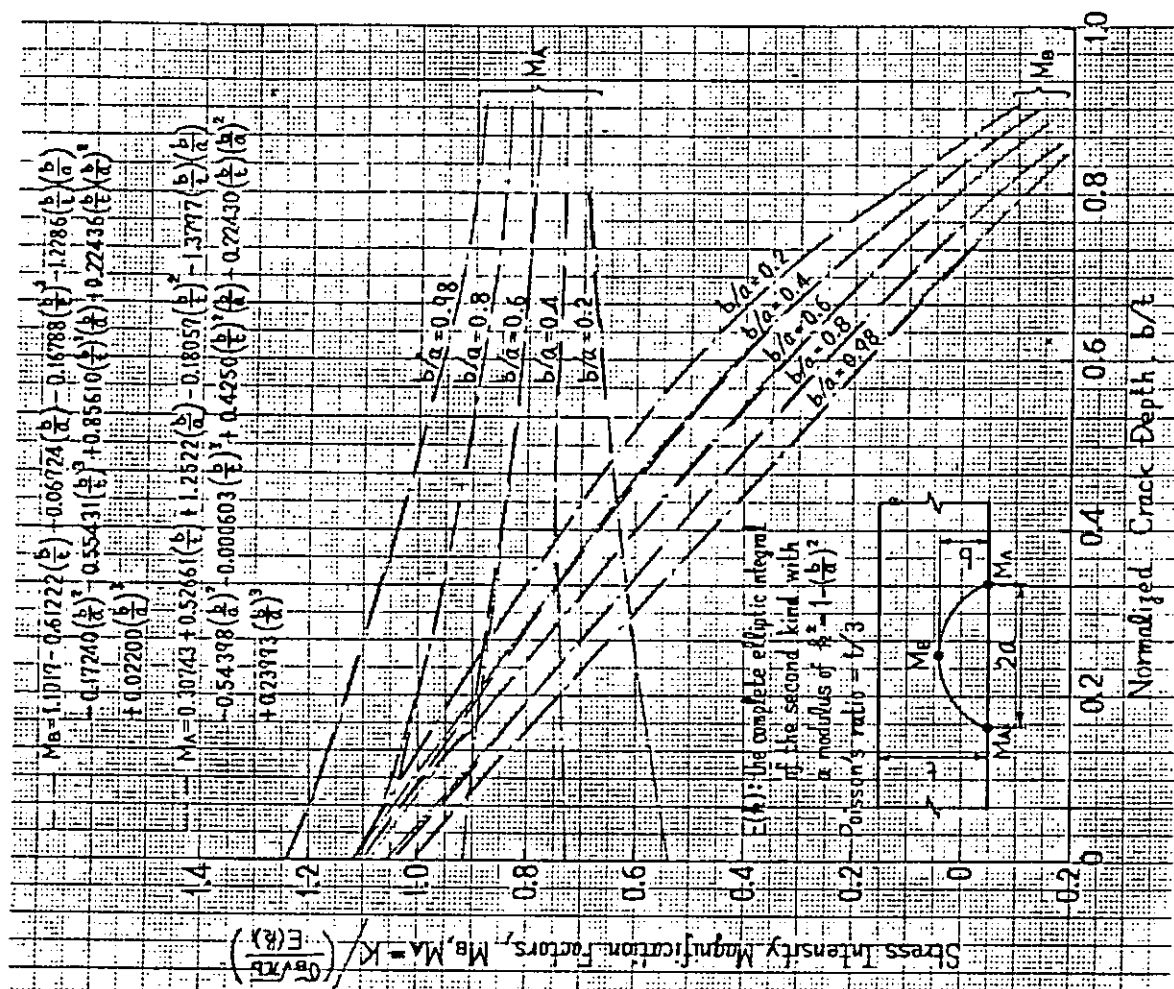


FIG 3.5.2 Stress intensity magnification factor at maximum crack depth and at the crack surface for a surface flawed plate in plate bending<sup>(1)</sup>

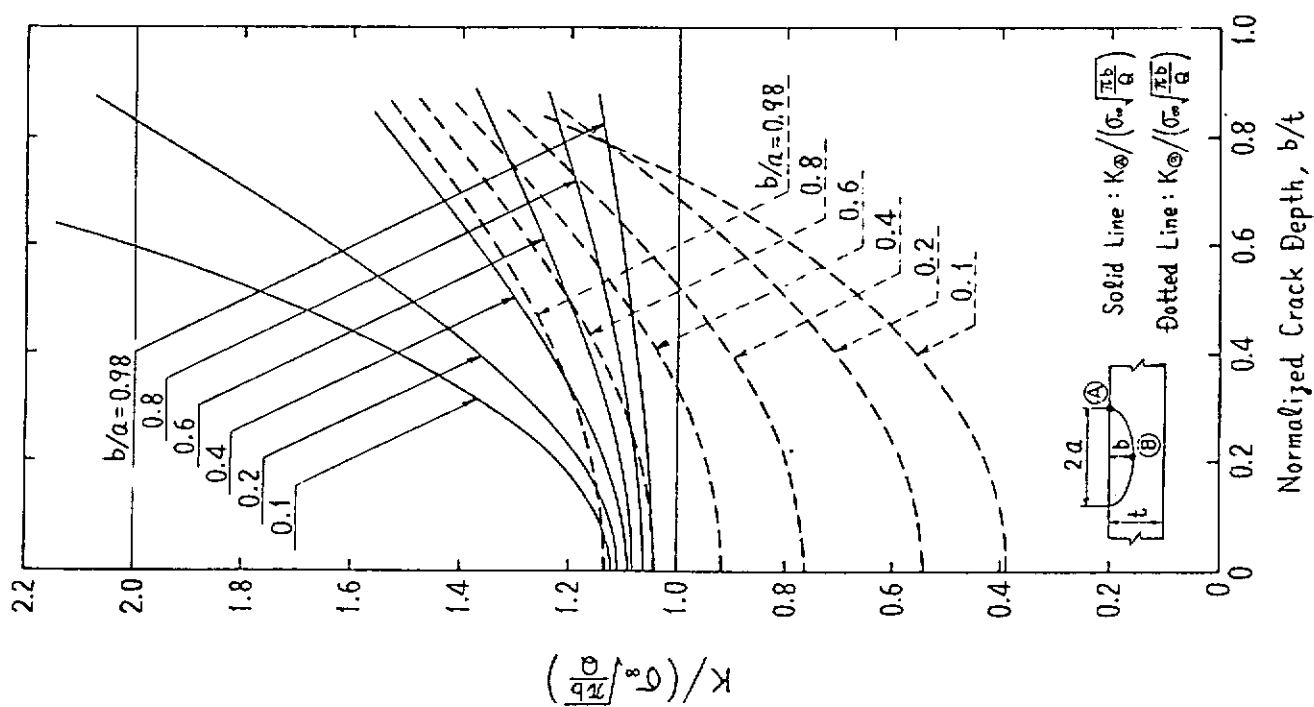


Fig. 3.5.3 Factors in plate tension<sup>(2)</sup>

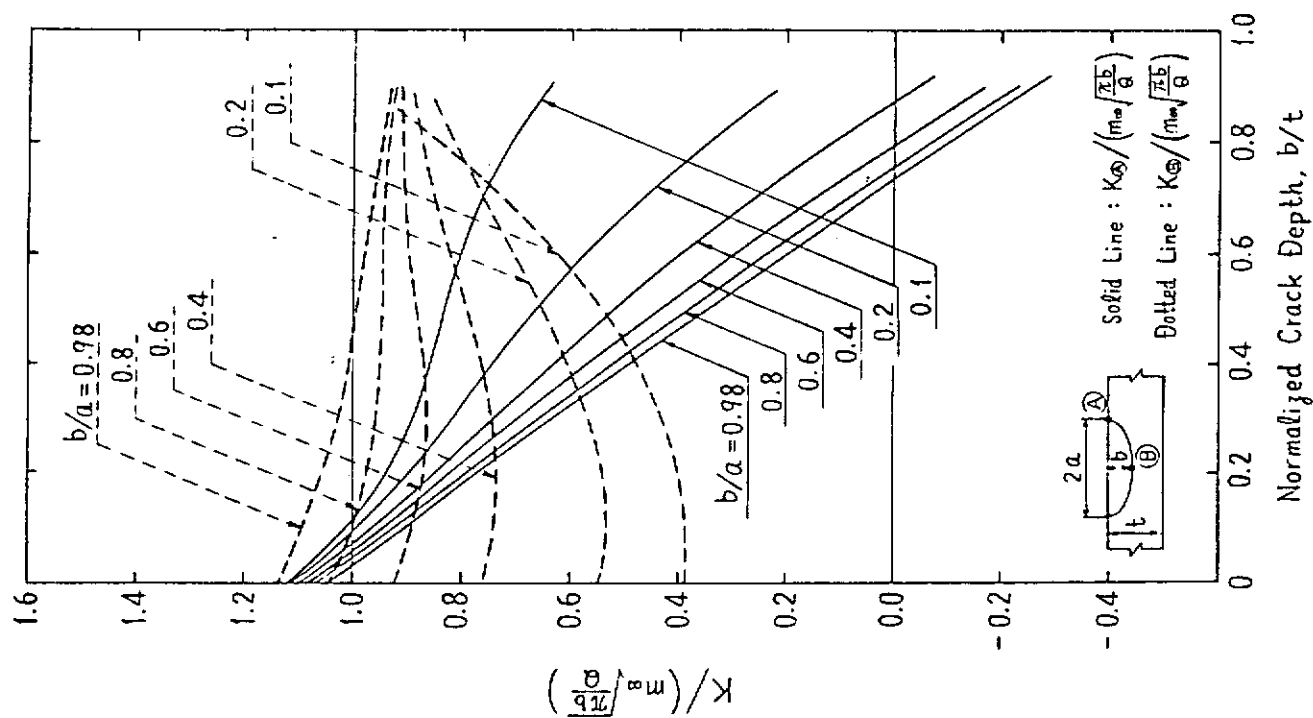


Fig. 3.5.4 Factors in plate bending<sup>(2)</sup>

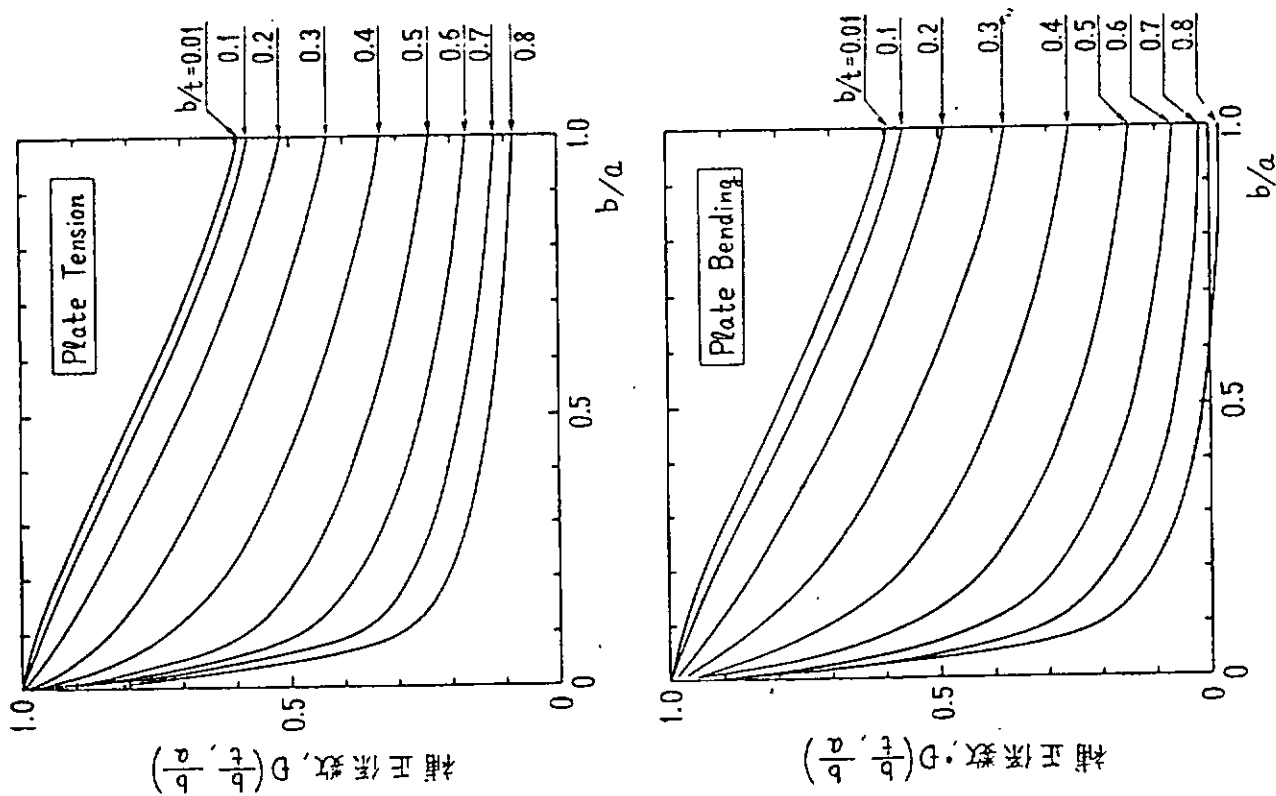


図3.5.5 二次元解から三次元解への補正係数  $D(\frac{b}{t}, \frac{b}{a})$

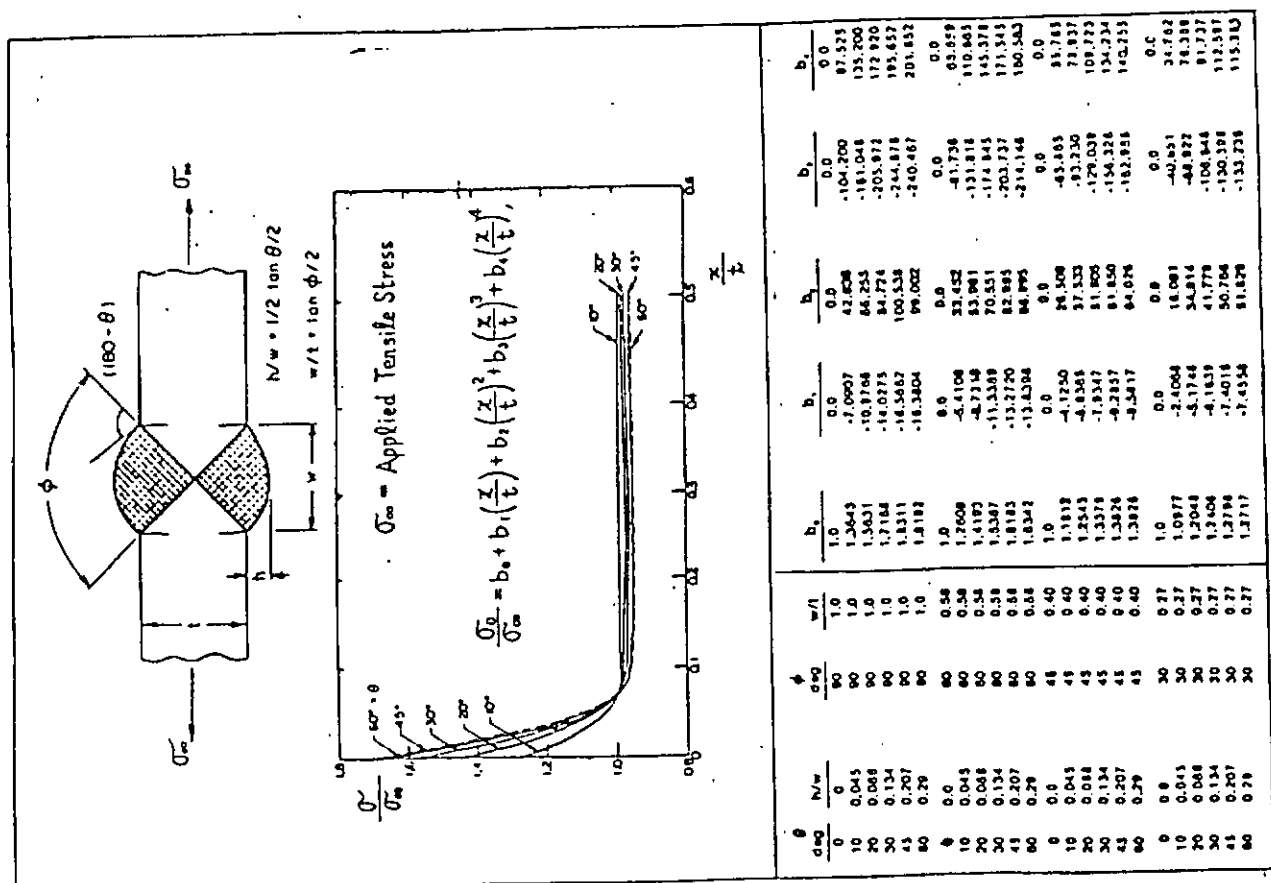
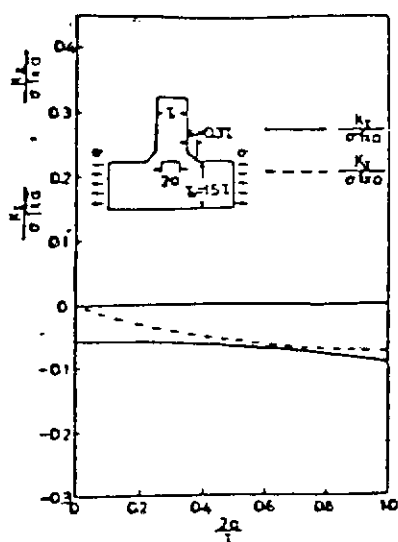
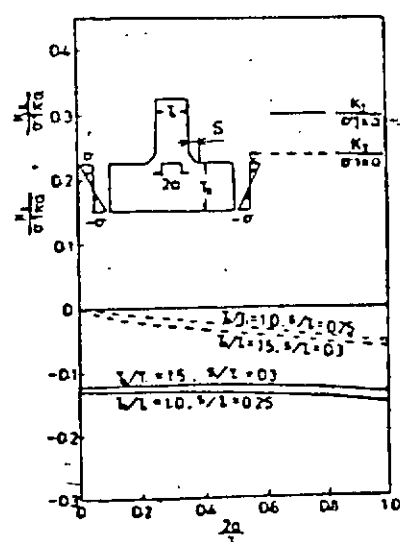


図3.5.6 Stress gradient near the weld toe<sup>(3)</sup>



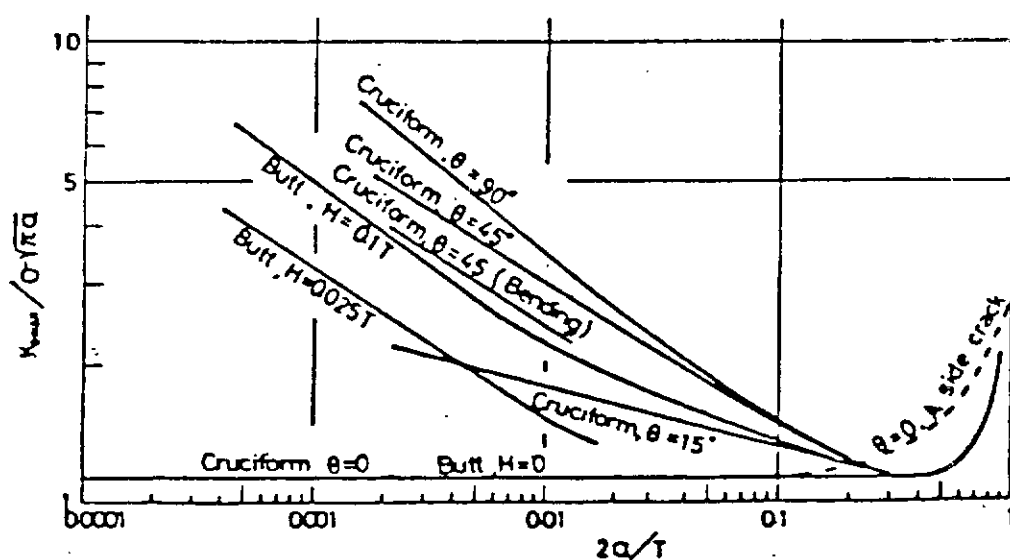
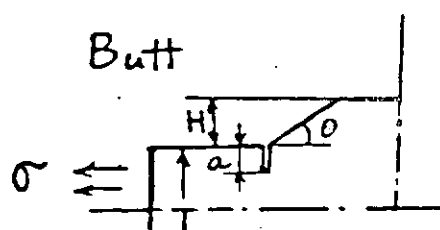
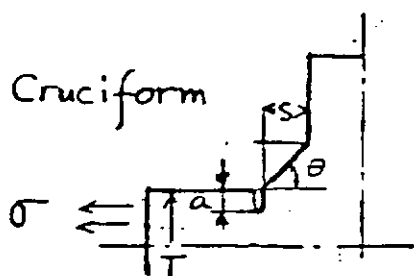
Stress intensity factor of tee joint under sub-plate tensile loading ( $T_2/T_1=1.5$ ,  $S/T_1=0.3$ )

(a)



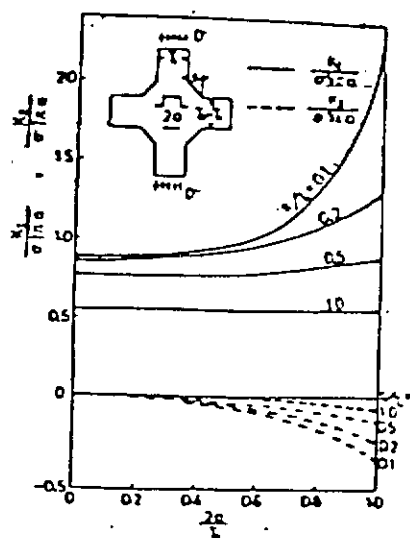
Stress intensity factor of tee joint under sub-plate bending load ( $T_2/T_1=1.5$ ,  $S/T_1=0.3$ )

(b)

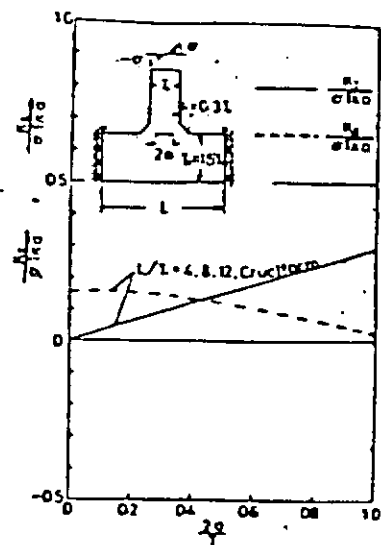


(c)

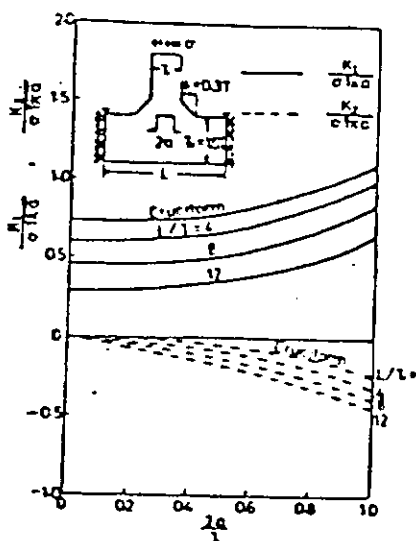
図3.5.7 隅肉溶接V-部・余盛止端部のK値<sup>(7)</sup>



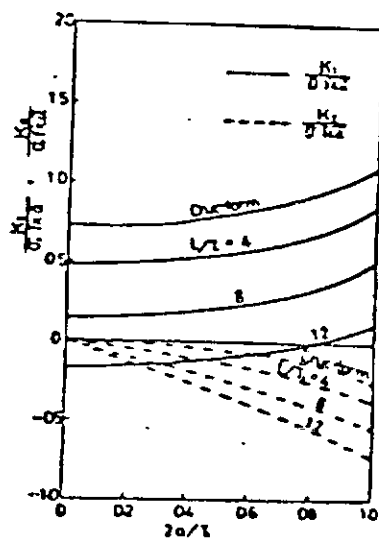
(a) Stress intensity factor of cruciform joints under tensile loading ( $T_2/T_1 = 1.0$ )



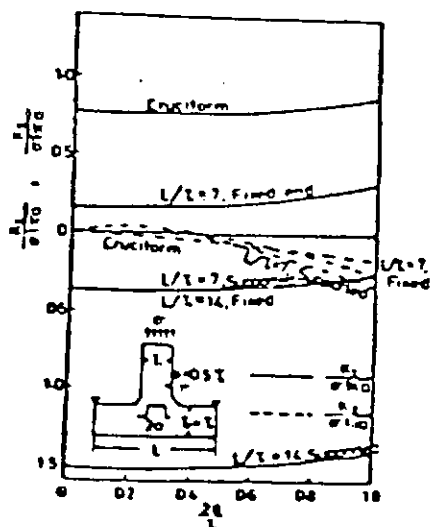
(b) Stress intensity factor of tee joints under main plate bending load ( $T_2/T_1 = 1.5$ ,  $S/T_1 = 0.3$ )



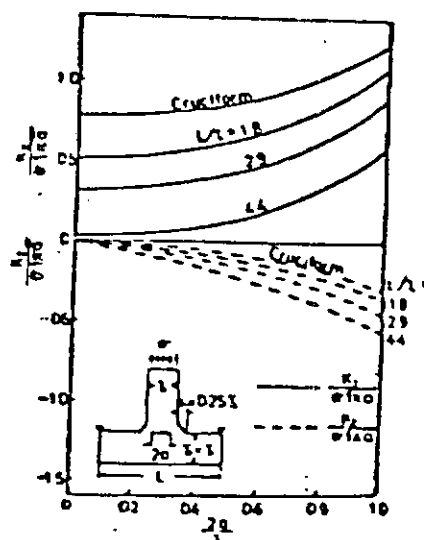
(c)  $T_2/T_1 = 1.5$ , Fixed end ( $S/T_1 = 0.3$ )



(d)  $T_2/T_1 = 1.5$ , Supported end ( $S/T_1 = 0.3$ )



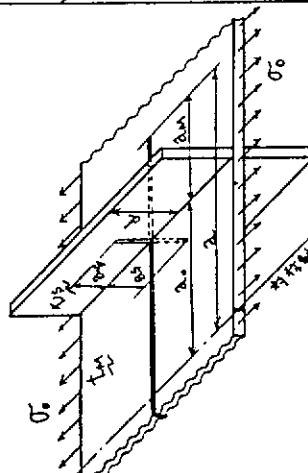
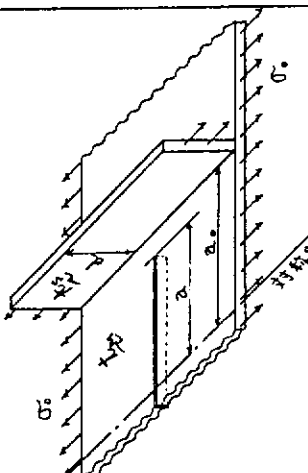
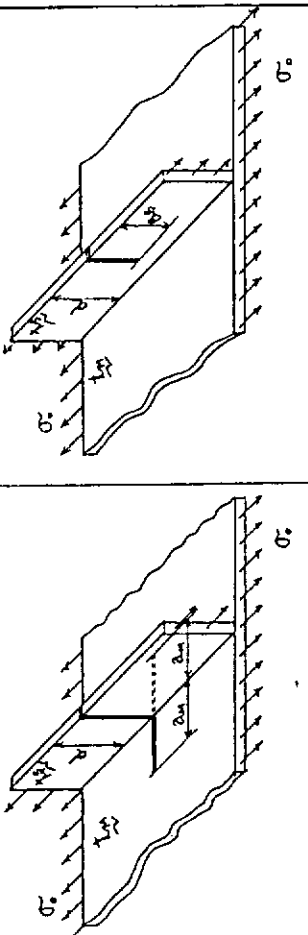
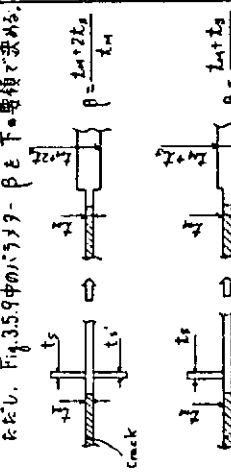
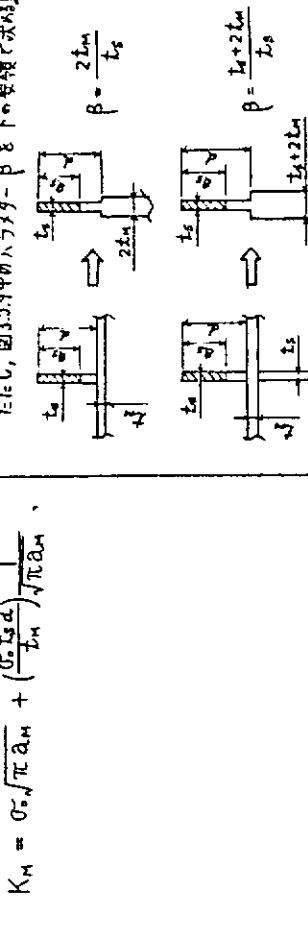
(e)  $T_2/T_1 = 1.0$ , Supported end ( $S/T_1 = 0.5$ )



(f)  $T_2/T_1 = 1.0$ , Supported end ( $S/T_1 = 0.25$ )

図3.5.8 隅肉溶接V-ト部のK値<sup>(7)</sup>

表3.5.4 防撓パネル中の亀裂先端のK値

|        | CRACK FROM MAIN PLATE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | CRACK FROM STIFFENER                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 概形     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                        |
| K 値略算式 | <p>(13), (14)</p> $K_M (\text{主板の} K \text{値}) = \sigma_c \sqrt{\pi a} - 2 \left( \frac{Q}{t_s t_s} \right) \left[ \frac{a}{\pi} \cdot \frac{t_s}{t_s} \sqrt{\frac{t_s}{a}} \right]$ $K_S (\text{スチフナ} \text{の} K \text{値}) = \frac{Q}{t_s t_s} \left\{ (1 + 0.297 (1 - \cos \frac{\pi a}{2d})) \sqrt{\frac{a}{t_s}} \right\}$ <p>ただし</p> $Q = \pi \sigma_c t_s \sqrt{a^2 - a_0^2} / f$ $f = \frac{1}{t_s} \left\{ 2d \cos \left( \frac{\pi a}{2d} \right) \left( 1 - \frac{2}{\pi} \cos \left( \frac{\pi a}{2d} \right) \right) + t_s \cos \left( \frac{\pi a}{2d} \right) + \frac{2 t_s}{a} \cos \left( \frac{\pi a}{2d} \right) \right\}$ <p>ただし、上の2式 (開口率・a/d) と置いて求める。</p> $V_M = \frac{2}{\pi} \left[ \sigma_c \sqrt{a^2 - a_0^2} - \frac{Q}{t_s t_s} \left( \cos \left( \frac{\pi a}{2d} \right) \right) \cdot \frac{Q}{a^2} \cos \left( \frac{\pi a}{2d} \right) \right]$ $V_S = \frac{2}{\pi} \left[ \frac{Q}{t_s t_s} \left( 2d \cos \left( \frac{\pi a}{2d} \right) \left( 1 - \frac{2}{\pi} \cos \left( \frac{\pi a}{2d} \right) \right) + t_s \cos \left( \frac{\pi a}{2d} \right) \right) \right]$ <p>両側スチフナの場合</p> | <p>(15), (16)</p> <p>スチフナがある場合と、無い場合とのK値比率 (<math>F_A</math>) を図3.5.9より求める。</p> $\frac{[K]_{\text{スチフナあり}}}{[K]_{\text{スチフナなし}}} = F_A$ <p>ただし、Fig. 3.5.9中のパラメータ <math>\beta</math> と下の要領で求める。</p>  <p>ただし、図3.5.9中のパラメータ <math>\beta</math> と下の要領で求める。</p> $K_M = \sigma_c \sqrt{\pi a_M} + \left( \frac{\sigma_c t_s d}{t_s} \right) \sqrt{\pi a_M}$ | <p>(15) (16)</p> <p>上記の場合と、スチフナ深さ(d)が十分長い単一平板中亀裂の場合のK値比率 (<math>F_A</math>) を図3.5.9より求める。</p> $\frac{[K_S]}{[K_S]_{\text{単一平板}}} = F_A$ $[K_S]_{\text{単一平板}} = 1.12 \sigma_c \sqrt{\pi a_s}$ <p>ただし、図3.5.9中のパラメータ <math>\beta</math> と下の要領で求める。</p>  |

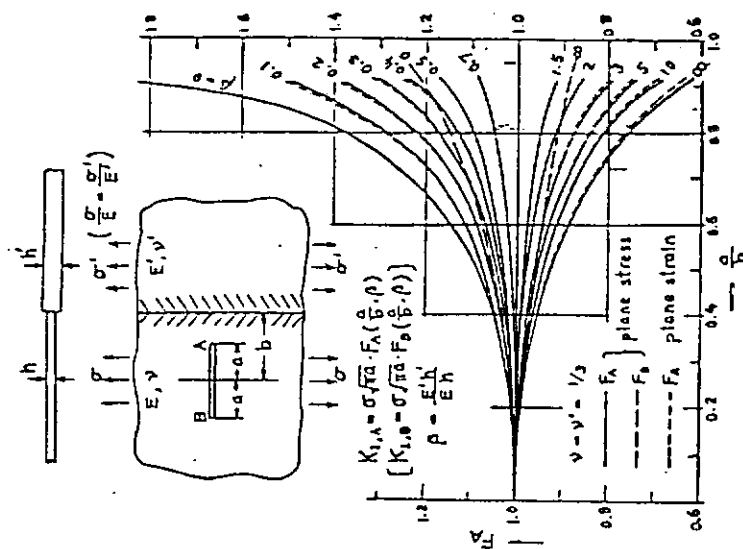


図 3.5.9 板厚不連続の補正係数  $F_A$ <sup>(16)</sup>

表 3.5.5 K値(便覧)ハンドブックの文献リスト

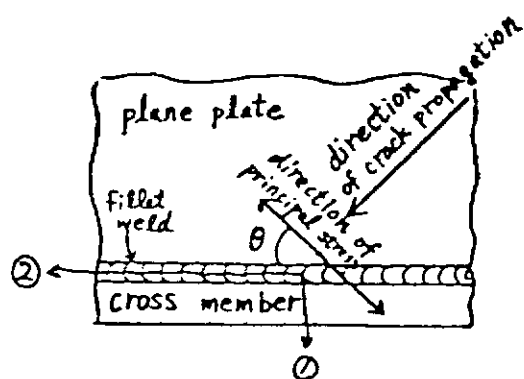
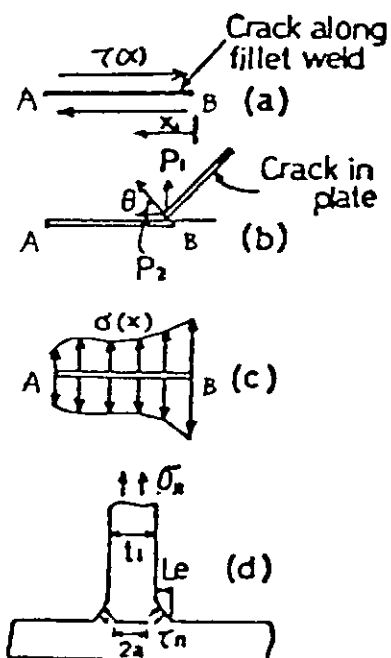
| 文献名                                       | 著者                             | 発行年  | 発行所                                                                                           | 備考(特記) |
|-------------------------------------------|--------------------------------|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| THE STRESS ANALYSIS OF CRACKS<br>HANDBOOK | H. TADA, P. PARIS,<br>G. IRWIN | 1973 | DEL RESEARCH CORPORATION<br>MELLERTOWN, PENNSYLVANIA                                          |        |
| HANDBOOK<br>OF Stress-Intensity Factors   | G. C. SIH                      | 1973 | Institute of Fracture and<br>Solid Mechanics,<br>LEHIGH UNIVERSITY<br>Bethlehem, Pennsylvania |        |
| き裂の弾性解析と応力拡大係数                            | 石田 誠                           | 1976 | 培風館                                                                                           |        |
| (応力拡大係数大要)<br>Compendium on -----         |                                | 1979 | (英国)                                                                                          |        |

表 3.5.6 (a) 参考文献 (その1)

|      | 著 者                            | Title                                                                                              | 出 典                                                                             |
|------|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| (1)  | A.S. Kobayashi                 | Crack Opening Displacement in a Surface Flawed Plate Subjected to Tension or Plate Bending.        | Proc. of the 2nd. Int. Conf. on Mechanical Behavior of Material, Boston, 1976.8 |
| (2)  | J.C. Newman, Jr. and I.S. Raju | Analysis of Surface Cracks in Finite Plates Under Tension or Bending Loads.                        | NASA Technical Paper, 1578.                                                     |
| (3)  | F.V. Lawrence                  | Estimation of Fatigue Crack Propagation Life in Butt Welds.                                        | Welding Journal, 1973, May.                                                     |
| (4)  | S.J. Maddox                    | A Fracture Mechanics Analysis of the Fatigue Behavior of a Fillet Welded Joint.                    | IIW-XIII-722-74                                                                 |
| (5)  | 中村宇八郎, 福沢光男, 矢田敏夫              | すみ肉溶接継手の適正寸法に関する研究                                                                                 | 石川島播磨技報, 第16巻 第5号, 昭51.9月                                                       |
| (6)  | H.P. Lieurade                  | Utilisation de la Mechanique de la Rupture Pour Le Resistance a la Fatigue des Assemblages Soudes. | IIW-XIII-840-77                                                                 |
| (7)  | S. Usami and S. Kusumoto       | Fatigue Strength at Root of Cruciform Toe and Lap Joints.                                          | IIW-XIII-833-77.<br>(JIW-XIII-432-77.)                                          |
| (8)  | S. Berge and H. Myhre          | Fatigue Strength of Misaligned Cruciform and Butt Joints.                                          | Norwegian Maritime Research, No.1/1977.                                         |
| (9)  | K.H. FRANK                     | The Fatigue Strength of Fillet Welded Connections.                                                 | Ph.D. Thesis, Lehigh University, Oct., 1971                                     |
| (10) | T.R. Gurney and S.J. Maddox    | Proposed Fatigue Design Stresses For Weld Metal.                                                   | (Report R/RB/E 56/73, Sept, 1973)                                               |
| (11) | H. Petershagen                 | Survey of Literature on the Fatigue Behavior of Cruciform Joints.                                  | IIW-XIII-750-74.                                                                |
| (12) | HAYES, D.J. and MADDOX, S.J.   | The Stress Intensity Factor of a Crack at the Toe of a Fillet Weld.                                | The Weld Inst. Research Bulletin, 13(1), 1972.                                  |

表3.5.6 (b) 参考文献 (その2)

|      | 著 者                            | Title                                                                                         | 出 典                                                            |
|------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| (13) | 金沢, 町田, 土井                     | クラックアレスターに関する基礎的研究<br>(第6報)——スチフナ型アレスターの有効性について——                                             | 造船学会論文集 第124号,<br>昭和43年12月.                                    |
| (14) | (SR169- 資料)                    |                                                                                               |                                                                |
| (15) | H.TADA, P.PARIS AND<br>G.IRWIN | The Stress Analysis of Cracks Hand-<br>book.                                                  | DEL RESEARCH CORPORATION,<br>Hellertown, Pennsylvania,<br>1973 |
| 16)  | M. Ishida                      | On the Determination of Stress Inten-<br>sity Factors for Some Common<br>Structural Problems. | Engineering Fracture Mech-<br>anics, Vol. 2, p.61, 1970        |

図3.6.1 平板部から直交交差部材に  
到達した後の亀裂経路図3.6.2 すみ肉溶接継手に沿う  
亀裂に作用する各種応力  
成分

## 4 基本要素のK値解析の例

3.2節で述べた船殻構造に特徴的と思われる幾つかの基本要素(図4.1)について、部材寸法などを変えてK値解析を行ない、K値近似式を作成した。

なお、基本要素④、⑤に関しては、すでに3.5節に記載済みである。

### 4.1 基本要素①のK値解析

#### 4.1.1 計算モデル

タンカーの横桁のブラケットウ部やバルクキャリアのフレーム端部など、船体構造部材にはフェイスプレートのスニップ端部が多くあり、この部分の応力集中により疲労亀裂が発生しやすい。

このような船体構造部材に対応した基本要素①のF.E.M.計算モデルを図4.1.1に示す。

フェイスプレートとウェブプレートは膜要素、直交交差部材はバー要素でモデル化し、フェイスプレートの端部をスニップしない場合とスニップした場合の2種類について、表4.1.1に示すようにフェイスプレートとウェブプレートの寸法を変化させて、全部で13ケース計算した。

荷重はフェイスプレート、ウェブプレートおよび直交交差部材に一樣な引張応力を負荷した。

#### 4.1.2 計算方法

ここでは解析解との重ね合わせ法によるK値解析プログラム<sup>1)</sup>と、亀裂なしモデルのF.E.M.応力解析<sup>2)</sup>の結果を使った近似的な方法でK値を求めた。

重ね合わせ法による解析では、亀裂は主応力と直交する方向に進展すると仮定しており、図4.1.1のX方向に対して、フェイスプレート側に約20°傾斜する。

しかし、簡略化計算では簡単化のために亀裂長さ $a$ は $x$ 方向に測るものと仮定する。

このように仮定した理由は、後で述べる亀裂なしモデルの応力分布図(図4.1.3)より分かるように、亀裂が少し進展すると、主応力の大きさは亀裂径路により、それほど変化しないからである。

亀裂なしモデルの応力分布より求める近似的な方法では、 $K$ 値を(4.1.1)式により求める。

$$K = M \cdot \sigma_0 \sqrt{\pi a} \text{ ----- (4.1.1)}$$

ここに、

$\sigma_0$ : 遠方一様引張応力 ( $\text{kgf/mm}^2$ )

$a$ : 亀裂長さ(図4.1.1の $x$ 方向にとる。) ( $\text{mm}$ )

$$M = M_t \cdot M_k \cdot M_p \text{ ----- (4.1.2)}$$

$$M_t = \sqrt{\frac{2}{\pi \xi} \tan \frac{\pi \xi}{2} \cdot \frac{0.752 + 2.03 \xi + 0.37 \{1 - \sin(\pi \xi / 2)\}^3}{\cos(\pi \xi / 2)}} \text{ --- (4.1.3)}^{3)}$$

$$M_k = C_0 + C_1 \xi + C_2 e^{-\lambda \xi} \text{ ----- (4.1.4)}$$

$$M_p = 1 + 0.14 \xi - 0.58 \xi^2 \text{ ----- (4.1.5)}^{4)}$$

ただし、 $\xi = a/dw$

(4.1.4)式の $M_k$ は次のようにして求めた。

まず、亀裂なしモデルによるF.E.M.応力解析を行なう。

その解析結果の例を図4.1.2に変位図(要素分割図)、図4.1.3に主応力図を示す。図4.1.3の点線は、主応力と直角方向に亀裂が進展すると仮定して求めた予測亀裂進展径路である。

また、図4.1.4にスニップしないモデルの主応力分布図を示す。

この図より、亀裂発生点(図4.1.4の縦軸の位置)近くでは応力が急激に高くなっていることが分かる。

応力分布の $K$ 値に対する影響 $M_k$ を図4.1.4に示す応力分布を使って求める方法は、Appendix (p.134)に示す。

表4.1.1に示す計算条件について求めた $M_R$ を、図4.1.5～図4.1.8に実線で示す。これらの計算結果を、(4.1.4)式の形に最小自乗法により回帰して求めた係数 $C_i$  ( $i=0\sim 2$ )、入を表4.1.2に示す。

これらの係数を(4.1.4)式に代入し計算した結果を図4.1.5～図4.1.8に点線で示すが、(4.1.4)式の近似度は充分であることが分かる。

### 4.1.3 計算結果

表4.1.1の計算条件について、解析解との重ね合わせ法による方法と(4.1.2)式の近似式で求めた結果を表4.1.3, 表4.1.4および図4.1.9, 図4.1.10に示す。

図4.1.9, 図4.1.10より、特定の条件についての解析解との重ね合わせ法と近似式とで求められた結果はよく一致しているので、(4.1.2)式による近似式はこのような基本要素の $K$ 値算式として有効である。

## 4.2 基本要素③の $K$ 値解析

### 4.2.1 基本要素

図4.2.1に示す如く平板上のstiffener端部に貫通亀裂がある場合の亀裂先端の $K$ 値を計算対象とする。

### 4.2.2 計算モデル

計算モデルを図4.2.2に示す。計算は平面問題として取り扱い、stiffenerは該部平板部のヤング率を変える事により表現した。なお、計算は平面歪状態(板厚方向の歪を拘束)を想定し、周辺要素数204個とした周辺積分構造解析プログラムを用いて行なった。また、stiffener止端部の形状としてはtaper無しの場合とsnip形状の場合の2 Caseを考えた。(図4.2.3にsnip部のモデル化の例を示す。)

### 4.2.3 計算 case

以下の諸量をパラメータとし、表 4.2.1 に示す如く計 40 case について計算を行なった。

- a) stiffener 止端部形状 (taper 無 (vertical), 30° snip)
- b) 平板端部拘束面と stiffener 止端部の距離 :  $\ell$   
 $\ell = 25, 100 \text{ mm}$
- c) stiffener 板厚 :  $t_2$   
 $t_2 = 10, 20 \text{ mm}$
- d) 亀裂長さ (半長) :  $a$   
 $a = 0, 10, 50, 100, 200 \text{ mm}$

### 4.2.4 計算結果

#### 1) 亀裂進展径路

図 4.2.4 に case-1 で  $a=0$  (亀裂がない場合) の主応力分布より、亀裂が主応力方向に直角に進展すると仮定して求めた亀裂進展径路を示す。図 4.2.4 より判断すると、本 case の場合、亀裂は stiffener と直交する線 (図中 A-A) より約  $10^\circ$  傾斜した方向へ進展すると考えられる。

他の case でもほぼ同様の傾向であったが、簡単化の為、以下の K 値の計算に於いては、亀裂は stiffener と垂直な方向へ直進するものと仮定した。

#### 2) 亀裂先端の K 値

図 4.2.5 に case-1 ~ case-8 の各 case に対応する計算より得られた亀裂長さ  $a$  と亀裂先端の K 値との関係を示す。

なお、K 値の計算手法として、変位法、応力法、内圧法の 3 種類の方法を比較検討したが、本図ではこれらの手法のなかで最も精度が良いと考えられる変位法により得られた亀裂先端の K 値を採用している。

なお、図 4.2.5 では stiffener 止端部の形状、stiffener の板厚、亀裂と

平板端部拘束面との距離等の各因子の影響が明らかでないので、これら各因子の影響を以下で考察する。

#### a) stiffener止端部の形状の影響

図4.2.6にstiffener止端部の形状をtaper無しとした場合と, snip形状とした場合との亀裂先端のK値の比を示す。図4.2.6より, 4 caseとも亀裂が短い所では, taper 無しの場合の方が snip 形状の場合より多少K値が大きい(  $a \rightarrow 0$  で15~30%大), 亀裂が長くなると(  $a > 50\text{mm}$  では), 両者の差はほとんどなくなる。

#### b) 平板端部拘束面と亀裂との距離の影響

図4.2.7に平板端部拘束面と亀裂との距離  $l$  が100mmの場合と25mmの場合との亀裂先端のK値の比を示す。図4.2.7より, 亀裂が特に短い(  $a < 10\text{mm}$  )場合は, 4 caseとも  $l$  が短い方(  $l = 25\text{mm}$  )がK値は大となるが, それ以外の場合は  $l$  が長い方(  $l = 100\text{mm}$  )がK値が大となる。

#### c) stiffener板厚(剛性)の影響

図4.2.8にstiffenerの板厚が20mmの場合と10mmの場合の亀裂先端のK値の比を示す。

全体的にstiffener板厚が厚い程K値も高い。板厚と等しい亀裂長さ(  $a = 10\text{mm}$  )の場合, 特にK値は大となっている。

### 4.3 基本要素 ③ の K 値解析

#### — 構造的な不連続部の K 値 —

#### 4.3.1 目的

構造的な不連続部の K 値解析を行う場合、不連続部の位置する構造部材の種類に応じて応力分布の特長を把握して解析する必要がある。構造的な不連続部は、縦応力が横部材に流入する構造と、横部材自身が不連続である構造とに分類できる。これらの数々の構造について逐一 K 値表示するのは実際的でなく見通しの良い表示も得られない。このため、まわし溶接部のビード形状の不連続が構造的な不連続部と重畳する場合の小亀裂の K 値表示を試みる。具体的には、スタフテ基部、ハッチカバーブラケット端部、ロンジの隔壁貫通部ブラケット端、2重張船側と2重底コーナ部等の小亀裂の K 値を表示するにとした。

#### 4.3.2 荷重と構造

溶接部のビード形状の不連続と構造的な不連続との重畳の代表例として、**図4.3.1**のような計算モデルについて K 値評価して理想化する。そして、実船構造への類推を行う。構造系の主部材の変形に従部材が適合する。そして不連続部がその従部材端に存在する系について検討する。その際主部材の変形を理想化して引張型と剪断型に分類して検討する。

#### 4.3.2.1 引張型

縦通材が引張/圧縮を受けそれに付く従部材が強制変形を受ける場合である。ハッチコーミング端部のブラケット趾端、ロンジ材の隔壁貫通部のブラケット端、ロンジヒに乘るスチッパ基部のまわし部等の各種構造の場合が適当な例である。

#### 4.3.2.2 剪断型

横部材の不連続部に多くある形式であり、従部材が荷重を支持して設計されている場合である。不連続部は主部材の曲げと剪断を同時に受けるが、曲げ変形については4.3.2.1の引張りの強制変位と同等であるので、剪断についてののみまとめておくとする。2重張船側構造と2重底との交差部、タンカーサイドロンジと水平桁との取合部等の局部構造が代表例である。

#### 4.3.2.3 構造寸法と亀裂形態

K値解析する場合の亀裂形態として表4.3.1のように、主部材である板に伝播するA型亀裂と、主部材と不連続部の境界に伝播するB型亀裂がある。

主部材と従部材との相互干渉による応力集中については、Hovgaardや渡辺恵弘先生の不連続桁の研究があり、設計パラメータとしては次の形式で与えられる。

即ち 桁端部の巨視的剪断応力( $\tau$ )と見掛けの引張り応力( $\sigma$ )の比は次式となる。

$$\tau/\sigma = \frac{1}{\mu\beta E} \times \tanh(\beta L)$$

$$\beta^2 = \frac{\alpha}{\mu E} \left( \frac{1}{A} + \frac{1}{a} \right)$$

$\mu E = 25 \text{ mm}$  (溶接継手の実験定数)

$\alpha$  = 主部材と従部材との接合部板厚

$A, a$  : 主(従)構造の断面積

上式から明らかとなり 重要な設計パラメータは 従構造の長さ( $L$ )である。溶接継手の実験定数から リフと

主構造との接合度合を示すビードの剪断バネ効果を換算すると

約  $9.5 \text{ m/m}$  となる。すなわち 主構造と従構造は

約  $10 \text{ m/m}$  の剪断バネで結合されているものと考えて理論解析

することが必要である。図4.3.1に 計算対象とした構造が示さ

れている。構造的な応力集中は,  $\alpha=100$ ,  $A=10,000 \text{ cm}^2$

あるので  $\beta=1/50$  とするようにし  $L$  を変えて制御する。

具体的に、 $L=20 \text{ m/m} \sim 720 \text{ m/m}$ , 溶接趾長さ  $h=0 \sim 10 \text{ m/m}$

とし 一部の構造については スニツプ形状を  $30^\circ$  とし計算する。

### 4.3.3 計算方法及び計算結果

まず、応力分布の影響係数を各種の構造パラメータで求める。亀裂のない構造について有限要素法で応力分布を求め、片側亀裂に引き裂き力が作用する場合のK値を次式により求める。

$$\frac{K}{\sigma\sqrt{\pi a}} = \frac{2}{\pi} \sum_{i=1}^m \sigma_i \frac{\Delta a}{a} \frac{F(a_i/a)}{\sqrt{1-(a_i/a)^2}}$$

ここで  $\sigma_i$  は  $a_i$  点の有限要素法による応力値で  $\Delta a$  区間に一様に分布する

$$F(a_i/a) = 1.3 - 0.3(a_i/a)$$

図4.3.2~図4.3.5 に応力解析の要素と応力分布の計算結果を示す。

次いで、図4.3.6 に一例を示したアイソパラメトリック要素による詳細K値解析をして、上式との相違を求め、構造の違いによる修正係数を求める。図4.3.7 は上式によるK値と詳細解析によるK値の差を例示した。

なお、た円型に板を伝播する亀裂を考える場合には、板の拘束を次式で求めれば良い。

$$\frac{K}{\sigma\sqrt{\pi a}} = \frac{M_K \cdot M_C}{E(\epsilon)}, \quad M_C = 1/1.1215$$

$$M_K = \text{小林の多項式}$$

$$E(\epsilon) = \sqrt{1 + 1.464(b/a)^{1.65}}$$

#### 4.3.4 K値の表示式

各種の構造パラメータ  $a/t$ ,  $\beta L$ ,  $h/t$  の2次又は3次式で最小二乗近似し K値の算定式を以下のように示す。

$$\frac{K_I}{\delta \sqrt{\pi a}} = f_0(a/t) \times f_1(a/t) \times f_2(a/t, \beta L) \times f_3(h/t, a/t) \times f_{30}(a/t)$$

ここで

$f_0(a/t)$  : 詳細有限要素によるK値と亀裂のない応力解析から求めたK値との比で約7点の最小二乗近似で定めた。

$$f_0(a/t) = (0.940, -0.516, 0.326, 0) \mathbf{A}$$

$f_1(a/t)$  : 隣接部材の拘束による影響係数で亀裂の前方に拘束材があるA型クラックでは

$$f_1(a/t) = (1.00, 0.140, -0.58, 0) \mathbf{A}$$

B型クラックでは  $f_1 = 1.0$

とする。

$f_2(a/t, \beta L)$  : 亀裂形式と荷重様式で異なる応力分布の影響係数

で  $f_2 = \mathbf{B}^T \mathbf{C} \mathbf{A}$  で与えられ  $\mathbf{C}$  は表4.3.1の

行列である  $\beta L$  が7.2以上では  $\beta L = 7.2$  とする。

$f_3(h/t, a/t)$  : 脚長比の補正係数で  $h/t = 0.5$  で  $f_3 = 1.0$  その他の場合 ( $0.0 < h/t < 1$ )

$$f_3(h/t, a/t) = f_4(h/t, a/t) / f_4(0.5, a/t)$$

$$f_4 = \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{H}$$

D行列は表4.3.1で与えられる。

$f_{30}(a/t)$ : リブ継手にスニツフ°が無い時 1.0 とし、

30°スニツフ°の時  $f_{30} = E_1^T A / E_2^T A$   
 $E_1, E_2$  は表4.3.1に示す

である。

これらの A, B, H ベクトルは次の通りである。

$$A = \begin{bmatrix} 1 \\ a/t \\ (a/t)^2 \\ (a/t)^3 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ \beta L \\ (\beta L)^2 \\ (\beta L)^3 \end{bmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} (2\gamma-1)(\gamma-1) \\ -2\gamma(\gamma-1) \\ -\gamma(2\gamma-1) \end{bmatrix}$$

前述の  $K_I$  値の表示式と詳細 K 値解析との相違を表4.3.2

に示す。  $\beta L$  が小さいと誤差は増すが  $K_I$  値が小さいので

実用上問題がなく、約 2~5% 以内で近似できる。

#### 4.3.5 まとめ

不連続部の重複する場合の小亀裂の K 値解析を

有限要素解析して、近似表示式を示した。

### 4.4 基本要素(F)のK値解析

#### 4.4.1 計算モデル

船殻の直交交差部は、構造的に応力集中が大きく、疲労亀裂の発生成長が強度設計上の大きな問題とされている。ここでは図4.4.1に示すようなモデル〔基本要素(F)〕の亀裂の K 値について解析を行なう。

亀裂は初期において板厚を貫通しない表面亀裂の形態をとり、やがて板厚を貫通した亀裂へと成長する。このような成長過程における亀裂の $K$ 値を精密に求めるには、本来、複雑な三次元応力解析を必要とし、現時点でその解を得ることは困難である。しかし、疲労亀裂の伝播成長の解析を目的とする場合は、適当な等価応力設定により、 $K$ 値の簡易算定で粗い近似値を求めることが可能である。

$K$ 値の簡易解析として、次の手順に従った計算を行なう。

- (1) 亀裂なしの場合についての応力分布を求める。
- (2) 特に、亀裂が存在し又は伝播する位置・範囲における応力分布を、簡易表現式にまとめる〔図4.4.2〕。
- (3) 疲労亀裂伝播の解析が主たる目的であるとして、適当と考えられる等価応力を設定する。
- (4) 比較的単純な平面モデルに引き写して、 $K$ 値を算定する。

具体的な計算を行なうのに、図4.4.3に示すような対称直交交差部のモデルを用いた。外力としては曲げモーメント $M$ 、引張力 $P$ 、剪断力 $F$ が考えられるが、ここでは疲労損傷の上で問題となることの多い曲げモーメント $M$ がかかる場合を採り上げ解析を行なうこととする。

亀裂の形態としては、図4.4.4に示すように

- (a) フェイスの板厚内の表面亀裂
- (b) フェイスの板厚を貫通した亀裂
- (c) フェイスの板厚を貫通し、ウェブへも入った亀裂

があるが、ここでは主として(a)、(b)の場合を対象とした算定を行なう。

亀裂が浅くて(フェイス板厚の10~20%以下の深さ)長い形状の表面亀裂である場合は、亀裂の伝播成長がもっぱら板厚方向に起る。それ故、亀裂なしの場合の応力分布の解と止端部の応力集中とを勘定に入れ、縁亀裂のモデルで安全側の $K$ 値を算定することが出来る〔3.5節、表3.5.3を参照〕。

しかし、亀裂が半円に近い場合、又は亀裂深さが板厚の20～30%以上の深い亀裂又は貫通亀裂の場合は、長さ方向の亀裂伝播が重要となり、これを律するパラメータの設定が必要となる。ここでは特に疲労亀裂伝播の解析に注目し、(4.4.1)式のように有効応力値 $\sigma_{eff.}$ を設定し<sup>5),6)</sup>、分布荷重のかかった無限板のモデルを用いてKの有効値を求めることとした。

$$\sigma_{eff.} = \sigma_m + \sigma_b/2 \text{ ----- (4.4.1)}$$

$\sigma_m$  : 軸力引張応力

$\sigma_b$  : 平面曲げ応力

#### 4.4.2 応力分布についての解析

対称直交交差部について、図4.4.5のようなモデルのメッシュ分割により応力分布を求めた。計算は板厚 $t = 10 \text{ mm}$ 、ウェブ高さ $h = 1,000 \text{ mm}$ 、アームの長さ $l = 3,000 \text{ mm}$ として、フランジ幅 $W$ を500, 1000, 2000 mmの3通りにかえた場合について行なった。

図4.4.6にこれら3つの場合について、亀裂の発生・成長が起るX-X線に直角方向のメンブレン応力 $\sigma_m$ の分布を、特にフェイス面、O-X線上ならびにO-Y線上(ウェブとの接合線)について示す。また曲げモーメント $M$ から計算される公称応力 $\sigma_N$ を破線で示す。

図4.4.7にこれら3つの異なる $W$ の場合のフェイス面O-X線上における、亀裂線に直角方向の軸力引張応力 $\sigma_m$ 、ならびに平面曲げ応力 $\sigma_b$ の分布を示す。

軸力引張応力と平面曲げ応力とは、破壊損傷の進行に異なる寄与をするが、疲労亀裂伝播の解析に限ると(4.4.1)式に示したような等価応力 $\sigma_{eff.} = \sigma_m + (\sigma_b/2)$ が亀裂の長さ方向の成長を支配すると考えられる<sup>5),6)</sup>。O-X線上における $\sigma_{eff.}$ の分布を図4.4.8に示す。図4.4.8の縦軸には $\sigma_{eff.}$ と公称応力 $\sigma_N$ との比をとり、横軸にはフランジ中央線からの距離 $X$ とフランジ

半幅  $W/2$  との比をとっている。図4.4.8に示す3本の曲線は、次のような式でまとめて表現することが出来る。

$$\sigma_{\text{eff}}/\sigma_N = 2.4 \left[ 8(X+t)/W \right]^{-\frac{1}{3} \log(W/180)} - 1 \text{ ----- (4.4.2)}$$

: for  $X \geq 0$

有限要素法による計算結果と、(4.4.2)式による簡易算定との比較を図4.4.9に示す。

#### 4.4.3 等価K値の算定

一様な軸力引張と平面曲げを受ける平板における疲労亀裂の伝播成長については、次のような伝播速度式が貫通亀裂について成立<sup>5)</sup>。

$$da/dN = C \left[ (\Delta\sigma_m + \Delta\sigma_b/2) \sqrt{\pi a} \right]^m \text{ ----- (4.4.3)}$$

$a$  : 亀裂半長

$N$  : 応力繰返し数

$\Delta\sigma_m, \Delta\sigma_b$  : 応力範囲の軸力引張および平面曲げ成分

$C, m$  : 材料定数

板厚を貫通していない亀裂でも亀裂深さが板厚の20~30%以上となると(4.4.3)式が近似的に成立<sup>6)</sup>。それ故、疲労亀裂伝播の解析に限るならば、(4.4.3)式を拡張して、平面曲げ応力が軸力引張応力の $1/2$ の寄与をなすものとして等価のK値を算定することが出来る。

図4.4.10に示すように、分布応力のかかる無限板の亀裂のモデルにあてはめると、応力拡大係数の実効値  $K_{\text{eff}}$  が次のような式で求められる。

$$\begin{aligned} K_{\text{eff}} &= \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \int_{-a}^a \sigma_{\text{eff}} \cdot \sqrt{\frac{a-x}{a+x}} dx \\ &= \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \int_0^a \sigma_{\text{eff}} \cdot \frac{2a dx}{\sqrt{a^2 - x^2}} \text{ ----- (4.4.4)} \end{aligned}$$

ここで、次のような変数変換を行えば、

$$x = a \sin \theta \quad \text{-----} (4.4.5)$$

(4.4.4)式は

$$K_{eff.} = \sqrt{\pi a} \cdot \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \sigma_{eff.} d\theta \quad \text{-----} (4.4.6)$$

$\sigma_{eff.}$ の値として(4.4.2)式を代入すると、 $K_{eff.}$ が求められる。図4.4.11に(4.4.2)、(4.4.6)式から得られた $K_{eff.}$ 値を $6\sqrt{\pi a}$ との比の形で示す。

このようにして得られた $K_{eff.}$ 値は応力拡大係数そのものではないが、極端に浅くて長い亀裂の場合を除き、一般に長さ方向の亀裂伝播を律する等価のK値としてParis則を準用した解析に適用することが出来る。

#### 4.5 スチフナエンド部の表面亀裂のK値解析

防撓材のスニップ端はパネル振動による疲労損傷が比較的多く発生している。

SR157研究部会<sup>7)</sup>において、この部分の応力解析が実施されており、ここでは、その結果を用いて、隅肉溶接部の表面亀裂のK値を近似的に求めた例を示す。

SR157で解析された計算モデルを図4.5.1に示す。

表面亀裂のK値を知るには、板厚方向の応力分布が必要であるが、図4.5.1より分かるように板厚方向の要素分割数が少なく、また詳細な解析結果は利用できなかった。

そこで、近似的なあつかいとして、新たに作成した平面歪F.E.M.モデルにより板厚方向の応力分布形を求め(図4.5.2～図4.5.4)、応力の絶対値(パネル中央で1mmの変位に相当する)はSR157で求められた図4.5.1のA,B,C点の最大応力値でキャリブレートして、応力分布を求めた。

図4.5.1でA,B,C点での応力値と計算条件を表4.5.1に示す。

このようにして求めた応力分布を用いると, Appendix (p.134)に示す方法により $M_R$ が計算できる(4.1節参照)。

K値を次式で与える。

$$K = \frac{M_t \cdot M_R \cdot M_P}{E(l)} \cdot \sigma \sqrt{\pi b} \quad \text{----- (4.5.1)}$$

ここで,

$b$ : 板厚方向の亀裂長さ (mm)

$E(l)$ : 第2種完全楕円積分 ( $l = \sqrt{1 - (b/a)^2}$ )

$a$ : 板表面での亀裂長さの半分 (mm)

$\sigma$ : パネル中央で1mmの曲げ撓みに相当する最大応力 (kgf/mm<sup>2</sup>)  
(表4.5.1)

$M_t$ : 平板表面亀裂の最深部K値の有限板厚修正係数  
(J.C. Newman<sup>8)</sup>による値を採用。)

Crack A ;  $b/t = \infty$  (貫通亀裂)

Crack B ; 引張荷重に対する値

Crack C ; 曲げ荷重に対する値

$M_P$ : Crack A ;  $1 + 0.14(b/t) - 0.58(b/t)^2$  ----- (4.5.2)  
Crack B, C ; 1

$$M_R = C_0 + C_1 \cdot (b/t) + C_2 \cdot e^{-\lambda(b/t)} \quad \text{----- (4.5.3)}$$

|         | $\lambda$ | $C_0$ | $C_1$ | $C_2$ |
|---------|-----------|-------|-------|-------|
| Crack A | 9.5       | 0.89  | -0.44 | 0.11  |
| Crack B | 9.5       | 0.85  | -0.71 | 0.19  |
| Crack C | 0         | 1.0   | 0     | 0     |

$M_R$ の値と(4.5.3)式の近似式による値を図4.5.5に示す。

Crack A, B, Cに対する計算結果を $b/t$ ,  $b/a$ をパラメータにして図示すると, 図4.5.6～図4.5.8に示すごとくなる。

# Appendix : $M_k$ の求め方

$M_k$  (応力集中による影響係数) は次式で定義される。

$$M_k = K_f (\text{任意応力場での } K \text{ 値}) / K_t (\text{一様応力場での } K \text{ 値}) \text{---(A1)}$$

例えば, リブ十字溶接継手の場合は,  $K_f$  は溶接部断面の有限要素法による  $K$  値を,  $K_t$  は一様応力の両側き裂平板の  $K$  値をとる。

しかし,  $K_f$  の解が利用できない場合は, き裂なし計算モデルの応力解析結果から, 汎用的に次のようにして,  $K_f$  を推定できる。この場合の  $K_f$  は任意応力場の半無限板の  $K$  値であり,  $K_t$  は一様応力場の半無限板の  $K$  値となる。

半無限板に応力分布が作用する場合の  $K$  値は次式で与えられる。<sup>A1)</sup>

$$K_f = \int_0^a \frac{2}{\sqrt{\pi a}} \frac{a}{\sqrt{a^2 - x^2}} \sigma_0 \sum_{n=0}^1 C_n x^n F(\xi) dx = M_f \cdot \sigma_0 \sqrt{\pi a}$$

$$M_f = \sum_{n=0}^1 M_{kn} \quad , \quad M_{kn} = \sum_{n=0}^1 k_n C_n a^n \text{---(A2)}$$

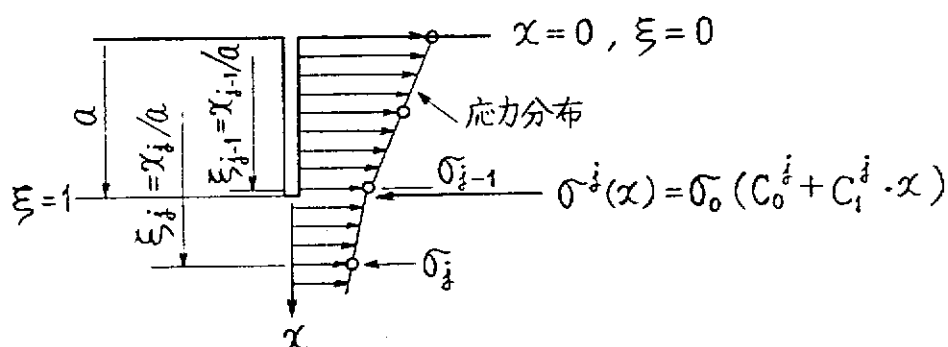
$$k_n = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{\xi^n F(\xi)}{\sqrt{1 - \xi^2}} d\xi \text{---(A3)}$$

$$F(\xi) = 1.30 + 0.02\xi - 0.59\xi^2 + 0.27\xi^3 \quad , \quad \xi = x/a$$

ここに,  $a$ : き裂長さ

$\sigma_0$ : 遠方一様応力

$C_n$ : 応力分布を多項式分布としたときの係数



分割された区間  $j$  での応力分布を次式で表わす。

$$\sigma^j(x) = \sigma_0 (C_0^j + C_1^j \cdot x) \text{---(A4)}$$

したがって、(A2)式の  $M_{k_n}$ ,  $n=0, 1$  は次式で与えられる。

$$M_{k_0} = \sum_{k=1}^{j-1} \left[ \frac{2}{\pi} \left\{ 1.30 (I_0(\xi_k) - I_0(\xi_{k-1})) + 0.02 (I_1(\xi_k) - I_1(\xi_{k-1})) \right. \right. \\ \left. \left. - 0.59 (I_2(\xi_k) - I_2(\xi_{k-1})) + 0.27 (I_3(\xi_k) - I_3(\xi_{k-1})) \right\} \times C_0^k \right] \\ + \frac{2}{\pi} \left\{ 1.30 (I_0(1) - I_0(\xi_{j-1})) + 0.02 (I_1(1) - I_1(\xi_{j-1})) \right. \\ \left. - 0.59 (I_2(1) - I_2(\xi_{j-1})) + 0.27 (I_3(1) - I_3(\xi_{j-1})) \right\} \times C_0^j \quad \text{----- (A5)}$$

$$M_{k_1} = \sum_{k=1}^{j-1} \left[ \frac{2}{\pi} \left\{ 1.30 (I_1(\xi_k) - I_1(\xi_{k-1})) + 0.02 (I_2(\xi_k) - I_2(\xi_{k-1})) \right. \right. \\ \left. \left. - 0.59 (I_3(\xi_k) - I_3(\xi_{k-1})) + 0.27 (I_4(\xi_k) - I_4(\xi_{k-1})) \right\} \times C_1^k \cdot a \right] \\ + \frac{2}{\pi} \left\{ 1.30 (I_1(1) - I_1(\xi_{j-1})) + 0.02 (I_2(1) - I_2(\xi_{j-1})) \right. \\ \left. - 0.59 (I_3(1) - I_3(\xi_{j-1})) + 0.27 (I_4(1) - I_4(\xi_{j-1})) \right\} \times C_1^j \cdot a \quad \text{----- (A6)}$$

ここで、積分  $I_n(\xi_0)$  は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} I_0(\xi_0) &= \int_0^{\xi_0} \frac{d\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} = \arcsin \xi_0 \\ I_1(\xi_0) &= \int_0^{\xi_0} \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi = -\sqrt{1-\xi_0^2} \\ I_2(\xi_0) &= \int_0^{\xi_0} \frac{\xi^2}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi = \frac{1}{2} \left[ -\xi_0 \sqrt{1-\xi_0^2} + \arcsin \xi_0 \right] \\ I_3(\xi_0) &= \int_0^{\xi_0} \frac{\xi^3}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi = \frac{1}{3} \left[ -(\xi_0^2 + 2) \sqrt{1-\xi_0^2} \right] \\ I_4(\xi_0) &= \int_0^{\xi_0} \frac{\xi^4}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi = \frac{1}{8} \left[ -\xi_0 (2\xi_0^2 + 3) \sqrt{1-\xi_0^2} + 3 \arcsin \xi_0 \right] \end{aligned} \right\} \quad \text{(A7)}$$

また、一様応力場の半無限板の  $K$  値は次式で与えられる。

$$K_t = 1.12 \sigma_0 \sqrt{\pi a} \quad \text{----- (A8)}$$

したがって、(A2)式の  $K_f$  と (A8)式の  $K_t$  を (A1)式に代入することにより  $M_k$  が求まる。

上記の  $M_k$  の精度を確認するため、表面き裂の場合とリブ十字溶接継手の場合について計算し、文献の値と比較する。

表面き裂の場合は J.C. Newman の解で裏面で 0 の線形分布応力の場合について比較した結果 図 A1 のようになる。

$b/a = 0.5$  では、全き裂長さにわたってほぼ一致しているが、 $b/a$  が小さくなるとき裂長さが大きくなるにつれて差が出てくる。これはき裂が大きくなると、板曲げによる変形の影響が出てくるからと思われる。したがって、板曲げが大きい範囲では実用上の精度で応力分布の影響は  $M_R$  で算入することができる。

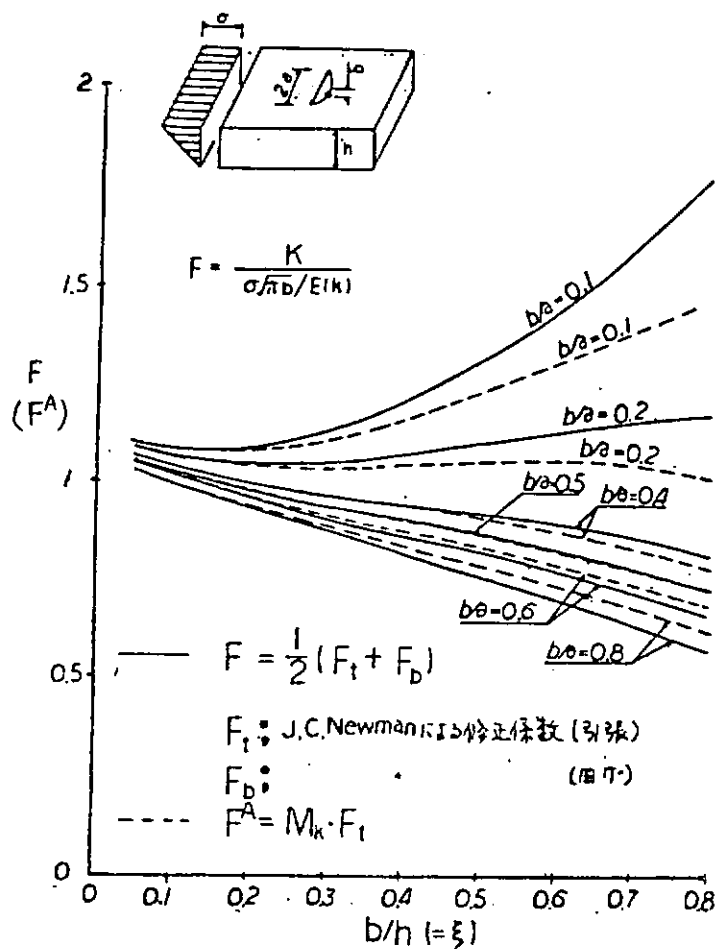
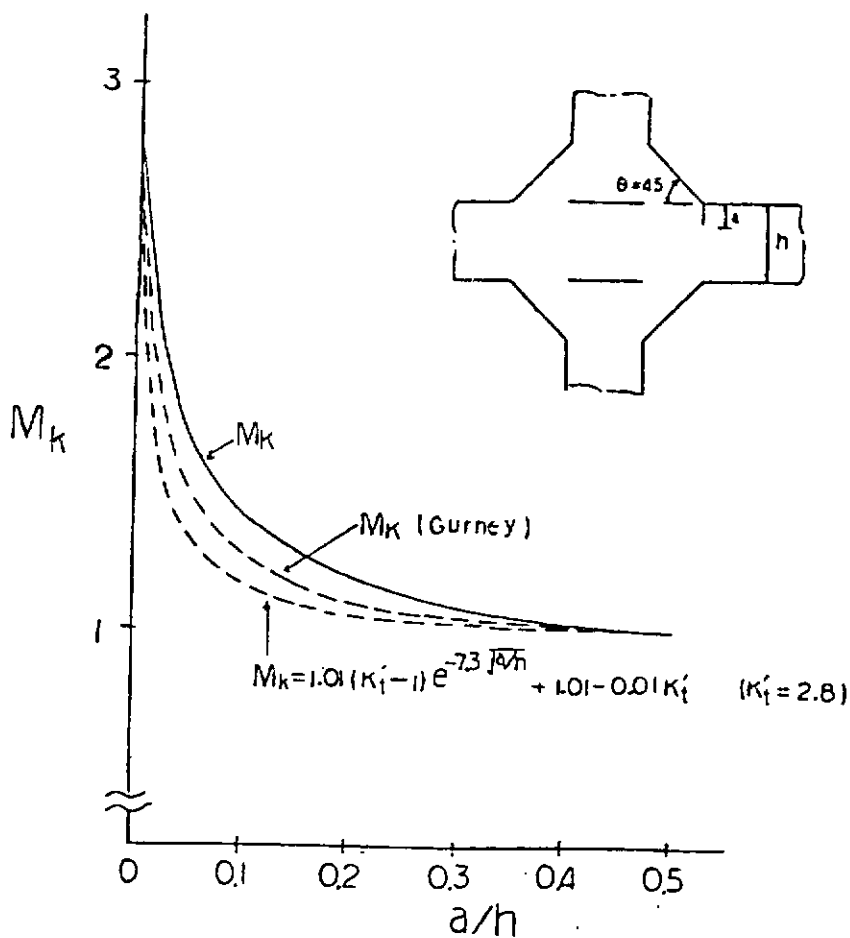
リブ十字溶接継手の場合は、図 A2 に示すように、第 5 章 (Maddox) の値に対しては最大 20% 程度、Gurney の値<sup>A2)</sup> に対しては最大 10% 程度大きくなっている。

この理由は明確には分らないが、応力勾配が大きな部分での  $K$  値の算出方法にも問題があると思われる。

(Gurney の  $K$  値の精度は、中央切欠平板で最大 20% 程度低目であることが示されている。)

#### 参考文献

- A1) H. Tada, P. Paris and G.R. Irwin, The Stress Analysis of Cracks Handbook, Del Research Corporation (1973)
- A2) T.R. Gurney, Finite element analysis of some joints with the welds transverse to the direction of stress, Welding Research International Vol.6 No.4 (1976)

図 A1 半楕円き裂での  $M_K$  の確認図 A2 リブ十字継手での  $M_K$  の確認

## 参考文献

- 1) O. Ushirokawa, Crack Simulation Computer Program for Plate Structure, IHI Engineering Review Vol. 13 No. 3 (1980. 7)
- 2) 根本, 外, 有限要素法による平面応力解析の汎用プログラムおよび適用例, 石川島播磨技報 第11巻第5号 (1971. 9)
- 3) H. Tada, P. Paris and G. R. Irwin, The Stress Analysis of Cracks Handbook, Del Research Corporation (1973)
- 4) 石田, き裂の弾性解析と応力拡大係数, 破壊力学と材料強度講座2, 培風館 (1976)
- 5) F. Erdogan, Proc. 1st Int. Conf. Fracture, Sendai (1975), p. 765
- 6) 川原, 栗原, 表面き裂の疲労による伝播成長過程に関する予備的考察, 日本造船学会論文集 第137号 (昭. 50. 6)
- 7) 日本造船研究協会第157研究部会, 船体構造のメンテナンスフリーに関する研究, 研究資料 No. 287 (昭. 53. 3)
- 8) J. C. Newman, et al., Analysis of Surface Cracks in Finite Plates under Tension or Bending Loads, NASA, T. P. 1578 (1979)

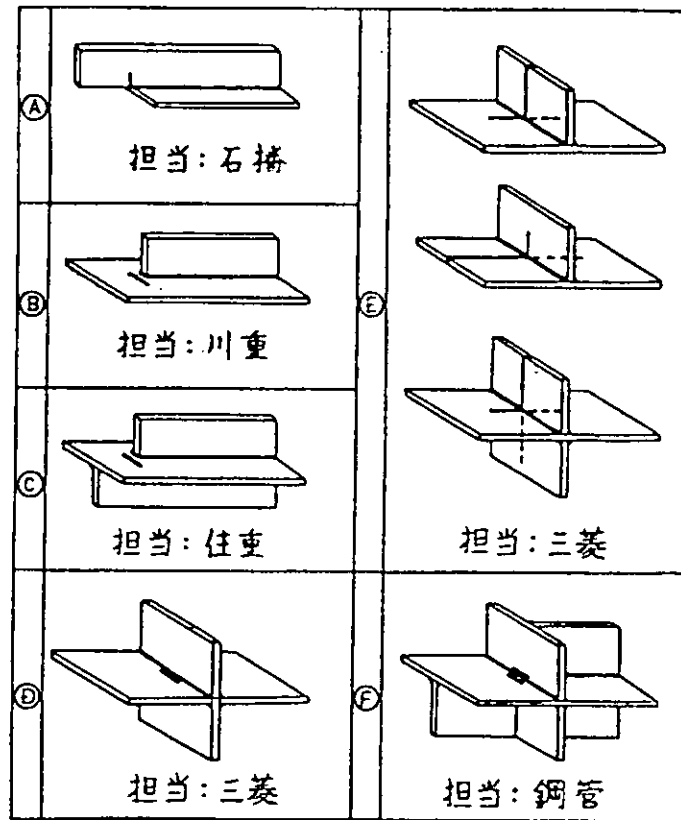


図4.1 基本要素

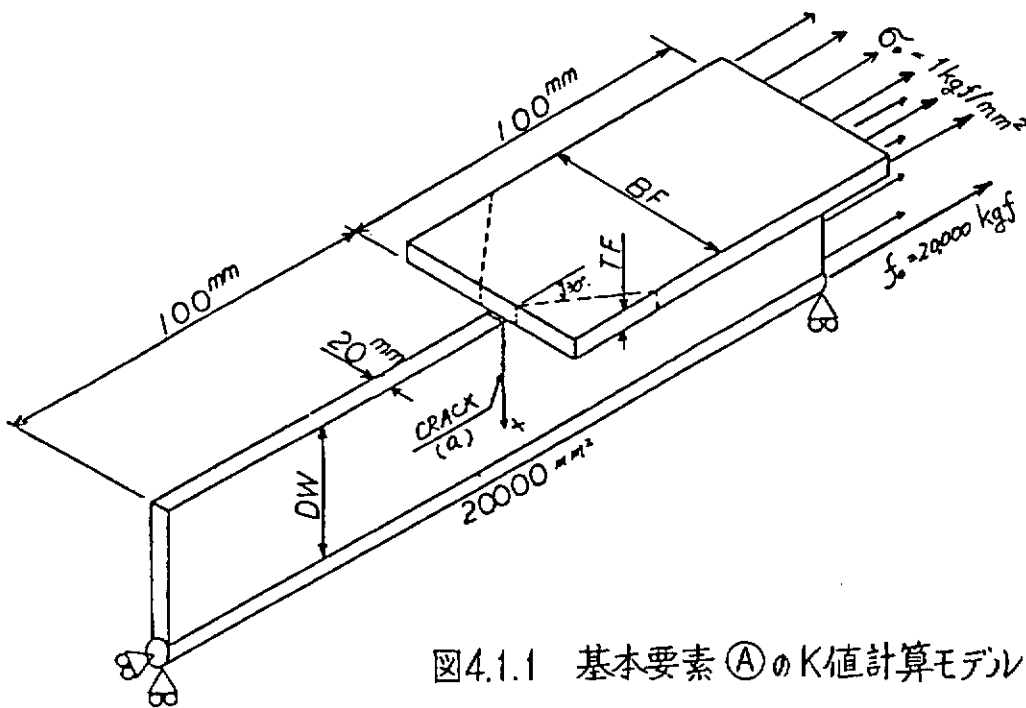


図4.1.1 基本要素①のK値計算モデル

图4.1.3 Principal stress distribution of basic element ①

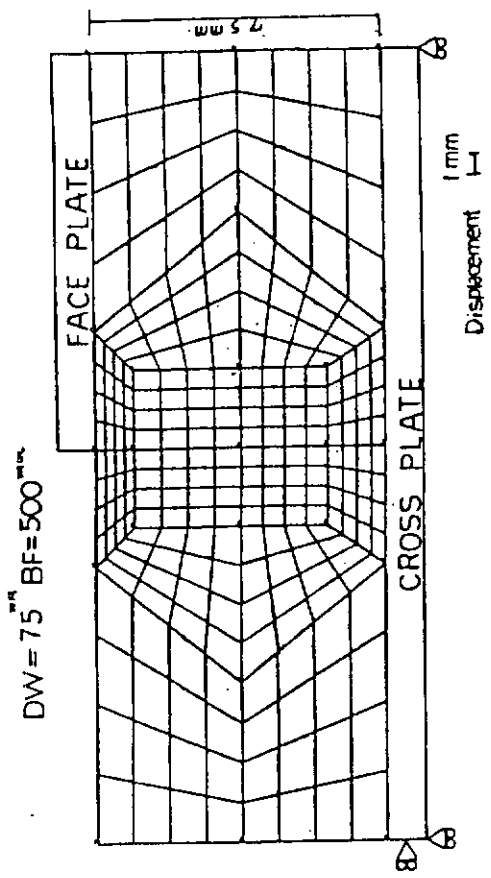


图4.1.2 Mesh divisions and displacements of basic element ①

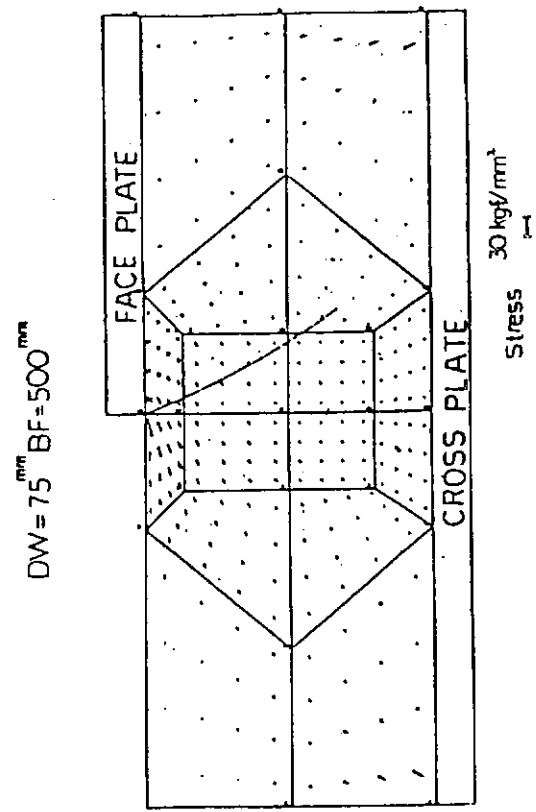


表 4.1.1 Calculating conditions.

| Case | Face    | DW(mm) | BF (mm) | TF (mm) | Stress analysis       | Equation(2)           | Superposition method  |
|------|---------|--------|---------|---------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1    | No snip | 50     | 150     | 20      | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 2    |         |        | 300     |         | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |                       |
| 3    |         |        | 500     |         | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |                       |
| 4    |         | 75     | 150     |         | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |                       |
| 5    |         |        | 300     |         | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |                       |
| 6    |         |        | 500     |         | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |                       |
| 7    |         | 100    | 150     |         | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 8    |         |        | 300     |         | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |                       |
| 9    |         |        | 500     |         | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |                       |
| 10   | Snip    | 50     | 150     | 10      | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |                       |
| 11   |         |        |         | 20      | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 12   |         |        |         | 30      | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |                       |
| 13   |         |        |         | 40      | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |                       |

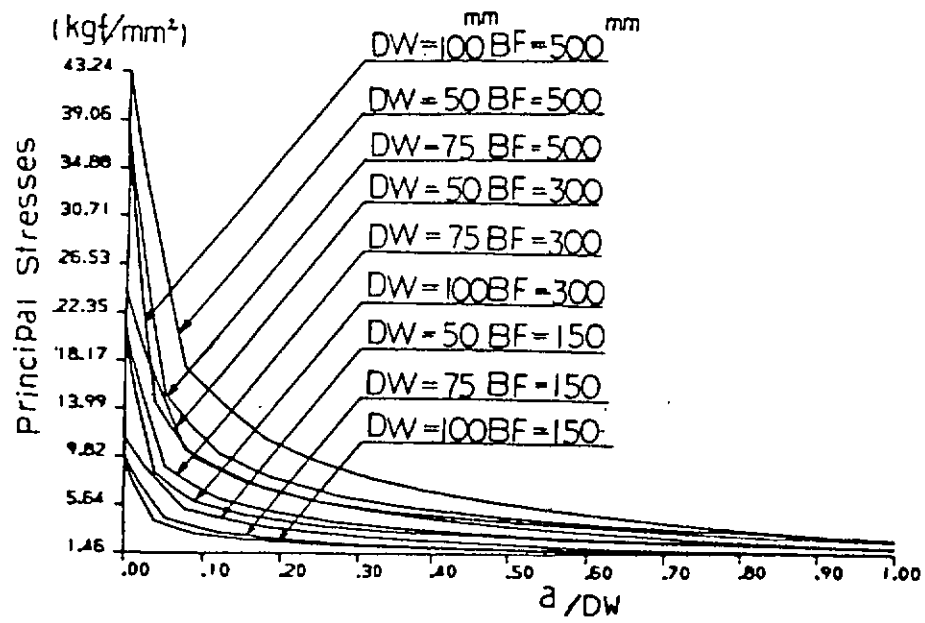


Fig. 4.1.4 Stress Distributions of Basic Element (A) (No arip)

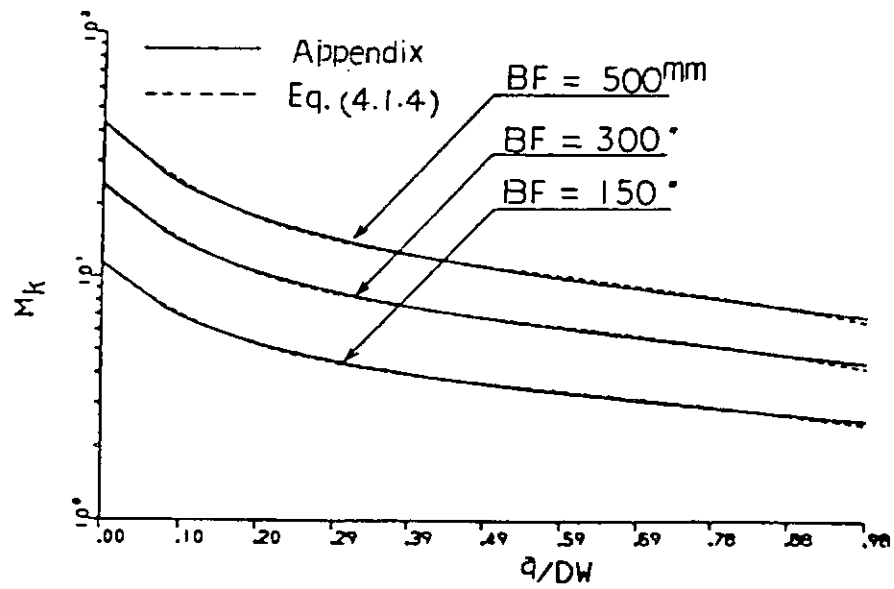


Fig. 4.1.5  $M_k$  of Basic Element (A) ( $DW=50$  No arip)

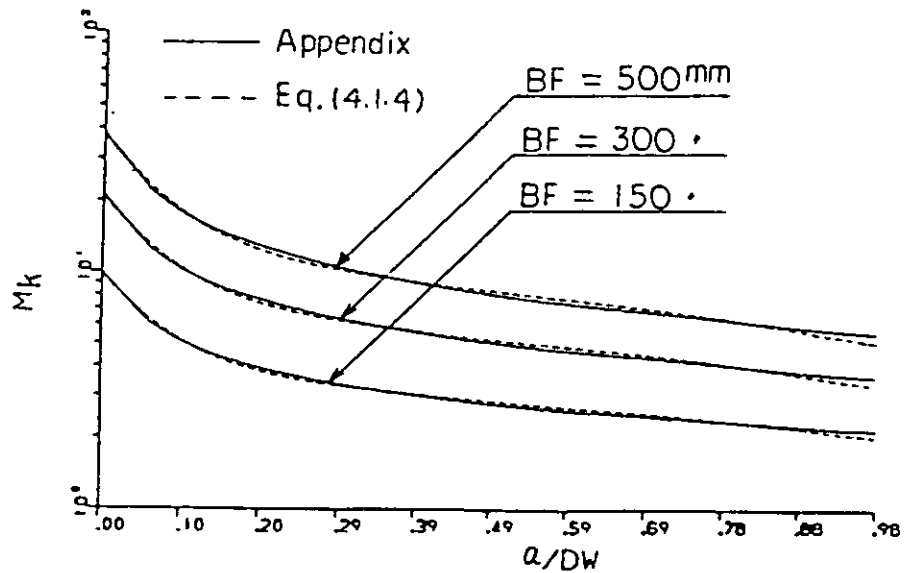


Fig. 4.1.6  $M_k$  of Basic Element (A) ( $DW=75$  No arip)

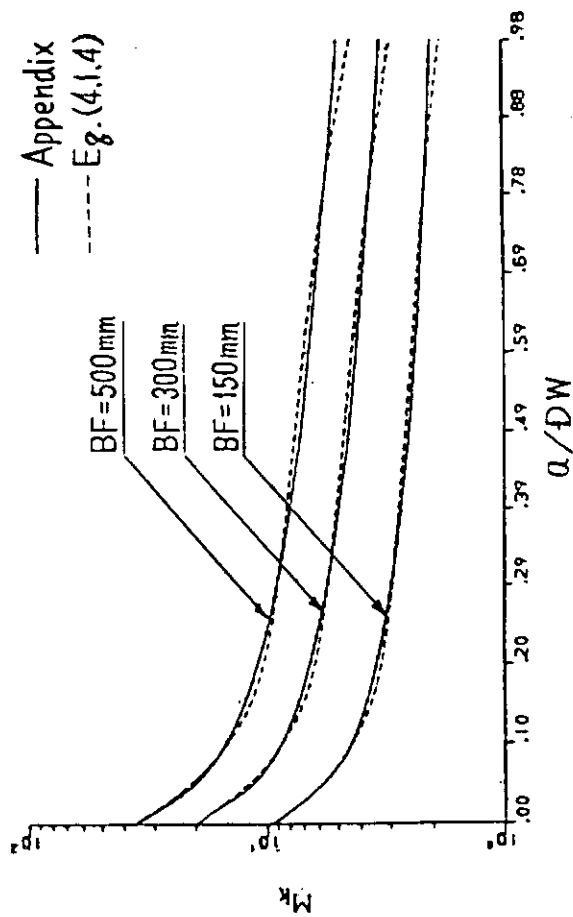


图4.1.7  $M_k$  of basic element A (DW=100, no snip)

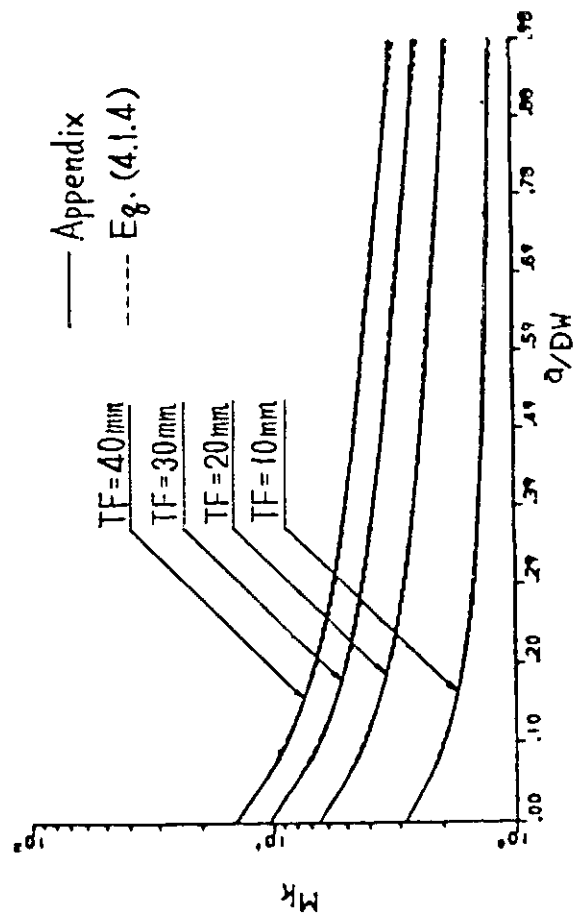


图4.1.8  $M_k$  of basic element A (DW=50, BF=150, snip)

表4.1.2 Coefficients in equation (4.1.4)

| Case | Face Plate | $\lambda^*$ | $C_0$ | $C_1$  | $C_2$ |
|------|------------|-------------|-------|--------|-------|
| 1    | No snip    | 10          | 4.73  | -2.31  | 6.72  |
| 2    |            | 10          | 9.18  | -5.06  | 15.0  |
| 3    |            | 10          | 15.2  | -8.83  | 28.0  |
| 4    |            | 13.5        | 3.70  | -1.70  | 6.15  |
| 5    |            | 13.5        | 7.15  | -3.89  | 13.7  |
| 6    |            | 13.5        | 11.8  | -6.89  | 25.8  |
| 7    | Snip       | 17.0        | 3.34  | -1.54  | 6.00  |
| 8    |            | 17.0        | 6.42  | -3.57  | 13.4  |
| 9    |            | 17.5        | 10.7  | -6.53  | 25.3  |
| 10   |            | 9.5         | 1.47  | -0.256 | 1.39  |
| 11   |            | 9.5         | 2.95  | -1.16  | 3.60  |
| 12   |            | 9.5         | 4.42  | -2.06  | 6.04  |
| 13   |            | 9.5         | 5.89  | -2.96  | 8.58  |

\*  $M_k(y) = C_0 + C_1 \cdot y + C_2 \cdot e^{-\lambda y}$ ,  $y = a/DW$



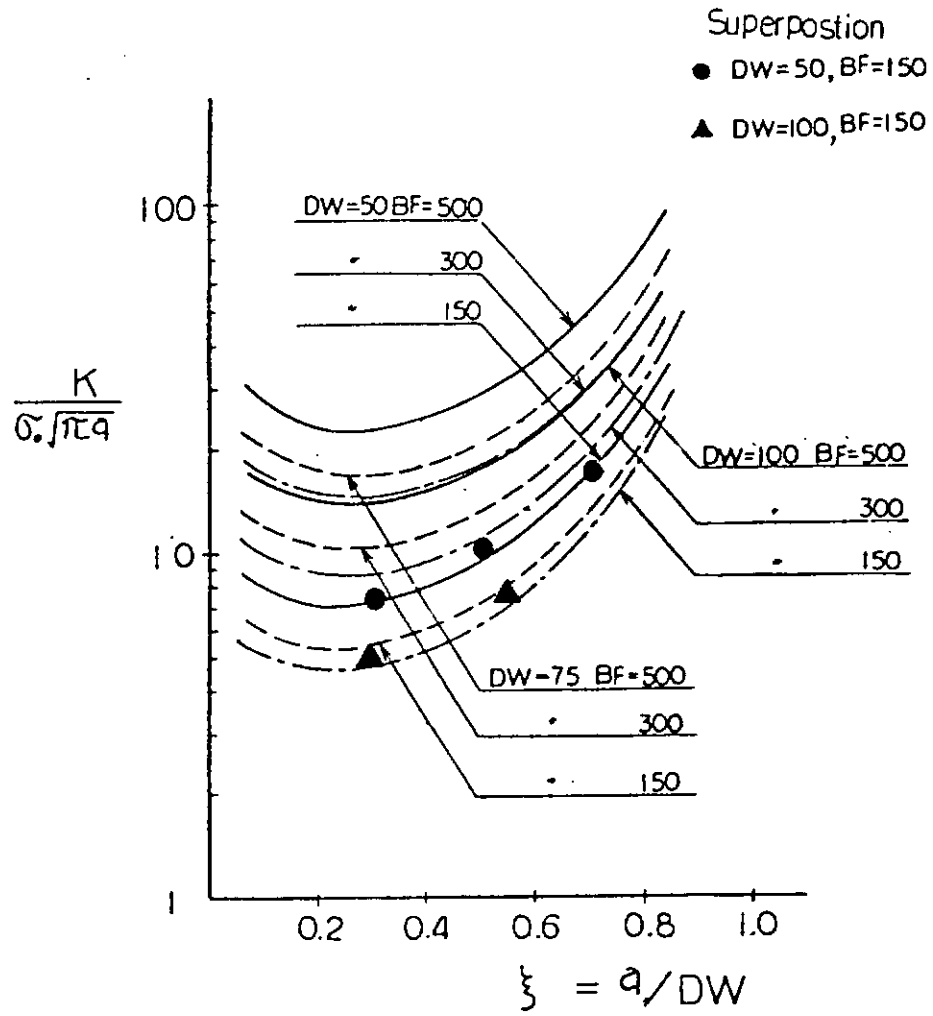


Fig 4.1.9 Stress intensity factors of basic element (B) (no snip)

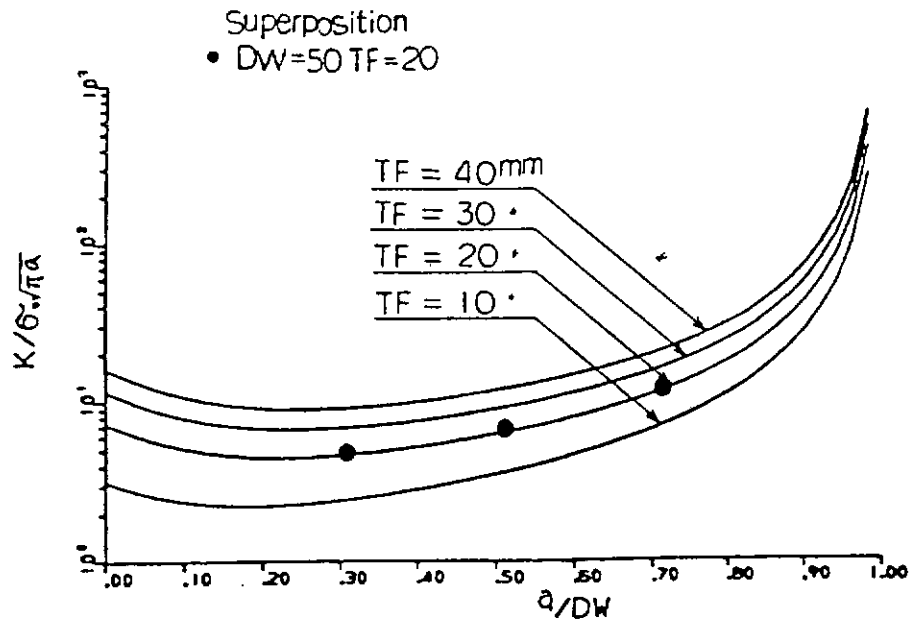


Fig 4.1.10 Stress Intensity Factors of Basic Element (A) (BF=150 Snip)

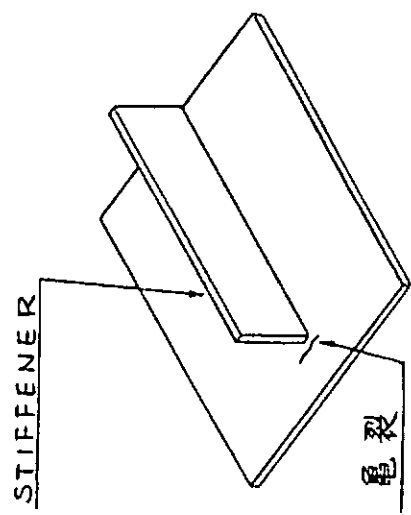


図 4.2.1

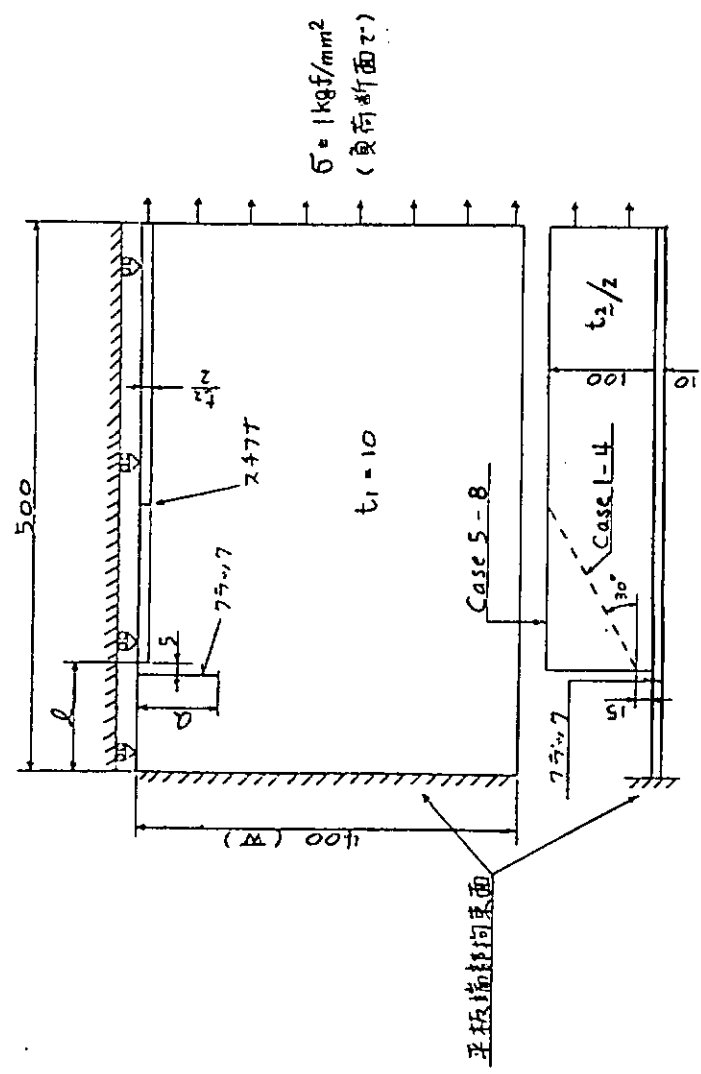


図4.2.2 計算モデル

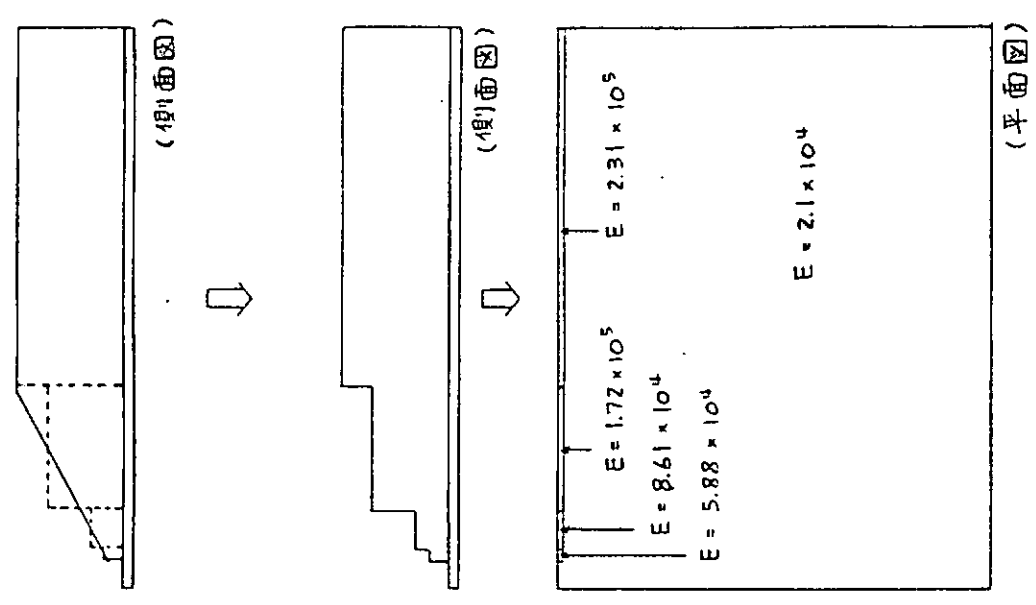


図4.2.3 スニップ部のモデル化例  
(Case 1, 3)

表 4.2.1 計算 Case

| ケース番号  | 形状                                                                                  | l mm | t <sub>2</sub> mm | a mm                |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------|------|-------------------|---------------------|
| Case-1 |  | 25   | 10                | 0, 10, 50, 100, 200 |
| 2      |                                                                                     |      | 20                | 0, 10, 50, 100, 200 |
| 3      |                                                                                     | 100  | 10                | 0, 10, 50, 100, 200 |
| 4      |                                                                                     |      | 20                | 0, 10, 50, 100, 200 |
| 5      |  | 25   | 10                | 0, 10, 50, 100, 200 |
| 6      |                                                                                     |      | 20                | 0, 10, 50, 100, 200 |
| 7      |                                                                                     | 100  | 10                | 0, 10, 50, 100, 200 |
| 8      |                                                                                     |      | 20                | 0, 10, 50, 100, 200 |

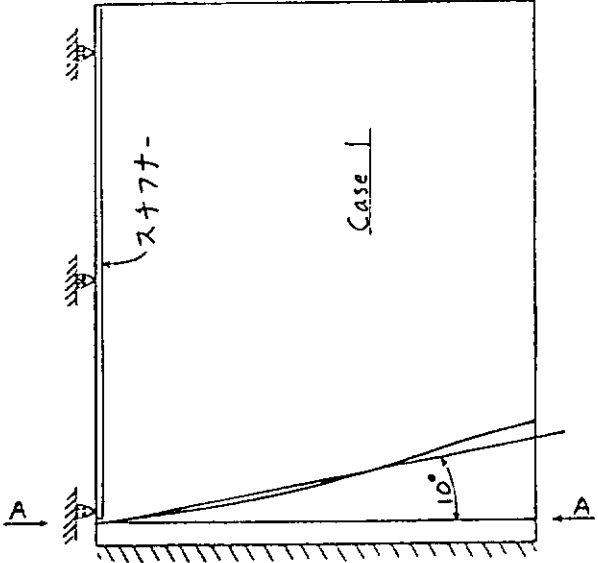
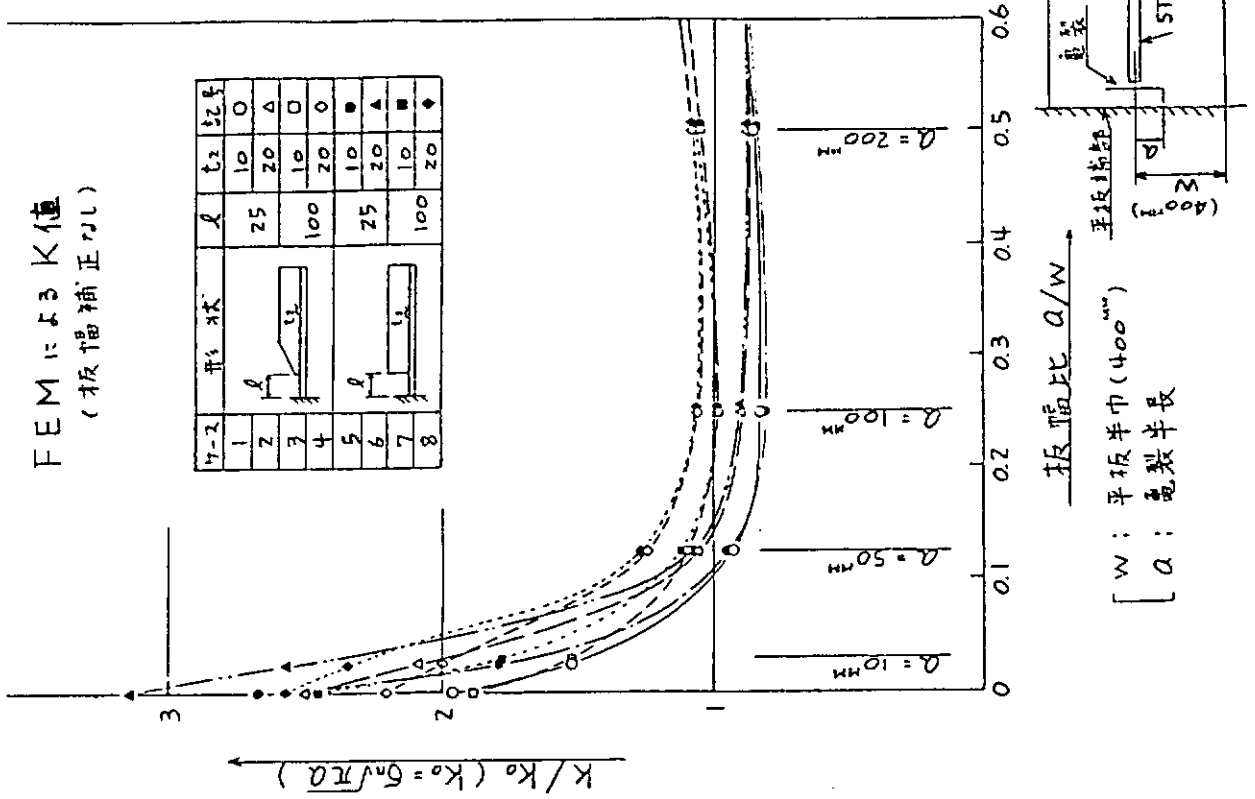


図 4.2.4 ぎ裂が小さい時の応力分布から推定したき裂進展経路



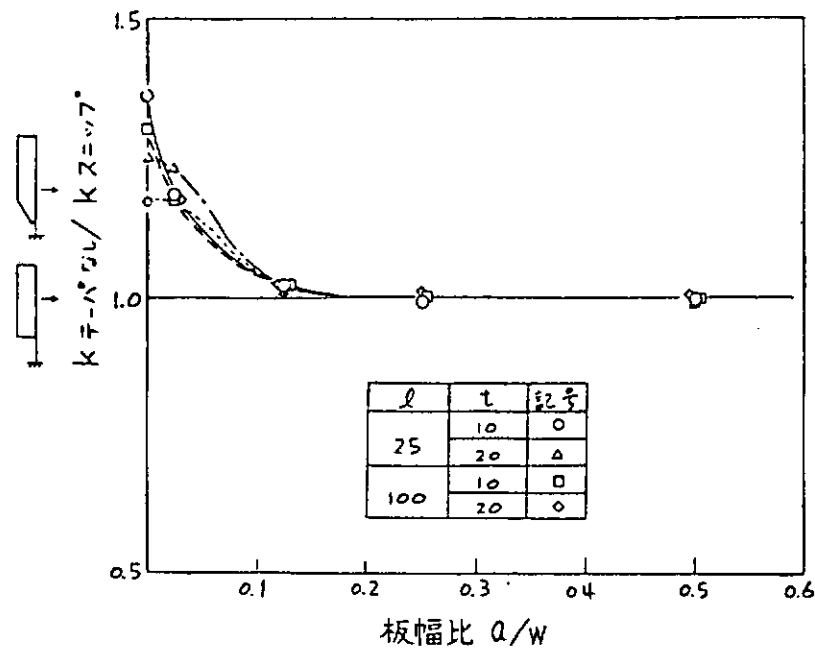


図4.2.6 STIFFENER止端部の形状の影響

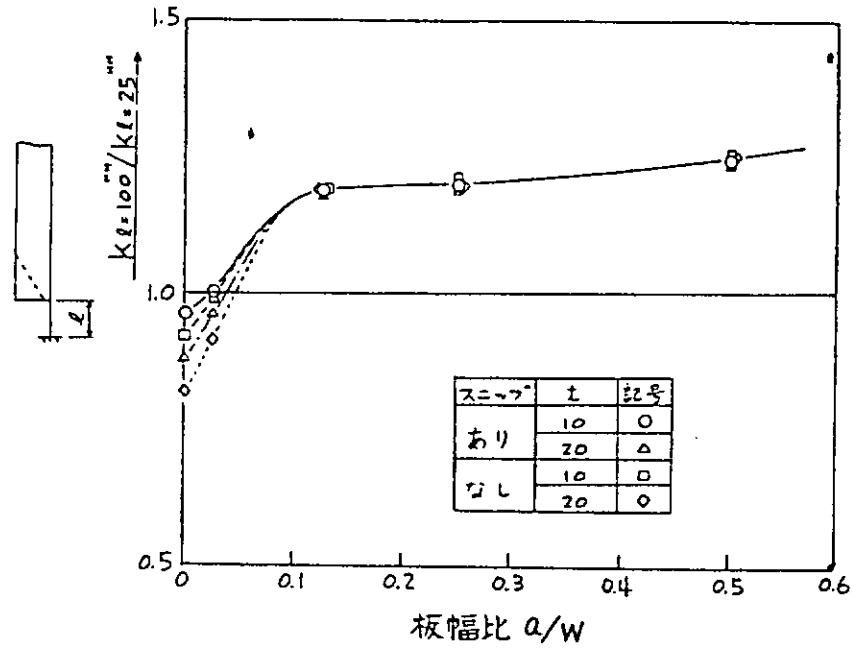


図4.2.7 平板端部拘束面と亀裂との距離の影響

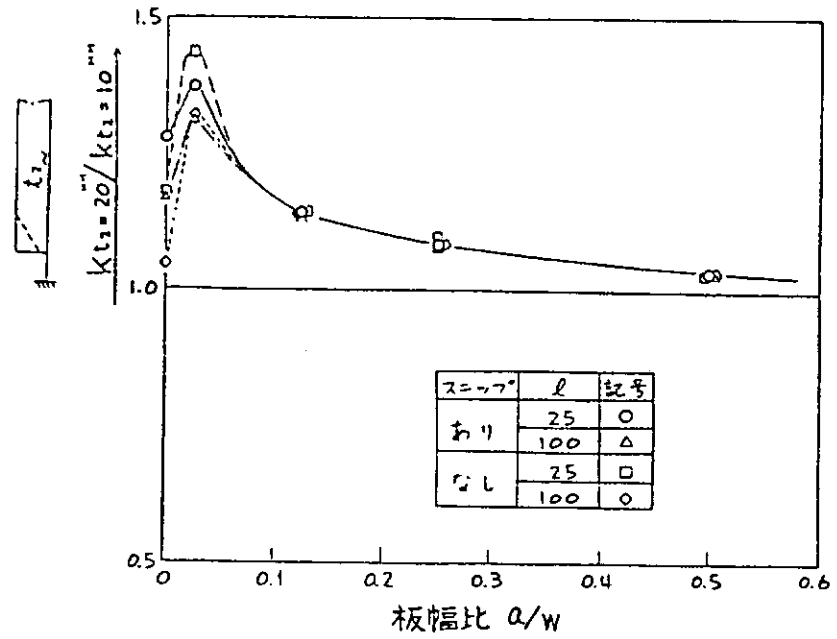


図4.2.8 STIFFENER板厚(剛性)の影響

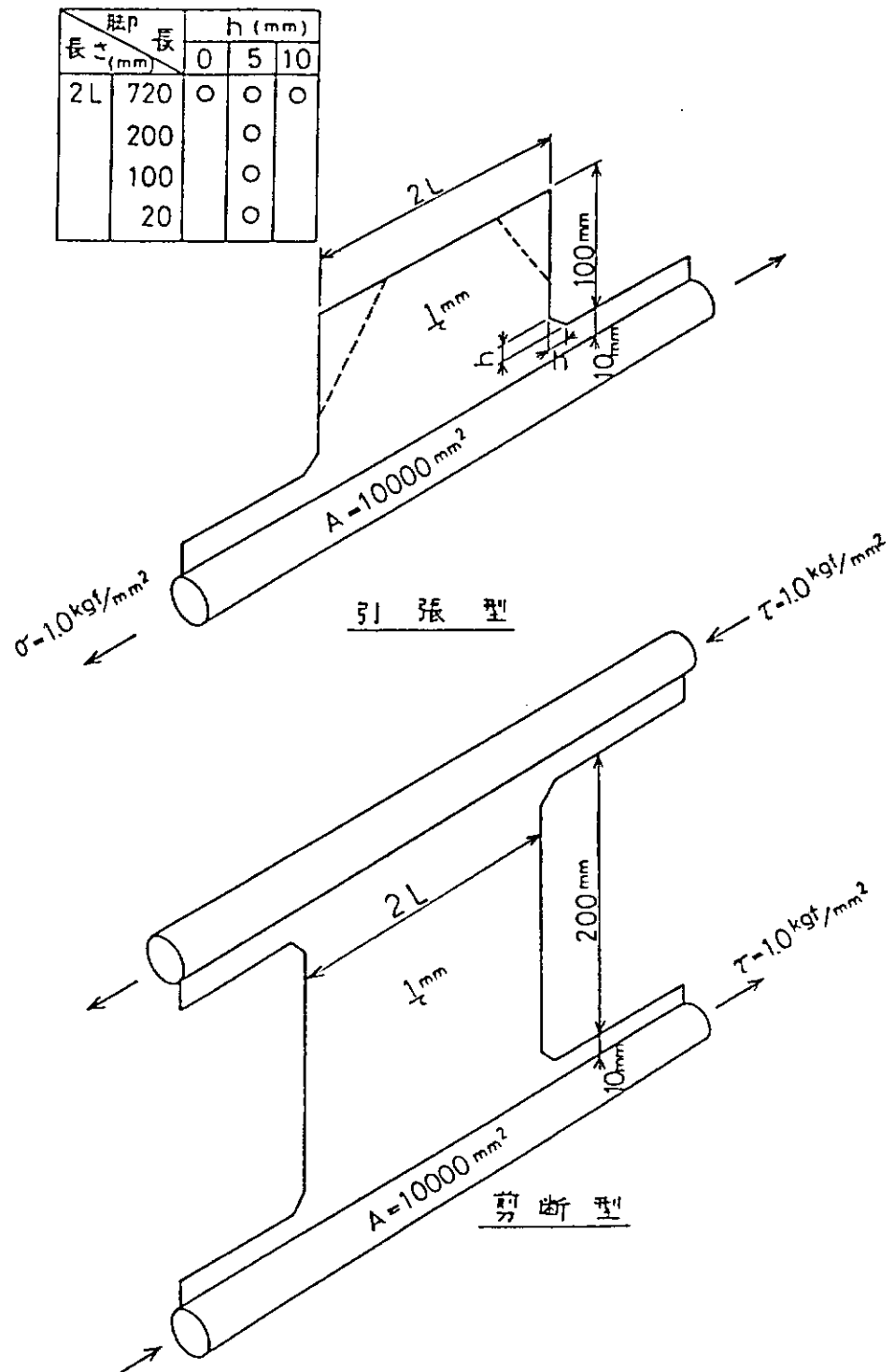
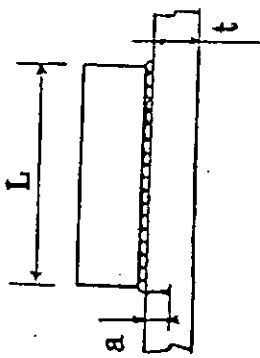
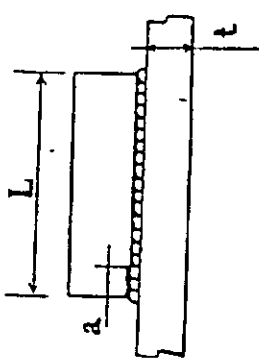


図4.3.1 解析構造

表4.3.1 K値表示式の係数

| $f_2 = BCA$<br>$f_3 = \frac{f_4(h/t)}{f_4(0.5)}$<br>$f_4 = A^T D H$ |                                                                                       | $A = \begin{Bmatrix} 1 \\ a/t \\ (a/t)^2 \\ (a/t)^3 \end{Bmatrix}$<br>$H = \begin{Bmatrix} (2\tau-1)(\tau-1) \\ -2\tau(\tau-1) \\ -\tau(2\tau-1) \end{Bmatrix}$<br>$\tau = h/t$<br>$f_{30} = \frac{E_1^T A}{E_2^T A}$                                                                                                                                        |
|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CRACK の様式                                                           |                                                                                       | 係数 行列                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| A                                                                   |    | 引張型 $C = (.456 \ .253 \ -.0246 \ 0)^T ( \ 3.90 \ -5.18 \ 4.18 \ -1.87 )$                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|                                                                     |                                                                                       | 剪断型 $C = (.165 \ .435 \ -.0442 \ 0)^T ( \ 2.02 \ -2.72 \ 1.91 \ -.759 )$<br>$D = \begin{bmatrix} 5.39 & 3.83 & 3.61 \\ -10.68 & -5.46 & -4.47 \\ 12.40 & 5.72 & 4.71 \\ -5.17 & -2.27 & -1.82 \end{bmatrix}$<br>$E_1 = \begin{bmatrix} 3.83 \\ -5.46 \\ 5.72 \\ -2.27 \end{bmatrix}$<br>$E_2 = \begin{bmatrix} 3.88 \\ -5.36 \\ 5.47 \\ -2.13 \end{bmatrix}$ |
| B                                                                   |  | 引張型 $C = ( -.100 \ .384 \ -.0321 \ 0 )^T ( \ 3.33 \ -5.08 \ 5.16 \ -2.07 )$                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|                                                                     |                                                                                       | 剪断型 $C = ( .531 \ .239 \ -.247 \ 0 )^T ( \ 5.27 \ -7.18 \ 7.15 \ -2.77 )$<br>$D = \begin{bmatrix} 4.76 & 2.88 & 2.34 \\ -9.78 & -4.46 & -3.56 \\ 11.04 & 4.51 & 3.60 \\ -4.61 & -1.63 & -1.44 \end{bmatrix}$<br>$E_1 = \begin{bmatrix} 2.88 \\ -4.46 \\ 4.51 \\ -1.63 \end{bmatrix}$<br>$E_2 = \begin{bmatrix} 3.33 \\ -5.07 \\ 5.16 \\ -2.06 \end{bmatrix}$ |

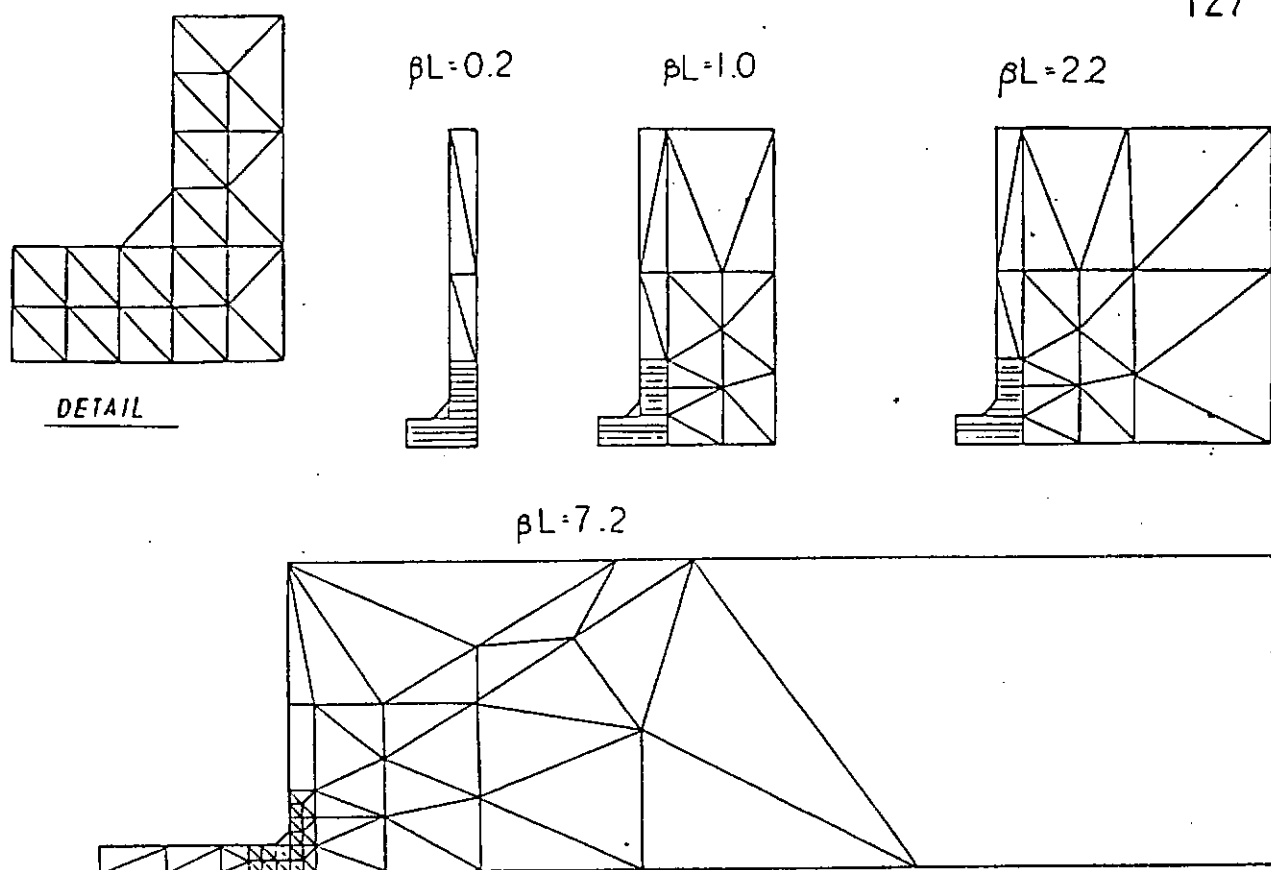


図4.3.2 き裂の無い時の応力解析

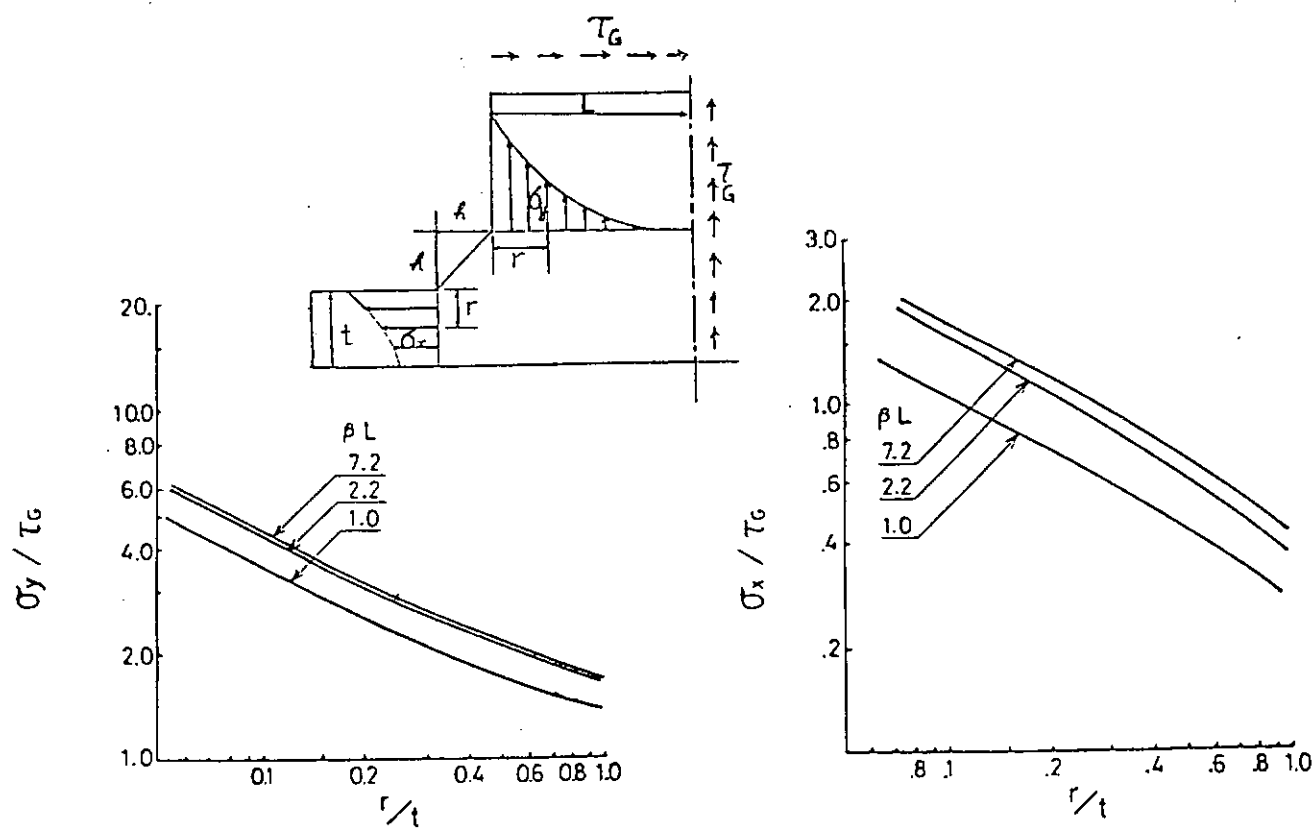


図4.3.3 剪断型の応力分布

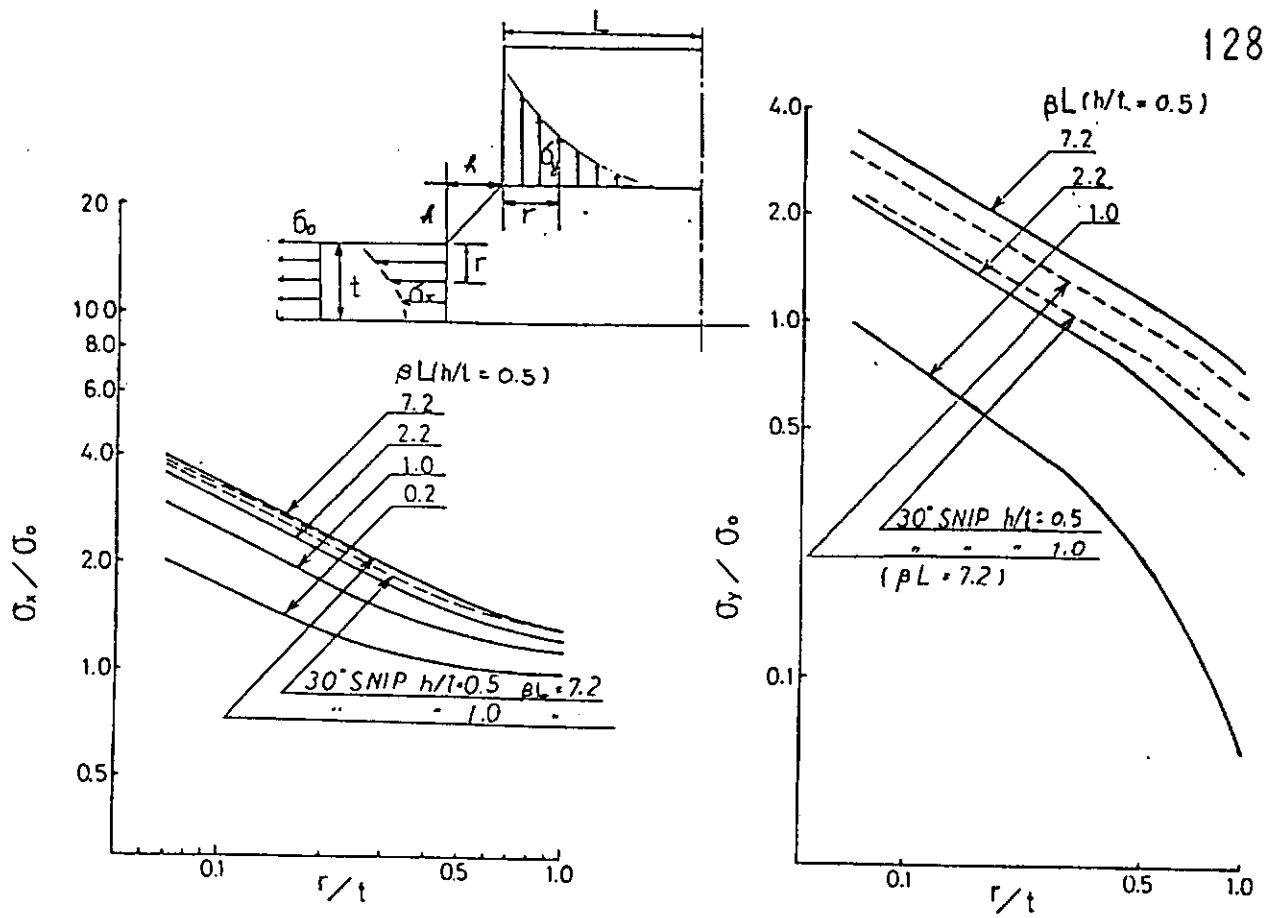


図4.3.4 引張型の応力分布

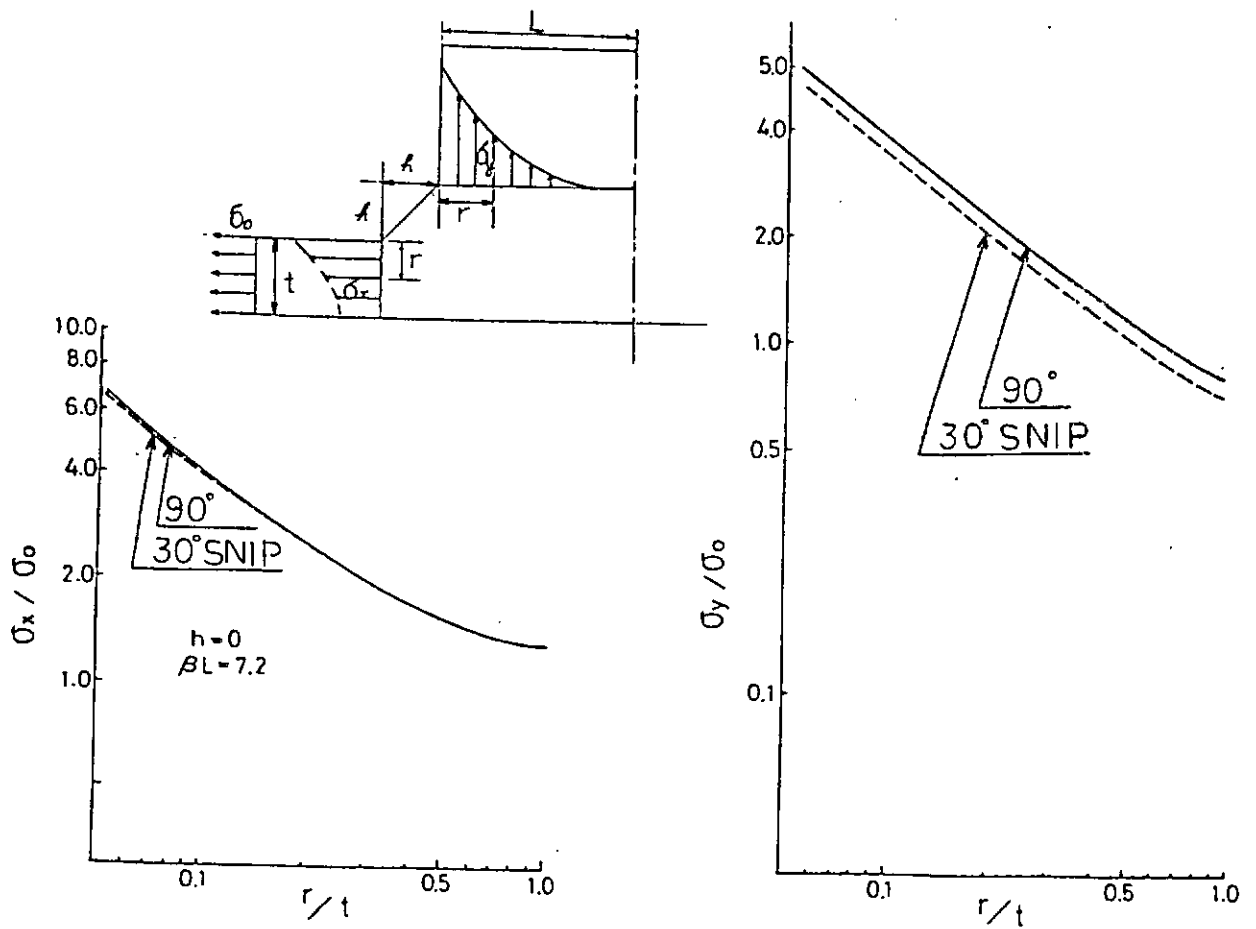
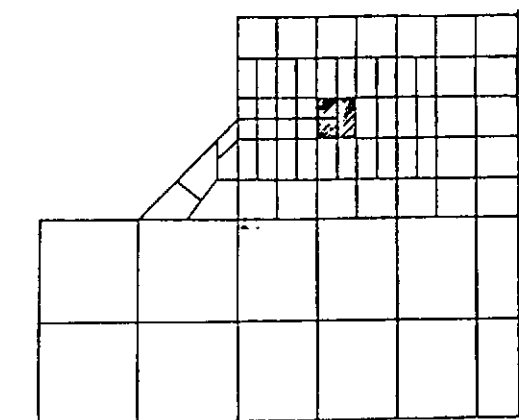


図4.3.5 引張型の応力分布 ( $h = 0.0$ )



$$\frac{K_1}{\sigma \sqrt{a}} = \frac{E \delta / \tau}{80 \sqrt{r a}}$$

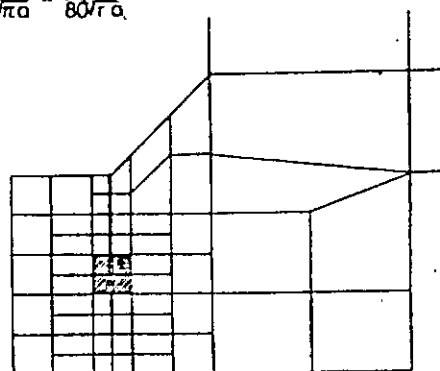


図4.3.6 詳細K値解析時の要素分割

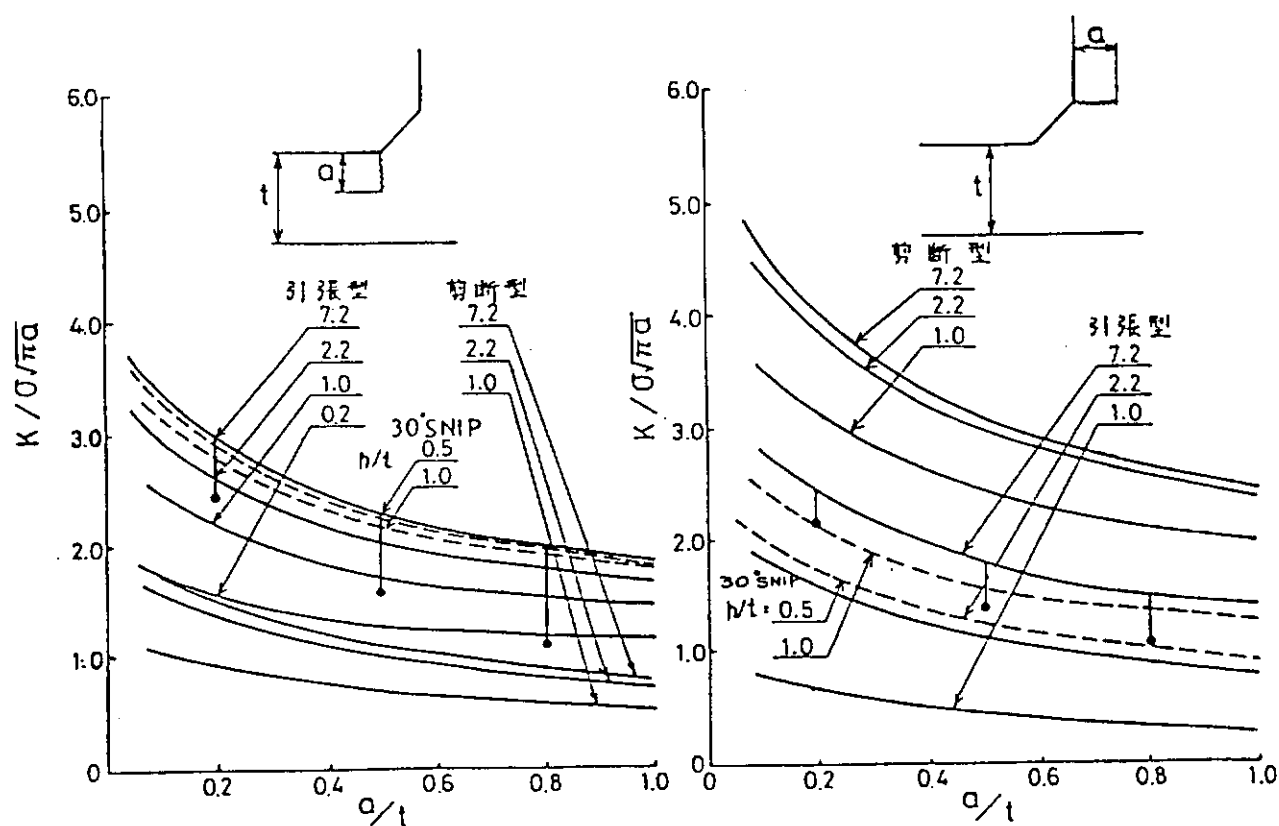


図4.3.7 応力分布から求めたK値と詳細計算によるK値の比較

表4.3.2 表示式と詳細K値との比較

| 構造長<br>パラメータ<br>$\beta L$ | クラック<br>長さ<br>$a/t$ | クラック<br>の<br>様式 | 表示式<br>(a) | F.E.M<br>(b) | ヒヒ<br>(a/b) |
|---------------------------|---------------------|-----------------|------------|--------------|-------------|
| 7.2                       | 0.2                 | A               | 2.632      | 2.478        | 1.062       |
| 7.2                       | 0.5                 | A               | 1.531      | 1.605        | .953        |
| 7.2                       | 0.8                 | A               | 0.821      | 1.101        | .745        |
| 7.2                       | 0.2                 | B               | 2.160      | 2.190        | .986        |
| 7.2                       | 0.5                 | B               | 1.411      | 1.418        | .995        |
| 1.2                       | 0.5                 | B               | 0.437      | 0.419        | 1.043       |
| 0.4                       | 0.5                 | B               | 0.067      | 0.216        | .310        |

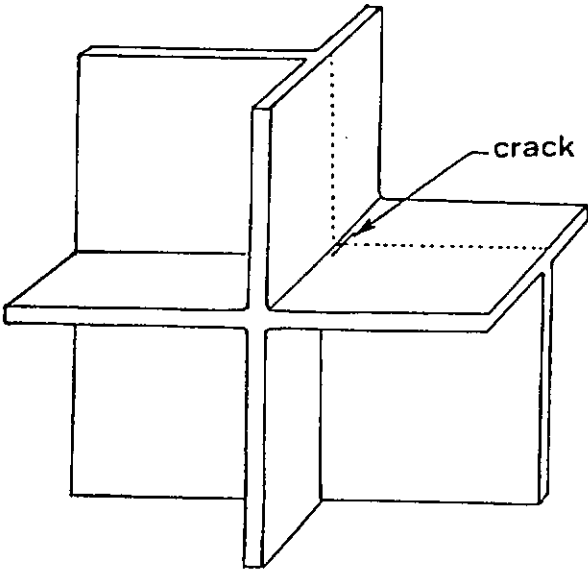


図4.4.1 基本要素 ⑤

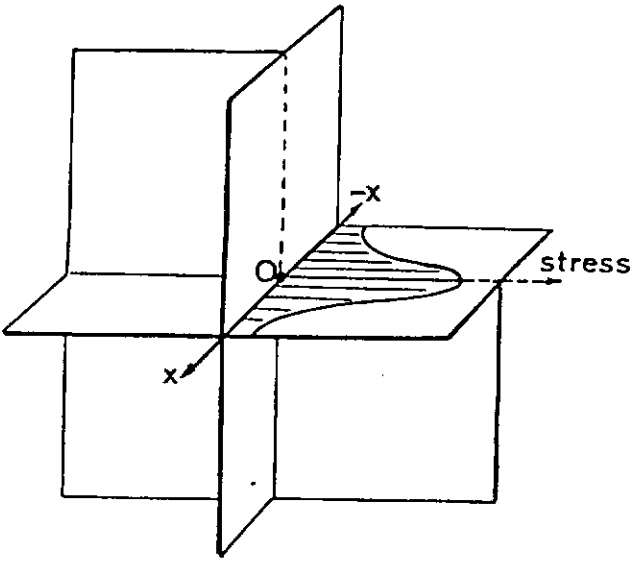


図4.4.2 基本要素 ⑤ において変位と  
応力分布

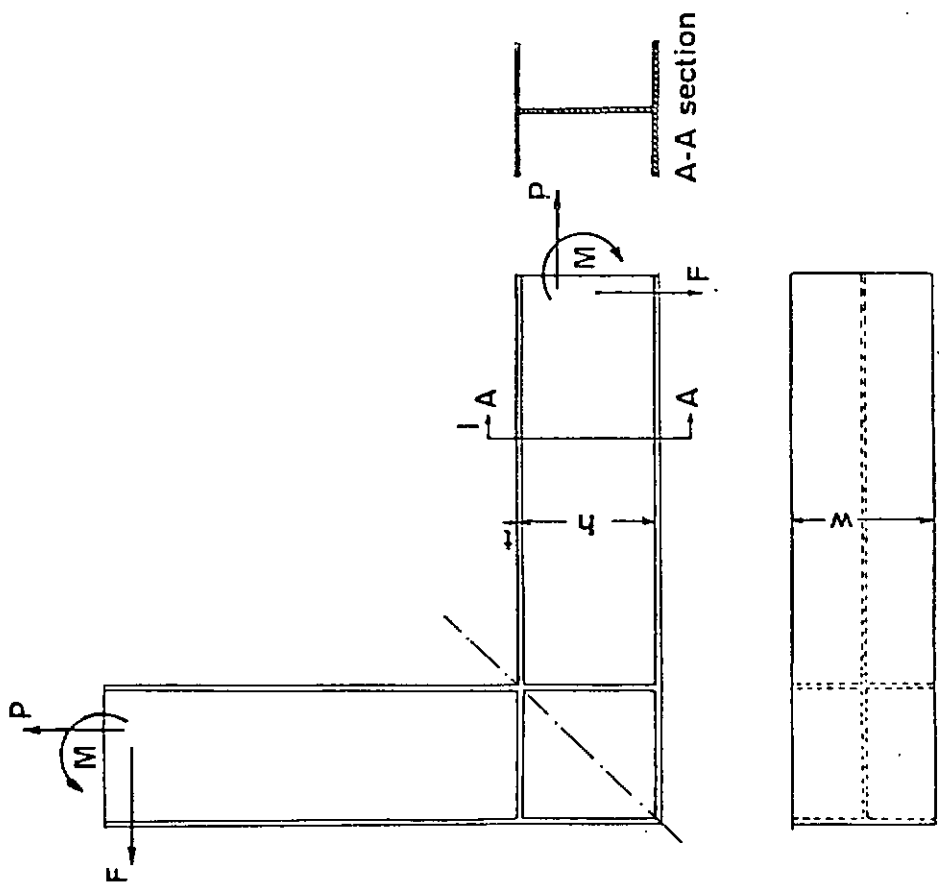


図4.4.3 応力解析のための対称直交差部モデル

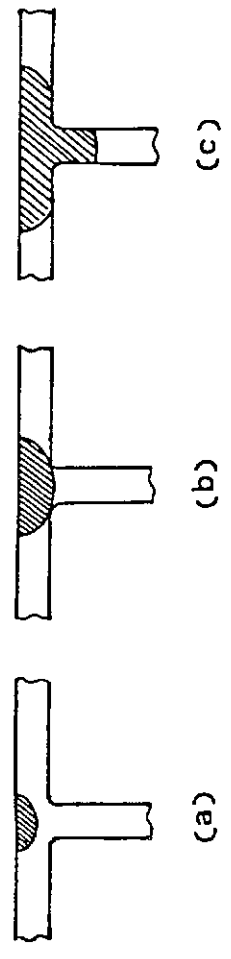


図4.4.4 いろいろなき裂の形態

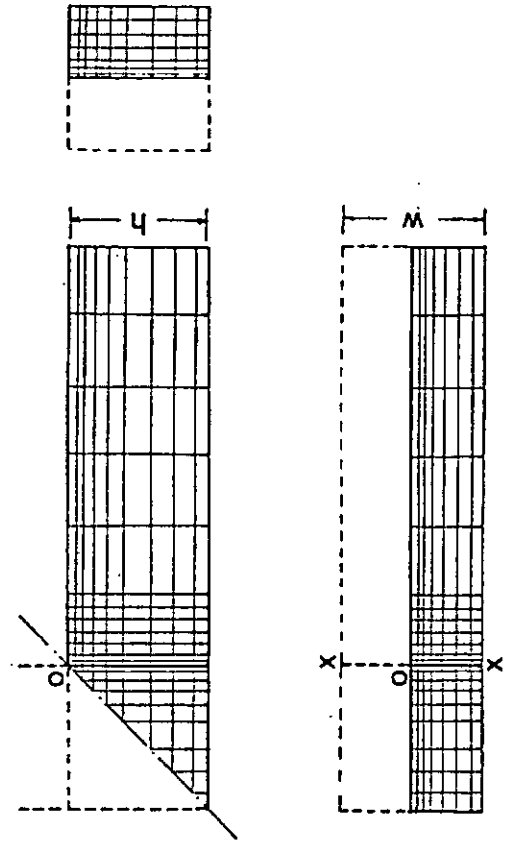
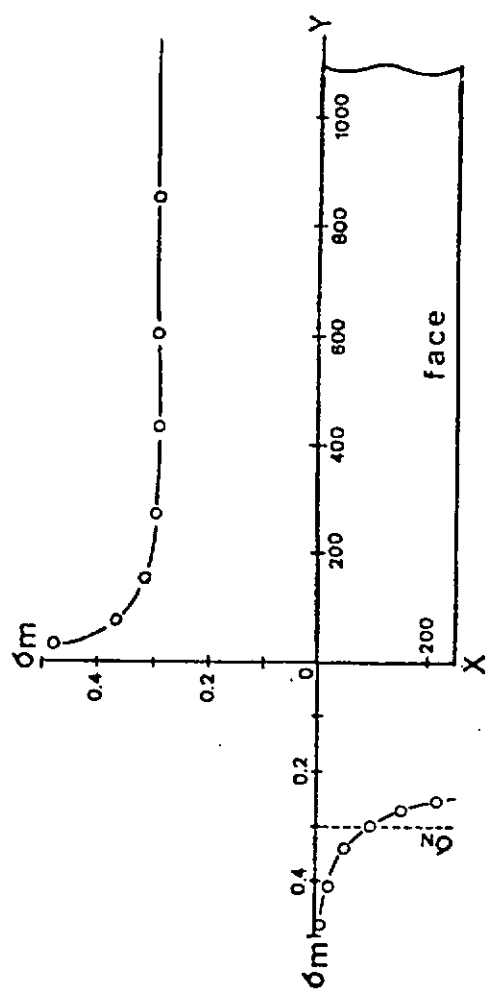
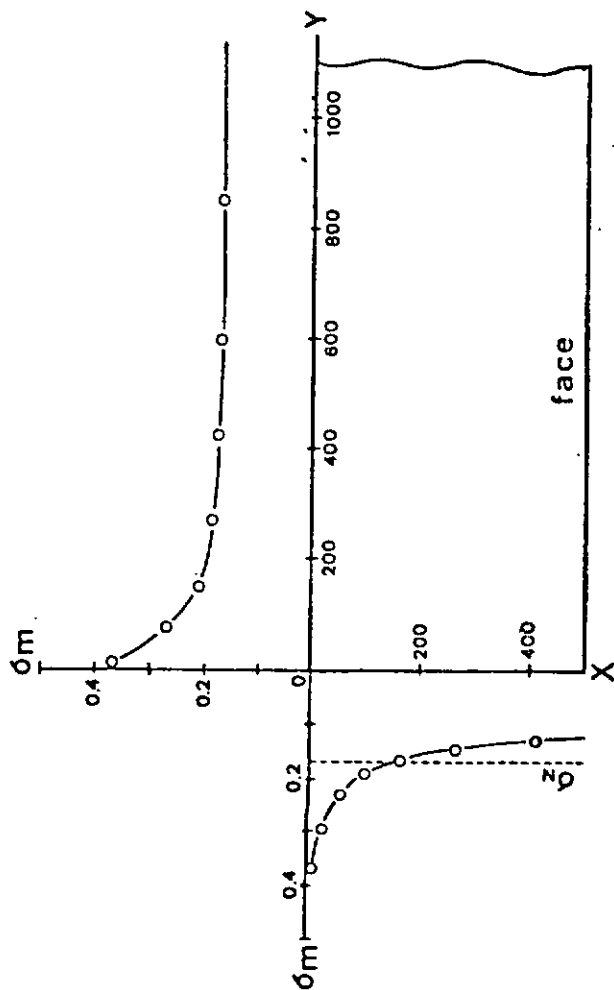


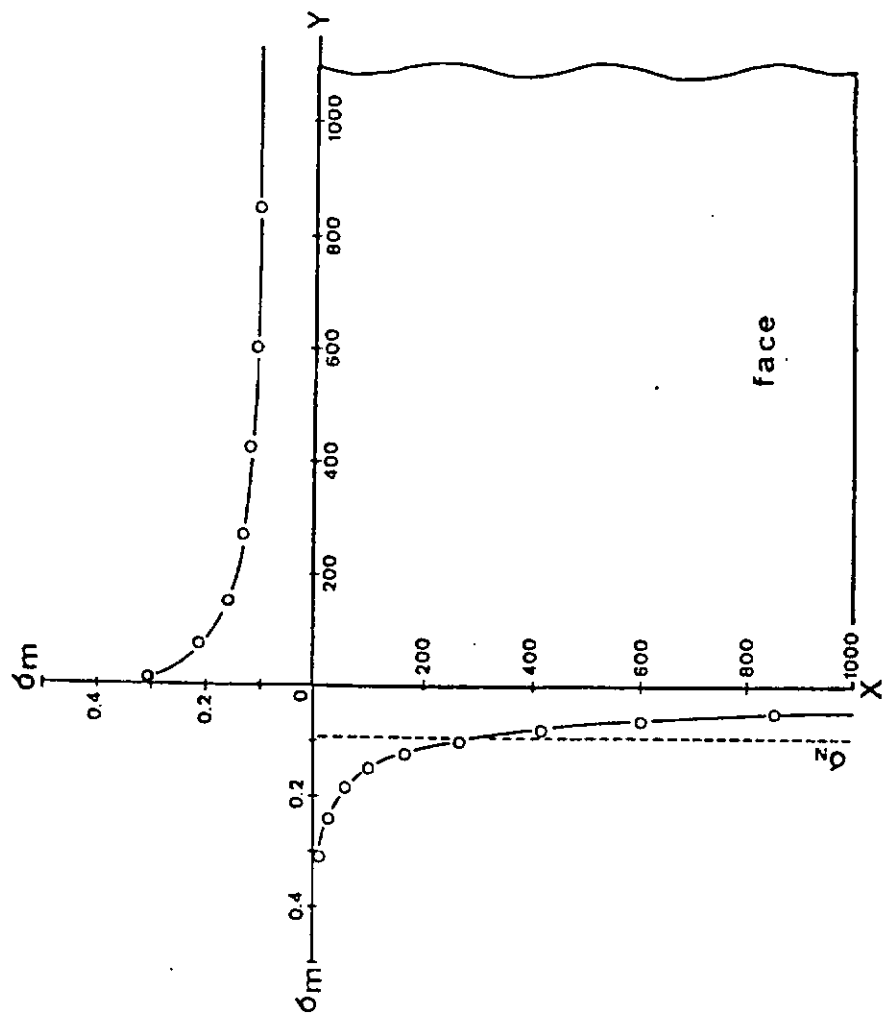
図4.4.5 応力解析のためのメッシュ分割の一例



(a)  $W/2 = 250 \text{ mm}$ .

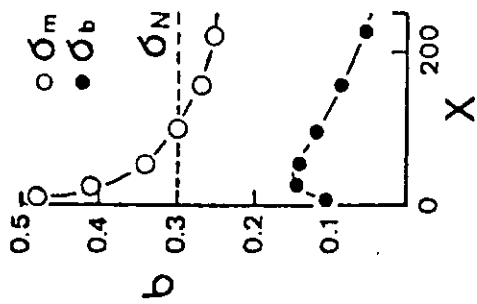


(b)  $W/2 = 500 \text{ mm}$ .

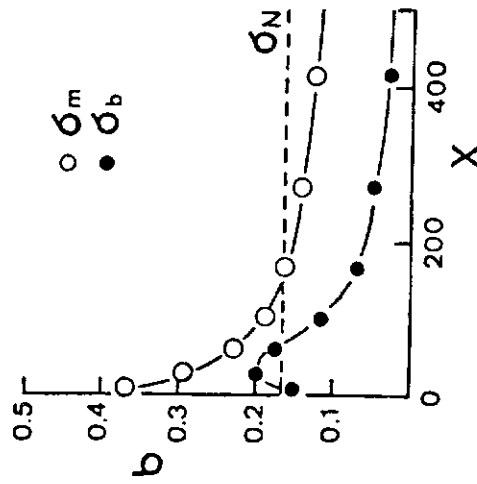


(c)  $W/2 = 1000 \text{ mm}$ .

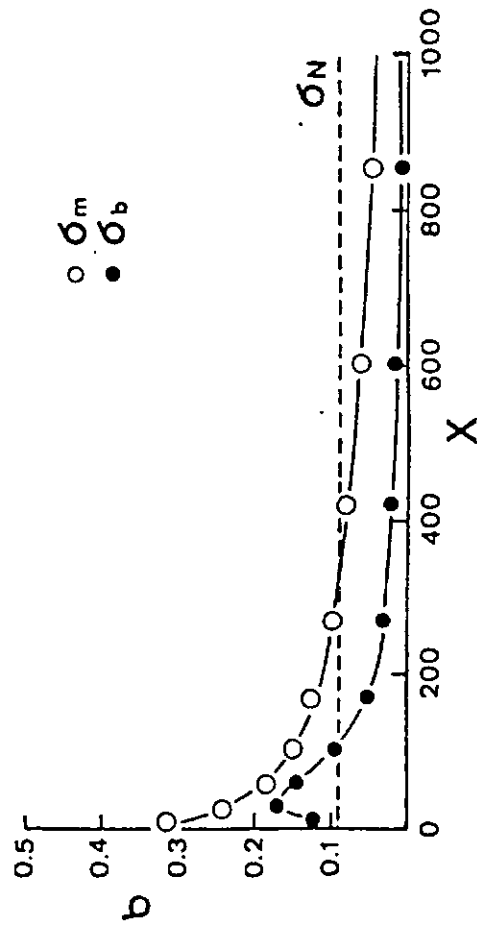
図4.4.6 3次元線形弾性理論の軸力3次元応力の分布  
 $[M = 10^6 \text{ kg} \cdot \text{mm}, h = 1000 \text{ mm}, t = 10 \text{ mm}]$



(a)  $w/2 = 250 \text{ mm}$



(b)  $w/2 = 500 \text{ mm}$



(c)  $w/2 = 1000 \text{ mm}$

図4.4.7 フェイス面 X-X 線上の軸力  $\sigma_m$  および  
面外曲げ応力  $\sigma_b$  の分布 [  $M = 10^6 \text{ kg} \cdot \text{mm}$ ,  
 $h = 1000 \text{ mm}$ ,  $t = 10 \text{ mm}$  ]

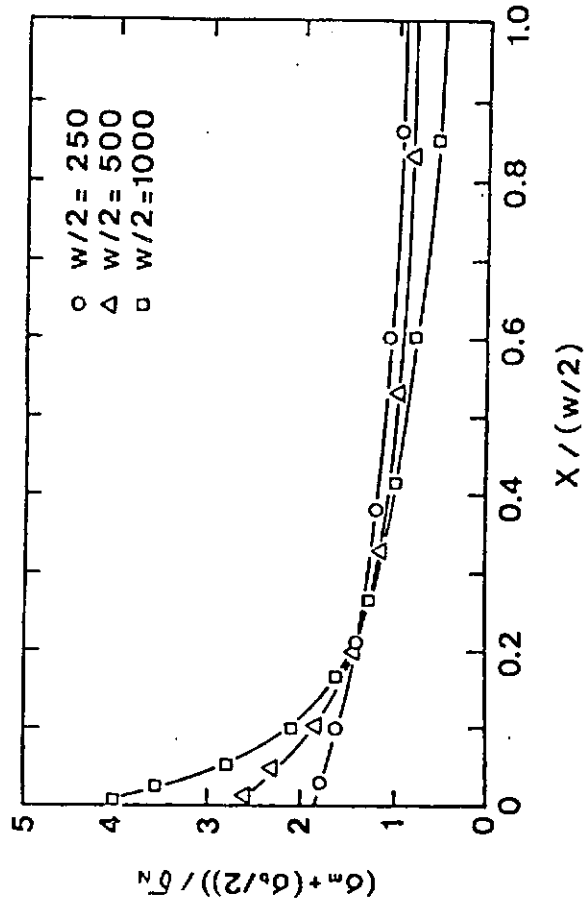


図4.4.8 フェイス面 X-X 線上における有効応力  $\sigma_{eff}$   
 $= \sigma_m + (\sigma_b/2)$  の分布 [  $M = 10^6 \text{ kg} \cdot \text{mm}$ ,  $h = 1000 \text{ mm}$ ,  $t = 10 \text{ mm}$  ]

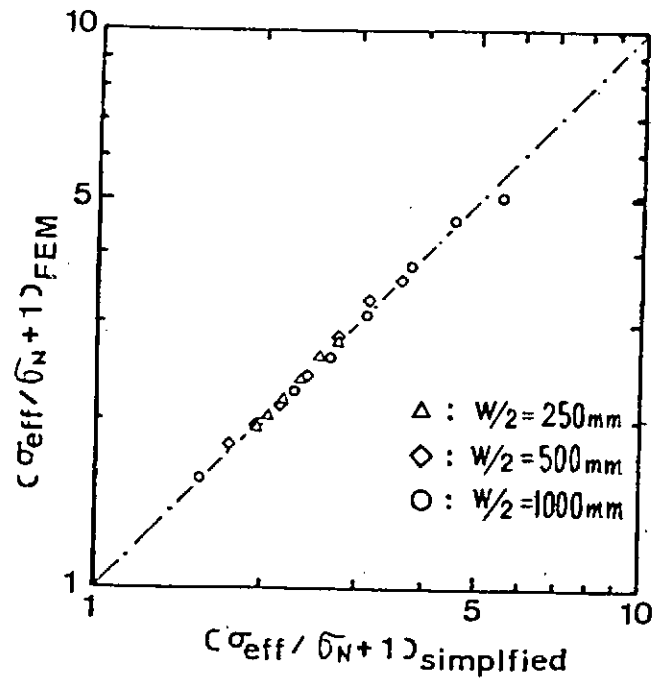


図4.4.9  $\sigma_{eff}$ の簡易式と有限要素法計算値との比較線図

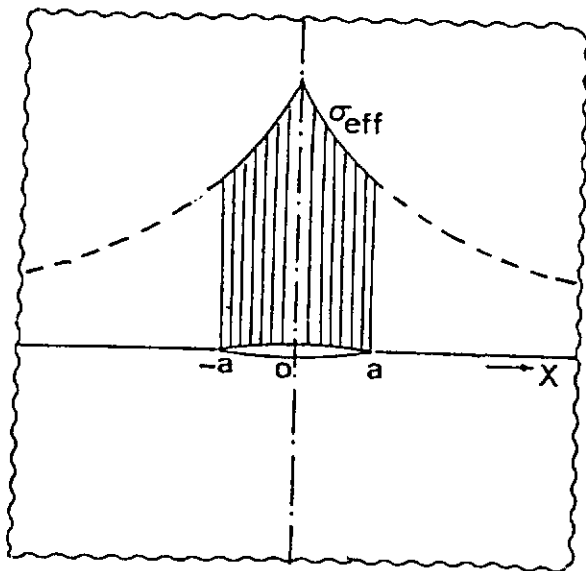


図4.4.10 等価K値算定のための無限板モデル

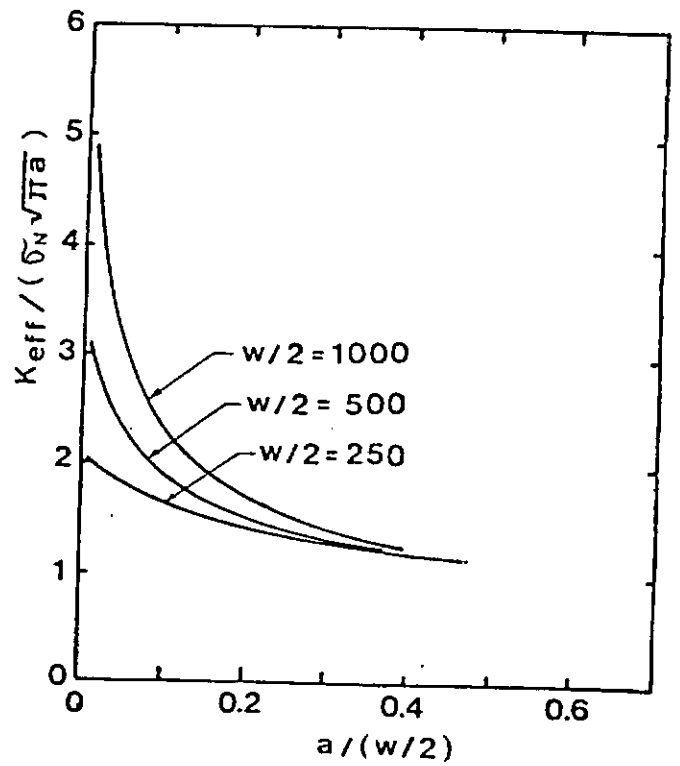


図4.4.11 等価K値の計算結果



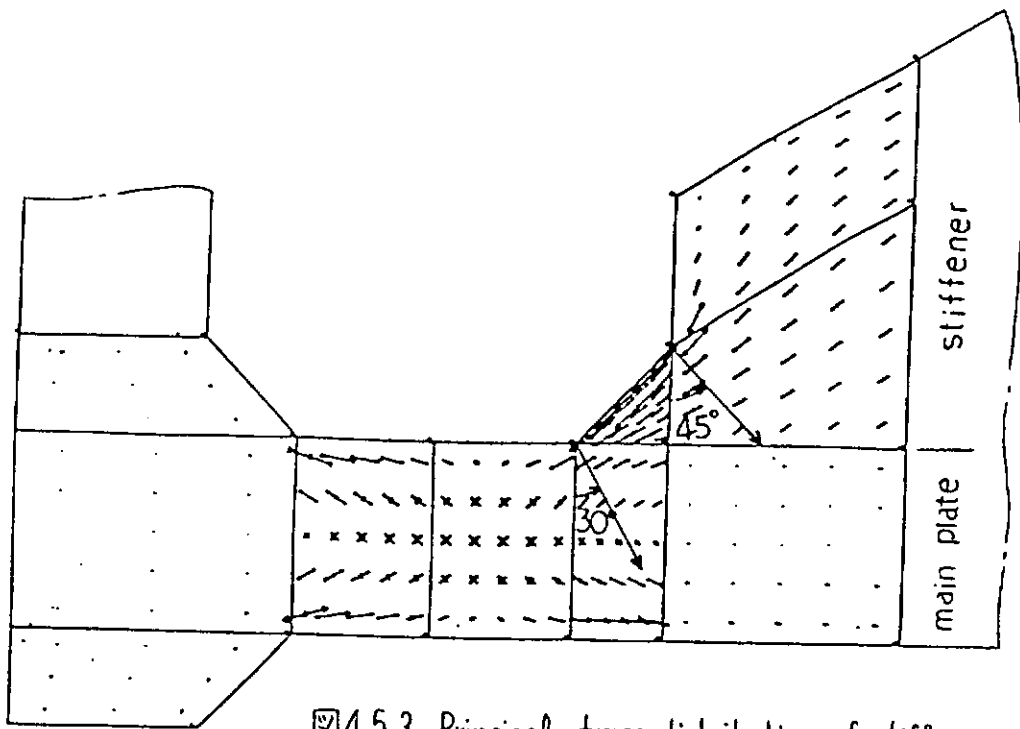


图4.5.3 Principal stress distribution of stiffener snip end

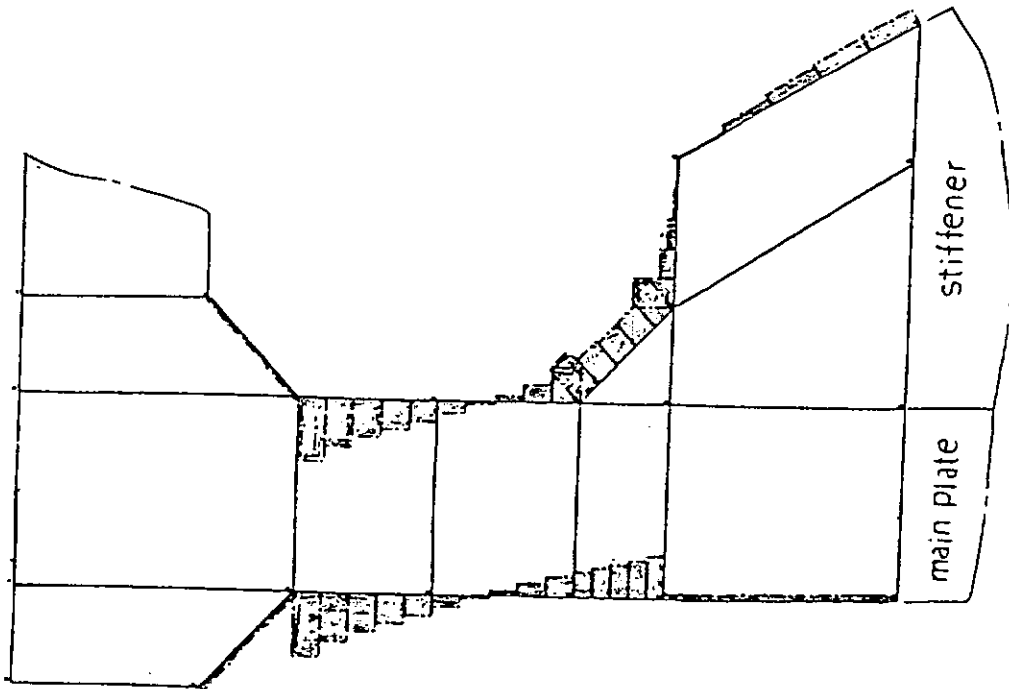


图4.5.4 Plate surface stress of stiffener snip end

表 4.5.1 Max. stress from 3-D stress analysis

| Scantlings *)                                                                                | Position | $\sigma$<br>Stress (kgf/mm <sup>2</sup> ) |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------|-------------------------------------------|
| $d = 50 \text{ mm}$<br>$h = 15 \text{ mm}$<br>$t_M = 12 \text{ mm}$<br>$t_W = 12 \text{ mm}$ | A        | 33                                        |
|                                                                                              | B        | 28                                        |
|                                                                                              | C        | 23                                        |

\*) See 图 4.5.1

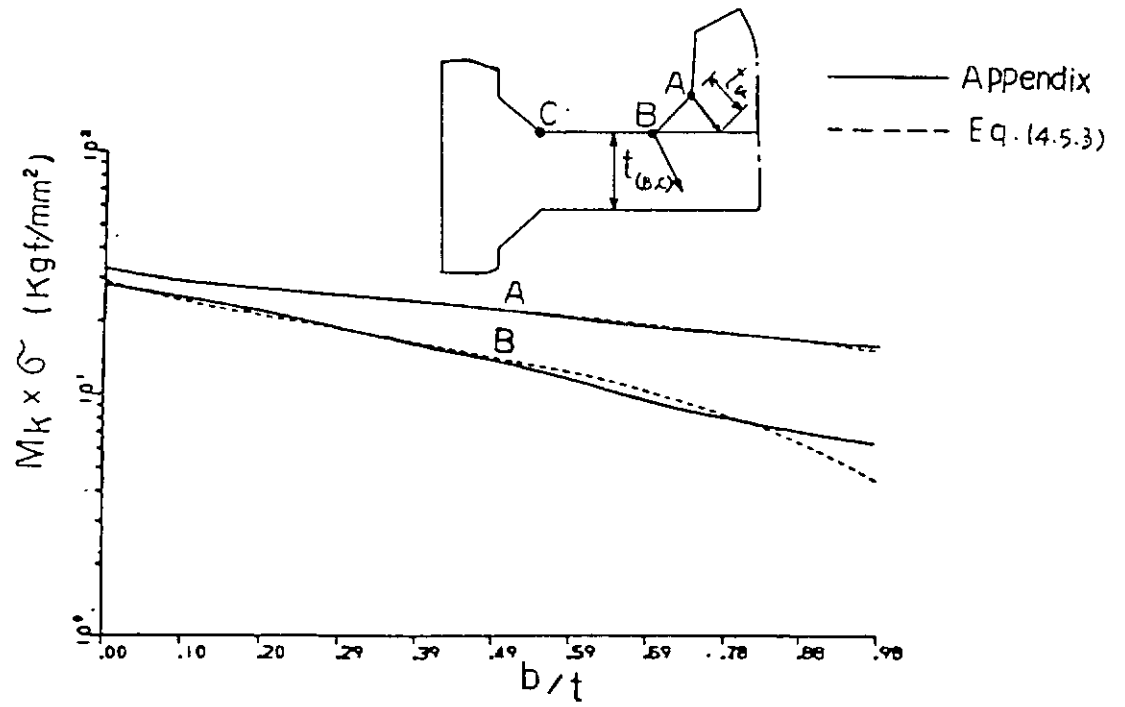


Fig 4.5.5  $M_k$  of Stiffener Snip End (Crack A, E)

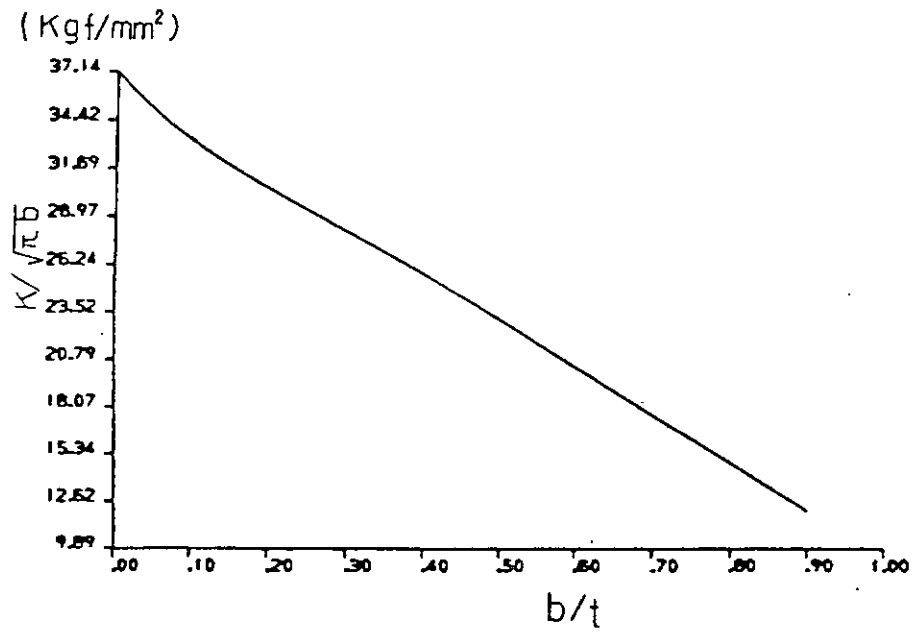


Fig 4.5.6 Stress Intensity Factors of Stiffener Snip End (Crack A)

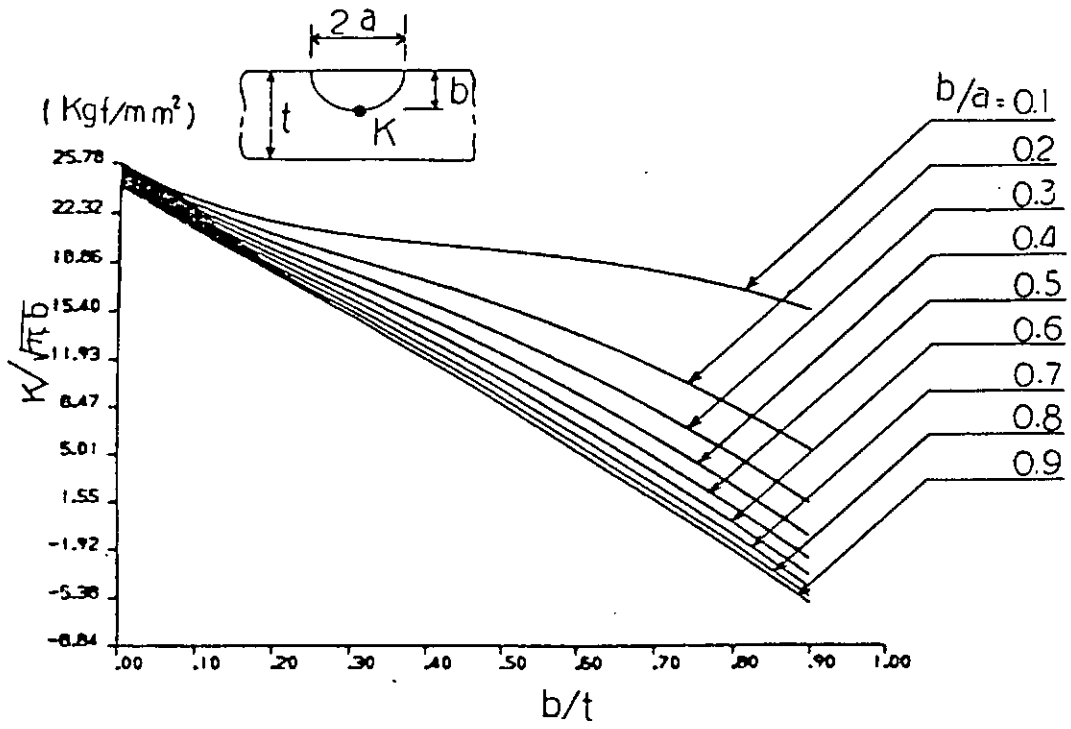


Fig 4.5.7 Stress Intensity Factors of Stiffener Snip End (Crack B)

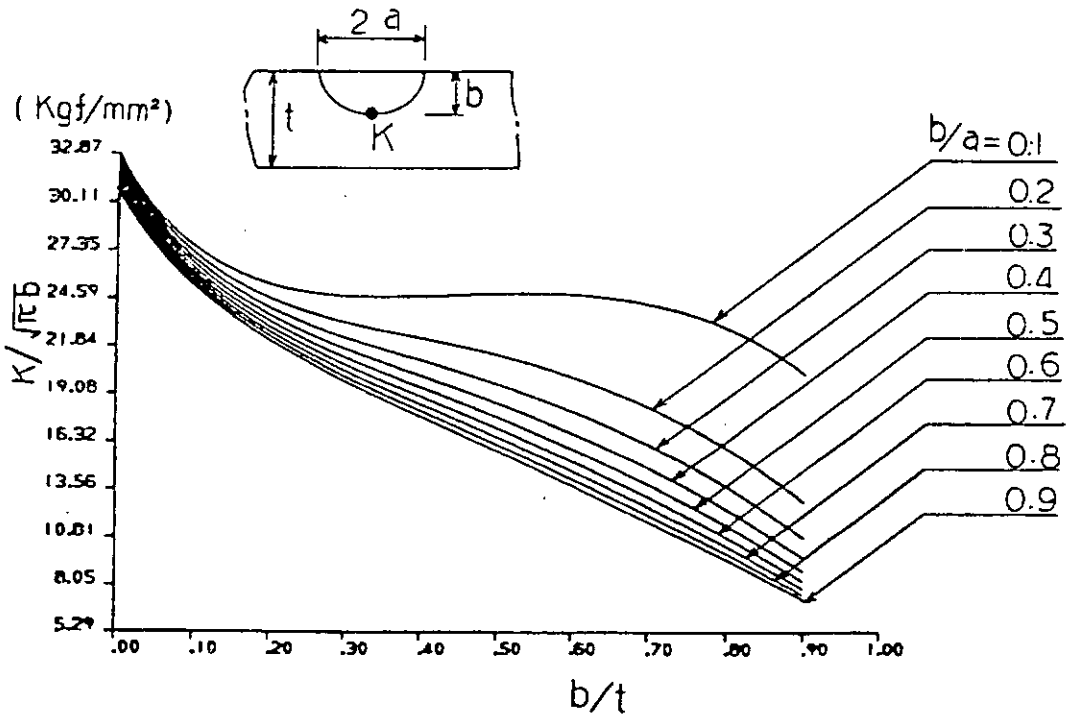


Fig 4.5.8 Stress Intensity Factors of Stiffener Snip End (Crack C)

## 5. 材料定数の便覧 (材料特性値, 物性値の便覧)

本便覧は、軟鋼、50キロ級高張力鋼、低温用として用いられる 2.5%Ni, 3.5%Ni および 9%Ni 鋼を中心として、破壊管理制御設計に必要な材料定数ならびにその取扱ひ法、推定法についてまとめたものである。

### 5.1 疲労亀裂の伝播特性に関するもの

#### 5.1.1 疲労亀裂伝播速度則

疲労き裂の伝播速度は、繰返し応力の変動中、き裂の形状、寸法、その他多くのファクターに依存するが、線形破壊力学の基本パラメータ、応力拡大係数を用いて、一般に次のような形であらわされる。

$$da/dN = \text{func}(\Delta K) \text{ ----- (5.1.1)}$$

$da/dN$  : き裂伝播速度 (繰返し応力 1 サイクル当りのき裂成長量)

$\Delta K$  : 応力拡大係数範囲 (繰返し応力 1 サイクルにおける応力拡大係数  $K$  の変動中)

Paris<sup>1)</sup> は (5.1.1) 式の関数の形として実験的に次のような実験式を求めた。

$$da/dN = C (\Delta K)^m \text{ ----- (5.1.2)}$$

$C, m$  : 材料定数

(5.1.2) 式は  $da/dN$  と  $\Delta K$  とが、図 5.1.1 に示すように、両対数グラフ上で直線関係にあることをあらわし、「Paris 則」と呼ばれて今日まで多くの検証がなされてきた。

広い条件範囲のデータをとると、 $da/dN$  と  $\Delta K$  との関係は、必ずしも直線とならず、ばらつき、ずれ、折れ曲りなどがあらわれる。Paris 則に対し多くの修正式が提案されているが、主として次のようなファクターの影響を考慮に入れたものである。

- (i) 平均応力  $\sigma$  は 応力比
- (ii)  $\Delta K$  の上限界 (き裂伝播が急激に増大する)
- (iii)  $\Delta K$  の下限界 (き裂が伝播しなくなる)
- (iv) 環境, 雰囲気
- (v) 応力繰返し速度
- (vi) その他

このうち (i) の平均応力については、通常、次のような形の修正が行われる。

$$da/dN = C \cdot f(R) \cdot (\Delta K)^m \text{ ----- (5.1.3)}$$

$R$ : 応力比,  $\sigma_{min}/\sigma_{max}$

(5.1.3) 式の  $f(R)$  の関数形としては、次のようなものが例として挙げられる。

- ①  $f(R) = (1+R)/(1-R)$  [豊貞<sup>2)</sup>]
- ②  $f(R) = 1/(1-R)^m$  [Roberts et al<sup>3)</sup>]
- ③  $f(R) = (1+0.8R)^m$  [Elber<sup>4)</sup>]

(ii) に挙げた  $\Delta K$  の上限界は、一般に小寸法の試験片で全周降伏に近い応力条件であらわれる。比較的大寸法の構造物でのき裂伝播では、事実上無視できることが多い。

(iii) に挙げた  $\Delta K$  の下限界については、5.1.3 項、また (iv) に挙げた環境については 5.1.4 項に、後述する。

いずれにしても、Paris則は全2の実験条件において精度良く成立つものではない。しかし、疲労き裂伝播速度をあらわす式として最も簡単な形を持っており、構造物の設計又は安全性評価への応用に便利である。

本設計指針においては、解析の単純化・簡易化を目指して、Paris則を疲労き裂伝播速度則として採用する。但し、Paris則をあてはめたための推定の偏りや誤差に関連し、次項以下に示すような諸配慮が有用である。

### 5.1.2 疲労き裂伝播特性をあらわす定数 $C, m$

前項(5.1.2)式に示したParis則が、疲労き裂伝播速度則として広く妥当性を持ったためには2つの定数  $C, m$  が、本来、同じ材料について常に一定であることが必要である。しかし実際には、同一とみなされる材料でも、 $C, m$  の値に少なからずばらつきがみられる。

図5.1.2に、軟鋼(SM41)から80キロ級高張力鋼までの母材、溶接金属、熱影響部について求められた  $C, m$  値のプロット<sup>5)</sup>を示す。図5.1.2に示されるように、 $C, m$  の値そのものには大きなばらつきがあるものの、両者の間には次式で示されるような相関関係がある。

$$C = A / B^m \text{ ----- (5.1.4)}$$

$A, B$ : 相関関係をあらわす定数

北川<sup>6)</sup>は鋼について  $A, B$  の値を次のように与えている。

$$\left. \begin{aligned} A &= 5 \times 10^{-5} \text{ (mm/cycle)} \\ B &= 55 \text{ (kgf/mm}^{3/2}\text{)} \end{aligned} \right\} \text{----- (5.1.5)} \\ \text{for steels}$$

$C, m$  値の間の相関関係については更にいくつかの検証がなされている(7), 8), いずれも (5.1.5) 式に近い定数  $A, B$  で与えられる相関関係を確認している。

$m$  値と材料の降伏点  $\sigma_Y$  との間には、図 5.1.3 に示すような弱い相関関係がある。<sup>9)</sup>  $m$  値は  $\sigma_Y$  が大きいほど、小さくなる傾向があり、次のような式でその相関関係があらわされる。

$$m = m_0 - \sigma_Y / \lambda \text{----- (5.1.6)}$$

$$m_0 = 4 \sim 5.5$$

$$\lambda = 35 \sim 55 \text{ (kgf/mm}^{3/2}\text{)}$$

大型試験片でのデータは、一般に、 $m$  が低くめとなり、次のような式が当てはまることとなる。

$$m = 4 - \sigma_Y / 35 \text{----- (5.1.7)}$$

: for large sized specimen

一般に大型構造物への応用の場合、 $m$  の値を

$$2 \leq m \leq 4 \text{----- (5.1.8)}$$

の範囲で選定するのが適当である。4以上の高い  $m$  の値は試験片寸法が小さい場合、全面降伏に近い応力がかかる場合、などにあられることが多い。

(5.1.8), (5.1.4), (5.1.5) 式を考慮に入れると  $C, m$  の標準値として、例えば、次のようなものを選ぶことができる。

- ①  $m=2, C=1.65 \times 10^{-8}$
- ②  $m=3, C=3.01 \times 10^{-10}$
- ③  $m=4, C=5.46 \times 10^{-12}$

### 5.1.3 疲労亀裂伝播下限界条件

$\Delta K$  の値がある限界より低くなると、疲労き裂伝播が起らなくなる。このような  $\Delta K$  の下限界値を  $\Delta K_{th}$  とあらわす。(5.1.2) 式の Paris 則と合わせると、大ざっぱに次のような式が設定されることとなる。

$$da/dN = \begin{cases} C(\Delta K)^m & : \Delta K \geq \Delta K_{th} \\ 0 & : \Delta K < \Delta K_{th} \end{cases} \quad \text{----- (5.1.9)}$$

(5.1.9) 式の代りに 次のような式も提案されている。<sup>8)</sup>

$$da/dN = C(\Delta K)^m - V_0 \quad \text{----- (5.1.10)}$$

$V_0$  : 臨界き裂速度  $[= C(\Delta K_{th})^m]$

このような下限界値  $\Delta K_{th}$  は、一般に応力比  $R$  (応力繰返しにおける下限応力/上限応力の比) の影響を大きく受ける。 $\Delta K_{th}$  と  $R$  との関係は図5.1.4に示すように、次のような直線関係であらわされる。

$$\Delta K_{th} = \Delta K_{th0} - \beta R \text{ ----- (5.1.11)}$$

$\Delta K_{th0}$ ,  $\beta$  : 材料定数

表5.1.1 に  $\Delta K_{th0}$  および  $\beta$  の値の例を示す。図5.1.4に データの1例を示す。

このような  $\Delta K$  の下限界値は、多くの場合、長い繰返し数をおけ応力を漸減して行く方法で求められる。しかし実構造物において、ランダム変動応力を受ける場合は、き裂伝播にさまざまな加速・遅延現象が起るので、 $\Delta K_{th}$  の設定にあたっては注意が必要である [5.1.6 項参照]。

#### 5.1.4 腐食環境下の疲労き裂伝播

大気中に比較して、海水中、河川水中 などでは、腐食の影響を受けて疲労き裂伝播が加速される。その加速の度合いは、応力繰返し速度、応力波形の影響を受ける。また当然のことながら腐食環境条件（温度、塩分濃度、pH、自然腐食 電気防食の差異 など）もき裂伝播速度に大きく影響する。

海水中の自然腐食条件下での疲労き裂伝播速度について、永井<sup>10)</sup>は、図5.1.5に示すように、次のような形の実験式を得ている。

$$da/dN = (-C_1 \log f + C_2) \cdot (\Delta K)^m \text{ ---- (5.1.12)}$$

$f$  = 応力繰返し速度

$C_1, C_2$  = 雰囲気、温度によって決る定数

一方、海洋構造物に用いられる 80 級高張力鋼鋼材<sup>11)</sup>について、岡本らは 図 5.1.6 に示すような、折れ曲り臭、又は踊り場を持つ  $da/dN \sim \Delta K$  曲線を得ている。このように腐食環境下の疲労き裂伝播には、さまざまな複雑な現象を伴うので、出来るだけ問題とする環境に近い条件で得られた実験データに基づく解析を行うことが必要である。今後の研究の発展とデータの蓄積とに俟つところが多い。

### 5.1.5 複数き裂の成長と合体結合

疲労き裂の伝播成長は、隣接して複数個のき裂が存在する場合、それらのき裂の合体により、不連続的に急速な成長を示すこととなる。

特に、溶接継手の止端部には、しばしば多数の小さいき裂が発生し、これが結合・合体することにより、継手止端に沿った長いき裂が形成される。

図 5.1.7 に示すように海洋構造物に用いられるパイプ継手においては、比較的初期段階で溶接線に沿った浅いき裂の急速な成長がしばしば見られる。<sup>12)</sup> これは 図 5.1.8 に示すように、

単一き裂の成長としてでなく、多数のき裂が次々と合体して起る見かけ上の急速なき裂成長であると解釈される。

き裂の合体は、き裂相互の位置関係により、極めて多様な変化を示す。実構造物におけるき裂成長は、しばしば解析に乗りにくい複雑な様相を示す。これらの現象を把握するには、出来るだけ実構造物に近いモデルでの実験結果についての知見を蓄えておくことが必要である。

### 5.1.6 ランダム荷重下の疲労亀裂伝播

異なる振中の応力サイクルが次々と繰返される場合の疲労き裂伝播の評価には、 $\sigma$ - $N$  1次近似として、線形重ね合せ又は Miner 則が用いられる。

しかし、実際の試験片にランダムな変動繰返し応力をかけると、さまざまな加速・遅延現象がまじり Miner 則による寿命算定に誤差を生じることとなる。

ここでは特に顕著な加速・遅延をいまいちす応力サイクルを挙げ、寿命評価解析における注意を促すこととする。

- 1) 引張側の過大荷重は、一般にき裂伝播を遅延させる。
- 2) 圧縮側の過大荷重は、あまり大きな変化を与えない。いくらか加速する傾向がある。
- 3) 過大荷重直後 数サイクル～約 30 サイクルは、き裂伝播が加速される傾向にある。
- 4) ブロック荷重は、ブロックの長さが短いほど遅延の程度が少なく、加速の程度が大きくなる。
- 5) ランダム荷重は、長さを出来るだけ短くしたブロック荷重とほぼ同等の寿命経過を示す。

これらの効果の寄与により、Miner 則による寿命評価が  $1/3$  以下の短い寿命から 3 倍以上の長い寿命までのばらつきを生ずることとなる。

## 5.2 脆性亀裂の発生特性に関するもの

### 5.2.1 破壊靱性値 ( $K_{IC}$ 値及び $\delta_{IC}$ 値) の温度依存性

#### 5.2.1.1 母材の亀裂発生破壊靱性値 $K_{IC}$

脆性亀裂発生特性に関する試験は、今までに各方面で数多く行なわれており、ここでは以上のデータの殆んどを包含すると考えられる日本鉄鋼協会データシート分科会で収集されたもの<sup>13)</sup>を中心にして、その中から造船規格だけを抜き出して整理した。 $K_{IC}$  値の温度依存性に関する整理方法は、 $K_{IC}$  値と温度の関係をアレニウス型の次式により最小二乗法で直線近似した。

$$K_{IC} = K_0 \exp\left(-\frac{T_0}{T}\right) \text{----- (5.2.1.1.)}$$

ここで  $T$ : 温度 (°K)

$K_0, T_0$ : 係数

表 5.2.1.1 ~ 5.2.1.12 は NK 規格 (日本海事協会規格)<sup>14)</sup> をベースに分類したデータ及び計算結果であり、全面降伏している値 (米印) は除外して計算した。全面降伏のチェックは低温引張試験が行なわれていないものについては TM 委員会の提案式<sup>15)</sup>を用いて行なった。

表中生データには材料切欠と疲労切欠のものがあるが、これらのデータをもとにして各鋼種の最低値と考えられる NK 規格値における材料切欠と疲労切欠の場合の推定値を求めた。

例えば生データが材料切欠の場合として、表 5.2.1.1 の

KAS 板厚 9mm を例にとれば、先ず RR3M で提案されている方法<sup>16)</sup>によつて生データと(5.2.1.1)式で整理して、 $K_0: 1.20 \times 10^3$ ,  $T_0: 2.546 \times 10^2$ を得る。

次に KA 鋼の Vノッチシャルピー値(但し、ここでは試験温度  $10^\circ\text{C}$  の時のシャルピー値を  $2.8 \text{ kgf}\cdot\text{cm}$  と仮定した)から、次式で示されるある温度における Vノッチシャルピー値  $vE_T$  とエネルギー遷移温度  $vT_{RE}$  との関係式<sup>17)</sup>;

$$vE_T = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{T-vT_{RE}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{T-vT_{RE}}{20}\right)^2\right\} dT \quad \text{----- (5.2.1.2)}$$

==で T: 試験温度( $^\circ\text{C}$ )

より、 $vT_{RE}$  を求める。また破面遷移温度  $vT_{RS}$  と材料切れからの脆性破壊発生試験(ティーポノッチ試験)によつて得られる応力  $\frac{1}{2}\sigma_{y0}$  ( $\sigma_{y0}$ : 公称降伏点、ここでは KA 鋼の値として  $24 \text{ kgf}/\text{mm}^2$ ) における亀裂長さ  $(2a) 80 \text{ mm}$  に対する破壊発生限界温度 ( $\sigma = \frac{1}{2}\sigma_{y0} [T_{\lambda}]_{a=40}$ ) との関係式が、次式のように求められている<sup>16)</sup>。

$$\sigma = \frac{1}{2}\sigma_{y0} [T_{\lambda}]_{a=40} = (0.0032/\sigma_{y0} + 0.391) vT_{RS} + 2.74\sqrt{\pi} - 5.44 \text{ (}^\circ\text{K)}$$

==で  $a$ : 板厚(mm)

$vT_{RS} \doteq vT_{RE}$

----- (5.2.1.3)

なお、この場合  $K_c$  値は次式で表わされる。

$$K_c = \frac{1}{2}\sigma_{y0} \sqrt{40\pi} \quad \text{----- (5.2.1.4)}$$

従つて以上(5.2.1.2)~(5.2.1.4)式によつて得られる  $T_{\lambda}$  温度と  $K_c$  値から(5.2.1.1)式を整理された生データの  $T_0: 2.546 \times 10^2$  をそのまま用いて再度(5.2.1.1)式に代入し、KA 鋼の  $nK$  規移値における材料

切欠の値として  $K_{OMN}: 7.814 \times 10^2$ ,  $T_0: 2.546 \times 10^2$  を得る。

次に、材料切欠から疲労切欠の  $K_c$  値を推定する方法としては、RR3M 及び矢島らによる方法があるが、<sup>(16), (18)</sup> こゝでは

図5.2.1.36 に示すように、<sup>(19)</sup> 金沢らによつてタイプノック4試験における D-M モデルから計算される亀裂先端 COD ( $\delta = V(a)$ ) と疲労切欠の場合に等しいとされる available COD ( $\delta^a$ ) の比が求められており、更に  $K_c$  と  $\delta_c$  の関係式:  $K_c = \sqrt{E \sigma_y \delta_c}$  を用いると、材料切欠と疲労切欠の  $K_c$  値の関係は次式で表わされる。

$$\frac{\text{疲労切欠の } K_c \text{ 値}}{\text{材料切欠の } K_c \text{ 値}} = \left\{ \frac{\delta^a}{V(a)} \right\}^{\frac{1}{2}} \text{----- (5.2.1.5)}$$

そこで(5.2.1.5) 式によつて疲労切欠の  $K_c$  値を推定する場合に、生データの試験条件を全て満足する安全側のカーブとして、図5.2.1.36 において板幅と亀裂長さの比  $\%w = 0.6$  亀裂先端の切欠幅  $d = 0.2$  で示されるカーブを採用した。またこのカーブの誤差を考慮して  $\sigma_{mt}/\sigma_y$  は 0.34 以上とした。

従つて、KA鋼の NK 規格値における疲労切欠に対する  $K_c$  値は、前に求めた材料切欠の  $K_{OMN}$ ,  $T_0$  を用いて、図5.2.1.36 と (5.2.1.5)

式から、生データの試験条件の各温度における疲労切欠の  $K_c$  値を推定し、これらを(5.2.1.1) 式で直線回帰して求めた値が、 $K_0: (4.548 \times 10^3)$ ,  $T_0: (5.986 \times 10^2)$  である。

次に、生データが疲労切欠の場合として、表5.2.1.10 の KT50N 板厚 8mm について説明する。先ず、生データから

(5.2.1.1) 式によって疲労切欠の  $K_t$ ,  $T_0$  (tbp) を求め, ついで 図5.2.1.36と  
 (5.2.1.5) 式より, 先程とは逆に, 上で求めた疲労切欠の  $K_t$  値を推定し,  
 これらを(5.2.1.1) 式で直線回帰して,  $K_t$ ,  $T_0$  (いずれも無tbp) を得る。

この材料切欠の値をもとに以下 先程と同様の方法で KL24B, KT50N  
 の VK 規格における材料切欠及び疲労切欠の値を求めた。

なお 9%Ni 鋼 KL9N については表 5.2.1.11, 5.2.1.12 に示すように  
 VK 規格値における材料切欠の推定値として, 上記の方法はとらず  
 実績最低値<sup>20)</sup>を採用し, この値をもとに上記と同様にして, 疲労切欠の  
 $K_t$ ,  $T_0$  を求めた。以上によって得られた結果を 図5.2.1.1 ~ 5.2.1.12 に図  
示した。 図中  $K_t$  値の温度依存性を表わす各直線は全データの試験  
 温度範囲内で表示している。従って各鋼種の使用温度域での  $K_t$  値を求める場合は  
 それぞれの直線を使用温度域で外挿して求めねばよい。但し軟鋼の場合  
 の  $K_t$  値は 経験的に  $K_t = 600 \text{ kgf} \cdot \sqrt{\text{mm}} / \text{mm}^2$  が上限とされている。

### 5.2.1.2 溶接継手部の亀裂発生破壊靱性値 $K_{IC}$

溶接部は母材に比べて, 材質が不均一で靱性を左右する不確定要素が多いが, 母材と  
 同様温度依存性は顕著である。 図5.2.1.13 ~ 5.2.1.21 に造船規格  
(VK 規格) を中心にしたデータを示す。 図中には参考のために,  
 前項で得られた同一鋼種の母材の結果も示してある。

ここに示されたデータは材料切欠を付した単純突合せ溶接継手の  
 デューブノッチ試験による一部手溶接を含めた大入熱溶接のデータが  
 殆んどである。例えば図5.2.1.13 でも合かるように, 入熱量の小さい手  
 溶接と大入熱のデルタオッシレートでは後者の靱性が低

下しており、一般に大入熱程靱性は低下する傾向にあり、溶接金属 (w.m) とボルト部では後者の靱性が劣るようである。また母材と溶接部では前者の靱性が優れている。

なお、ここでは提示しないが、溶接部の場合も造船規格要求値における  $K_{IC}$  値を推定する試みがなされている。<sup>(16),(18)</sup>

### 5.2.1.3 母材の亀裂発生破壊靱性値 $K_{IC}$

日本鉄鋼協会データシート合科会のデータ<sup>(13)</sup>を中心に収集した造船規格の鋼種について、図5.2.1.22～5.2.1.26に示す。ここに示すデータは9%Ni鋼を除き(9%Ni鋼はタイプ1の4)小型3点曲げCOD試験の結果である。 $K_{IC}$ 値と同様温度依存性は顕著で、温度の低下と共に靱性は劣化する。

データの整理方法については必ずしも統一した方法はなく、ここでは  $K_{IC}$  と温度をリニアスケールで表示した。またTM委員会及びBE委員会報告<sup>(15),(21)</sup>では、造船規格ではないが、軟鋼からHT80までのデータが報告されており、同時に  $K_{IC}$  の各種評価法についても詳しく述べられているので参照されたい。

### 5.2.1.4 溶接継手部の亀裂発生破壊靱性値 $K_{IC}$

ここに提示する造船規格のデータは、SR147 研究部会<sup>(22)</sup>で行なわれた、大入熱単純突合せ溶接継手部の機械切欠付き小型3点曲げCOD試験のデータが主体であり、これを鋼種毎に整理して図5.2.1.27～5.2.1.32に示す。図中

各鋼種について溶接部と共に前項で得られている母材のデータも併せて図示した。図から分かるように、全体として、母材の靱性値は溶接より高い靱性を示す。一方、溶接部においては一般に入熱量が増大すると靱性が下がる傾向にあるが、ここでは入熱量が多くなるに従って必ずしも靱性が低下するとは限らないようである。また、ボンド部と溶接金属において両者の靱性を比較した場合にも、必ずしもボンド部が弱いという傾向はないようである。

なお溶接部における $\sigma_c$ 値の評価法についてはBE委員会報告<sup>21)</sup>に詳しく述べられており、同時に軟鋼からHT80に及ぶ多くのデータも提示されている。

#### 5.2.1.5 COD試験におけるティープノッチ及び小型3点曲げ試験結果について

従来、切欠付ティープノッチ試験あるいは小型3点曲げ試験によって破壊靱性値 $\sigma_c$ が求められており、これまでのいくつかの研究によ<sup>22), 24), 25)</sup>って、母材については両試験で得られる $\sigma_c$ は、一例を図5.2.1.33に示すように、両者はかなりよく一致することが分かっている。従って母材については、CODフライテリオンに基づいて、小型試験結果から大型試験の破壊応力を比較的よく推定できる。

一方、溶接継手部に關する小型3点曲げとティープノッチ試験による $\sigma_c$ 値の相関に關するデータは少ないが、例えばSR147研究部会で得られている単純突合せ溶接継手

部の試験結果の一例を **図5.2.1.34**と**5.2.1.35** <sup>22)</sup> に示す。図中溶接継手部では実験式のばらつき以外に、低温域で、大型試験(ディープノッチ)の $\sigma_c$ は小型試験(3点曲げ)に比べて著しく小さくなっている。この原因としては溶接残留応力が考えられ、小型試験片では無視できる残留応力が大型試験片では無視できないようである。従って、残留応力を考慮することなく大型試験による溶接継手部の破壊応力を小型試験の $\sigma_c$ から求めることは危険側の推定となるので、この残留応力を考慮した補正式の提案もなされている。<sup>22)</sup>

#### 5.2.1.6 疲労及び材材切欠におけるCOD試験結果について

実構造物において脆性破壊が生じる場合には疲労亀裂から発生することが多く、亀裂長さが同じであれば、亀裂先端半径が小さい程低応力で破壊する。即ち疲労亀裂が最も厳しいことになる。しかしながら、試験片で行なわれるCOD試験は疲労切欠導入に一定の条件があることや、その煩雑さなどから、材材切欠で行なわれることが多いし、単に材料の靱性を知る尺度としてはこれで十分であるが、現実にはごくした値としては材材切欠のデータから疲労切欠の値を推定することが必要である。

このような必要性から、両者の関係を求める研究がなされておき、例えば**表5.2.1.13**に示すように、小型3点曲げCOD試験によって得られた軟鋼からHT80までの疲労切

欠と材欠の両者の関係を温度差で表わした結果がある。最も代表的な値として、 $\sigma_c = 0.1 \text{ mm}$  の場合、HT60からHT80では母材及び溶接部で  $\Delta T = 50^\circ\text{C}$ 、40~50キロ級鋼では  $\Delta T = 30^\circ\text{C}$  前後という値が得られており<sup>22)</sup>、これらの結果はWES 3003各種改定案にも反映されている。

一方これとは別に、豊貞によって<sup>26)</sup>材欠の小型3点曲げCOD試験から疲労切欠に相当する available CODが提案され、これによれば、切欠幅  $0.2 \text{ mm}$  の場合、材欠のCOD曲げ試験で得られた値を  $0.34$  倍すると、疲労切欠における安全側の値が得られるという、より定量的な研究がある。

また最近金沢らによって<sup>19)</sup> available CODの誤差に基づきデイープロックによるCOD試験結果を解析して、図5.2.1.36に示すような疲労切欠と材欠の関係が求められており、5.2.1.1項の疲労及び材欠相互の推定にはこの図を利用した。

#### 5.2.1.7 Vノッチシャルピー試験結果について

材料の靱性を評価する最も簡便な工業的試験法の1つであるVノッチシャルピー試験のデータを、日本鉄鋼協会データシート分科会資料<sup>13)</sup>を基に提示する。

表5.2.1.14~5.2.1.16は、 $\sigma_c$ で収集された各種規格の鋼種であり、表5.2.1.17~5.2.1.19は、これらの各クラス別の母材におけるシャルピー遷移温度、 $VTRE$ 、 $VTRE$  を求めた結果で

ある。

更に、図5.2.1.37は、 $\pi$ の表の $v_{TrE}$ と $v_{TrS}$ の関係をプロットしたもので、一般に言われているように両者にはほぼ1対1の対応があることが分かる。また図5.2.1.38は各クラス毎のシャルピー値の平均値より求めた $V$ シャルピー遷移曲線である。

一方、シャルピー値と破壊靱性値 $K_c$ 及び $\delta_c$ の関係から、シャルピー値より $K_c$ 、 $\delta_c$ を指定する方法については、各種の方法が提案されているが、これらについては別項で詳しく述べられているので、ここには触れない。

なお、興味ある実例的な適用例として、矢島<sup>18)</sup>らの研究があることを付け加えておく。

## 5.2.2 破壊靱性に影響をおよぼす因子

脆性破壊発生に影響を及ぼす因子には2種類ある。1つは破壊靱性値( $K_c$ および $\delta_c$ )に対するものであり、もう1つは破壊パラメータ( $K$ および $\delta$ )に対するもので2.1および2.2で述べた。

本項では、前者の影響因子について触れるが、支配的因子である温度の影響については5.2.1を参照して頂きたい。

### 5.2.2.1 板厚効果

一般に破壊靱性は板厚が増加することにより低下する傾向がある。これは板厚が増大することにより亀裂先端部の応力の3軸度が増し、破面が生じ易くなるためと考えられる。このことは脆性破壊の発生起点が板厚貫通切欠の場合、主として板厚中央部であることから理解されよう。

また、板厚効果は切欠先端部に生じる塑性変形とその拘束状態とが関連しており、塑性域が十分小さい状態で破壊を生じる低温域あるいは延性破壊を生じる高温域では板厚効果は顕著ではないと考えられる。

図5.2.2.1に、ディープノッチ試験により求められた脆性破壊発生温度と板厚との関係<sup>27)</sup>を示す。

図5.2.2.2は、切欠曲げ試験において最終破壊に先立ちき裂先端に延性き裂を生じ始めるCOD値： $\delta_i$ と与える温度 $T_i$ と板厚 $t$ との関係<sup>15)</sup>を求めた例である。 $T_i$ は板厚の増加とともに上昇するが、次第に飽和する傾向にある。

図5.2.2.3は、板厚165mmのA533 Type B-Class 1鋼の板厚中央部から採取した切欠曲げ試験結果より、一定の限界COD値を与える温度と板厚との関係を示したものである<sup>28)</sup>。

これらの結果はいずれも、脆性破壊発生温度に關し板厚効果が板厚の $1/2$ 乗に比例する傾向があることを示している。

### 5.2.2.2 線状加熱の影響

熱塑性加工を施せば一般に鋼板は脆化する。線状加熱においては鋼板の表面層は局部的な加熱・冷却により組織変化を生じ、また内部ひずみに伴う材質変化により靱性が劣化する。劣化の程度は鋼板素材の材質および施工条件により異なり、適正に管理された条件では軟鋼から50kg級鋼の材質劣化は特に大きいものではない。

図5.2.2.4にKAS, K5D, K5E鋼板の線状加熱条件とディープノッチ試験に

おける脆性破壊発生特性（塑性仕事）との関係を示す。<sup>29),31)</sup> 同図において次のことが認められる。

- (1) 各鋼種とも、脆性き裂発生特性は冷却条件によって大きく影響を受ける。
- (2)  $A_{c1}$  変態点以上（ $700 \sim 900^{\circ}\text{C}$ ）に加熱しても、空冷の場合、脆性き裂発生特性は素材と同等か若干低下する程度である。
- (3)  $700 \sim 900^{\circ}\text{C}$  に加熱して  $500^{\circ}\text{C}$  以下から水冷した場合、脆性き裂発生特性は素材と同等か若干低下する程度である。
- (4) 加熱後同時水冷する場合、加熱温度が  $700 \sim 800^{\circ}\text{C}$  になると脆性き裂発生特性はかなり劣化する。加熱温度が  $650^{\circ}\text{C}$  以下の場合、脆性き裂発生特性におよぼす悪影響は認められない。

図5.2.2.5 および図5.2.2.6 に、線状加熱条件とシャルピー衝撃試験破面遷移温度<sup>30)</sup> および硬さとの関係を示す。

### 5.2.2.3 塑性拘束の影響

立体構造部材に切欠きがあり、切欠先端の塑性変形が板厚方向に拘束される場合、あるいは軟質溶接部に切欠きがあり周囲の母材によって変形が拘束される場合には、切欠先端部は多軸応力状態になり破壊発生特性が通常の切欠つき平板の場合と異なることがある。

図5.2.2.7, 8 に拘束引張試験による KAS, KDS, KEK 鋼の破壊発生特性と<sup>32), 33)</sup> 平板試験片における破壊特性と対比して示す。拘束引張試験は、構造的連続による応力集中および残留応力が重畳した厳しい試験法であり、直接塑性変形の拘束の影響を示すものではないことに注意が必要であるが、これらの影響を考慮するのみでは拘束引張試験の強度低下を説明することはできない。

図5.2.2.9 は、溝つき試験片の拘束係数  $\beta$ （後述）と破壊発生応力との<sup>34), 35)</sup> 関係も SH50 鋼板について調べた結果であり、拘束状態と温度によって

破壊特性が異なることを示している。

これらの塑性拘束の影響は板厚効果と同様に、塑性変形が比較的大きな状態が顕著であり、塑性拘束条件により切欠きの変形挙動が異なり、ともに、破壊靱性値（たとえば  $S_c$ ）が異なることに関係している。

### (1) 変形挙動

引張型の破壊モード (Mode I) における切欠きの変形特性は多軸応力下の降伏条件を考慮して、引張方向に対する降伏応力を補正することにより記述される。<sup>34), 36)</sup> DM モデルによるき裂開口変位  $\delta$  および塑性域寸法  $P$  は補正した降伏応力  $S$  を用い次のように表わされる。

$$\delta = \frac{2S}{\pi^2 A} a \cdot \ln \sec \left( \frac{\pi \sigma}{2S} \right) \quad (5.2.2.1)$$

$$P = a \left\{ \sec^{-1} \left( \frac{\pi \sigma}{2S} \right) - 1 \right\} \quad (5.2.2.2)$$

$$\text{ただし } S = \beta \sigma_Y \quad (5.2.2.3)$$

$\beta$  : 塑性拘束係数 (降伏条件により定められる)

$\sigma_Y$  : 降伏応力 (1 軸),  $\sigma$  : 一様応力,  $a$  : き裂長さ/2

$$A = \begin{cases} E'/4\pi & (\text{平面応力}) \\ E'/4\pi(1-\nu^2) & (\text{平面ひずみ}) \end{cases}$$

$E'$  : 板厚不連続等を補正したヤング率,  $\nu$  : ポアソン比

塑性拘束パラメタ  $\beta$  は拘束の強さにより 1.0 ~ 2.57 の値をとる。

平面応力状態では、中央切欠試験片で 1.0、広幅の縁切欠試験片では 1.15 となる。したがって十分広い平板中の切欠に対しては 1.15 の値をとる。

溝つき試験片および軟質継手について  $\beta$  および  $E'$  を示めた例を以下に示す。<sup>34) 35)</sup>

$$E' = \begin{cases} \beta E & \text{溝つき切欠} \\ E & \text{軟質継手} \end{cases} \quad (5.2.2.4)$$

$$\beta = \begin{cases} \frac{3}{4} + \frac{t_0}{4H_0} & \frac{1}{2(K_Y - 3/4)} \leq \frac{H_0}{t_0} \leq 1 \\ K_Y - (K_Y - 3/4)^2 \cdot \frac{H_0}{t_0} & 0 \leq \frac{H_0}{t_0} \leq \frac{1}{2(K_Y - 3/4)} \end{cases} \quad (5.2.2.5)$$

$$\begin{aligned}
 \text{ここで } K_T &= (\sigma_Y^B)^* / \sigma_Y \\
 (\sigma_Y^B)^* &= \begin{cases} \frac{T_0 + t_0}{2t_0} & \text{溝つき試験片} \\ \sigma_Y & \text{軟質溶接継手} \end{cases} \quad \text{----- (5.2.2.6)}
 \end{aligned}$$

$\beta$  と溝つき試験片の板厚比 ( $H_0/t$ ) との関係を図5.2.2.10に示す。

図5.2.2.11に溝つき試験片により求められた応力-開口変位曲線と拘束条件との関係を示すが、拘束が大きいほど引張応力に対するき裂の開口が小さくなることがわかる。

## (2) 限界開口変位量

前述の拘束引張試験 (KAS鋼板) における限界開口変位を平板試験片のそれと比較して図5.2.2.8に示す。また、溝つき試験における塑性拘束係数  $\beta$  と限界開口変位との関係を図5.2.2.12示す。

拘束引張試験片が厳しい状態を想定したものであること、 $\beta = 1.4$  程度の拘束は溝つき試験片で形状的不連続性がきわめて大きいものに対応していることから、部材拘束の大きい部材に対し、通常の破壊靱性試験において求められる限界開口変位  $\delta_c$  値に 2~5 倍の安全を見込んで評価すれば十分であろう。

## 5.2.2.4 残留応力及び応力除去熱処理

軟鋼および 50 キロ級高張力鋼の突合溶接継手部には、溶接線方向に降伏変に達する引張残留応力が分布し、継手から離れた位置の圧縮残留応力とつり合っている。これに対し、継手に直角方向の残留応力は溶接線方向の値の 1/3 以下である。図5.2.2.13に突合溶接継手の残留応力分布の代表的計測例を示す。

上述のように溶接線近傍には高い引張残留応力が分布しているため、溶接部に切欠きが存在する場合には脆性破壊強度が低下する場合がある。

図5.2.2.14に、切欠きに溶接残留応力を付加した厳しい試験片による脆性破壊発生試験結果の例を示す。<sup>37)</sup> 残留応力の影響は低温域において著しい

が高温域ではほとんど認められない。

応力除去熱処理を施すと残留応力が低下することは言うまでもないが、鋼種によっては材質そのものが脆化する場合があり、応力除去熱処理の効果はこれらの相互変化を勘案して評価されなければならない。

応力除去熱処理条件がシャルピー破壊遷移温度に及ぼす影響も<sup>37)</sup>図5.2.2.15, 16に示すが、SM41では650°C以下の温度条件では材質が改善されるのに対し、HT-60では応力除去熱処理温度が高いほど脆化する傾向を示している。これらの効果を考慮して破壊特性を評価した例も<sup>37)</sup>図5.2.2.17, 18に示す。

残留応力の分布している部材からの脆性破壊発生特性は $P^+$ <sup>39)</sup>あるいは $COD$  (active  $COD$ )<sup>40), 41)</sup> 説により評価される。

残留応力分布のある切欠きの $COD$ 評価、 $P^+$ 評価に関しては多くの研究が行われて<sup>37)~41)</sup>いるが、ここでは有限板中の切欠きについて $COD$ および $P$ の計算式を示す。

(1) 分布応力 $\sigma(x)$ が存在していることに

一様引張応力 $\sigma$ を受ける切欠 (無限板, 平面応力)

$$COD[\sigma + \sigma(x); a] = \frac{\sigma_C \sigma_Y}{\pi E} \ln\left(\frac{a}{c}\right)$$

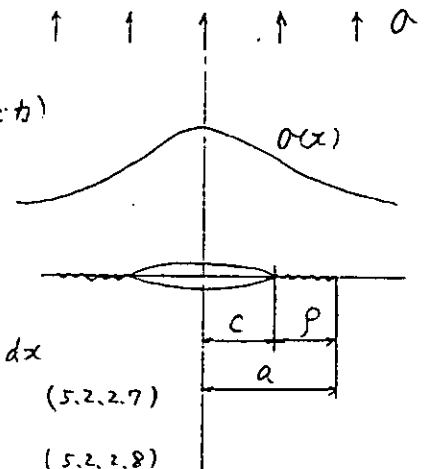
$$+ \frac{4}{\pi E} \int_c^a \frac{\sqrt{a^2 - x^2}}{(x - \lambda) \sqrt{a^2 - \lambda^2}} \cdot \sigma(\lambda) d\lambda \cdot dx \quad (5.2.2.7)$$

$$P[\sigma + \sigma(x)] = a - c \quad (5.2.2.8)$$

$$\sigma_Y \cos^{-1}\left(\frac{c}{a}\right) = \int_0^a \frac{\sigma + \sigma(\lambda)}{\sqrt{a^2 - \lambda^2}} d\lambda \quad (5.2.2.9)$$

$$COD_{active}[\sigma + \sigma(x); a, a'] = COD[\sigma + \sigma(x); a] - COD[\sigma(x); a'] \quad (5.2.2.10)$$

$$\sigma_Y \cos^{-1}\left(\frac{c}{a'}\right) = \int_0^{a'} \frac{\sigma(\lambda)}{\sqrt{a'^2 - \lambda^2}} d\lambda \quad (5.2.2.11)$$



(2) 階段状応力分布と一様引張応力を受ける切欠 (嵩圧板, 平面応力)<sup>41)</sup>

き裂先端位置と塑性域寸法により次の場合に分けられる。ここに $\sigma_Y$ は材料の降伏応力 $\sigma_Y$ 以上の応力は受け持たない<sup>42)</sup>と仮定する。

Case 1  $m + R < 1$ ,  $a < b$

$$COD[\sigma + \sigma(x); a] = \frac{8C\sigma_Y}{\pi E} \ln\left(\frac{a}{c}\right) \quad (5.2.2.12)$$

$$P = a - c \quad (5.2.2.13)$$

$$R = \frac{2}{\pi} \cos^{-1}\left(\frac{c}{a}\right) - m \quad (5.2.2.14)$$

Case 2  $m + R < 1$ ,  $a > b$

$$COD[\sigma + \sigma(x); a] = \frac{8C\sigma_Y}{\pi E} \ln\left(\frac{a}{c}\right) - \frac{4(m-n)\sigma_Y}{\pi E} \left\{ (c-b) \cosh^{-1} \left| \frac{a^2 - b^2}{a(b-c)} + \frac{b}{a} \right| - (c+b) \cosh^{-1} \left| \frac{a^2 - b^2}{a(b+c)} + \frac{b}{a} \right| \right\} \quad (5.2.2.15)$$

$$P = a - c \quad (5.2.2.16)$$

$$R = \frac{2}{\pi} \left\{ \cos^{-1}\left(\frac{c}{a}\right) + (m-n) \cos^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) \right\} - m \quad (5.2.2.17)$$

Case 3  $R + m \geq 1$ ,  $a > b$

$$COD[\sigma + \sigma(x); a] = \frac{8C}{\pi E} \ln\left(\frac{a}{c}\right) - \frac{4(1-R-n)}{\pi E} \left\{ (c-b) \cosh^{-1} \left| \frac{a^2 - b^2}{a(b-c)} + \frac{b}{a} \right| - (c+b) \cosh^{-1} \left| \frac{a^2 - b^2}{a(b+c)} + \frac{b}{a} \right| \right\} \quad (5.2.2.18)$$

$$P = a - c \quad (5.2.2.19)$$

$$R = \frac{(1-n) \cos^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) + \cos^{-1}\left(\frac{c}{a}\right) - \frac{\pi}{2}}{\cos^{-1}\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (5.2.2.20)$$

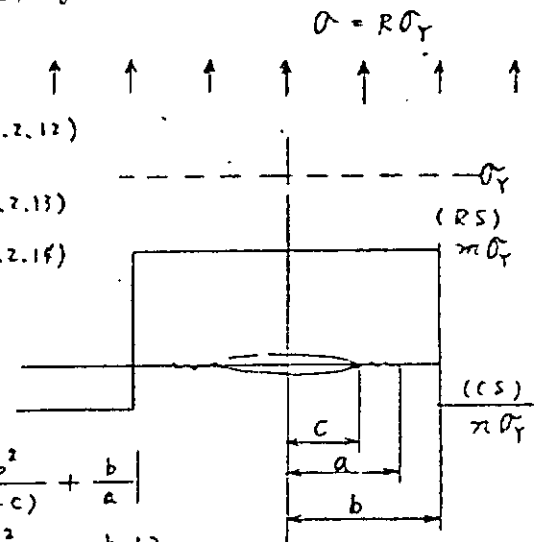
Case 4  $R + m < 1$ ,  $b < c$

$$COD[\sigma + \sigma(x); a] = \frac{8C}{\pi E} - \ln\left(\frac{a}{c}\right)$$

$$- \frac{4(m-n)}{\pi E} \left\{ (c-b) \cosh^{-1} \left| \frac{a^2 - b^2}{a(b-c)} + \frac{b}{a} \right| - (c+b) \cosh^{-1} \left| \frac{a^2 - b^2}{a(b+c)} + \frac{b}{a} \right| \right\} \quad (5.2.2.21)$$

$$P = a - c \quad (5.2.2.22)$$

$$R = \frac{2}{\pi} \left\{ \cos^{-1}\left(\frac{c}{a}\right) + (m-n) \cos^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) \right\} - m \quad (5.2.2.23)$$



Case 5  $R+m \geq 1, b < c$

$$\begin{aligned} \text{COD}(\sigma + \sigma(x); a) = & \frac{8c}{\pi E} \ln\left(\frac{a}{c}\right) \\ & - \frac{(1-n-R)}{\pi E} \left\{ (c-b) \cosh^{-1} \left| \frac{a^2-b^2}{a(b-c)} + \frac{b}{a} \right| \right. \\ & \left. - (c+b) \cosh^{-1} \left| \frac{a^2-b^2}{a(b+c)} + \frac{b}{a} \right| \right\} \quad (5.2.2.24) \end{aligned}$$

$$p = a - c \quad (5.2.2.25)$$

$$R = \frac{(1-n) \cos^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) + \cos^{-1}\left(\frac{c}{a}\right) - \frac{\pi}{2}}{\cos^{-1}\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (5.2.2.26)$$

階段状残留応力が分布している場合のき裂開口変位の計算例を

図5.2.2.19(a)~(d)に示す。

溶接継手においては、図5.2.2.13に示すように引張残留応力の分布域の外側に圧縮残留応力が分布しているが、破壊強度評価には圧縮残留応力を考慮することなく、引張残留応力のみが分布するものとして評価を行えば安全であり実際的であろう。(図5.2.2.19(a)あるいは(b)参照)

### (3) WSD委員会のDesign Curveにおける残留応力の評価<sup>42)</sup>

図5.2.2.20は、ゲージ長を切欠長さの2倍にとり、この間のひずみとCOD:  $\delta$ との関係を残留応力( $\sigma_Y$ レベル)の分布幅を変えて計算した結果である。降伏レベルの残留応力の効果としてWSD委員会ではDesign Curve

$$\delta = 3.5 e a \quad (5.2.2.27)$$

において

$$e = 0.6 e_Y (= 0.6 \sigma_Y / E)$$

を加算して評価することを提案している。また、継手に平行な切欠については同じく

$$e = 0.2 \sigma_Y$$

を加算して評価することを提案している。

### 5.2.2.5 荷重速度 (動的および衝撃)

一般に破壊靱性は荷重速度の影響を受け、荷重速度が大きくなれば破壊靱性値は低下する。これについて<sup>44)</sup>行なった試験の結果を図5.2.2.21に示すが、その低下の度合いは高靱性域ほど著しい。また、 $R_{olp}$ <sup>45)</sup>は動的破壊靱性値 ( $K_{I0}$ ) を求め、静的破壊靱性値 ( $K_{Ic}$ ) と比較して示している。図5.2.2.22および5.2.2.23がその結果である。これらの図から、 $K_{I0}$  を動的降伏点 ( $\sigma_{yp}$ ) に対する比という形で実験的に次のように与えている。

$$\text{NDT 温度において} \quad K_{I0} / \sigma_{yp} \approx 3$$

$$0^\circ\text{C において} \quad K_{I0} / \sigma_{yp} \approx 4.5$$

$$\text{ただし, } K_{I0} : \text{kg} \cdot \text{mm}^{-3/2}, \quad \sigma_{yp} : \text{kg} / \text{mm}^2$$

### 5.2.2.6 圧延による方向性

一般に、鋼板の圧延方向 (L) とそれと直角方向 (C) とではVシャルピー吸収エネルギー ( $vE$ ) の値は異なり、前者の  $vE$  は後者のものより大きい。また、破面遷移温度 ( $vT_s$ ) やエネルギー遷移温度 ( $vT_E$ ) も両方向で差がある場合もある。このような異方性は圧延方法によるところが大きい。異方性を改善するためには、圧延方法の制御によるクロスローリングも行なわれる。

板厚 8 および 15 mm の KT-50N 鋼について V シャルピー衝撃

特性での異方性を調べた結果<sup>46)</sup>を図5.2.2.24に示す。板厚15mm

での異方性は小さいが、板厚8mmでの異方性はかなり大きい。

同一鋼板についての破壊靱性値がL方向とC方向とで

差があるか否かを調べた結果<sup>46)</sup>を図5.2.2.25に示す。シャルピ衝撃

特性で異方性の大きかった板厚8mmの場合でも、異方性の

小さかった板厚15mmの場合と同様、L方向とC方向とでの破壊靱性値

の差は認めがたい。

また図5.2.2.26に示すように、シャルピ衝撃特性で異方性をかなり

有するもの(D材)および有しないもの(E材)の2種の60kg/mm<sup>2</sup>

級高張力鋼板を用いて破壊靱性値を調べた木原<sup>47)</sup>の

試験結果を図5.2.2.27に示す。破壊靱性値では、D材および

E材ともにL、C方向間に著しい差を認めることができず、

異方性の著しいD材の $vT_s$ の高いC方向が、破壊靱性値の

面からとくに不利であるとは言えない。

したがって、シャルピ衝撃特性でのLおよびC方向の異方性は、

破壊靱性値の差となって現われてこないの<sup>2)</sup>、脆性破壊

強度の面からあまり問題とならないようである。

### 5.2.2.7 塑性歪

一般に鋼材に塑性歪を与えると<sup>加工硬化し</sup>降伏点などは上昇するが、伸び・絞り<sup>は</sup>低下し、鋼材を脆化させる原因となる。

室温で与えた塑性歪が破壊靱性に及ぼす影響は池田<sup>48)</sup>

によって調べられている。図5.2.2.28は60 kg/mm<sup>2</sup>級高張力鋼(HT60)に

ついでの結果である。縦軸のEはヤング率、横軸のT<sub>k</sub>は

絶対温度である。同様のことをSM41B, HT80, HT100およ

び9%Ni鋼について調べ、図5.2.2.28でK<sub>c</sub>が $\frac{1}{2}\sigma_Y\sqrt{\pi a}$ となる温度

[T<sub>i</sub>]<sub>c=40</sub>が塑性歪の量によってどのように変化するかを求めている。

その結果が図5.2.2.29に示されている。

なお、[T<sub>i</sub>]<sub>c=40</sub>は、長さ80mmの板厚貫通切欠がそれ

と直角方向に降伏点の1/2に等しい一様応力を受けて

脆性破壊するときの温度に相当する。塑性歪の増大に

したがって、HT60, HT80および9%Ni鋼板の脆性破壊発生

温度が上昇する傾向はほぼ同じである。SM41Bはこれらより

上昇度合いが大きく、さらにHT100になるとその傾向は

著しい。

つぎに、高温で与えた塑性歪が破壊靱性に及ぼす影響

について述べる。正岡<sup>49)</sup>は、S35C材を用いて高温での

塑性加工が破壊靱性にどのような影響を与えるかを調

べている。その結果を図5.2.2.30に示す。同じ量の塑性歪を室温で

与えたものより、 $200 \sim 300^{\circ}\text{C}$ の高温で与えたものの方が

靱性の劣化が著しい。この違いは鋼材の青熱脆性が原因

であるとしている。また、Burdekin<sup>50)</sup>は、種々の高温下で

軟鋼試験片の切欠先端に曲げにより塑性歪を与え、

その後限界COD値を求めている。その結果を図5.2.2.31に示す。

室温での予歪材と $250^{\circ}\text{C}$ で時効したもの比べ、 $250^{\circ}\text{C}$

で歪を付与した予歪材では、限界COD値が著しく低下し

脆化が激しい。これに対し、予歪を与える温度をさらに

高めた $350^{\circ}\text{C}$ でのものは、 $250^{\circ}\text{C}$ でのものよりも脆化がかえ

って少ない。このように、高温で、とくに $200 \sim 300^{\circ}\text{C}$ でC-Mn

鋼に塑性歪を与えると、その破壊靱性が著しく劣化

することがあると報告されている。

このような現象は、たとえ高温での塑性歪という全体的な変形を鋼材が受けなくとも、欠陥を有する部材を溶接する

際、溶接による熱歪サイクルのため局部的に生じることがある。

図5.2.2.32は溶接による熱歪脆化を<sup>51)</sup>佐藤らが調べた結果である。NWN

(Non-Weld Notch)は熱歪サイクルをうけていない母材試験片、

AWN (After-Weld Notch)は溶接による熱歪サイクルをうけ

た部分に溶接後切欠を加工したもの、BWN (Before-Weld

Notch)は溶接による熱歪サイクルをうける部分に溶接前予め

切欠を加工したものである。したがって、BWNの切欠先端近傍

は高温でしかも切欠による応力集中のため、AWNの場合

よりも大きな塑性変形をうけている。図5.2.2.32からAWNに比べ

BWNの脆化は大きいことがわかる。このような熱歪脆化の

度合いは鋼種によっても異なるが、高張力鋼よりも軟鋼

などの低強度鋼で著しいようである。

#### 5.2.2.8 予荷重

溶接残留応力を焼なましにより除去したことによる効果

は先に5.2.2.4で述べたが、予荷重という機械的方法により

溶接残留応力を軽減した場合の破壊強度について述べ

る。木原<sup>52)</sup>は図5.2.2.33に示す溶接残留応力付きの軟鋼試験

片を用いて、予荷重が破壊応力に及ぼす影響を調べている。

試験結果を図5.2.2.34に示す。太い実線は予荷重を与えない場合、すなわち溶接のまゝの状態での破壊応力曲線である。予荷重を与えると、除荷により残留応力は減少し、低温で再負荷しても低応力破壊することなく、予荷重に相当する応力レベル以上の破壊応力が得られている。なお、溶接残留応力がない場合でも、このような予荷重の効果が認められるが、これについては次項で述べる。

#### 5.2.2.9 繰返し荷重

吉識<sup>53)</sup>は、中央切欠を有する軟鋼板に、切欠と直角方向に繰返し荷重を与えた後破壊試験を行ない、繰返し荷重をうけていない処女材の破壊靱性値と比較している。結果を図5.2.2.35に示す。図中、母材とは、繰返し荷重をうけていないもの、1サイクル材および低サイクル材とは、切欠断面上の平均応力が0~28 kg/mm<sup>2</sup>となるような片振りの繰返し荷重をそれぞれ1回および約  $2 \times 10^3$  回与えたもの、また高サイクル材とは、0~10 kg/mm<sup>2</sup>の繰返し応力を約  $10^5$  回与えたものである。低応力レベルの繰返しによって破壊靱性値はほとんど変化しないが、降伏点にほぼ等しい高応力レベルの負荷は

その繰返し数に関係なくみかけ上破壊靱性を向上させる。

この主な理由は、負荷のとき切欠先端近傍に形成される塑性域

が除荷時に周囲から圧縮され、完全に除荷された状態で

切欠先端近傍に圧縮応力が残留するためである。図5.2.2.36-

に示すように、この圧縮残留応力の大小と負荷応力の大小

とはほぼ対応することが確かめられている。

なお、鋼材によつては荷重の繰返しを受けたためにその

破壊靱性値が低下するものもある。切欠のない平滑材で

この場合の破壊靱性値の変化を調べておけばよい。

しかし、切欠を有する部材では、繰返し荷重が脆性破壊

強度に及ぼす影響を、破壊靱性値の変化と切欠先端近傍

に残留する圧縮応力との両面から検討すべきである。

### 5.2.3 シャルピ-試験結果からの破壊靱性値の推定法

鋼構造物の破壊性能確保の観点から、鋼板とその溶接部の破壊靱性の評価は主要な課題である。従来から、その評価手法の1つとして、工業的には2Vシャルピ-衝撃試験が広く用いられ、経験的ではあるが、構造物の性能保証の1つの指標として実用されている。確かにシャルピ-試験は、その試験手法の簡便さ、費用の安さなど、多くの利点を持ち、工業的材質比較試験法としては、現在、これより優れたものが見当たらないのも実情である。

一方、構造物の破壊性能を保証する手段として、近年、破壊力学的手法が提案され、これを用いた材料の選定手法や溶接欠陥の限界評価法なども示されるに至っている。これらにおいては、いわゆる破壊靱性(fracture toughness)なる指標を材料の破壊抵抗として用いるものであり、線形弾性破壊力学では  $K_{Ic}$  (平面ひずみ破壊靱性) などが、全面降伏後破壊力学では 限界COD、 $\delta_c$  やあるいは 限界J-積分、 $J_c$  などが指標とされる。現在では、そのための破壊靱性試験法( $K_{Ic}$  試験、COD 試験、弾塑性破壊靱性試験など)が既に実用化されている。

シャルピ-衝撃試験は簡便ではあるが、破壊力学的手法の適用の観点からは直接的には実用性がない。そこで、一つの破壊試験の結果として得られるシャルピ-衝撃吸収エネルギーや各種遷移温度が、破壊力学的代表靱性との間に何らかの相関関係が存在しないかという期待がもたれ、そうすれば従来の簡便な手法の利用価値が上がる。このような観点からの、各種破壊靱性とシャルピ-特性値との相関性の検討が、これまでも多くなされている。ここでは以下にこれらの結果の代表例を記述する。

### 5.2.3.1 シャルト・衝撃特性の経験的指標と破壊靱性値との相関の問題点

鋼構造物の破壊、とくに脆性破壊事例は、これまでも陸上船舶を問わず報告された例が多い。時には大々的な事故にもつながり、それを契機として多くの破壊特性に関する研究もなされ、事故原因の解明の努力を重ねられている。古くから、材料の破壊抵抗に関しては、シャルピ・衝撃試験が用いられ、事故調査から、経験的に破壊防止のためのシャルピ特性値のあり方が示された例がある。

その代表的なものか、1940年代の前年に多発した米国戦時海軍艦における事故調査の結果<sup>54)</sup>であり、船の損傷温度( $-10^{\circ}\sim 0^{\circ}\text{C}$ のものが多い)における鋼板の吸収エネルギーが15 ft-lb ( $\approx 2.1 \text{ kg}\cdot\text{m}$ ) 以下のものに損傷が多発していたことが報告されている(図 5.2.3.1)。V シャルト・吸収エネルギーが15 ft-lb となる温度  $vT_{15}$  は、一つの破壊指標として、その後用いられるようになった。一方、1954年のタンカー“World Concord”の北大西洋における折半事故を契機として、英国ロイド協会の調査<sup>55)</sup>では、吸収エネルギーが35 ft-lb ( $\approx 4.2 \text{ kg}\cdot\text{m}$ ) 以下、あるいは延性破面率が30%以下のものでは破壊が生じやすいことが報告されている。この調査によつて、遷移温度  $vT_{35}$  も一つの目安とされるに至っている。これらの事例から得られたものは、シャルピ・吸収エネルギーを一定値以上に保証しておけば、破壊の確率が著しく小さくなるという事実であり、シャルピ特性値を一つの破壊防止指標として用いることの妥当性を示していることである。

しかし、1940年代のリムド鋼に関する結果と、1950年以降のセミキルド、キルド鋼に関する結果では、要求される指標が大きく異なっており、使用する鋼材の特性が指標を左右し、一般に高級になるとその抵抗値要求も大きくすべきで

あると云う結果となっている。これは、シャルピー試験という特性試験でない手法を用いる場合には仕方ないかも知れない。そのような観点からも、破壊特性値との相関を検討することを行なわれているといえるが、こゝまで述べたことからしても、そこには必ずしも限界がある。以下には、従来の研究によって示された相関式の代表例を示すのであるが、これらの使用にあたっては、その適用性に十分な注意を払う必要がある。例えば、 $K_{Ic}$ と吸収エネルギー $V$ の間にも多くの相関式が提案されているわけであり、この事実は「いづれの相関式も全ての鋼材に対して当てはまらないことを意味しているとも言える。」すなわち、調査の範囲内での統計的处理に基づく結果であることに注意しなければならない。しかし、シャルピー試験の性格からして、巨視的見地からの総合制定基準として用いるとき、特定の対象範囲に対して十分な適用性を持つとも言えるので、その判断が以下の相関式の適用にあたって重要といえる。

5.2.3.2 Nomenclature

|                                                                                                                                                                                            | SI Unit                           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| $K_{IC}$ : 平面ひずみ破壊靱性 (板厚効果を<br>考え板厚がじゅうぶん大きい場合に対<br>応する $K_c$ としているもの $\times$ ASTM<br>E399 の定義に従うものなどあり)                                                                                  | $N/mm^{3/2}$<br>( $MPa m^{1/2}$ ) |
| $K_{Id}$ : 動的破壊靱性                                                                                                                                                                          | $N/mm^{3/2}$                      |
| $\delta_c$ : 限界 COD (BSI DD19 などに<br>準じた曲げ COD 試験によって得ら<br>れる値を用いているものが多い)                                                                                                                 | mm                                |
| $[T]_{\sigma=\sigma_c=c}$ : き裂長さ $2c$ , 作用応力 $\sigma$ の無限<br>平板で脆性破壊が発生する温度.<br>例えば, $\delta_c = \frac{8\sigma_y c}{\pi E} \ln \left( \sec \frac{\pi \sigma}{2\sigma_y} \right)$ となる<br>温度 | K                                 |
| $\rho_c^+$ : 限界 $\rho^+$ 値                                                                                                                                                                 | mm                                |
| $T_{NDT}$ : Nil-ductility 温度                                                                                                                                                               | K                                 |
| $\sqrt{E}$ : V-ノッチシャルピ° 吸収エネルギー                                                                                                                                                            | J                                 |
| $\sqrt{TS(E)}$ : V-ノッチシャルピ° 試験の破面遷移<br>温度 (エネルギー)                                                                                                                                          | K                                 |
| $\sigma_y$ : 対象温度での材料の降伏応力                                                                                                                                                                 | $N/mm^2$                          |
| $\sigma_{y0}$ : 室温 (公称) 降伏応力                                                                                                                                                               | $N/mm^2$                          |

|            |                                                                                                                                                   |                     |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| E          | 縦弾性係数                                                                                                                                             | N/mm <sup>2</sup>   |
| t          | 板厚                                                                                                                                                | mm                  |
| $\alpha$   | 降伏比 (降伏点/引張強さ)                                                                                                                                    |                     |
| T          | 対象温度                                                                                                                                              | K                   |
| $\Delta T$ | 遷移領域における破壊靱性遷移<br>曲線とシャルピ-吸収エネルギー曲線<br>の温度差                                                                                                       | K                   |
| $K_{Ic}$   | 限界応力拡大係数<br>(文献 62, 69)) ( $K_{Ic} = \sqrt{E\sigma_Y\delta_c}$ によって 限界 COD,<br>$\delta_c$ より換算した値, 必ずしも<br>ASTM E399 の $K_{Ic}$ として Valid<br>でない) | N/mm <sup>3/2</sup> |

### 5.2.3.3 シャルピ-衝撃エネルギーと破壊靱性値との相関

$K_{Ic}$  (平面ひずみ破壊靱性値) との相関<sup>72)</sup>

| 著 者                                         | 年 代  | 相 関 式                                                                                                                        |                                                                                        | 備 考                                                                                                                                                       |
|---------------------------------------------|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                             |      | 慣 用 単 位                                                                                                                      | S I                                                                                    |                                                                                                                                                           |
| Rolfe, S.T.<br>Novak, S.R.<br>(文献 56))      | 1970 | $(K_{Ic}/\sigma_Y)^2$<br>$= 5(\sqrt{E}/\sigma_Y - 0.05)$<br>$K_{Ic}$ in ksi√in,<br>$\sqrt{E}$ in ft·lb,<br>$\sigma_Y$ in ksi | $(K_{Ic}/\sigma_Y)^2$<br>$= 127.0 \left( \frac{5085\sqrt{E}}{\sigma_Y} - 0.05 \right)$ | 表 5.2.3.1 に示す 11 鋼材に対する<br>4 点曲げ切欠き試験から得た<br>$K_{Ic}$ (ASTM, E399 に準拠) と<br>吸収エネルギー $\sqrt{E}$ の相関. 試験<br>温度 80°F. Upper shelf 温度<br>域に適用される. (図 5.2.3.2) |
| Barsom, J.M.<br>Rolfe, S.T.<br>(文献 57))     | 1970 | $K_{Ic}^2/E = 2(\sqrt{E})^{1.5}$<br>$K_{Ic}$ in ksi√in,<br>$\sqrt{E}$ in ft·lb<br>E in ksi                                   | $K_{Ic}^2/E = 221.85(\sqrt{E})^{1.5}$                                                  | ASTM, E399 に準じ, Fatigue-crack<br>付 3 点曲げ試験によって得た $K_{Ic}$ .<br>Transition 温度域に適用. 対象<br>鋼種表 5.2.3.2 (図 5.2.3.3).                                          |
| Saxillors, R.H.<br>Corton, H.T.<br>(文献 58)) | 1971 | $K_{Ic} = 15.5(\sqrt{E})^{0.5}$<br>$K_{Id} = 15.873(\sqrt{E})^{0.375}$<br>$K_{Ic}, K_{Id}$ in ksi√in<br>$\sqrt{E}$ in ft·lb  | $K_{Ic} = 462.55(\sqrt{E})^{0.5}$<br>$K_{Id} = 492.05(\sqrt{E})^{0.375}$               | A533 class B, A517, A542 に<br>対するデータから得られた相関式.<br>Transition 温度域に適用.<br>(図 5.2.3.4, 5) 適用範囲<br>5 ft·lb ≤ $\sqrt{E}$ ≤ 50 ft·lb.                           |

|                                         |      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-----------------------------------------|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 伊藤 悌二<br>田中 潔<br>佐藤 誠<br>(文献59))        | 1972 | $(K_{Ic}/100)^2 = 300(vE/\sigma_Y)$<br>$K_{Ic}$ in $\text{kg}/\text{mm}^{3/2}$<br>$vE$ in $\text{kg}\cdot\text{m}$<br>$\sigma_Y$ in $\text{kg}/\text{mm}^2$                                                                                                                                                              | $(K_{Ic}/100)^2 = 28851(\frac{vE}{\sigma_Y})$                                                                                                                             | HT60, HT80の溶接継ぎには<br>おける表面切欠き応力試験か<br>ら得た実験式, Barsom'sのデータ<br>を含む。(図5.2.3.6, 7)<br>Transition領域に適用。<br>$K_{Ic}$ は次式により板厚効果を考慮して<br>求めたもの。<br>$K_{Ic} = \begin{cases} K_c / \{1 + 0.043(40-t)\} & : t \leq 40 \text{ mm} \\ K_c & : t > 40 \text{ mm} \end{cases}$ |
| 田中 潔<br>野田 直孝<br>(文献60))                | 1973 | $K_{Ic}^2/\sigma_Y = 900(vE)^{0.5}$<br>$K_{Ic}$ in $\text{kg}/\text{mm}^{3/2}$<br>$vE$ in $\text{kg}\cdot\text{m}$<br>$\sigma_Y$ in $\text{kg}/\text{mm}^2$                                                                                                                                                              | $K_{Ic}^2/\sigma_Y = 2818.4(vE)^{0.5}$                                                                                                                                    | 軟鋼およびHT80の各種材料の<br>主として溶接ボンド部および<br>HT50鋼素材に対する相関。<br>(図5.2.3.8) $K_{Ic}$ は $K_c$ から次式に<br>よって求めたもの<br>$K_{Ic} = K_c \{1 + 1.4(\sigma_Y/\sigma_c)^{-0.5}\}$<br>$(\sigma_c = (K_{Ic}/\sigma_Y)^2/t)$                                                               |
| Barsom, J.M.<br>(文献61))                 | 1975 | $\Delta T = 215 - 1.5\sigma_Y$<br>$: 36 \text{ ksi} < \sigma_Y < 140 \text{ ksi}$<br>$\Delta T = 0 : \sigma_Y > 140 \text{ ksi}$<br>$K_{Ic}/E = 5vE$<br>$\Delta T$ in $^{\circ}\text{F}$ , $K_{Ic}$ in $\text{ksi}\sqrt{\text{in}}$ ,<br>$vE$ in $\text{ft}\cdot\text{lb}$ , $E$ in $\text{ksi}$                         | $\Delta T = 119 - 0.12\sigma_Y$<br>$: 248.2 \text{ MPa} < \sigma_Y < 965.3 \text{ MPa}$<br>$\Delta T = 0 : \sigma_Y > 965.3 \text{ MPa}$<br>$K_{Ic}/E = 645.8 vE$         | 静的曲げとシャルピ衝撃曲げのP-R<br>吸収エネルギー遷移曲線の温度差<br>$\Delta T$ と降伏応力の関係(図5.2.3.9)<br>および橋梁用鋼材 A36, A572,<br>A440, A242, A588, A514 などに<br>関する $K_{Ic}$ と $vE$ の相関。                                                                                                            |
| 征矢 勇夫<br>柏村 英雄<br>萩原 行人<br>他<br>(文献62)) | 1976 | $K_c(\text{at } T^{\circ}\text{C})$<br>$= \{420\sigma_Y \cdot vE(\text{at } T+\Delta T)\}^{0.5}$<br>$\Delta T = 142 - \sigma_{Y0} - 5t$<br>$(^{\circ}\text{C})$<br>$\sigma_Y, \sigma_{Y0}$ in $\text{kg}/\text{mm}^2$<br>$t$ in $\text{mm}$ ,<br>$K_c$ in $\text{kg}/\text{mm}^{3/2}$ , $vE$ in $\text{kg}\cdot\text{m}$ | $K_c(\text{at } T \text{ K})$<br>$= \{1315.3\sigma_Y \cdot vE(\text{at } T+\Delta T)\}^{0.5}$<br>$\Delta T = 142 - 0.10197\sigma_Y$<br>$- 5t \text{ (K)}$                 | 軟鋼(SM41), SM50, HT60,<br>HT80の溶接ボンド部に関<br>して求めた $K_c$ との相関。材料<br>板厚が関係している。文献64)<br>の $\sigma_c$ と $vE$ の相関を基にして<br>$K_c = \sqrt{E\sigma_Y\sigma_c}$ より換算したもの。<br>(図5.2.3.10)。<br>Transition温度域に適用。                                                               |
| 小河 34<br>富永 双<br>丸山 武志<br>(文献63))       | 1979 | $K_{Ic} = (19.1 \pm 6)vE^{0.38}$<br>$K_{Ic} = (16.7 \pm 2)vE^{0.55}$<br>for as weld<br>$K_{Ic} = (15.8 \pm 2)vE^{0.99}$<br>for Norma. Temper<br>and SR<br>$K_{Ic}, K_{Ic}$ in $\text{ksi}\sqrt{\text{in}}$<br>$vE$ in $\text{ft}\cdot\text{lb}$                                                                          | $\bar{K}_{Ic} = (591.2 \pm 185.7)vE^{0.38}$<br>$K_{Ic} = (196.9 \pm 29.4)vE^{0.55}$<br>for as weld<br>$K_{Ic} = (173.6 \pm 59.9)vE^{0.99}$<br>for Norma. Temper<br>and SR | 2%Cr-1Mo鋼およびその<br>エレクトロスラグ溶接部に対する<br>3点曲げ試験結果からの<br>相関式。(図5.2.3.11)<br>静的曲げ速度;<br>$\dot{K}^s = 4 \sim 10 \text{ kg}/\text{mm}^{3/2}/\text{s}$<br>動的曲げ速度;<br>$\dot{K}^D = \dot{K}^s \times 10^3 \text{ kg}/\text{mm}^{3/2}/\text{s}$                               |

$\delta_c$  との 相 関

| 著 者                                         | 年 代  | 相 関 式                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                       | 備 考                                                                                                                                                                                                                  |
|---------------------------------------------|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                             |      | 慣 用 単 位                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | S I                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                      |
| 萩原 行人<br>正矢 勇夫<br>三波 建市<br>佐藤 光雄<br>(文献64)) | 1976 | $\delta_c$ (at $T^{\circ}\text{C}$ )<br>$= 0.02 \sqrt{E} (T + \Delta T)$<br>$\Delta T = 120 - \sigma_{T0}$<br>$- 5(\sqrt{E} - 20)$<br>$(20 \leq t \leq 60)$<br>遷移領域:<br>$\sqrt{E}(T + \Delta T) = \begin{cases} (T + \Delta T) C \sigma_{T0} \\ \sqrt{E} \end{cases}$<br>Upper shelf 域:<br>$(T + \Delta T) C \sigma_{T0}$ の $\sqrt{E}$<br>の代りに $\sqrt{E}^*$ と採用<br>$\sqrt{E}^* = \sqrt{E} \cdot \exp(-T_s/T)$<br>$\delta, t$ in mm<br>$\sqrt{E}$ in $\text{kg-m}$ | $\delta_c$ (at $T \text{ K}$ )<br>$= 0.002039 \sqrt{E} (T + \Delta T)$<br>$\Delta T = 120 - 0.10197 \sigma_{T0}$<br>$- 5(\sqrt{E} - 20)$<br>$(20 \leq t \leq 60)$ (K) | 軟鋼～HT80までの構造用高<br>張力鋼材およびその溶接部に<br>関する相関式。Transition 領域<br>に関する温度シフトの考え方を<br>Upper shelf 域まで拡張した<br>式を提案。シフト温度としては<br>$\delta_c = 0.16 \text{ mm}$ となる温度と<br>$\sqrt{T_E} (= \sqrt{T_S})$ との差を採用。<br>(図 5.2.3.12～14)。 |

日本溶接協会, WSD委員会<sup>65)</sup>では、溶接欠陥の限界評価に関する安全側の評価  
 手法として  $\delta_c = 0.01 \sqrt{E} (T + \Delta T)$ ,  $\delta_c$  in mm,  $\sqrt{E}$  in  $\text{kg-m}$   
 と採用している。

## 5.2.3.4 (破面)遷移温度と破壊靱性の相関

| 著 者                               | 年 代  | 相 関 式                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                       | 備 考                                                                                                                                                     |
|-----------------------------------|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                   |      | 慣 用 単 位                                                                                                                                                                                                                                                                             | S I                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                         |
| 笠松 裕<br>高野 正義<br>松岡 雅典<br>(文献66)) | 1975 | $[T_i]_{\sigma=\sigma_{T0}} = 0.687 \cdot \alpha \cdot \sqrt{T_S}$<br>$+ 7.83 \sqrt{E} - 54$ (K)<br>$\alpha$ : 降伏比<br>$t$ in mm<br>$\sqrt{T_S}$ in K<br>$(16 \leq t \leq 75)$                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                       | HT50～HT80の高張力鋼、アルミ合<br>鋼、3.5% Ni 鋼の鋼板とそれらの溶<br>接部に関するシャルピ試験とテプ<br>ル試験結果とから $K_{IC}$ 基準に<br>基づく相関式の決定。降伏比と<br>板厚を修正因子として考慮。<br>(図 5.2.3.15). (表 5.2.3.3) |
| 金沢 武<br>町田 進<br>宮田 隆司<br>(文献67))  | 1974 | $[T_i]_{\sigma=\sigma_{T0}} = (0.0047 \sigma_{T0}$<br>$+ 0.56) \sqrt{T_S} + 11.5 \sqrt{E} - 102$<br>$(K)$<br>$\sigma_{T0}$ in $\text{kg/mm}^2$                                                                                                                                      | $[T_i]_{\sigma=\sigma_{T0}} = (4.79 \times 10^{-4} \sigma_{T0}$<br>$+ 0.56) \sqrt{T_S} + 11.5 \sqrt{E} - 102$                                                                                                                         | 文献66)の提案式とCOD試験結<br>果をもとに、室温降伏点と考慮して<br>修正 LT 式。                                                                                                        |
| 松岡 雅典<br>笠松 裕<br>(文献68))          | 1977 | $[T_i]_{\sigma=\sigma_{T0}} = (0.00612 \sigma_{T0}$<br>$+ 0.4704) \sqrt{T_S} + 8.26 \sqrt{E}$<br>$- 90.2 + 0.608 \sigma_{T0}$<br>$\times \{ [\ln(\%40)(2\% \sigma_{T0})^2] \}$<br>$+ \{ c(2\% \sigma_{T0})^2 - 40 \} / 100 \}$ (K)<br>$\sigma_{T0}$ : 公称降伏応力<br>in $\text{kg/mm}^2$ | $[T_i]_{\sigma=\sigma_{T0}} = (6.24 \times 10^{-4} \sigma_{T0}$<br>$+ 0.4704) \sqrt{T_S} + 8.26 \sqrt{E}$<br>$- 90.2 + 0.608 \sigma_{T0}$<br>$+ \{ [\ln(\%40)(2\% \sigma_{T0})^2] \}$<br>$+ \{ c(2\% \sigma_{T0})^2 - 40 \} / 100 \}$ | 日本溶接協会 鉄鋼部会 BE 委<br>員会および TM 委員会のデー<br>タ、さらに著者らのデータに基づいて、<br>COD仮説を適用した場合には<br>算出される $[T_i]$ 温度と $\sqrt{T_S}$ の相<br>関式。                                 |

|                                        |      |                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                 |
|----------------------------------------|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 長谷部友雄<br>川口喜昭<br>有持和成<br>(文献69)        | 1975 | $K_c = 3000 \exp[(1.5\sqrt{t_{rs}} + 12\sqrt{t} - 90)/T]$                                                                                                                                                                                                                      | $K_c = 29420 \exp[(1.5\sqrt{t_{rs}} + 12\sqrt{t} - 90)/T]$                                                                                                               | 軟鋼~HT80までの鋼板および溶接部(BE委員会データをまとめた)の曲げCOD試験結果から、 $K_c = \sqrt{E\sigma_y\delta_c}$ として求めた $K_c$ と $\sqrt{t_{rs}}$ の相関式。 $K_c$ の温度依存性には Pivot 説を採用。 |
|                                        |      | $K_c$ in $\text{kg}/\text{mm}^{3/2}$<br>$t$ in mm, $\sqrt{t_{rs}}$ , $T$ in K                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                 |
| 越賀房夫<br>田中基吉<br>栗田美之<br>(文献37)         | 1971 | $\sigma_c^* = \gamma (T/100)^5$<br>$\gamma = 1.53 \exp\{-\frac{\sqrt{t_{rs}}(^{\circ}\text{C})}{40}\}$                                                                                                                                                                         | $\sigma_c^* = \gamma (T/100)^5$<br>$\gamma = 1408.5$<br>$\times \exp\{-\frac{\sqrt{t_{rs}}}{40}\}$                                                                       | SM41, HT60, HT80, Mn-Mo鋼に適用するティアノッチ試験から求めた $\sigma_c^*$ と $\sqrt{t_{rs}}$ の相関。 $\gamma$ の相関式は(文献70)による。(図5.2.3.16)                              |
|                                        |      | $T$ in K<br>$\sigma_c^*$ in mm                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                 |
| Stout, R.D.<br>Johnson, H.H.<br>(文献71) | 1960 | $T_{NDT} = \sqrt{t_{15\text{ mils}}}$<br>$\sqrt{t_{15\text{ mils}}}$ : 横断断面が15 mils ( $\approx 0.38\text{ mm}$ ) となる温度                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                          | 落重試験における Nil-Ductility Transition 温度, $T_{NDT}$ と $\sqrt{t_{15\text{ mils}}}$ の相関                                                               |
| ASME<br>B. P. Code<br>Sec. III         |      | $T_{NDT} - 60 \approx \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{t_{35\text{ mils}}} \\ \text{および} \\ \sqrt{t_{r50}} \end{array} \right. (^{\circ}\text{F})$<br>$\sqrt{t_{35\text{ mils}}}$ : 横断断面が35 mils ( $\approx 0.89\text{ mm}$ ) となる温度<br>$\sqrt{t_{r50}}$ : 吸収エネルギーが50 ft-lb となる温度 | $T_{NDT} - 33.3 \approx \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{t_{35\text{ mils}}} \\ \text{および} \\ \sqrt{t_{r68}} \end{array} \right.$<br>$\sqrt{t_{r68}}$ : 吸収エネルギーが68 J となる温度 | Reference Intensity Factor, $K_{IR}$ を求める場合の便法                                                                                                  |
|                                        |      | $K_{IR} = 1.223 \exp[0.0145(T - NDT + 160)] + 26.777$<br>$K_{IR}$ in $\text{ksi}\sqrt{\text{in}}$                                                                                                                                                                              | $K_{IR} = 42.497 \exp[0.0145 \times ((T - NDT)1.8 + 160)] + 930.45$                                                                                                      |                                                                                                                                                 |

## SI Unit への換算

### 応力拡大係数

$$\text{N}/\text{mm}^{3/2}$$

$$\text{kgf}/\text{mm}^{3/2}$$

$$\text{ksi}\sqrt{\text{in}}$$

$$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$$

$$1$$

$$0.10197$$

$$0.028779$$

$$0.031623$$

$$9.80665$$

$$1$$

$$0.28222$$

$$0.310114$$

$$34.748$$

$$3.5432$$

$$1$$

$$0.010988$$

### エネルギー

$$\text{J}$$

$$\text{kgf}\cdot\text{m}$$

$$\text{ft}\cdot\text{lb}$$

$$1$$

$$0.10197$$

$$0.737562$$

$$9.80665$$

$$1$$

$$7.23301$$

$$1.35582$$

$$0.13826$$

$$1$$

### 5.3 脆性亀裂の伝播停止特性に関するもの

#### 5.3.1 伝播停止特性値（破壊靱性 $K_{Ic}$ 値）の温度依存性

ニニでは造船規格の母材し方向について収集した標準二重引張試験、ESSO 試験及び一部大型伝播試験（板幅<sup>(13), (22)</sup> 1.5~2 m）によって得られた亀裂伝播停止破壊靱性値を提示する。実際のデータは全て NK 規格のものであり、これらのデータを NK 規格の各グレード毎に分類して表 5.3.1.1 ~ 5.3.1.6 に示す。表中 AR は左延のまま、N は焼ならし、D.T は標準二重引張試験片、大型は大型亀裂伝播試験片（板厚 1.5~2 m）を表わしている。また、 $K_0$ 、 $T_0$  は一般によく行なわれるアレニウス型の表示式  $K_{Ic} = K_0 \exp(-T_0/T)$ 、ここで  $T$  は絶対温度、 $K_0$  は整理した時の係数であり、決定係数は上式で直線回帰した時の直線式とデータとの一致の度合を表わしており、1 に近い程データとの一致が良い。 $K_0$ 、 $T_0$  の計算は鋼種、板厚、熱処理、試験片形状等のファクターを考慮し、例えばこれらの 4 つのファクターが同じものは全てまとめて直線回帰した。次に表 5.3.1.1 ~ 5.3.1.6 で得られた  $K_0$ 、 $T_0$  をもとに、各鋼種について図 5.3.1.1 ~ 5.3.1.5 に示した。図中 KA 級と KD 級を比較すると、アレスター性能はやゝ後者が良く、当然のことながら KE 級では KD 級よりアレスター性能は向上している。また図 5.3.1.4 で示されるように、ニニで収集したデータを見る限り KD32 級は意外にアレスター性能が良好である。

一方  $K_{ca}$  と V シャルピーエネルギー遷移温度  $\sqrt{T_E}$  との  
相関について、WES 3003<sup>73)</sup>では次式が使用されている。

$$\frac{K_{ca}}{\sqrt{\pi}} = \begin{cases} 260 f(t) \exp \left\{ 3100 \left( \frac{1}{\sqrt{T_E} + 291} - \frac{1}{T + 273} \right) \right\} ; -18^\circ \leq \sqrt{T_E} \\ (310 + 2.75 \sqrt{T_E}) f(t) \exp \left\{ (3505 + 25.5 \sqrt{T_E}) \left( \frac{1}{\sqrt{T_E} + 291} - \frac{1}{T + 273} \right) \right\} ; -58^\circ \leq \sqrt{T_E} < -18^\circ \\ 150 f(t) \exp \left\{ (2986 + 13.6 \sqrt{T_E}) \left( \frac{1}{1.13 \sqrt{T_E} + 299} - \frac{1}{T + 273} \right) \right\} ; \sqrt{T_E} < -58^\circ \end{cases} \quad (5.3.1.1)$$

ここで、 $T: ^\circ\text{C}$

$$f(t) = \begin{cases} 1 - 0.05(t - 30) & ; t \leq 35 \text{ mm} \\ \frac{54}{65} - \frac{3t}{1300} & ; 35 < t \leq 100 \text{ mm} \end{cases}$$

(13)

また日本鉄鋼協会データシート分科会では造船規格を  
含めた軟鋼から高張力鋼までの広範なデータをもとに(5.3.1.1)  
式より相関性の良い次式が得られている。

$$K_{ca} = 1548.8 \exp \left\{ 10^{(3.488 + 0.0069 \sqrt{T_E} + 0.0055t)} \times \left( 0.00327 - \frac{1}{T + 273} \right) \right\} \quad (5.3.1.2)$$

ここで  $T: ^\circ\text{C}$

以上 2つの式を板厚 30 mm の場合について比較してみ  
ると 図 5.3.1.6 に示すように、 $\sqrt{T_E}$  が低くなるに従い、両者  
の差は大きくなり、要求  $\sqrt{T_E}$  は  $K_{ca}$  の増大と共に(5.3.1.2)式が  
厳しくなる。

### 5.3.2. 伝播停止特性(破壊靱性)に影響を及ぼす因子

鋼材およびその溶接部の脆性破壊伝播停止特性は、二重引張試験、ESSO試験などの大型脆性破壊伝播試験により計測され、伝播停止特性値はより大型試験結果の静的な破壊力学的解析により  $K_{ca}$  値として求められている。 $K_{ca}$  値に及ぼす支配的因子は温度の影響であるが、これについては前項を参照されたい。本項では、温度の他に伝播停止特性  $K_{ca}$  に無視し得ない影響を与える、(a) 板厚の効果、(b) 溶接残留応力の影響、(c) 試験系コンプライアンスの影響について述べることにする。

#### 5.3.2.1 板厚効果

脆性破壊伝播停止特性は、発生特性同様、一般に板厚が増加するに比例して低下するが、板厚効果の影響は発生特性以上に顕著であるとされている。これは板厚が増加することにより、(i) き裂先端部の三軸応力度の増加とともに、(ii) 脆性き裂の伝播は図5.3.2.1に示すように、板表面に生ずる shear lip を引きずる形で板中心を脆性き裂が進行することになるとされている。要言すれば、板厚中央は塑性拘束がきびしく、かつ、材質的にも脆い組織であることが多いため、板中央を脆性破壊が進行すが、板表面に生ずる shear lip を伴ってき裂が伝播するので、平均の伝播抵抗値は発生の場合以上に表面の影響を大きく受けるからである。

板表面の影響は、板厚が大であればその影響は小さい。そのため、伝播停止特性への板厚効果は薄い板厚領域で顕著なものとなる。

表5.3.2.1<sup>74)</sup>に、脆性破壊発生温度への板厚効果と比較した脆性破壊伝播停止温度の板厚依存性を示す。

伝播停止特性  $K_{ca}$  値の板厚依存性の定量的評価式は、次の5.3.3項で述べる現行 WES 3003<sup>73)</sup>における、シャルピー試験からの破壊靱性推定式中の板厚効果係数  $f(t)$  に集約された形で、一応完備されたものとなっている。前項で既述したとおり、 $K_{ca}$  の温度依存式はアレニウス型で次式の様に表現できる。

$$K_{ca}(t, T) = K_0 \exp(-k/T) \text{ ----- (5.3.2.1)}$$

一方 図5.3.2.2<sup>75)</sup>に一例を示すが、同一材から機械切削により種々の板厚に減じたものについての2重引張試験結果は、 $\log K_{ca}$  と  $1/t$  でプロットすると、線図が平行となることが知られている。これは(5.3.2.1)式の表示で板厚は  $K_0$  により影響を与えることを意味し、

$$K_{ca}(t, T) = f(t) K_0' \exp(-k/T) \text{ ----- (5.3.2.2)}$$

と書けることとなる。(5.3.2.2)式の  $f(t)$  が板厚効果係数である。

$f(t)$  の具体的表示式は、現行 WES 3003では、その前身の旧 WES 136 制定以降の板厚 50 mm 以上の鋼板の伝播特性値のデータ蓄積を考慮して現在、形となっているが、板厚効果係数  $f(t)$  の決定の

ために、旧 WES 136 で取り入れた基本的形態は維持されている。すなわち、 $K_0'$  とは板厚 30mm の  $K_0$  をとく。

$$f(t) = K_0(t) / K_0(30) \text{ ----- (5.3.2.3)}$$

として  $f(t)$  を決定 (旧 WES 136 では後述のような実験的方法にあつた) するわけである。さらに得られた  $f(t)$  から任意板厚の 2 重引張試験結果を板厚 30mm に換算し、プレスリッチャルヒ-遷移温度  $pT_c$  との相関からえられる次式もそのまま現行 WES で踏襲されている。

$$\begin{aligned} K_{ca}(30, pT_c) &= \{ K_0(t) / f(t) \} \exp(-k/pT_c) \\ &= K_0(30) \exp(-k/pT_c) \text{ ---- (5.3.2.4)} \\ &= \begin{cases} 260 & : 273^\circ K \leq pT_c \\ 260 + 2.75 pT_c & : 233^\circ K \leq pT_c \leq 273^\circ K \\ 150 & : pT_c \leq 233^\circ K \end{cases} \end{aligned}$$

ここに、

$$k = \begin{cases} 3100 & : 273^\circ K \leq pT_c \\ 3100 + 22.5 pT_c & : 233^\circ K \leq pT_c \leq 273^\circ K \text{ (5.3.2.5)} \\ 2680 + 12 pT_c & : pT_c \leq 233^\circ K \end{cases}$$

板厚効果係数  $f(t)$  を決定するに際しては、旧 WES 136 では、板厚 50mm 以下の材料について機械切削によって減厚した各種板厚の 2 重引張試験結果から、**図 5.3.2.3** に示すように、(5.3.2.3) 式の  $f(t)$  と板厚の関数とで求めた。この際得られた板厚 35mm 以下の板厚範囲の  $f(t)$  は、現行 WES 3003 でも踏襲されている。板厚 50mm 以上の  $f(t)$  を求めるにあたっては、次の (5.3.2.6.) 式が成

立するので、これから (5.3.2.7) 式のように  $f(t)$  が定義できる。

$$\begin{aligned} K_{ca}(t, T) &= K_{ca}(30, pT_c) f(t) \exp\left\{k\left(\frac{1}{pT_c} - \frac{1}{T}\right)\right\} \\ &= K_{ca}(t, pT_c) \exp\left\{\left(\frac{1}{pT_c} - \frac{1}{T}\right)\right\} \end{aligned} \quad (5.3.2.6)$$

$$f(t) = K_{ca}(t, pT_c) / K_{ca}(30, pT_c) \quad \text{-----} (5.3.2.7)$$

2重引張試験とプレス・タッチシャルピーから得られる  $pT_c$  を用いて。

任意板厚の  $K_{ca}(t, pT_c) \exp$  を求め、 $pT_c$  と (5.3.2.4), (5.3.2.5) 式から求める

$K_{ca}(30, pT_c)_{cal}$  の値を (5.3.2.7) 式に代入して。図 5.3.2.4 に示す

$f(t)$  の線図がえられる。図 5.3.2.3, 図 5.3.2.4 より伝播停止

特性  $K_{ca}$  値に及ぼす板厚効果の定量的評価式は、結局、WES3003

では、両図から板厚 100 mm まで適用可能な次式の形に定めら

れている。

$$\begin{aligned} K_{ca}(t, T) &= f(t) K_{ca}(30, pT_c) \exp(k/pT_c) \exp(-k/T) \\ f(t) &= \begin{cases} 1 - 0.05(t - 30) & t \leq 35 \text{ mm} \\ \frac{54}{65} - \frac{3}{1300} t & 34 \text{ mm} \leq t \leq 100 \text{ mm} \end{cases} \quad (5.3.2.8) \end{aligned}$$

### 5.3.2.2 溶接残留応力の影響

脆性破壊伝播停止特性に及ぼす溶接残留応力の影響は、本質的には溶接構造部材内を脆性き裂が進展する場合の脆性き裂の伝播経路に及ぼす残留応力の影響の問題であると言えよう。過去20年来の研究より溶接残留応力のき裂伝播経路へ及ぼす影響に関しては、大要次の2点が実験的に明らかにされている。

- (i) 一般に脆性き裂は最大主応力に直角な方向に伝播する。溶接残留応力が存在すると、主応力方向は乱されて、そのき裂伝播方向は曲げられる。
- (ii) 溶接構造部材内の母材と溶接部(ボンド)の靱性に大きなギャップがある場合には、残留応力が存在しても特定の条件が満足されれば、溶接部を伝播してきた脆性き裂は曲げられることなく、溶接部を直進することがある。

上記の(i) (ii)の結論は、針め継手型、ないしは溶接継手部大型脆性破壊試験(ESSO試験、2重引き張試験、内部切欠型大型伝播試験)から得られ、溶接構造物の脆性破壊伝播停止設計指針に多大の影響を与えるものである。以下に、過去の実験を例証しつつ、この点について若干の説明を行う。

<sup>76)</sup>  
 図 5.3.2.5 に 木原らの 斜め継手 ESSO 試験の結果の 1 例を示す。  
 直進してきた脆性き裂は、それに対して 斜め溶接継手が 前方に存在  
 した場合、外部応力と内部応力としての溶接残留応力の存在の結果、  
 最大主応力の方向へき裂経路は曲げられる。これに対して、SR 処理と  
 溶接残留応力を除去した場合、脆性き裂は直進伝播する。木原らの実験  
 では、斜め継手の角度 (図中の  $\theta$ ) を  $15^\circ$  から  $60^\circ$  まで変化させた実験  
 により、前述の (i) の結論をえたわけであるが、 $\theta = 0^\circ$  で ESSO 試験  
 片の切欠位置を溶接部に与えた場合にも、やはり、<sup>77)</sup> 図 5.3.2.6 に示  
 ように、残留応力の影響によりき裂は多少曲りつつ母材部を伝播  
 し易い。図 5.3.2.7 は、機械的残留応力除去を行った溶接継手試  
 験片について ESSO 試験を行い、溶接残留応力の影響を軽減して  
 脆性亀裂を溶接継手ボンド部に伝播させ、継手ボンド部の脆性  
 破壊伝播停止特性値  $K_{ca}$  を求めた 萩原<sup>78)</sup> の実験結果である。  
 同図には、5.3.3 項に後述する 母材の  $K_{ca}$  のシャルピー試験から  
 の WES 推定式をボンド部に適用した 線図を示しているが、推定値と  
 実験値は大略一致している。この実験は、残留応力のき裂伝播  
 経路への影響とともに溶接部の  $K_{ca}$  測定には残留応力除去が必要な事を  
 示している。図 5.3.2.5 から 7 までの実験結果を要約すれば、溶接残留応力の  
 脆性破壊伝播への影響は、上述の (i) に集約され、破壊制御設計上  
 は溶接残留応力が存在する限り、溶接構造においては、たとえ溶接部

の停止靱性値  $K_{IC}$  が母材のそれと、相対的に小さくとも、き裂は結局は母材を伝播する<sup>21)</sup>。母材の  $K_{IC}$  のみを考慮すれば、という結論がえられる。

溶接残留応力のき裂伝播経路に及ぼす影響と、

その知見にもとづく破壊制御設計指針は、大要、上記の内容に及ぶが、たとえば、大入熱溶接継手のとき母材と溶接継手部(ボルト部)の間に大きな靱性ギャップが存在する場合とは、冒頭(ii)で述べた如く溶接残留応力が存在しても、継手から発生した脆性き裂が靱性最劣化部を伝播する<sup>22)</sup>こともあることが、内部切欠型 ESS の試験、三重引張試験等を用いた SR147 研究<sup>22)</sup>によって示された。図 5.3.2.8~9 は、縦軸に負荷応力  $\sigma_{AP}$  と降伏応力  $\sigma_Y$  の比、横軸に靱性劣化度合として母材とボルト部の吸収エネルギーの比あるいは遷移温度の差を取って整理した結果である。継手から発生した脆性き裂が、その後の伝播経路として母材を選ぶか、ボルトを選ぶかの定量的識別式は得られていないが、ボルト沿いの伝播がおこりうる限界線が図の如くに得られている。

$$\sigma_{AP}/\sigma_Y \geq \frac{\sqrt{VE_B}}{\sqrt{VE_M}} - 0.35 \text{ ----- (5.3.2.9)}$$

$VE_B$  : 溶接ボルト部のシャルピーエネルギー値

$VE_M$  : 母材のシャルピーエネルギー値

あるいは、

$$\sigma_{AP}/\sigma_Y \geq -\frac{1}{90} (VT_{RSB} - VT_{RSM}) + 0.72 \text{ -- (5.3.2.10)}$$

$VT_{RSB}$  : 溶接ボルト部破面遷移温度

$VT_{RSM}$  : 母材破面遷移温度

母材と溶接継手の靱性ギャップが大きい大入熱溶接継手の場合、継手から発生した脆性き裂は、溶接ビードと大型試験の荷重方向がほぼ直角の時には、その後の伝播経路として、靱性最劣化部が選ばる可能性はあるが、

図 5.3.2.10~12 に示すように、そのような継手に対して、斜めに交差しようとする脆性き裂は、交差角（図 5.3.2.5 の  $\theta$  に同じ）が小さくとも継手を横切る角度は溶接残留応力の影響でかなり大きくなり、伝播経路として靱性最劣化部が選ばる可能性は小さい。さらに、

図 5.3.2.13 に示すように、このようなボルト脆化程度の著しい継手で脆性き裂が靱性最劣化部としてのボルト部を伝播して停止したとしても、その見掛け上の（巨視的）伝播停止特性値  $K_{ca}$  は母材とほぼ同じ値となる。この事実を説明するため、ボルト部を伝播する脆性き裂は、溶接残留応力のため、まず母材方向に流れ、母材境界で停止し、ボルト部内でのき裂の再発生が伝播の必要条件であり、再発生の停止が巨視的な伝播停止

であるとするモデルが提案されている。いずれにせよ冒頭 (ii) で述べたような場合においても、巨視的伝播停止特性  $K_{ca}$  が母材と同等となるという事実は、破壊制御設計の観点からすれば、

(i) の事実とともに、溶接残留応力が存在する場合、脆性破壊伝播停止にとって最も重要なパラメータは母材の伝播停止特性値  $K_{ca}$  であるということとなる。

### 5.3.2.3 試験系コンプライアンスの影響

2重引張試験や ESSO 試験で得られる脆性破壊伝播停止特性値  $K_{ca}$  は、通常、脆性き裂伝播中、荷重が一定に保たれているとして（定荷重条件）計算されているが、実際に破壊伝播中の荷重変化を動的に計測すると、<sup>80)</sup>図 5.3.2.14 に示すように、荷重はき裂伝播中一定ではなく落下する。荷重落下曲線の様相は、

(i) 試験の荷重条件（定荷重条件か、定変位条件かあるいはその中間の一般荷重条件かという条件）を定める試験機剛性

(ii) 試験片寸法

上記 (i) 及び (ii) の試験系コンプライアンスの影響を受ける。

金沢らは<sup>81)</sup>図 5.3.2.15 に示す静的なね模型を用いた解析及び試験片寸法、

試験機剛性を系統的に変えた脆性破壊伝播試験による

実験研究により、一般荷重条件下の脆性き裂伝播に伴う荷重

変化の式、及び破壊伝播停止特性  $K_{ca}$  の式をた。次の (5.3.2.11), (5.3.2.12)

式により、試験系コンプライアンスの破壊伝播停止特性への影響は、

定量的に評価しうる。荷重変化の式は、

$$\frac{P_i(a)}{P_i^0} = \frac{1}{1 + \frac{\pi\alpha}{2\lambda} \int_0^a [K_{f,c}]^2 dc} \quad \text{----- (5.3.2.11)}$$

ここに  $P_i(a)$  : き裂長さ  $a$  の時の荷重  
 $P_i^0$  :  $a=0$  の時の荷重

$\lambda = L/B$  (図 5.3.2.16 参照)

$c = a/B$  (図 5.3.2.16 参照)

$\alpha$ : 試験コンプライアンスに決定する荷重条件パラメータ

定荷重条件で  $\alpha = 0$

定変位条件で  $\alpha = 1$ .

一般荷重条件で  $0 < \alpha < 1$

$[K_{f.e}]$ : 定荷重条件での  $K$  値。図 5.3.2.16 参照

求める長方形板の応力拡大係数に等しい

石田の数値解<sup>82)</sup>で  $P_i$  に対応する応力  $\sigma_i$  として、

$$[K_{f.e}] = \frac{K}{\sigma_i \sqrt{\pi B}} = \sqrt{\frac{a}{B}} \cdot F_T$$

また、一般荷重条件下での  $K_{ca}(g.e.)$  は、

$$K_{ca}(g.e.) = \sigma_i \sqrt{\pi a_f} F_T \left( \frac{P_i}{P_o} \right) \text{ ----- (5.3.2.12)}$$

ここに、 $a_f$ : き裂停止時のき裂長さ

$\frac{P_i}{P_o}$ : (1)式より  $a = a_f$  として求める値

図 5.3.2.17 に示すように、(5.3.2.11)式で  $\alpha = 1$  とした定変位条件下での荷重変化を試験片縦横比  $\lambda$  をパラメータとして計算すると、 $\lambda$  が小さく、き裂長さの板幅に対する比が大きくなるにつれて、荷重低下は著しいことがわかる。

$\lambda, \alpha$  を変えた諸コンプライアンス条件下での実験結果を (5.3.2.11), (5.3.2.12) 式をもととして、荷重条件とする  $K_{ca}$  を修正し、検討した結果、以下の実用上有用な結論が上記、全沢らの研究<sup>81)</sup>から得られている。

試験片縦横比の大きい試験片 ( $\lambda \geq 4.0$ ) を用い、かつき裂長さの板幅に対する比を小さくおさえるならば、寸法効果、荷重条件の影響はほとんど現れない。それ故、脆性破壊伝播停止特性  $K_{ca}$

を通常の定荷重条件下での式

$$K_{ca} = \sigma_c \sqrt{\pi a_f} F_T \text{-----} (5.3.2.13)$$

から求めるためには、 $\lambda \geq 4.0$  の試験片を用い、相対亀裂長  $a/b$

を小さくすることが望ましい。

### 5.3.3 シャルピ-試験結果からの伝播停止特性値 (破壊靱性値) の推定法

WES 3003 に従えば V 1/4 シャルピ-試験のエネルギー-遷移温度,  $vTrs$  から式を用いて 任意の温度,  $T$  と板厚,  $t$  における 破壊靱性  $K_{ca}(T, t)$  を推定することが出来る<sup>73)</sup>。

$$K_{ca}(T, t)/\pi^{1/2} = \left\{ \begin{array}{l} 260 f(t) \exp \left\{ 3100 \left( \frac{1}{pTc + 273} - \frac{1}{T + 273} \right) \right\} \\ \quad : -18^\circ\text{C} \leq vTrs \\ \\ (260 + 2.75 pTc) f(t) \exp \left\{ (3100 + 22.5 pTc) \right. \\ \quad \times \left( \frac{1}{pTc + 273} - \frac{1}{T + 273} \right) \left. \right\} \\ \quad : -58^\circ\text{C} \leq vTrs \leq -18^\circ\text{C} \\ \\ 150 f(t) \exp \left\{ (2680 + 12 pTc) \left( \frac{1}{pTc + 273} - \frac{1}{T + 273} \right) \right\} \\ \quad : vTrs \leq -58^\circ\text{C} \end{array} \right.$$

----- (5.3.3.1)

$$f(t) = \left\{ \begin{array}{ll} 1 - 0.05(t - 30) & : t \leq 35 \text{ mm} \\ 54/65 - 3t/1300 & : 35 \text{ mm} < t \leq 100 \text{ mm} \end{array} \right\} \text{---} (5.3.3.2)$$

$$pTc = \left\{ \begin{array}{ll} vTrs + 18 & : -58^\circ\text{C} \leq vTrs \\ 25.5 + 1.13 vTrs & : -196^\circ\text{C} \leq vTrs \leq -58^\circ\text{C} \\ vTrs & : vTrs \leq -196^\circ\text{C} \end{array} \right\} \text{---} (5.3.3.3)$$

$$v_{Trs} = v_{Tre} \quad \text{--- (5.3.3.4)}$$

以上の相関は本質的には フォルスノッチシャルピー試験の破面遷移温度  $pT_c$  と  $K_{Ic}(T, t)$  の相関に属するもので、太字かき之を、 $K_{Ic}(pT_c, t)$  として規定<sup>(\*)</sup>であることを示している。ただし フォルスノッチシャルピー試験は一般的でないので、 $pT_c$  と  $v_{Trs}$  および  $v_{Tre}$  の相関を用いて  $v_{Tre}$  から  $K_{Ic}$  を推定できる<sup>(\*)</sup>ようになっている。**図 5.3.3.1** に、 $v_{Trs}$  から  $K_{Ic}$  を推定する際のばうつこの例と遷移温度の比較を示す。 $pT_{c.1}$  は (5.3.3.3) 式を用いて  $v_{Trs}$  から求めた値である。 $pT_{c.2}$  は ESSO 試験の  $K_{Ic}$  値 (5.3.3.1) 式により、 $T = pT_{c.1}$  として得られる  $K_{Ic}(pT_{c.1}, t)$  により決まる温度である。

(\*)  $pT_c$  と  $K_{Ic}$  の相関規定というものは統計的相関であるが、この相関係数が導かれた背景としては<sup>83)</sup>、

- (1) フォルスノッチによりノッチ底から脆性亀裂が発生し、これがシャルピー試験片の境界効果(表皮効果)で停止する。
- (2) 停止した時の亀裂形状から  $K$  値を計算することは難しいが、50% 脆性破面の形状が鋼種によりそれぞれ変わらなければ、その時の  $K$  値、すなわち  $pT_c$  における  $K_{Ic}$  もほぼ一定となるであろう。

ところで上記の相関から求めた  $K_{Ic}$  は、時としてかなりの誤差を示すが、その原因は以下に述べる点で理想的なモデルと離れているからであると考えられる。

- (1) 多くの圧入、圧入鋼では フォレス ノッチ を与え、なおかつ ノッチ底から延性亀裂を生ずる<sup>84)</sup>。
- (2) 板厚方向に靱性の分布がある時は、板厚方向のどの位置から シャルピー試験片をとり出すかが問題となる。
- (3) 軟鋼のように 加工硬化の大きい材料では、フォレス ノッチによる塑性ひずみ域が ノッチ全断面を占める。この時は 加工ひずみを受けた鋼材の停止特性を測る こととなる<sup>79)</sup>。

さらに  $PTC$  と  $VTIS$  は 平均  $18^{\circ}\text{C}$  の差があるが、鋼材によっては数拾度の差を示す。これは 前者が 脆性亀裂の停止性能を表わすのに対し、後者は延性亀裂から 脆性亀裂への転化 という 多分に発生特性的な性能にも支配されているからであると考えられる<sup>79)</sup>。

#### 5.3.4 クラックアレスター能力の評価例

脆性亀裂の伝播停止に関する力学的条件、すなわち挙動定量化の基礎式ないしその考え方については、既に、2.3節“脆性破壊伝播停止の取り扱い方”で詳しく述べられている。また、今までに提唱された考え方やその変遷についても、2.3節で触れられている。

本節では、主として脆性亀裂の伝播停止挙動を評価した事例、あるいは予測した事例や特性指標の具体的な値についての紹介に力点を置いて記した。

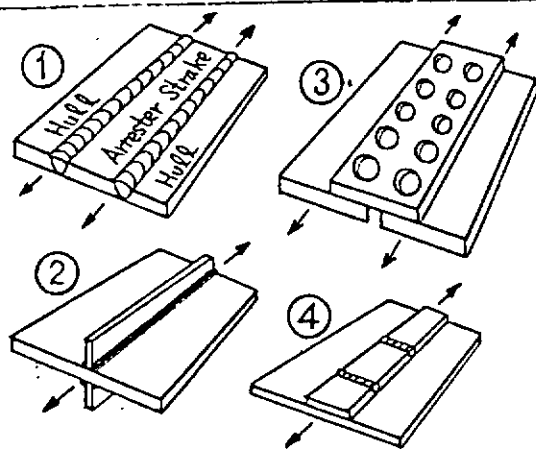
まず、クラックアレスターの形式について触れる。形式としては、以下のものが知られている。

① インサートプレート型 (突合せ溶接型)

② スチフナ型

③ リベット シーム型

④ パッチ型



このうち①は材質的に優れた鋼板を部分的に挿入する方法であり、②から④は幾何形状による力学的効果として亀裂停止を図る方法である。

2.3節でも述べられたように、クラックアレスター能力の(相対強度)評価法として表5.3.4.1に示す方法が知られている。実験室内の小さな伝播再現試験片での動的現象と、これは一回り大きくて実構造体により近い大形試験片での実験結果を、データベースに工学的に換算する手法である。

いずれの相対強度評価法においても材料抵抗値(停止破壊靱性)は、温度勾配型標準伝播試験を行ない、図5.3.4.1(a)のように特性化する。同図中の亀裂停止靱性  $K_{ca}$  は、初期応力  $\sigma_0$  と停止亀裂長さ  $C_{ARREST}$  を用いて(静的な)  $K$  値算定式から求められる。図5.3.4.1(a)と同様の表示を、船体用軟鋼板(板厚20mm)のA級鋼とE級鋼に対して比較表示したものが図5.3.4.1(b)<sup>9)</sup>である。

次に各評価 procedure の相違を、インサートプレート型アレスターモデル(図5.3.4.2)を想定して述べる<sup>85), 86)</sup>。ただし、アレスターモデルは、伝播方向には温度一定であり、一様引張りを受けるものとする。

“ $C_{eff}$  の考え方”に従えば、力学パラメータである  $K$  値は初期応力  $\sigma_0$  と等価亀裂長さ  $C_{eff}$  によって決まる。等価亀裂長さ  $C_{eff}$  は、実際の亀裂長さ  $C$  を用いて図5.3.4.3(または図2.3.4)から求められる<sup>85), 86)</sup>。

また、“ $K_{eff}$  の考え方”では、塑性波速度の考察から著しく長大化した亀裂の  $K$  値は際限なく大きくはならず飽和する点が考慮される。実際の亀裂長さ  $C$  と初期応力  $\sigma_0$  で決まる  $K$  値を用いて、 $K_{eff}$  が図5.3.4.4(または図2.3.5)で与えられる<sup>87)</sup>。

$K_{eff}$  の考え方は、スチフナ型アレスター他にも適用できる。すなわち、 $K$  値は

初期応力  $\sigma_0$  を一定として漸次亀裂長さ  $C$  が大きくなった場合を仮想して、図5.3.4.5に示されるような構造的アレスト効果を静的に求めれば良い。具体的な解法としては、

- (1) 汎用構造計算(FEM)プログラムを利用する方法  $\times$
  - (2) 単純な境界値問題の理論解を重ね合せて求める方法
- などが考えられる。

亀裂が停止するか否かは、亀裂が伝播した状況を仮想して力学的パラメータ  $K$  (あるいは  $K_{eff.}$ ) と停止破壊靱性  $K_{ca}$  の大小比較により判定される。例として、“ $C_{eff.}$  の考え方”によりインサートプレート型アレスターでの亀裂挙動を予測した結果を図5.3.4.6に示す。<sup>85), 86)</sup> また、“ $K_{eff.}$  の考え方”によりスチフナ型アレスターでの亀裂挙動を予測した例が、図5.3.4.7に示されている。<sup>90)</sup> 図5.3.4.7の構造的アレスト効果の具体的な解法<sup>88), 89), 90)</sup> は、前述の(2)の方法によっている。

次に、動的計算ベースによるクラック伝播停止挙動の評価例等について触れる。動的計算ベースの評価法では、2.3節で詳述されているように、エネルギー平衡論から導かれる材料特性値を用いる。すなわち、亀裂の拡大に伴い系から散逸していくエネルギー（≒破面形成のためになされる仕事）を、刻々の動的平衡を追跡しながら（有限要素法差分法などにより）数値的に求めて材料抵抗値の指標化に用いる。すなわち、(2.3.1)式および(2.3.10)式から求められる  $K_D$  である。

$K_D$  は、動的破壊靱性 (dynamic fracture toughness,  $\text{kgf}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$ ) と称されており、温度 $\times$ 亀裂速度（および板厚 $\times$ 種々の脆化因子）のみに支配される。試験片形状や負荷様式にはよらない値である（図2.3.6および図5.3.4.8(a)<sup>91)</sup>, (b)<sup>75)</sup>）。船体用軟鋼板についてA級鋼とE級鋼の動的破壊靱性値  $K_D$  を相対比較的に表示したものが図5.3.4.9である<sup>9)</sup>。またこの動的エネルギー平衡の考え方に従って、平板の直交交差部モデルでの亀裂速度変化および停止の有無を検討した例を図5.3.4.10に示す。<sup>9)</sup>

最後に、船体用軟鋼板A級鋼の板交差部での亀裂停止性能を比較実験的に調べた結果を図5.3.4.11に示す。<sup>75), 92)</sup>

## 参考文献

- 1) P.C. Paris, Proc. 10th Sagamore Army Material Research Conf. (1964), pp. 107~132
- 2) 豊貞, 部分片振領域における疲労亀裂伝播速度について, 日本造船学会論文集第133号(昭.48.6)
- 3) R. Roberts and E. Erdogan, Trans. ASME, Ser. D 89-4, 885 (1967)
- 4) W. Elber, ASTM, STP 486 (1971)
- 5) 越賀, 川原, 疲労き裂伝播に着目した設計基準に関する二, 三の考察, 日本造船学会論文集第133号(昭.48.6)
- 6) 北川, 日本機械学会誌 75巻 642号(1972), p. 1068
- 7) T.R. Gurney, IIW Doc. No. XIII-890-78
- 8) 田中, Int. J. Fracture, Vol. 15 No. 1 (1979)
- 9) 日本造船研究協会 第169研究部会, 船体構造の破壊管理制御設計に関する研究, 研究資料 No. 326 (昭.55.3)
- 10) 永井, 岩田, 矢島, 山本, 藤本, 軟鋼の塩水中疲労き裂伝播速度に及ぼす荷重繰返し速度, 平均応力, 温度および陰極防食の影響について, 日本造船学会論文集 第140号 (昭.51.12)
- 11) 永井, 岡本, 日本造船学会 溶接研究委員会 第一分科会 資料 1-416-77
- 12) 川原, 岩崎, 浅野, OTC 3423, Offshore Tech. Conf. (1979)
- 13) 日本鉄鋼協会標準化委員会 デタシト部会, 破壊靱性デタシト分科会資料(昭.55)
- 14) 日本海事協会, 鋼船規則集(昭.55)
- 15) 日本溶接協会 鉄鋼部会 技術委員会 TM委員会, 脆性破壊発生特性に基づく鋼板の材質判定規準の確立に関する共同研究 — TM委員会共同研究 総合報告書 — (昭.50.11)
- 16) 日本造船研究協会 第3基準研究部会, 危険物の特性および運搬船の特殊設備に関する調査研究報告書, 研究資料 No. 78R (昭.54.3)

- 17) 日本溶接協会鉄鋼部会技術委員会JI委員会, WES 3003 (IB WES 136) G種改訂案(昭.52.2)
- 18) 矢島, 多田, じん性を考慮した船殻材の選定, 三菱重工技報 Vol.17 No.5 (昭.55.9)
- 19) 金沢, 町田, 豊貞, 栗飯原, 限界COD値に及ぼす切欠尖鋭度の影響, 日本造船学会論文集 第148号 (昭.55.12)
- 20) 日本造船研究協会第8基準研究部会, LNG運搬船の安全基準に関する調査研究報告書(その1) (昭.51.3)
- 21) 日本溶接協会鉄鋼部会技術委員会BE委員会, 溶接構造用鋼板のポンド脆化に関する共同研究—BE委員会共同研究総合報告書— (昭.50.7)
- 22) 日本造船研究協会第147研究部会, 船体用高張力鋼板大入熱溶接継手の脆性破壊強度評価に関する研究, 日本造船研究協会報告第87号 (昭.53.2)
- 23) 日本造船研究協会第3基準研究部会, 危険物の特性および運搬船の特殊設備に関する調査研究報告書, 研究資料No.44R (昭.51.3)
- 24) 金沢, 町田, 糸賀, 土屋, COD仮説による脆性破壊発生特性の研究, 日本造船学会論文集第131号 (昭.47.6)
- 25) 越賀, 秋山, 岩崎, 限界COD値の安全性および $\rho_c^+$ 値決定法について, 日本造船学会論文集第134号 (昭.48.12)
- 26) 豊貞, 曲げCOD試験片における Notch Acuity 効果の定量化に関する一考察, 日本造船学会論文集第143号 (昭.53.6)
- 27) 池田, 薦田, 極厚板のせい性破壊に関する板厚効果, 神戸製鋼技報 Vol.22 No.2
- 28) 萩原, 三村, 弾塑性破壊力学による破壊靱性に及ぼす板厚効果, 鉄と鋼 Vol.65 No.2 (1979), pp.58-66
- 29) 日本造船研究協会第111研究部会, 船体用鋼板の靱性におよぼす冷間加工と溶接の重畳効果および加熱加工条件の影響に関する研究, 研究資料No.128 (昭.46.3)

- 30) 木原, 栖原, 黒川, 片岡, 修行, 中島, 矢島, 深江, 鋼板の靱性に及ぼす組立工程における加工の影響(その2) — 線状加熱による熱塑性変形ならびに局所的靱性劣化について —, 日本造船学会論文集 第133号(昭.48.6)
- 31) 木原, 栖原, 黒川, 片岡, 修行, 中島, 矢島, 深江, 鋼板の靱性に及ぼす組立工程における加工の影響(その3) — 鋼板の靱性に及ぼす線状加熱条件の影響について —, 日本造船学会論文集 第133号(昭.48.6)
- 32) 金沢, 町田, 宮田, 拘束部材の脆性破壊発生特性について, 日本造船学会論文集 第129号(昭.46.6)
- 33) 日本造船研究協会第119研究部会, 大型鉦石運搬船の船体構造材料に関する研究 報告書
- 34) 佐藤, 豊田, 阪野, 豊貞, 塑性拘束が脆性破壊発生におよぼす影響と軟質継手の脆性破壊強度に関する研究, 日本造船学会論文集 第132号(昭.47.12)
- 35) 日本溶接協会, SJ委員会報告書(第2報)(昭.49.3)
- 36) 酒井, 阪野, 混合モード状態における脆性破壊発生に関する考察, 日本造船学会論文集 第139号(昭.51.6)
- 37) 越賀, 田中, 栗田, 溶接構造物の脆性破壊発生に及ぼす応力除去焼鈍の影響, 日本造船学会論文集 第129号(昭.46.6)
- 38) 矢田, 酒井, 分布応力を受ける不連続構造物に生じる脆性破壊の発生に関する一考察, 日本造船学会論文集 第123号(昭.43.6)
- 39) 越賀, 予荷重が脆性破壊事故防止に果たす役割のDugdale 模型による機構の考察, 日本造船学会論文集 第127号(昭.45.6)
- 40) 金沢, 三村, 町田, 宮田, 萩原, 脆性破壊発生のクライテリアに関する考察, 日本造船学会論文集 第129号(昭.46.6)
- 41) Y. Akita, T. Yada, K. Sakai, N. Iino, COD Approach for Evaluation of Brittle Fracture Initiation in Residual Stress Field, The 1st Int. Symp. of the JWS, Vol.3 (1971)

- 42) 日本溶接協会鉄鋼部会技術委員会 WSD委員会, 脆性破壊発生に対する溶接欠陥の許容判定基準 (解説) — WSD委員会総合報告書 — (昭.51)
- 43) 佐藤, 寺崎, 構造用材料の溶接残留応力分布におよぼす溶接諸条件の影響, 溶接学会誌 第45巻 第2号 (1976), pp.150-156
- 44) W.O. Shabbits, HSST Program Technical Report, No.13 (1970)
- 45) S.T. Rolfe, Ship Structure Symposium, Washington D.C., (1975)
- 46) 日本造船研究協会 第3基準研究部会, 危険物の特性および運搬船の特殊設備に関する調査研究報告書, 研究資料 No.68.R (昭.53.3)
- 47) 木原, 金沢, 町田, 早野, 畑中, 高圧力, Vol.8 No.6 (1970)
- 48) 池田, 前中, 佐久間, 溶接学会誌, Vol.38 No.8 (1969)
- 49) 正岡, 高瀬, 池田, 佐々木, 日本学術振興会第129委員会資料 (1976)
- 50) F.M. Burdekin, M.G. Dawes, G.L. Archer, F. Bonoma and G.R. Egan, Brit. Welding Journal, 15 (1968)
- 51) K. Satoh, M. Toyoda, Y. Kawaguchi and K. Arimochi, IIW Doc. IX-974-76, X-804-76 (1976)
- 52) H. Kihara, K. Masubuchi, K. Iida and H. Oba, IIW Doc. X-218-59 (1959)
- 53) 吉識, 金沢, 町田, 多田, 山内, 永元, 矢島, 鋼材の脆性破壊発生特性におよぼす疲労の影響, 造船協会論文集 第121号 (昭.42.6)
- 54) M.L. Williams, Analysis of Brittle Behavior in Ship Plates, ASTM STP 158 (1954)
- 55) J. Hodgson and G.M. Boyd, Brittle Fracture in Welding Ship, Trans. Roy. Inst. Nav. Arch., 100 (1958)
- 56) S.T. Rolfe and S.R. Novak, Slow-Bend K<sub>IC</sub> Testing of Medium-Strength High-Toughness Steels, ASTM STP 463 (1970)

- 57) J. M. Barson and S. T. Rolfe, Correlations Between  $K_{IC}$  and Charpy V-Notch Test Results in the Transition-Temperature Range, ASTM STP 466 (1970)
- 58) R. H. Sailors and H. T. Corten, Relationship Between Material Fracture Toughness Using Fracture Mechanics and Transition-Temperature Tests, ASTM STP 514 (1971)
- 59) 伊藤, 田中, 佐藤, 溶接ボンド部表面切欠からの脆性破壊, 日本造船学会論文集 第131号 (昭.47.6)
- 60) 田中, 野田, 脆性破壊発生の  $K_{IC}$  に及ぼす板厚の効果および  $K_{IC}$  と  $vE$  の相関についての考察, 溶接学会梗概 13 (1973), p.268
- 61) J. M. Barsom, Development of the AASHTO Fracture Toughness Requirements for Bridge Steels, Eng. Fract. Mech., 7 (1975), p.605
- 62) 征矢, 柏村, 萩原, 他, 角変形目違い溶接部の表面欠陥からの脆性破壊発生特性とシャルピ試験の相関, 日本造船学会論文集 第140号 (昭.51.12)
- 63) 小河, 富永, 丸山,  $2\frac{1}{4}$  Cr-1 Mo 鋼溶接部の静的, 動的破壊靱性値に及ぼす熱処理の影響, 溶接学会誌 Vol.48 (1979)
- 64) 萩原, 征矢, 三波, 佐藤, Vシャルピ衝撃特性からの脆性破壊発生特性の評価法, 溶接学会誌 Vol.45 (1976)
- 65) 日本溶接協会 鉄鋼部会技術委員会 WSD委員会 (町田 進主査)
- 66) 笠松, 高野, 松岡, 2Vシャルピ衝撃試験の特性値と Deep Notch Test による脆性破壊発生特性値との相関について, 溶接学会誌 Vol.44, No.6 (1975)
- 67) T. Kanazawa, S. Machida and T. Miyata, Present Status on the Evaluation Criteria of Fracture Toughness for Structural Steels and Their Welded Joints in Japan, Proc. Int. Conf. on "Prospects of Fracture Mechanics" Delft Univ. (1974)

- 68) 松岡, 笠松, 2Vシャルピ〃衝撃試験の破面遷移温度とCOD試験による破壊発生温度との相関, 溶接学会誌, Vol.46 No.10 (1977)
- 69) 長谷部, 川口, 有持, 脆性破壊発生特性からみた溶接継手ボンド部の材質評価に対する提案, 溶接学会誌 Vol.44, No.1 (1975)
- 70) 佐藤, 豊田, 溶接継手の脆性破壊強度におよぼす残留応力と材料の力学的特性の影響, 日本造船学会論文集 第131号 (昭.47.6)
- 71) R.D. Stout and H.H. Johnson, Comparison and Analysis of Notch Toughness Tests for Steels in Welded Structures, Welding Research Council, Bulletin, No.62 (1960)
- 72) H.G. Pisarski, A review of correlations relating Charpy energy to K<sub>IC</sub>, Welding Inst. Res. Bull. (1978)
- 73) 日本溶接協会規格, 低温構造用鋼板判定基準 WES 3003
- 74) 池田, 西山記念技術講座 15, 溶接構造物の脆性破壊 (昭.47.2)
- 75) 日本造船研究協会第169研究部会, 船体構造の破壊管理制御設計に関する研究, 研究資料 No.315 (昭.54.3)
- 76) 木原, 楠田, 飯田, 前田, 松岡, 脆性破壊の伝播に及ぼす溶接残留応力の影響, 造船協会論文集 第108号 (昭.35.12), p.385
- 77) H.Kihara, T.Yoshida and H.Oba, IIW Doc. X-217-59 (1959)
- 78) 萩原, 三村, 中村, 溶接部の脆性亀裂伝播特性について, 溶接学会昭和51年秋季講演大会, p.146
- 79) 三村, 破壊靱性を支配する諸因子, 鉄と鋼, No.7, Vol.64 (1978.6), p.78
- 80) 金沢, 越賀, 破壊力学と材料強度講座 8, 脆性破壊, 培風館, p.111
- 81) 金沢, 町田, 矢島, 青木, 脆性破壊伝播停止特性におよぼす寸法効果および荷重条件の影響, 日本造船学会論文集 第130号 (昭.46.12), p.343
- 82) 石田, 日本機械学会第3回シンポジウム 講演論文集, 破壊力学の応用と拡張, (1971.6.10-11)

- 83) 越賀, 今沢, 竹花, 鋼板における脆性亀裂の停止遷移現象, 造船協会論文集 第114号 (昭.38.12)
- 84) 日本溶接協会鉄鋼研究委員会報告, 溶接技術 11 (1963)
- 85) 池田, 矢島, 前中, 中島, 岡部, 溶接型クラックアレスターの研究, 三菱重工業技報 Vol.6, No.6 (1969.11) および Technical Review Vol.8, No.2 (1971.6)
- 86) 木原, 金沢, 池田, 前中, 木下, 永元, 矢島, クラックアレスターの有効性について (第1報), 造船協会論文集 第122号 (昭.42.12) および, クラックアレスターの有効性について (第2報), 日本造船学会論文集 第124号 (昭.43.12)
- 87) 町田, 青木, クラックアレスターに関する基礎的研究 (第7報) — 長大クラックの阻止とアレスターの設計について —, 日本造船学会論文集 第131号 (昭.47.6)  
T.Kanazawa, S.Machida, H.Yajima and M.Aoki, Study on Brittle Crack Arrester — Considerations on the Arrest of a Very Long Crack —, Selected Papers from the Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.11 (1973)
- 88) 金沢, 町田, 大八木, クラックアレスターに関する基礎的研究 (第4報) — Integral Stiffener型アレスターモデルについての考察 —, 造船協会論文集 第121号 (昭.42.6)
- 89) 金沢, 町田, 大八木, クラックアレスターに関する基礎的研究 (第5報) — 溝型およびスチフナ型クラックアレスターの解析, 造船協会論文集 第122号 (昭.42.12)
- 90) 金沢, 町田, 土井, クラックアレスターに関する基礎的研究 (第6報) — スチフナ型アレスターの有効性について —, 日本造船学会論文集 第124号 (昭.43.12)
- 91) 金沢, 町田, 新村, 寺本, 吉成, 高速クラックの動的様相に関する研究 (第3報) — 造船用鋼材の動的破壊特性 —, 日本造船学会論文集 第144号 (昭.53.12)
- 92) 日本造船研究協会第169研究部会, 船体構造の破壊管理制御設計に関する研究, 研究資料 No.297, (昭.53.3)

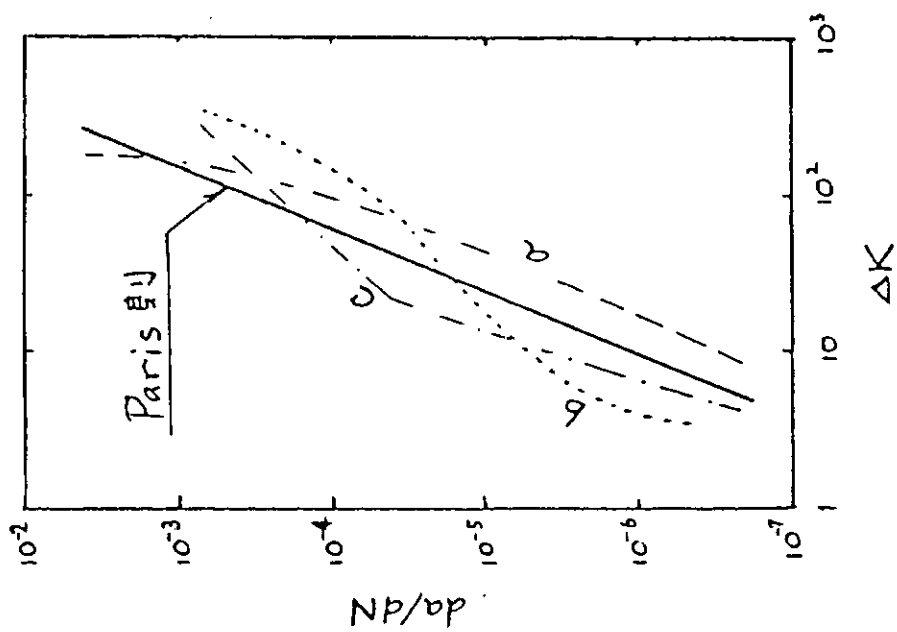


図5.1.1 き裂伝播速度  $da/dN$  と  
応力拡大係数範囲  $\Delta K$  との関係

実線 : Paris則  
a, b, c : 実験データにあられる  
いろいろな変化

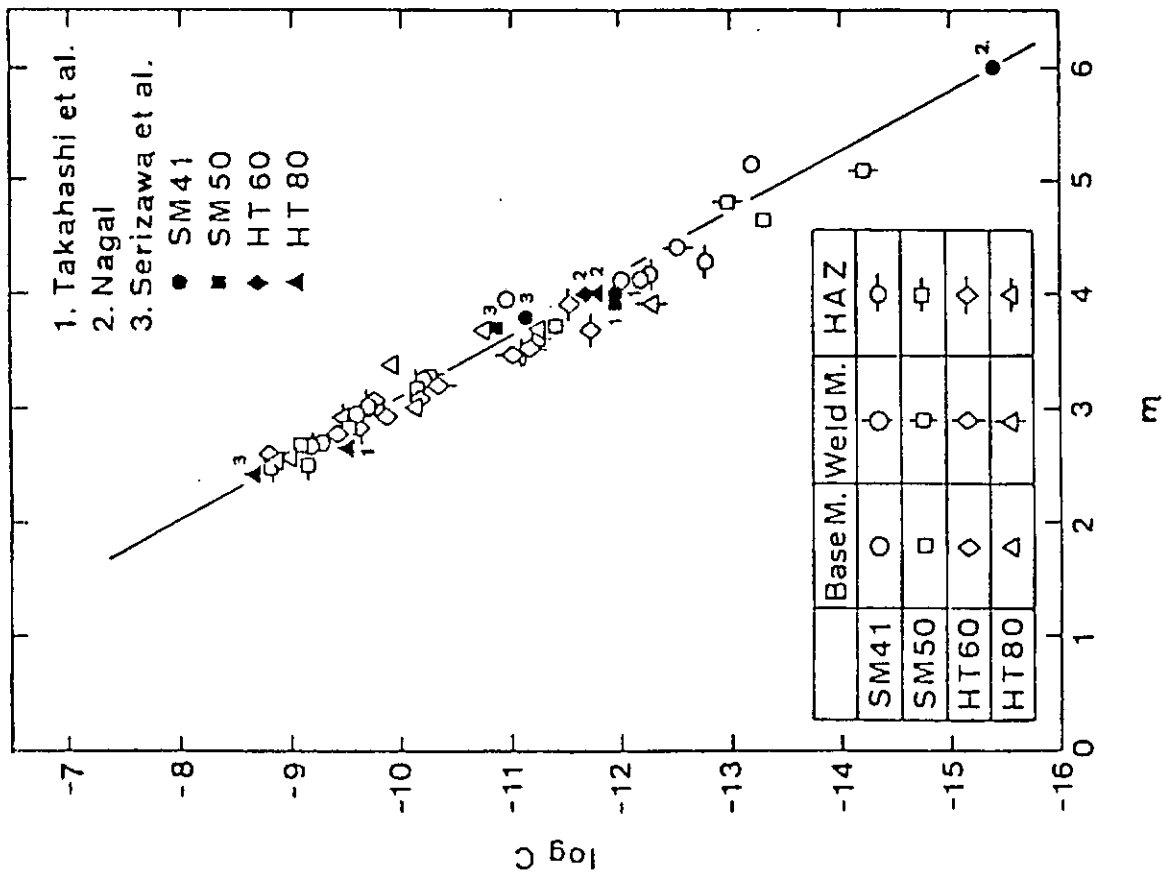


図5.1.2 Cとmとの関係

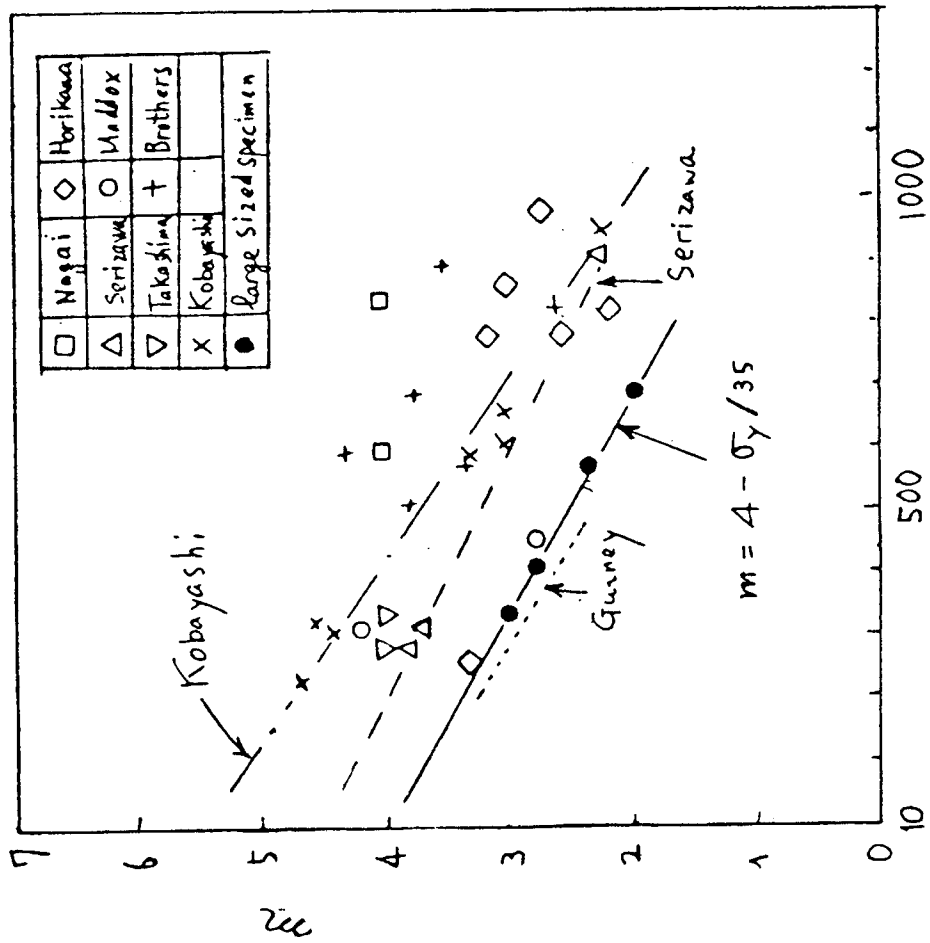


図5.1.3 材料定数  $m$  と降伏応力  $\sigma_y$  との相関関係

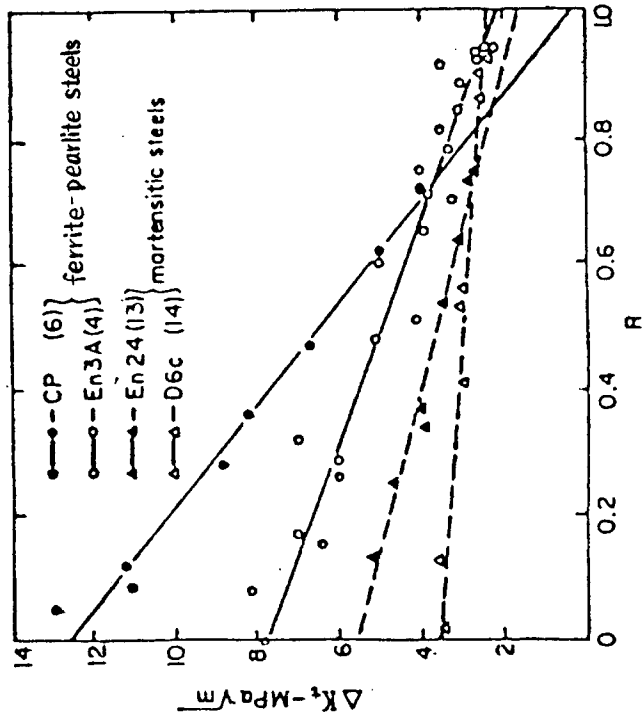


図5.1.4 4つの鋼種についての  $\Delta K_{th}$  の  
応力比  $R$  への依存性

表 5.1.1  $\Delta K_{th}$  に関するデータ例

[ O. Vosikovsky : Eng. Fract. Mech.  
Vol. 11, 595~602 (1979) ]

| Reference                             | Steel                                 | U.T.S.<br>(MPa) | Y.S.<br>(MPa) | $\Delta K_{th}$<br>( $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ) | $\beta$<br>( $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ) |
|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------|---------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Jerram<br>and<br>Pridde<br>(1973)     | Mild Steel<br>0.23C, 0.6Mn            | 454             | 303           | 7.75                                               | 5.56                                       |
| Branco<br>Radon d<br>Culver<br>(1976) | Mild Steel<br>0.19C, 0.59Mn           | 585             | 401           | 6.54                                               | 2.85                                       |
| Sasaki<br>Ohta d<br>Kosuge<br>(1977)  | SM50A<br>0.19C, 1.4Mn                 | 568             | 372           | 10.37                                              | 8.56                                       |
| "                                     | SM58A<br>0.16C, 1.3Mn                 | 666             | 558           | 7.93                                               | 7.18                                       |
| "                                     | HT80<br>0.13C, 0.9Mn<br>0.5Cr, 0.14Mo | 823             | 794           | 8.98                                               | 7.80                                       |

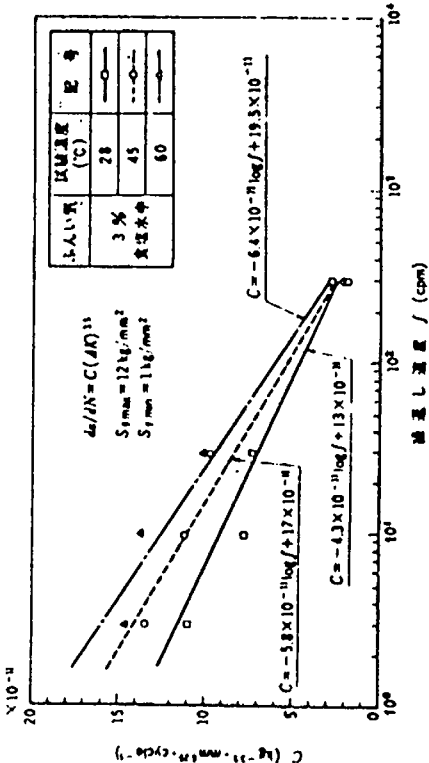


図 5.1.5 き裂進展速度式の係数  $C$  値に及ぼす荷重繰返し速度  
及び温度の影響

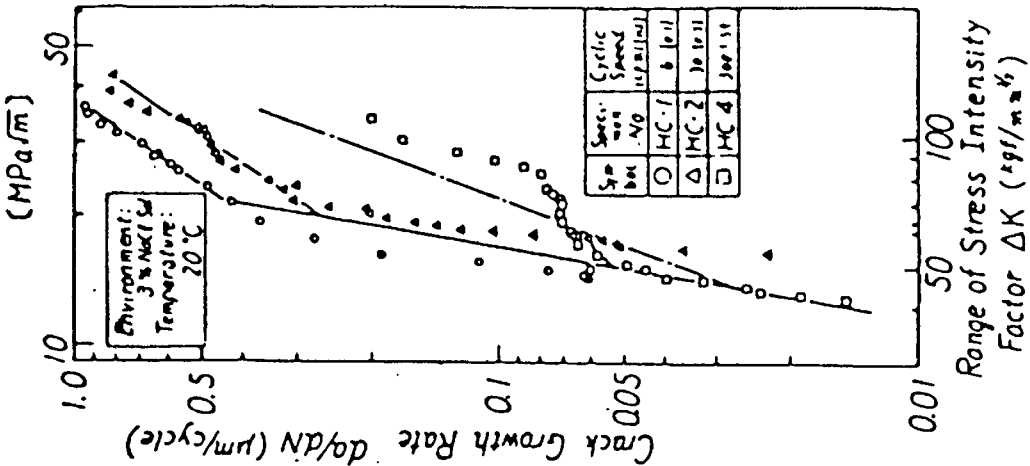


図 5.1.6 HT-80 鋳鋼の腐食  
疲労き裂伝播特性

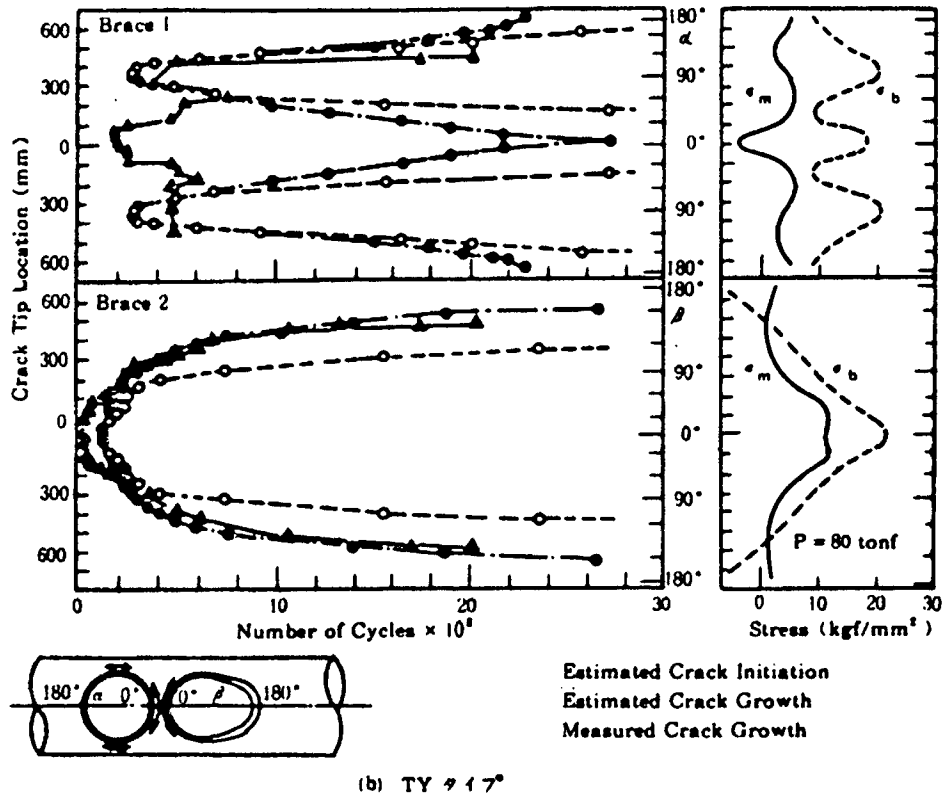


図5.1.7 疲労き裂成長線図

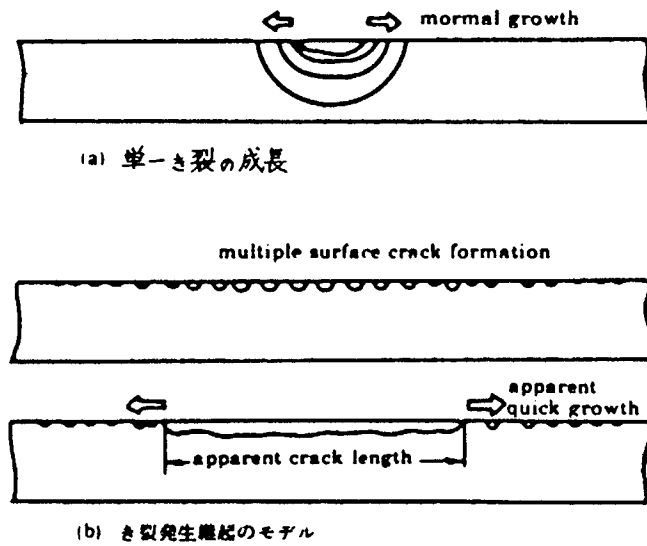


図5.1.8 パイプ継手におけるき裂成長初期の急速な長さ方向のき裂伝播についての解釈

表 5.2.1.1 亀裂発生破壊靱性値  $K_{IC}$  (Z01)  
(母材L方向)

| NK規格 | 鋼種  | 板厚<br>(mm) | 熱処理 | 降伏点<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | VTRE<br>(°C) | 試験片<br>形状             | 切欠          | 試験温度<br>(°C)          | K <sub>IC</sub> 値<br>(kgfmm/mm <sup>3/2</sup> ) | K <sub>0</sub>                  | T <sub>0</sub>                 | 決定係数                            | K <sub>0MN</sub>             |                      |                              |                      |         |                      |                      |      |                                 |                         |        |        |  |
|------|-----|------------|-----|-------------------------------|--------------|-----------------------|-------------|-----------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------|----------------------|------------------------------|----------------------|---------|----------------------|----------------------|------|---------------------------------|-------------------------|--------|--------|--|
| KA級  | KAS | 9          | AR  | 29                            | —            | 試験片<br>形状             | MN<br>(0.2) | -145                  | 161.9                                           | 1200×10 <sup>3</sup>            | 2546×10 <sup>2</sup>           | 0.9                             | KA:<br>7.814×10 <sup>2</sup> |                      |                              |                      |         |                      |                      |      |                                 |                         |        |        |  |
|      |     |            |     |                               |              |                       |             | -136                  | 194.7                                           | KA:<br>(4.548×10 <sup>3</sup> ) | KA:<br>(5986×10 <sup>2</sup> ) | (0.98)                          |                              |                      |                              |                      |         |                      |                      |      |                                 |                         |        |        |  |
|      |     | 19         |     | 26.2                          | 13           |                       |             | Deep<br>(400×<br>240) | MN<br>(0.1)                                     | -130                            | 197.0                          | ↑                               | ↑                            | ↑                    | KA:<br>7.228×10 <sup>2</sup> |                      |         |                      |                      |      |                                 |                         |        |        |  |
|      |     |            |     |                               |              |                       |             |                       |                                                 | -145                            | 150.1                          |                                 |                              |                      |                              |                      |         |                      |                      |      |                                 |                         |        |        |  |
|      |     |            |     |                               |              |                       |             |                       |                                                 | -123                            | 211.1                          |                                 |                              |                      |                              |                      |         |                      |                      |      |                                 |                         |        |        |  |
|      |     |            |     |                               |              |                       |             |                       |                                                 | -100                            | 283.0                          |                                 |                              |                      |                              |                      |         |                      |                      |      |                                 |                         |        |        |  |
|      |     |            |     |                               |              |                       |             |                       |                                                 | -90                             | # 323.8                        |                                 |                              |                      |                              |                      |         |                      |                      |      |                                 |                         |        |        |  |
|      |     |            |     |                               |              |                       |             |                       |                                                 | -88                             | 412.4                          |                                 |                              |                      |                              |                      |         |                      |                      |      |                                 |                         |        |        |  |
|      |     | 20         |     | 25                            | 3            |                       |             |                       |                                                 | Deep<br>(400×<br>240)           | MN<br>(0.1)                    |                                 |                              |                      |                              | -70                  | # 584.9 | 9252×10 <sup>3</sup> | 2500×10 <sup>2</sup> | 0.65 |                                 |                         |        |        |  |
|      |     |            |     |                               |              |                       |             |                       |                                                 |                                 |                                |                                 |                              |                      |                              | -70                  | # 387.1 |                      |                      |      | KA:<br>(1.443×10 <sup>3</sup> ) | (4526×10 <sup>2</sup> ) | (0.96) |        |  |
|      |     |            |     |                               |              |                       |             |                       |                                                 |                                 |                                |                                 |                              |                      |                              | -120                 | 86.8    |                      |                      |      |                                 |                         |        |        |  |
|      |     |            |     |                               |              |                       |             |                       |                                                 |                                 |                                |                                 |                              |                      |                              | -120                 | 190.0   |                      |                      |      |                                 |                         |        |        |  |
|      |     |            |     |                               |              |                       |             |                       |                                                 |                                 |                                |                                 |                              |                      |                              | -102                 | # 361.3 |                      |                      |      |                                 |                         |        |        |  |
|      |     |            |     |                               |              |                       |             |                       |                                                 |                                 |                                |                                 |                              |                      |                              | -82                  | # 351.8 |                      |                      |      |                                 |                         |        |        |  |
|      |     | -80        |     | # 337.8                       |              |                       |             |                       |                                                 |                                 |                                |                                 |                              |                      |                              |                      |         |                      |                      |      |                                 |                         |        |        |  |
|      |     | 20         |     | 28                            | 8            | Deep<br>(400×<br>240) | MN<br>(0.1) |                       |                                                 |                                 |                                | -80                             | # 323.8                      | 9252×10 <sup>3</sup> |                              | 2500×10 <sup>2</sup> | 0.65    |                      |                      |      |                                 |                         |        |        |  |
|      |     |            |     |                               |              |                       |             | -60                   | # 300.3                                         |                                 |                                | KA:<br>(1.443×10 <sup>3</sup> ) | (4526×10 <sup>2</sup> )      |                      |                              |                      |         |                      |                      |      |                                 |                         |        | (0.96) |  |
|      |     |            |     |                               |              |                       |             | -196                  | 61.0                                            |                                 |                                |                                 |                              |                      |                              |                      |         |                      |                      |      |                                 |                         |        |        |  |
|      |     |            |     |                               |              |                       |             | -180                  | 72.7                                            |                                 |                                |                                 |                              |                      |                              |                      |         |                      |                      |      |                                 |                         |        |        |  |
|      |     |            |     |                               |              |                       |             | -160                  | 82.1                                            |                                 |                                |                                 |                              |                      |                              |                      |         |                      |                      |      |                                 |                         |        |        |  |
|      |     |            |     |                               |              |                       |             | -140                  | 110.2                                           |                                 |                                |                                 |                              |                      |                              |                      |         |                      |                      |      |                                 |                         |        |        |  |
|      |     |            |     |                               |              |                       |             | -100                  | 255.7                                           |                                 |                                |                                 |                              |                      |                              |                      |         |                      |                      |      |                                 |                         |        |        |  |
|      |     |            |     |                               |              |                       |             | -80                   | 288.6                                           |                                 |                                |                                 |                              |                      |                              |                      |         |                      |                      |      |                                 |                         |        |        |  |
|      |     | 20         |     | 31                            | 0            |                       |             | Deep<br>(400×<br>240) | MN<br>(0.1)                                     | -128                            | 141.3                          |                                 |                              |                      |                              |                      |         |                      |                      |      |                                 |                         |        |        |  |
|      |     |            |     |                               |              |                       |             |                       |                                                 | -120                            | 110.2                          |                                 |                              |                      |                              |                      |         |                      |                      |      |                                 |                         |        |        |  |
|      |     |            |     |                               |              |                       |             |                       |                                                 | -100                            | 281.5                          |                                 |                              |                      |                              |                      |         |                      |                      |      |                                 |                         |        |        |  |
|      |     |            |     |                               |              |                       |             |                       |                                                 | -81                             | 382.4                          |                                 |                              |                      |                              |                      |         |                      |                      |      |                                 |                         |        |        |  |

表 5.2.1.2 亀裂発生破壊軟化性値 Kc (Zn2)  
(母材 L 方向)

| NK規格 | 鋼種            | 板厚<br>(mm) | 熱処理 | 降伏点<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | TRe<br>(°C) | 試験片<br>形状 | 切欠    | 試験温度<br>(°C) | Kc値<br>(kgfmm/mm <sup>2</sup> ) | Ko                             | To                             | 決定係数   | KOMN                        |
|------|---------------|------------|-----|-------------------------------|-------------|-----------|-------|--------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------|-----------------------------|
| KA級  | KAS           | 20         |     | —                             | —           |           |       | -140         | 114.9                           |                                |                                |        |                             |
|      |               |            |     |                               |             |           |       | -124         | 213.6                           |                                |                                |        |                             |
|      |               |            |     |                               |             |           |       | -113         | #424.6                          | ↓                              | ↓                              | ↓      | ↓                           |
|      |               | 23.5       |     | 27                            | 3           |           |       | 143          | 93.8                            |                                |                                |        |                             |
|      |               |            |     |                               |             |           |       | -120         | 113.7                           |                                |                                |        |                             |
|      |               |            |     |                               |             |           |       | -103         | 129.0                           |                                |                                |        |                             |
|      |               |            |     |                               |             |           |       | -80          | #368.3                          |                                |                                |        |                             |
|      | LAS<br>(LR規格) |            |     |                               |             | Deep      | MN    | -80          | #373.0                          | 5.529 × 10 <sup>2</sup>        | 186.3 × 10 <sup>2</sup>        | 0.59   | KA: 4.659 × 10 <sup>2</sup> |
|      |               |            |     |                               |             | (400 ×    | (0.1) | -185         | 70.3                            | KA: (1.061 × 10 <sup>3</sup> ) | KA: (4409 × 10 <sup>3</sup> )  | (0.67) |                             |
|      |               | 25.5       |     | 28                            | -1          | 240)      |       | -140         | 157.2                           |                                |                                |        |                             |
|      |               |            |     |                               |             |           |       | -120         | 265.1                           |                                |                                |        |                             |
|      |               |            |     |                               |             |           |       | -100         | #415.3                          |                                |                                |        |                             |
|      |               |            | AR  |                               |             |           |       | -80          | 260.4                           | ↑                              | ↑                              | ↑      | ↑                           |
|      |               |            |     |                               |             |           |       | -160         | 70.3                            |                                |                                |        |                             |
|      |               |            |     | 28                            | -3          |           |       | -143         | 175.9                           |                                |                                |        |                             |
|      |               |            |     |                               |             |           |       | -132         | 114.9                           |                                |                                |        |                             |
| KAS  |               | 25.4       |     |                               |             |           |       | -120         | 276.8                           |                                |                                |        |                             |
|      |               |            |     |                               |             |           |       | -104         | #368.3                          |                                |                                |        |                             |
|      |               |            |     |                               |             |           |       | -81          | #340.2                          |                                |                                |        |                             |
|      |               |            |     |                               |             |           |       | -160         | 83.5                            | 1.154 × 10 <sup>3</sup>        | 2.385 × 10 <sup>2</sup>        | 0.74   | KA: 9.128 × 10 <sup>2</sup> |
|      |               |            |     |                               |             |           |       | -132         | 143.1                           | KA: (1.716 × 10 <sup>3</sup> ) | KA: (492.2 × 10 <sup>2</sup> ) | (0.55) |                             |
|      |               |            |     | 27                            | 8           | Deep      | MN    | -120         | 124.4                           |                                |                                |        |                             |
|      |               |            |     |                               |             | (400 ×    | (0.2) | -104         | 409.1                           |                                |                                |        |                             |
|      |               |            |     |                               |             | 160)      |       | -80          | 288.1                           |                                |                                |        |                             |
|      |               |            |     |                               |             |           |       | -58          | 468.8                           |                                |                                |        |                             |
|      |               |            |     |                               |             |           |       | -40          | #402.3                          |                                |                                |        |                             |
|      |               |            |     |                               |             |           |       | 20           | #426.1                          |                                |                                |        |                             |

表 5.2.1.3 龜裂発生破壊靱性値 Kc (号 3)

(母材 L 方向)

| NK規格 | 鋼種               | 板厚<br>(mm) | 熱処理 | 降伏点<br>(kg/mm <sup>2</sup> ) | vire<br>(°C) | 試験片<br>形状         | 切欠          | 試験温度<br>(°C) | Kc値<br>(kg/mm <sup>3/2</sup> ) | K O                                                          | T O                                                          | 決定係数           | KOMN                           |
|------|------------------|------------|-----|------------------------------|--------------|-------------------|-------------|--------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------|--------------------------------|
| KA級  | KAS              | 25.4       | AR  | 25.5                         | -1           | Deep<br>(400×160) | MN<br>(0.2) | -159         | 75.0                           | 1.154 × 10 <sup>3</sup><br>KA:<br>(1.716 × 10 <sup>3</sup> ) | 2.886 × 10 <sup>2</sup><br>KA:<br>(4.922 × 10 <sup>2</sup> ) | 0.74<br>(0.55) | KA:<br>9.128 × 10 <sup>2</sup> |
|      |                  |            |     |                              |              |                   |             | -119         | 175.5                          |                                                              |                                                              |                |                                |
|      |                  |            |     |                              |              |                   |             | -109         | 282.9                          |                                                              |                                                              |                |                                |
|      |                  |            |     |                              |              |                   |             | -62          | # 376.7                        |                                                              |                                                              |                |                                |
|      |                  |            |     |                              |              |                   |             | -32          | # 323.9                        |                                                              |                                                              |                |                                |
|      |                  |            |     |                              |              |                   |             | 1            | # 330.7                        |                                                              |                                                              |                |                                |
|      |                  |            |     |                              |              |                   |             | -184         | 51.1                           |                                                              |                                                              |                |                                |
|      |                  |            |     |                              |              |                   |             | -153         | 121.0                          |                                                              |                                                              |                |                                |
|      |                  |            |     |                              |              |                   |             | -120         | 107.3                          |                                                              |                                                              |                |                                |
|      |                  |            |     |                              |              |                   |             | -105         | 143.1                          |                                                              |                                                              |                |                                |
|      |                  |            |     |                              |              |                   |             | -78          | 315.3                          |                                                              |                                                              |                |                                |
|      |                  |            |     |                              |              |                   |             | -45          | 301.7                          |                                                              |                                                              |                |                                |
| KB級  | ARS<br>(AB規格) 27 | 35         | AR  | 28.5                         | -3           | Deep<br>(400×240) | MN<br>(0.1) | -4           | 301.7                          | 2.735 × 10 <sup>3</sup><br>KA:<br>(1.115 × 10 <sup>4</sup> ) | 4.015 × 10 <sup>2</sup><br>KA:<br>(7.668 × 10 <sup>2</sup> ) | 0.79<br>(0.99) | KA:<br>1.925 × 10 <sup>3</sup> |
|      |                  |            |     |                              |              |                   |             | 20           | # 371.6                        |                                                              |                                                              |                |                                |
|      |                  |            |     |                              |              |                   |             | -160         | 100.8                          |                                                              |                                                              |                |                                |
|      |                  |            |     |                              |              |                   |             | -140         | 89.1                           |                                                              |                                                              |                |                                |
|      |                  |            |     |                              |              |                   |             | -140         | 124.1                          |                                                              |                                                              |                |                                |
|      |                  |            |     |                              |              |                   |             | -119         | 206.4                          |                                                              |                                                              |                |                                |
|      |                  |            |     |                              |              |                   |             | -118         | 218.2                          |                                                              |                                                              |                |                                |
|      |                  |            |     |                              |              |                   |             | -100         | 309.7                          |                                                              |                                                              |                |                                |
|      |                  |            |     |                              |              |                   |             | -90          | # 344.9                        |                                                              |                                                              |                |                                |
|      |                  |            |     |                              |              |                   |             | -78          | # 321.4                        |                                                              |                                                              |                |                                |
|      |                  |            |     |                              |              |                   |             | -140         | 105.5                          |                                                              |                                                              |                |                                |
|      |                  |            |     |                              |              |                   |             | -120         | 208.8                          |                                                              |                                                              |                |                                |
|      |                  |            |     |                              |              |                   |             | -100         | 145.4                          |                                                              |                                                              |                |                                |
|      |                  |            |     |                              |              |                   |             | -100         | 351.9                          |                                                              |                                                              |                |                                |
|      |                  |            |     |                              |              |                   |             | -80          | 354.3                          |                                                              |                                                              |                |                                |

表 5.2.1.4 龜裂発生破壊靱性値 (Zn4)

| NK規格 | 鋼種  | 板厚<br>(mm) | 熱処理 | 降伏点<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | T <sub>re</sub><br>(°C) | 試験片<br>形状         | 切欠          | 試験温度<br>(°C) | KC値<br>(kgf/mm <sup>3/2</sup> ) | K <sub>0</sub>           | T <sub>0</sub>           | 決定係数   | K <sub>omN</sub>             |
|------|-----|------------|-----|-------------------------------|-------------------------|-------------------|-------------|--------------|---------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------|------------------------------|
| KD級  | KDK | 35         |     | 29.6                          | -23                     | Deep<br>(400×160) | MN<br>(0.2) | -60          | 366.0                           | ↓                        | ↓                        | ↓      | ↓                            |
|      |     |            |     |                               |                         |                   |             | -160         | 122.7                           |                          |                          |        |                              |
|      |     |            |     |                               |                         |                   |             | -140         | 129.5                           |                          |                          |        |                              |
|      |     |            |     |                               |                         |                   |             | -120         | 264.2                           |                          |                          |        |                              |
|      |     | 25.4       | AR  | 31.5                          | -31                     |                   |             | -105         | 296.6                           | 2.113×10 <sup>3</sup>    | 3.354×10 <sup>2</sup>    | 0.84   | KD:<br>1.449×10 <sup>2</sup> |
|      |     |            |     |                               |                         |                   |             | -90          | #489.2                          | KD:                      | KD:                      |        |                              |
|      |     |            |     |                               |                         |                   |             | -83          | #528.4                          | (2.532×10 <sup>3</sup> ) | (4.969×10 <sup>2</sup> ) | (1.00) |                              |
|      |     |            |     |                               |                         |                   |             | -60          | #489.2                          |                          |                          |        |                              |
|      |     |            |     |                               |                         |                   |             | -40          | #451.7                          |                          |                          |        |                              |
|      |     |            |     |                               |                         |                   |             | -196         | 109.1                           |                          |                          |        |                              |
|      |     |            |     |                               |                         |                   |             | -166         | 126.1                           |                          |                          |        |                              |
|      |     |            |     |                               |                         |                   |             | -156         | 150.0                           | 8.665×10 <sup>2</sup>    | 1.762×10 <sup>2</sup>    | 0.73   | KD:<br>4.600×10 <sup>2</sup> |
|      |     |            |     |                               |                         |                   |             | -110         | 400.6                           | KD:                      | KD:                      |        |                              |
|      |     |            |     |                               |                         |                   |             | -100         | #414.2                          | (3.265×10 <sup>3</sup> ) | (5.497×10 <sup>2</sup> ) | (1.00) |                              |
|      |     | 35         | N   | 28                            | -16                     |                   |             | -54          | #340.9                          | ↑                        | ↑                        | ↑      | ↑                            |
|      |     |            |     |                               |                         |                   |             | -141         | 49.4                            |                          |                          |        |                              |
|      |     |            |     |                               |                         |                   |             | -140         | 49.4                            |                          |                          |        |                              |
|      |     |            |     |                               |                         |                   |             | -120         | 134.6                           |                          |                          |        |                              |
|      |     |            |     |                               |                         |                   |             | -120         | 56.2                            | 3.345×10 <sup>3</sup>    | 5.584×10 <sup>2</sup>    | 0.46   | KD:<br>6.577×10 <sup>3</sup> |
|      |     |            |     |                               |                         |                   |             | -112         | #296.6                          | KD:                      | KD:                      |        |                              |
|      |     |            |     |                               |                         |                   |             | -100         | #289.8                          | (2.830×10 <sup>3</sup> ) | (5.584×10 <sup>2</sup> ) | (—)    |                              |
|      |     |            |     |                               |                         |                   |             | -97          | #277.8                          |                          |                          |        |                              |
|      |     |            |     |                               |                         |                   |             | -78          | #243.7                          |                          |                          |        |                              |
|      |     |            |     |                               |                         |                   |             | -140         | 145.4                           |                          |                          |        |                              |
|      |     | KD         | AR  | 30                            | -14                     |                   |             | -100         | 157.2                           | 8.727×10 <sup>2</sup>    | 2.344×10 <sup>2</sup>    | 0.38   | KD:<br>6.899×10 <sup>2</sup> |
|      |     |            |     |                               |                         |                   |             | -80          | 389.4                           | KD:                      | KD:                      |        |                              |
|      |     |            |     |                               |                         |                   |             | -80          | 302.6                           | (2.362×10 <sup>3</sup> ) | (5.873×10 <sup>2</sup> ) | (0.64) |                              |
|      |     |            |     |                               |                         |                   |             |              |                                 |                          |                          |        |                              |

表 5.2.1.5 亀裂発生破壊靱性値 Kc (その5)

| 板厚 (mm) |     | 試験片形状 | 切欠 | 試験温度 (°C) | Kc値 (kgf/mm <sup>3/2</sup> ) | K <sub>0</sub> | T <sub>0</sub> | 決定係数 | K <sub>0</sub> MN |
|---------|-----|-------|----|-----------|------------------------------|----------------|----------------|------|-------------------|
| NK規格    | 金剛槍 |       |    |           |                              |                |                |      |                   |
| KD級     | KD  | 35    |    | -38       | 28                           |                | ↓              | ↓    | ↓                 |
|         | KDK | 38    | AR |           |                              |                |                |      |                   |
|         |     |       |    |           |                              |                |                |      |                   |
|         |     |       |    |           |                              |                |                |      |                   |
|         |     |       |    |           |                              |                |                |      |                   |
|         |     |       |    |           |                              |                |                |      |                   |
|         |     |       |    |           |                              |                |                |      |                   |
|         |     |       |    |           |                              |                |                |      |                   |
|         |     |       |    |           |                              |                |                |      |                   |
|         |     |       |    |           |                              |                |                |      |                   |
|         |     |       |    |           |                              |                |                |      |                   |
| KE級     | KEN | 30    | N  |           |                              |                |                |      |                   |
|         |     |       |    |           |                              |                |                |      |                   |
|         |     |       |    |           |                              |                |                |      |                   |
|         |     |       |    |           |                              |                |                |      |                   |
|         |     |       |    |           |                              |                |                |      |                   |
|         |     |       |    |           |                              |                |                |      |                   |
|         |     |       |    |           |                              |                |                |      |                   |
|         |     |       |    |           |                              |                |                |      |                   |
|         |     |       |    |           |                              |                |                |      |                   |
|         |     |       |    |           |                              |                |                |      |                   |
|         |     | 40    |    |           |                              |                |                |      |                   |
|         |     | 50    |    |           |                              |                |                |      |                   |
|         |     |       |    |           |                              |                |                |      |                   |
|         |     |       |    |           |                              |                |                |      |                   |
|         |     |       |    |           |                              |                |                |      |                   |
|         |     |       |    |           |                              |                |                |      |                   |
|         |     |       |    |           |                              |                |                |      |                   |
|         |     |       |    |           |                              |                |                |      |                   |
|         |     |       |    |           |                              |                |                |      |                   |
|         |     |       |    |           |                              |                |                |      |                   |
|         |     |       |    |           |                              |                |                |      |                   |

(母材1.方向)

表 5.2.1.6 亀裂発生破壊挙動性値 (その6)

| NK規格  | 金剛種  | 板厚<br>(mm) | 熱処理 | 降伏点<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | Vt <sub>re</sub><br>(°C) | 試験片<br>形状           | 切欠<br>(mm)   | 試験温度<br>(°C) | KC値<br>(kgf/mm <sup>3/2</sup> ) | K <sub>0</sub>                   | T <sub>0</sub>                   | 決定係数   | K <sub>OMN</sub>                                                   |
|-------|------|------------|-----|-------------------------------|--------------------------|---------------------|--------------|--------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------|--------------------------------------------------------------------|
|       |      |            |     |                               |                          |                     |              |              |                                 |                                  |                                  |        |                                                                    |
| KE級   | KEN  | 50         | N   | 27.5                          | -40                      |                     | MN<br>(0.15) | -140         | 208.8                           |                                  |                                  |        | KE:<br>1.340 × 10 <sup>3</sup>                                     |
|       |      |            |     |                               |                          |                     |              | -120         | 445.8                           |                                  |                                  |        |                                                                    |
|       |      |            |     |                               |                          |                     |              | -120         | 183.0                           | 2096 × 10 <sup>3</sup>           | 3048 × 10 <sup>2</sup>           | 0.64   |                                                                    |
|       |      |            |     |                               |                          |                     |              | -100         | 431.7                           | KE:<br>5.859 × 10 <sup>3</sup>   | KE:<br>6.448 × 10 <sup>2</sup>   | (0.84) |                                                                    |
| KA32級 | A33A | 23         |     | 40.7                          | -1                       | Deep<br>(400 × 240) |              | -80          | 373.0                           |                                  |                                  |        | KA32:<br>3.158 × 10 <sup>3</sup>                                   |
|       |      |            |     |                               |                          |                     |              | -162         | 65.6                            |                                  |                                  |        |                                                                    |
|       |      |            |     |                               |                          |                     |              | -140         | 206.4                           |                                  |                                  |        |                                                                    |
|       |      |            |     |                               |                          |                     |              | -120         | 190.0                           | 3.868 × 10 <sup>3</sup>          | 4.359 × 10 <sup>2</sup>          | 0.87   |                                                                    |
|       |      |            |     |                               |                          |                     |              | -100         | 300.3                           | KA32:<br>7.765 × 10 <sup>3</sup> | KA32:<br>6.750 × 10 <sup>2</sup> | (0.96) |                                                                    |
|       |      |            |     |                               |                          |                     |              | -79          | 462.2                           |                                  |                                  |        |                                                                    |
| KA32級 | A5A  | 30         | AR  | 37.8                          | 8                        |                     | MN<br>(0.1)  | -196         | 110.2                           |                                  |                                  |        | KA32:<br>5.381 × 10 <sup>2</sup>                                   |
|       |      |            |     |                               |                          |                     |              | -160         | 112.6                           | 8.106 × 10 <sup>2</sup>          | 1.689 × 10 <sup>2</sup>          | 0.77   |                                                                    |
|       |      |            |     |                               |                          |                     |              | -120         | 309.7                           | KA32:<br>6.890 × 10 <sup>2</sup> | KA32:<br>2.754 × 10 <sup>2</sup> | (1)    |                                                                    |
|       |      |            |     |                               |                          |                     |              | -80          | 387.1                           |                                  |                                  |        |                                                                    |
|       |      |            |     |                               |                          |                     |              | -196         | 89.9                            |                                  |                                  |        |                                                                    |
|       |      |            |     |                               |                          |                     |              | -160         | 74.2                            | 4.610 × 10 <sup>2</sup>          | 1.440 × 10 <sup>2</sup>          | 0.62   |                                                                    |
| KD32級 | K5D  | 12.7       |     | 39                            | —                        |                     |              | -160         | 115.6                           | KD32:<br>1.370 × 10 <sup>3</sup> | KD32:<br>3.710 × 10 <sup>2</sup> | (0.93) | KD32:<br>5.058 × 10 <sup>2</sup><br>K5D<br>4.932 × 10 <sup>2</sup> |
|       |      |            |     |                               |                          |                     |              | -140         | 168.4                           |                                  |                                  |        |                                                                    |
|       |      |            |     |                               |                          |                     |              | -120         | 236.9                           | K5D:<br>1.335 × 10 <sup>3</sup>  | K5D:<br>3.710 × 10 <sup>2</sup>  | (0.93) |                                                                    |
|       |      |            |     |                               |                          |                     |              | -80          | 234.1                           |                                  |                                  |        |                                                                    |
|       |      |            |     |                               |                          |                     |              | -182         | 75.0                            |                                  |                                  |        |                                                                    |
|       |      |            |     |                               |                          |                     |              | -160         | 180.7                           |                                  |                                  |        |                                                                    |
| KD32級 | K5D  | 25         | N   | 34.7                          | -60                      | Deep<br>(400 × 160) | MN<br>(0.2)  | -161         | 194.3                           |                                  |                                  |        |                                                                    |
|       |      |            |     |                               |                          |                     |              | -151         | 235.2                           |                                  |                                  |        |                                                                    |
|       |      |            |     |                               |                          |                     |              | -141         | 560.8                           |                                  |                                  |        |                                                                    |
|       |      |            |     |                               |                          |                     |              | -122         | 467.1                           |                                  |                                  |        |                                                                    |
|       |      |            |     |                               |                          |                     |              | -160         | 140.7                           |                                  |                                  |        |                                                                    |
|       |      |            |     |                               |                          |                     |              |              |                                 |                                  |                                  |        |                                                                    |

表 5.2.1.7 龜裂發生破綻物性値 (No.7)

| NK規格         | 鋼種   | 板厚<br>(mm) | 熱處理 | 降伏点<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | vTE<br>(°C) | 試験片<br>形状             | 切欠          | 試験温度<br>(°C) | KC値<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | Ko                                                                    | To                                                                    | 決定係數           | KoMN                                                            |  |  |
|--------------|------|------------|-----|-------------------------------|-------------|-----------------------|-------------|--------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|----------------|-----------------------------------------------------------------|--|--|
| KD32級<br>K5D | 25.4 |            | N   | 35                            | -24         | Deep<br>(400×<br>240) | MN<br>(0.1) | -154         | 117.3                         | 3.842×10 <sup>3</sup>                                                 | 3.469×10 <sup>2</sup>                                                 | 0.66<br>(0.83) | KD32:<br>2.038×10 <sup>3</sup><br>K5D:<br>1.923×10 <sup>3</sup> |  |  |
|              |      |            |     |                               |             |                       |             | -138         | 577.7                         |                                                                       |                                                                       |                |                                                                 |  |  |
|              |      |            |     |                               |             |                       |             | -121         | 434.0                         |                                                                       |                                                                       |                |                                                                 |  |  |
|              |      |            |     |                               | -38         |                       |             | -100         | ≠476.3                        |                                                                       |                                                                       |                |                                                                 |  |  |
|              |      |            |     |                               |             |                       |             | -187         | 63.3                          |                                                                       |                                                                       |                |                                                                 |  |  |
|              |      |            |     |                               |             |                       |             | -160         | 166.5                         |                                                                       |                                                                       |                |                                                                 |  |  |
|              |      |            |     | -65                           | -68         |                       | MN<br>(0.2) | -140         | 290.9                         | KD32:<br>(1.009×10 <sup>4</sup> )<br>K5D:<br>(9.823×10 <sup>3</sup> ) | KD32:<br>(6.421×10 <sup>2</sup> )<br>K5D:<br>(6.464×10 <sup>2</sup> ) | 0.66<br>(0.83) | KD32:<br>2.038×10 <sup>3</sup><br>K5D:<br>1.923×10 <sup>3</sup> |  |  |
|              |      |            |     |                               |             |                       |             | -119         | 215.8                         |                                                                       |                                                                       |                |                                                                 |  |  |
|              |      |            |     |                               |             |                       |             | -100         | 452.8                         |                                                                       |                                                                       |                |                                                                 |  |  |
|              |      |            |     |                               |             |                       |             | -181         | 144.9                         |                                                                       |                                                                       |                |                                                                 |  |  |
|              |      |            |     |                               |             |                       |             | -161         | 226.7                         |                                                                       |                                                                       |                |                                                                 |  |  |
|              |      |            |     |                               |             |                       |             | -141         | 438.1                         |                                                                       |                                                                       |                |                                                                 |  |  |
|              |      |            |     | 34                            | -37         |                       |             | -121         | ≠615.4                        | KD32:<br>(1.009×10 <sup>4</sup> )<br>K5D:<br>(9.823×10 <sup>3</sup> ) | KD32:<br>(6.421×10 <sup>2</sup> )<br>K5D:<br>(6.464×10 <sup>2</sup> ) | 0.66<br>(0.83) | KD32:<br>2.038×10 <sup>3</sup><br>K5D:<br>1.923×10 <sup>3</sup> |  |  |
|              |      |            |     |                               |             |                       |             | -102         | ≠577.9                        |                                                                       |                                                                       |                |                                                                 |  |  |
|              |      |            |     |                               |             |                       |             | -160         | 90.3                          |                                                                       |                                                                       |                |                                                                 |  |  |
|              |      |            |     |                               |             |                       |             | -152         | 168.7                         |                                                                       |                                                                       |                |                                                                 |  |  |
|              |      |            |     |                               |             |                       |             | -137         | 235.2                         |                                                                       |                                                                       |                |                                                                 |  |  |
|              |      |            |     |                               |             |                       |             | -130         | 397.2                         |                                                                       |                                                                       |                |                                                                 |  |  |
|              |      |            |     |                               |             |                       |             | -120         | ≠526.7                        |                                                                       |                                                                       |                |                                                                 |  |  |
|              |      |            |     |                               |             |                       |             | -110         | ≠497.7                        |                                                                       |                                                                       |                |                                                                 |  |  |
|              |      |            |     |                               |             |                       |             | -164         | 151.7                         |                                                                       |                                                                       |                |                                                                 |  |  |
|              |      |            | AR  | 34.5                          | -37         |                       |             | -155         | 248.8                         | KD32:<br>(1.009×10 <sup>4</sup> )<br>K5D:<br>(9.823×10 <sup>3</sup> ) | KD32:<br>(6.421×10 <sup>2</sup> )<br>K5D:<br>(6.464×10 <sup>2</sup> ) | 0.66<br>(0.83) | KD32:<br>2.038×10 <sup>3</sup><br>K5D:<br>1.923×10 <sup>3</sup> |  |  |
|              |      |            |     |                               |             |                       |             | -133         | 496.0                         |                                                                       |                                                                       |                |                                                                 |  |  |
|              |      |            |     |                               |             |                       |             | -118         | ≠469.2                        |                                                                       |                                                                       |                |                                                                 |  |  |
|              |      |            |     |                               |             |                       |             | -60          | ≠417.6                        |                                                                       |                                                                       |                |                                                                 |  |  |
|              |      |            |     |                               |             |                       |             | 3            | ≠436.4                        |                                                                       |                                                                       |                |                                                                 |  |  |
|              |      |            |     |                               |             |                       |             | -169         | 78.4                          |                                                                       |                                                                       |                |                                                                 |  |  |

表 5.2.18 龜裂發生破壊靱性値(表 8)

(母材 L 方向)

| NK規格  | 鋼種             | 板厚<br>(mm) | 熱処理 | 降伏点<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | vTRe<br>(°C) | 試験片<br>形状              | 切欠          | 試験温度<br>(°C) | KC値<br>(kgfmm/mm <sup>2</sup> ) | Ko                                                                                                  | To                                                                                                   | 決定係数                     | KoMN                                                              |  |  |  |  |  |
|-------|----------------|------------|-----|-------------------------------|--------------|------------------------|-------------|--------------|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------------------------------------|--|--|--|--|--|
| KD32級 | K5D            | 25.4       | AR  | 37                            | -33          | Deep<br>(40C x<br>160) | MN<br>(0.2) | -145         | 342.6                           | 2205 x 10 <sup>3</sup><br>KD32:<br>(1.996 x 10 <sup>3</sup> )<br>K5D:<br>(1.903 x 10 <sup>3</sup> ) | 3.001 x 10 <sup>2</sup><br>KD32:<br>(4.086 x 10 <sup>2</sup> )<br>K5D:<br>(4.088 x 10 <sup>2</sup> ) | 0.24<br>(0.89)<br>(0.89) | KD32:<br>1467 x 10 <sup>3</sup><br>K5D:<br>1396 x 10 <sup>3</sup> |  |  |  |  |  |
|       |                |            |     |                               |              |                        |             | -130         | 514.8                           |                                                                                                     |                                                                                                      |                          |                                                                   |  |  |  |  |  |
|       |                |            |     |                               |              |                        |             | -110         | # 554.0                         |                                                                                                     |                                                                                                      |                          |                                                                   |  |  |  |  |  |
|       |                |            |     |                               |              |                        |             | -80          | # 485.8                         |                                                                                                     |                                                                                                      |                          |                                                                   |  |  |  |  |  |
|       |                |            |     |                               |              |                        |             | 0            | # 490.9                         |                                                                                                     |                                                                                                      |                          |                                                                   |  |  |  |  |  |
|       |                |            |     |                               |              |                        |             | -154         | 68.1                            |                                                                                                     |                                                                                                      |                          |                                                                   |  |  |  |  |  |
|       |                |            |     |                               |              |                        |             | -107         | 366.5                           |                                                                                                     |                                                                                                      |                          |                                                                   |  |  |  |  |  |
|       |                |            |     |                               |              |                        |             | -93          | 293.2                           |                                                                                                     |                                                                                                      |                          |                                                                   |  |  |  |  |  |
|       |                |            |     |                               |              |                        |             | -76          | # 490.9                         |                                                                                                     |                                                                                                      |                          |                                                                   |  |  |  |  |  |
|       |                |            |     |                               |              |                        |             | -43          | # 434.7                         |                                                                                                     |                                                                                                      |                          |                                                                   |  |  |  |  |  |
|       | A=3D<br>(AB規格) | 25.5       |     | 35.2                          | —            | Deep<br>(40C x<br>160) |             | -160         | 78.4                            | 1416 x 10 <sup>4</sup><br>KD32:<br>(4.431 x 10 <sup>4</sup> )                                       | 5499 x 10 <sup>2</sup><br>KD32:<br>(8.530 x 10 <sup>2</sup> )                                        | 0.87<br>(0.96)           | KD32:<br>8145 x 10 <sup>3</sup>                                   |  |  |  |  |  |
|       |                |            |     |                               |              |                        |             | -145         | 342.6                           |                                                                                                     |                                                                                                      |                          |                                                                   |  |  |  |  |  |
|       |                |            |     |                               |              |                        |             | -130         | 514.8                           |                                                                                                     |                                                                                                      |                          |                                                                   |  |  |  |  |  |
|       |                |            |     |                               |              |                        |             | -110         | # 554.0                         |                                                                                                     |                                                                                                      |                          |                                                                   |  |  |  |  |  |
|       |                |            |     |                               |              |                        |             | -80          | # 485.8                         |                                                                                                     |                                                                                                      |                          |                                                                   |  |  |  |  |  |
|       |                |            |     |                               |              |                        |             | 0            | # 490.9                         |                                                                                                     |                                                                                                      |                          |                                                                   |  |  |  |  |  |
|       |                |            |     |                               |              |                        |             | -164         | 138.4                           |                                                                                                     |                                                                                                      |                          |                                                                   |  |  |  |  |  |
|       |                |            |     |                               |              |                        |             | -164         | 84.4                            |                                                                                                     |                                                                                                      |                          |                                                                   |  |  |  |  |  |
|       |                |            |     |                               |              |                        |             | -140         | 305.0                           |                                                                                                     |                                                                                                      |                          |                                                                   |  |  |  |  |  |
|       |                |            |     |                               |              |                        |             | -116         | 420.0                           |                                                                                                     |                                                                                                      |                          |                                                                   |  |  |  |  |  |
|       | L5D            |            |     | 36.6                          | -27          | Deep<br>(40C x<br>240) | MN<br>(0.1) | -98          | # 452.8                         | 1416 x 10 <sup>4</sup><br>KD32:<br>(4.431 x 10 <sup>4</sup> )                                       | 5499 x 10 <sup>2</sup><br>KD32:<br>(8.530 x 10 <sup>2</sup> )                                        | 0.87<br>(0.96)           | KD32:<br>8145 x 10 <sup>3</sup>                                   |  |  |  |  |  |
|       |                |            |     |                               |              |                        |             | -162         | 107.9                           |                                                                                                     |                                                                                                      |                          |                                                                   |  |  |  |  |  |
|       |                |            |     |                               |              |                        |             | -161         | 72.7                            |                                                                                                     |                                                                                                      |                          |                                                                   |  |  |  |  |  |
|       |                |            |     |                               |              |                        |             | -145         | 201.7                           |                                                                                                     |                                                                                                      |                          |                                                                   |  |  |  |  |  |
|       |                |            |     |                               |              |                        |             | -125         | 326.1                           |                                                                                                     |                                                                                                      |                          |                                                                   |  |  |  |  |  |
|       |                |            |     | 38                            | -5           |                        |             | -104         | # 417.6                         |                                                                                                     |                                                                                                      |                          |                                                                   |  |  |  |  |  |
|       |                |            |     |                               |              |                        |             | -165         | 56.3                            |                                                                                                     |                                                                                                      |                          |                                                                   |  |  |  |  |  |

表 5.2.1.9 亀裂発生破壊靱性値 (その 9)

| NK規格  | 鋼種             | 板厚<br>(mm)                 | 熱処理          | 降伏点<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | V <sub>TR</sub><br>(°C)    | 試験片<br>形状                           | 切欠                                  | 試験温度<br>(°C)                        | KIC値<br>(kgf/mm <sup>3/2</sup> )    | K <sub>0</sub>                      | T <sub>0</sub>                      | 決定係数   | K <sub>OMN</sub>                 |                                  |
|-------|----------------|----------------------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------|----------------------------------|----------------------------------|
| KD32級 | L5D<br>(LFR規格) | 30                         | AR           | 38                            | -5                         | Deep<br>(400 x<br>240)              | MN<br>(0.1)                         | -141                                | 159.5                               | 2780 x 10 <sup>3</sup>              | 4062 x 10 <sup>2</sup>              | 0.95   | KD32:<br>3014 x 10 <sup>3</sup>  |                                  |
|       |                |                            |              |                               |                            |                                     |                                     | -120                                | 201.7                               | KD32:<br>(1.189 x 10 <sup>4</sup> ) | KD32:<br>(7.307 x 10 <sup>2</sup> ) | (0.99) | ↓                                |                                  |
|       | K5D            |                            | 36           | -43                           | MN<br>(0.1)                | -104                                | 246.3                               |                                     |                                     |                                     |                                     |        |                                  |                                  |
|       |                |                            |              |                               |                            | -80                                 | 307.3                               |                                     |                                     |                                     |                                     |        |                                  |                                  |
|       |                |                            |              |                               |                            | -196                                | 117.3                               | 1318 x 10 <sup>3</sup>              |                                     |                                     |                                     |        |                                  |                                  |
|       |                |                            |              |                               |                            | -160                                | 147.8                               | KD32:<br>(5.869 x 10 <sup>2</sup> ) | 1979 x 10 <sup>2</sup>              | 0.82<br>(1)                         | KD32:<br>7084 x 10 <sup>3</sup>     |        |                                  |                                  |
| KE32級 | KD32           | 35                         | N            | 33                            | -63                        | Deep<br>(400 x<br>160)              | MN<br>(0.2)                         | -120                                | 485.7                               |                                     |                                     |        | K5D<br>6.873 x 10 <sup>2</sup>   |                                  |
|       |                |                            |              |                               |                            |                                     |                                     | -80                                 | 466.9                               | (5.659 x 10 <sup>2</sup> )          |                                     |        |                                  |                                  |
|       | K5E            |                            |              | 38.2                          | -38                        | MN<br>(0.1)                         | -160                                | 155.1                               |                                     |                                     |                                     |        |                                  | KD32:<br>1.136 x 10 <sup>3</sup> |
|       |                |                            |              |                               |                            |                                     | -140                                | 267.6                               |                                     |                                     |                                     |        |                                  |                                  |
|       |                |                            |              |                               |                            |                                     | -120                                | 504.6                               | 2014 x 10 <sup>3</sup>              | 2.686 x 10 <sup>2</sup>             | 0.76                                |        |                                  |                                  |
|       |                |                            |              |                               |                            |                                     | -98                                 | 514.8                               | KD32:<br>(1.946 x 10 <sup>3</sup> ) | KD32:<br>(4.297 x 10 <sup>2</sup> ) | (0.93)                              |        |                                  |                                  |
| E32   | 30             | 40                         | N            | 36                            | -43                        | Deep<br>(400 x<br>240)              | MN<br>(0.1)                         | -80                                 | 456.8                               |                                     |                                     |        | KE32:<br>8.181 x 10 <sup>2</sup> |                                  |
|       |                |                            |              |                               |                            |                                     |                                     | -60                                 | 448.3                               |                                     |                                     |        |                                  |                                  |
|       | E32            |                            |              | 36                            | -62<br>(V <sub>Trs</sub> ) | MN<br>(0.15)                        | -196                                | 89.1                                |                                     |                                     |                                     |        |                                  | 0.82                             |
|       |                |                            |              |                               |                            |                                     | -163                                | 161.9                               |                                     |                                     |                                     |        |                                  | (0.88)                           |
|       |                |                            |              |                               |                            |                                     | -153                                | 192.4                               | 1.170 x 10 <sup>3</sup>             | 2.036 x 10 <sup>2</sup>             | 0.82                                |        |                                  |                                  |
|       |                |                            |              |                               |                            |                                     | -139                                | 387.1                               | KE32:<br>(1.638 x 10 <sup>3</sup> ) | KE32:<br>(3.710 x 10 <sup>2</sup> ) | (0.88)                              |        |                                  |                                  |
| E32   | 36             | -62<br>(V <sub>Trs</sub> ) | MN<br>(0.15) | -120                          | 464.5                      |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |        |                                  |                                  |
|       |                |                            |              | -196                          | 74.2                       | K5E:<br>(1.519 x 10 <sup>3</sup> )  | K5E:<br>(3.710 x 10 <sup>2</sup> )  | (0.88)                              |                                     |                                     |                                     |        |                                  |                                  |
|       |                |                            |              | -160                          | 182.7                      |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |        |                                  |                                  |
|       |                |                            |              | -120                          | 276.9                      |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |        |                                  |                                  |
| E32   | 36             | -62<br>(V <sub>Trs</sub> ) | MN<br>(0.15) | -80                           | 278.3                      |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |        |                                  |                                  |
|       |                |                            |              | -160                          | 126.7                      | 1.918 x 10 <sup>3</sup>             | 3.001 x 10 <sup>2</sup>             | 0.87                                |                                     |                                     |                                     |        |                                  |                                  |
| E32   | 36             | -62<br>(V <sub>Trs</sub> ) | MN<br>(0.15) | -136                          | 183.0                      |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |        |                                  |                                  |
|       |                |                            |              | -120                          | 351.9                      | KE32:<br>(1.708 x 10 <sup>3</sup> ) | KE32:<br>(3.877 x 10 <sup>2</sup> ) | (0.99)                              |                                     |                                     |                                     |        |                                  |                                  |
| E32   | 36             | -62<br>(V <sub>Trs</sub> ) | MN<br>(0.15) | -100                          | 363.6                      |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |        |                                  |                                  |

表 5.2.1.10 龜裂発生破壊致性値(その10)  
(母材L方向)

| NK規格    | 鋼種                             | 板厚<br>(mm) | 熱処理 | 降伏点<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | TRe<br>(°C) | 試験片<br>形状            | 切欠           | 試験温度<br>(°C)         | KC値<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | Ko                                                                                               | To                                                                                               | 決定係数                                                                                            | KoMN                                                                                            |                         |                                                                        |  |
|---------|--------------------------------|------------|-----|-------------------------------|-------------|----------------------|--------------|----------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|------------------------------------------------------------------------|--|
| KE32級   | E32                            | 40         | N   | 36                            | -62<br>VRS  | Deep<br>(40×<br>160) | MN<br>(0.15) | -80                  | 452.8                         | ↓                                                                                                | ↓                                                                                                | ↓                                                                                               | ↓<br>KE32:<br>1.286 × 10 <sup>2</sup>                                                           |                         |                                                                        |  |
|         |                                | 50         |     | 37                            | —           |                      |              | -50                  | 398.8                         |                                                                                                  |                                                                                                  |                                                                                                 |                                                                                                 |                         |                                                                        |  |
|         |                                |            |     |                               |             |                      |              | -160                 | 131.3                         |                                                                                                  |                                                                                                  |                                                                                                 |                                                                                                 |                         |                                                                        |  |
|         |                                |            |     |                               |             |                      |              | -140                 | 220.5                         |                                                                                                  |                                                                                                  |                                                                                                 |                                                                                                 |                         |                                                                        |  |
|         |                                |            |     |                               |             |                      |              | -120                 | 244.0                         |                                                                                                  |                                                                                                  |                                                                                                 |                                                                                                 |                         |                                                                        |  |
|         |                                |            |     |                               |             |                      |              | -100                 | 333.1                         |                                                                                                  |                                                                                                  |                                                                                                 |                                                                                                 |                         |                                                                        |  |
| KD36級   | D36                            | 35         | AR  | 38.6                          | -37         |                      |              | -80                  | 401.2                         | 2.564 × 10 <sup>3</sup><br>KD36:<br>3                                                            | 2.728 × 10 <sup>2</sup><br>KE32:<br>(5.560 × 10 <sup>2</sup> )                                   | 0.97<br>(0.99)                                                                                  | ↓<br>KE32:<br>1.286 × 10 <sup>2</sup>                                                           |                         |                                                                        |  |
|         |                                |            |     |                               |             |                      |              | -50                  | 427.0                         |                                                                                                  |                                                                                                  |                                                                                                 |                                                                                                 |                         |                                                                        |  |
|         |                                |            |     |                               |             |                      |              | -160                 | 84.4                          |                                                                                                  |                                                                                                  |                                                                                                 |                                                                                                 |                         |                                                                        |  |
|         |                                |            |     |                               |             |                      |              | -140                 | 136.0                         |                                                                                                  |                                                                                                  |                                                                                                 |                                                                                                 |                         |                                                                        |  |
|         |                                |            |     |                               |             |                      |              | -120                 | 168.9                         |                                                                                                  |                                                                                                  |                                                                                                 |                                                                                                 |                         |                                                                        |  |
|         |                                |            |     |                               |             |                      |              | -96                  | 373.0                         |                                                                                                  |                                                                                                  |                                                                                                 |                                                                                                 |                         |                                                                        |  |
| KHT80N級 | River<br>ACE<br>(NK特許)<br>(系組) | 25         | QT  | 78.6                          | —           | Deep<br>(90×45)      | FN           | -60                  | 445.8                         | 2.131 × 10 <sup>3</sup><br>+<br>4.398 × 10 <sup>3</sup><br>KHT80N:<br>(7.570 × 10 <sup>3</sup> ) | 2.426 × 10 <sup>2</sup><br>+<br>2.426 × 10 <sup>2</sup><br>KHT80N:<br>(2.426 × 10 <sup>2</sup> ) | 1<br>+<br>(—)                                                                                   | KHT80N:<br>1.561 × 10 <sup>3</sup>                                                              |                         |                                                                        |  |
|         |                                |            |     |                               |             |                      |              | -40                  | 417.6                         |                                                                                                  |                                                                                                  |                                                                                                 |                                                                                                 |                         |                                                                        |  |
|         |                                |            |     |                               |             |                      |              | -196                 | 91.0                          |                                                                                                  |                                                                                                  |                                                                                                 |                                                                                                 |                         |                                                                        |  |
|         |                                |            |     |                               |             |                      |              | -164                 | 230.5                         |                                                                                                  |                                                                                                  |                                                                                                 |                                                                                                 |                         |                                                                        |  |
|         |                                |            |     |                               |             |                      |              | -143                 | 513.2                         |                                                                                                  |                                                                                                  |                                                                                                 |                                                                                                 |                         |                                                                        |  |
|         |                                |            |     |                               |             |                      |              | -131                 | 469.5                         |                                                                                                  |                                                                                                  |                                                                                                 |                                                                                                 |                         |                                                                        |  |
| KL24B級  | KT50N                          | 8          | N   | 37                            | —           |                      |              | Deep<br>(40×<br>240) |                               | -118                                                                                             | 468.6                                                                                            | 3.848 × 10 <sup>3</sup><br>+<br>4.849 × 10 <sup>3</sup><br>KL24B:<br>(1.526 × 10 <sup>3</sup> ) | 2.839 × 10 <sup>2</sup><br>+<br>1.734 × 10 <sup>2</sup><br>KL24B:<br>(3.414 × 10 <sup>2</sup> ) | 0.99<br>+0.09<br>(0.98) | KL24B:<br>1.572 × 10 <sup>3</sup><br>KT50N:<br>1.576 × 10 <sup>3</sup> |  |
|         |                                |            |     |                               |             |                      |              |                      |                               | -105                                                                                             | 476.2                                                                                            |                                                                                                 |                                                                                                 |                         |                                                                        |  |
|         |                                |            |     |                               |             |                      |              |                      |                               | -93                                                                                              | 439.2                                                                                            |                                                                                                 |                                                                                                 |                         |                                                                        |  |
|         |                                |            |     |                               |             |                      |              |                      |                               | -183                                                                                             | 169.0                                                                                            |                                                                                                 |                                                                                                 |                         |                                                                        |  |
|         |                                |            |     |                               |             |                      |              |                      |                               | -175                                                                                             | 207.0                                                                                            |                                                                                                 |                                                                                                 |                         |                                                                        |  |
|         |                                |            |     |                               |             |                      |              |                      |                               | -164                                                                                             | 279.0                                                                                            |                                                                                                 |                                                                                                 |                         |                                                                        |  |
|         |                                | 14         |     | 33                            | -111        |                      |              |                      |                               | -150                                                                                             | 391.0                                                                                            | 1.529 × 10 <sup>3</sup><br>↑                                                                    | 3.414 × 10 <sup>2</sup><br>↑                                                                    | 0.98<br>↑               | 1.576 × 10 <sup>3</sup><br>↑                                           |  |
|         |                                |            |     |                               |             |                      |              |                      |                               | -140                                                                                             | 496.0                                                                                            |                                                                                                 |                                                                                                 |                         |                                                                        |  |
|         |                                |            |     |                               |             |                      |              |                      |                               |                                                                                                  |                                                                                                  |                                                                                                 |                                                                                                 |                         |                                                                        |  |

表 5.2.1.11 龜裂発生破壊靱性値(その11)  
(母材 L 方向)

| NK規格       | 鋼種    | 板厚<br>(mm) | 熱処理 | 降伏点<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | T <sub>RE</sub><br>(℃) | 試験片<br>形状              | 切欠          | 試験温度<br>(℃) | KC値<br>(kgf/mm <sup>3/2</sup> ) | K <sub>0</sub>                       | T <sub>0</sub>                       | 決定係数   | KOMN                                     |
|------------|-------|------------|-----|-------------------------------|------------------------|------------------------|-------------|-------------|---------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------|------------------------------------------|
| KL24B<br>級 | KT50N | 14         |     | 33                            | -111                   | Deep<br>(400 x<br>160) | MN<br>(0.2) | -160        | 274.4                           | 1.763 x 10 <sup>3</sup>              | 2.252 x 10 <sup>2</sup>              | 0.96   | KL24B:<br>9.407 x 10 <sup>2</sup>        |
|            |       |            |     |                               |                        |                        |             | -130        | 335.9                           | KL24B:<br>(1.802 x 10 <sup>3</sup> ) | 3.793 x 10 <sup>2</sup>              | (1)    | KT50N:<br>9.683 x 10 <sup>2</sup>        |
|            |       |            |     |                               |                        |                        |             | -115        | # 497.7                         | KT50N:<br>(1.847 x 10 <sup>3</sup> ) | KT50N:<br>(3.787 x 10 <sup>2</sup> ) | (1)    |                                          |
|            |       |            |     |                               |                        |                        |             | -100        | # 518.2                         |                                      |                                      |        |                                          |
|            |       |            |     |                               |                        |                        |             | -170        | 157.2                           |                                      |                                      |        |                                          |
|            |       | 15         | N   | 32.5                          | -                      | Deep<br>(400 x<br>240) | FN          | -163        | 208.8                           | 8.433 x 10 <sup>3</sup>              | 4.028 x 10 <sup>2</sup>              | 0.61   |                                          |
|            |       |            |     |                               |                        |                        |             | -157        | 255.7                           | +                                    | +                                    | 0.57   |                                          |
|            |       |            |     |                               |                        |                        |             | -155        | 239.3                           | 4.097 x 10 <sup>3</sup>              | 2.373 x 10 <sup>2</sup>              |        |                                          |
|            |       |            |     |                               |                        |                        |             | -153        | 471.6                           | KL24B:<br>(1.190 x 10 <sup>3</sup> ) | KL24B:<br>(3.318 x 10 <sup>2</sup> ) | (0.46) | KL24B:<br>1.035 x 10 <sup>3</sup>        |
|            |       |            |     |                               |                        |                        |             | -140        | 337.3                           | KT50N:<br>(1.224 x 10 <sup>3</sup> ) | KT50N:<br>(3.312 x 10 <sup>2</sup> ) | (0.45) | KT50N:<br>1.070 x 10 <sup>3</sup>        |
| KL9N60     | KL9N  | 23         | QT  | 67.9                          | -                      | Deep<br>(-)            | MN<br>(-)   | -50         | # 661.0                         |                                      |                                      |        |                                          |
|            |       |            |     |                               |                        |                        |             | -30         | # 629.1                         |                                      |                                      |        |                                          |
|            |       |            |     |                               |                        |                        |             | -196        | 1023.0                          |                                      |                                      |        |                                          |
|            |       |            |     |                               |                        |                        |             | -196        | 940.8                           |                                      |                                      |        |                                          |
|            |       |            |     |                               |                        |                        |             | -196        | 858.7                           |                                      |                                      |        |                                          |
|            |       | 24         |     | 72.6                          | -                      |                        |             | -175        | #1000.9                         |                                      |                                      |        |                                          |
|            |       |            |     |                               |                        |                        |             | -175        | #1091.0                         |                                      |                                      |        |                                          |
|            |       |            |     |                               |                        |                        |             | -162        | #1001.2                         |                                      |                                      |        |                                          |
|            |       |            |     |                               |                        |                        |             | -162        | #1020.6                         | 1.034 x 10 <sup>3</sup>              | 1471 x 10                            | 0.02   | 実績最低値<br>KOMN:<br>1433 x 10 <sup>3</sup> |
|            |       |            |     |                               |                        |                        |             | -162        | # 809.5                         |                                      |                                      |        | TOMN:<br>6.836 x 10                      |
|            |       |            |     |                               |                        |                        |             | -140        | # 954.9                         | (1.171 x 10 <sup>3</sup> )           | (8.091 x 10 <sup>2</sup> )           | (0.90) |                                          |
|            |       |            |     |                               |                        |                        |             | -140        | #1030.0                         |                                      |                                      |        |                                          |
|            |       |            |     |                               |                        |                        |             | -196        | 837.6                           |                                      |                                      |        |                                          |
|            |       |            |     |                               |                        |                        |             | -196        | 905.7                           |                                      |                                      |        |                                          |
|            |       |            |     |                               |                        |                        |             | -196        | 811.8                           |                                      |                                      |        |                                          |

表 5.2.1.12 亀裂発生破壊率特性値(その12)

(組立式方向)

| NIK規格       | 鋼種   | 板厚<br>(mm) | 板端処理 | 降伏点<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | vT <sub>E</sub><br>(°C) | 試験片<br>形状             | 試験温度<br>(°C) | K <sub>C</sub> 値 <sup>2</sup><br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | K <sub>0</sub>                                    | T <sub>0</sub>                                    | 決定係数           | KOMN                                                                      |
|-------------|------|------------|------|-------------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------|---------------------------------------------------------------------------|
| KL9N60<br>級 | KL9N | 24         | QT   | 72.6                          | —                       | Deep<br>(400×<br>240) | MN<br>(0.2)  | -196                                                    | 1.034×10 <sup>3</sup><br>(1.171×10 <sup>3</sup> ) | 1.471×10 <sup>3</sup><br>(8.091×10 <sup>3</sup> ) | 0.02<br>(0.00) | 実績最低値<br>KOMN:<br>1.433×10 <sup>3</sup><br>TOMN:<br>6.836×10 <sup>3</sup> |
|             |      |            |      |                               |                         |                       |              | -196                                                    |                                                   |                                                   |                |                                                                           |
|             |      |            |      |                               |                         |                       |              | -196                                                    |                                                   |                                                   |                |                                                                           |
|             |      |            |      |                               |                         |                       |              | -190                                                    |                                                   |                                                   |                |                                                                           |
|             |      |            |      |                               |                         |                       |              | -185                                                    |                                                   |                                                   |                |                                                                           |
|             |      |            |      |                               |                         |                       |              | -180                                                    |                                                   |                                                   |                |                                                                           |
|             |      |            |      |                               |                         |                       |              | -180                                                    |                                                   |                                                   |                |                                                                           |
|             |      |            |      |                               |                         |                       |              | -180                                                    |                                                   |                                                   |                |                                                                           |
|             |      |            |      |                               |                         |                       |              | -174                                                    |                                                   |                                                   |                |                                                                           |
|             |      |            |      |                               |                         |                       |              | -162                                                    |                                                   |                                                   |                |                                                                           |
|             |      |            |      |                               |                         |                       |              | -162                                                    |                                                   |                                                   |                |                                                                           |
|             |      |            |      |                               |                         |                       |              | -162                                                    |                                                   |                                                   |                |                                                                           |
|             |      |            |      |                               |                         |                       |              | -162                                                    |                                                   |                                                   |                |                                                                           |
|             |      | 30         |      | 71.1                          |                         |                       |              | -196                                                    | 2.025×10 <sup>3</sup><br>(1.171×10 <sup>3</sup> ) | 7.826×10 <sup>3</sup><br>(8.091×10 <sup>3</sup> ) | 1<br>(0.00)    | ↓                                                                         |
|             |      |            |      |                               |                         |                       |              | -163                                                    |                                                   |                                                   |                |                                                                           |

(注)

AR : 圧延の目

N : 焼ならし

QT : 焼入れ焼どし

DecP: テーパーノッチ試験片

400×240: (板厚: 400mm, 亀裂全長: 240mm)

MN : 機械切欠

(0.2) : (亀裂先端切欠幅: 0.2mm)

FN : 疲労切欠

# : 全面降伏の値

+ : 疲労切欠に於ける生デークから

計算した値

K<sub>0</sub>, T<sub>0</sub>: K<sub>C</sub>=K<sub>oexp</sub>( $\frac{T_0-T}{T_0}$ )に於ける係数で表中無印は生デーク及び波打切欠から推定

した機械切欠の値。( )内は機械切欠から推定した疲労切欠の値。

KOMN: 機械切欠のT<sub>0</sub>を用いてT<sub>i</sub>温度に於けるK<sub>C</sub>値から次式により計算される機械切

欠の場合の値, K<sub>C</sub>=KOMNexp(- $\frac{T-T_0}{T_0}$ ),  $\delta = \frac{1}{\delta_0}(\frac{T_0}{T_0})$ ,  $\delta = 40 = (0.00321 \delta_0 + 0.391)$

vT<sub>E</sub>+2.74 $\sqrt{T-541(K)}$ , ここで $\delta_0$ はJIS NK 規格の降伏点, vT<sub>E</sub>は NK 規格の

V シミュレーション値よりWES3003G 種改正案のV シミュレーション値からの推定値。

実績最低値のKOMN, TOMN: 上記の方法により無印係に今までの実績値の最低から求めた値

決定係数: アプローチ型に直線近似した場合の直線式とデークとの一致度を表わし

1に近い程デークとの一致が見え。

| 組種  | 処理   | 処理 | 記号 | 備考                 |
|-----|------|----|----|--------------------|
| KAS | 9    | AR | ①  | 鉄鋼協会デニール分、デニール試験値  |
|     |      |    | ②  | NK規格(KA)のVTEからの推算値 |
|     |      |    | ③  | "                  |
|     | 19   | AR | ④  | 鉄鋼協会デニール分、デニール試験値  |
|     |      |    | ⑤  | NK規格(KA)のVTEからの推算値 |
|     |      |    | ⑥  | "                  |
| 20  | 25.4 | AR | ⑦  | 鉄鋼協会デニール分、デニール試験値  |
|     |      |    | ⑧  | NK規格(KA)のVTEからの推算値 |
|     |      |    | ⑨  | "                  |

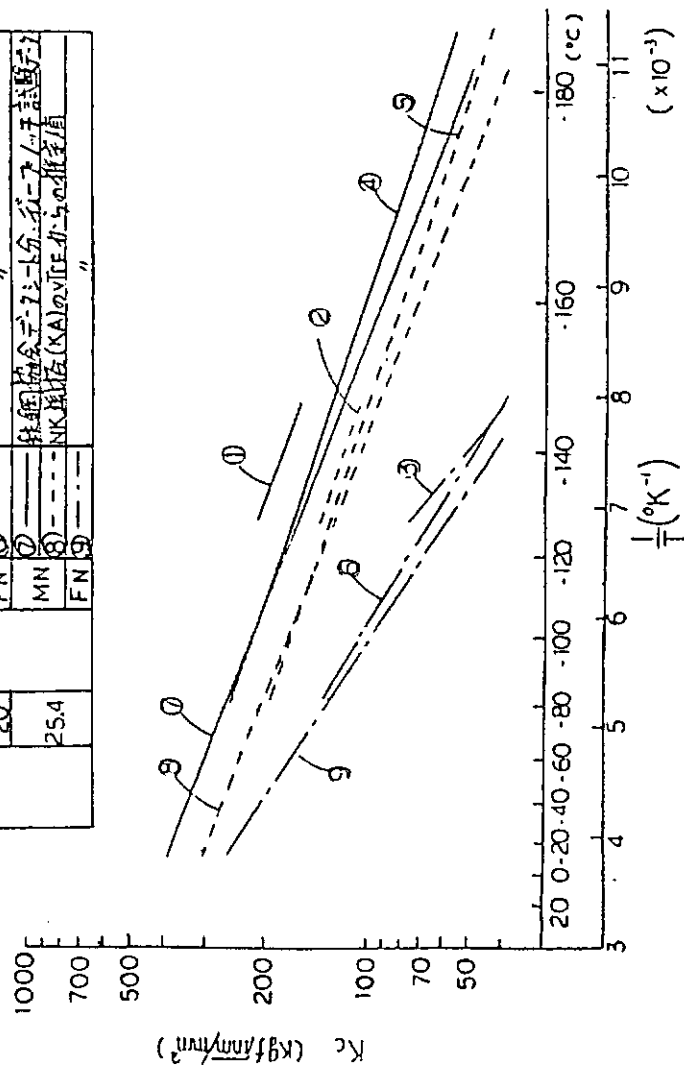


図5.2.11 KASの破壊物性値(母材方向)  
 破壊切欠に対する試験結果からNK規格値からの試験切欠値に  
 変換切欠に対する推算値)

| 組種  | 処理   | 処理 | 記号 | 備考                 |
|-----|------|----|----|--------------------|
| LAS | 23.5 | AR | ①  | 鉄鋼協会デニール分、デニール試験値  |
|     |      |    | ②  | NK規格(KA)のVTEからの推算値 |
|     |      |    | ③  | "                  |
| ARS | 25.5 | AR | ④  | 鉄鋼協会デニール分、デニール試験値  |
|     |      |    | ⑤  | NK規格(KA)のVTEからの推算値 |
|     |      |    | ⑥  | "                  |
| KB  | 27   | AR | ⑦  | 鉄鋼協会デニール分、デニール試験値  |
|     |      |    | ⑧  | NK規格(KA)のVTEからの推算値 |
|     |      |    | ⑨  | "                  |

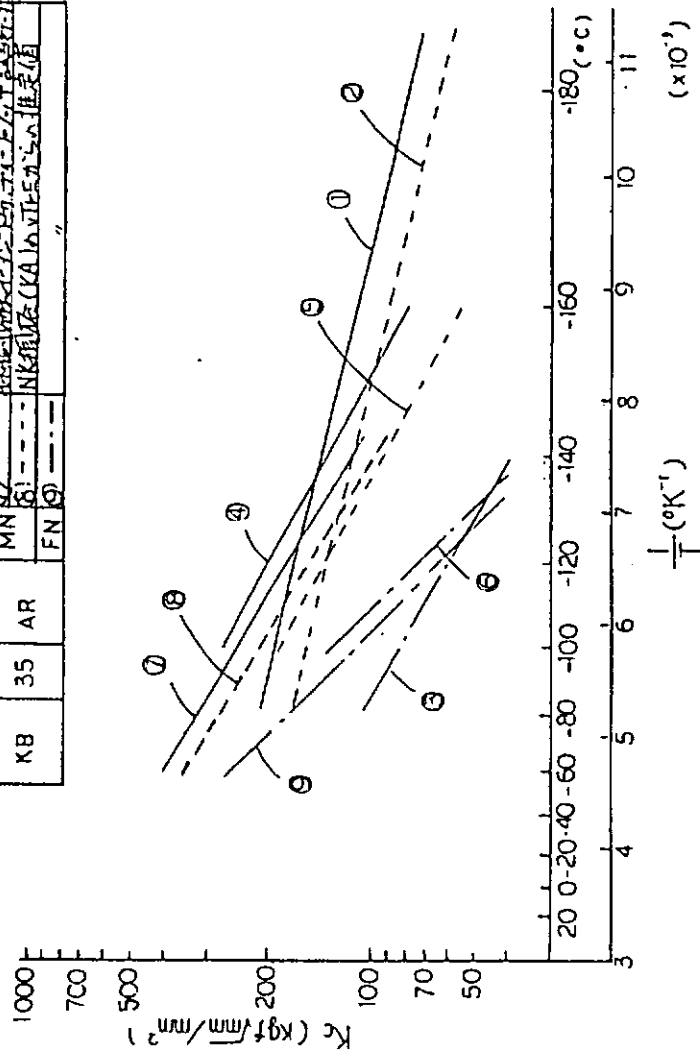


図5.2.12 LAS, ARS, KBの破壊物性値(母材方向)  
 破壊切欠に対する試験結果からNK規格値からの試験切欠値に  
 変換切欠に対する推算値)

| 紙種  | 紙厚   | 紙種 | 紙厚 | 備考                   |
|-----|------|----|----|----------------------|
| KDK | 25.4 | AR | ①  | 紙種規格 (KDK) の平均値から推定値 |
|     |      |    | ②  | 紙種規格 (KDK) の平均値から推定値 |
|     |      | FN | ③  | 紙種規格 (KDK) の平均値から推定値 |
|     | N    | MN | ④  | 紙種規格 (KDK) の平均値から推定値 |
|     |      | FN | ⑤  | 紙種規格 (KDK) の平均値から推定値 |
|     |      | FN | ⑥  | 紙種規格 (KDK) の平均値から推定値 |
| KD  | 35   | AR | ⑦  | 紙種規格 (KDK) の平均値から推定値 |
|     |      |    | ⑧  | 紙種規格 (KDK) の平均値から推定値 |
|     |      | FN | ⑨  | 紙種規格 (KDK) の平均値から推定値 |
|     | AR   | MN | ⑩  | 紙種規格 (KDK) の平均値から推定値 |
|     |      | FN | ⑪  | 紙種規格 (KDK) の平均値から推定値 |
|     |      | FN | ⑫  | 紙種規格 (KDK) の平均値から推定値 |
| KDK | 38   | MN | ⑬  | 紙種規格 (KDK) の平均値から推定値 |
|     |      | FN | ⑭  | 紙種規格 (KDK) の平均値から推定値 |
|     |      | FN | ⑮  | 紙種規格 (KDK) の平均値から推定値 |

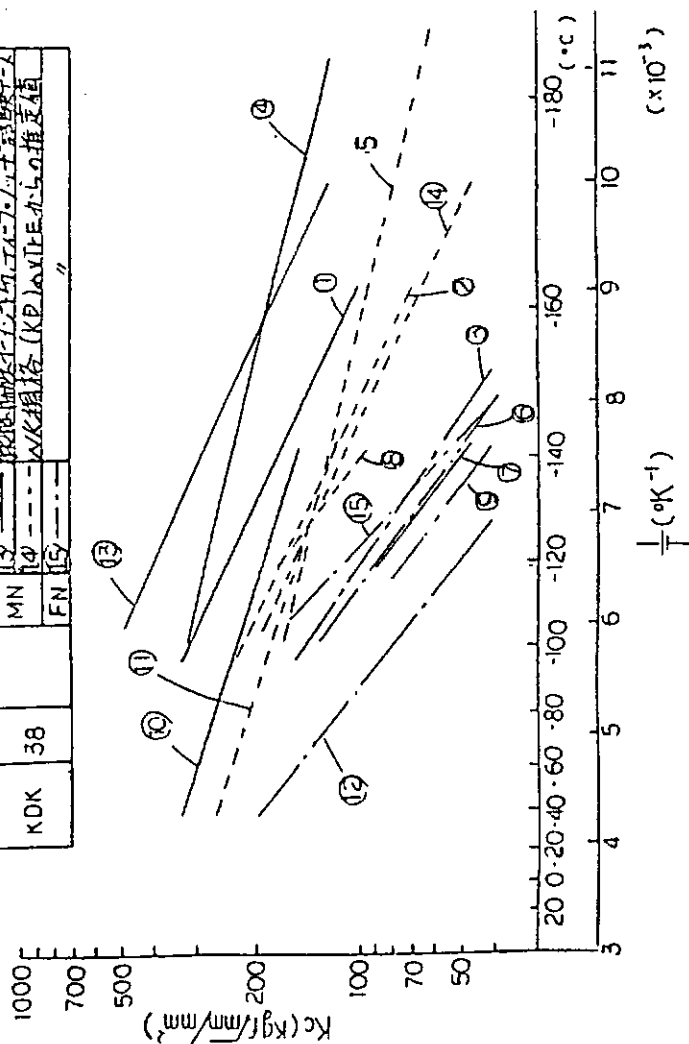


図 5.2.13 KDK, KD の破壊物性値 (紙種規格)  
紙種規格と紙種規格結果と紙種規格値からの破壊物性値との差を比較して推定値

| 紙種  | 紙厚 | 紙種 | 紙厚 | 備考                   |
|-----|----|----|----|----------------------|
| KEN | 20 | MN | ①  | 紙種規格 (KEN) の平均値から推定値 |
|     |    |    | ②  | 紙種規格 (KEN) の平均値から推定値 |
|     |    | FN | ③  | 紙種規格 (KEN) の平均値から推定値 |
|     | 30 | MN | ④  | 紙種規格 (KEN) の平均値から推定値 |
|     |    | FN | ⑤  | 紙種規格 (KEN) の平均値から推定値 |
|     |    | FN | ⑥  | 紙種規格 (KEN) の平均値から推定値 |
| KE  | 40 | MN | ⑦  | 紙種規格 (KEN) の平均値から推定値 |
|     |    |    | ⑧  | 紙種規格 (KEN) の平均値から推定値 |
|     |    | FN | ⑨  | 紙種規格 (KEN) の平均値から推定値 |
|     | 50 | MN | ⑩  | 紙種規格 (KEN) の平均値から推定値 |
|     |    | FN | ⑪  | 紙種規格 (KEN) の平均値から推定値 |
|     |    | FN | ⑫  | 紙種規格 (KEN) の平均値から推定値 |

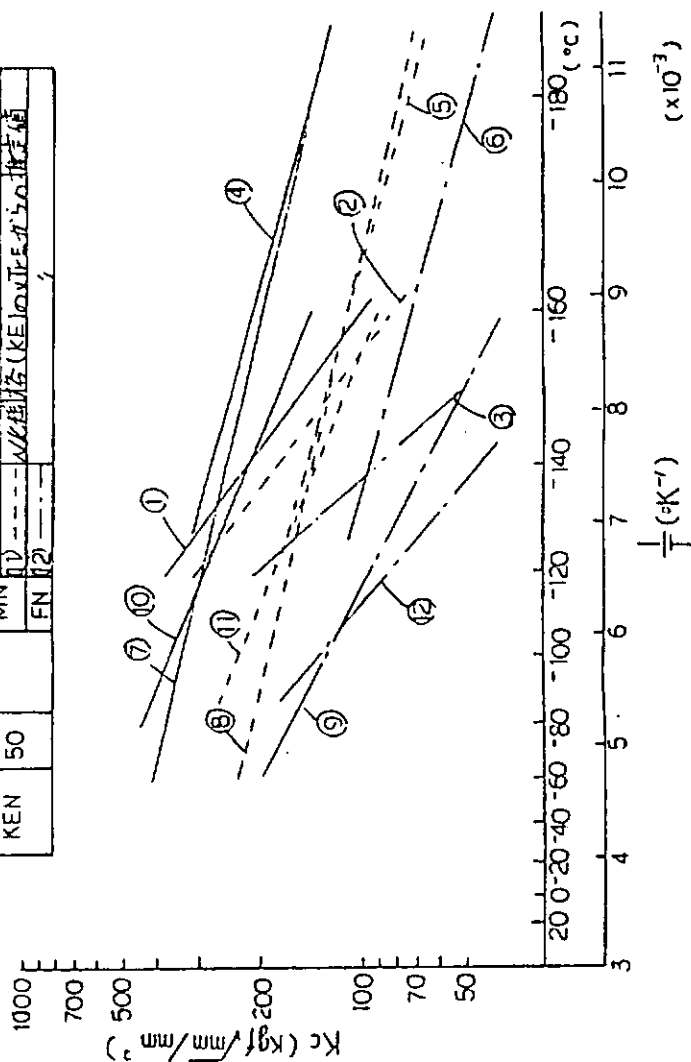


図 5.2.14 KEN, KE の破壊物性値 (紙種規格)  
紙種規格と紙種規格結果と紙種規格値からの破壊物性値との差を比較して推定値

| 鋼種  | 板厚  | 熱処理 | 切欠 | 記号 | 備考                          |
|-----|-----|-----|----|----|-----------------------------|
| K5D | 127 | AR  |    | ①  | 縦張試験片を2分割して2分割試験片より機械的性質を測定 |
|     |     |     |    | ②  | 機械的性質 (K5D) の平均値            |
|     |     |     |    | ③  | 機械的性質 (K5D) の平均値            |
|     |     |     |    | ④  | 機械的性質 (K5D) の平均値            |
|     |     |     |    | ⑤  | 機械的性質 (K5D) の平均値            |
|     | 25  | N   |    | ⑥  | 縦張試験片を2分割して2分割試験片より機械的性質を測定 |
|     |     |     |    | ⑦  | 機械的性質 (K5D) の平均値            |
|     |     |     |    | ⑧  | 機械的性質 (K5D) の平均値            |
|     |     |     |    | ⑨  | 機械的性質 (K5D) の平均値            |
|     |     |     |    | ⑩  | 機械的性質 (K5D) の平均値            |

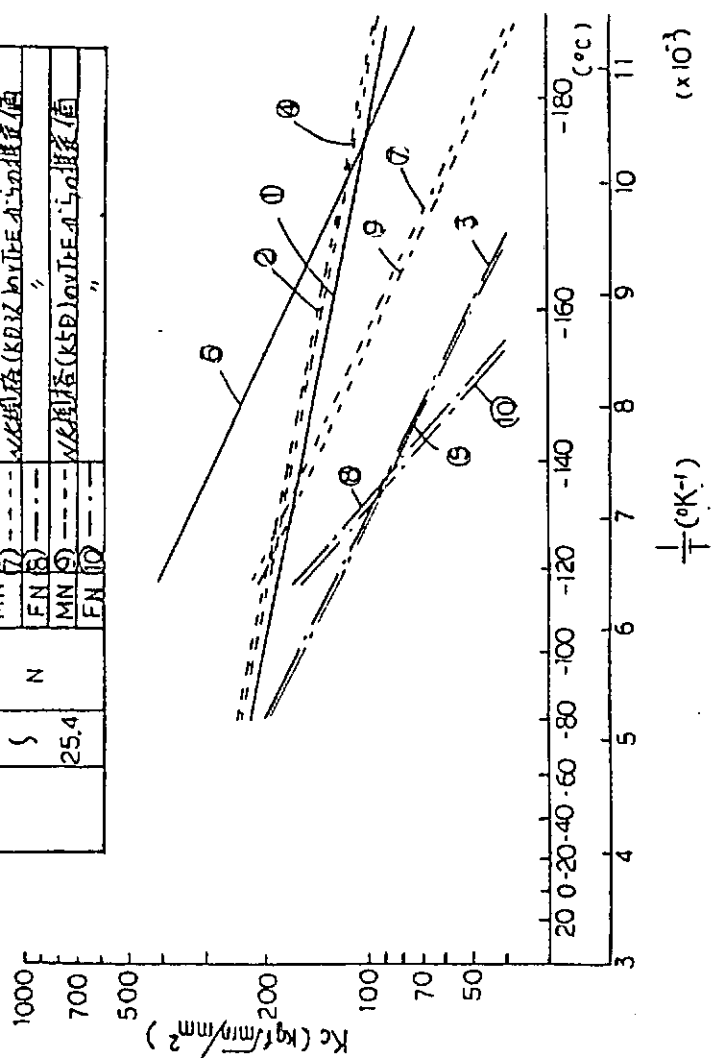


図 5.2.1.6 K5D の破壊物性値 (母材 6 方向)  
(機械的性質は縦張試験結果より機械的性質の平均値より推定)

| 鋼種   | 板厚 | 熱処理 | 切欠 | 記号 | 備考                          |
|------|----|-----|----|----|-----------------------------|
| A33A | 23 | AR  |    | ①  | 縦張試験片を2分割して2分割試験片より機械的性質を測定 |
|      |    |     |    | ②  | 機械的性質 (K5A) の平均値            |
|      |    |     |    | ③  | 機械的性質 (K5A) の平均値            |
|      |    |     |    | ④  | 機械的性質 (K5A) の平均値            |
|      |    |     |    | ⑤  | 機械的性質 (K5A) の平均値            |
| K5A  | 30 |     |    | ⑥  | 縦張試験片を2分割して2分割試験片より機械的性質を測定 |
|      |    |     |    | ⑦  | 機械的性質 (K5A) の平均値            |
|      |    |     |    | ⑧  | 機械的性質 (K5A) の平均値            |
|      |    |     |    | ⑨  | 機械的性質 (K5A) の平均値            |
|      |    |     |    | ⑩  | 機械的性質 (K5A) の平均値            |

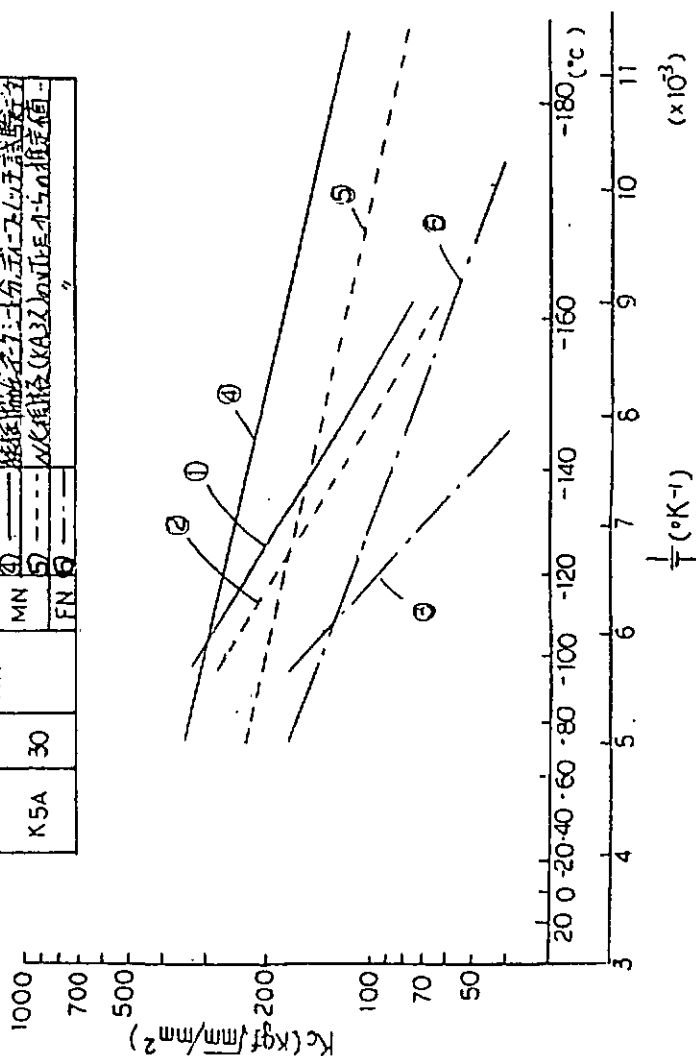


図 5.2.1.5 A33A, K5A の破壊物性値 (母材 6 方向)  
(機械的性質は縦張試験結果より機械的性質の平均値より推定)

| 鋼種   | 板厚   | 処理 | 切欠 | 記号 | 備考                       |
|------|------|----|----|----|--------------------------|
| K50  | 25.4 | AR | ①  | MN | 鉄板の強度を1/2分、デフォーマン試験値より推定 |
|      |      |    | ②  | FN | NK規格 (K50) のVTEからの推定値    |
|      |      |    | ③  | FN | "                        |
|      |      |    | ④  | FN | NK規格 (K50) のVTEからの推定値    |
| A33D | 25.5 |    | ⑤  | MN | 鉄板の強度を1/2分、デフォーマン試験値より推定 |
|      |      |    | ⑥  | FN | NK規格 (K50) のVTEからの推定値    |
|      |      |    | ⑦  | FN | "                        |
|      |      |    | ⑧  | FN | NK規格 (K50) のVTEからの推定値    |
| L50  | 30   |    | ⑨  | MN | 鉄板の強度を1/2分、デフォーマン試験値より推定 |
|      |      |    | ⑩  | FN | NK規格 (K50) のVTEからの推定値    |

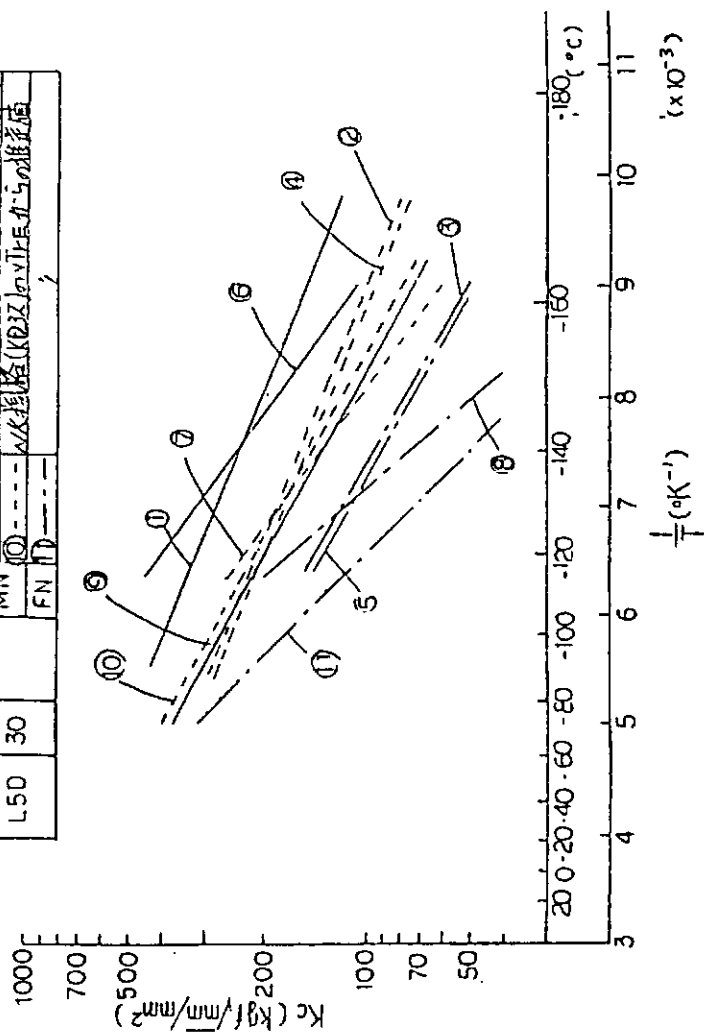


図 5.2.1.7 K50, A33D, L50 の破壊靱性値 (図表 1 方向)  
(試験切欠と板厚を試験結果および NK 規格値からの試験切欠  
および最前切欠と材料の推定値)

| 鋼種   | 板厚 | 処理 | 切欠 | 記号 | 備考                       |
|------|----|----|----|----|--------------------------|
| K50  | 30 | N  | ①  | MN | 鉄板の強度を1/2分、デフォーマン試験値より推定 |
|      |    |    | ②  | FN | NK規格 (K50) のVTEからの推定値    |
|      |    |    | ③  | FN | "                        |
|      |    |    | ④  | FN | NK規格 (K50) のVTEからの推定値    |
|      |    |    | ⑤  | FN | "                        |
| KD32 | 35 |    | ⑥  | MN | 鉄板の強度を1/2分、デフォーマン試験値より推定 |
|      |    |    | ⑦  | FN | NK規格 (K50) のVTEからの推定値    |
|      |    |    | ⑧  | FN | "                        |

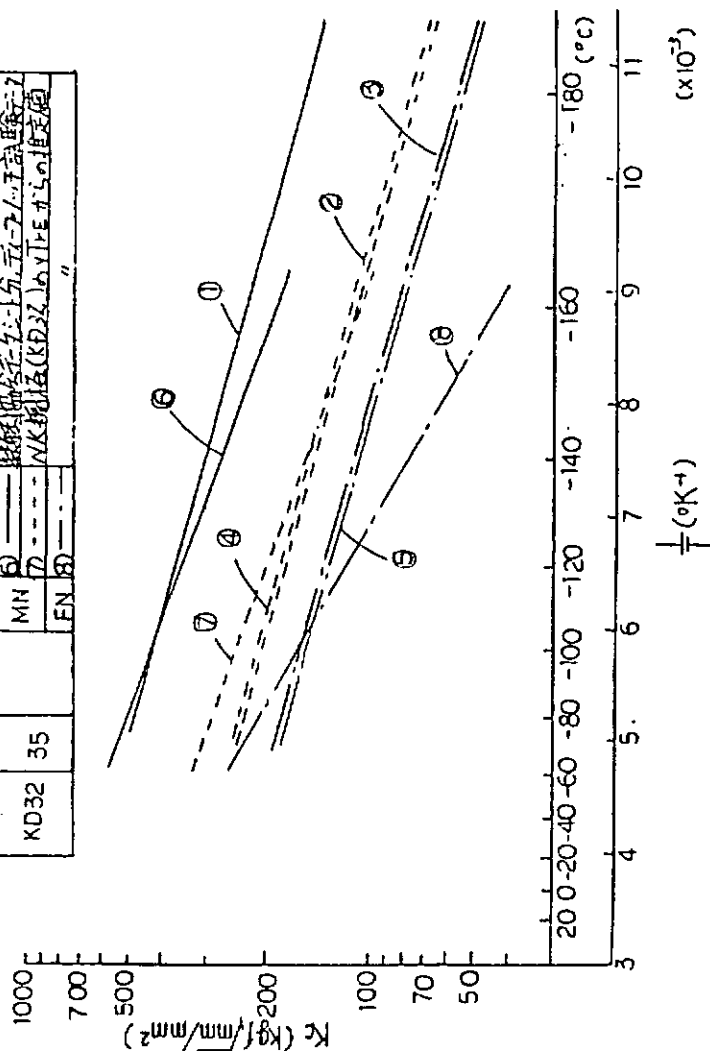


図 5.2.1.8 K50, KD32 の破壊靱性値 (図表 1 方向)  
(試験切欠と板厚を試験結果および NK 規格値からの試験切欠  
および最前切欠と材料の推定値)

| 材料   | 板厚 | 処理 | 加工 | 記号 | 備考           |
|------|----|----|----|----|--------------|
| KSE  | 30 | N  |    | ①  | 試験結果より平均値を算出 |
|      |    |    |    | MN | 試験結果より平均値を算出 |
|      |    |    |    | ②  | 試験結果より平均値を算出 |
|      |    |    |    | FN | 試験結果より平均値を算出 |
|      |    |    |    | ③  | 試験結果より平均値を算出 |
| E 32 | 40 | N  |    | ④  | 試験結果より平均値を算出 |
|      |    |    |    | MN | 試験結果より平均値を算出 |
|      |    |    |    | ⑤  | 試験結果より平均値を算出 |
|      |    |    |    | FN | 試験結果より平均値を算出 |
|      |    |    |    | ⑥  | 試験結果より平均値を算出 |
|      | 50 | N  |    | ⑦  | 試験結果より平均値を算出 |
|      |    |    |    | MN | 試験結果より平均値を算出 |
|      |    |    |    | ⑧  | 試験結果より平均値を算出 |
|      |    |    |    | FN | 試験結果より平均値を算出 |
|      |    |    |    | ⑨  | 試験結果より平均値を算出 |

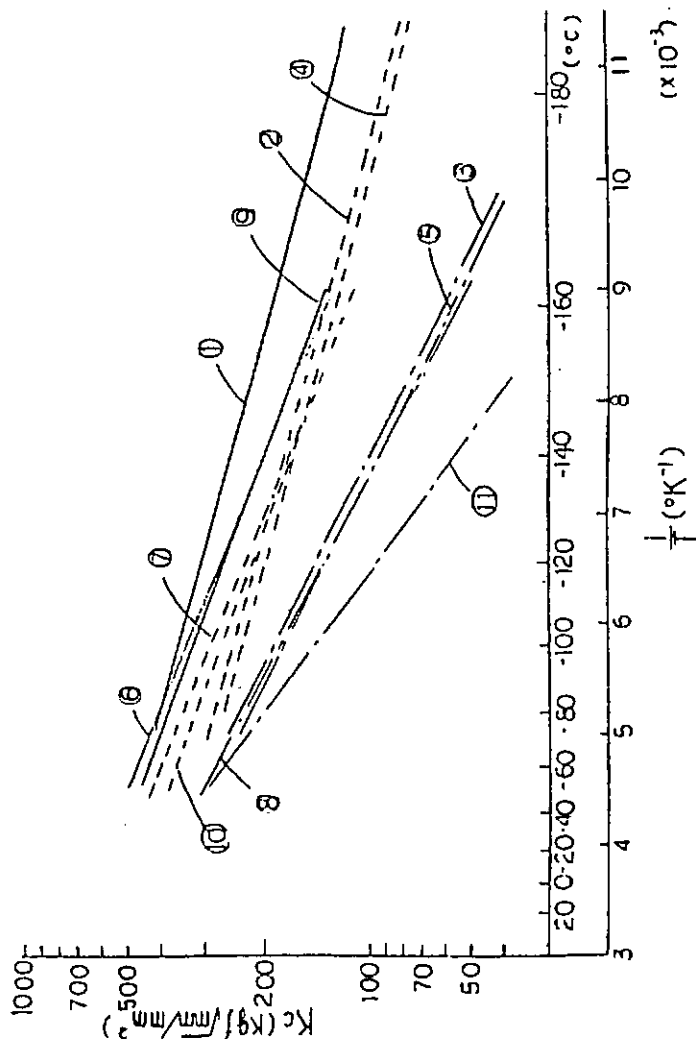


図 5.2.1.9 KSE, E32 の破壊数値 (母材 L 方向)  
 試験結果より平均値を算出 (母材 L 方向)  
 疲労切欠に対する係数値

| 材料    | 板厚 | 処理 | 加工 | 記号 | 備考           |
|-------|----|----|----|----|--------------|
| D36   | 35 | N  |    | ①  | 試験結果より平均値を算出 |
|       |    |    |    | MN | 試験結果より平均値を算出 |
|       |    |    |    | ②  | 試験結果より平均値を算出 |
|       |    |    |    | FN | 試験結果より平均値を算出 |
| RACEK | 25 | QT |    | ③  | 試験結果より平均値を算出 |
|       |    |    |    | MN | 試験結果より平均値を算出 |
|       |    |    |    | ④  | 試験結果より平均値を算出 |
|       |    |    |    | ⑤  | 試験結果より平均値を算出 |
|       |    |    |    | ⑥  | 試験結果より平均値を算出 |
| -0    |    |    |    | ⑦  | 試験結果より平均値を算出 |
|       |    |    |    | ⑧  | 試験結果より平均値を算出 |

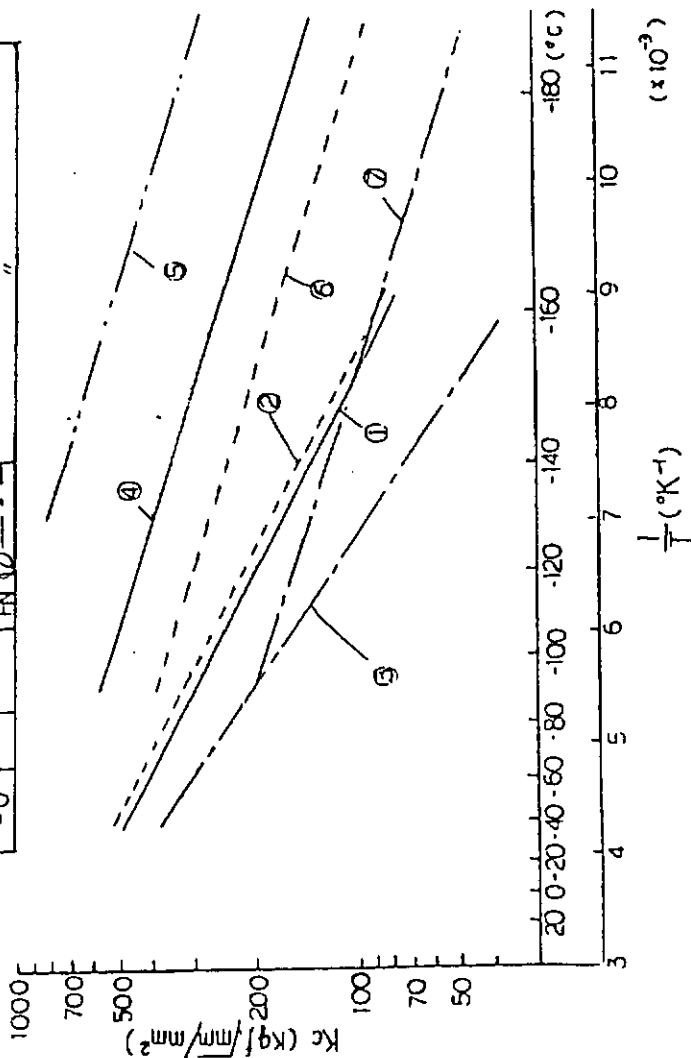


図 5.2.1.10 D36, RACEK-0 の破壊数値 (母材 L 方向)  
 試験結果より平均値を算出 (母材 L 方向)  
 疲労切欠に対する係数値

| 試験板屋敷処理切欠 | 記号   | 備考                       |
|-----------|------|--------------------------|
| 8         | FN ① | 鉄鋼協会デ-7分・デ-2分・デ-2分試験     |
|           | MN ② | 自レデ-7分からの推定値             |
|           | MN ③ | NK規格 (K024B) のVtFEからの推定値 |
|           | FN ④ | "                        |
| 14        | MN ⑤ | NK規格 (KT50N) のVtFEからの推定値 |
|           | FN ⑥ | "                        |
|           | MN ⑦ | 鉄鋼協会デ-7分・デ-2分・デ-2分試験     |
|           | MN ⑧ | NK規格 (K024B) のVtFEからの推定値 |
| 15        | FN ⑨ | "                        |
|           | MN ⑩ | NK規格 (KT50N) のVtFEからの推定値 |
|           | FN ⑪ | "                        |
|           | FN ⑫ | 鉄鋼協会デ-7分・デ-2分・デ-2分試験     |
| 15        | MN ⑬ | 自レデ-7分からの推定値             |
|           | MN ⑭ | NK規格 (K024B) のVtFEからの推定値 |
|           | FN ⑮ | "                        |
|           | MN ⑯ | NK規格 (KT50N) のVtFEからの推定値 |

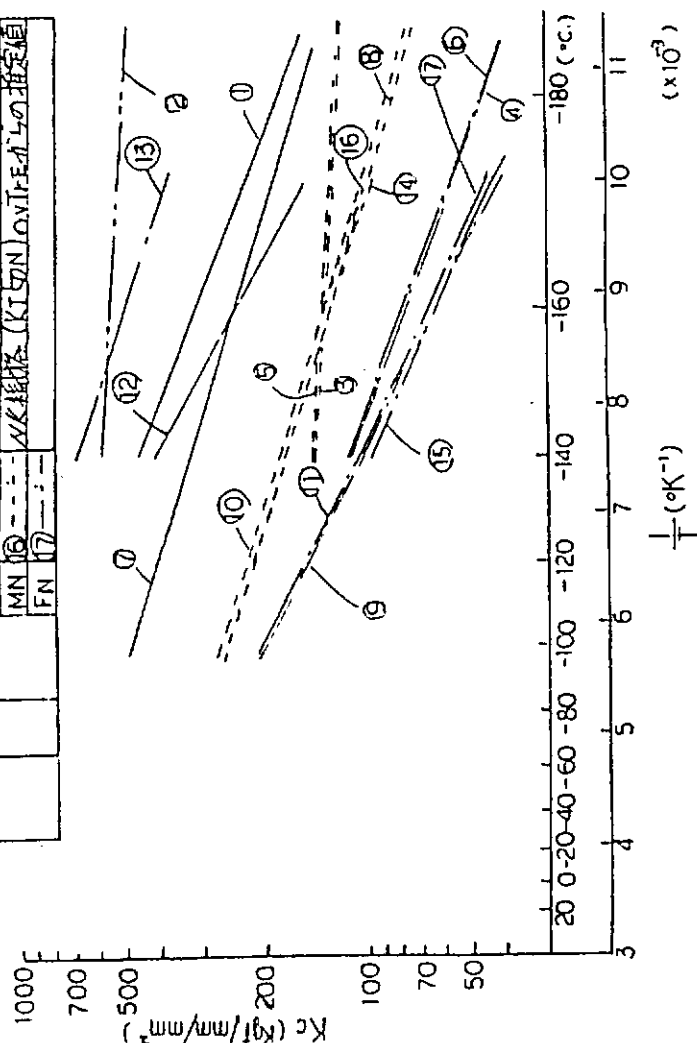


図 5.2.1.11 KT50N の破壊挙動性値 (母材 L 方向)  
(機械切欠・疲労切欠と比較して試験結果および NK 規格値からの  
機械切欠および疲労切欠に対する推定値)

| 鋼種   | 板厚 | 熱処理 | 記号   | 備考                   |
|------|----|-----|------|----------------------|
| KL9N | 23 | QT  | ①    | 鉄鋼協会デ-7分・デ-2分・デ-2分試験 |
|      | 24 |     | MN ② | "                    |
|      | 30 |     | ③    | 破壊最低値 (造研 R024B 報告)  |
|      | 35 |     | FN ④ | 自レデ-7分からの推定値         |

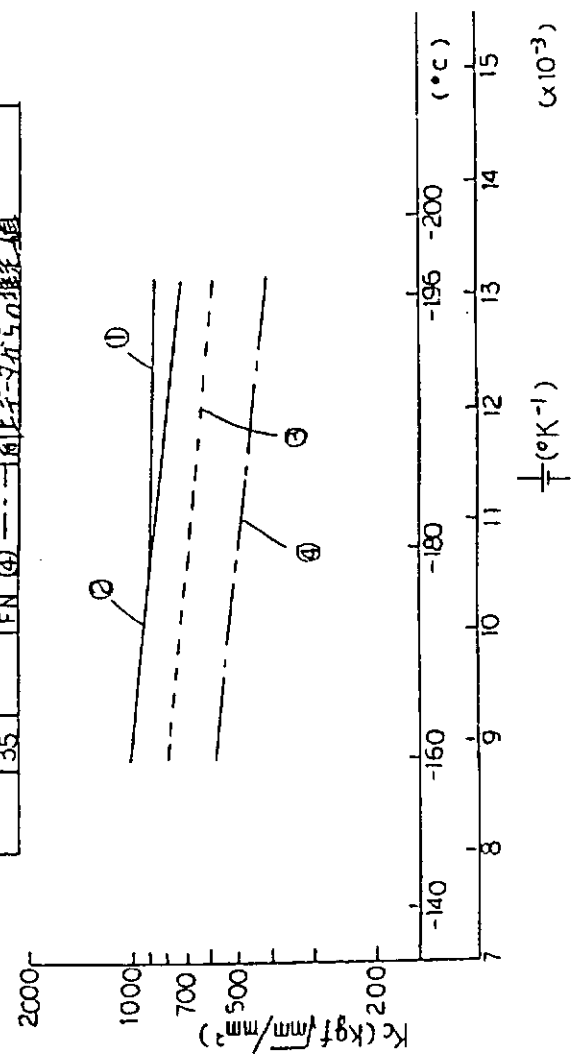


図 5.2.1.12 KL9N の破壊挙動性値 (母材 L 方向)  
(機械切欠と比較して試験結果および破壊最低値の機械切欠からの  
疲労切欠に対する推定値)

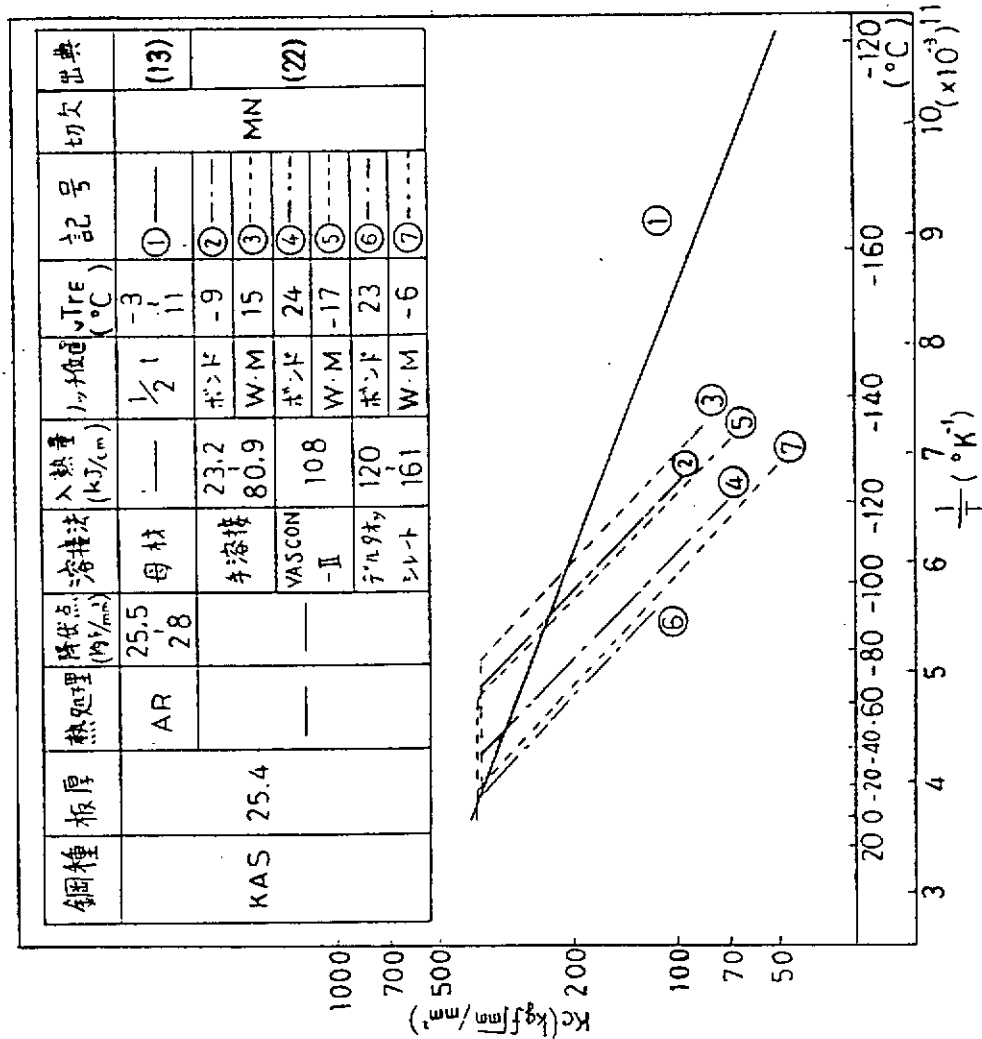


図 5.2.1.13 KASの母材及び単結実合せ溶接継手の破壊靱性値 (L方向)

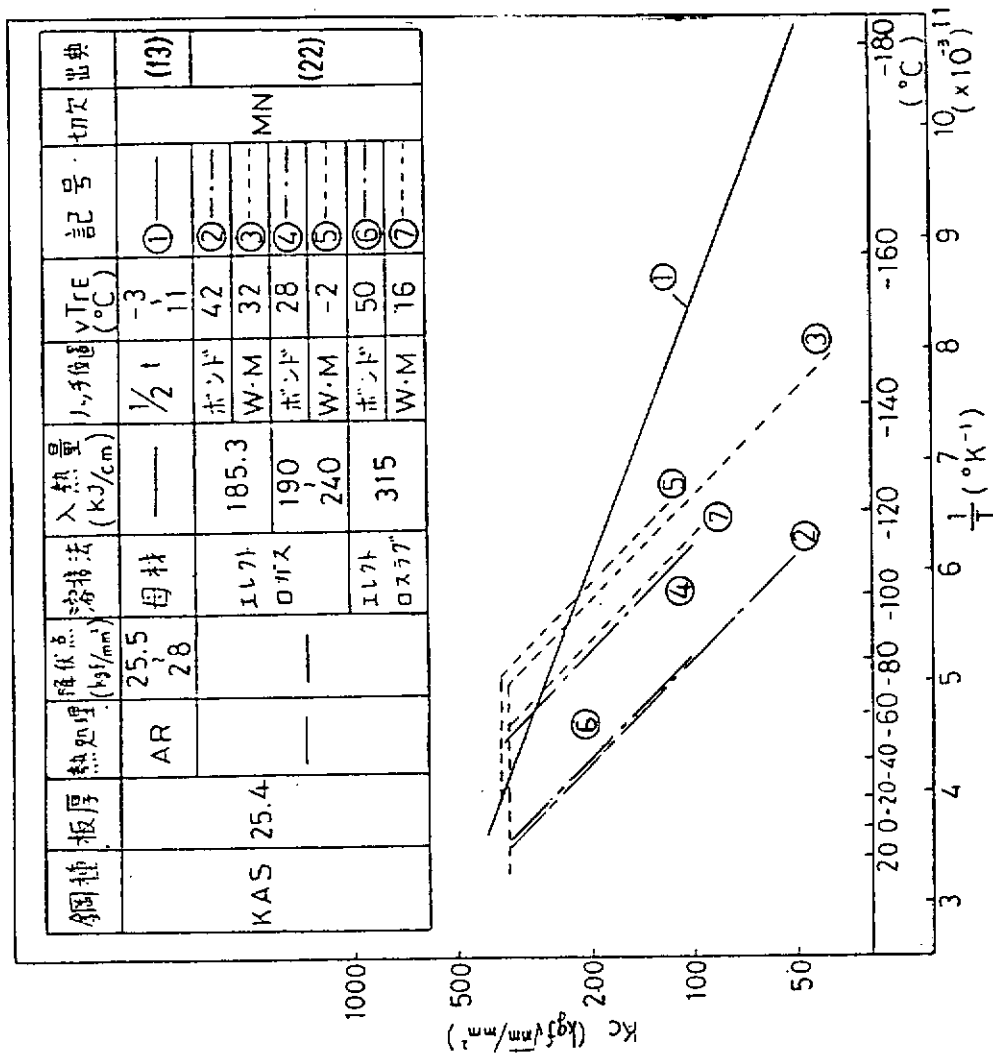


図 5.2.1.14 KASの母材及び単結実合せ溶接継手の破壊靱性値 (L方向)

図 5.2.1.15 KDKの母材及び溶接継手の破壊靱性値 (L方向)

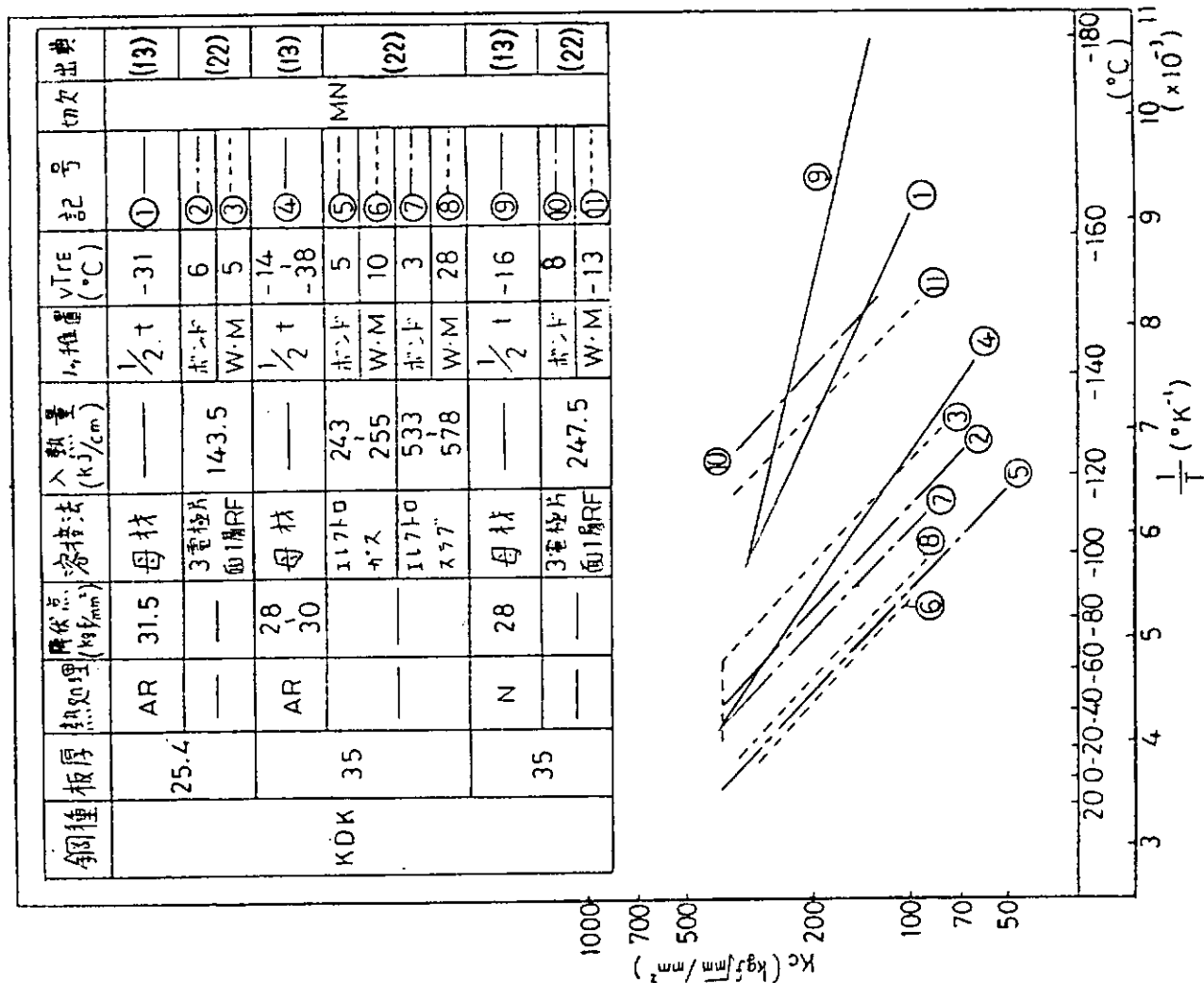
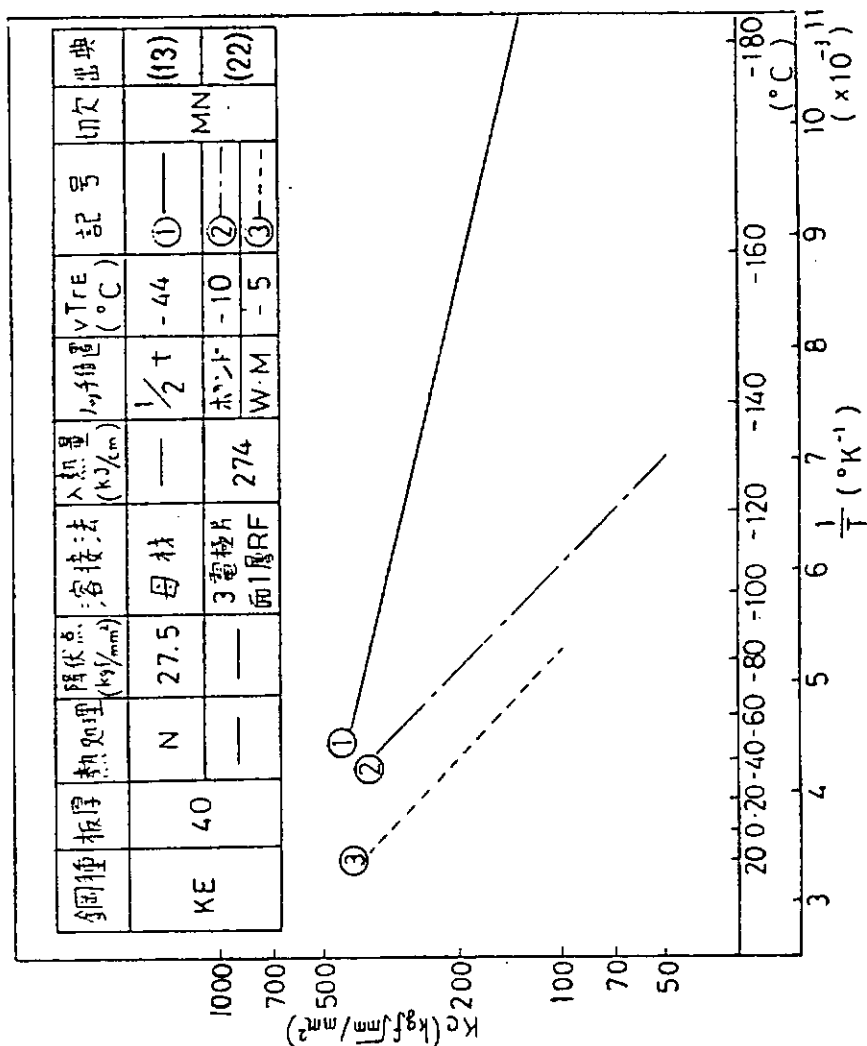


図 5.2.1.16 KEの母材及び溶接継手の破壊靱性値 (L方向)



| 鋼種  | 板厚   | 熱処理 | 降伏点<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | 溶接法    | 入熱量<br>(kJ/cm) | 1/2位置<br>VRE (°C) | 記号 | 切欠 | 出典   |
|-----|------|-----|-------------------------------|--------|----------------|-------------------|----|----|------|
| K5D | 25   | N   | 34                            | 母材     | —              | 1/2 t             | ①  | —  | (13) |
|     | 25.4 | —   | 35                            | —      | —              | ボンド               | ②  | —  | (22) |
|     | 25.4 | —   | —                             | 手溶接    | 26.4           | W・M               | ③  | —  | (13) |
|     | —    | AR  | 34.5                          | 母材     | —              | 1/2 t             | ④  | —  | (22) |
|     | —    | —   | 38                            | —      | —              | ボンド               | ⑤  | —  | (13) |
|     | —    | —   | —                             | VASCON | 117            | W・M               | ⑥  | —  | (22) |
|     | —    | —   | —                             | 3電極片   | 139.5          | ボンド               | ⑦  | —  | (13) |
|     | 25.4 | —   | —                             | 面1層RF  | 134            | W・M               | ⑧  | —  | (22) |
|     | —    | —   | —                             | エレクトロ  | 142            | ボンド               | ⑨  | —  | (13) |
|     | —    | —   | —                             | ガス     | 120            | W・M               | ⑩  | —  | (22) |
|     | —    | —   | —                             | 7電9オ   | 161            | ボンド               | ⑪  | —  | (13) |
|     | —    | —   | —                             | シート    | —              | W・M               | ⑫  | —  | (22) |

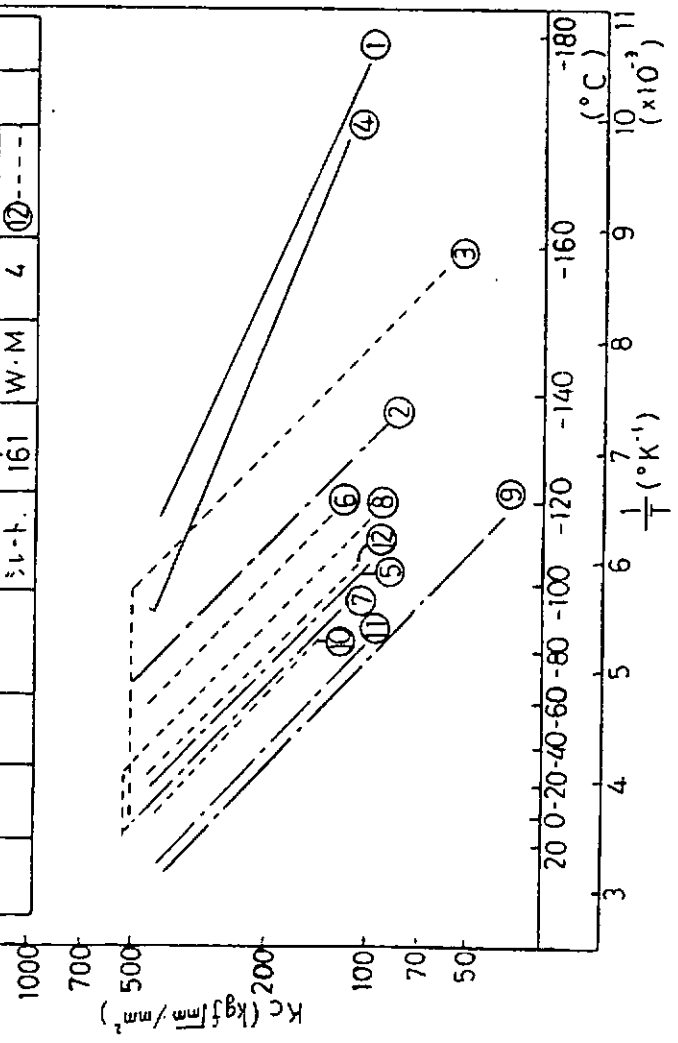


図 5.2.1.17 K5Dの母材及び単純突合せ溶接継手の破壊靱性値 (L方向)

| 鋼種  | 板厚   | 熱処理 | 降伏点<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | 溶接法   | 入熱量<br>(kJ/cm) | 1/2位置<br>VRE (°C) | 記号 | 切欠 | 出典   |
|-----|------|-----|-------------------------------|-------|----------------|-------------------|----|----|------|
| K5D | 25   | N   | 34                            | 母材    | —              | 1/2 t             | ①  | —  | (13) |
|     | 25.4 | —   | 35                            | —     | —              | ボンド               | ②  | —  | (22) |
|     | —    | —   | —                             | エレクトロ | 166.5          | W・M               | ③  | —  | (13) |
|     | —    | —   | —                             | ガス    | 172.4          | ボンド               | ④  | —  | (22) |
|     | 25.4 | —   | —                             | —     | 183.2          | W・M               | ⑤  | —  | (13) |
|     | —    | —   | —                             | —     | 141.1          | ボンド               | ⑥  | —  | (22) |
|     | —    | —   | —                             | —     | 197.6          | W・M               | ⑦  | —  | (13) |
|     | —    | AR  | 34.5                          | 母材    | —              | 1/2 t             | ⑧  | —  | (22) |
|     | —    | —   | 38                            | —     | —              | ボンド               | ⑨  | —  | (13) |
|     | 25.4 | —   | —                             | CES   | 392            | ボンド               | ⑩  | —  | (22) |
|     | —    | —   | —                             | —     | 426            | W・M               | ⑪  | —  | (13) |
|     | —    | —   | —                             | —     | —              | —                 | ⑫  | —  | (22) |

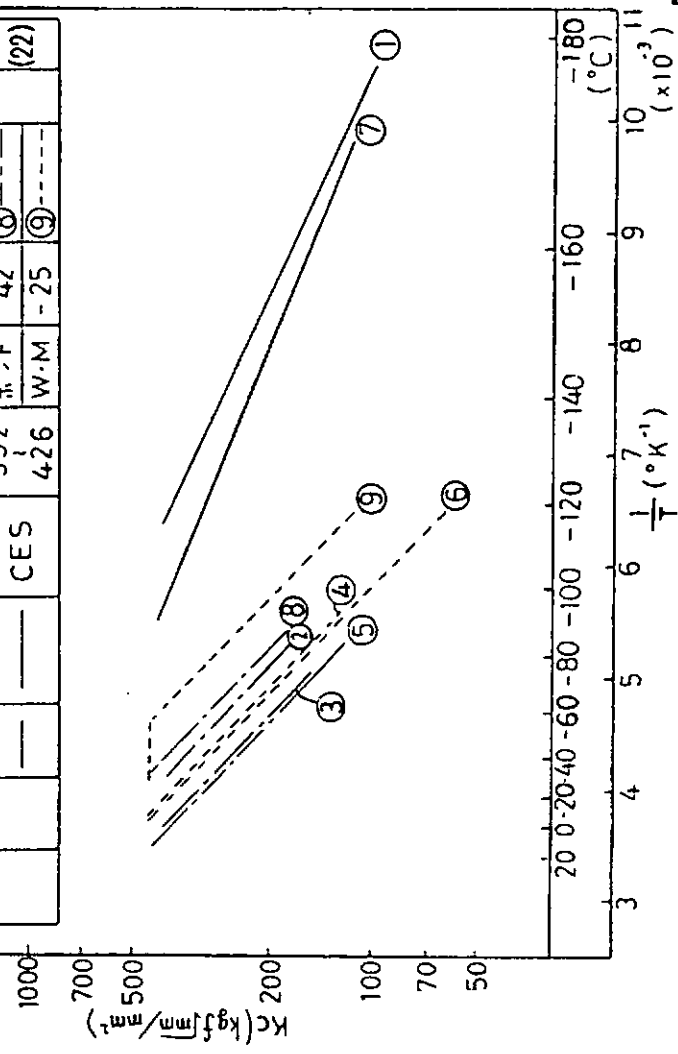


図 5.2.1.18 K5Dの母材及び単純突合せ溶接継手の破壊靱性値 (L方向)

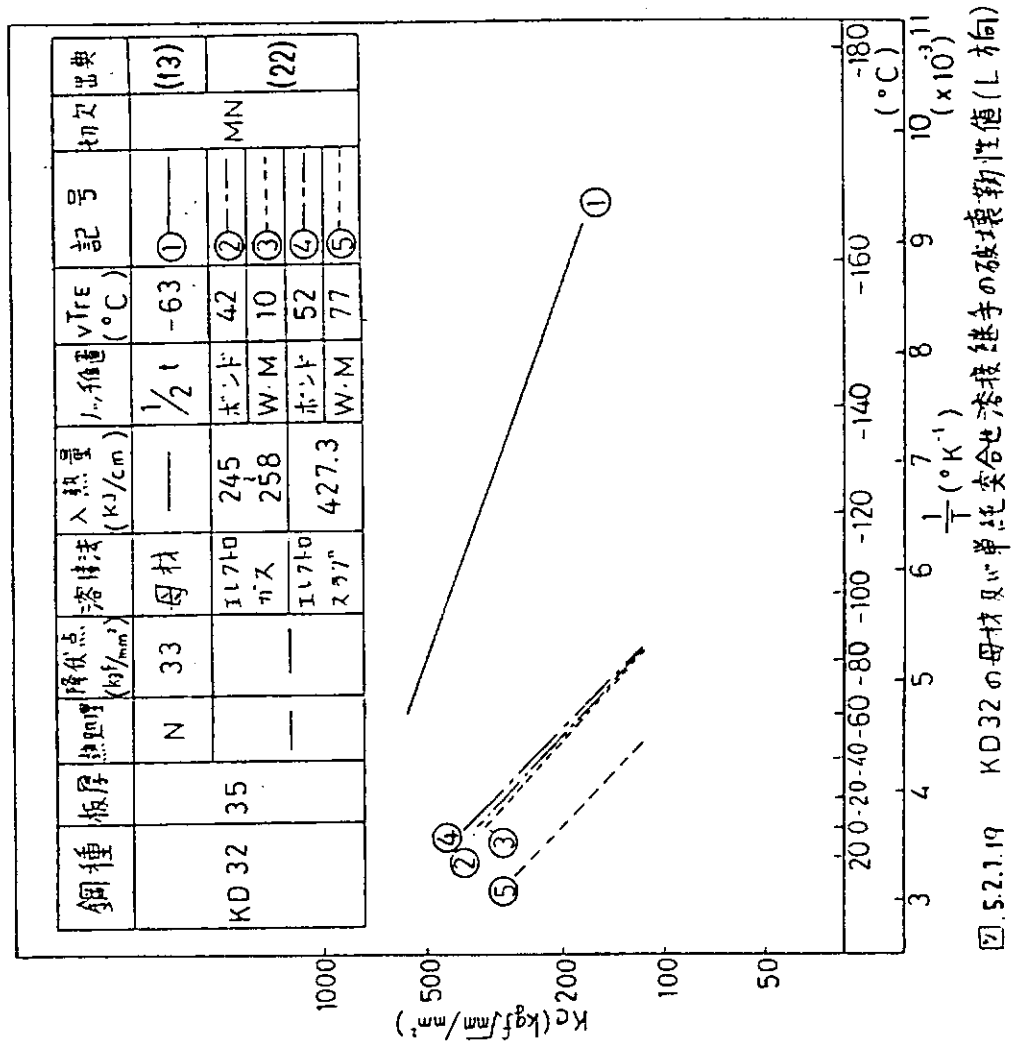


図 5.2.1.19 KD32 の母材及び単結実合せ溶接継手の破壊靱性値 (L 方向)

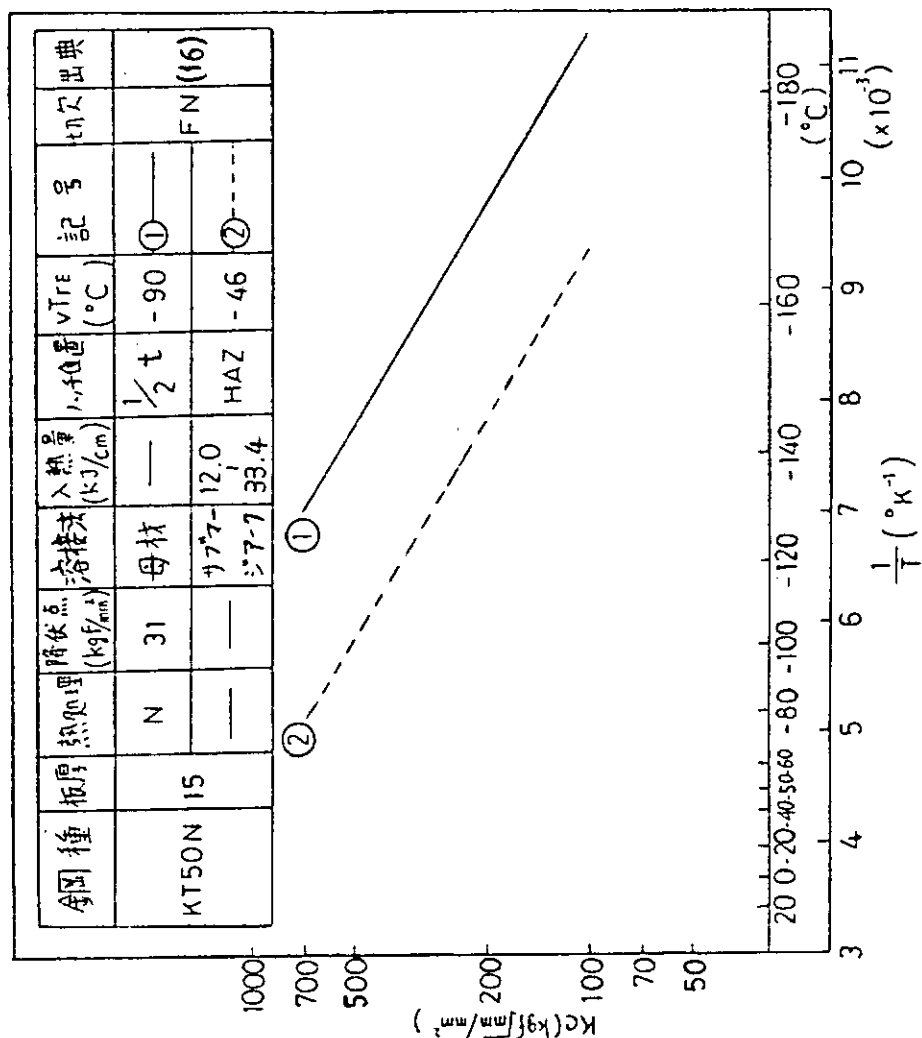


図 5.2.1.20 KT50N の母材及び単結実合せ溶接継手の破壊靱性値 (L 方向)

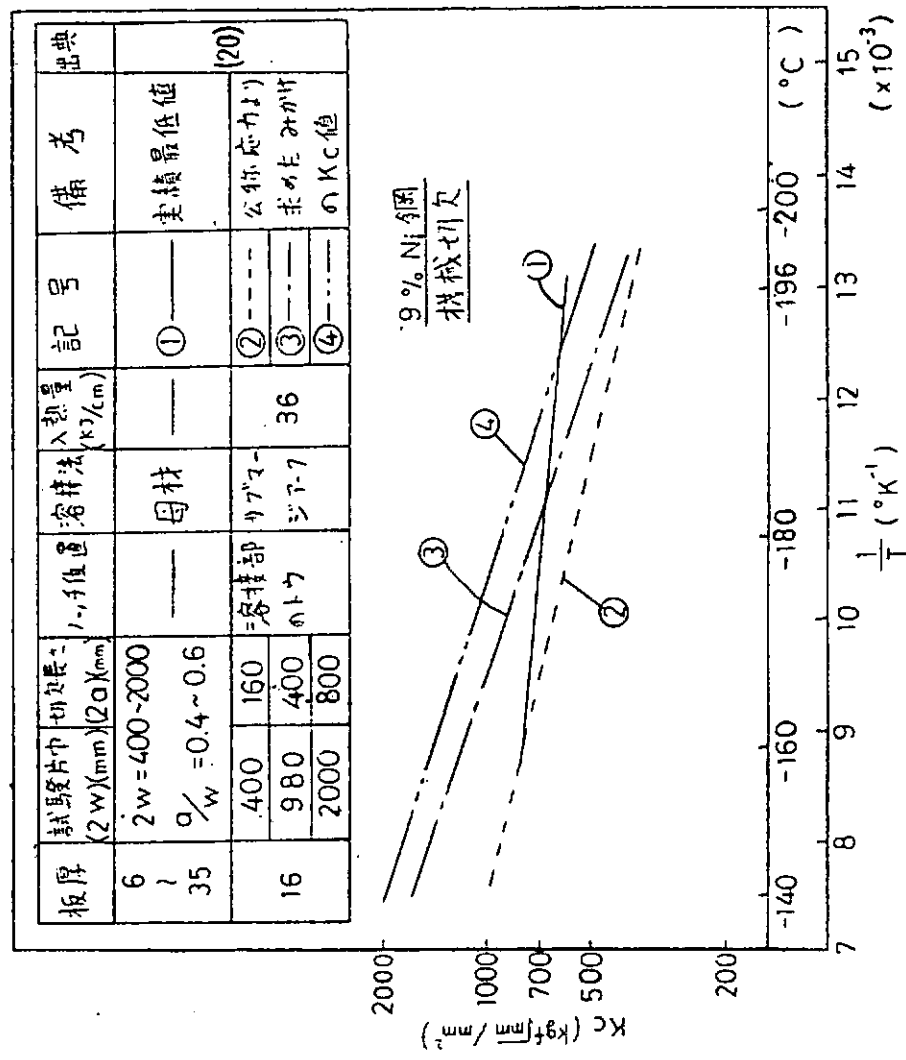


図 5.2.1.21 9%Ni 鋼の母材及び単純実合せ溶接継手の破壊靱性値(L 方向)

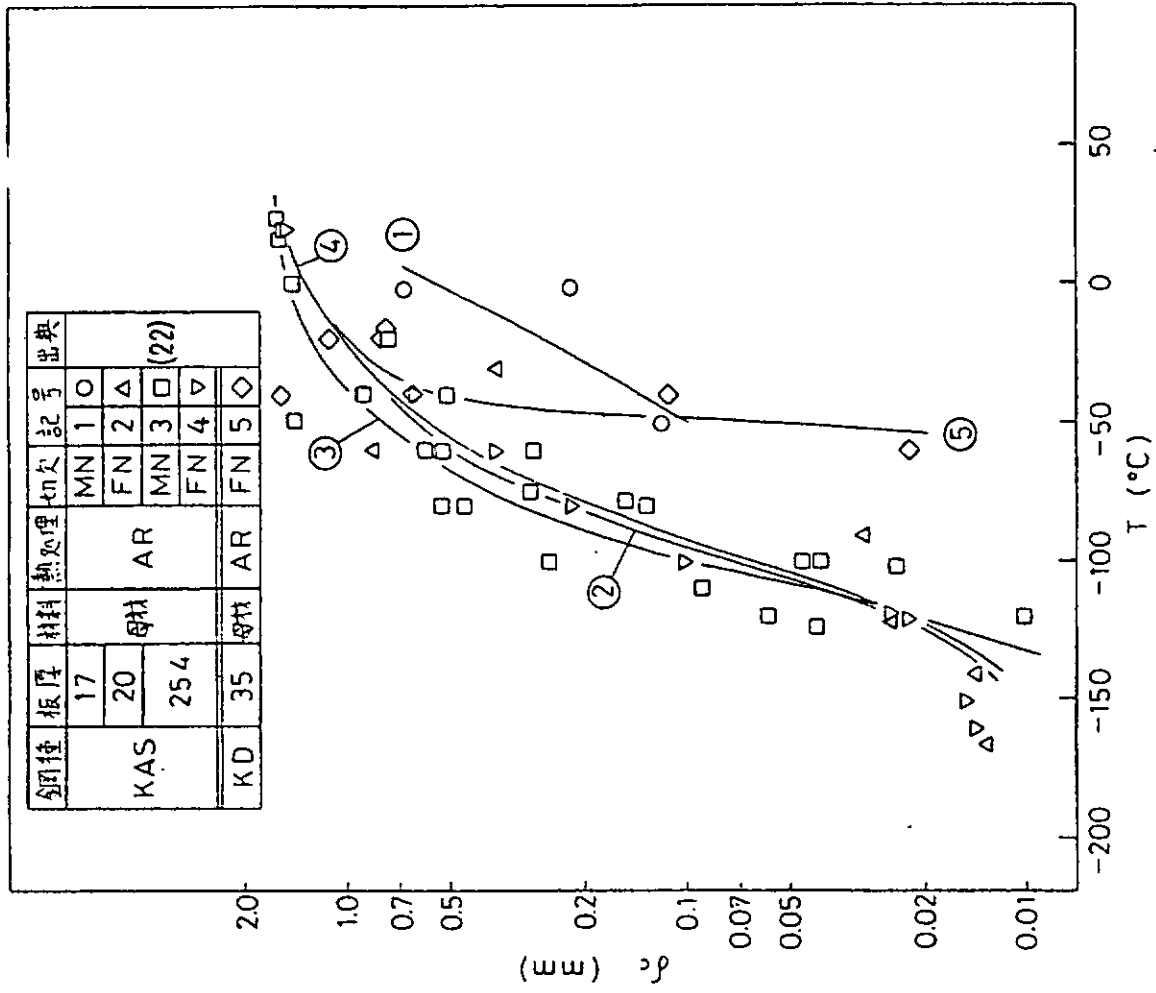


図 5.2.1.22 小型三点曲げ COD 試験による KAS, KB の破壊靱性値 (母材 L 方向)

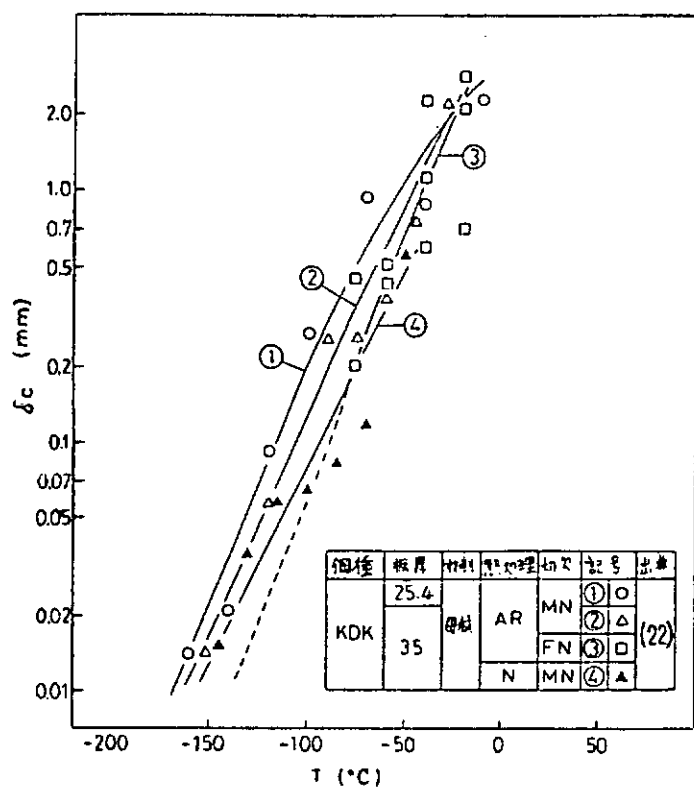


図5.2.1.23 小型三点曲げCOD試験によるKDKの破壊靱性値 (母材L方向)

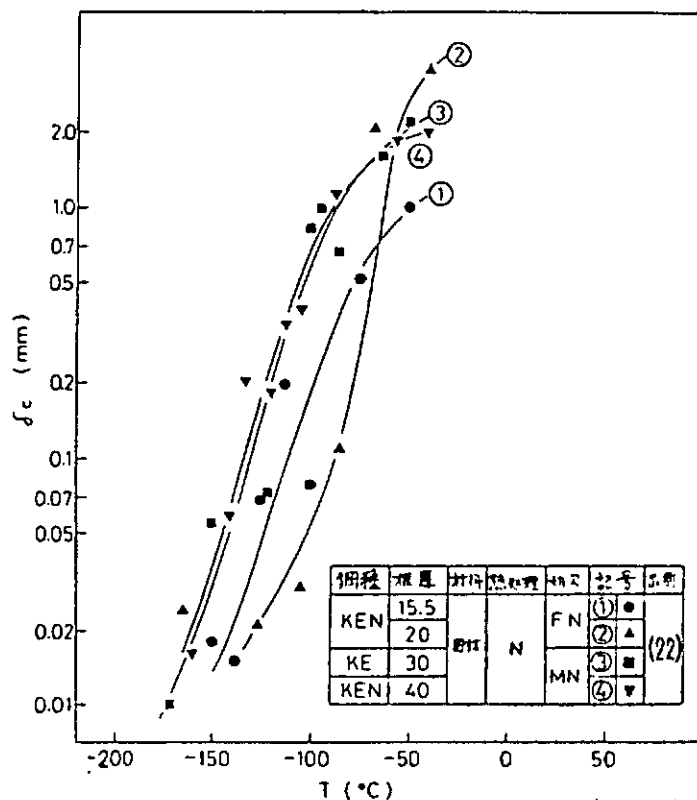


図5.2.1.24 小型三点曲げCOD試験によるKEN, KEの破壊靱性値 (母材L方向)

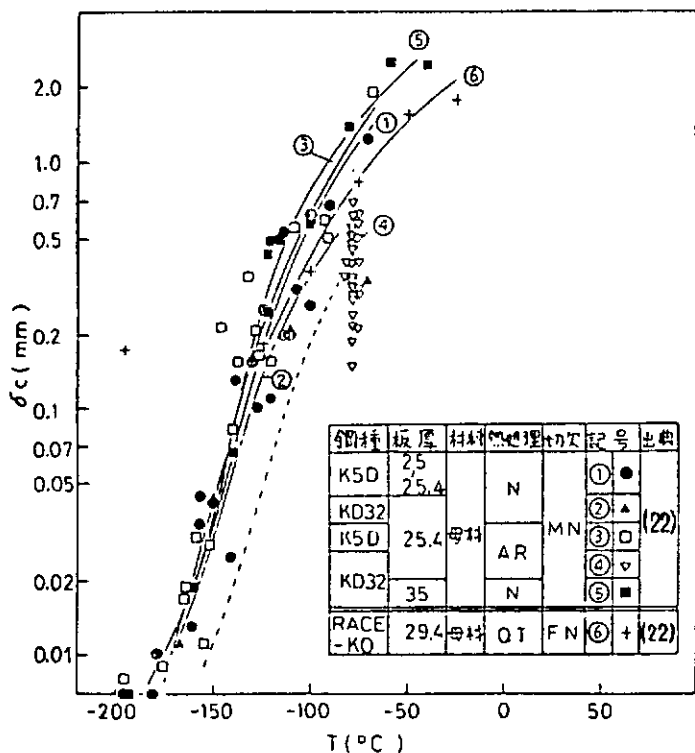


図5.2.1.25 小型三点曲げCOD試験によるK5D, KD32, RACE-KO (KHT 80N相当材)の破壊靱性値 (母材L方向)

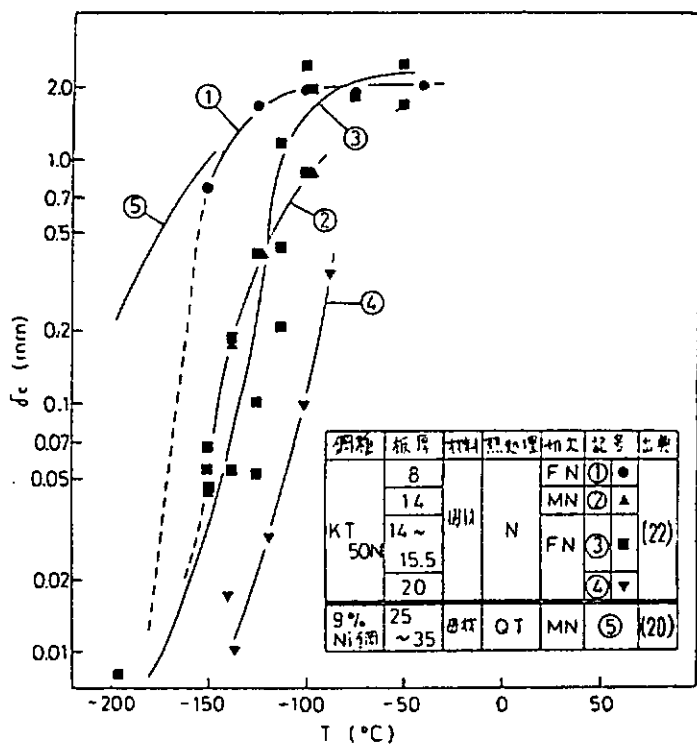


図5.2.1.26 小型三点曲げCOD試験によるKT50Nの破壊靱性値  
及びテンパー化試験片による9% Ni鋼の破壊靱性値 (母材L方向)

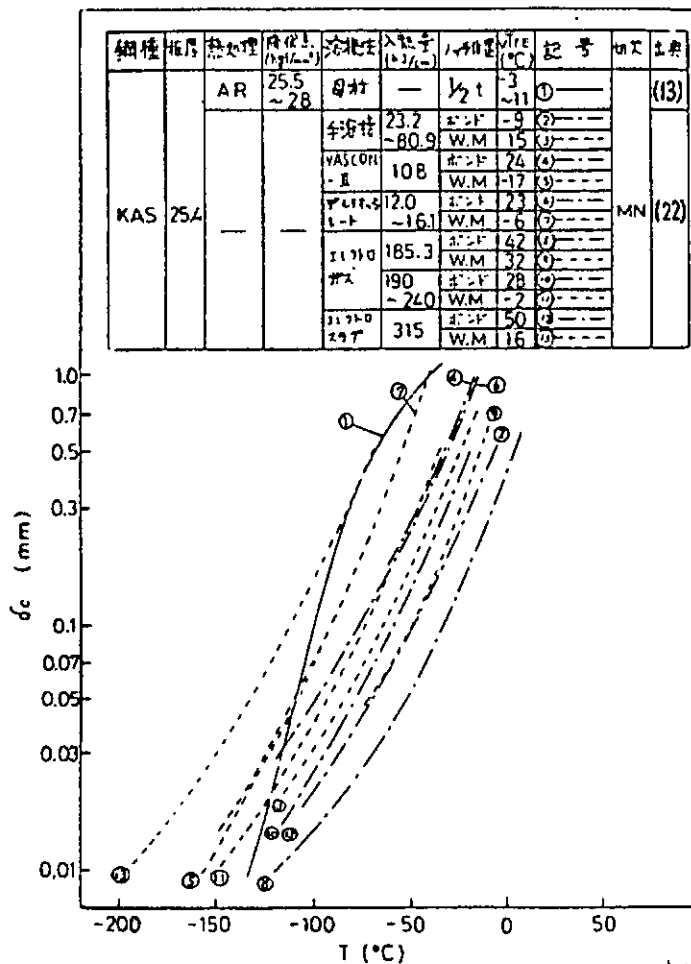


図5.2.1.27 小型三点曲げCOD試験によるKASの母材及び単結実合セ溶接継手の破壊靱性値(L方向)

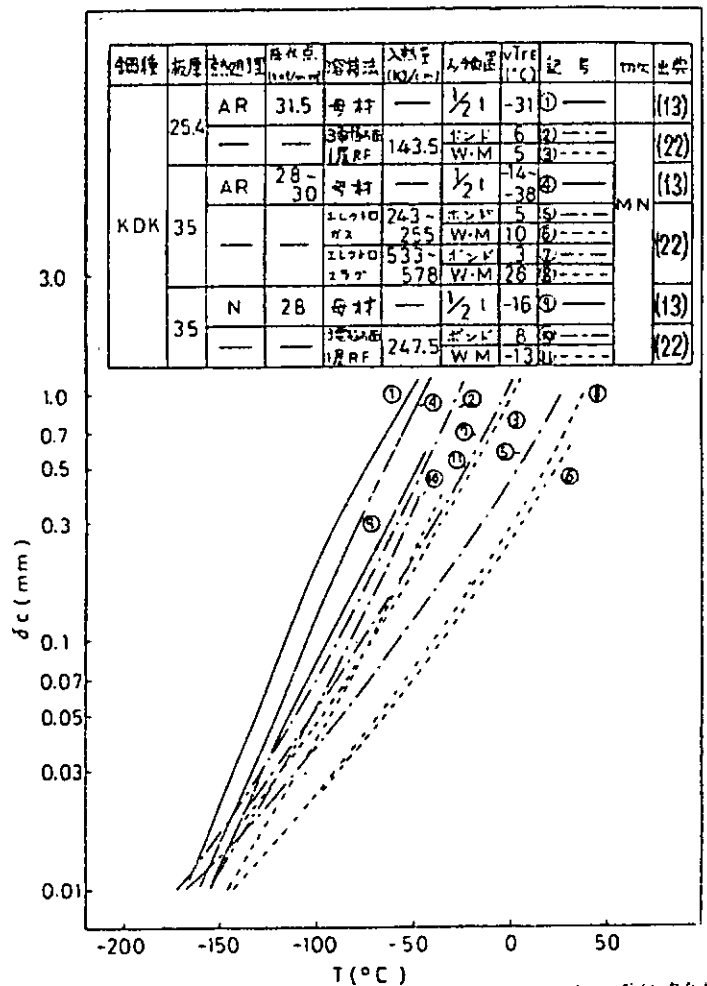


図5.2.1.28 小型三点曲げCOD試験によるKDKの母材及び単結実合セ溶接継手の破壊靱性値(L方向)

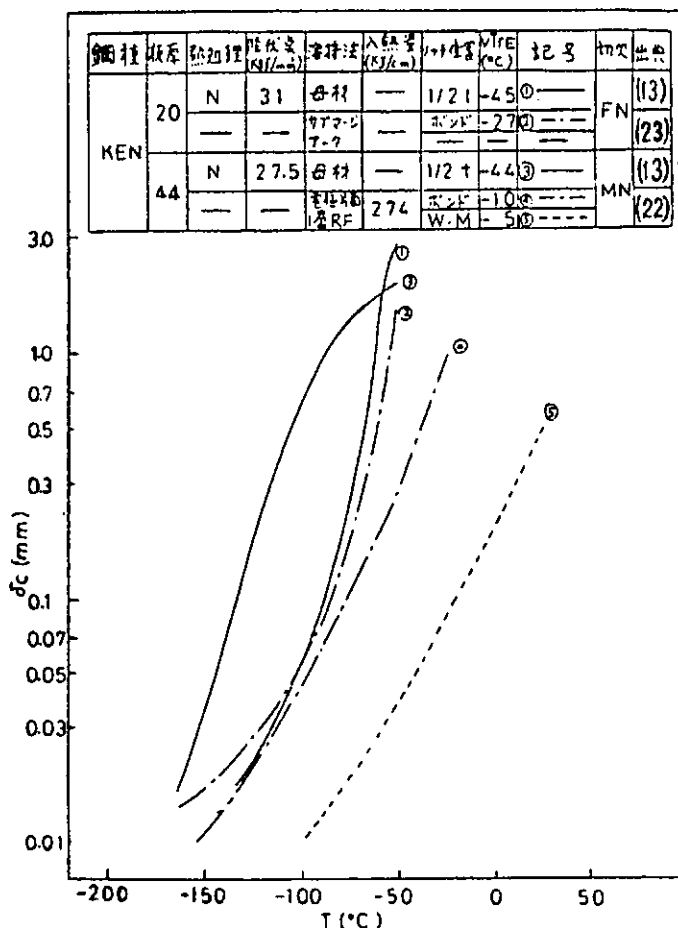


図5.2.1.29 小型三点曲げCOD試験によるKENの母材及び単結実合セ溶接継手の破壊靱性値(L方向)

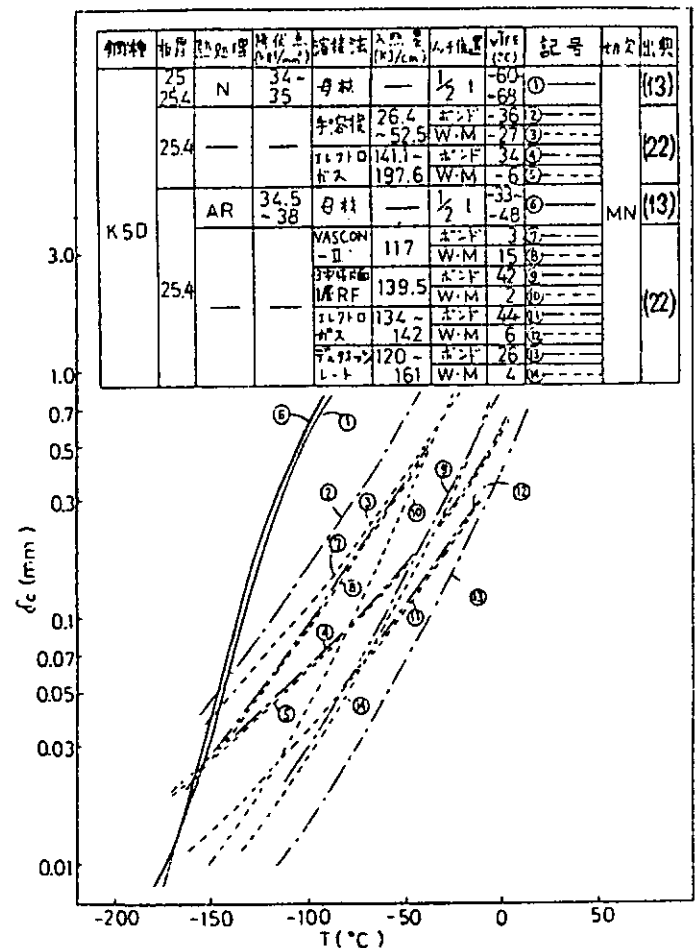


図5.2.1.30 小型三点曲げCOD試験によるKSDの母材及び単結実合セ溶接継手の破壊靱性値(L方向)



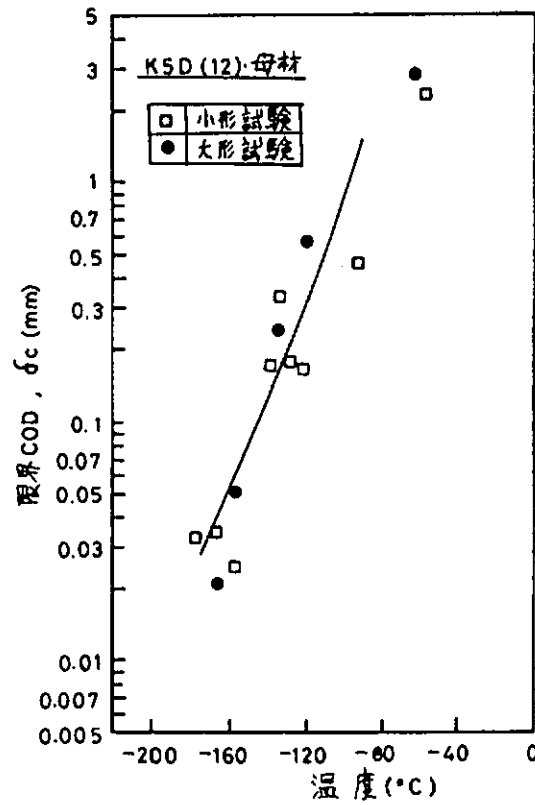


図5.2.1.33 限界CODと温度の関係

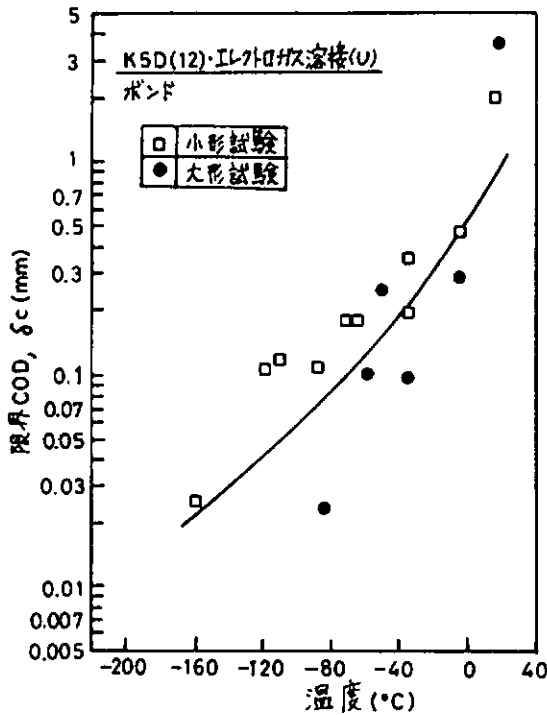


図5.2.1.34 限界CODと温度の関係

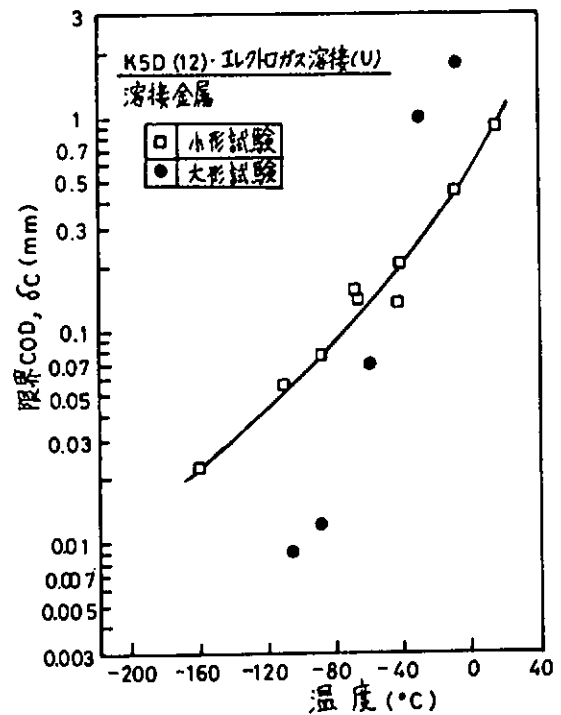


図5.2.1.35 限界CODと温度の関係

表 5.2.1.13 各種構造用鋼及びその溶接部に関する $\Delta T$

| 鋼種        | (a) $\Delta T$ ( $\delta c=0.05\text{mm}$ ) |      |       |               |
|-----------|---------------------------------------------|------|-------|---------------|
|           | 切欠位置                                        | B.M. | W.M.  | BOND          |
| H.T.80(1) |                                             | 55   | 82.45 | 47.65, 95     |
| H.T.80(2) |                                             | 52   |       |               |
| H.T.80(3) |                                             | 47   |       |               |
| H.T.60(1) |                                             | 61   | 90.50 | 103.38, 39.73 |
| H.T.60(2) |                                             | 32   |       |               |
| S.M.58 O  |                                             |      | 50    |               |
| S.M.53 C  |                                             | 24   |       |               |
| S.M.50 B  |                                             |      | 30    |               |
| S.M.41 B  |                                             |      | 39    |               |

| 鋼種        | (b) $\Delta T$ ( $\delta c=0.1\text{mm}$ ) |      |       |               |
|-----------|--------------------------------------------|------|-------|---------------|
|           | 切欠位置                                       | B.M. | W.M.  | BOND          |
| H.T.80(1) |                                            | 52   | 78.47 | 40.40, 107    |
| H.T.80(2) |                                            | 55   |       |               |
| H.T.80(3) |                                            | 34   |       |               |
| H.T.60(1) |                                            | 52   | 45.50 | 112.25, 32.50 |
| H.T.60(2) |                                            | 31   |       |               |
| S.M.58 O  |                                            |      | 45    |               |
| S.M.53 C  |                                            | 28   |       |               |
| S.M.50 B  |                                            |      | 25    |               |
| S.M.41 B  |                                            |      | 31    |               |

| 鋼種        | (c) $\Delta T$ ( $\delta c=0.2\text{mm}$ ) |      |       |                |
|-----------|--------------------------------------------|------|-------|----------------|
|           | 切欠位置                                       | B.M. | W.M.  | BOND           |
| H.T.80(1) |                                            | 48   | 71.43 | 34.19, 96      |
| H.T.80(2) |                                            | 54   |       |                |
| H.T.80(3) |                                            | 26   |       |                |
| H.T.60(1) |                                            | 45   | 38.61 | >112.17, 29.17 |
| H.T.60(2) |                                            | 29   |       |                |
| S.M.58 O  |                                            |      | 40    |                |
| S.M.53 C  |                                            | 29   |       |                |
| S.M.50 B  |                                            |      | 21    |                |
| S.M.41 B  |                                            |      | 28    |                |

(注1) B.M.; 母材, W.M.; 溶接金属, BOND; ボンド, HAZ; 熱影響部  
(注2) 表中の数字( $\Delta T$ )の単位は  $^{\circ}\text{C}$ , 検計対象板厚範囲 25mm 以下 50mm  
までの間の板厚に検数個の $\Delta T$ があるのは溶接法の違いによる  
(注3) T.M. 炭素合金鋼より, H.T.80(3), H.T.60(3), H.T.60(2), B.M.)  
JMC 炭素合金鋼より, (S.M.58 O, S.M.50 B, S.M.41 B の $\delta W.M.$  及び HAZ)

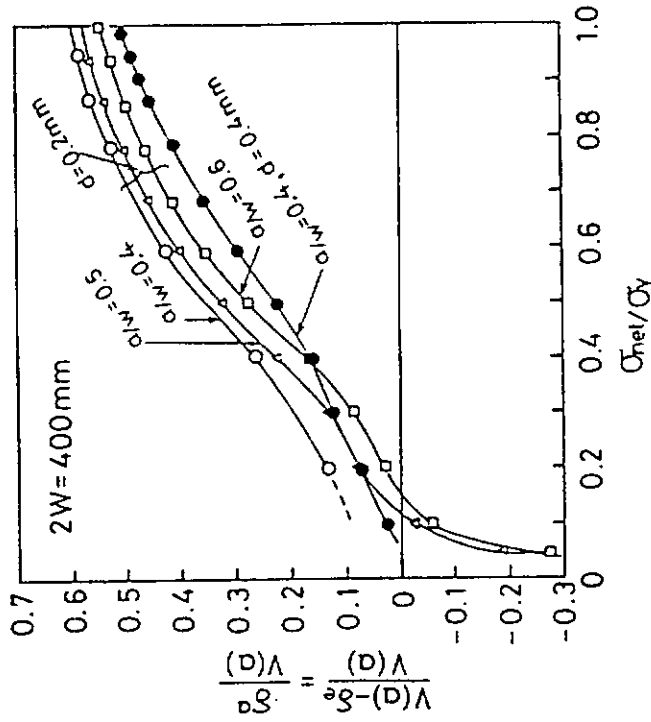


図 5.2.1.36 D-M モデルより計算される脆性先端 COD( $\delta^0$ )  
に於ける available COD( $\delta^0$ ) の比率

表 5.2.1.15 各種規格の鋼材の分類表

| 鋼種<br>クラス | 特性             | 計 算 規 格 |         |                                                                                                                                                      |
|-----------|----------------|---------|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|           |                | 通称規格    | JIS規格   | WES規格                                                                                                                                                |
| LN        | 用途用<br>AI 1/4" | KT35N   | SLA33A  | LT33-50G                                                                                                                                             |
|           | $\sigma_t$ 33  | KT50N   | SLA24B  | LT45-4-120G-100A                                                                                                                                     |
|           | $\sigma_u$ 41  | KL24B   |         | LT79-3-110G-90A<br>SLT33A<br>SH141A                                                                                                                  |
| LQ        | 用途用<br>AI 3/4" | KT50Q   |         | LT33-6-80G-30A                                                                                                                                       |
|           | $\sigma_t$ 33  | KST50Q  |         | LT36-4-80G-50A                                                                                                                                       |
|           | $\sigma_u$ 46  | NK-LTC  | SLA33B  | LT33-2-90G-60A<br>N-TUF 33<br>LT33-4-80G-50A<br>LT36-2-90G-60A<br>N-TUF 37<br>LT33-4-90G-60A<br>SH146A<br>LT33-6-80G-50A<br>SH150A<br>LT40-2-50G-20A |
| WS        | $\sigma_t$ 50  | K6A     | SM58    | HW50                                                                                                                                                 |
|           |                | K6D     | SM580   | HT60                                                                                                                                                 |
|           | $\sigma_u$ 60  | KD46    | SPV 50  | LT50-5-60G-20A                                                                                                                                       |
| W6        | $\sigma_t$ 60  | K6E     | SPV 500 | LT45-4-70G-40A                                                                                                                                       |
|           | $\sigma_u$ 70  | KE46    |         | LT50-3-60G-40A                                                                                                                                       |
|           |                |         |         | LT50-10G                                                                                                                                             |
| W7        | $\sigma_t$ 70  |         |         | HW63                                                                                                                                                 |
|           | $\sigma_u$ 80  |         |         | LT56-6-50G-20A                                                                                                                                       |
|           |                |         |         | LT63-6-50G-20A                                                                                                                                       |
| W9        | $\sigma_t$ 90  |         |         | LT56-60A-30A                                                                                                                                         |
|           | $\sigma_u$ 100 |         |         | LT56-3-90G-60A                                                                                                                                       |
|           |                |         |         | HW70                                                                                                                                                 |
| N3        | $\sigma_t$ 70  |         |         | WELTEN80                                                                                                                                             |
|           | $\sigma_u$ 80  |         |         | K-TEN80                                                                                                                                              |
|           |                |         |         | LT70-50G-20A                                                                                                                                         |
| N5        | $\sigma_t$ 90  |         |         | SUMITEN80                                                                                                                                            |
|           | $\sigma_u$ 100 |         |         | FACEK-0                                                                                                                                              |
|           |                |         |         | LT70-3-80G-60A<br>LT70-6-60G-40A (NK 1471 参照)                                                                                                        |
| N3        | $\sigma_t$ 70  |         |         | HW90                                                                                                                                                 |
|           | $\sigma_u$ 80  |         |         | LT79-6-100G-70A                                                                                                                                      |
|           |                |         |         | LT29-3-100G-70A                                                                                                                                      |
| N5        | $\sigma_t$ 90  |         |         | LT45-3-100G-10A                                                                                                                                      |
|           | $\sigma_u$ 100 |         |         | SLT33N6                                                                                                                                              |
|           |                |         |         | N-TUF 195                                                                                                                                            |

表 5.2.1.16 各種規格の鋼材の分類表

| 鋼種<br>クラス | 特性                               | 計 算 規 格                |               |              |
|-----------|----------------------------------|------------------------|---------------|--------------|
|           |                                  | 通称規格                   | JIS規格         | WES規格        |
| 1 A       | $\sigma_t$ 24 kg/mm <sup>2</sup> | KA, KAS, LAS, KAM, ARS | SM41A<br>S541 | IN 201E      |
|           |                                  | KB, KDS                | SM41B         |              |
|           |                                  | ABCN, NVC              |               |              |
| 1 B       | $\sigma_t$ 24 kg/mm <sup>2</sup> | KC, KCK                |               |              |
|           |                                  | KD, KDK, KDS           | SM41C         | A516, Gr.50  |
|           |                                  | KON, NYD               | SPV25-24      | AB, GrD(ADN) |
| 1 C       | $\sigma_t$ 24 kg/mm <sup>2</sup> | KE, KEN                |               | A662MOD      |
|           |                                  | NVE, BVE, E            |               | SH141E       |
| 1 D       | $\sigma_t$ 24 kg/mm <sup>2</sup> | KA32, K5A              | SM50 SM50A    | IN 鋼材力       |
|           |                                  | N32A, AH32             | SM50B         |              |
|           |                                  | NVA32, K32A            | SM50BN        | HT50         |
| 1 E       | $\sigma_t$ 24 kg/mm <sup>2</sup> | A33A                   | SM50C         |              |
|           |                                  | AB-GrAH32              | MS-50         |              |
| 2 A       | $\sigma_t$ 32                    | K5D, L50               |               |              |
|           |                                  | KD32, K50H3            |               |              |
|           |                                  | N32D, DH32             |               |              |
| 2 B       | $\sigma_t$ 32                    | K32D, A33D             |               |              |
|           |                                  | AB-CH                  |               |              |
|           |                                  | K5E, NVE32             |               |              |
| 2 C       | $\sigma_t$ 32                    | E32, A32E              |               |              |
|           |                                  | N32E, EH32             |               |              |
| 3 A       | $\sigma_t$ 36                    | KA36                   | SM50YB        |              |
|           |                                  | N36A                   | SM53B         |              |
|           |                                  | NVA36                  | SM53C         | HW36         |
| 3 B       | $\sigma_t$ 36                    | KB36                   | SPV36N        |              |
|           |                                  | N36B                   | SPV36NSR      |              |
|           |                                  | KD36, D36              |               |              |
| 3 C       | $\sigma_t$ 36                    | N36D                   |               |              |
|           |                                  | A36E, KE36             |               |              |
|           |                                  | NVE36                  |               |              |
| 3 D       | $\sigma_t$ 36                    | KE36SR                 |               |              |
|           |                                  |                        |               |              |
|           |                                  |                        |               |              |
| 3 E       | $\sigma_t$ 36                    |                        |               |              |
|           |                                  |                        |               |              |
|           |                                  |                        |               |              |

表 3.2.1.16 各種鋼材の機械的性質

| 鋼種  | 特性    | 規格    |       |                  |
|-----|-------|-------|-------|------------------|
|     |       | 造船規格  | JIS規格 | WES規格            |
| N 9 | 9Ni鋼材 | KL90T |       | L750-V-196G-196A |
|     |       | KL9N  |       |                  |
| C   |       |       |       |                  |
|     |       |       |       |                  |
| H   |       |       |       |                  |
|     |       |       |       |                  |

表 3.2.1.17 各種鋼材の機械的性質

| クラス         | 採取方向 | 試験温度 | データ数 | 平均値   | 標準偏差 |
|-------------|------|------|------|-------|------|
| 1 A<br>(AR) | L    | vTRe | 47   | -4.5  | 15.3 |
|             | C    | vTRe | 47   | -1.1  | 15.2 |
| 1 B<br>(AR) | L    | vTRe | 19   | -1.1  | 11.5 |
|             | C    | vTRe | 18   | 5.4   | 8.7  |
| 1 C<br>(AR) | L    | vTRe | 24   | -11.4 | 7.7  |
|             | C    | vTRe | 25   | -5.6  | 12.7 |
| 1 D<br>(AR) | L    | vTRe | 5    | -1.6  | 9.8  |
|             | C    | vTRe | 6    | -0.2  | 11.2 |
| 1 E<br>(N)  | L    | vTRe | 8    | -12.5 | 9.4  |
|             | C    | vTRe | 8    | -8.4  | 10.5 |
| 1 F<br>(N)  | L    | vTRe | 1    | -29.0 | —    |
|             | C    | vTRe | 1    | -17.0 | —    |
| 1 G<br>(N)  | L    | vTRe | 39   | -18.5 | 11.0 |
|             | C    | vTRe | 39   | -15.1 | 12.9 |
| 1 H<br>(N)  | L    | vTRe | 13   | -17.2 | 8.1  |
|             | C    | vTRe | 14   | -15.3 | 9.9  |
| 1 I<br>(N)  | L    | vTRe | 9    | -19.1 | 14.4 |
|             | C    | vTRe | 9    | -14.3 | 8.6  |
| 1 J<br>(N)  | L    | vTRe | 4    | -12.2 | 12.6 |
|             | C    | vTRe | 4    | -6.0  | 7.8  |
| 1 K<br>(N)  | L    | vTRe | 32   | -32.4 | 10.2 |
|             | C    | vTRe | 30   | -35.3 | 8.7  |
| 2 A<br>(AR) | L    | vTRe | 18   | -33.7 | 14.3 |
|             | C    | vTRe | 17   | -25.1 | 14.9 |
| 2 B<br>(AR) | L    | vTRe | 24   | -15.8 | 15.7 |
|             | C    | vTRe | 25   | -6.0  | 21.2 |
| 2 C<br>(AR) | L    | vTRe | 9    | -11.2 | 9.2  |
|             | C    | vTRe | 8    | -7.5  | 19.4 |
| 2 D<br>(AR) | L    | vTRe | 8    | -17.2 | 28.5 |
|             | C    | vTRe | 8    | -11.1 | 33.3 |
| 2 E<br>(AR) | L    | vTRe | 3    | -29.3 | 5.9  |
|             | C    | vTRe | 3    | -31.7 | 8.5  |

表 5.2.1.19 各種鋼のクラス別Vickers-遺移温度

| クラス<br>(熱処理) | 採取方向 | 遺移温度         | $\bar{T}-9$ 枚 | 平均値<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | 標準偏差<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) |
|--------------|------|--------------|---------------|-------------------------------|--------------------------------|
| 3E<br>(N)    | L    | vTre<br>vTrs | 14            | -47.6<br>-44.4                | 8.9<br>10.9                    |
|              | C    | vTre<br>vTrs | 11<br>11      | -32.2<br>-23.4                | 7.1<br>9.8                     |
| LN<br>(N)    | L    | vTre<br>vTrs | 24<br>26      | -85.2<br>-85.0                | 19.0<br>18.4                   |
|              | C    | vTre<br>vTrs | 19<br>21      | -77.9<br>-76.8                | 24.0<br>25.5                   |
| LQ<br>(QT)   | L    | vTre<br>vTrs | 24<br>27      | -80.5<br>-82.2                | 19.3<br>17.8                   |
|              | C    | vTre<br>vTrs | 13<br>13      | -73.8<br>-71.6                | 22.4<br>24.3                   |
| W5<br>(QT)   | L    | vTre<br>vTrs | 45<br>43      | -57.2<br>-56.2                | 18.3<br>22.4                   |
|              | C    | vTre<br>vTrs | 29<br>29      | -42.3<br>-41.5                | 19.9<br>22.3                   |
| W7<br>(QT)   | L    | vTre<br>vTrs | 39<br>39      | -81.4<br>-83.5                | 23.3<br>22.4                   |
|              | C    | vTre<br>vTrs | 27<br>26      | -64.9<br>-65.3                | 22.1<br>23.8                   |
| N3<br>(N)    | L    | vTre<br>vTrs | 5<br>5        | -104.4<br>-100.8              | 12.9<br>13.4                   |
|              | C    | vTre<br>vTrs | 5<br>5        | -95.6<br>-91.4                | 20.5<br>18.0                   |
| N3<br>(QT)   | L    | vTre<br>vTrs | 4<br>4        | -130.0<br>-128.0              | 14.5<br>18.9                   |
|              | C    | vTre<br>vTrs | 4<br>4        | -121.2<br>-119.7              | 16.7<br>16.6                   |
| N9<br>(QT)   | L    | vTre<br>vTrs | 4<br>4        | -185.3<br>-178.8              | 11.1<br>21.1                   |
|              | C    | vTre<br>vTrs | 3<br>2        | -182.7<br>-176.0              | 19.7<br>0.0                    |

表 5.2.1.18 各種鋼のクラス別Vickers-遺移温度

| クラス<br>(熱処理) | 採取方向 | 遺移温度         | $\bar{T}-9$ 枚 | 平均値<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | 標準偏差<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) |
|--------------|------|--------------|---------------|-------------------------------|--------------------------------|
| 2A<br>(QT)   | L    | vTre<br>vTrs | 6<br>6        | -56.3<br>-59.8                | 5.4<br>6.6                     |
|              | C    | vTre<br>vTrs | 6<br>6        | -52.3<br>-57.5                | 7.2<br>9.2                     |
| 2D<br>(AR)   | L    | vTre<br>vTrs | 19<br>19      | -25.1<br>-17.1                | 13.9<br>17.5                   |
|              | C    | vTre<br>vTrs | 5<br>5        | -22.2<br>-24.2                | 12.4<br>10.5                   |
| 2D<br>(N)    | L    | vTre<br>vTrs | 19<br>19      | -38.4<br>-34.1                | 17.3<br>19.1                   |
|              | C    | vTre<br>vTrs | 3<br>3        | -44.0<br>-39.0                | 14.2<br>9.8                    |
| 2E<br>(N)    | L    | vTre<br>vTrs | 27<br>28      | -42.0<br>-38.8                | 14.8<br>16.2                   |
|              | C    | vTre<br>vTrs | 12<br>13      | -33.5<br>-33.4                | 13.7<br>12.1                   |
| 3A<br>(AR)   | L    | vTre<br>vTrs | 15<br>14      | -26.1<br>-27.1                | 15.0<br>17.5                   |
|              | C    | vTre<br>vTrs | 9<br>8        | -22.3<br>-26.5                | 17.2<br>17.0                   |
| 3A<br>(N)    | L    | vTre<br>vTrs | 4<br>4        | -50.7<br>-36.7                | 5.5<br>9.3                     |
|              | C    | vTre<br>vTrs | 4<br>4        | -33.2<br>-26.2                | 8.6<br>5.2                     |
| 3D<br>(AR)   | L    | vTre<br>vTrs | 11<br>11      | -29.5<br>-33.1                | 12.2<br>13.7                   |
|              | C    | vTre<br>vTrs | 1<br>2        | -18.0<br>-10.5                | —<br>7.8                       |
| 3D<br>(N)    | L    | vTre<br>vTrs | 4<br>4        | -36.0<br>-36.0                | 5.4<br>7.8                     |
|              | C    | vTre<br>vTrs | 2<br>2        | -34.0<br>-42.0                | 2.8<br>2.8                     |



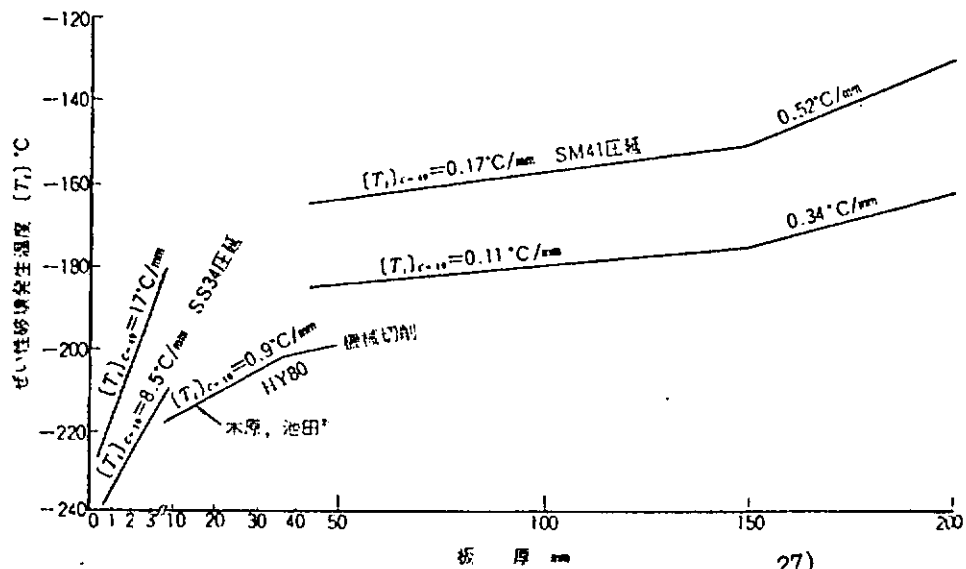


図5.2.2.1 ぜい性破壊発生温度と板厚の関係 (板厚 0.8 ~ 200 mm,  $\sigma = \sigma_y/2.5$ ) 27)

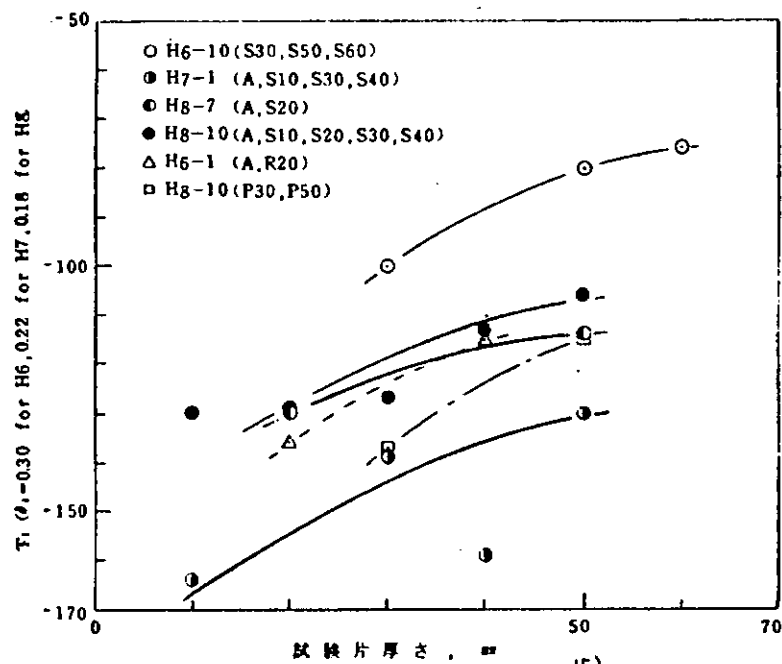
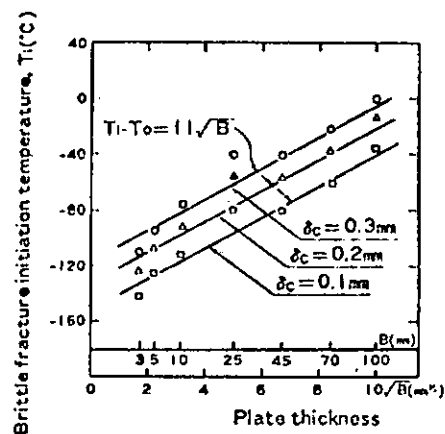


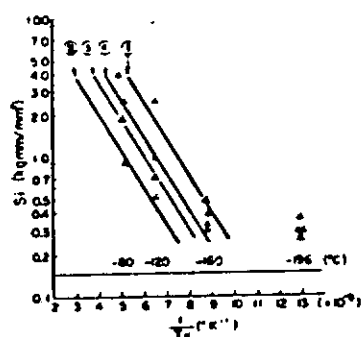
図5.2.2.2 試験片厚さの  $T_i$  に対する効果 15)



Relation between brittle fracture initiation temperature and plate thickness in terms of COD.

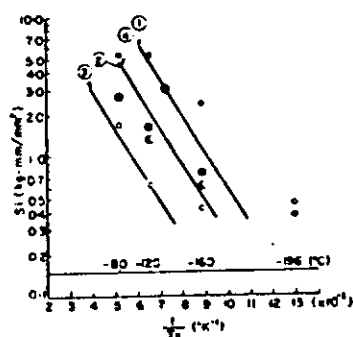
図5.2.2.3 脆性き裂発生温度と板厚との関係 28)

| Spec. No. | Symbol | Line-Heat Condition | Empirical Formula                        |
|-----------|--------|---------------------|------------------------------------------|
| K5A       | ①      | Original Plate      | $S_i = 1000 \cdot e^{-\frac{1112}{T_s}}$ |
|           | ②      | 800°C A, 700°C WC   | $S_i = 25.0 \cdot e^{-\frac{1112}{T_s}}$ |
|           | ③      | 800°C A, 500°C WC   | $S_i = 42.0 \cdot e^{-\frac{1112}{T_s}}$ |
|           | ④      | 800°C A, C          | $S_i = 56.7 \cdot e^{-\frac{1112}{T_s}}$ |



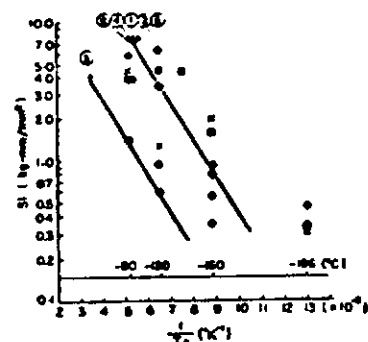
Results of brittle fracture initiation test  
(deep notch test  
K 5 A, thickness : 30 mm)

| Spec. No. | Symbol | Line-Heat Condition | Empirical Formula                         |
|-----------|--------|---------------------|-------------------------------------------|
| K5E       | ①      | Original Plate      | $S_i = 1000 \cdot e^{-\frac{1112}{T_s}}$  |
|           | ②      | 800°C A, 500°C WC   | $S_i = 118.0 \cdot e^{-\frac{1112}{T_s}}$ |
|           | ③      | 800°C A, 700°C WC   | $S_i = 35.1 \cdot e^{-\frac{1112}{T_s}}$  |
|           | ④      | 800°C A, 500°C WC   | $S_i = 118.0 \cdot e^{-\frac{1112}{T_s}}$ |



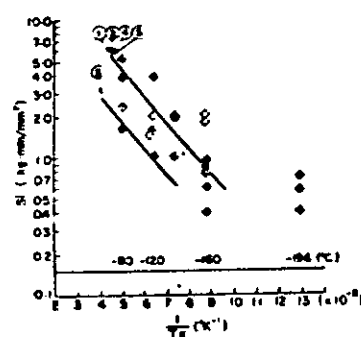
Results of brittle fracture initiation test  
(deep notch test  
K 5 E, thickness : 30 mm)

| Spec. No. | Symbol | Line-Heat Condition | Empirical Formula                        |
|-----------|--------|---------------------|------------------------------------------|
| K5D       | ①      | Original Plate      | $S_i = 93.0 \cdot e^{-\frac{1112}{T_s}}$ |
|           | ②      | 800°C A, 500°C WC   |                                          |
|           | ③      | 800°C A, 700°C WC   | $S_i = 34.8 \cdot e^{-\frac{1112}{T_s}}$ |
|           | ④      | 800°C A, 500°C WC   |                                          |
|           | ⑤      | 800°C A, C          | $S_i = 32.0 \cdot e^{-\frac{1112}{T_s}}$ |
|           | ⑥      | 880°C A, 575°C WC   |                                          |



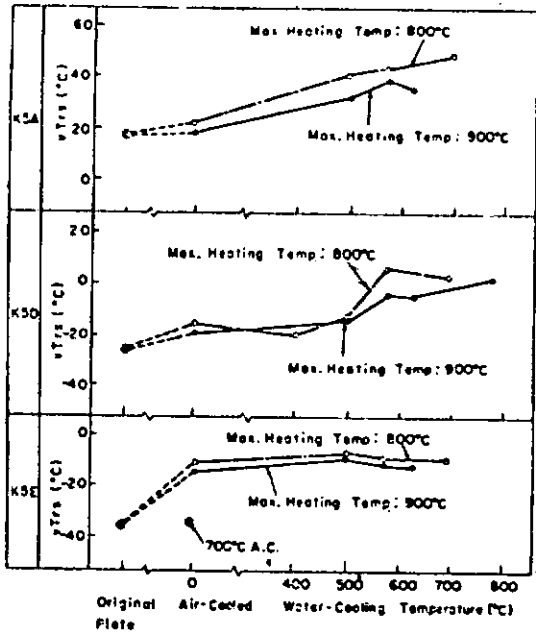
Results of brittle fracture initiation test  
(deep notch test  
K 5 D, thickness : 30 mm)

| Spec. No. | Symbol | Line-Heat Condition | Empirical Formula                        |
|-----------|--------|---------------------|------------------------------------------|
| K5D       | ①      | Original Plate      | $S_i = 44.0 \cdot e^{-\frac{1112}{T_s}}$ |
|           | ②      | 800°C A, 500°C WC   | $S_i = 18.0 \cdot e^{-\frac{1112}{T_s}}$ |
|           | ③      | 700°C A, 500°C WC   | $S_i = 44.0 \cdot e^{-\frac{1112}{T_s}}$ |
|           | ④      | 700°C A, 500°C WC   | $S_i = 44.0 \cdot e^{-\frac{1112}{T_s}}$ |
|           | ⑤      | 700°C A, C          | $S_i = 44.0 \cdot e^{-\frac{1112}{T_s}}$ |



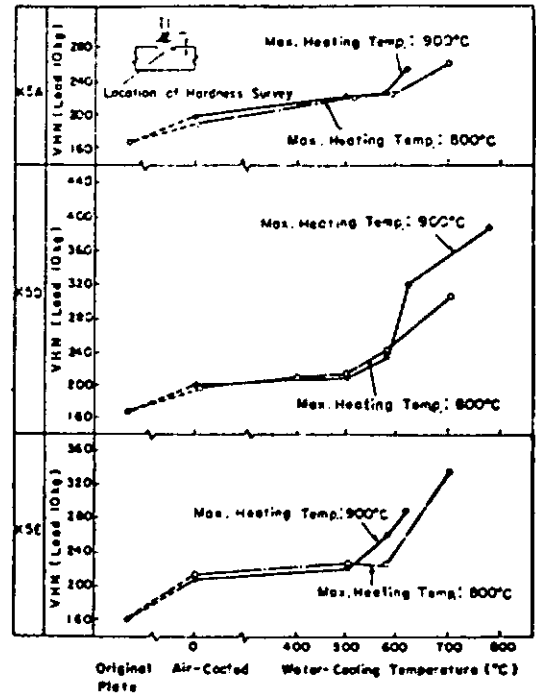
Results of brittle fracture initiation test  
(deep notch test  
K 5 D, thickness : 12.7 mm)

図5.2.2.4 線状加熱条件が脆性破壊の発生特性に及ぼす影響<sup>29)</sup>



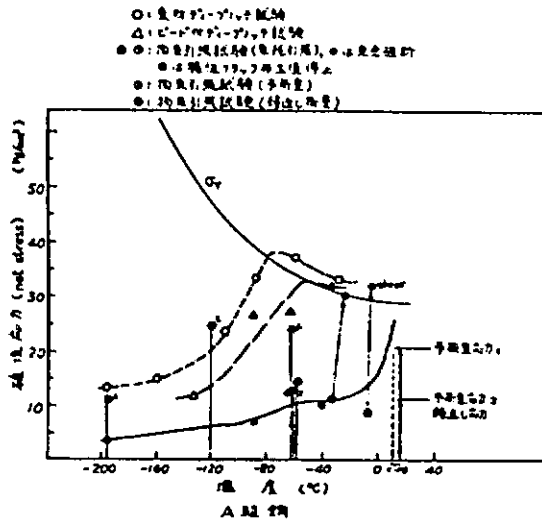
Effect of water-cooling temperature on Charpy V-notch transition temperature  $T_{TS}$  of line-heated zone

図5.2.2.5 線状加熱条件が鋼板の靱性に及ぼす影響<sup>30)</sup>

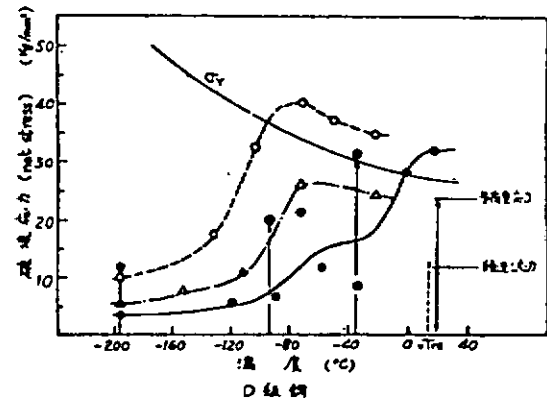


Effect of water-cooling temperature on the hardness of line-heated zone

図5.2.2.6 線状加熱条件が鋼板の硬さに及ぼす影響<sup>30)</sup>

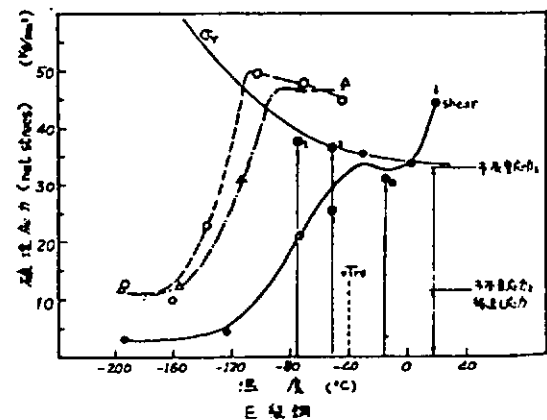


(a) 破断応力と温度の関係



(b) 破断応力と温度の関係

図5.2.2.7 拘束引張試験片による<sup>32)</sup>  
軟鋼板の破壊特性



(c) 破断応力と温度の関係

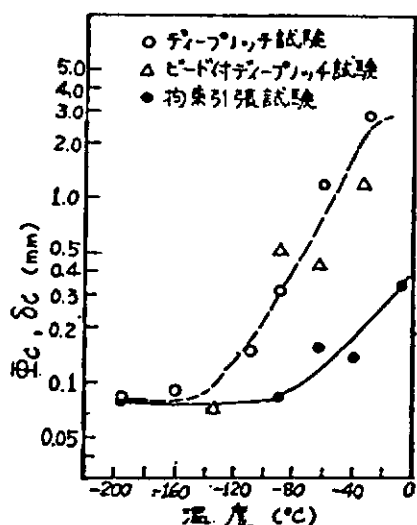


図5.2.2.8 破壊時の COD の温度依存性 (A 級鋼)

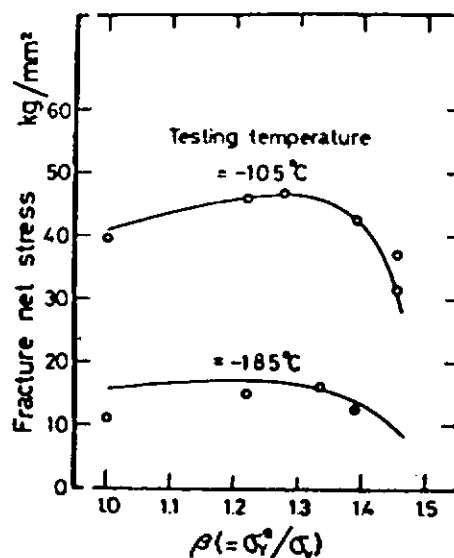


図5.2.2.9 溝つき切欠試験片における破壊応力と \$\beta\$ の関係の理論計算と実験値との比較 (34), (35)

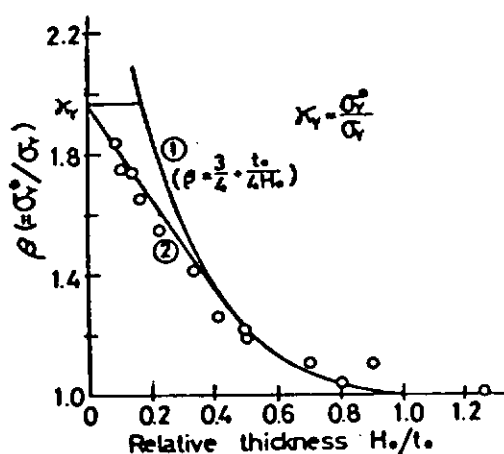


図5.2.2.10 \$\beta (= \sigma\_y^0 / \sigma\_y)\$ と \$H\_0/t\_0\$ の関係 (軟質溶接継手) (34), (35)

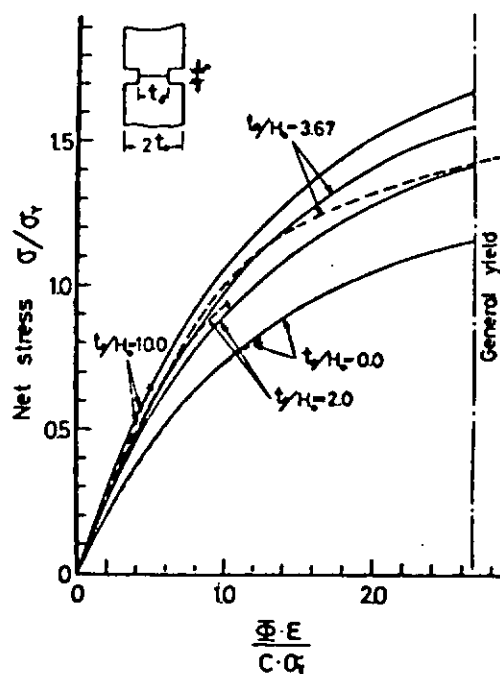


図5.2.2.11 溝つき切欠試験片における \$\sigma\$ と \$Q\$ の関係の理論計算と実験結果の比較 (34), (35)

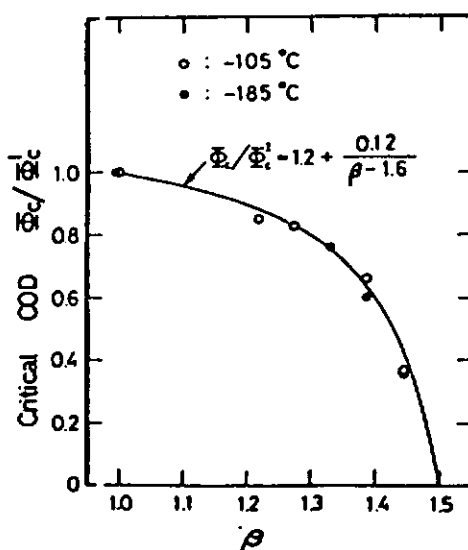
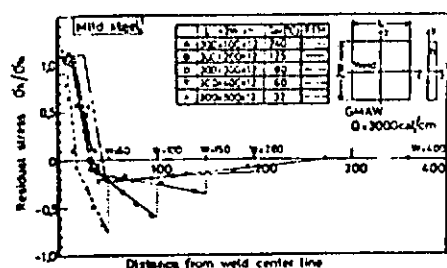
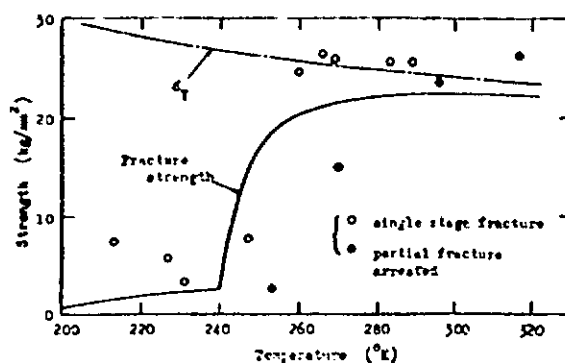


図5.2.2.12 限界開口変位 \$\phi\_c\$ におよぼす拘束係数 \$\beta\$ の影響 (34), (35)



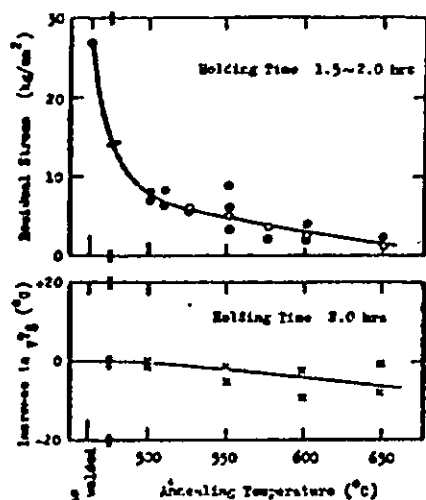
Distributions of residual stress in groove welds of mild steel

図5.2.2.13 突合せ溶接継手の残留応力分布<sup>43)</sup>  
(軟鋼)



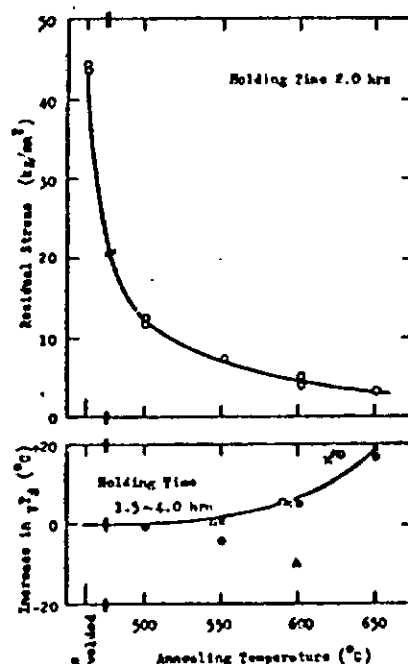
Application of the proposed calculation of brittle fracture strength to a famous data obtained by Kihara et al.

図5.2.2.14 残留応力が脆性破壊の発生特性に及ぼす影響<sup>37)</sup>  
(軟鋼)



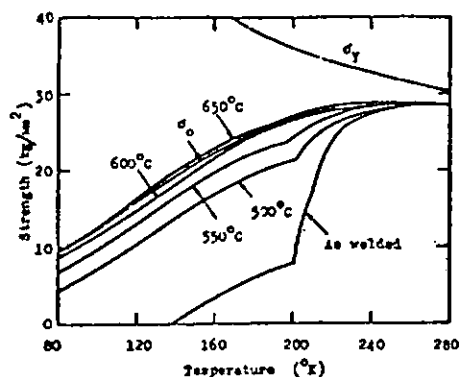
Residual stress and change in  $\nu T_g$  plotted against annealing temperature for SM 41

図5.2.2.15 熱処理温度と残留応力および破面遷移温度との関係(SM41)



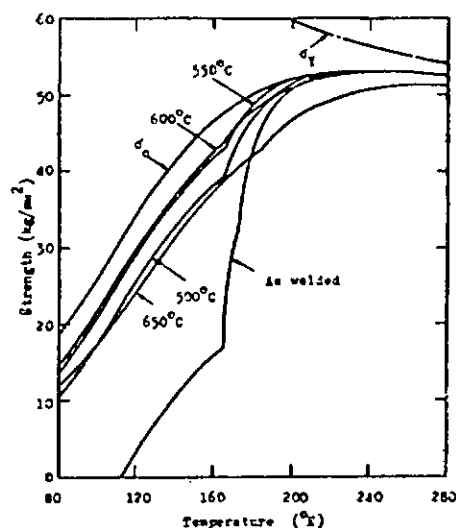
Residual stress and change in  $\nu T_g$  plotted against annealing temperature for HT 60

図5.2.2.16 熱処理温度と残留応力および破面遷移温度との関係(HT60)<sup>37)</sup>



Brittle fracture strengths calculated for welded structures of SM 41 as functions of temperature

図5.2.2.17 熱処理温度と破壊特性<sup>37)</sup>  
(SM41 計算値)



Brittle fracture strengths calculated for welded structures of HT 60 as functions of temperature

図5.2.2.18 熱処理温度と破壊特性<sup>37)</sup>  
(HT60 計算値)

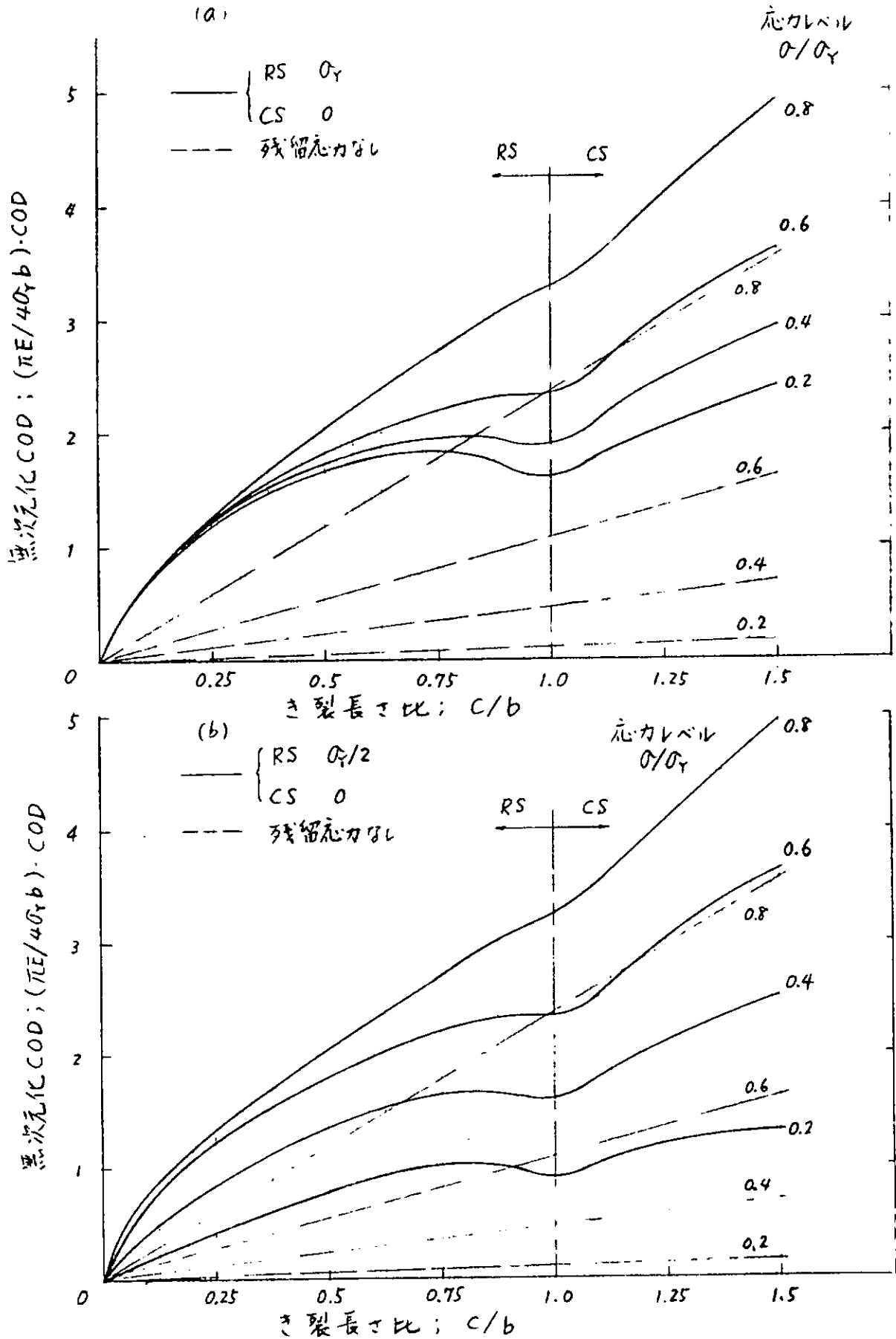


図 5.2.2.19 (a), (b) 階段状残留応力分布を受けるき裂の開口変位量 (無限板)

(C)

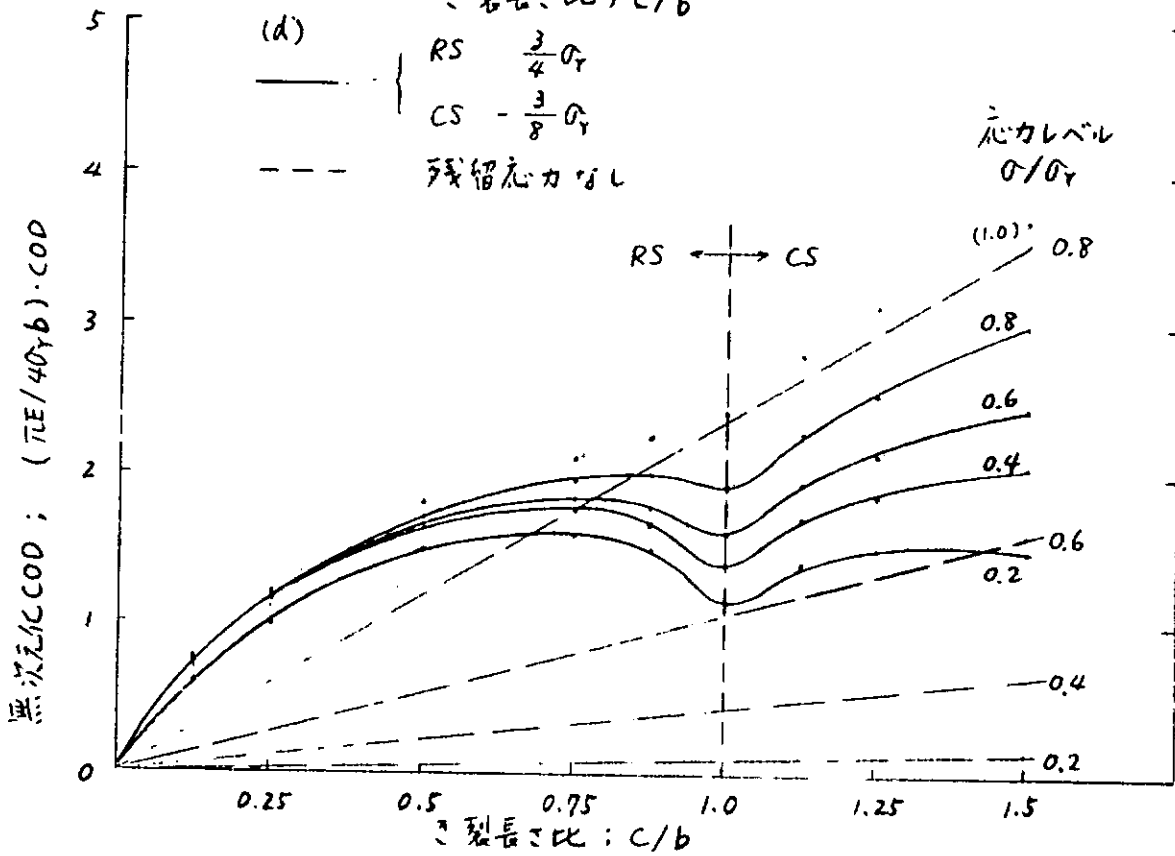
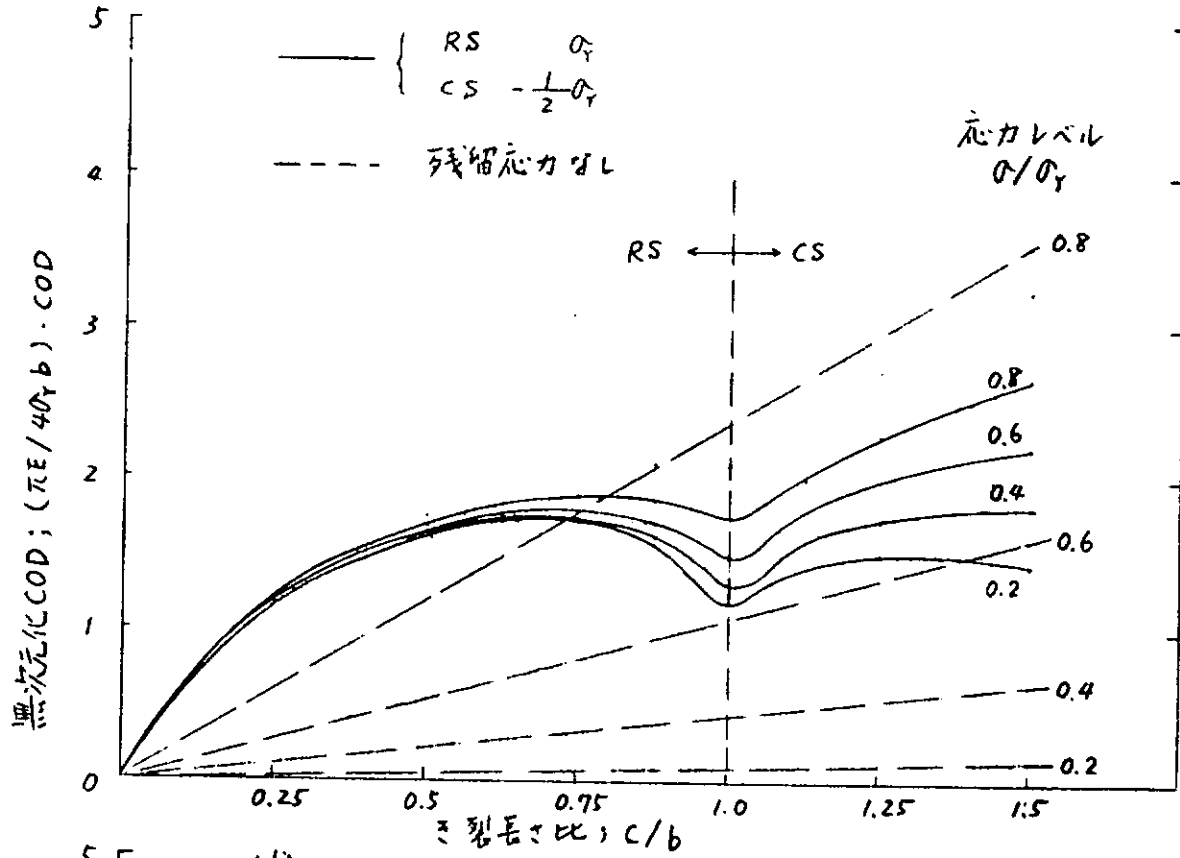


図5.2.2.19(c),(d) 階段状残留応力分布を受けるき裂の開閉変位量(無限板)

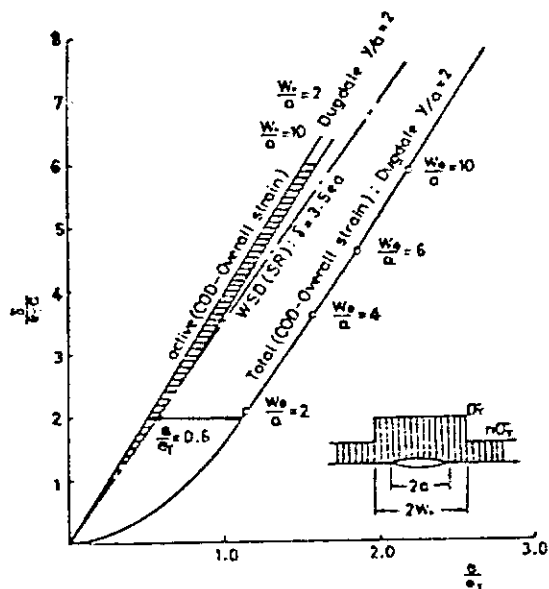


図5.2.2.20 WSD委の残留応力に対する<sup>42)</sup>  
評価法

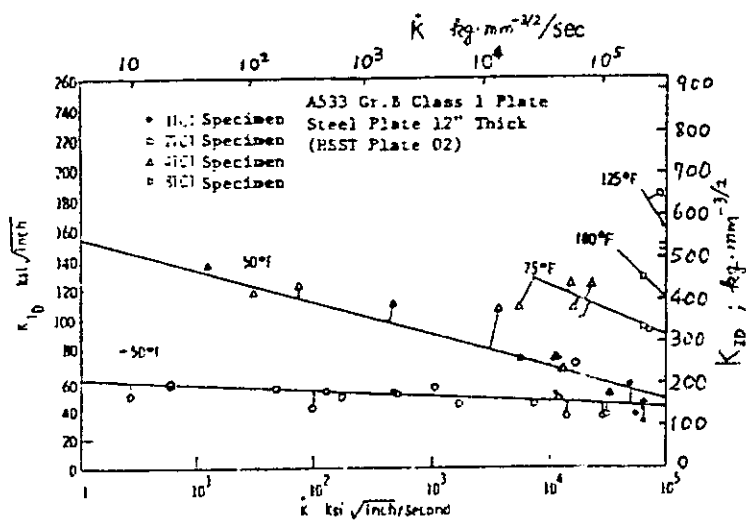


図5.2.2.21 K値の速度と破壊靱性の関係<sup>44)</sup>

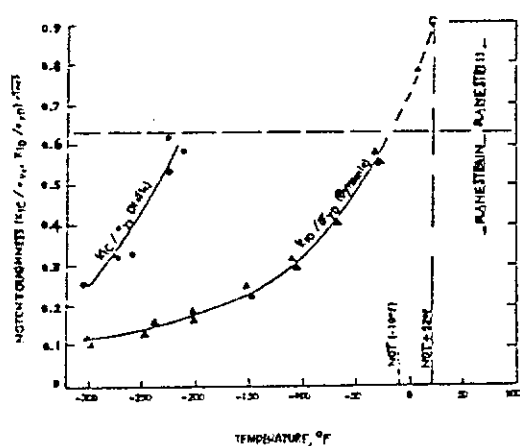


図5.2.2.22 Crack-Toughness Performance<sup>45)</sup>  
for ABS-C Steel (軟鋼)

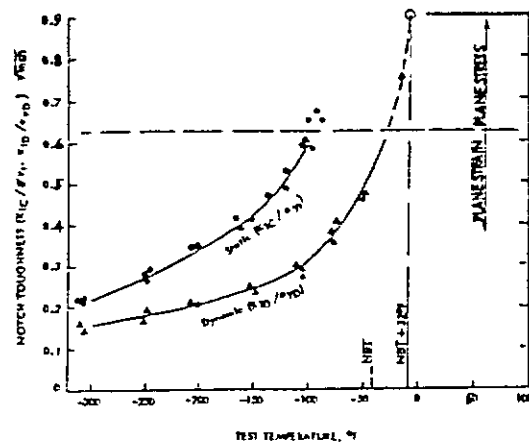


図5.2.2.23 Crack-Toughness Performance<sup>45)</sup>  
for A517-F Steel (HT20相当)

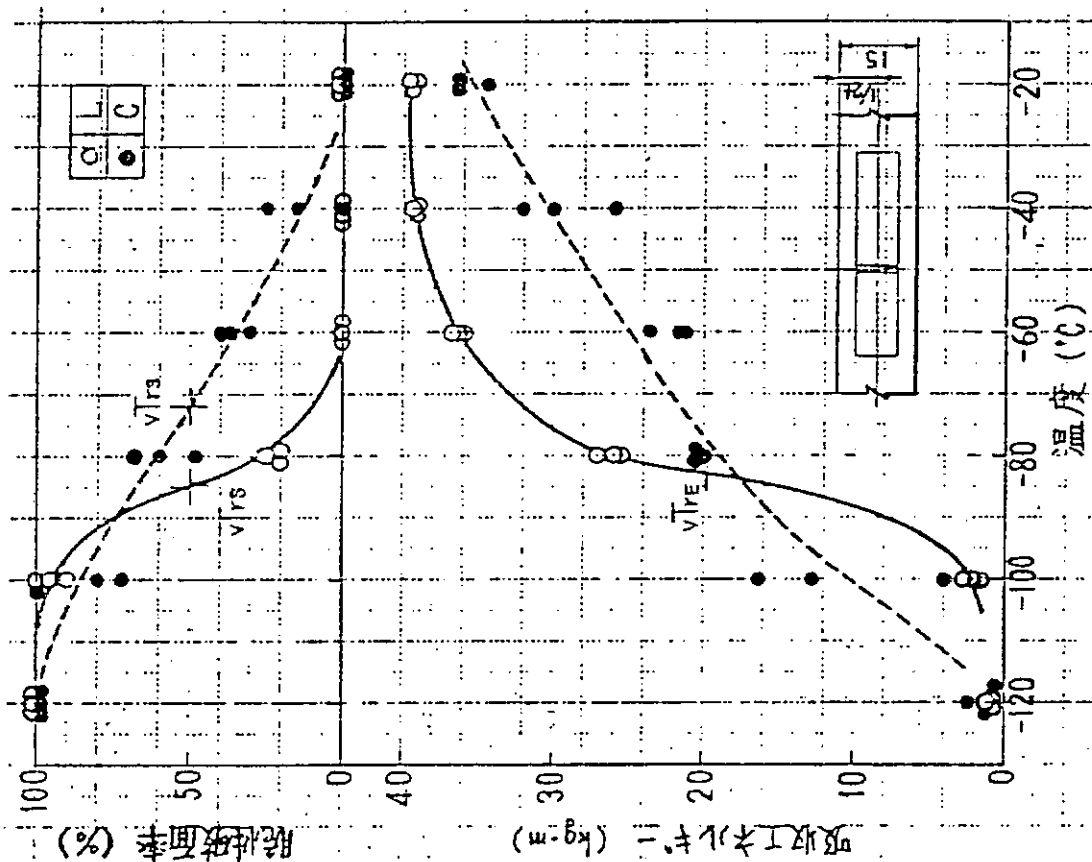


図5.2.2.24 (b) V-ノッチシャルピ-試験結果 46)  
(KT-50N鋼, 母材, 板厚 15mm)

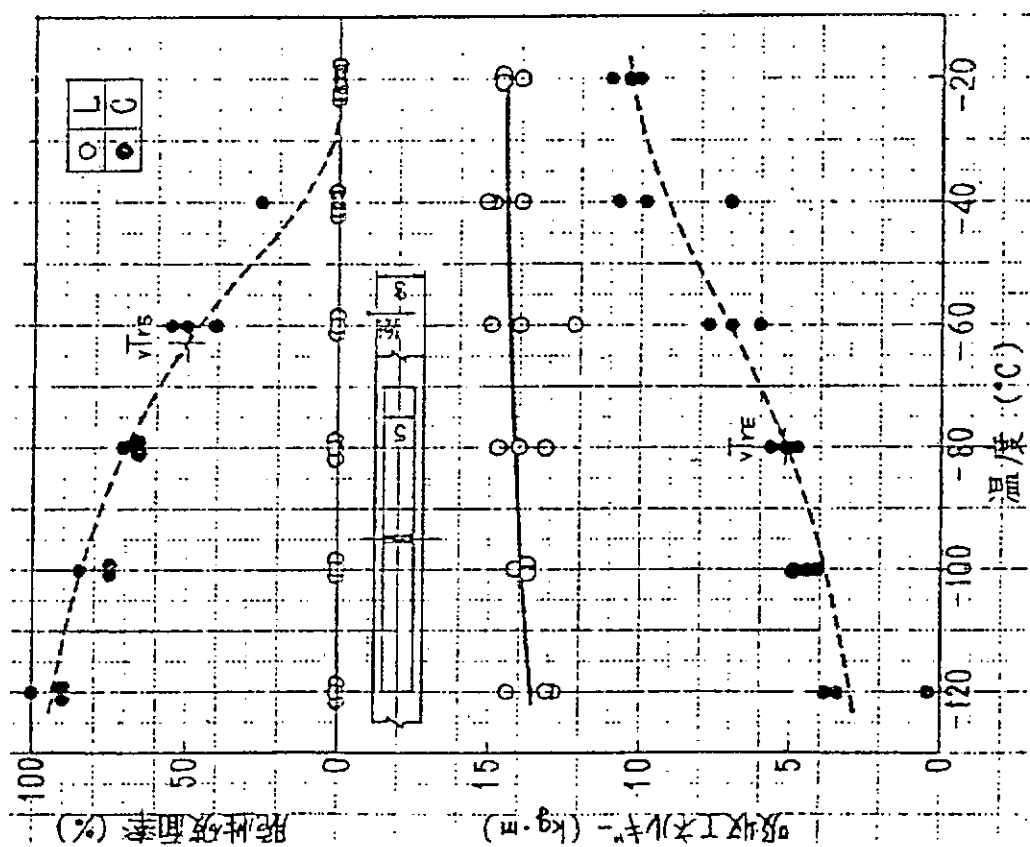
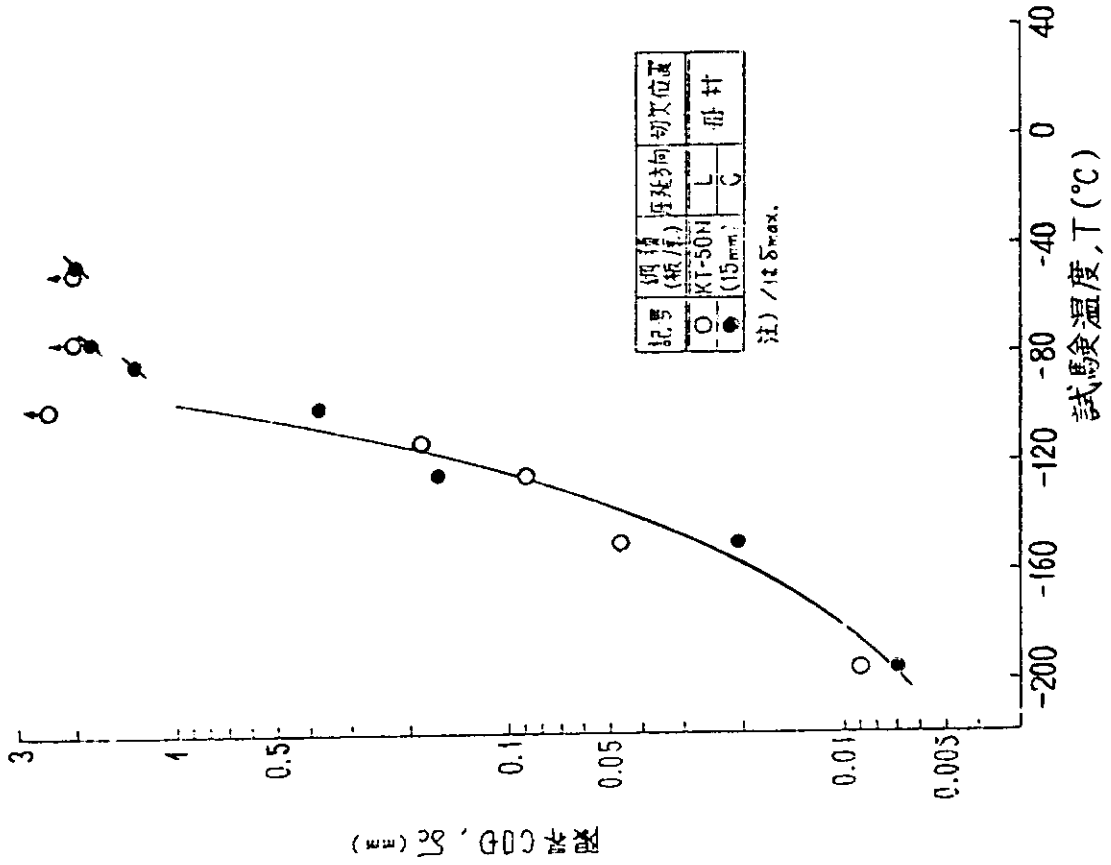
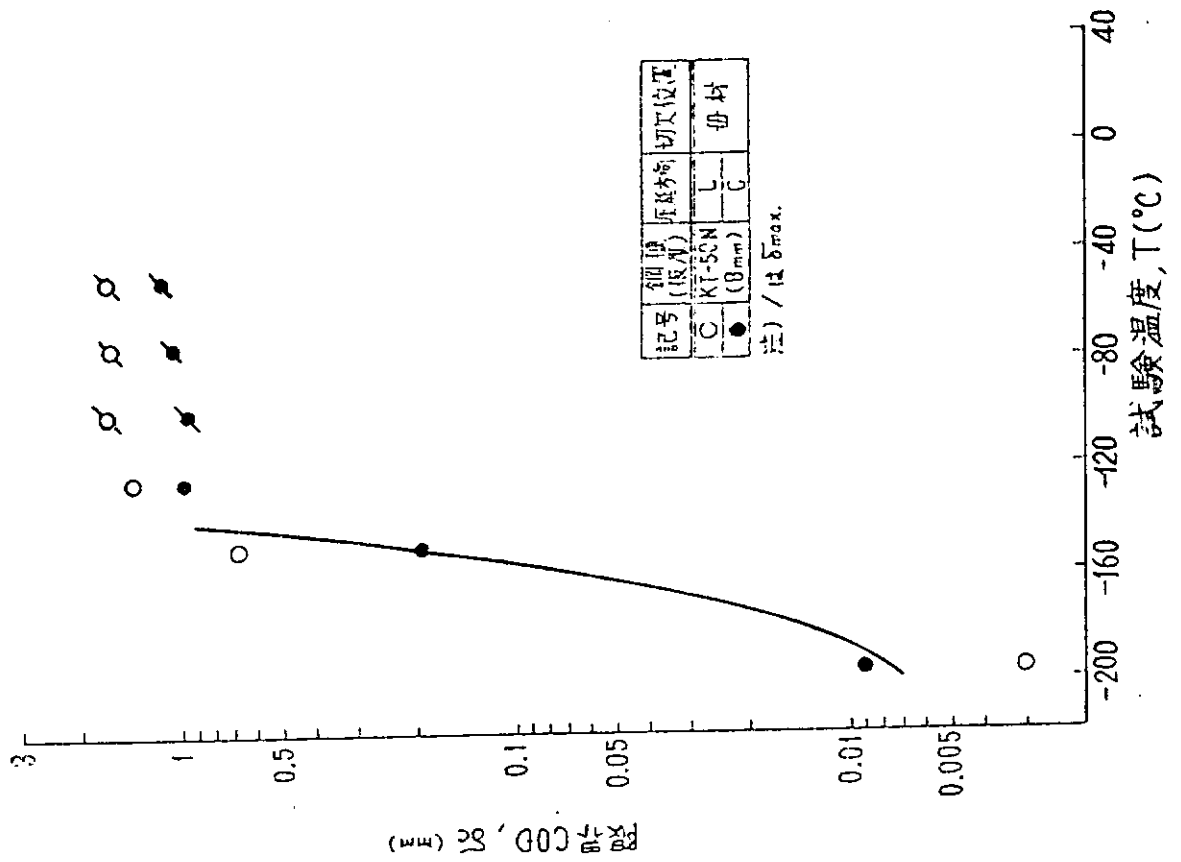


図5.2.2.24 (a) V-ノッチシャルピ-試験結果 46)  
(KT-50N鋼, 母材, 板厚 8mm)



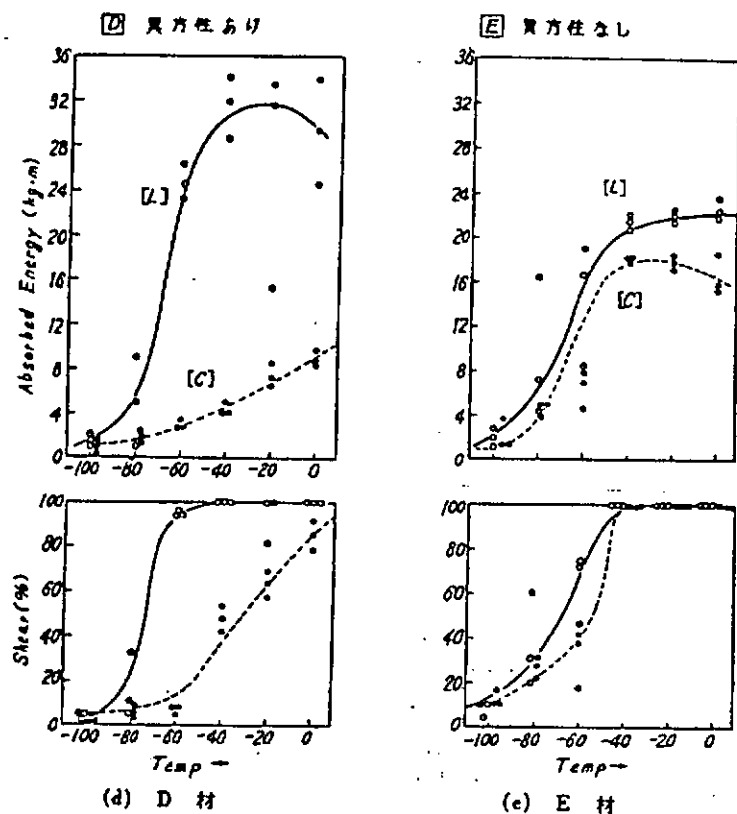


図5.2.2.26 V-ノッチシャルピー衝撃特性 (HT60)

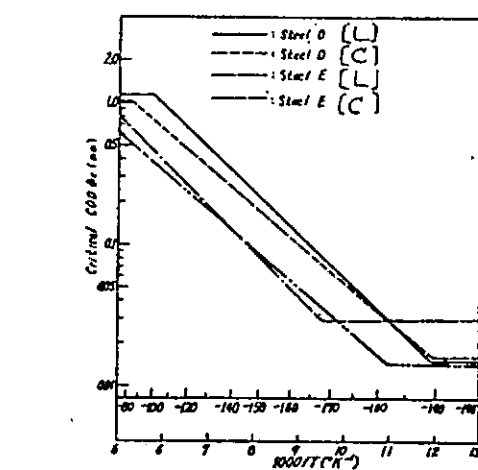


図5.2.2.27 限界CODと温度との関係

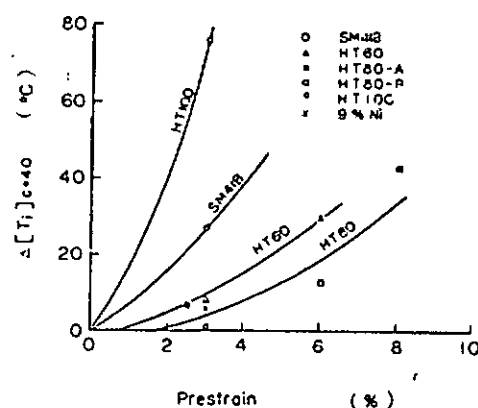


図5.2.2.29 Correlation between increment of brittle fracture initiation temperature and prestrain

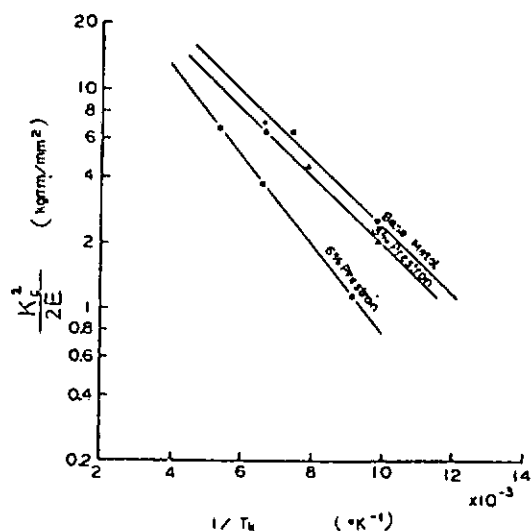


図5.2.2.28 Correlation between plastic surface energy and reciprocal of absolute temperature for HT60

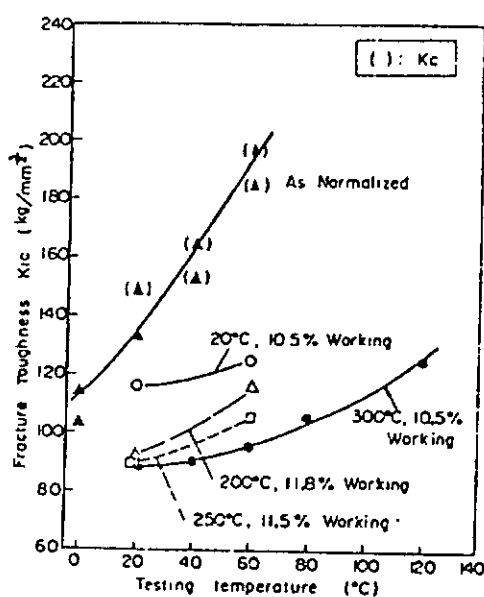


図5.2.2.30 破壊靱性 ( $K_{IC}$ ) と 温度の関係  
におよぼす予ひずみ温度の影響  
(約10%の圧延予ひずみ材)

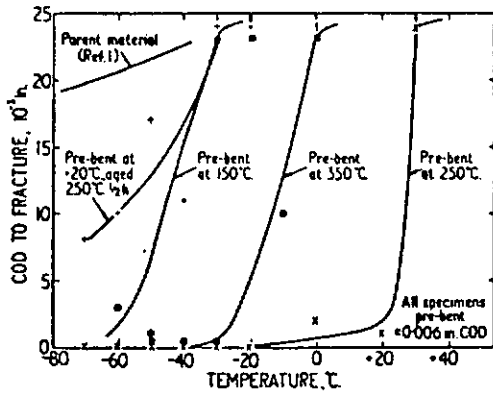


図5.2.2.31 限界開口変位と温度の関係におよぼす予ひずみ温度の影響

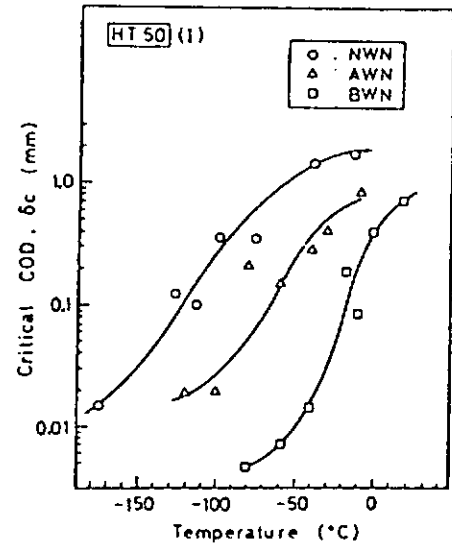


図5.2.2.32 溶接熱ひずみ履歴をうけたHT50 (1) 材の限界COD-温度曲線

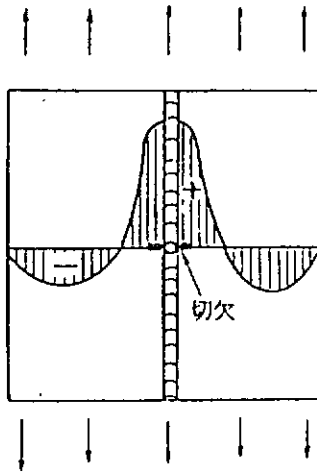


図5.2.2.33 溶接ビード付き広幅引張り試験片の残留応力分布

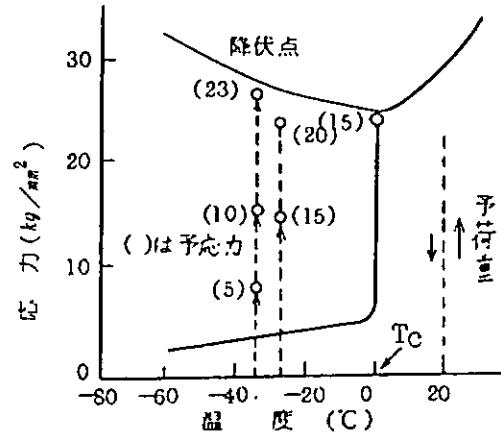


図 5.2.2.34 予歪による残留応力除去の影響

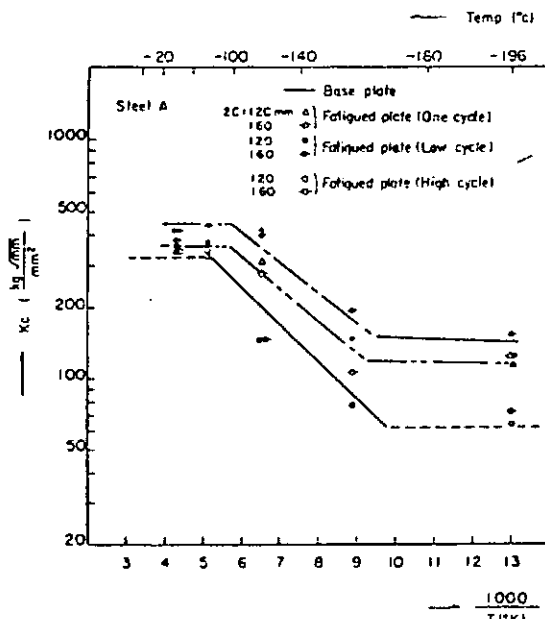


図5.2.2.35 Fracture toughness value ( $K_c$ ) vs. temperature

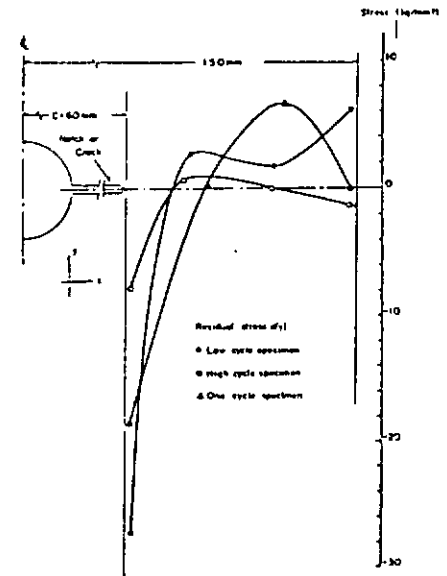
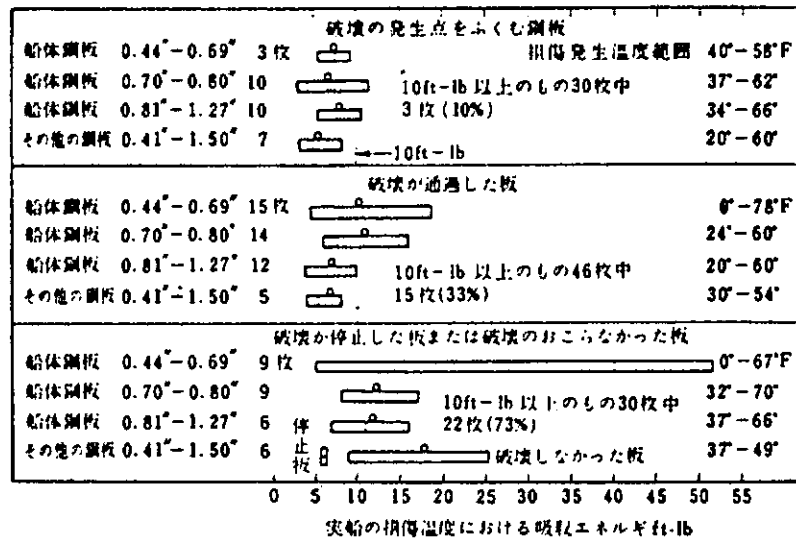
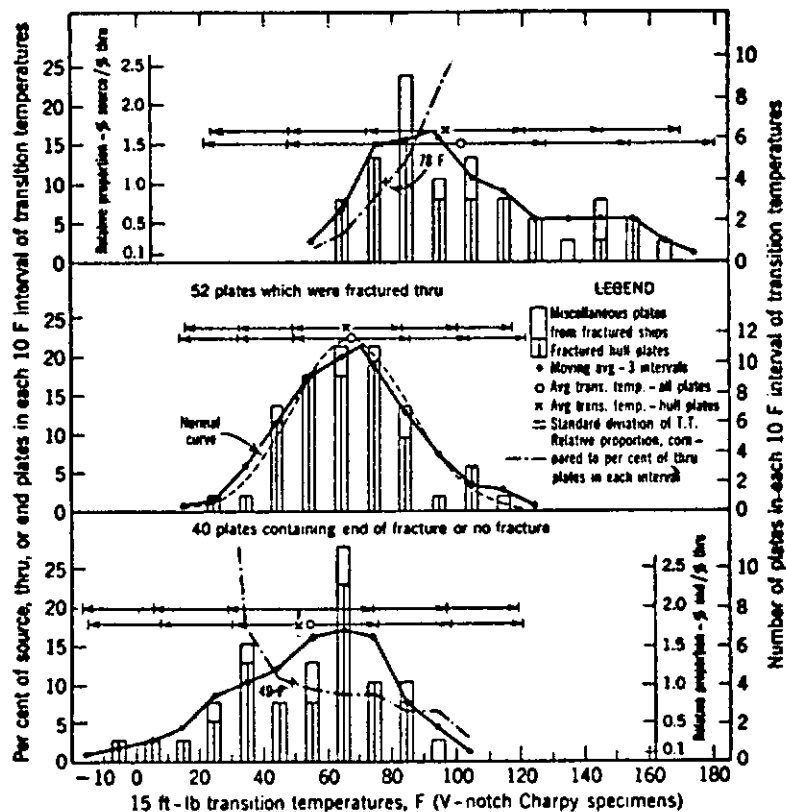


図5.2.2.36 Residual stress on fatigue cracked section



(a) 実船の損傷温度で行なった V-シャルピー試験の吸収エネルギー、  
○印はグループの平均吸収エネルギー



(b) 損傷をおこした船体鋼板の 15 ft-lb 遷移温度の頻度分布

図 5.2.3.1 損傷船の破壊発生鋼板、通過鋼板停止  
あるいは破壊しなかった鋼板別の V 型切欠  
シャルピー試験結果<sup>54)</sup>

表5.2.3.1 Mechanical properties of steels investigated.<sup>56)</sup>

| Steel and Melting Practice         | Plate Thickness, in. | Yield Strength (0.2% offset), ksi | Tensile Strength, ksi | Elongation in 1 In., % |             | Reduction of Area, % |             | Charpy V-Notch Energy Absorption at +80 F, ft·lb |
|------------------------------------|----------------------|-----------------------------------|-----------------------|------------------------|-------------|----------------------|-------------|--------------------------------------------------|
|                                    |                      |                                   |                       | At Maximum Load        | At Fracture | At Maximum Load      | At Fracture |                                                  |
| A517F AM <sup>a</sup> .....        | 2                    | 110                               | 121                   | 8.0                    | 20.0        | 11.3                 | 66.0        | 62                                               |
| 4147 AM.....                       | 3/4                  | 137                               | 154                   | 7.0                    | 15.0        | 8.7                  | 49.0        | 26                                               |
| HY-130(T) AM.....                  | 2                    | 149                               | 159                   | 7.0                    | 20.0        | 9.6                  | 68.4        | 89                                               |
| 4130 AM.....                       | 3/4                  | 158                               | 167                   | 7.0                    | 14.0        | 7.9                  | 49.2        | 23                                               |
| 12Ni-5Cr-3Mo AM.....               | 2                    | 175                               | 181                   | 3.0                    | 14.0        | 3.0                  | 62.2        | 32                                               |
| 12Ni-5Cr-3Mo VM <sup>b</sup> ..... | 1                    | 183                               | 191                   | 4.5                    | 15.0        | 6.9                  | 61.2        | 60                                               |
| 12Ni-5Cr-3Mo VM.....               | 2                    | 186                               | 192                   | 5.9                    | 17.0        | 9.3                  | 67.1        | 65                                               |
| 18Ni-8Co-3Mo (180 Grade) AM        | 2                    | 193                               | 200                   | 3.0                    | 12.5        | 4.1                  | 48.4        | 25                                               |
| 18Ni-8Co-3Mo (180 Grade) AM        | 2                    | 190                               | 196                   | 3.0                    | 12.0        | 3.2                  | 53.7        | 25                                               |
| 18Ni-8Co-3Mo (180 Grade) VM        | 2                    | 187                               | 195                   | 3.0                    | 15.0        | 4.2                  | 65.7        | 49                                               |
| 18Ni-8Co-5Mo (250 Grade) VM        | 2                    | 246                               | 257                   | 2.2                    | 11.5        | 3.4                  | 53.9        | 16                                               |

<sup>a</sup> AM signifies an air-melted basic-electric-furnace steel.  
<sup>b</sup> VM signifies a vacuum-induction-melted steel.

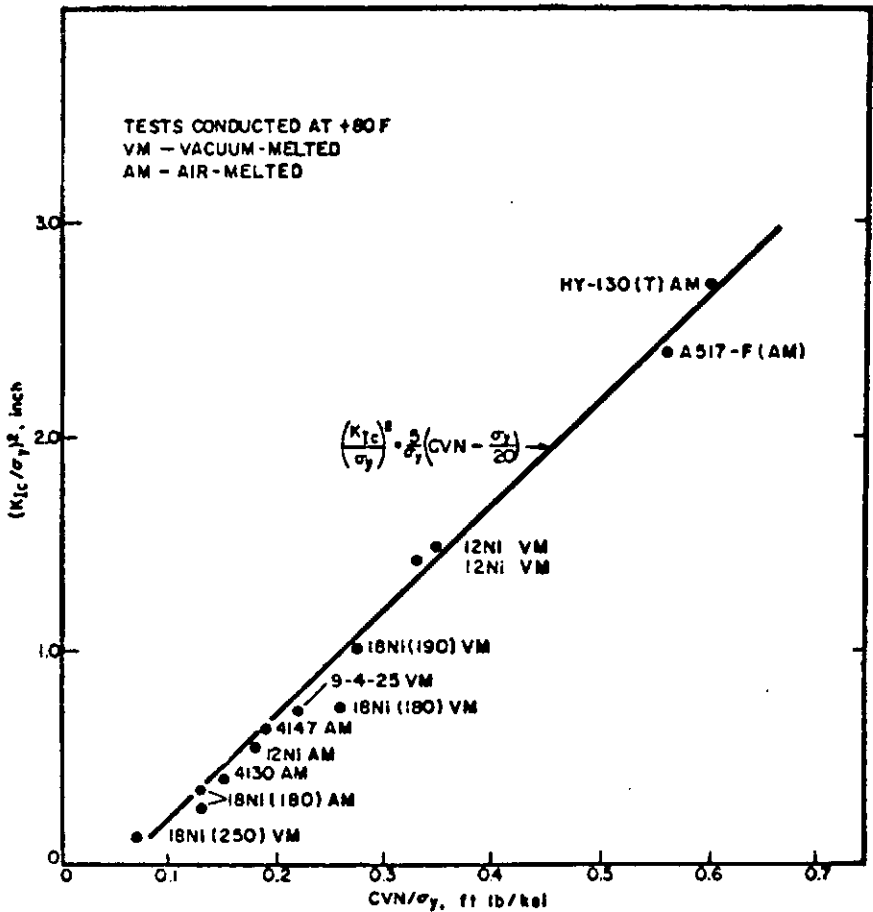


图 5.2.3.2 Relation between plane-strain stress-intensity factor,  $K_{Ic}$ , and Charpy V-notch energy absorption (CVN).<sup>56)</sup>

表5.2.3.2 Longitudinal mechanical properties of steels investigated.<sup>57)</sup>

| Steel              | Yield Strength<br>(0.2% offset),<br>kai | Tensile Strength,<br>kai | Elonga-<br>tion in<br>1 in.,<br>% | Reduction<br>of Area,<br>% | Charpy<br>V-Notch<br>Energy<br>Absorption<br>at +80 F,<br>ft-lb |
|--------------------|-----------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| A36.....           | 37                                      | 71                       | 36                                | 67                         | 26                                                              |
| ABS-C.....         | 39                                      | 63                       | 36                                | 67                         | 87                                                              |
| A302-B.....        | 56                                      | 88                       | 26                                | 67                         | 61                                                              |
| HY-80.....         | 84                                      | 99                       | 25                                | 75                         | 116                                                             |
| A517-F.....        | 118                                     | 129                      | 19                                | 65                         | 47                                                              |
| HY-130.....        | 137                                     | 143                      | 20                                | 71                         | 98                                                              |
| 10Ni-Cr-Mo-Co..... | 191                                     | 209                      | 17                                | 72                         | 71                                                              |
| 18Ni(180).....     | 180                                     | 189                      | 14                                | 66                         | 55                                                              |
| 18Ni(250).....     | 246                                     | 258                      | 11                                | 52                         | 21                                                              |

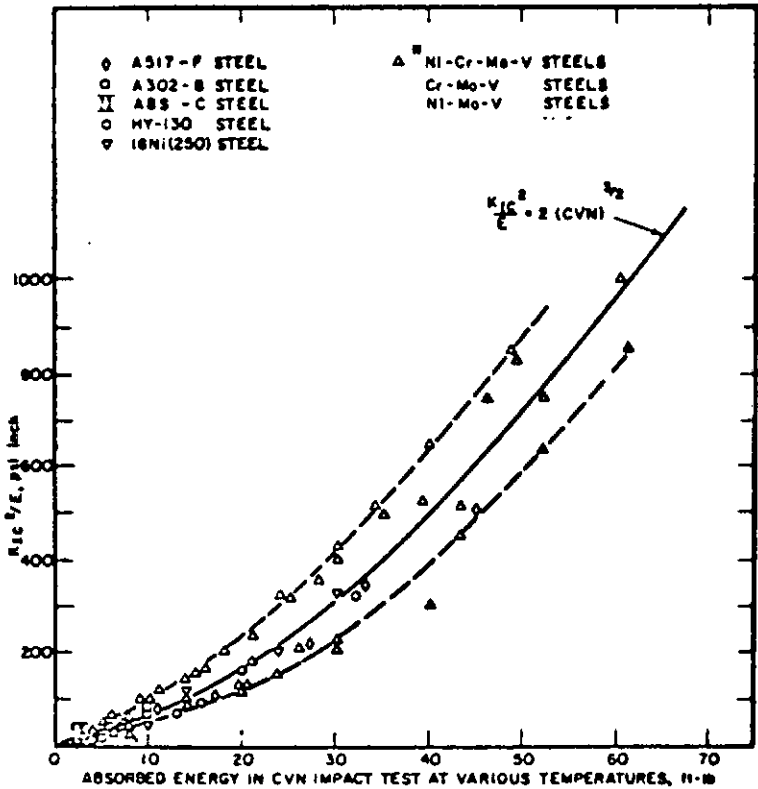


图5.2.3.3 Relation between  $K_{IC}$  and CVN values in the transition-temperature region.<sup>57)</sup>

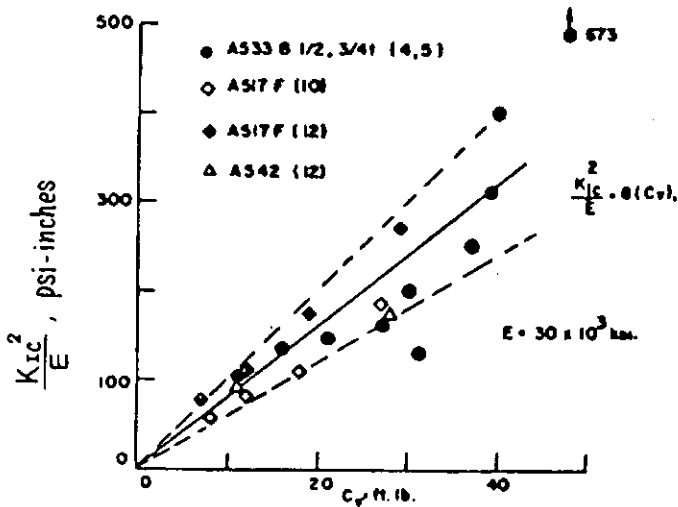
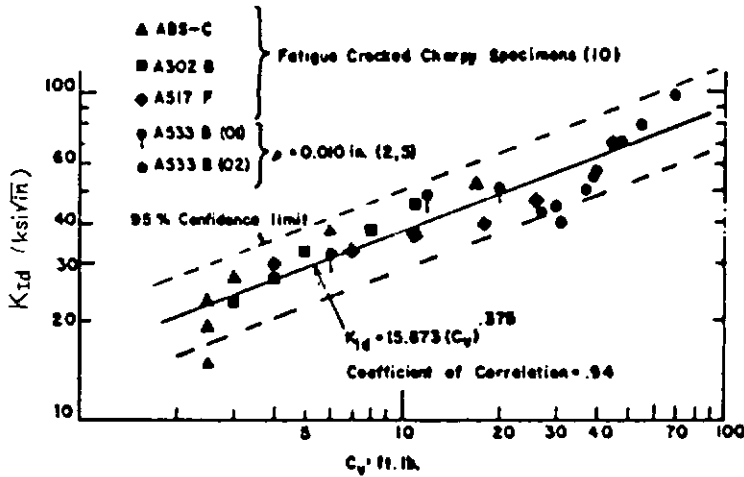
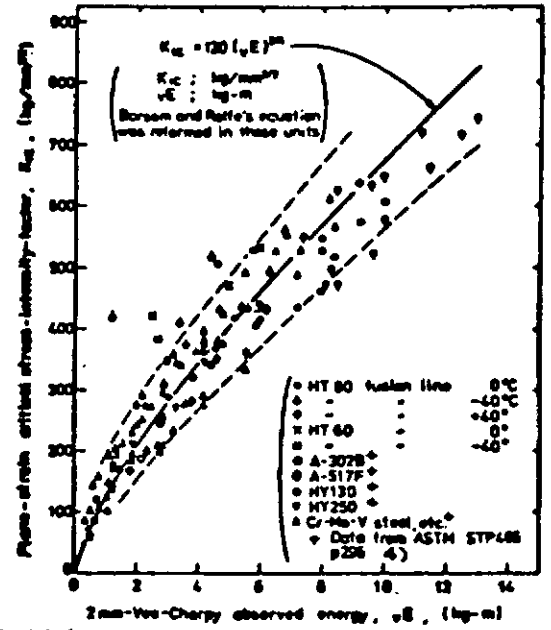


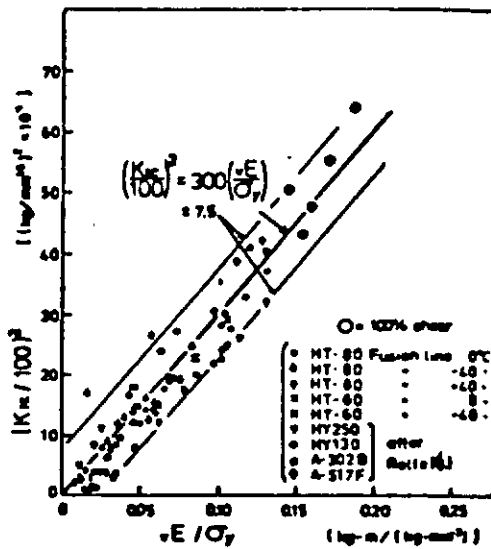
图5.2.3.4 Transition temperature correlation between  $(K_{IC}/E)^3$  and  $C_v$  for a series of unirradiated steels.<sup>58)</sup>



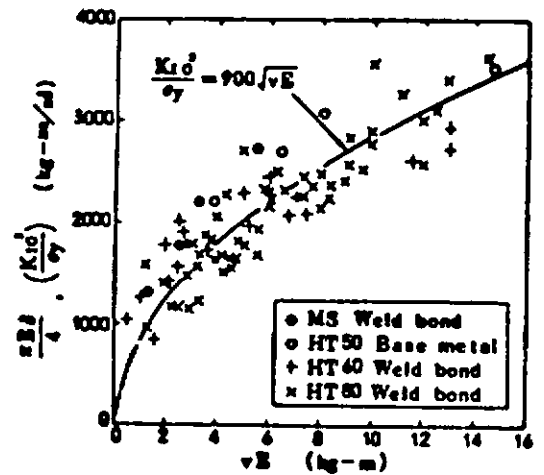
5.2.3.5 Transition temperature correlation between  $K_{ID}$  (dynamic) and  $C_v$  for a series of unirradiated steels. 58)



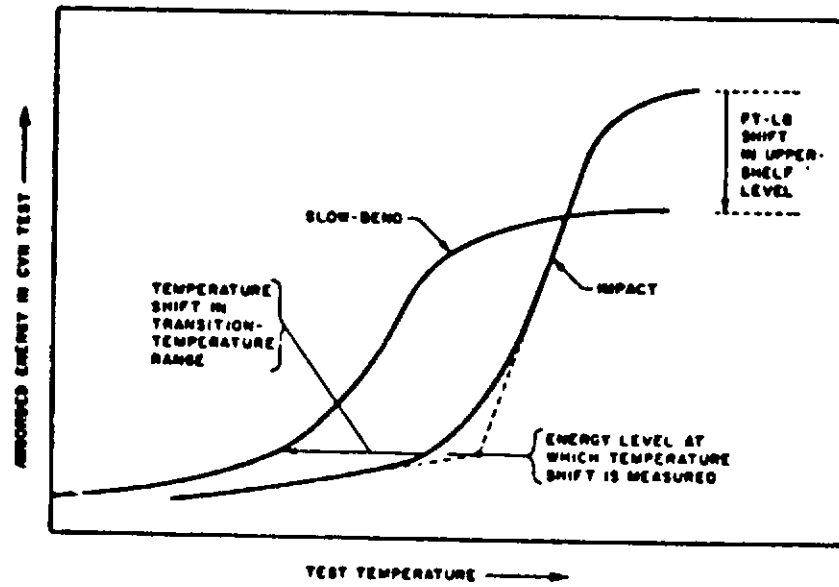
5.2.3.6 Correlation between  $K_{IC}$  value and V-notch Charpy absorbed energy in HT 60 and HT 80 steel weld fusion line. 59)



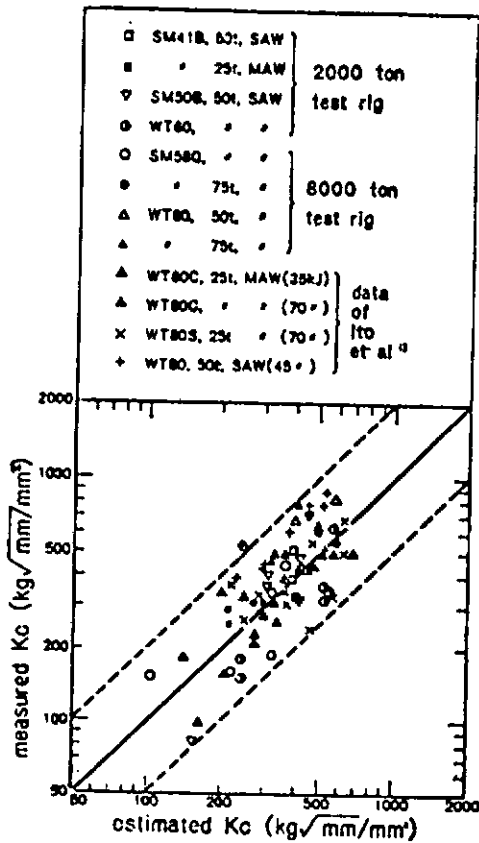
5.2.3.7 Correlation between  $K_{IC}$  and V-notch Charpy absorbed energy in the range of transition temperature of the HT 60 and HT 80 steel weld fusion line. 59)



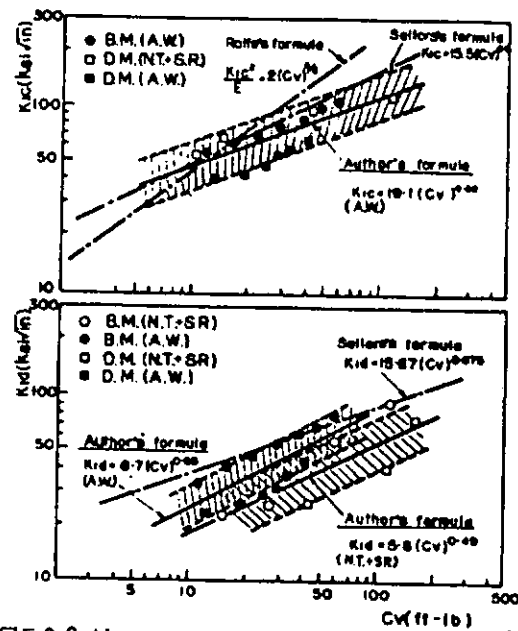
5.2.3.8  $K_{ID}/\sigma_y$  と  $vE$  との関係 60)



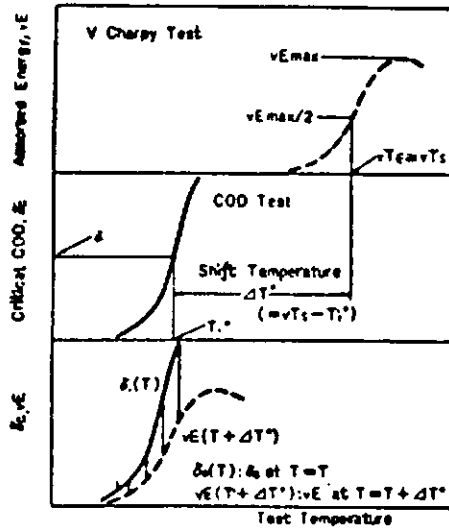
5.2.3.9 61)



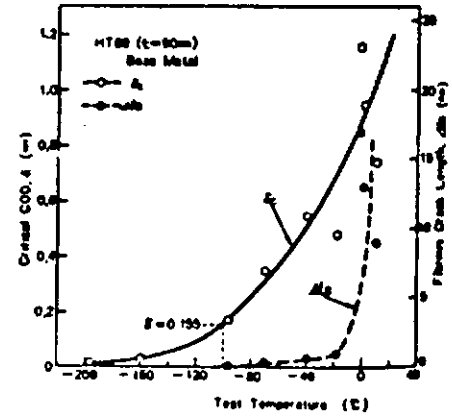
5.2.3.10 Relation of measured  $K_c$ -value and estimation from Charpy test 62)



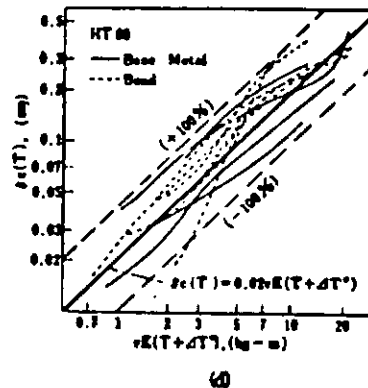
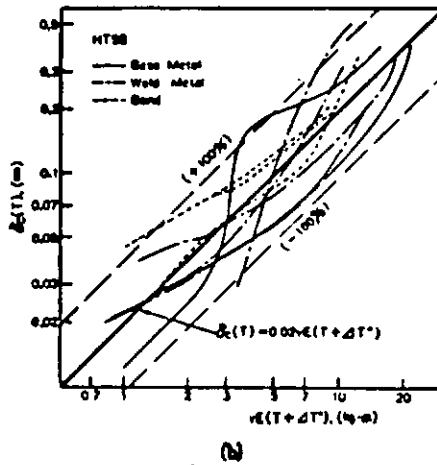
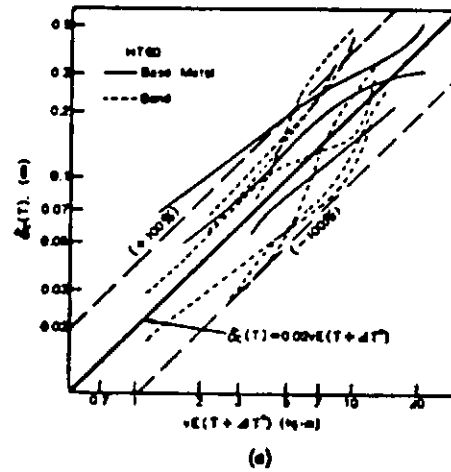
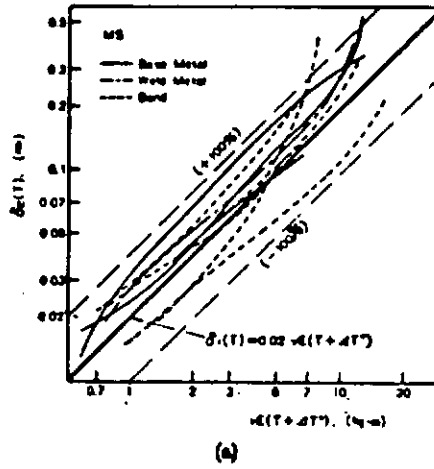
5.2.3.11 Correlation between  $C_n$  and  $K_c, K_f$  63)



5.2.3.12 Schematic Results of COD Test and V Charpy Test 64)



5.2.3.13 Temperature Dependence of Critical COD and Fibrous Crack Length 64)



5.2.3.14 Relation between  $\delta_c(T)$  [mm] and  $vE(T+\Delta T^*)$  [kg-m] 64)

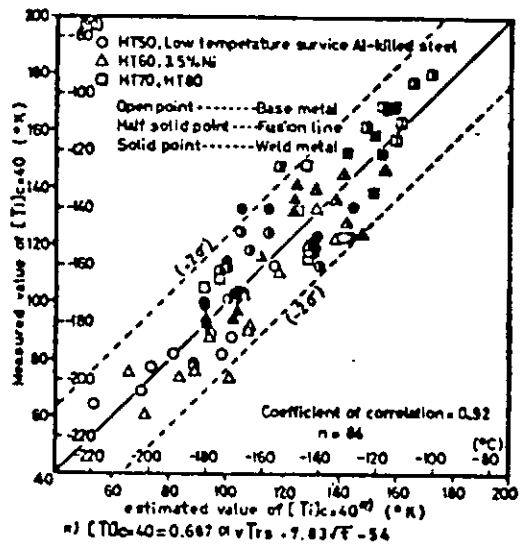


图5.2.3.15 Comparison between measured values of  $[T]_{c=40}$  and estimated ones<sup>66)</sup>

表5.2.3.3 Yield ratio of steel plates<sup>66)</sup>

| Brand                                             | Yield ratio |
|---------------------------------------------------|-------------|
| HT50(N type)                                      | 0.70        |
| HT50(QT type)                                     | 0.80        |
| Low temperature service Al-killed steel (N type)  | 0.70        |
| Low temperature service Al-killed steel (QT type) | 0.75        |
| HT60 (QT type)                                    | 0.83        |
| 3.5% Ni (N type)                                  | 0.78        |
| 3.5% Ni (QT type)                                 | 0.87        |
| HT70                                              | 0.90        |
| HT80                                              | 0.93        |

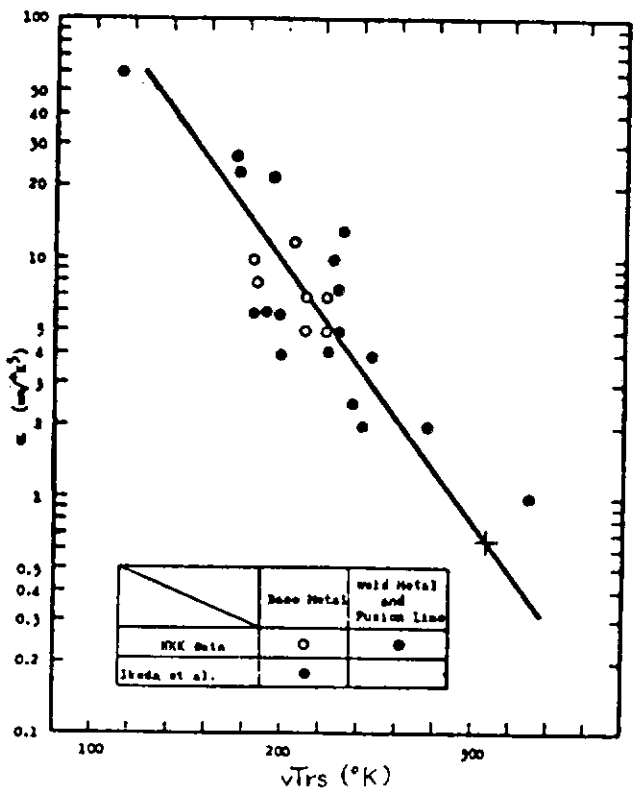


图5.2.3.16 Correlation between  $\sqrt{T_{rs}}$  and  $\alpha$ <sup>37)</sup>

表 5.3.1.2 亀裂伝播停止破壊靱性値  $K_{IC}$  (その2)

| NK項目 | 鋼種   | 板厚<br>(mm) | 熱処理 | 測定温度<br>$T_{IC}$ (°C) | 試験片<br>形状 | $K_{IC}$<br>( $\text{MPa}\sqrt{\text{cm}}$ ) | $K_{IC}$      | T.            | 注      |
|------|------|------------|-----|-----------------------|-----------|----------------------------------------------|---------------|---------------|--------|
| KAI  | KA   | 12         |     | 31                    | -2        | 8                                            | 413.6         |               |        |
|      |      |            |     |                       |           | 7                                            | 282.6         |               |        |
|      |      |            |     |                       |           | -4                                           | 200.5         |               |        |
|      |      |            |     |                       |           | -6                                           | 281.0         |               |        |
|      |      |            |     |                       |           | -11                                          | 126.1         |               |        |
|      |      |            |     |                       |           | -15                                          | 66.2          |               |        |
|      | 19   |            |     | 26.2                  | —         | 19                                           | 358.6         |               |        |
|      |      |            |     |                       |           | 10                                           | 129.3         | 1553          | 2536.3 |
|      |      |            |     |                       |           | 10                                           | 164.9         | $\times 10^3$ | (13)   |
|      |      |            |     |                       |           | 5                                            | 227.5         | (注: 値: 0.86)  |        |
|      |      |            |     |                       |           | -36                                          | 35.8          |               |        |
| KAS  | 25.4 | 26         | 11  | 49                    | 904.8     | 9934                                         | 3755          |               |        |
|      |      |            |     | 45                    | 699.1     | $\times 10^3$                                |               |               |        |
|      |      |            |     | 35                    | 476.3     | (注: 値: 0.88)                                 |               |               |        |
|      |      |            |     | 33                    | 417.2     |                                              |               |               |        |
|      |      |            |     | 32                    | 521.5     |                                              |               |               |        |
| KB   | KB   | 35         | AR  | 29.6                  | —         | 42                                           | 584.0         |               |        |
|      |      |            |     |                       |           | 32                                           | 549.0         |               |        |
|      |      |            |     |                       |           | 26                                           | 481.0         | 5615          | 1393   |
|      |      |            |     |                       |           | 17                                           | 308.0         | $\times 10^3$ | (22)   |
|      |      |            |     |                       |           | 36                                           | 754.0         | (注: 値: 0.38)  |        |
|      |      |            |     |                       |           | 26                                           | 723.0         |               |        |
|      | 19   |            |     | 30                    | -20       | 12                                           | 457.0         |               |        |
|      |      |            |     |                       |           | 11                                           | 472.0         |               |        |
|      |      |            |     |                       |           | 21                                           | 559.6         | 1926          | 4412   |
|      |      |            |     |                       |           | 7                                            | 311.2         | $\times 10^3$ |        |
|      |      |            |     |                       |           | -3                                           | 109.4         | (注: 値: 0.85)  |        |
| KDS  | 30   | D.T        | 26  | -3                    | 5         | 556.3                                        | 1657          | 1737          |        |
|      |      |            |     |                       | -1        | 132.9                                        | $\times 10^3$ |               |        |
|      |      |            |     |                       | -7        | 267.5                                        | (注: 値: 0.29)  |               |        |
|      |      |            |     |                       | -26       | 180.8                                        |               |               |        |
|      |      |            |     |                       | 20        | 635.7                                        | 667           | 1485          |        |
| KDS  | KDS  | 30         | D.T | 26                    | -3        | 17                                           | 481.7         | (注: 値: 0.98)  |        |
|      |      |            |     |                       |           | -1                                           | 239.1         |               |        |
|      |      |            |     |                       |           | 35                                           | 753.1         | 2134          | 3885   |
|      |      |            |     |                       |           | 25                                           | 404.1         | $\times 10^3$ |        |
|      |      |            |     |                       |           | 20                                           | 418.7         | (注: 値: 0.93)  |        |
|      |      |            |     |                       |           | 19                                           | 331.7         |               |        |
|      | 30   |            |     | ES                    | 1326.5    | 1326.5                                       |               |               |        |

表 5.3.1.1 亀裂伝播停止破壊靱性値  $K_{IC}$  (その1)

| NK項目 | 鋼種  | 板厚<br>(mm) | 熱処理 | 測定温度<br>$T_{IC}$ (°C) | 試験片<br>形状 | $K_{IC}$<br>( $\text{MPa}\sqrt{\text{cm}}$ ) | $K_{IC}$ | T.            | 注    |
|------|-----|------------|-----|-----------------------|-----------|----------------------------------------------|----------|---------------|------|
| KAI  | KA  | 12         | AR  | 30.5                  | 9         | -14                                          | 303.7    |               |      |
|      |     |            |     |                       |           | -21                                          | 162.7    |               |      |
|      |     |            |     |                       |           | -23                                          | 136.0    |               |      |
|      |     |            |     |                       |           | -28                                          | 171.5    |               |      |
|      |     |            |     |                       |           | -27                                          | 193.1    |               |      |
|      | KAS | 12         | D.T | 29.5                  | 0         | -36                                          | 97.2     |               |      |
|      |     |            |     |                       |           | -43                                          | 77.9     |               |      |
|      |     |            |     |                       |           | 2                                            | 356.5    |               |      |
|      |     |            |     |                       |           | -2                                           | 315.5    |               |      |
|      |     |            |     |                       |           | -12                                          | 195.4    |               |      |
| KAS  | KAS | 12         | D.T | 28                    | 4         | -12                                          | 215.3    |               |      |
|      |     |            |     |                       |           | -20                                          | 102.9    |               |      |
|      |     |            |     |                       |           | -23                                          | 78.2     |               |      |
|      |     |            |     |                       |           | 17                                           | 372.6    |               |      |
|      |     |            |     |                       |           | 5                                            | 322.1    |               |      |
|      | KDS | 12         | D.T | 28                    | 12        | 2                                            | 434.4    |               |      |
|      |     |            |     |                       |           | -2                                           | 218.4    |               |      |
|      |     |            |     |                       |           | -3                                           | 241.1    | 1212          | 2301 |
|      |     |            |     |                       |           | -4                                           | 205.7    | $\times 10^3$ | (13) |
|      |     |            |     |                       |           | -15                                          | 149.7    | (注: 値: 0.66)  |      |
| KDS  | KDS | 12         | D.T | 29.5                  | 0         | -15                                          | 106.3    |               |      |
|      |     |            |     |                       |           | 3                                            | 343.2    |               |      |
|      |     |            |     |                       |           | -16                                          | 208.6    |               |      |
|      |     |            |     |                       |           | -17                                          | 110.4    |               |      |
|      |     |            |     |                       |           | -18                                          | 175.5    |               |      |
|      | KDS | 12         | D.T | 28                    | 4         | -24                                          | 81.3     |               |      |
|      |     |            |     |                       |           | -33                                          | 55.6     |               |      |
|      |     |            |     |                       |           | 6                                            | 367.4    |               |      |
|      |     |            |     |                       |           | 2                                            | 240.8    |               |      |
|      |     |            |     |                       |           | 0                                            | 284.6    |               |      |
| KDS  | KDS | 12         | D.T | 28                    | 12        | -7                                           | 194.1    |               |      |
|      |     |            |     |                       |           | -18                                          | 144.1    |               |      |
|      |     |            |     |                       |           | -19                                          | 120.4    |               |      |
|      |     |            |     |                       |           | 2                                            | 359.8    |               |      |
|      |     |            |     |                       |           | -2                                           | 229.9    |               |      |
|      | KDS | 12         | D.T | 28                    | 12        | -5                                           | 175.4    |               |      |
|      |     |            |     |                       |           | -6                                           | 245.8    |               |      |
|      |     |            |     |                       |           | -7                                           | 270.4    |               |      |
|      |     |            |     |                       |           | -9                                           | 201.7    |               |      |
|      |     |            |     |                       |           | -14                                          | 115.3    |               |      |

表5.3.1.3 電裂伝播停止破壊靱性値 Kca (その3)

| (母材方向) |     |         |     |                          |            |                                         |                |         |      |
|--------|-----|---------|-----|--------------------------|------------|-----------------------------------------|----------------|---------|------|
| NK種別   | 鋼種  | 板厚 (mm) | 熱処理 | 伝裂止 V <sub>TE</sub> (°C) | 伝裂片止止 (°C) | K <sub>ca</sub> (kg/cm <sup>3/2</sup> ) | K <sub>o</sub> | T.      | 注    |
| KDS    | KDN | 30      | AR  | 26 - 3                   | ESSO       | 25 919.0                                | 1341           | 2,159.3 | (13) |
|        |     |         |     |                          |            | 22 741.7                                |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 14 497.8                                |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 14 1197.2                               |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 36 2152.9                               |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 35 1941.1                               | 4,619          | 3,828.3 |      |
|        |     |         |     |                          |            | 32 1420.6                               |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 22 820.6                                |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 19 1194.4                               |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 42 817.2                                |                |         |      |
| KDK    | KEN | 30      | N   | 29.6                     | O.T        | 41 921.9                                | 2,760          | 4,705.3 | (13) |
|        |     |         |     |                          |            | 37 737.0                                |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 31 493.4                                |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 20 311.2                                |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 15 196.2                                |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 15 239.5                                |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 20 770.9                                |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 12 534.5                                | 2,334          | 5,696.3 |      |
|        |     |         |     |                          |            | 4 300.4                                 |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | -5 97.3                                 |                |         |      |
| KE級    | KEN | 35      | AR  | 28                       | ESSO       | -6 163.4                                |                |         | (22) |
|        |     |         |     |                          |            | 24 651.0                                | 4,077          | 2,600.3 |      |
|        |     |         |     |                          |            | 17 524.0                                |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 12 428.0                                |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 0 302.0                                 |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 19 730.4                                | 6,476          | 4,693.3 |      |
|        |     |         |     |                          |            | 11 515.3                                |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 7 244.0                                 |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | -15 115.9                               |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | -16 57.8                                |                |         |      |
| KE級    | KEN | 38      | AR  | 29                       | D.T        | 0 585.2                                 | 1,191          | 6,210.9 | (13) |
|        |     |         |     |                          |            | -8 364.9                                |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | -40 142.8                               |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 23 1746.3                               |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 21 1453.6                               |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 19 1248.2                               | 5,090          | 5,743.3 |      |
|        |     |         |     |                          |            | 18 1469.9                               |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 14 1504.5                               |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 17 1351.7                               |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 15 1101.8                               |                |         |      |
| KE級    | KEN | 50      | N   | 30                       | ESSO       | 7 711.8                                 |                |         | (13) |
|        |     |         |     |                          |            | 28.6                                    |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            |                                         |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            |                                         |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            |                                         |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            |                                         |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            |                                         |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            |                                         |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            |                                         |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            |                                         |                |         |      |

表5.3.1.4 電裂伝播停止破壊靱性値 Kca (その4)

| (母材方向) |     |         |     |                          |            |                                         |                |         |      |
|--------|-----|---------|-----|--------------------------|------------|-----------------------------------------|----------------|---------|------|
| NK種別   | 鋼種  | 板厚 (mm) | 熱処理 | 伝裂止 V <sub>TE</sub> (°C) | 伝裂片止止 (°C) | K <sub>ca</sub> (kg/cm <sup>3/2</sup> ) | K <sub>o</sub> | T.      | 注    |
| KE級    | KEN | 30      | —   | 28.6                     | ESSO       | 5 535.3                                 |                |         | (13) |
|        |     |         |     |                          |            | 1 326.4                                 |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 17 832.1                                |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 14 732.2                                |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 5 403.9                                 |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 25 691.4                                |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 16 610.3                                |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 12 417.2                                |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 1 298.3                                 | 4,251          | 2,575.3 |      |
|        |     |         |     |                          |            | -10 238.8                               |                |         |      |
| KE級    | KEN | 38      | —   | 34                       | O.T        | 24 718.1                                |                |         | (13) |
|        |     |         |     |                          |            | 24 789.9                                |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 20 630.6                                |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 19 574.4                                |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 10 459.6                                |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 10 437.9                                |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 8 370.9                                 |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 0 298.3                                 |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | -17 218.8                               |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 26 1184.0                               | 5,062          | 3,237.3 |      |
| KE級    | KEN | 40      | —   | 35                       | —          | 12 543.0                                |                |         | (22) |
|        |     |         |     |                          |            | 6 391.9                                 |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | -8 285.8                                |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | -33 71.3                                |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 30 698.0                                | 1,451          | 2,965.3 |      |
|        |     |         |     |                          |            | 19 685.4                                |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 13 480.3                                |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | -2 235.4                                |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 24 779.0                                | 1,645          | 4,317.3 |      |
|        |     |         |     |                          |            | 21 713.0                                |                |         |      |
| KE級    | KEN | 50      | —   | 27                       | 大型         | 9 462.0                                 |                |         | (13) |
|        |     |         |     |                          |            | 28 293.0                                |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 31 1046.7                               | 1,026          | 2,879.3 |      |
|        |     |         |     |                          |            | 30 846.4                                |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 2 222.5                                 |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 2 190.7                                 |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | -25 129.3                               |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 22 317.9                                |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 20 522.0                                |                |         |      |
|        |     |         |     |                          |            | 19 534.3                                |                |         |      |

表5.3.1.6 電裂伝播停止破壊靱性値  $K_{Ic}$  (その6)

| NK項目  | 鋼種    | 板厚<br>(mm) | 熱処理  | 降伏点<br>$\sigma_{0.2}$ (MPa) | 引張強さ<br>$\sigma_{TS}$ (MPa) | 引張伸び<br>$\delta_5$ (%) | 試験温度<br>(°C) | $K_{Ic}$<br>( $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ) | $K_{Ic}$            | $T_0$ | 出典   |
|-------|-------|------------|------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------|--------------|---------------------------------------------|---------------------|-------|------|
| KD32H | K5D   | 25.4       | 大型   | 34                          | -37                         | 大型                     | 5            | 723.0                                       | $4.169 \times 10^3$ | 3029  | (22) |
|       |       |            |      | 35                          |                             |                        | 1            | 756.0                                       | $4.10 \times 10^3$  |       |      |
|       |       |            |      |                             |                             |                        | -2           | 548.0                                       | (注: 係数: 0.89)       |       |      |
|       |       |            |      |                             |                             |                        | 10           | 413.0                                       |                     |       |      |
| KD32H | A33D  | 25.5       | D.T  | 34                          | -36                         |                        | 1            | 597.5                                       |                     |       | (13) |
|       |       |            |      |                             |                             |                        | -5           | 669.3                                       |                     |       |      |
|       |       |            |      |                             |                             |                        | -14          | 342.1                                       | $2.711 \times 10^3$ | 2275  |      |
|       |       |            |      |                             |                             |                        | -20          | 290.0                                       | $2.711 \times 10^3$ |       |      |
| KD32H | KD32  | 35         | 大型   | 36.6                        | -27                         |                        | -1           | 702.0                                       | (注: 係数: 0.87)       |       | (22) |
|       |       |            |      |                             |                             |                        | -7           | 536.8                                       |                     |       |      |
|       |       |            |      |                             |                             |                        | -18          | 372.2                                       |                     |       |      |
|       |       |            |      |                             |                             |                        | -30          | 265.2                                       |                     |       |      |
| KE32H | K5E   | 35         | D.T  | 33                          | -63                         |                        | 5            | 1304                                        | $7.489 \times 10^3$ | 3116  | (22) |
|       |       |            |      | 35                          |                             |                        | 1            | 629                                         | $3.10 \times 10^3$  |       |      |
|       |       |            |      |                             |                             |                        | -11          | 536                                         | (注: 係数: 0.76)       |       |      |
|       |       |            |      |                             |                             |                        | -15          | 436                                         |                     |       |      |
| KE32H | E32   | 50         | ESSO | 38.2                        | -62                         |                        | 12           | 731.0                                       | $3.974 \times 10^3$ | 2490  | (13) |
|       |       |            |      |                             |                             |                        | -5           | 394.9                                       | $3.10 \times 10^3$  |       |      |
|       |       |            |      |                             |                             |                        | -10          | 240.0                                       | (注: 係数: 0.92)       |       |      |
|       |       |            |      |                             |                             |                        | -30          | 162.8                                       |                     |       |      |
| KD36H | D36   | 35         | AR   | 36                          | —                           |                        | 21           | 859.8                                       |                     |       | (13) |
|       |       |            |      |                             |                             |                        | 13           | 586.7                                       | $3.318 \times 10^3$ | 3788  |      |
|       |       |            |      |                             |                             |                        | 4            | 360.4                                       | $3.10 \times 10^3$  |       |      |
|       |       |            |      |                             |                             |                        | -9           | 202.3                                       | (注: 係数: 0.997)      |       |      |
| KI33H | KT50Q | 20         | QT   | 37                          | —                           |                        | 17           | 546.2                                       | $1.082 \times 10^3$ | 3475  | (13) |
|       |       |            |      |                             |                             |                        | 13           | 865.2                                       | $3.10 \times 10^3$  |       |      |
|       |       |            |      |                             |                             |                        | 11           | 435.2                                       | (注: 係数: 0.87)       |       |      |
|       |       |            |      |                             |                             |                        | -10          | 210.8                                       |                     |       |      |
| KD36H | D36   | 35         | AR   | 38.6                        | —                           |                        | -13          | 158.2                                       |                     |       | (13) |
|       |       |            |      |                             |                             |                        | 21           | 549.0                                       |                     |       |      |
|       |       |            |      |                             |                             |                        | 8            | 675.0                                       | $5.523 \times 10^3$ | 3295  |      |
|       |       |            |      |                             |                             |                        | 5            | 435.9                                       | $3.10 \times 10^3$  |       |      |
| KI33H | KT50Q | 20         | QT   | 44.3                        | -86                         |                        | -6           | 238.6                                       | (注: 係数: 0.79)       |       | (13) |
|       |       |            |      |                             |                             |                        | -12          | 151.1                                       |                     |       |      |
|       |       |            |      |                             |                             |                        | -34          | 691.7                                       | $5.074 \times 10^3$ | 1569  |      |
|       |       |            |      |                             |                             |                        | -56          | 381.8                                       | $3.10 \times 10^3$  |       |      |

表5.3.1.5 電裂伝播停止破壊靱性値  $K_{Ic}$  (その5)

| NK項目  | 鋼種  | 板厚<br>(mm) | 熱処理 | 降伏点<br>$\sigma_{0.2}$ (MPa) | 引張強さ<br>$\sigma_{TS}$ (MPa) | 引張伸び<br>$\delta_5$ (%) | 試験温度<br>(°C) | $K_{Ic}$<br>( $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ) | $K_{Ic}$            | $T_0$ | 出典   |
|-------|-----|------------|-----|-----------------------------|-----------------------------|------------------------|--------------|---------------------------------------------|---------------------|-------|------|
| KE32H | KEN | 50         | N   | 297                         | —                           |                        | 17           | 581.2                                       |                     |       | (13) |
|       |     |            |     |                             |                             |                        | 14           | 184.0                                       |                     |       |      |
|       |     |            |     |                             |                             |                        | 12           | 695.5                                       |                     |       |      |
|       |     |            |     |                             |                             |                        | 12           | 377.4                                       |                     |       |      |
|       |     |            |     |                             |                             |                        | 9            | 748.9                                       |                     |       |      |
|       |     |            |     |                             |                             |                        | 8            | 593.6                                       |                     |       |      |
|       |     |            |     |                             |                             |                        | 8            | 471.7                                       |                     |       |      |
|       |     |            |     |                             |                             |                        | 5            | 248.9                                       |                     |       |      |
|       |     |            |     |                             |                             |                        | 4            | 227.7                                       | $2.489 \times 10^3$ | 5104  |      |
|       |     |            |     |                             |                             |                        | -1           | 839.8                                       | $3.10 \times 10^3$  |       |      |
|       |     |            |     |                             |                             |                        | -1           | 896.8                                       | (注: 係数: 0.52)       |       |      |
|       |     |            |     |                             |                             |                        | -4           | 452.1                                       |                     |       |      |
| KA32H | K5A | 30         | D.T |                             |                             |                        | -22          | 239.8                                       |                     |       | (13) |
|       |     |            |     |                             |                             |                        | -22          | 307.9                                       |                     |       |      |
|       |     |            |     |                             |                             |                        | -26          | 294.8                                       |                     |       |      |
|       |     |            |     |                             |                             |                        | -26          | 192.1                                       |                     |       |      |
|       |     |            |     |                             |                             |                        | -79          | 92.1                                        |                     |       |      |
|       |     |            |     |                             |                             |                        | -82          | 110.6                                       |                     |       |      |
|       |     |            |     |                             |                             |                        | -125         | 143.1                                       |                     |       |      |
|       |     |            |     |                             |                             |                        | -127         | 77.9                                        |                     |       |      |
|       |     |            |     |                             |                             |                        | 18           | 429.6                                       | $6.551 \times 10^3$ | 1388  |      |
|       |     |            |     |                             |                             |                        | 17           | 690.9                                       | $3.10 \times 10^3$  |       |      |
|       |     |            |     |                             |                             |                        | 10           | 601.6                                       | (注: 係数: 0.95)       |       |      |
|       |     |            |     |                             |                             |                        | 8            | 384.8                                       |                     |       |      |
| KD32H | K5D | 12.7       | AR  | 37.8                        | 8                           |                        | -28          | 667.2                                       | $3.585 \times 10^3$ | 2705  | (22) |
|       |     |            |     | 39                          | —                           |                        | -29          | 434.1                                       | $3.10 \times 10^3$  |       |      |
|       |     |            |     |                             |                             |                        | -34          | 523.1                                       | (注: 係数: 0.49)       |       |      |
|       |     |            |     |                             |                             |                        | -37          | 343.2                                       |                     |       |      |
|       |     |            |     |                             |                             |                        | 1            | 766.0                                       |                     |       |      |
|       |     |            |     |                             |                             |                        | -4           | 798.2                                       | $9856 \times 10^3$  | 1359  |      |
|       |     |            |     |                             |                             |                        | -6           | 482.6                                       | $3.10 \times 10^3$  |       |      |
|       |     |            |     |                             |                             |                        | -8           | 515.2                                       | (注: 係数: 0.93)       |       |      |
|       |     |            |     |                             |                             |                        | -66          | 145.5                                       |                     |       |      |
|       |     |            |     |                             |                             |                        | 0            | 845.0                                       |                     |       |      |
|       |     |            |     |                             |                             |                        | -5           | 534.0                                       | $1.523 \times 10^3$ | 1443  |      |
| KD32H | K5D | 25.4       | D.T | 37                          | -48                         |                        | -6           | 801.0                                       | $3.10 \times 10^3$  |       | (22) |
|       |     |            |     | 35                          | -39                         |                        | -38          | 334.0                                       | (注: 係数: 0.83)       |       |      |
|       |     |            |     |                             |                             |                        | -5           | 626.0                                       |                     |       |      |
|       |     |            |     |                             |                             |                        | -7           | 710.0                                       |                     |       |      |

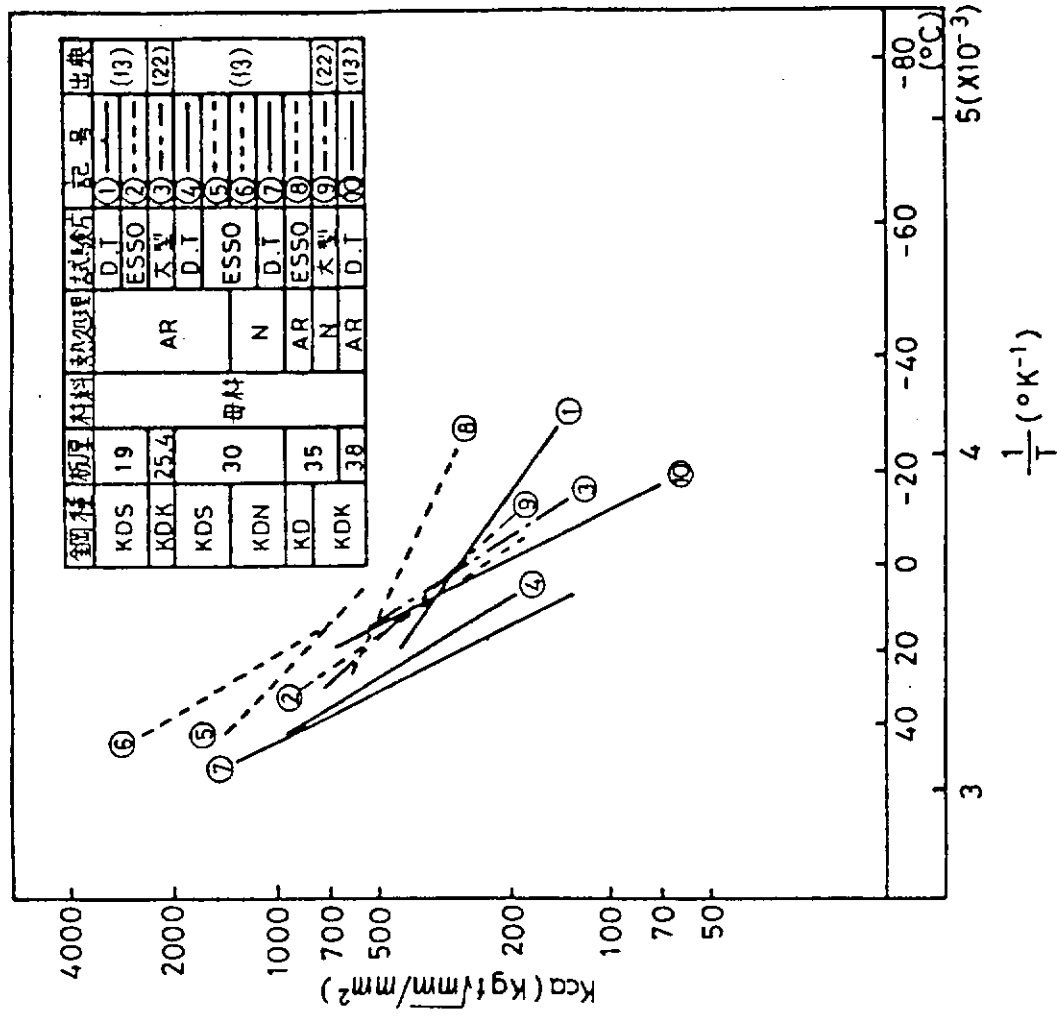


図 5.3.1.1 亀裂伝播停止破壊靱性値

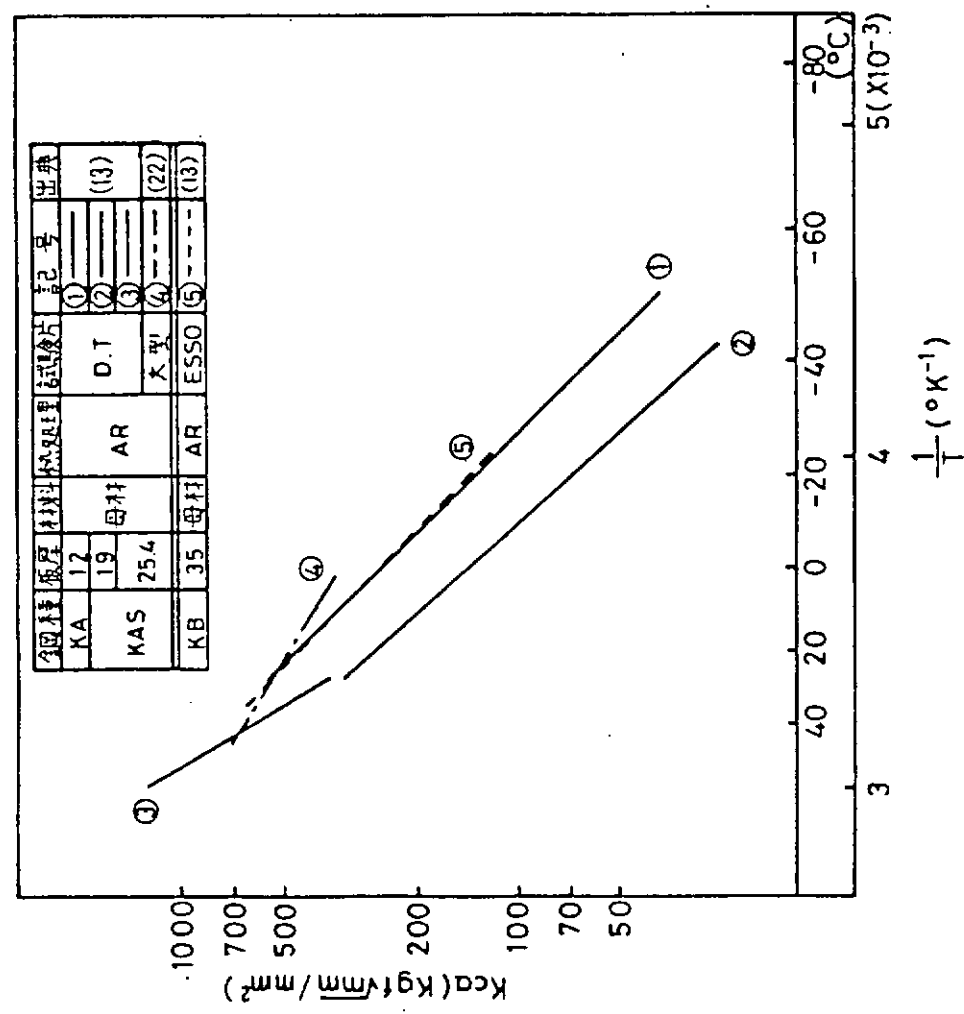


図 5.3.1.2 亀裂伝播停止破壊靱性値

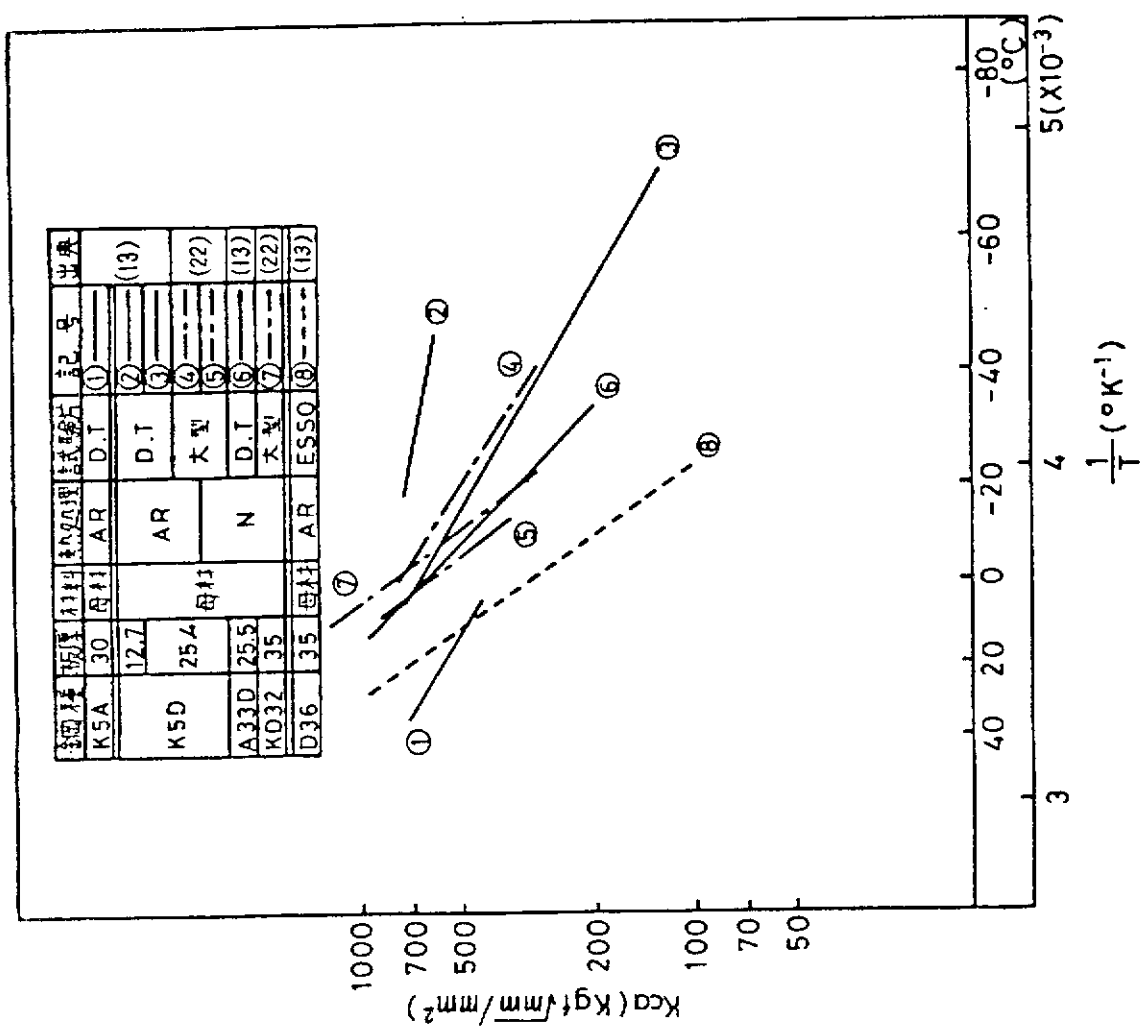


図.5.3.1.4 亀裂伝播停止破壊靱性値

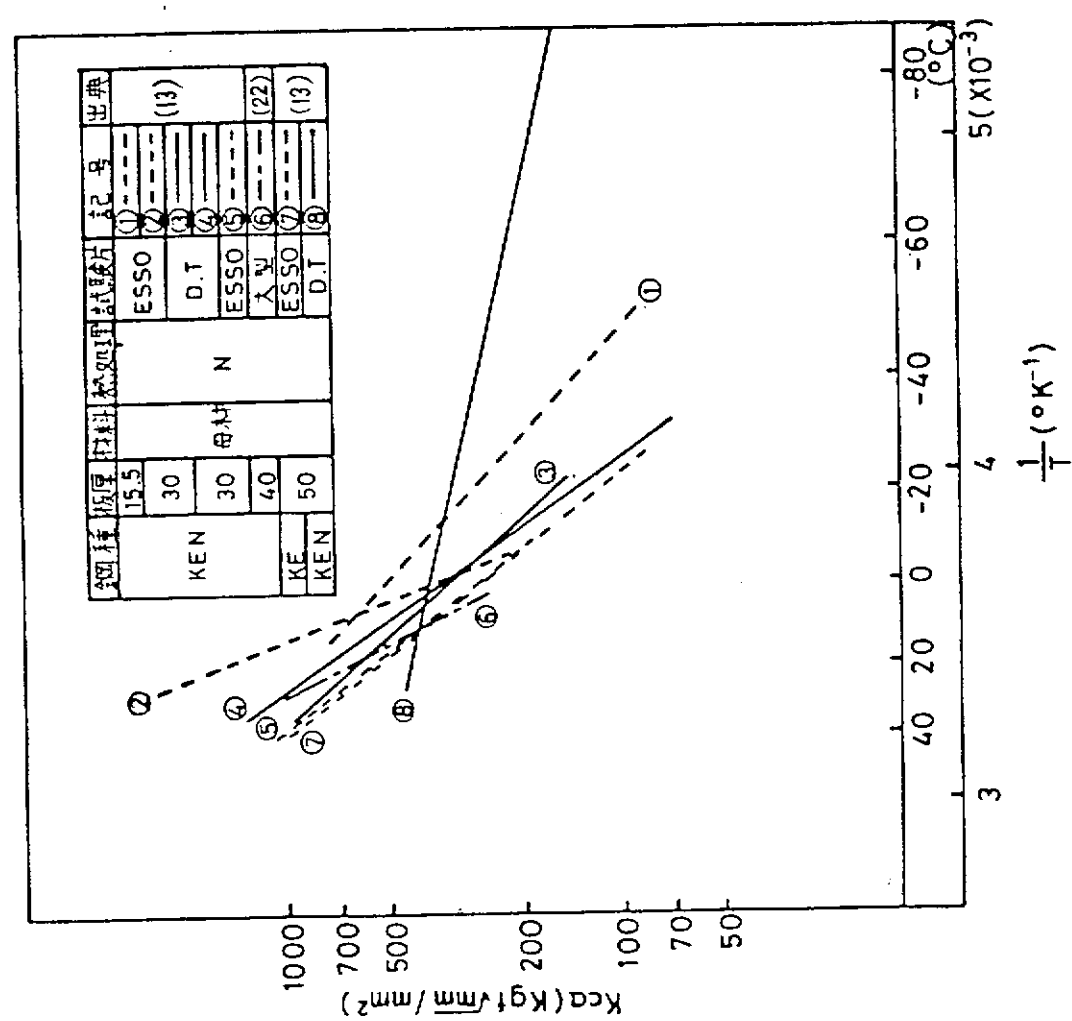


図.5.3.1.3 亀裂伝播停止破壊靱性値

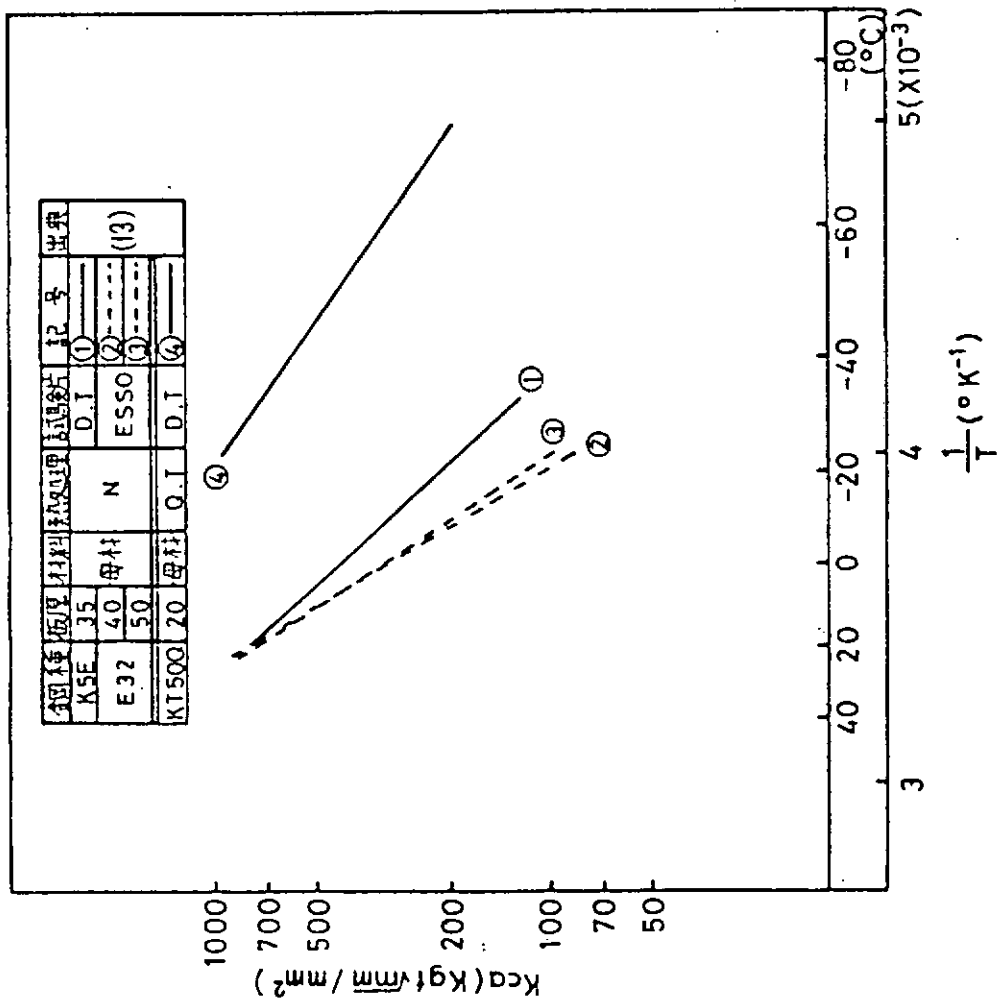
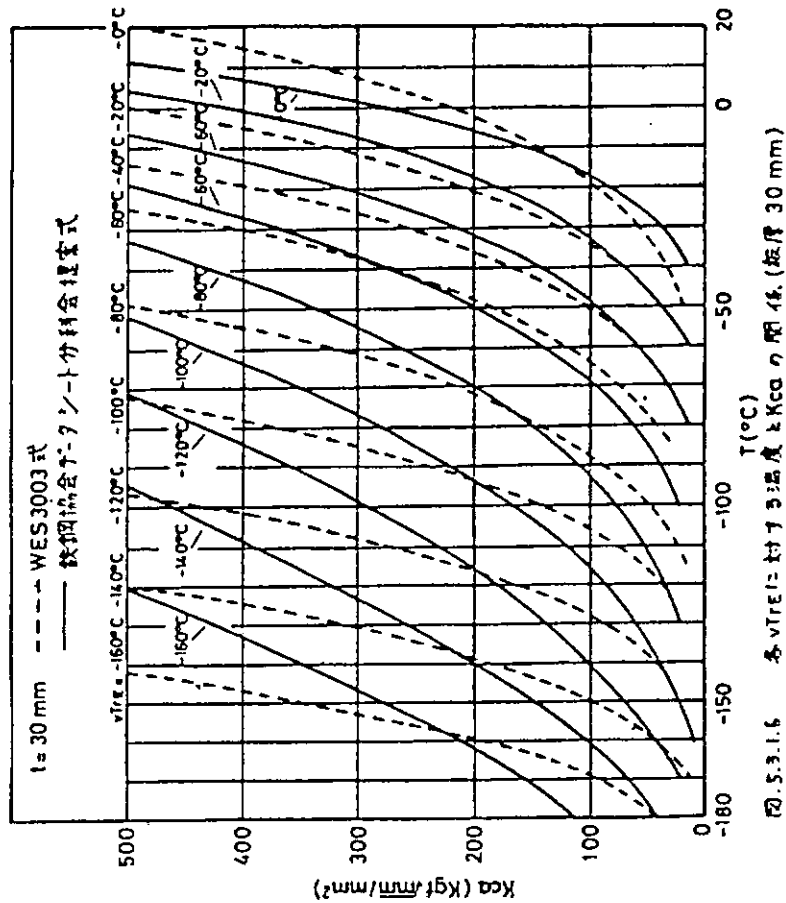


図.5.3.1.5 亀裂伝播停止破壊靱性値



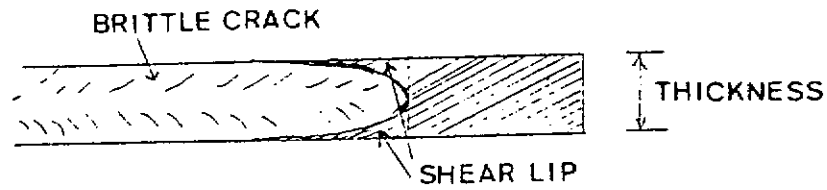


図5.3.2.1 脆性亀裂の伝播破面

表 5.3.2.1 脆性破壊発生温度および停止温度の板厚 1 mm にたいする変化率 ( $^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ )<sup>74)</sup>

| 試験法                       |                 | 板厚 (mm) | 0.8~3.2  | 10~30                | 30~150    | 150~200   |
|---------------------------|-----------------|---------|----------|----------------------|-----------|-----------|
| 試験法                       | 特性              |         |          |                      |           |           |
|                           | Deep notch test | 発生      | (圧延) 8.5 | (機械) 0.9             | (圧延) 0.17 | (圧延) 0.52 |
| 温度勾配型<br>二重引張試験<br>ESSO試験 | 停止              |         | (圧延) 34  | (圧延) 3.0<br>(機械) 1.5 | (圧延) 0.2  |           |

(註) (圧延) = 圧延による減厚, (機械) = 機械切削による減厚

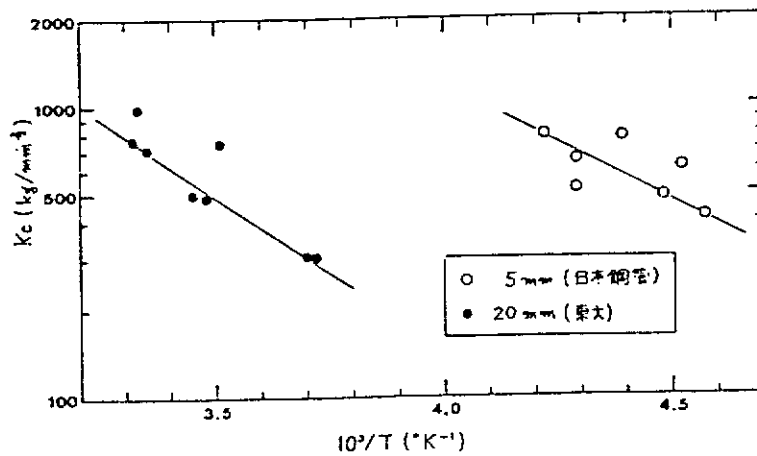


図5.3.2.2 伝播停止特性値に及ぼす板厚の影響<sup>75)</sup>

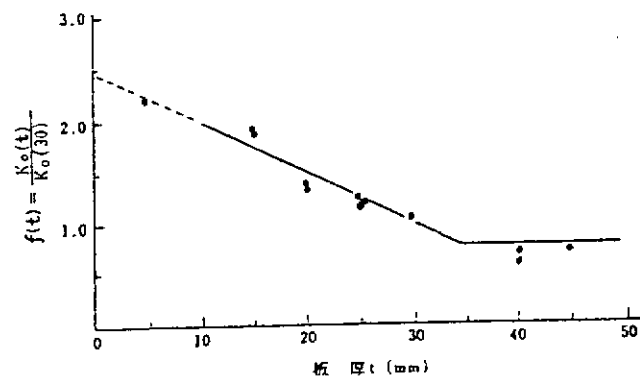


図5.3.2.3  $K_0(t)$  に及ぼす板厚効果(機械切削試験片)<sup>73)</sup>

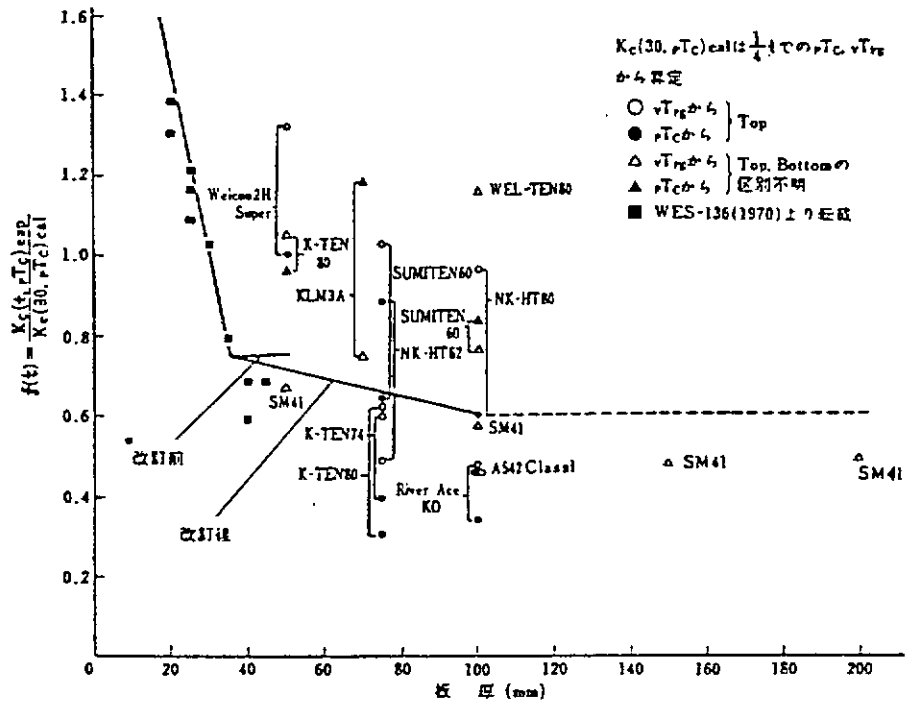


図5.3.2.4 伝播停止特性値の板厚依存性(WES3003)<sup>73)</sup>

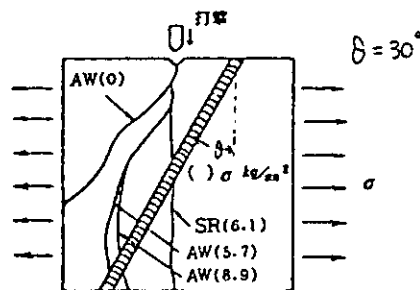


図5.3.2.5 斜めビードの場合の脆性亀裂伝播経路<sup>76)</sup>  
 (AW (溶接のまま), SR (残留応力除去))

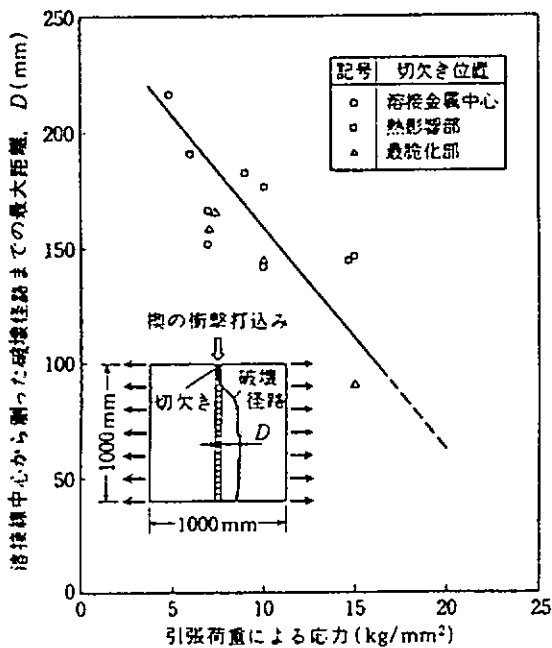


図5.3.2.6 溶接残留応力が脆性破壊伝播経路に及ぼす影響の実験(木原ほか<sup>77)</sup>)

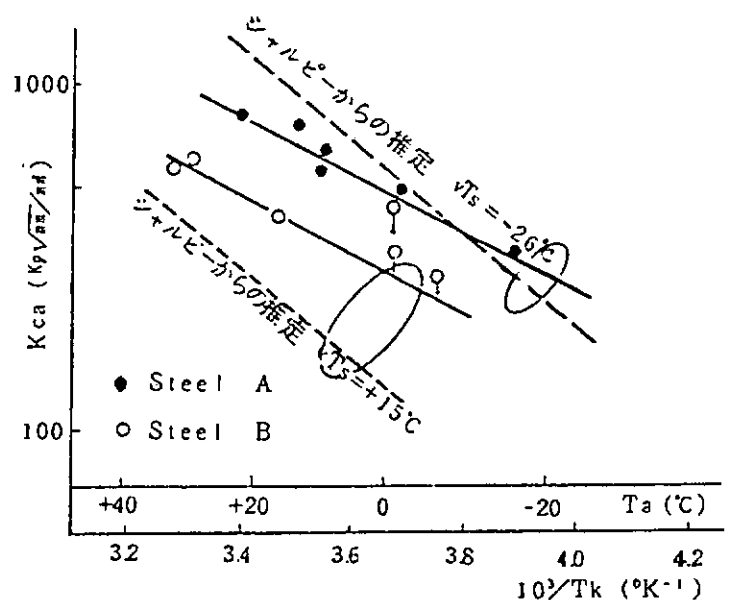


図5.3.2.7 ボンド部Kcaと温度の関係<sup>78)</sup>

| 記号     | 鋼種                 | 溶接法                                         |
|--------|--------------------|---------------------------------------------|
| ○●○○●● | KAS, KDK, KEN      | 手溶接 3電極片面溶接 1/2 1/2 ガス IL 1/2 IL 1/2 ガス     |
| △△△△△△ | K5D, KD32, 新HT50   | 手溶接 3電極片面溶接 1/2 1/2 ガス IL 1/2 IL 1/2 ガス CES |
| ○△     | 電裂が母材に於いて停止または貫通   |                                             |
| ○△     | 溶接継手ボンド部から母材へ於いて停止 |                                             |
| ○△     | 溶接継手ボンド部で停止        |                                             |
| ●△     | 溶接継手ボンド部を貫通        |                                             |
| ○△     | 溶接金属内部で停止          |                                             |
| ●△     | 溶接金属内部を貫通          |                                             |

| 記号     | 鋼種                 | 溶接法                                         |
|--------|--------------------|---------------------------------------------|
| ○●○○●● | KAS, KDK, KEN      | 手溶接 3電極片面溶接 1/2 1/2 ガス IL 1/2 IL 1/2 ガス     |
| △△△△△△ | K5D, KD32, 新HT50   | 手溶接 3電極片面溶接 1/2 1/2 ガス IL 1/2 IL 1/2 ガス CES |
| ○△     | 電裂が母材に於いて停止または貫通   |                                             |
| ○△     | 溶接継手ボンド部から母材へ於いて停止 |                                             |
| ○△     | 溶接継手ボンド部で停止        |                                             |
| ●△     | 溶接継手ボンド部を貫通        |                                             |
| ○△     | 溶接金属内部で停止          |                                             |
| ●△     | 溶接金属内部を貫通          |                                             |

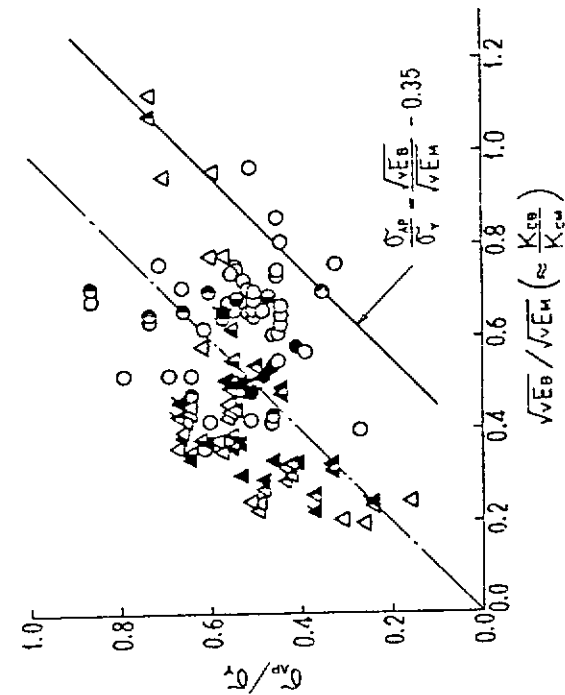


図5.3.2.8 大形伝播試験結果とVノッチシャルピー衝撃試験結果との関係<sup>22)</sup>  
 [負荷応力と降伏応力の比  $\sigma_u/\sigma_y$  と溶接継手ボンド部と母材との関係]

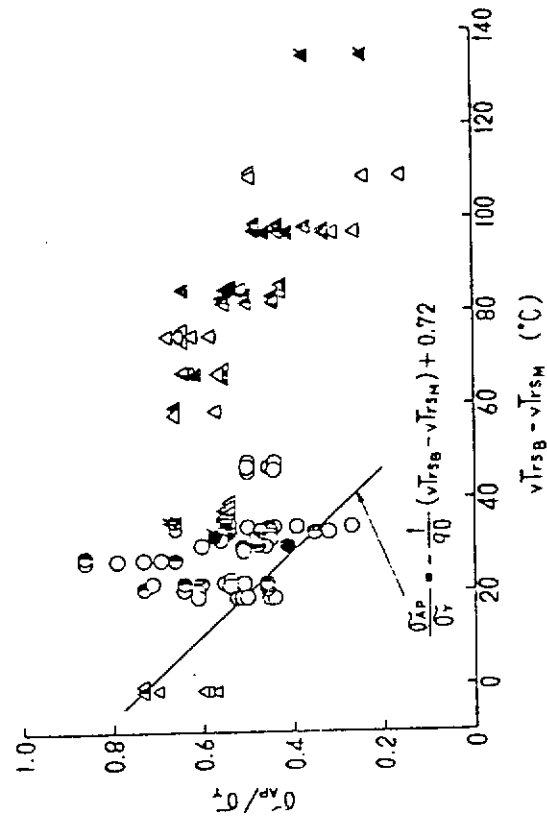
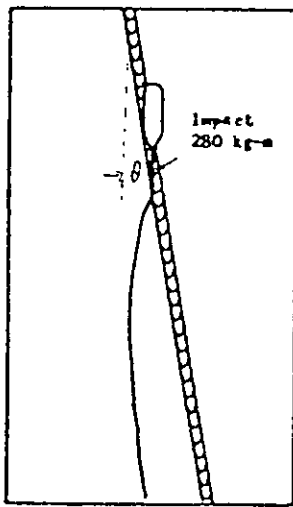
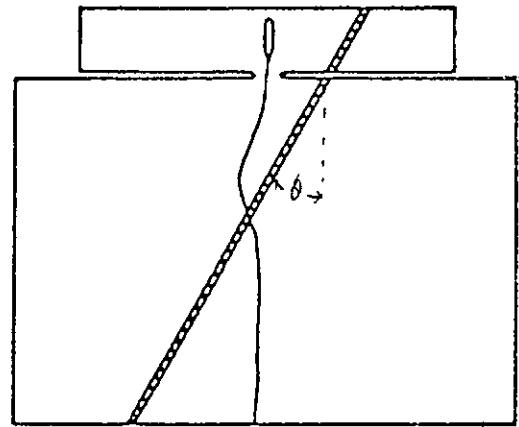


図5.3.2.9 大形伝播試験結果とVノッチシャルピー衝撃試験結果との関係<sup>22)</sup>  
 [負荷応力と降伏応力の比  $\sigma_u/\sigma_y$  と溶接継手ボンド部と母材との関係]



(b) Test Specimen No. 4  
 $\sigma = 20 \text{ kg/mm}^2$  (5/8  $\sigma_T$ )  
 $T = -30^\circ\text{C}$

図5.3.2.10 大入熱溶接斜め継手伝播試験結果 (内部切欠型)  
 $(\theta = 10^\circ \text{の場合})$



$\sigma = 24 \text{ kg/mm}^2$  (3/4  $\sigma_T$ )  $T = -30^\circ\text{C}$

図5.3.2.11 大入熱溶接斜め継手伝播試験結果 (二重引張型)  
 $(\theta = 30^\circ \text{の場合})$

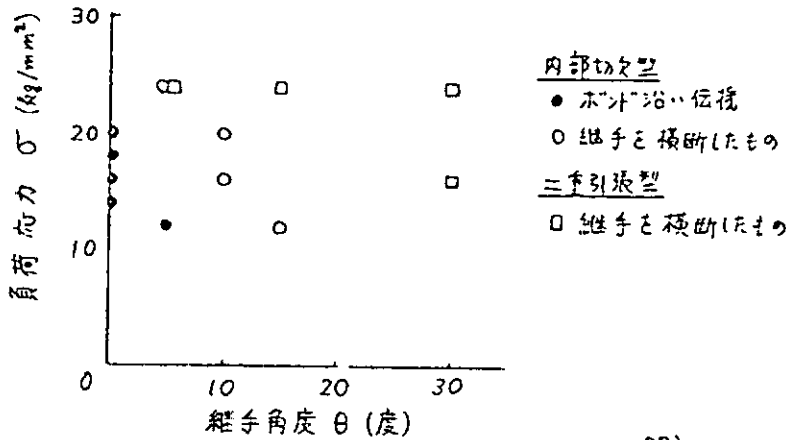


図5.3.2.12 大入熱溶接斜め継手試験結果 ( $-30^\circ\text{C}$ )のまとめ

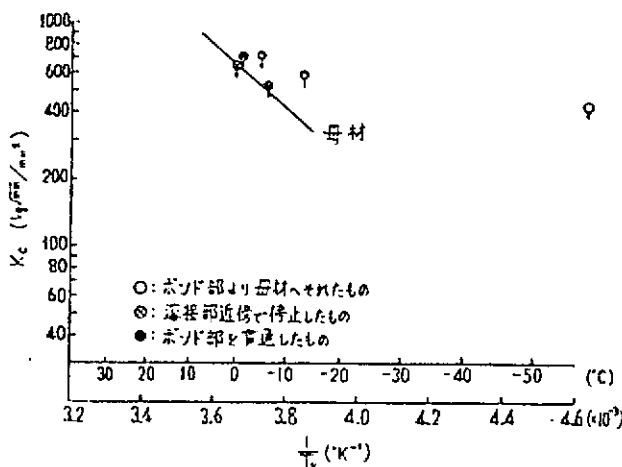


図5.3.2.13 大形伝播試験によるK 5 D鋼エレクトロガス溶接継手部の脆性破壊伝播特性

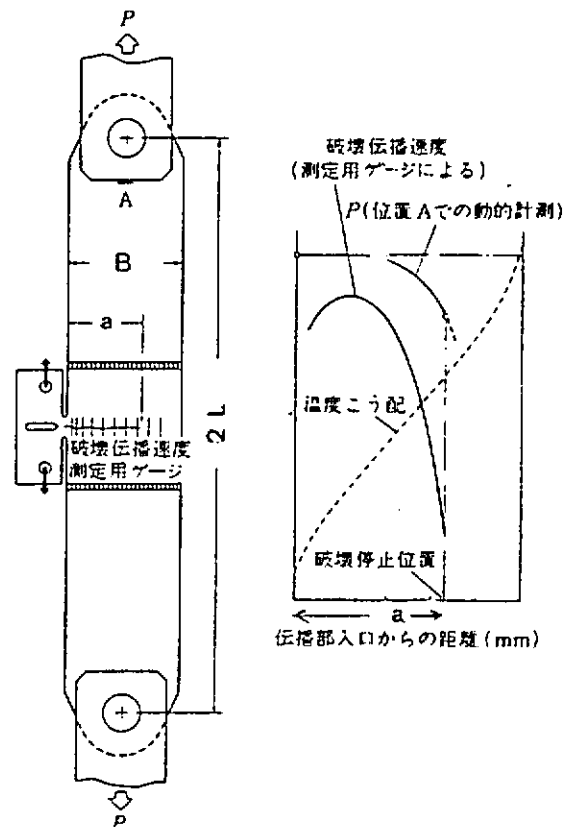


図5.3.2.14 温度こう配型二重引張試験の動的計測模式図 (80)

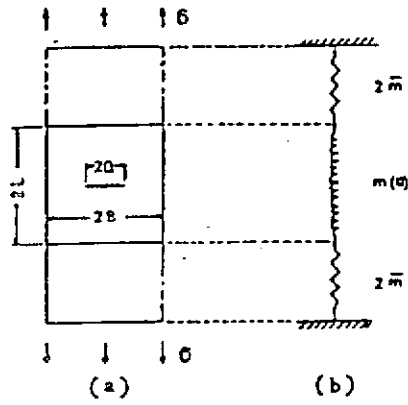


図5.3.2.15 Equivalent Spring Model<sup>81)</sup>

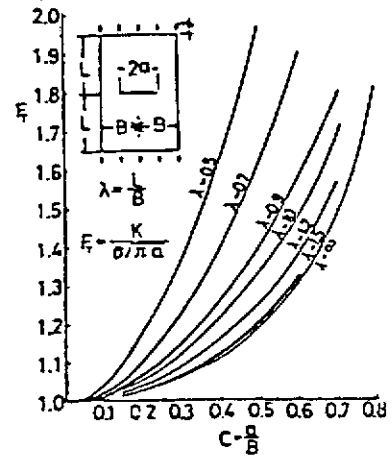


図5.3.2.16 K-value for Uniform Tension<sup>81)</sup>  
(after Ishida 82)

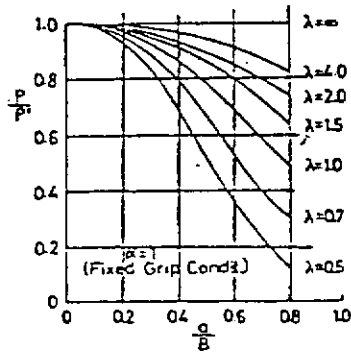


図5.3.2.17 Load Drop Curve for Fixed Grip Condition<sup>81)</sup>

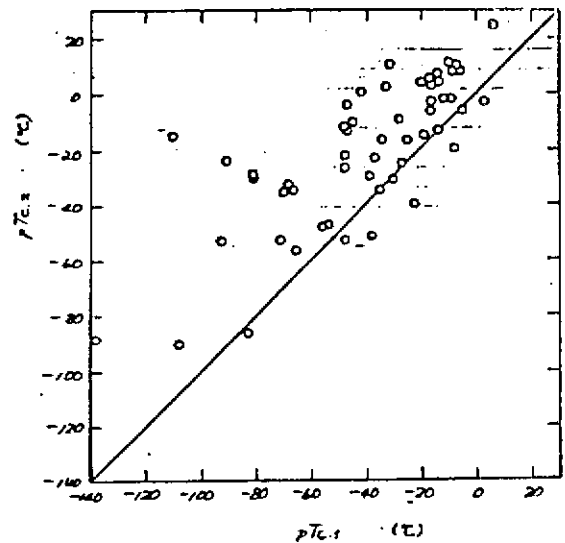
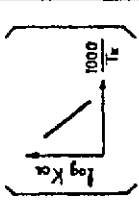
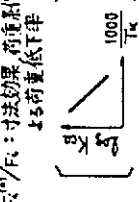
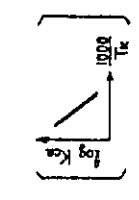
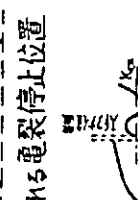
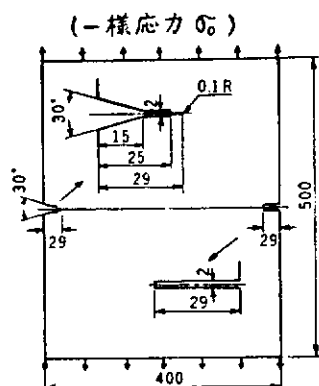


図5.3.3.1 シャルピー-破面遷移温度  $vT_{rs}$  から  $K_{Ic}$  を推定する時のばらつき

表5.3.4.1 フラックアレスター能力(亀裂停止位置)の評価 procedure の例

| ① イノサートプレート型 (実合せ溶接型)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | ② スチフナ型                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | ③ スチフナ型                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>a) <math>C_{eff}</math> の考え方</p> <div data-bbox="221 1503 1045 1839"> <p>温度勾配型標準伝播試験 (ES0試験, 二重引張試験) による <math>K_{Ia}</math> の温度依存性</p> <math display="block">K_{Ia} = f(\theta) \sigma_g \sqrt{C}</math> <p><math>\sigma_g</math>: (初期) 入力応力<br/>C: 停止電裂長さ</p>  <p>フラックアレスター-大型モジュールによるアリスト再現試験</p> <div data-bbox="691 1935 874 2159"> <math display="block">\left[ \begin{array}{c} \sigma_g \\ C \\ T (\text{温度}) \end{array} \right]</math> </div> <p><math>C_{eff}</math> の導入</p> <math display="block">K_{Ia} = f(\theta) \sigma_g \sqrt{C_{eff}}</math> <p>より得られる実式</p> <math display="block">C_{eff} = 0.1(C + 100)</math> <p>電裂停止の条件式</p> <math display="block">K_{Ia} = f(\theta) \sigma_g \sqrt{C_{eff}}</math> <p>予測される 停止電裂長さ C</p> </div> | <p>b) <math>K_{eff}</math> の考え方</p> <div data-bbox="221 1218 1045 1467"> <p>温度勾配型標準伝播試験 (二重引張試験) による <math>K_{Ia}</math> の温度依存性</p> <math display="block">K_{Ia} = \sigma_g \sqrt{\pi C} F_T \left( \frac{E_1}{E_2} \right)</math> <p><math>\sigma_g</math>: (初期) 入力応力<br/>C: 停止電裂長さ<br/><math>F_T</math>: 有限板修正係数<br/><math>E_1/E_2</math>: 寸法効果, 荷重条件による荷重低下率</p>  <p><math>K_{eff}</math> の導入</p> <math display="block">K_{Ia} = \sigma_g \sqrt{\pi C} F_T \left( \frac{E_1}{E_2} \right)</math> <p><math>K_{eff} = K_{Ia} \cdot T_{eff}</math></p> <p>広幅二重引張試験によるアリスト再現</p> <div data-bbox="691 1218 874 1442"> <math display="block">\left[ \begin{array}{c} \sigma_g \\ C \\ T (\text{温度}) \end{array} \right]</math> </div> <p>電裂停止の条件式 (MSの場合)</p> <math display="block">K_{eff} = 270 \cdot \sigma_g \sqrt{\pi C} \cdot T_{eff}</math> <p>予測される 停止電裂長さ C</p> </div> | <p>アレスターの設計条件</p> <div data-bbox="221 333 1045 761"> <p>温度勾配型標準伝播試験 (ES0試験, 二重引張試験) による <math>K_{Ia}</math> の温度依存性</p> <math display="block">K_{Ia} = f(\theta) \sigma_g \sqrt{\pi C}</math> <p><math>\sigma_g</math>: (初期) 入力応力<br/>C: 停止電裂長さ</p>  <p>電裂停止位置の <math>K_{Ia}</math> 値の算定</p> <p>(電裂長さ C を既知) 静的な <math>K</math> 値の C による変化の割合を計算</p> <p>予測される電裂停止位置</p>  </div> |
| <p>(出典)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 本原, 金沢, 永田, 前中, 永元, 矢島, "フラックアレスター" の有効性について (第1報), 造船協会論文集第122号 (昭和42年12月)</li> <li>・ 本原, 金沢, 永田, 前中, 永元, 矢島, "フラックアレスター" の有効性について (第2報), 日本造船学会論文集第124号 (昭和43年12月)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | <p>(出典)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 町田, 青木, "フラックアレスター" に関する基礎的研究 (第7報) — 長大フラックの阻止とアレスター設計について —, "日本造船学会論文集" 第131号 (昭和47年6月)</li> <li>・ T. Kanejima, S. Machida, H. Yajima and M. Aoki, "Study on Brittle Crack Arrester — Considerations on the Arrest of a Very Long Crack —", Selected Papers from the Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 11 (1973)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | <p>(出典)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 金沢, 町田, 太田, "フラックアレスター" に関する基礎的研究 (第4報) — Integral Stiffener型アレスターモデルについての考察 —, "造船協会論文集" 第121号 (昭和42年6月)</li> <li>・ 金沢, 町田, 太田, "フラックアレスター" に関する基礎的研究 (第5報) — 同一型は0.5スリット型アレスターとの比較 —, "造船協会論文集" 第122号 (昭和42年12月)</li> <li>・ 金沢, 町田, 太田, "フラックアレスター" に関する基礎的研究 (第6報) — スリット型アレスターの有効性について —, 日本造船学会論文集 第124号 (昭和43年12月)</li> <li>・ 町田, 青木, "フラックアレスター" に関する基礎的研究 (第7報) — 長大フラックの阻止とアレスター設計について —, "日本造船学会論文集" 第131号 (昭和47年6月)</li> </ul>                                                   |



Results of ESSO test

|               |                                       |
|---------------|---------------------------------------|
| steel-E* (30) | $\ln K_{ca} = -3.08(10^3/T_K) + 16.8$ |
| steel-E (30)  | $\ln K_{ca} = -2.47(10^3/T_K) + 14.4$ |
| steel-DH (30) | $\ln K_{ca} = -4.70(10^3/T_K) + 23.0$ |
| steel-EH (30) | $\ln K_{ca} = -4.70(10^3/T_K) + 23.1$ |

図 5.3.4.1 (a) 標準 ESSO 試験

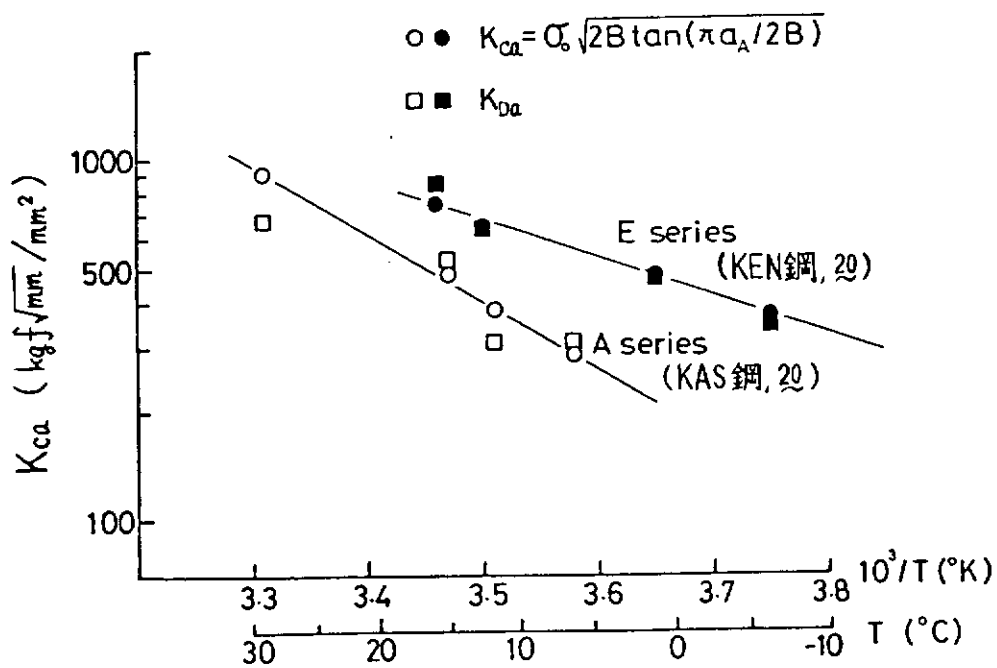


図 5.3.4.1 (b) 停止破壊靱性と温度の関係

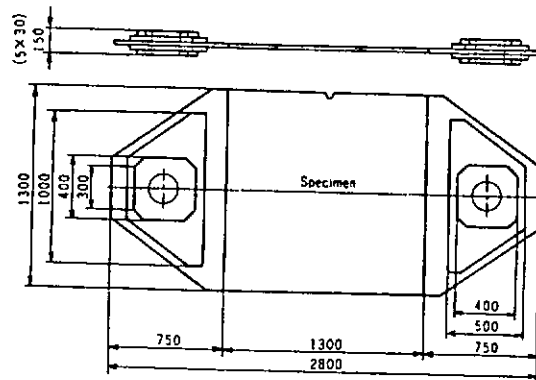


图 5.3.4.2(a) Specimen for butt welded-type crack arrester model

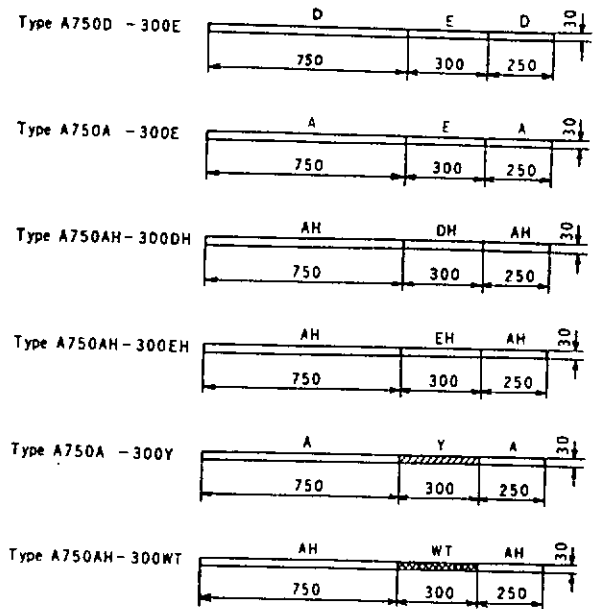
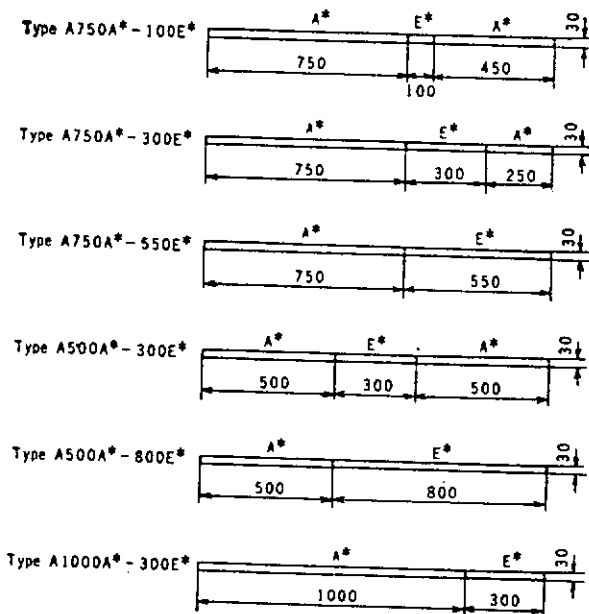


图 5.3.4.2(b) Specimens for butt welded-type crack arrester model

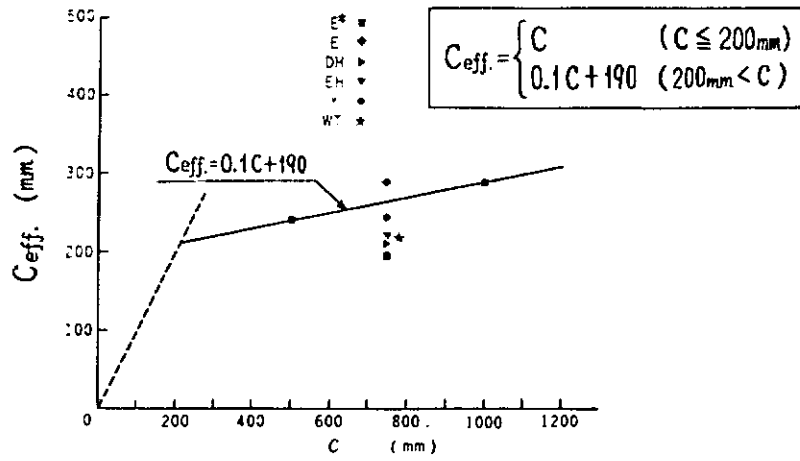


図5.3.4.3 Effective crack length vs. arresting crack length

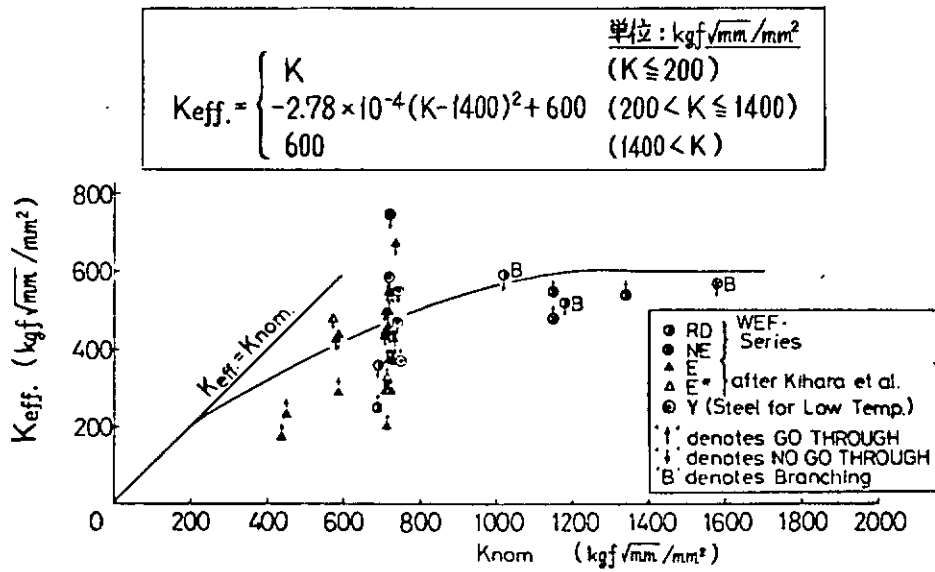


図5.3.4.4(a) Relation between  $K$  and  $K_{eff}$  for WEF-Series

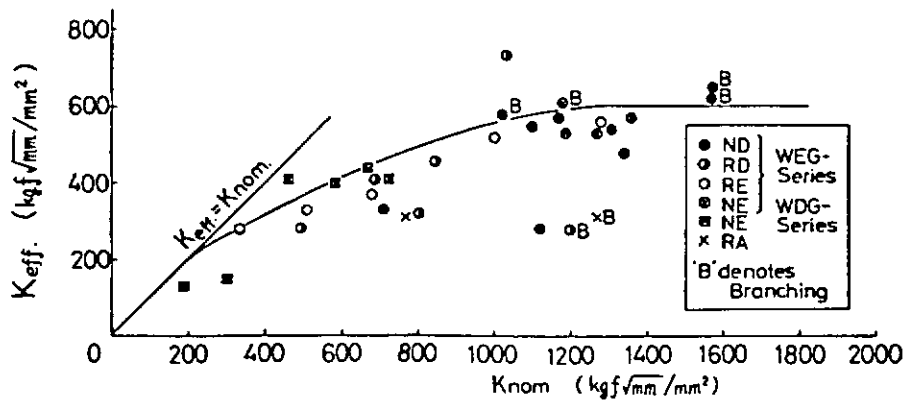


図5.3.4.4(b) Relation between  $K$  and  $K_{eff}$  for WEG & WDG-Series

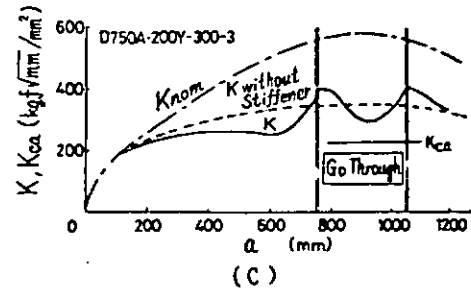
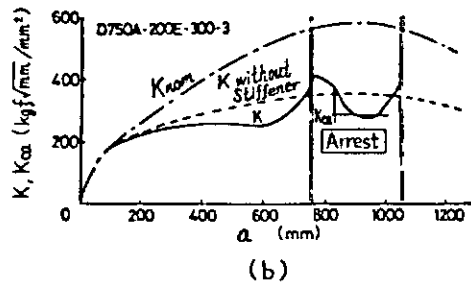
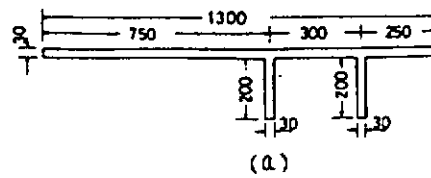


図 5.3.4.5  $K$  と  $K_{ca} \sim a$  (stiffener-type crack arrester of wide plate)

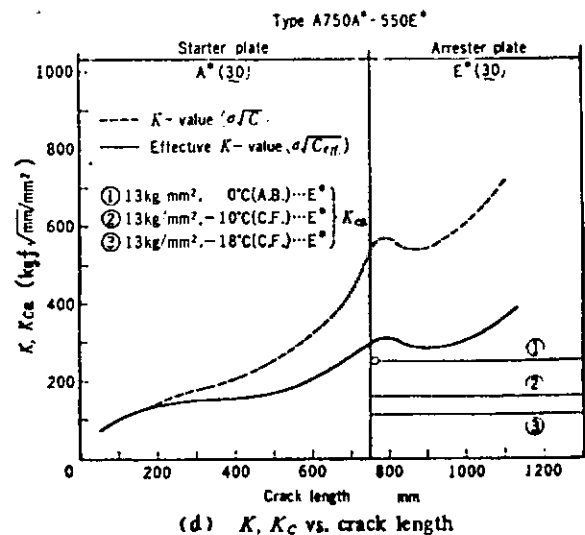
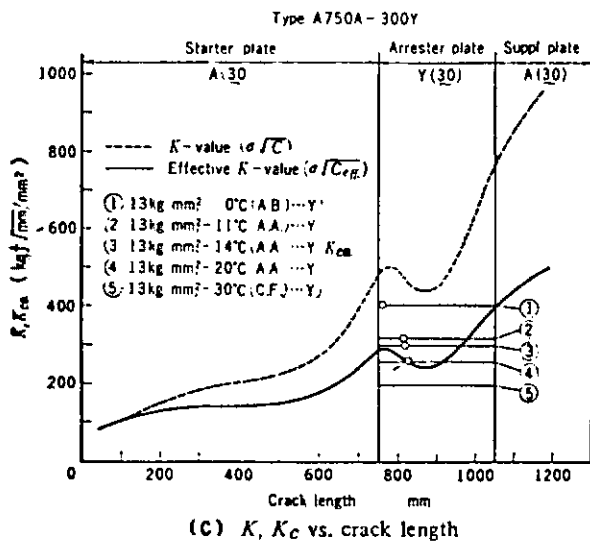
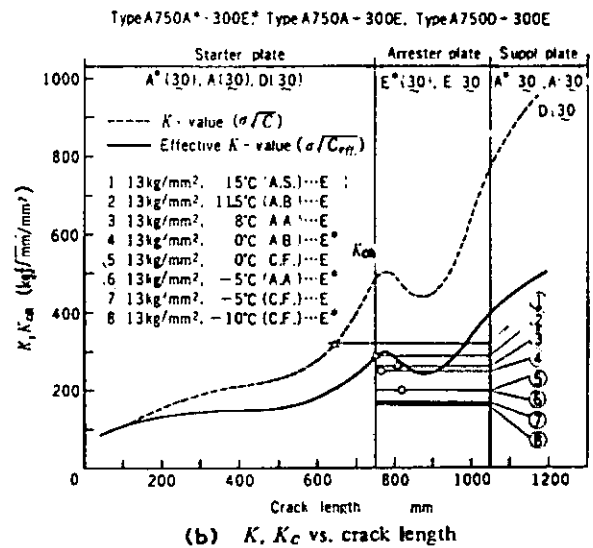
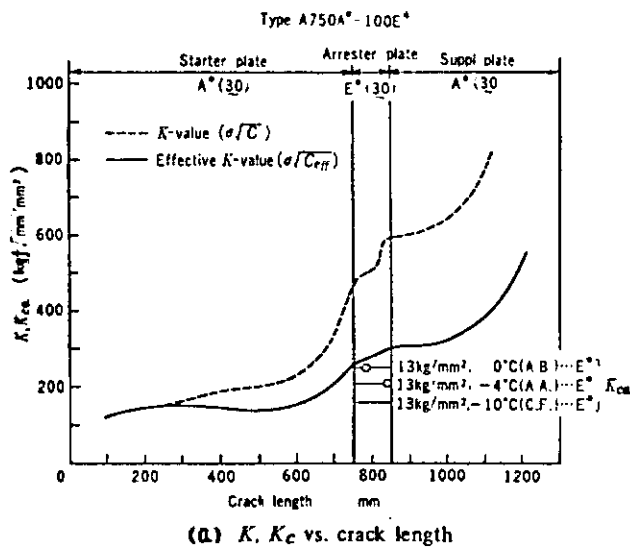


図 5.3.4.6 “ $C_{eff}$  の考え方” による電裂挙動予測 (試験体名は図 5.3.4.2 (b) に従う)

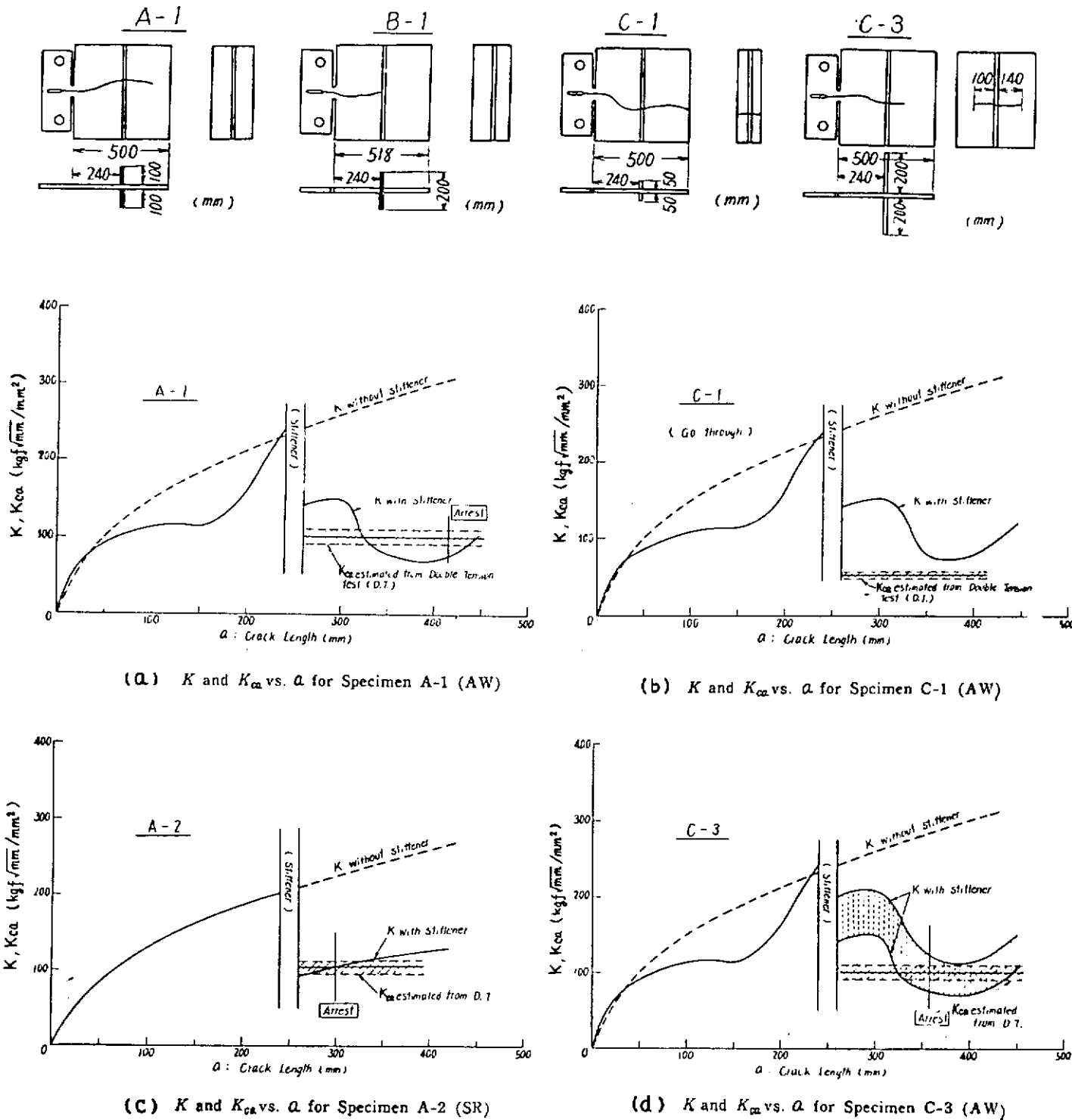


図5.3.4.7 “ $K_{eff}$ .の考え方”による電裂挙動予測

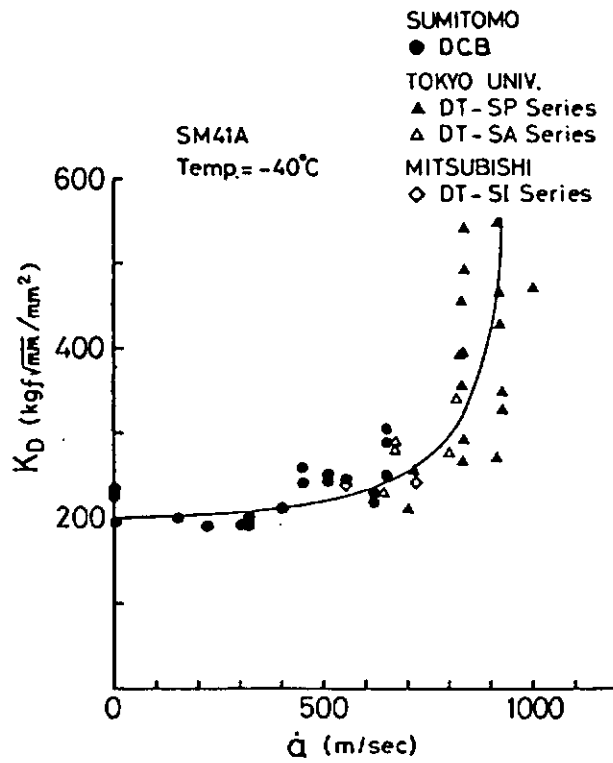


図 5.3.4.8(a) 動的破壊靱性値  $K_D$  と亀裂速度の関係

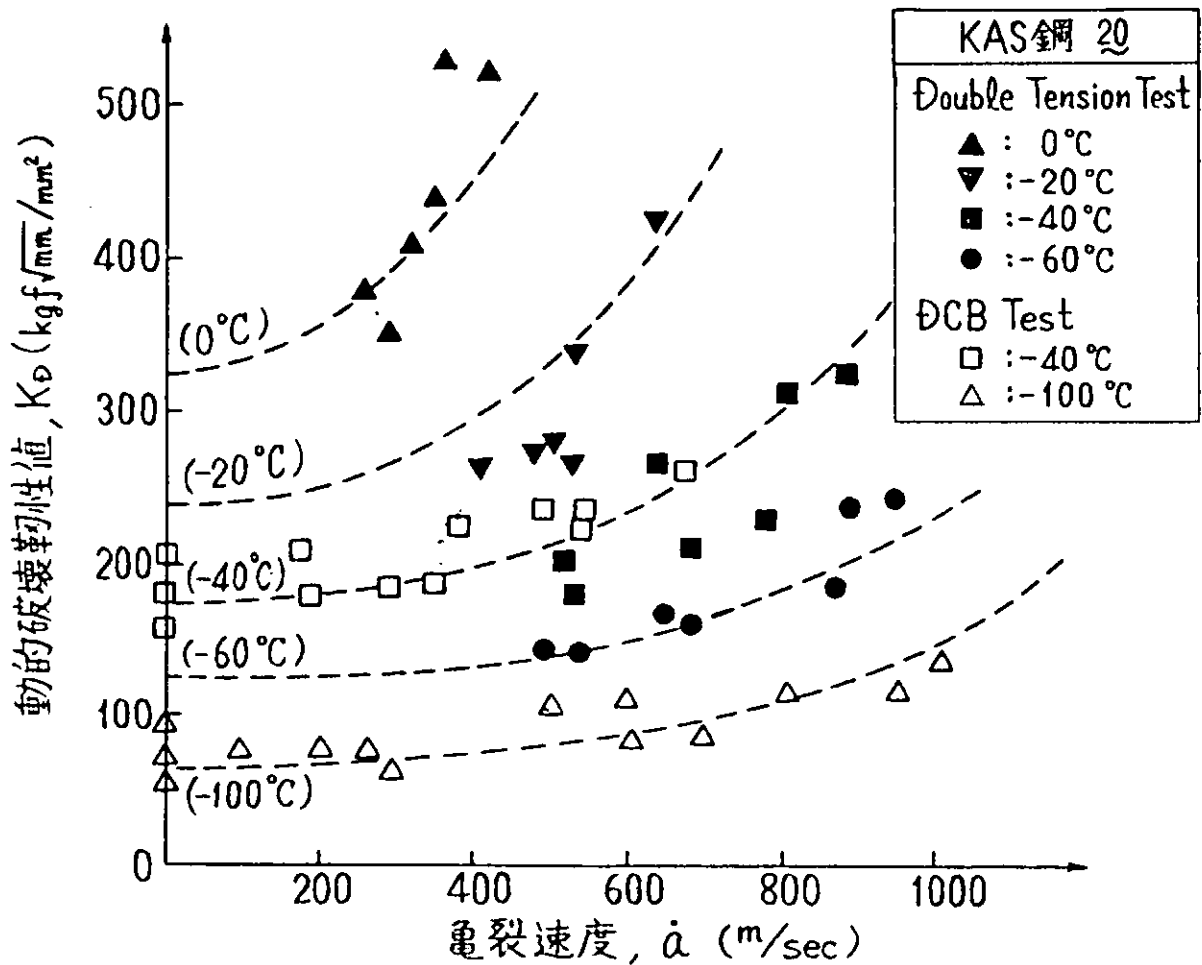


図 5.3.4.8(b) 動的破壊靱性値  $K_D$  の温度・亀裂速度依存性の例

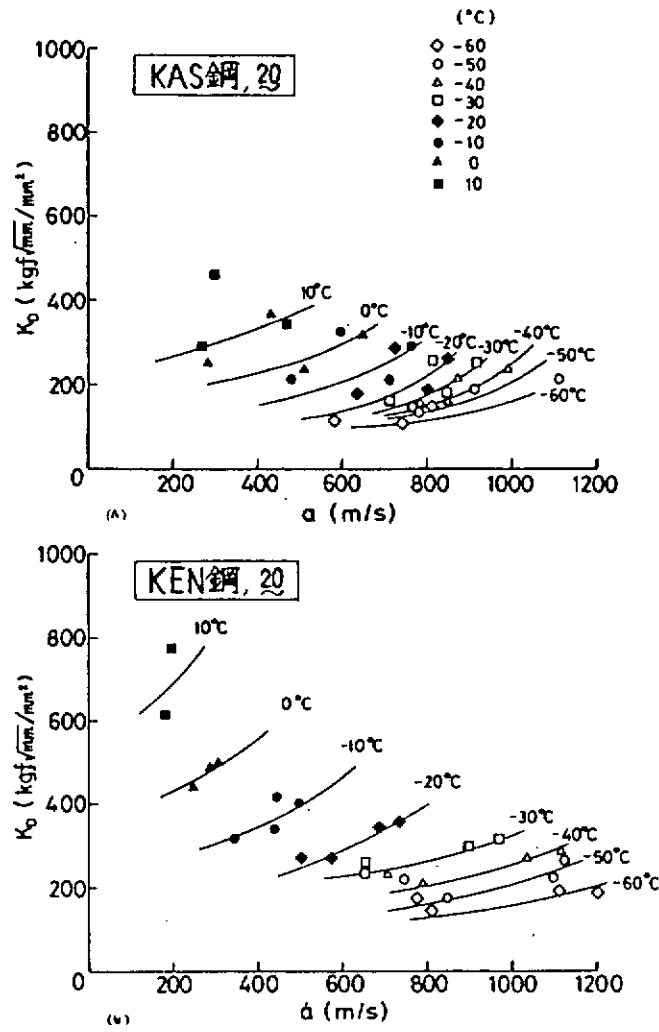
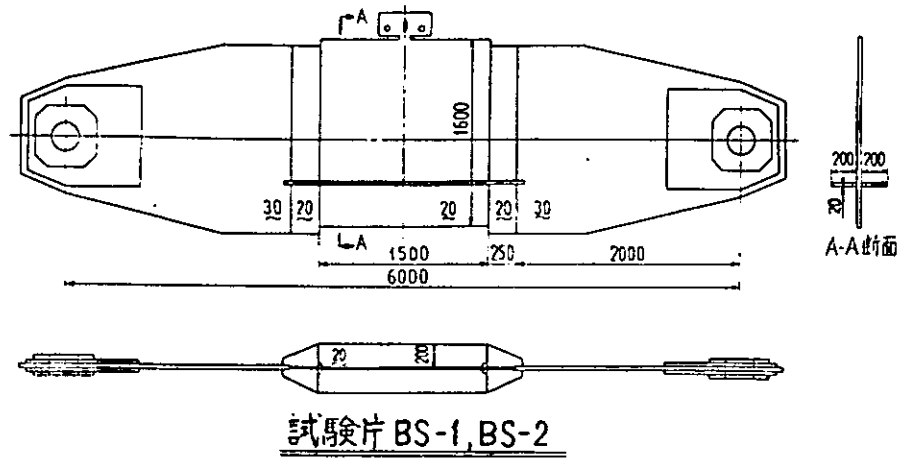
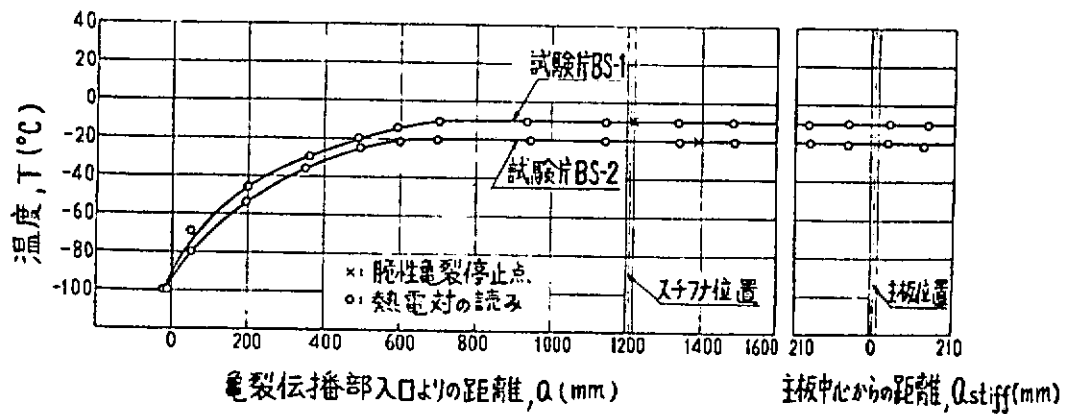


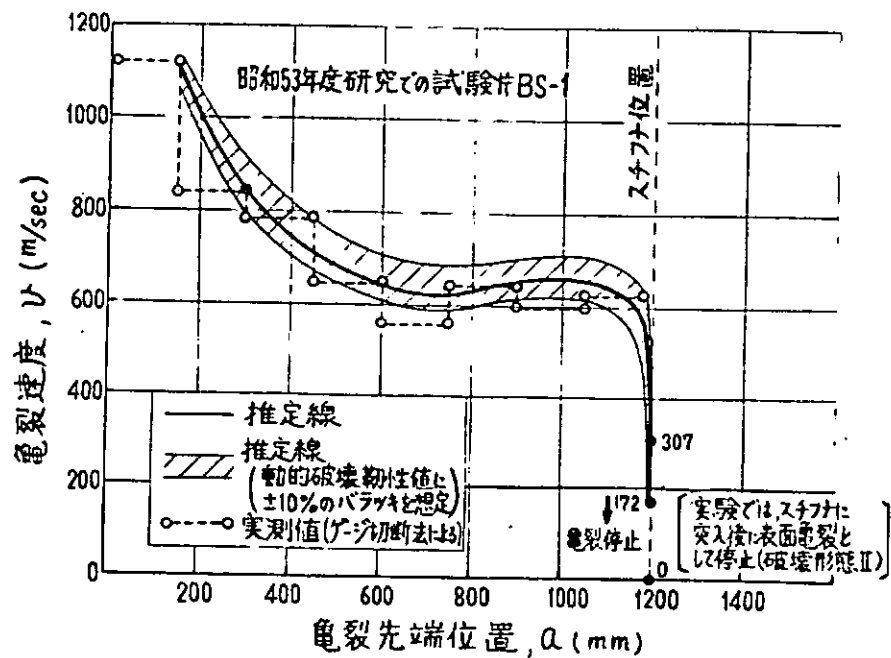
圖 5.3.4.9 動的破壊靱性値曲線



(a) 直交交差部構造要素モデル形状 (二重引張り型)

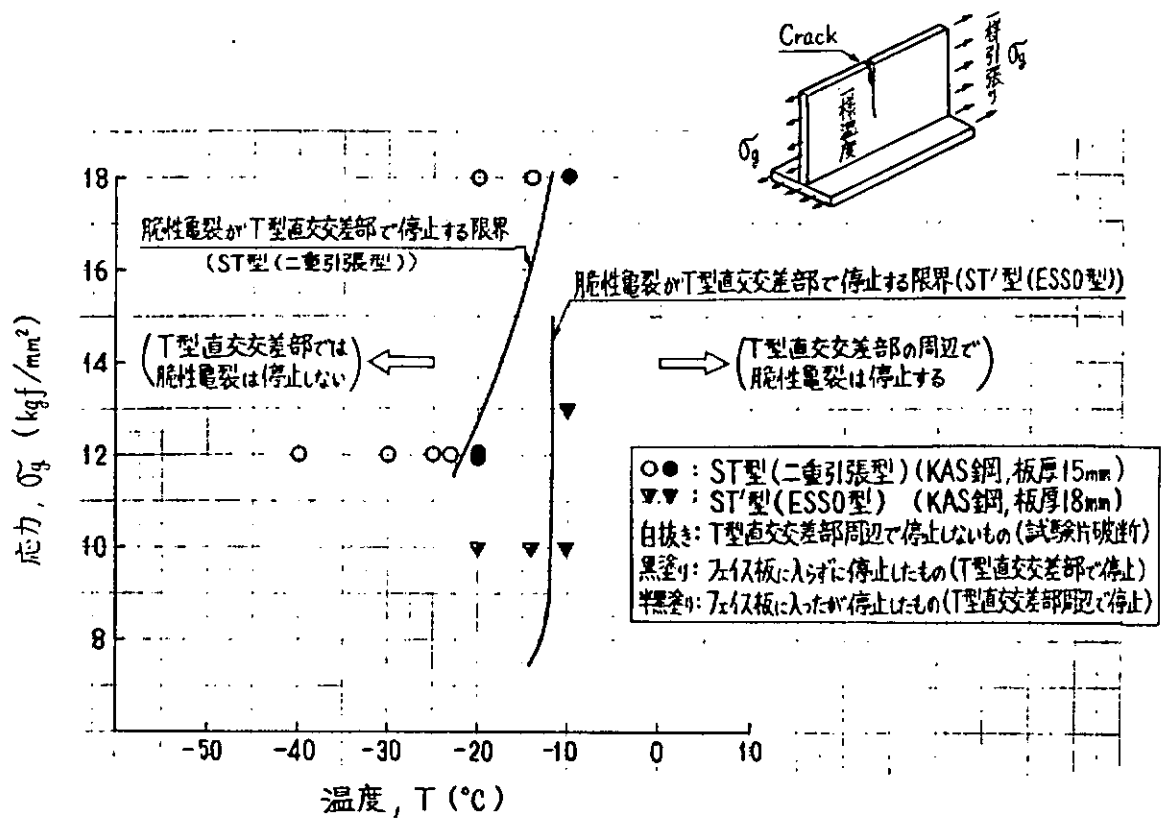


(b) 脆性不安定電裂伝播部の温度分布

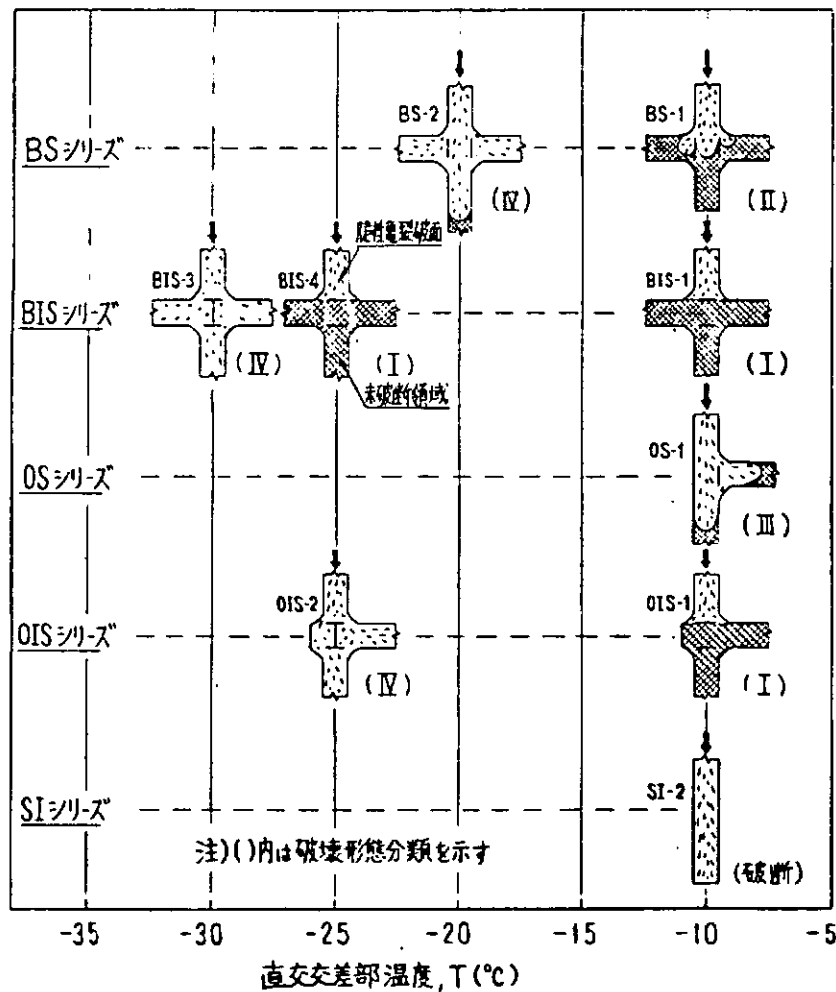


(c) 簡易法による電裂挙動 (速度変化) 予測

図5.3.4.10 直交交差部での電裂挙動



(a) T型直交差部構造要素モデルでの脆性亀裂伝播・伝播停止試験結果  
(ST型(二重引張型), ST'型(ESSO型))



(b) 直交差部構造要素モデルでの脆性亀裂伝播・伝播停止試験結果  
(KAS鋼, 板厚20mm, 試験応力  $\sigma_0 = 12$  kgf/mm<sup>2</sup>)

図5.3.4.11 直交差部での亀裂停止性能

## 6. 各種モデル化に基づく破壊力学解析の手順

### 6.1 まえがき

構造要素における亀裂の挙動を追跡する場合、一般的には逐一亀裂の成長段階に対応して、亀裂を含む部材の応力解析ならびにK値解析が必要である。しかしながらこの作業は非常に膨大となるため、設計段階で上記手法を採用することは殆ど不可能である。さらには、上記解析は、一般的には有限要素法を採用することになるが、直交差部材近傍のK値解析は3次元モデルを必要とし、膨大な費用、時間をかけても、すみ肉溶接近傍の形状が複雑なため、精度上問題がある疑念が存在し、現実的には解析不可能な問題も現時点では存在する。

したがってこのような現状では、種々の経験的工学知識をおりこんで、ある程度の大胆な仮定により、応力状態あるいは構造要素を適当にモデル化して破壊力学解析を行なうことが必要となる。

上記の観点から本章においては、設計段階で船殻構造(溶接構造物一般に対しても)に破壊力学を適用する際の各種モデル化を行ない、亀裂解析を行なう手順について提案する。

本方法は船殻構造の亀裂強度に対する case study, 種々の実験結果および実船の損傷実績を考慮して提案したものである。

また、本方法は上記に述べたような成長段階における応力解析を省略し、亀裂を含まない部材の応力解析結果をもとに亀裂解析を行なうもので、逐一亀裂を成長させて有限要素法などを適用してK値を求め、亀裂解析を行なう手法よりは精度の落ちることは宿命であるが、非安全側とならないよう配慮した。さらに、破壊に対する材料特性値も、現場で知り得る情報をもとに設定するようにしており、信頼できる研究室的な実験結果がある場合はその値を採用することが望ましいことはいうまでもない。なおここで取扱う事象は、疲労亀裂が伝播して脆性破壊が発生するまでを対象としている。

## 6.2 破壊力学解析を行なうにあたっての初期応力値の設定

破壊管理制御設計を行なうにあたっては、船体に作用する波浪外力の解析から、構造部材の破壊力学解析に至る広汎な解析が必要である。つまり

- (1) 波浪そのものの特性に関する統計的評価
  - (2) 波浪外力および部材応力の波に対する応答計算
  - (3) 構造全体あるいは部材の遭遇応力(最大期待値, 頻度分布など)に関する統計的評価
  - (4) 部材レベルでの疲労亀裂発生および伝播, 脆性亀裂の発生, 伝播および停止に関する疲労発生強度解析と破壊力学的検討
  - (5) 上記(4)の結果に基づく, 設計, 現場工作および検査, 補修の各種評価基準, 規格値に対する継続的見直し検討
- など一連の評価, 検討を一貫した総合的手順で行なう必要がある。

図6.1は、破壊管理制御設計の将来の設計内容の流れに関するビジョン的なものであり、各項目それぞれにおいて複雑多岐にわたる因子が未解決のまま残されており、不明確な問題点が多いことも事実である。

しかし、大型電子計算機の出現と、波浪の計測資料の整備等により、上記(1)→(3)にいたる過程の計算は、ある程度信頼できる結果が得られるようになってきた。

破壊力学解析においては、構造部材に作用する応力分布を与える必要があり、応力分布としては変動応力成分と静応力成分を求めておく必要がある。前者の変動応力成分を求める手法としては、従来から行なわれている二乗和平方根法と最近行なわれるようになってきた total system analysis 法とがある。すなわち、二乗和平方根法は応力を誘起する要因(例えば、縦曲げモーメント、水圧、各方向成分加速度等)間の相関がないとして、いいかえれば互いに統計的に独立として、二乗和平方根法に基づき最大期待値を求めるものである。一方、total system analysis 法は、応力を誘起する要因間の相関を

考慮し、波浪外力から応力解析に至るまでを一貫したものとして取扱い、応力の応答関数を求め、これに統計的処理を施して最大期待値を求めるものである。この total system analysis 法は膨大な計算を必要とし、最近の大型計算機の出現により解析可能となったものである。

したがって、後者の total system analysis 法によれば、部材に作用する変動応力成分をかなり精度良く求めることができるが、計算に膨大な時間を要する。一方、二乗和平方根法は total system analysis 法に比して精度はおちるが、かなり合理的な値を得ていることも事実である。上記いずれの手法を採用するかは、対象となる船に要求される安全性の程度等により決定しなければならないが、total system analysis 法を採用する場合の安全率の算入は、二乗和平方根法による場合の安全率より当然低く設定してしかるべきと考えられる。

上記いずれの方法を採用するにしても、種々の超過確率レベルの応力期待値が計算できるので、これらの結果より変動応力成分の累積頻度分布が得られる。しかし、これまでの多くの計算結果から 1 超過確率レベルの応力期待値が得られていれば、応力累積頻度分布は片対数直線（図 6.5 参照）で表わしても実用的には良いようである。

したがって、破壊力学解析における情報としては、静応力分布と、1 超過確率レベルの応力分布が与えられれば良いことになる。

### 6.3 初期欠陥寸法の設定

図 6.2 に本章で取扱う亀裂伝播寿命予測の手順を示す。破壊力学解析においては、初期に存在する欠陥の大きさを定めなければならない。航海中に発見された亀裂に対しては、その後の船体の安全性を検討する場合は、発見された亀裂の寸法を初期値として設定すれば良い。一方設計時に、これまでの損傷実績あるいは応力解析により、高応力集中部と認められ、亀裂発生の

危惧のある箇所あるいは工作上欠陥が生じる可能性のある箇所などについては、適当な大きさの初期欠陥を想定することが必要となる。この場合の初期欠陥の大きさは、安全側の見積りとして、初期欠陥寸法を大きめに設定する必要がある。

応力集中部のすみ肉溶接トウ部から発生する疲労亀裂は、最も損傷の生じる可能性が大きい。この場合疲労の発生は数箇所から生じ、小さな数個の表面亀裂が合体後1つの亀裂として伝播する。この亀裂合体時の大きさは、これまでの実験結果を総合すれば、表面で10mm程度、深さは0.2~0.4mm程度であると考えられる。そして、この時点が平滑疲労試験での亀裂発生寿命  $N_c$  にほぼ対応している。このような場合には、初期欠陥寸法は表面10mm、深さ0.5mmと設定すれば、安全側の評価が行なえるものと考えられる。一方、工作上的欠陥としてはかなり大きな初期欠陥を想定する必要があると考えられる。

いずれにしても、任意の亀裂の大きさからの亀裂伝播寿命予測ができるので、大きくなってからの亀裂残余寿命が十分大きなものであるならば、初期欠陥の大きさの設定はあまり重要でなくなる。一方、この亀裂残余寿命が船の寿命あるいは定検期間などに比べて同オーダーとなり、現実存在する可能性のある欠陥寸法内で、その残余寿命が欠陥寸法の設定いかんで安全となったり、非安全となる箇所は、2章で述べたように疲労発生強度の観点からも、重点的に対策を施す必要のある部材かどうかを十分検討しなければならないであろう。

以下においては、図6.2のフローチャートに従い、亀裂伝播寿命予測の簡便的な取扱いについて述べる。

#### 6.4 疲労亀裂伝播則における $C, m$ 値の設定

5.1節に示したごとく、疲労亀裂伝播速度は応力比等の影響を受けるが、これらの影響はあまり小さくなく、概略以下の Paris の伝播則で与えられる。

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m \quad \text{----- (6.1)}$$

$\frac{da}{dN}$  : 疲労亀裂伝播速度

$C, m$ : 定数

$\Delta K$ : stress intensity factor range

本章では式の簡単さから、上式を使用して疲労亀裂伝播寿命を予測することにする。ただし、応力比などの影響で亀裂伝播速度は上昇するので、ここでは  $C, m$  値は以下のように安全側の設定を行なう。

図6.3は、軟鋼から80キロ高張力鋼にいたる一般溶接構造用鋼板について  $C$  値と  $m$  値の関係を調べたものである<sup>1)</sup>。そこで、 $C$  値としては安全側の答を得るため、図の上限値である

$$C = 5.53 \times 10^{-4} / 59.2^m \text{ ----- (6.2)}$$

ただし、(6.1)式の  $\Delta K$  値は  $\text{kgf} \cdot \text{mm}^{-\frac{3}{2}}$ 、 $\frac{da}{dN}$  は  $\text{mm}/\text{cycle}$  表示としたときの  $C, m$  値とする。

を採用する。

図6.4は  $m$  値と降伏点の関係を調べたものであり<sup>2)</sup>、実験データには大きなばらつきが存在する。このばらつきの原因として、小さな試験片(例えば compact tension 試験片)での実験では処女材の切欠底部から亀裂が伝播し、除荷時においても亀裂が開口している stage I 領域と、リガメントの実断面応力が大きくなり試験片端部の影響が亀裂伝播速度に影響をおよぼす stage III 領域が、定常な亀裂伝播速度を示す stage II 領域に比べて相対的に大きな期間をしめ、stage I, II, III がほぼ  $\log \frac{da}{dN} \sim \log \Delta K$  座標上で、あたかも1本の直線となったように誤認しているのが原因である<sup>2)</sup>と推論した報告もある。

図中●印(ただし試験片は1箇所につき3枚～67枚の実験データが含まれている)は、150mm以上の広幅の中央貫通切欠試験片で、stage I, II, IIIの区別のはっきりしたものについて、stage IIの  $m$  値を求めた結果であり、降伏点との関係において、 $m$  値はよく1本の線上にのっており、4.6mm～5.3mmといった薄板で、広幅の中央貫通切欠試験によって得られている Gurney による結果とほぼ一致している。

いま  $C$  値と  $m$  値の間の関係が (6.2) 式のようになるとすると、低  $\Delta K$  側 ( $\Delta K$  値が  $59.2 \text{ kgf} \cdot \text{mm}^{\frac{3}{2}}$  以下) では  $m$  値を小さくする程、疲労亀裂伝播速度が早くなること、さらに次節に示すように、疲労亀裂伝播寿命算定時に等価応力係数の概念をもちいる場合、低  $\Delta K$  側の亀裂伝播速度が支配的となることから安全側という観点から、上記背景と合わせて  $m$  値を小さくすることにする。すなわち 図 6.4 の実線を  $m$  値として採用し、

$$m = 4 - 0.0327 \sigma_Y \text{ ----- (6.3)}$$

に於て  $\sigma_Y$ : 降伏点 (単位:  $\text{kgf}/\text{mm}^2$ )

したがって、部材の降伏点  $\sigma_Y$  から (6.3) 式および (6.4) 式によって、 $m$ ,  $C$  値が安全側として求められる。

なお上記の伝播速度の設定は腐食環境下のものについての設定ではなく、腐食が疲労亀裂伝播速度に影響を与えると考えられるような場合は、5.1.4 項に示すようなデータから  $C$ ,  $m$  値を別途設定する必要がある。

## 6.5 等価応力係数について

6.2 節で述べたように、船体の変動応力の期待値および累積応力頻度分布が、total system analysis 法あるいは二乗和平方根法により求められる。その結果は 図 6.5 に示すような片対数直線で近似できる。したがって、

$$\Delta \sigma = \frac{2R - 2i + 1}{2R} \Delta \sigma_{\max} \text{ ----- (6.4)}$$

( $i = 1, R$ )

レベルの応力は

$$\Delta N_i = 10^{\frac{n_i}{k}} - 10^{\frac{n(i-1)}{k}} \quad (i = 1, k) \quad \text{----- (6.5)}$$

サイクル、一生のうちで繰返されることになる。ランダム荷重下では疲労亀裂は(6.1)式で与えられる値よりも、delayed retardation 効果によって、一般的には遅くなることが知られているが、この遅延効果を定量的に把握することは現状では困難な場合が多いので、また計算も複雑となるのでここではこの効果を無視して安全側の評価を行なうようにする。(6.1)式の  $\Delta K$  値は、

$$\Delta K = \Delta S \sqrt{\pi a} f(a) \quad \text{----- (6.6)}$$

ただし  $a$  : 亀裂長

$S$  : グロス応力

$f(a)$  : 修正係数

で与えられる。今分布応力が作用する場合を考えると、

$$S = \sigma g(a) \quad \text{----- (6.7)}$$

ただし  $\sigma$  : 亀裂の存在によって影響を受けずに応力の応力

$g(a)$  : 応力分布形状を表わすパラメータで亀裂長さの関数

と与えられる。(6.6), (6.7)式を(6.1)式に代入し  $\left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi a} \cdot g(a) f(a)} \right\}^m$  の積分関数を  $F(a)$  とおくと、

$$F(a_f) - F(a_0) = C \sum (\Delta \sigma)^m \cdot \Delta N \quad \text{----- (6.8)}$$

ただし  $a_f$  : 最終亀裂長

$a_0$  : 初期亀裂長

(6.8)式の右辺は応力と繰返し数のみの関数であり、応力頻度分布が与えられ、その応力頻度分布に従ってランダム波が作用した場合、その応力発生順序が任意であっても、応力頻度分布に

相当する応力がすべて作用した後においては，右辺の値は一定となる。一方左辺は，亀裂長のみの関数であり，かつ右辺の最終値が一定となることから，応力履歴分布に対した応力がすべて作用した後の最終亀裂長は一定となる。すなわち，疲労亀裂伝播速度に対する過大荷重による遅延効果，さらにはある $K$ 値以下では疲労亀裂が伝播しない，いわゆる $K_{th}$ の効果を無視すれば，応力発生順序が任意であったとしても，累積応力履歴分布が一定なもの全て作用させた後の最終亀裂長は一定となる。

(6.4) ~ (6.7) 式を (6.1) 式に代入すると

$$\frac{1}{C} \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{\{\sqrt{\pi a} g(a) f(a)\}^n} = \Delta \sigma_{\max}^m \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^k \left\{ \frac{2k-2i+1}{2k} \right\}^m \left\{ 10^{\frac{\pi i}{k}} - 10^{\frac{\pi(i-1)}{k}} \right\} \quad (6.9)$$

図6.5 に示す累積応力履歴分布に従う応力が全て作用した後には，すなわち $10^n$ サイクル負荷後には，最終亀裂長 $a_f$ は(6.9)式で与えられる。いま $10^n$ 回一定応力振幅 $\Delta \sigma_{eg}$ が作用して $a_f$ まで亀裂が成長するような等価応力振幅 $\Delta \sigma_{eg}$ を考えると，(6.9)式の右辺は $\Delta \sigma_{eg}^m \cdot 10^n$ となる。したがって

$$\frac{\Delta \sigma_{eg}}{\Delta \sigma_{\max}} = \left[ \frac{\lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^k \left\{ \frac{2k-2i+1}{2k} \right\}^m \left\{ 10^{\frac{\pi i}{k}} - 10^{\frac{\pi(i-1)}{k}} \right\}}{10^n} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (6.10)$$

$$= R_a \text{ (等価応力係数)}$$

すなわち， $\Delta \sigma_{eg}$ の一定応力振幅を全期間( $10^n$ サイクル)作用させた時の最終亀裂長 $a_f$ は(6.9)式で与えられる $a_f$ と同じとなる。

したがって、 $\Delta O_{eg}$  を作用させて計算した亀裂成長曲線は、全期間を通じた平均的亀裂成長を与えることになる。等価応力係数  $R_a$  の計算結果を 図 6.6 に示す。したがって最大期待値に対する  $K$  値に  $R_a$  を乗じたものを  $\Delta K$  として (6.1) 式を適用すれば、全期間を通じた平均的寿命が計算できることになる。ただし、上述のように遅延効果、 $K_{th}$  の効果を無視しているから、この計算は実際よりもかなり早めの亀裂成長寿命を予測することになる。

ところで、疲労亀裂は  $\Delta K_{th}$  (threshold stress intensity factor range) 以下では成長しないが、前記の  $R_a$  はこの効果を無視したもので、 $\Delta K_{th}$  以下でも亀裂は成長するとして求めたものである。 $K$  値は亀裂長および応力分布の関数であるが、上記のようにランダム応力下での平均的亀裂伝播寿命を計算する場合には、亀裂長が変化するため、 $\Delta K_{th}$  の効果を亀裂伝播に考慮することは一般的には困難である。しかしながら、最大期待値レベルの  $K$  値が亀裂成長とともに減少あるいは一定となる場合においては、 $\Delta K_{th}$  の効果を疲労亀裂伝播計算にある程度考慮させることは、平均的亀裂伝播寿命を求める場合においても可能である。

いま亀裂長が  $a_1$  から  $a_2$  に成長していく間に、最大期待値レベルの  $K$  値が一定あるいは単調減少していく場があるとする。すなわち

$$K_{at a=a_1} \geq K_{at a=a_2} \quad (\text{at max. expected value}) \cdots (6.11)$$

$$\text{ただし } K_{at a=a_1} = \Delta \sigma_{\max} \cdot g(a_1) \sqrt{\pi a_1} \cdot f(a_1)$$

$$K_{at a=a_2} = \Delta \sigma_{\max} \cdot g(a_2) \sqrt{\pi a_2} \cdot f(a_2)$$

外荷重がランダムに作用する場合、亀裂長が $a_1$ の時の $\Delta K$ 値は

$$\Delta K_{at a=a_1} = \Delta \sigma \cdot g(a_1) \sqrt{\pi a_1} \cdot f(a_1) \text{ ----- (6.12)}$$

であり、(6.11), (6.12)より

$$\Delta K_{at a=a_1} = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \sigma_{\max}} K_{at a=a_1}$$

となり

$$\Delta K_{at a=a_2} \leq \Delta K_{at a=a_1} = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \sigma_{\max}} K_{at a=a_1} \leq \Delta K_{th} \text{ ----- (6.13)}$$

$$\text{ただし } \Delta K_{at a=a_2} = \Delta \sigma g(a_2) \sqrt{\pi a_2} f(a_2)$$

の時亀裂は成長しないことになる。したがって、(6.13)式より

$$\Delta \sigma \leq \frac{\Delta K_{th}}{K_{at a=a_1}} \cdot \Delta \sigma_{\max} \text{ ----- (6.14)}$$

の外荷重レベルが作用する時には、亀裂は伝播しない。(6.10)

式と同様に等価応力係数 $R'_a$ を求めると

$$R'_a = \left[ \frac{\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{2R - (1-d)(2i-1)}{2R} \right\}^m \left\{ 10^{\frac{n(1-d)i}{R}} - 10^{\frac{n(1-d)(i-1)}{R}} \right\}}{10^n} \right]^{\frac{1}{m}} \text{ ---- (6.15)}$$

$$\text{ただし } d = \Delta K_{th} / K_{at a=a_1}$$

したがって後の $K$ 値解析により得られる最大期待値レベルの $K$ 値が亀裂成長とともに一定あるいは単調減少する区間については、(6.10)式の $R_a$ の代りに、(6.15)式の $R'_a$ を使用しても安全側の

亀裂伝播寿命の予測ができる。

## 6.6 $K_{IC}$ 値の推定

5.2節に示れたとおり、脆性破壊発生に対する破壊靱性値  $K_{IC}$  値は、板厚、拘束など種々の影響を受ける。破壊靱性を求めるためには COD 試験片、CT 試験片、Deep Notch 試験片などといった、いわゆる破壊靱性試験片を作成して実験する必要がある。しかし設計段階においては、工業的試験であるシャルピ衝撃エネルギーをいかに設定するか、あるいは要求されるシャルピ値がいくつになる  $K_{IC}$  値に対応するかが重要な問題となる。シャルピ試験は切欠靱性を求める試験であるが、シャルピ値には発生エネルギーならずに伝播のエネルギーが含まれ、さらには部分的な試験片であり、負荷速度もかなり速く、 $K_{IC}$  値とは物理的に異なる量である。したがってシャルピ値と  $K_{IC}$  値との関係を理論的に関連させることは本来無理がある。

しかし、工業的にはシャルピ試験が広汎に行なわれていることを考慮すれば、シャルピ試験から  $K_{IC}$  値を推定することは非常に重要な意味をもつ。そのため、5.2.3 項に示れたごとく、その相関が多く研究されてきた。これらの結果のうち条件に適合するものを適当に選んで  $K_{IC}$  値を推定すればよいが、どれを使用してよいのか、実際の適用上は非常に問題となろう。そこで本節では船殻材料ということを考慮におき、シャルピ値より  $K_{IC}$  値を推定

する。手法の手順をかかげておく。

- 1) シャルビ衝撃値  $vE$  と試験温度との関係を、図6.7に模式的に示すようにアレニウス型にプロットする。<sup>(注1,2)</sup> そして遷移温度域のデータにのみ着目して図のように直線を引く。そしてその直線

$$vE = vE_0 \exp(-T_0/T) \text{-----} (6.16)$$

の定数  $vE_0$ ,  $T_0$  を求める。<sup>(注3,4)</sup>

(注1) 溶接部が問題となるときは、溶接部のシャルビ試験結果をプロットする。この場合通常はボンド部が低靱性箇所であるので、ボンド部のシャルビ値をプロットする。

(注2) 一温度におけるシャルビ値  $vE$  が判らない場合、軟鋼に対しては図6.8<sup>\*</sup>の本線で示すマスターカーブ

$$vE = \frac{0.572}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{T-vT_E} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{T-vT_E}{24.5}\right)^2\right\} dT \text{-----} (6.17)$$

ただし  $vT_E$  : エネルギー-遷移温度

を使用して温度と  $vE$  の関係を求める。また高張力鋼に対しては WES 3003<sup>3)</sup> のマスターカーブ<sup>3)</sup> (図6.9)

$$vE = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{T-vT_E} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{T-vT_E}{20}\right)^2\right\} dT \text{-----} (6.18)$$

を使用して温度と  $vE$  の関係を求める。そしてこの結果より図6.7を作成する。

\* : WES 3003 では軟鋼～HT80材までの鋼材のシャルビ遷移曲線を集めて、 $vT_E$  で標準化して上記鋼種につき一律のマスターカーブ、(6.18)式を与えているが、軟鋼だけが他の鋼種のシャルビ遷移曲線群と逸脱していた。そこで軟鋼についてのみのシャルビ遷移曲線より図6.8のようにマスターカーブを設定した。

[例] 軟鋼が  $-10^{\circ}\text{C}$  で  $2.8\text{kgf}\cdot\text{m}$  のシャルピー値を有していたとする。この場合図6.8の④点( $2.8\text{kgf}\cdot\text{m}$ )に対応する  $T-vT_{RE}$  (⑤点) をマスターカーブより  $-20^{\circ}\text{C}$  と求め、 $T=-10^{\circ}\text{C}$  より  $vT_{RE}=10^{\circ}\text{C}$  を得る。次に軟鋼のマスターカーブである(6.17)式の展開式の一次項

$$vE = 7 + 0.228(T - vT_{RE}) \text{-----} (6.19)$$

に  $vT_{RE}=10^{\circ}\text{C}$  を代入して、 $T(^{\circ}\text{C})$  における  $vE$  を求め、図6.7を作成する。

一方、K32鋼(HT50)の場合は図6.9を使用して上記と同様に、(6.18)式の展開式の一次項

$$vE = 10 + 0.4(T - vT_{RE}) \text{-----} (6.20)$$

を使用して、 $T(^{\circ}\text{C})$  における  $vE$  を求めればよい。

(注3) 軟鋼A級鋼の場合、シャルピー規定がないので、シャルピー値が判らない場合が多い。この場合、母材に対しては、 $NK^{(4)}$  で集められたA級鋼の  $vT_{RE}$  の上限値  $37^{\circ}\text{C}$  を考慮して、 $vT_{RE}=40^{\circ}\text{C}$  程度に設定することが望ましい。

(注4) 亀裂先端が溶接部となる場合、溶接部のシャルピー値を推定する必要が生じる。この場合は破面遷移温度  $vT_{Trs}$  が溶接熱サイクルによって上昇する量  $\Delta vT_{Trs}$  の実績値を調査した図6.10<sup>(5)</sup>を参考にして、その上限値の  $\Delta vT_{Trs}$  だけ  $vT_{RE}$  が母材より上昇すると考え、(6.19)あるいは(6.20)式より  $vE$  を推定する。

2) 萩原<sup>6)</sup>らが求めた、シャルビ値と、機械切欠付三点曲げ試験で得られた限界COD,  $(\delta_c)_M$  の相関式を使用して、 $(\delta_c)_M$  を推定する。すなわち

$$\Delta T^* = 120 - \sigma_{Y0} - 5(\sqrt{t} - 20) \text{-----} (6.21)$$

ただし  $\sigma_{Y0}$ : 室温における降伏点 ( $\text{kgf}/\text{mm}^2$ )

$t$ : 板厚 (mm)

より  $\Delta T^*$  を求める。そして

$$(\delta_c)_M = 0.01 \nu E_0 \exp(-T_0/(T + \Delta T^*)) \text{-----} (6.22)$$

ただし  $\nu E_0, T_0$ : (6.16) 式の値

$T$ : 温度 (K)

に  $\Delta T^*$  を代入して、 $(\delta_c)_M$  (mm) を求める。

3) 機械切欠材の  $(\delta_c)_M$  より、以下のようにして疲労予亀裂材の限界COD  $\delta_c$  を安全側に推定する。<sup>7)</sup>

$$\delta_c = 0.34 (\delta_c)_M \text{-----} (6.23)$$

4) 最低使用温度  $T$  (K) における降伏点  $\sigma_Y$  を以下の式<sup>8)</sup>より求める。

$$\sigma_Y = \sigma_{Y0} \exp \left\{ (329.6 - 66.5 \ln \sigma_{Y0}) \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{293} \right) \right\} \text{---} (6.24)$$

ただし  $\sigma_{Y0}$ : (6.21) 式での値

5) (6.23) 式で得られた最低使用温度  $T$  (K) における  $\delta_c$  値, および (6.24) 式の  $\sigma_Y$  より、最低使用温度  $T$  (K) における  $K_{Ic}$  値を以下の式より求める。

$$K_{Ic} = \sqrt{E \sigma_Y \delta_c} \text{-----} (6.25)$$

ただし  $E$ : ヤング率 ( $21000 \text{ kgf}/\text{mm}^2$ )

以上の 1)~5) の過程をふむことにより  $K_c$  値を安全側に推定できる。なお以上の過程を逆にたどれば、要求  $K_c$  値から要求シヤルピー値を求めることができる。

## 6.7 疲労亀裂伝播経路の設定

最大期待値レベルの変動荷重成分による主応力分布をもとに、6.3 節で設定した初期欠陥から疲労亀裂がどのような経路をたどるかを以下の方法<sup>9)</sup>により設定する。

[設定1] 平板中を伝播する板厚貫通亀裂は、亀裂なしの部材の最大主応力に垂直に伝播する。

上記は小骨材などが切断したために、他の部材の応力状態が変化し、その部材の亀裂挙動を追跡するような場合には成立しない。たとえばウェブステッパが切断され、この部分に作用していた応力がスロットまわりの応力状態を変化させ、これが原因となりスロットまわりから亀裂が伝播するというような場合である。このような場合には小骨材が切断されたということを加味した応力解析が新たに必要となる。

[設定2] 平板中を伝播してきた板厚貫通亀裂が直交交差部材に達した後、亀裂は以下のような経路に進入する。すなわち直交交差部材近傍の平板の最大主応力と直交交差部材とのなす角 $\theta$  (図6.11参照) により以下のように設定する。

①  $0^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$  のとき : 直交交差部材へ進入する。

②  $15^\circ < \theta < 25^\circ$  のとき : 直交交差部材に進入, あるいはすみ肉溶接部に沿う。(どちらの経路がより危険か, あるいは機能喪失につながらるかを考慮して, その方向に亀裂伝播経路を設定する。)

③  $25^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$  のとき : すみ肉溶接部に沿う。

ただし load carrying type のすみ肉溶接部に対しては進路を変えずに直交交差部材に進入する。

上記の設定は、通常のすみ肉溶接(脚長 5~15mm, 平板部板厚 10~20mm)を有するモデル試験の実験によって得られた知見をもとに行なわれたものである。実船殻構造では、ほぼ上記の設定で経路予測ができると考えられる。しかし、部分溶込みすみ肉溶接部では、上記設定よりも小さな $\theta$ のところでも直交交差部材に進入しやすくなると考えられる。(平板部から伝播してきた亀裂が、すみ肉溶接に沿う現象は、平板部を亀裂が直交交差部材に近づくにつれて、すみ肉溶接部に作用する応力が上昇し、このためすみ肉溶接ルート部から新たな亀裂が発生、伝播するためである。そしてこの新たな亀裂が、すみ肉のと部を伝播することにより、平板部の亀裂が直交交差部材へ進入することを妨げる効果を発揮すると考えられる。したがって、部分溶込みすみ肉溶接部では、ルート部からの亀裂の発生、伝播は、通常のすみ肉部のそれより遅くなると考えられる。)したがって

橋梁構造のボックスガ-ダのような部分溶込みすみ肉溶接部に対しては、上記設定は不適当と考えられる。これについては今後の研究が必要であろう。

次にすみ肉溶接に沿って伝播する亀裂が、沿いつづけるか、逸れるかの予測を行なうために、あらかじめ、以下のK値を求めておく。まずすみ肉部の亀裂に作用するせん断応力分布を

$$\tau(x_1) = \sum_{n=0}^4 C_n x_1^n \quad \text{-----} \quad (6.26)^{++}$$

ただし、 $x_1$ ：平板部の亀裂が直交交差部材に達した場所を原点とする座標（図6.12(a)参照）

$C_n$ ：応力分布を表わす定数

とおき

$$K_I = \sum_{n=0}^4 \hat{k}_n C_n^* a_1^{n+1} / \sqrt{\pi a_1} \quad \text{-----} \quad (6.27)^{++}$$

ただし

$2a_1$ ：すみ肉溶接部に沿っている亀裂がース長

$$\left. \begin{aligned} C_0^* &= C_0 - C_1 a_1 + C_2 a_1^2 - C_3 a_1^3 + C_4 a_1^4 \\ C_1^* &= C_1 - 2C_2 a_1 + 3C_3 a_1^2 - 4C_4 a_1^3 \\ C_2^* &= C_2 - 3C_3 a_1 + 6C_4 a_1^2 \\ C_3^* &= C_3 - 4C_4 a_1 \\ C_4^* &= C_4 \\ \hat{k}_0 &= \pi \\ \hat{k}_1 &= \hat{k}_2 = \frac{\pi}{2} \\ \hat{k}_3 &= \hat{k}_4 = \frac{3}{8} \pi \end{aligned} \right\} \quad \text{-----} \quad (6.28)$$

として、すみ肉溶接部に作用するせん断応力成分による  $K_I$  値を求める。

(++) 脚注：3.5節の表3.5.2の第2コラムと同じ結果を示してあるが、ここでの表示法は3.5節のそれと異なっている。

次に、直交交差部材に達するまでの平板中の亀裂径路上で作用していた初期応力が、すみ肉溶接に沿う亀裂におよぼす  $K$  値  $K_P$  を以下の式により求める。

$$K_P = 0.89 K_{a_2} \sqrt{\frac{a_2}{\pi(a_2 + 2a_1)(1 - \xi^2)}} \left[ 1 + (1 - \xi^2)(0.2945 - 0.3912\xi^2 + 0.7685\xi^4 - 0.9942\xi^6 + 0.5094\xi^8) \right] \text{-----} (6.29)$$

ただし

$$\xi = 0.85 a_2 / (a_2 + 2a_1)$$

$K_{a_2}$ : 平板中の亀裂が直交交差部材へ達した時点での  $K$  値 (たとえば後述の (6.36) 式から求める。)

$a_2$ : 平板中の亀裂がス長

この  $K_P$  値のうちのせん断成分  $K_2$  と opening mode  $K_3$  を以下のよう求める。(図 6.12(b) 参照)

$$\left. \begin{aligned} K_2 &= K_P \cos \theta \\ K_3 &= K_P \sin \theta \end{aligned} \right\} \text{-----} (6.30)$$

ただし  $\theta$ : 設定 1 での値 (図 6.11 参照)

さらにすみ肉溶接部に沿う、平板部の垂直応力分布  $\sigma(x_1)$  と

$$\sigma(x_1) = \sum_{n=0}^4 \tilde{C}_n x_1^n \text{-----} (6.31)$$

ただし  $\tilde{C}_n$ : 応力分布を表す定数

とおき

$$K_4 = \sum_{n=0}^4 \hat{K}_n \tilde{C}_n^* a_1^{n+1} / \sqrt{\pi a_1} \text{-----} (6.32)$$

ただし

$$\left. \begin{aligned}
 \tilde{C}_0^* &= \tilde{C}_0 - \tilde{C}_1 a_1 + \tilde{C}_2 a_1^2 - \tilde{C}_3 a_1^3 + \tilde{C}_4 a_1^4 \\
 \tilde{C}_1^* &= \tilde{C}_1 - 2\tilde{C}_2 a_1 + 3\tilde{C}_3 a_1^2 - 4\tilde{C}_4 a_1^3 \\
 \tilde{C}_2^* &= \tilde{C}_2 - 3\tilde{C}_3 a_1 + 6\tilde{C}_4 a_1^2 \\
 \tilde{C}_3^* &= \tilde{C}_3 - 4\tilde{C}_4 a_1 \\
 \tilde{C}_4^* &= \tilde{C}_4 \\
 \hat{R}_0 &= \pi \\
 \hat{R}_1 &= \hat{R}_2 = \frac{\pi}{2} \\
 \hat{R}_3 &= \hat{R}_4 = \frac{3}{8}\pi
 \end{aligned} \right\} \text{----- (6.33)}$$

としてすみ肉溶接に沿う亀裂に垂直に作用する応力成分によるK値 $K_4$ を求める。最後にA点(図6.12参照)の位置での平板部に作用するすみ肉溶接線に垂直な応力 $\sigma_n$ と、すみ肉溶接に作用するせん断応力 $\tau_n$ より、A点におけるすみ肉ルート部でのK値 $K_5$ を以下のようにして求める。

$$K_5 = (\sigma_n + \tau_n) \sqrt{(t_1 + 2Le) \tan \frac{\pi a}{t_1 + 2Le}} \text{----- (6.34)}$$

ただし

 $t_1$ : 平板部の板厚 $Le$ : すみ肉溶接脚長 $2a$ : すみ肉溶接未溶接部の長さ(通常  $2a = t_1$ )上記  $K_1 \sim K_5$  値を使用して

[設定3] すみ肉溶接部に沿って伝播している亀裂のその後の経路は、

$(K_1+K_2)/(K_3+K_4+K_5) \geq 2.1$  のとき：亀裂前方の最大主応力の  
法線方向に亀裂が逸れる。

$(K_1+K_2)/(K_3+K_4+K_5) \leq 1.9$  のとき：すみ肉溶接部に沿って亀  
裂は伝播しつづける。

$2.1 > (K_1+K_2)/(K_3+K_4+K_5) > 1.9$  のとき：上記のいずれかとなる。

(どちらの径路がより危険  
か、あるいは機能喪失に  
つながるかを考慮して、  
その方向に径路を設定す  
る。

上記設定は図6.13 に示す実験結果よりみちびかれたものである。すみ肉溶接に一端沿った亀裂が、すみ肉溶接を逸れるようにする試験体を種々の応力条件下で計画することが難しく、実験結果も図にみるように少ない。今後の研究によってさらに上記設定の信頼性をあげるか、さらにはより合理的な判定規準が導出されるようにすべきであるが、現在の時点では本設定に矛盾する損傷がみあたらない。したがって上記のように暫定的に設定する。

また直交交差部材に進入した亀裂は表面亀裂状に伝播し、直交交差部材の裏面に達する。直交交差部材に進入してから直交交差部材を貫通するまでは、亀裂が板表面に対し斜めに伝播していく場合でも、垂直に伝播したと仮想的に考える。

この区間は構造全体から考えると非常に短いため、後の亀裂伝播経路を大きく変えることはないと判断でき、さらには安全側の評価という観点より

[設定4] 直交交差部材に進入した亀裂は、直交交差部材を横切るまでは直交交差部材の板表面に対して垂直に伝播し、裏面のすみ内溶接部を横切り、裏面の平板部に伝播していく。

以上の設定1～4によって、疲労亀裂伝播経路を予測する。

## 6.8 船殻構造部材のK値推定式

前節によって亀裂伝播経路を設定し、この経路に沿って亀裂が伝播していく場合、亀裂成長の各段階でK値を与える必要が寿命予測の観点より生じる。そこで本節では、K値を簡易的に与える式を列挙する。これらの式の由来は6章付録を参照されたい。以下に掲げる式を組合せることにより、船殻構造に生じる電裂のK値をほとんど全てのものについて求めることができる。

A) 縁亀裂が最初の直交交差部材へ達するまでのK値 (図6.14 参照)

設定亀裂経路上の法線方向主応力分布を

$$\sigma(x) = \sum_{n=0}^4 C_n x^n \text{ ----- (6.35)}$$

とあって

$$K = M\left(\frac{a}{a_1}\right) \sum_{n=0}^4 \tilde{C}_n C_n a^n \sqrt{\pi a} \text{ ----- (6.36)}$$

ただし

$$M(\phi) = -0.58\phi^2 + 0.14\phi + 1 \text{ ----- (6.37)}$$

$$\tilde{k}_0 = 1.1215, \tilde{k}_1 = 0.6829, \tilde{k}_2 = 0.5255, \tilde{k}_3 = 0.4410, \tilde{k}_4 = 0.3868$$

$$\phi = a/a_2$$

$x$ : 自由縁を原点とした、亀裂径路上の曲線座標

$a_2$ : 自由縁から直交交差部材にいたるまでの設定径路に沿うガス長

$a$ : 亀裂ガス長

$C_n$ : 応力分布を表わす定数

B) 平板中の貫通亀裂の  $K$  値 (図6.15 参照)

亀裂発生点を原点にとり、設定亀裂径路上の法線方向主応力分布を

$$\sigma(x) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n x^n \quad \text{-----} (6.38)$$

とおくと、A側の亀裂先端の  $K$  値  $K_A$ , B側の亀裂先端の  $K$  値  $K_B$  は

$$\begin{Bmatrix} K_A \\ K_B \end{Bmatrix} = \hat{M} \sum_{n=0}^{\infty} \hat{k}_n C_n^* a^{n+1/2} / \sqrt{\pi a} \quad \text{-----} (6.39)$$

ただし

$$\left. \begin{aligned} C_0^* &= C_0 \mp C_1 e + C_2 e^2 \mp C_3 e^3 + C_4 e^4 \\ C_1^* &= \pm C_1 - 2C_2 e \pm 3C_3 e^2 - 4C_4 e^3 \\ C_2^* &= C_2 \mp 3C_3 e + 6C_4 e^2 \\ C_3^* &= \pm C_3 - 4C_4 e \\ C_4^* &= C_4 \\ a &= (a_1 + a_2)/2 \\ e &= (\pm a_1 \mp a_2)/2 \\ \hat{k}_0 &= \pi \\ \hat{k}_1 &= \hat{k}_2 = \pi/2 \\ \hat{k}_3 &= \hat{k}_4 = 3\pi/8 \end{aligned} \right\} \quad \text{-----} (6.40)$$

$$\hat{M} = \left\{ \begin{array}{l} M(\phi_1) = -0.58\phi_1^2 + 0.14\phi_1 + 1 \quad \left( \begin{array}{l} \text{亀裂前方に直交交差部材} \\ \text{が存在する場合} \end{array} \right) \\ \sqrt{\frac{2W}{\pi a} \tan \frac{\pi a}{2W}} \quad \left( \text{亀裂前方に自由端がある場合} \right) \end{array} \right\} \quad (6.41)$$

$$\phi_1 = a / \left[ \left\{ \begin{array}{l} a_{L1} \\ a_{L2} \end{array} \right\} - (\pm a_1 \mp a_2) / 2 \right]$$

$2W$ : 平板中の設定亀裂径路に沿うコース長

$a_{L1}, a_{L2}$ : 亀裂発生点からA側あるいはB側の直交交差部材に向かう設定亀裂径路上に沿う直交交差部材までのコース長(絶対値)

$a_1, a_2$ : A側あるいはB側の亀裂先端から原点までの設定亀裂径路に沿うコース長(絶対値)

(6.40), (6.41)式の符号は上にあるものがA側, 下にあるものがB側に対応するものである。

C) 平板に存在する表面亀裂のK値(すみ肉溶接トウ部を沿う場合をのぞく)(図6.16参照)

亀裂発生点に作用する主応力の変動膜応力成分  $\sigma_M$ , 変動面外曲げ応力成分  $\sigma_B$  を求め, 川原<sup>10)</sup>の亀裂伝播形状に関する実験式をもとに

$$\left. \begin{array}{l} b_0/a_0 < A - B \frac{b_0}{t} \quad \text{のとき} \quad a = \left\{ \left( \frac{b}{A - B b/t} \right)^n + a_*^n \right\}^{\frac{1}{n}} \\ \text{ただし} \quad a_* = \left[ a_0^n - \left( \frac{b}{A - B b/t} \right)^n \right]^{\frac{1}{n}} \end{array} \right\} \quad (6.42)$$

$$b_0/a_0 = A - B \frac{b_0}{t} \quad \text{のとき} \quad a = \frac{b}{A - B b/t} \quad \text{-----} \quad (6.43)$$

$$\left. \begin{array}{l} b_0/a_0 > A - B \frac{b_0}{t} \quad \text{のとき} \quad a = 1 / \left\{ \frac{A}{(b^n - b_*^n)^{\frac{1}{n}}} + \frac{B}{t} \right\} \\ \text{ただし} \quad b_*^n = b_0^n - A^n / \left( \frac{1}{a_0} - \frac{B}{t} \right)^n \end{array} \right\} \quad (6.44)$$

ただし

$$A = 0.98 + 0.07 R_B$$

$$B = 0.06 + 0.94 R_B$$

$$R_B = \sigma_B / (\sigma_M + \sigma_B)$$

$a_0$ : 初期欠陥半長

$b_0$ : 初期欠陥深さ

$t$ : 板厚

$n: \frac{m}{2} + 1$  ( $m$ : Paris の式の指数)

によって亀裂伝播形状を求める。その後上式で計算された  $a$ ,  $b$  の長さを有する半楕円表面亀裂の最深部の  $K$  値を, Newman<sup>11)</sup> によって得られた次式で求める。

$$K = (\sigma_M + H_2 \sigma_B) \sqrt{\pi \frac{b}{Q}} F \quad \text{----- (6.45)}$$

ただし

$$Q = 1 + 1.464 \left( \frac{b}{a} \right)^{1.65}$$

$$F = \left[ M_1 + M_2 \left( \frac{b}{t} \right)^2 + M_3 \left( \frac{b}{t} \right)^4 \right] f_w$$

$$M_1 = 1.13 - 0.09 \left( \frac{b}{a} \right)$$

$$M_2 = -0.54 + \frac{0.89}{0.2 + b/a}$$

$$M_3 = 0.5 - \frac{1}{0.65 + b/a} + 14 (1 - b/a)^{24}$$

$$f_w = \sqrt{AEC \left( \frac{\pi a}{2W} \sqrt{\frac{b}{t}} \right)}$$

$$H_2 = 1 + G_1 \left( \frac{b}{t} \right) + G_2 \left( \frac{b}{t} \right)^2$$

$$G_1 = -1.22 - 0.12 \left( \frac{b}{a} \right)$$

$$G_2 = 0.55 - 1.05 \left( \frac{b}{a} \right)^{0.75} + 0.47 \left( \frac{b}{a} \right)^{1.5}$$

----- (6.46)

ただし、 $2W$ ：平板中の亀裂伝播経路に沿うガース長，前

方に自由端がない場合は  $f_w=1$  とする。

上述のようにして  $b$  が  $0.8t$  に達した時点で貫通とみなし、以後は貫通亀裂として取扱う。(  $0.8t$  で貫通としたのは、これより深い欠陥の  $K$  値が求められていないこと、ならびに安全側の寿命推定という観点からである。)  $\sigma_M$ ,  $\sigma_B$  として亀裂発生点の応力を採用したのは、貫通時の亀裂長  $2a$  は構造部材の大きさに比して充分小さく、この範囲ではなだらかな応力分布となっていると考えられることからである。

#### D) すみ肉溶接トウ部を沿う表面亀裂の $K$ 値 (図6.17参照)

すみ肉溶接トウ部を沿う表面亀裂に対しては、最深部 D 点の  $K$  値,  $K_D$ , および表面の S 点の  $K$  値,  $K_S$  を岡本ら<sup>12)</sup>の研究結果を参考にして Newman の解<sup>11)</sup>を導入し以下のように求める。すなわち最深部に対しては、

$$K_D = M_F \cdot K_{td} (\sigma_M + H_2 \sigma_B) \sqrt{\pi \frac{b}{Q}} F \quad \text{-----} (6.47)$$

ただし

$$\left. \begin{aligned} M_F &= 1.01(K'_t - 1) \exp(-2.5 \sqrt{\frac{b}{t}}) + 1.01 - 0.01 K'_t \\ K'_t &= -0.0074 \left(\frac{\hat{\theta}}{10}\right)^3 + 0.1444 \left(\frac{\hat{\theta}}{10}\right)^2 - 0.10005 \left(\frac{\hat{\theta}}{10}\right) + 1 \end{aligned} \right\} \text{-----} (6.48)$$

$K_{td}$ ：構造的不連続による応力集中係数で角巻き溶接トウ部に亀裂が沿う場合 1.5，それ以外は 1

$H_2, Q, F$ ：(6.46)式で与えられる。

$\hat{\theta}$ ：すみ肉の角度 (図6.17参照, 単位: degree)

また表面に対しては

$$K_S = K_{t2} \cdot K_{td} (\sigma_M + H_1 \sigma_B) \sqrt{\pi \frac{b}{Q}} F_1 \quad \text{-----} (6.49)$$

ただし

$$Q = 1 + 1.464 \left(\frac{b}{a}\right)^{1.65}$$

$$F_1 = \left[ M_1 + M_2 \left(\frac{b}{t}\right)^2 + M_3 \left(\frac{b}{t}\right)^4 \right] f_\phi g f_w$$

$$M_1 = 1.13 - 0.09 \left(\frac{b}{a}\right)$$

$$M_2 = -0.54 + \frac{0.89}{0.2 + b/a}$$

$$M_3 = 0.5 - \frac{1}{0.65 + \frac{b}{a}} + 14(1 - b/a)^{24}$$

$$f_\phi = \sqrt{b/a}$$

$$g = 1.1 + 0.35 \left(\frac{b}{t}\right)^2$$

$$f_w = \sqrt{AeC \left( \frac{\pi a}{2w} \sqrt{\frac{b}{t}} \right)}$$

$$H_1 = 1 - 0.34 \left(\frac{b}{t}\right) - 0.11 \left(\frac{b}{a}\right) \left(\frac{b}{t}\right)$$

$$K_{t_2} = 1 + 0.8 \sqrt{S_2/S_1}$$

(6.50)

$K_{td}$  : (6.47)式の値と同じ

$K_{t_2}$  : すみ肉溶接トウ部の巨視的応力集中係数，角巻き溶接に沿う場合，亀裂表面先端が角巻きすみ肉溶接から逸れると  $K_{t_2} = 1$  とする。

$S_1, S_2$  : すみ肉溶接の脚長 (図6.17 参照)

ここに  $\sigma_M, \sigma_B$  は亀裂発生点の板材に作用する公称引張応力，公称面外曲げ応力である。また貫通時の判定は同じとする。

E) 平板中を伝播し，直交交差部材に達し，その後直交交差部材とのすみ肉溶接部を沿って伝播する亀裂の  $K$  値 (図6.18 参照)

$x \geq a_2$  において, すみ肉溶接に沿う平板の応力 (直交交差部材との境界線に垂直の成分) を

$$\sigma(x) = \sum_{n=0}^4 \hat{C}_n x^n \text{ ----- (6.51)}$$

せん断応力成分を

$$\tau(x_1) = \sum_{n=0}^4 C_n x_1^n \text{ ----- (6.52)}$$

ただし, 溶接すみ肉脚長  $Le$  が平板板厚  $t$  の  $\frac{1}{2}$  よりも小さい場合は, 上記応力に  $t/(2Le)$  を乗じた応力を (6.51), (6.52) 式の  $\sigma(x)$ ,  $\tau(x_1)$  とする。また  $x$  座標の原点は平板中の亀裂が縁亀裂の場合は自由端を, 他端にも亀裂先端が存在する場合は, その先端から図 6.18 の直交交差部材に達する点 A 点にいたる設定亀裂経路に沿うガース長の  $\frac{1}{2}$  の点とする。

とあって,

$$K = M\left(\frac{a}{a_{t_2}}\right) \cdot \left(K_p + \sum_{n=0}^4 \hat{R}_n^* \hat{C}_n \cdot a^n / \sqrt{\pi a} + \left| \sum_{n=0}^4 \hat{R}_n^* C_n^* \cdot a_1^{n+1} / \sqrt{\pi a_1} \right| \right) \text{ ---- (6.53)}$$

ただし

$$a = a_2 + 2a_1$$

$a_{t_2}$ : すみ肉溶接に沿う亀裂が次の直交交差部材に達する位置から,  $x$  座標の原点にいたるまでの亀裂設定経路に沿うガース長

$M$ : (6.37) 式

$K_p$ : (6.29) 式

$\hat{R}_n, C_n^*$ : (6.28) 式

で与えられ,  $\hat{R}_n^*$  は

$$k_n^* = D_1 + D_2 \sin \xi + \sum_{i=0}^3 E_i \xi^i (1-\xi^2)^{\frac{1}{2}} + \sum_{j=0}^3 F_j \xi^j (1-\xi^2)^{\frac{3}{2}} \dots (6.54)$$

$$\text{ただし } \xi = a_e/a$$

となる。ここに  $D_1, D_2, E_i, F_j$  の各係数は表 6.1 に示す値となる。

#### F) 直交交差部材へ進入した表面亀裂の K 値 (図 6.19 参照)

直交交差部材へ進入した表面状亀裂の伝播形状を (6.42) 式の  $a^*$  に  $(\frac{t_1}{2} + L_e)$  を代入して計算する。この亀裂形状に対して K 値を以下の式で求める。

$$K = K_p + (\sigma_M + H_2 \sigma_B) \sqrt{\pi \frac{b}{a}} F \dots (6.55)$$

ただし

$K_p$  : (6.29) 式の  $2a_1$  に  $b$  を代入した値

右辺第 2 項は (6.45) 式, (6.46) 式により与えられる。

貫通時の判定は D) と同じとする。なお直交交差部材に亀裂が進入した直後はすみ肉溶接部を伝播してきたため、接近する 2 つの直列表面亀裂状となるが、ここでは安全側としてあたかも完全溶込み T 継手を亀裂が伝播するものとして安全側の評価を行なう。

#### G) 直交交差部材に進入した表面亀裂が貫通亀裂に成長した場合の K 値 (図 6.20 参照)

直交交差部材中の亀裂経路に沿う主応力分布を

$$\sigma(x) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n x^n \dots (6.56)$$

とにおいて (ただし  $x$  座標の原点は直交交差部材へ亀裂が進入したところ, 図 6.20 参照)

$$K = [K_p + \sum_{n=0}^{\infty} \hat{k}_n C_n^* a^{n+1} / \sqrt{\pi a}] \hat{M} \dots (6.57)$$

ただし

$$K_P = 0.89 K_{a_2} \sqrt{\frac{a_2}{\pi(a_2 + \tilde{a})(1-\xi^2)}} \left[ 1 + (1-\xi^2)(0.2945 - 0.3912\xi^2 + 0.7685\xi^4 - 0.9942\xi^6 + 0.5094\xi^8) \right] \text{-----} (6.58)$$

$$\tilde{a} = \begin{cases} a_1 & (A \text{ side の亀裂先端に対し}) \\ a_2 & (B \text{ side の亀裂先端に対し}) \end{cases}$$

$$\xi = 0.85 a_2 / (a_2 + \tilde{a})$$

$K_{a_2}$  : 直交交差部材に達した時の K 値

$\hat{k}_n, C_n^*, a$  : (6.40) 式の値

$\hat{M}$  : (6.41) 式の値

H) 直交交差部材を横ぎった後の主亀裂の K 値 (図 6.21 参照)

$x \geq a_2$  の区間の主亀裂に沿う主応力分布を

$$\sigma(x) = \sum_{n=0}^4 C_n x^n \text{-----} (6.59)$$

において

$$K = M\left(\frac{a}{a_2}\right) \left\{ 0.89 K_{a_2} \sqrt{\frac{a_2}{\pi a (1-\xi_1^2)}} \left[ 1 + (1-\xi_1^2)(0.2945 - 0.3912\xi_1^2 + 0.7685\xi_1^4 - 0.9942\xi_1^6 + 0.5094\xi_1^8) \right] + 2P \sqrt{\frac{a_2 - t/2}{\pi a (1-\xi_2^2)}} \left[ 1 + (1-\xi_2^2)(0.2945 - 0.3912\xi_2^2 + 0.7685\xi_2^4 - 0.9942\xi_2^6 + 0.5094\xi_2^8) \right] + \sum_{n=0}^4 \hat{k}_n^* C_n a^{n+1} / \sqrt{\pi a} \right\} \text{-----} (6.60)$$

ただし

$M$  : (6.37) 式

$a_{22}$  : 主亀裂前方の直交交差部材に達する時点の亀裂ガス長

$K_{a_2}$  : T 継手で亀裂が直交交差部材を貫通した時の K 値

[(6.55) 式で  $b = 0.8t$  となった時の K 値]

$$\xi_1 = 0.85 a_2 / a$$

$$\xi_2 = (a_2 - t/2) / a$$

$$k_n^* : (6.54) \text{式}$$

(6.60)式の右辺の2項は部材Bに作用していた応力が、部材Bの亀裂の進展によって、部材Cに流入する効果を表わすものであり、集中荷重Pは安全側の評価を与えることを考慮して、

$$P = t \int_{-a_1}^{a_2} \sigma^*(x) dx \text{ ----- (6.61)}$$

ただし

$\sigma^*(x_1)$  : 部材Bに作用している膜応力分布

$x_1$  : 部材B上の座標, (図6.20のxに対応する)

と与える。

船殻部材においては、上記A)~H)を組合わせることによりK値を簡易的に推定できるものと思われる。なお上記においては、板厚貫通形の亀裂について面外曲げ応力を考慮しなかったが、面外曲げ応力が作用する場合には曲げ応力 $\sigma_b$ の0.37倍が等価膜応力である<sup>13)</sup>と考えて、例えば(6.35)式の $\sigma(x)$ にそれを加えることにより評価できる。

## 6.9 亀裂伝播寿命の推定

6.7節で設定された亀裂経路に沿って、6.8節で与えられる諸式を使用して、最大期待値レベルにおける変動荷重成分に対するK値、すなわち $\Delta K$ 値が求まる。さらに亀裂経路に対する法線応力分布を静荷重下で6.8節よりK値を求め、 $\Delta K$ 値を加える。この加えた値 $K + \Delta K$ 値が、破壊靱性値( $K_{IC}$ : 6.6節参照)を越えると脆性破壊が発生する危険が非常に大となるとして、この時点までの疲労亀裂伝播寿命を $\Delta K$ 値より計算する。この寿命が充分大ならば安全な亀裂と考えてよいであろう。

この寿命算定は、Parisの伝播式に上述の $\Delta K$ 値を代入して行なうことになるが、6.8節のB), D), G), H)の取扱いでは、亀裂先端が2箇所以上となるため、Parisの伝播式を連立させて $\Delta K$ 値、寿命を漸次求めていく必要がある。すなわちParisの伝播式(6.1)式に6.5節の等価応力係数を導入して、主亀裂に対しては

$$\Delta N = \frac{1}{C} (a_i - a_{i-1}) \cdot \frac{1}{(R_a \cdot \Delta K_A)^m} \quad (6.62)$$

他の亀裂の先端に対しては

$$\hat{a}_i = C \cdot \Delta N \cdot (R_a \cdot \Delta K_B)^m + \hat{a}_{i-1} \quad (6.63)$$

ただし、 $a_i$  : 主亀裂の亀裂長

$\Delta K_A$  : 亀裂長 $a_{i-1}$ のときの主亀裂の応力拡大係数範囲  
(最大期待値レベル)

$\hat{a}_i$  : 他の亀裂先端を有する亀裂長

$\Delta K_B$  : 他の亀裂先端(亀裂長 $\hat{a}_{i-1}$ の時)の応力拡大係数範囲  
(最大期待値レベル)

$R_a$  : 等価応力係数(場によっては $R_a'$ を使用可: 6.5節参照)

$N$  : 亀裂伝播寿命 (cycle)

$C, m$  : Parisの式の定数 (6.4節参照)

として漸次亀裂を伝播させて亀裂伝播寿命を求めればよい。この時  $a_i - a_{i-1}$  としては、図 6.22 に示すような計算精度のチェックから考慮して 0.1mm 程度とすればよい。

### 参考文献

- 1) 金沢, 板垣, 町田, 川本, 信頼性工学の概念を導入した欠陥の破壊力学的評価について, 日本造船学会論文集第146号 (昭.54.12)
- 2) 豊貞, 機械の研究, Vol.31, No.9 (1979), p.13
- 3) 日本溶接協会規格, 低温構造用鋼板判定基準 WES3003 (1978)
- 4) 三菱重工, 日本海事協会材料専門委員会資料, 80HM-1-7 (1980)
- 5) 三菱重工, 日本海事協会材料専門委員会資料, 80HM-2-7 (1980)
- 6) 萩原, 征矢, 三波, 佐藤, V-シャルピ°衝撃特性からの脆性破壊発生特性の評価法, 溶接学会誌, Vol.45, No.8 (1976), p.27
- 7) 豊貞, 曲げCOD試験片における Notch Acuity 効果の定量化に関する一提案, 日本造船学会論文集第143号 (昭.53.6)
- 8) 日本溶接協会鉄鋼部会技術委員会TM委員会, 脆性破壊発生特性に基づく鋼板の材質判定規準の確立に関する共同研究 - TM委員会総合報告書 - (昭.50.11)
- 9) 片埜, 村田, 立石, 豊貞, 岡本, 藤原, 三輪, 金沢, 破壊管理制御設計手法の一提案, 日本造船学会論文集第149号 (昭.56.6)
- 10) 川原, 栗原, 表面き裂の疲労による伝播成長過程に関する予備的考察, 日本造船学会論文集第137号 (昭.50.6), p.297
- 11) J.C. Newman, Jr. and I.S. Raju, Analysis of Surface Cracks in Finite Plates under Tension or Bending Loads, NASA Technical Paper 1578 (1979)
- 12) 岡本, 豊貞, 関西造船協会誌, Vol.175 (1979), p.31
- 13) A. Nagai and M. Toyosada, The 3rd Int. Symp. of the Japan Welding Soc., Tokyo (1978.9), p.337

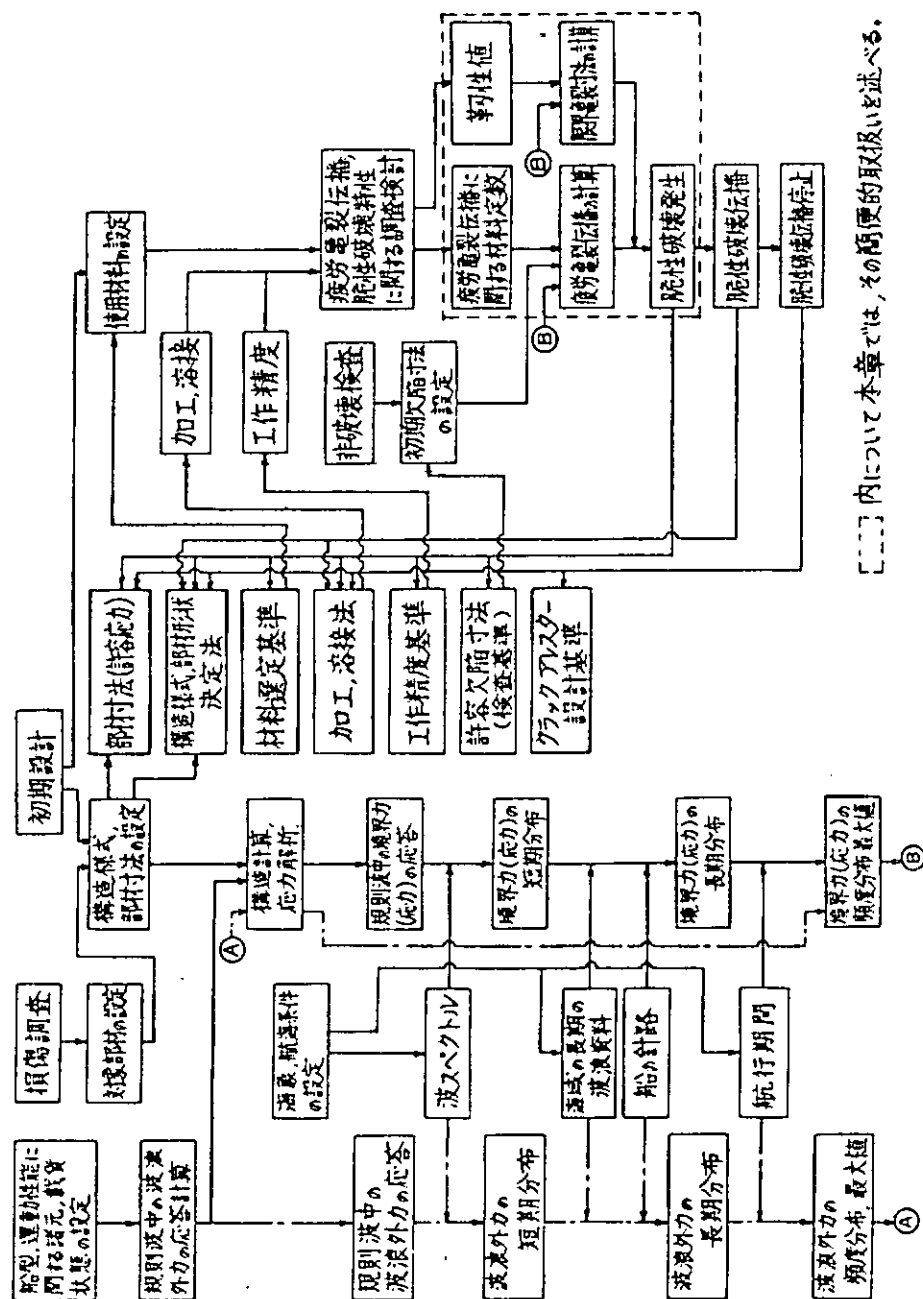
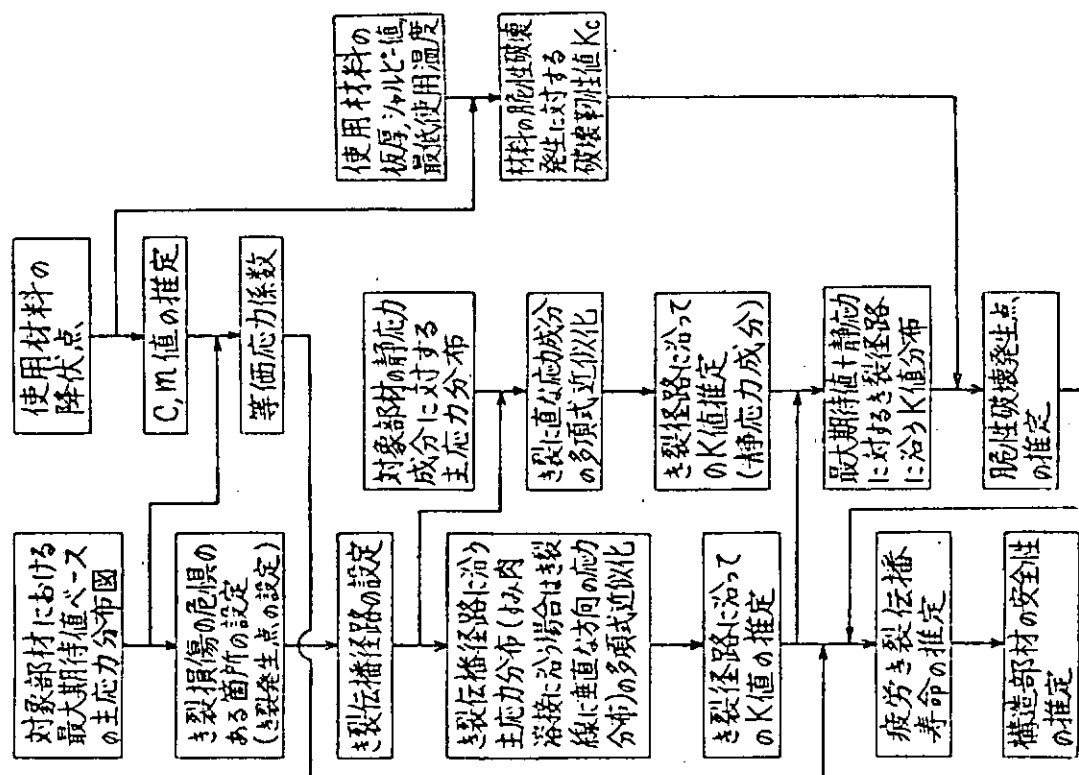


図6.1 破壊管理制御のフローチャート

图 6.2 破壊力学解析ソフト・チャート

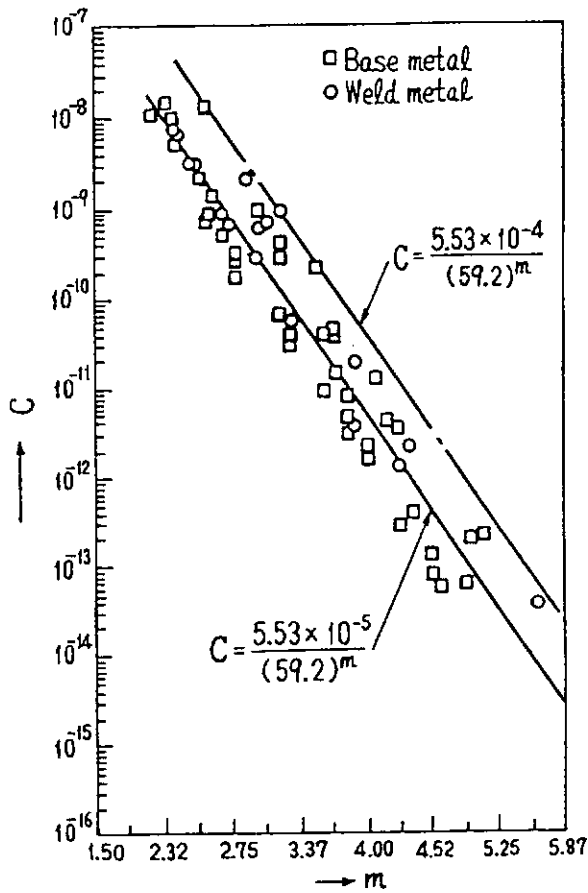


図6.3 Parisの伝播式におけるC値とm値の関係  
(単位: CGS単位)

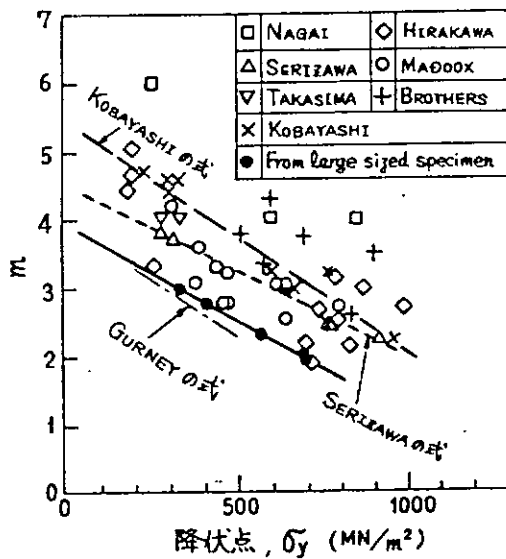


図6.4 m値と降伏点との関係

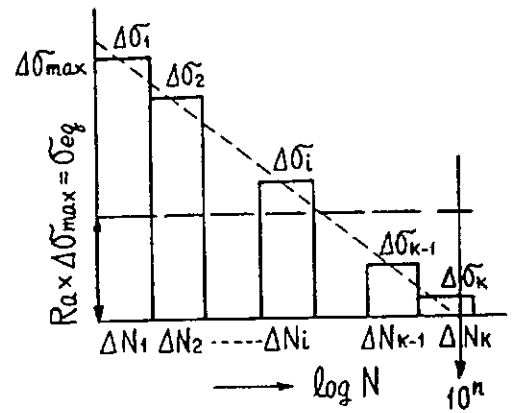


図6.5 累積応力頻度分布

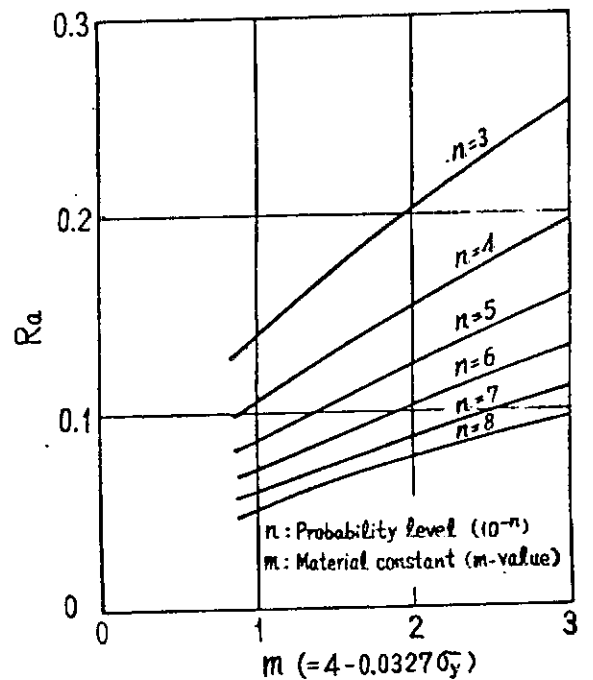


図6.6 等価応力係数とm値との関係

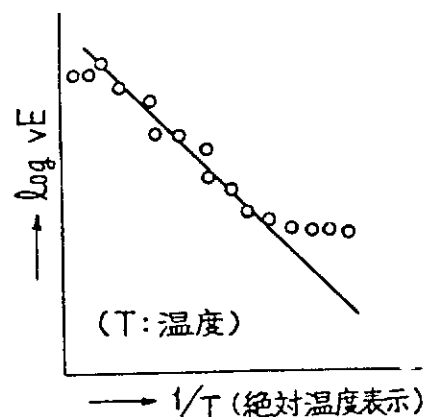


図6.7 シャルピ値vEのアレニウス型表示

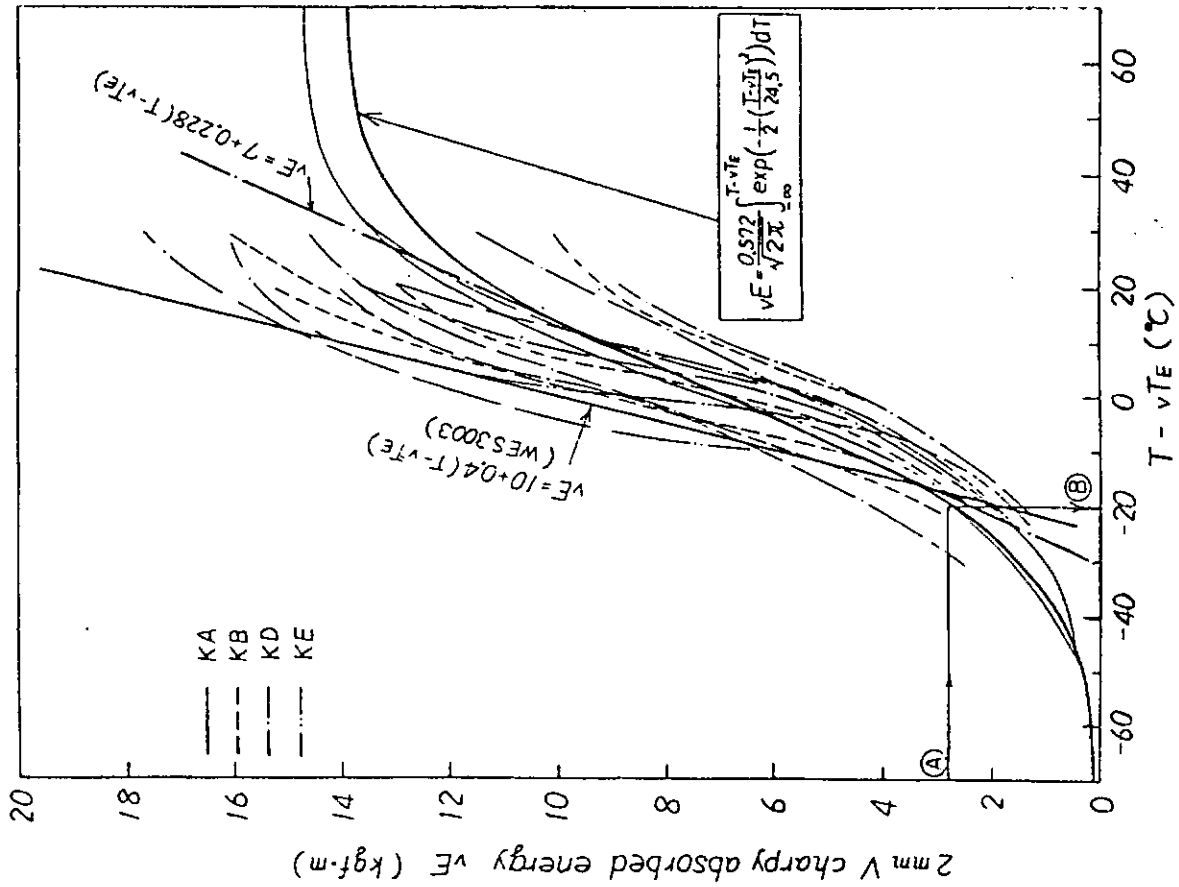


図6.8 造船用軟鋼のシャルピー遷移曲線

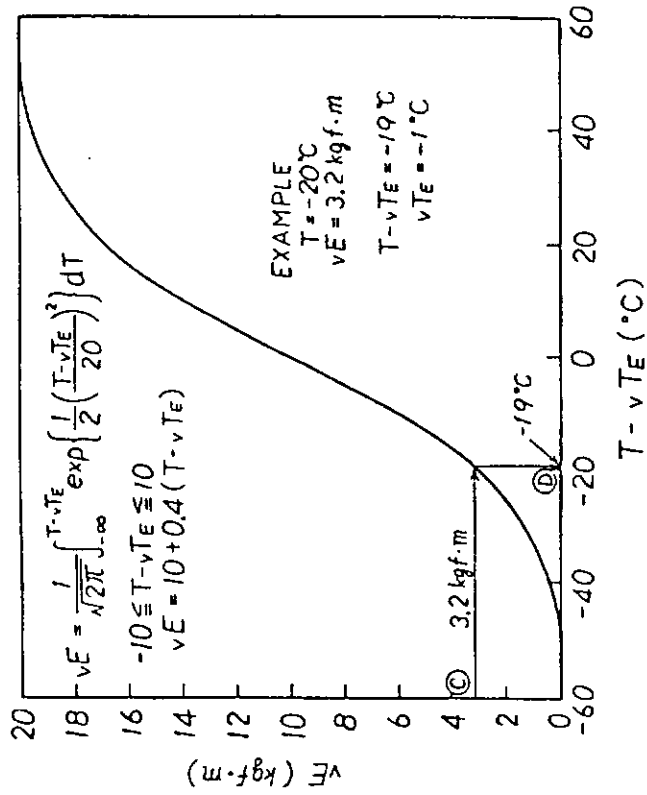


図6.9 Vノッチシャルピー衝撃試験における標準吸収エネルギー遷移曲線 (MASTER-CURVE) (WES3003)

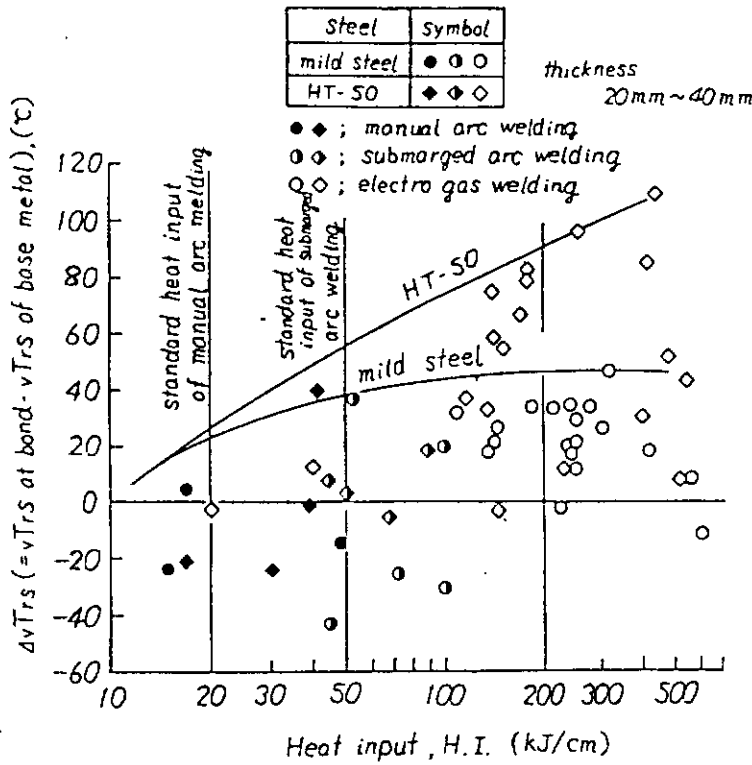


図6.10 溶接入熱量と $\Delta vTrs$ との関係

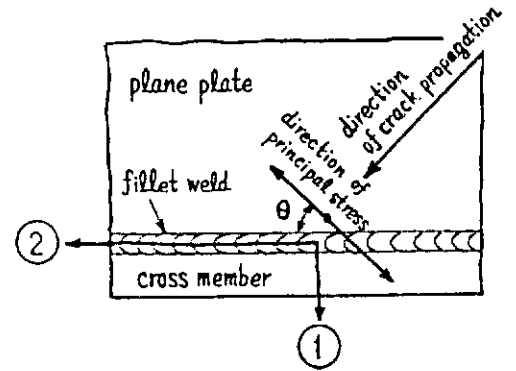


図6.11 平板部から直交差部材に到達した後の亀裂径路

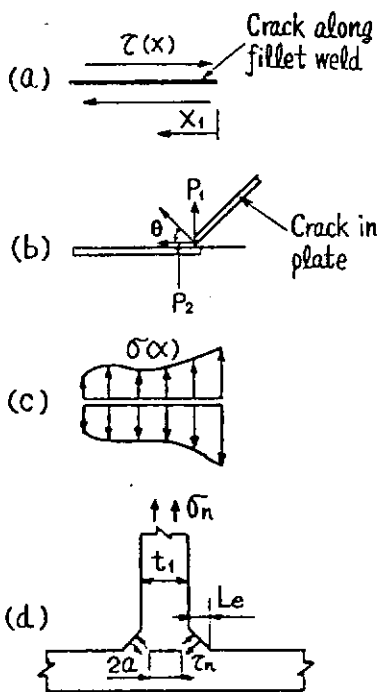


図6.12 すみ肉溶接部に作用するK値

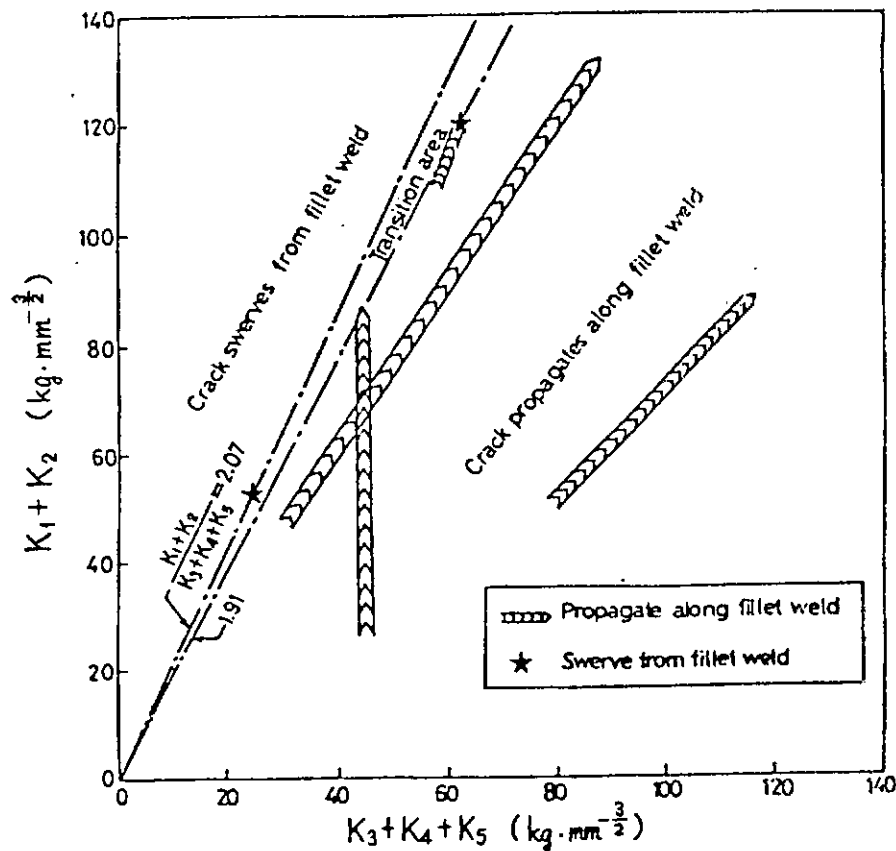


図6.13 すみ肉溶接部伝播試験結果

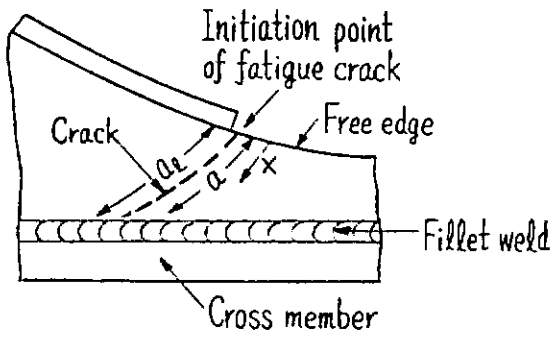


図6.14 自由縁からの亀裂

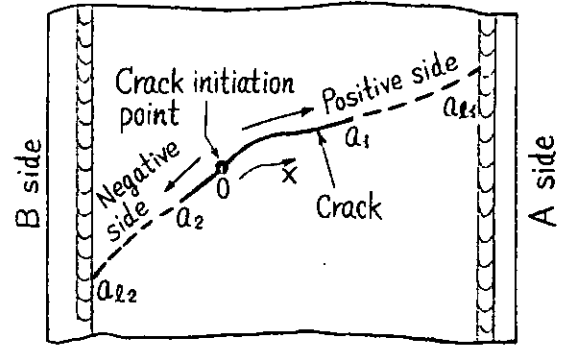


図6.15 平板中の貫通亀裂

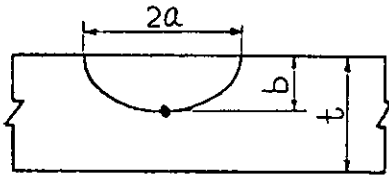


図6.16 平板中の表面亀裂

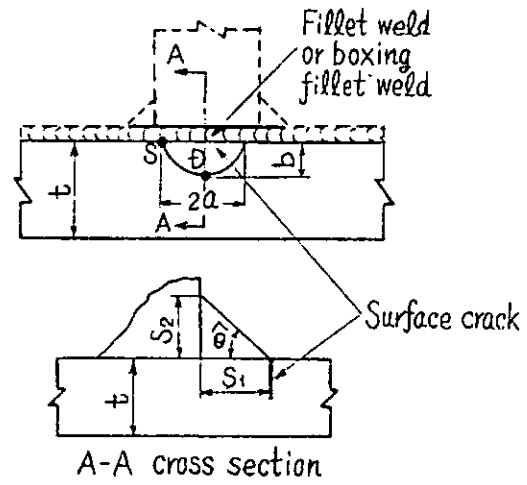


図6.17 ね肉溶接トウ部に沿う表面亀裂

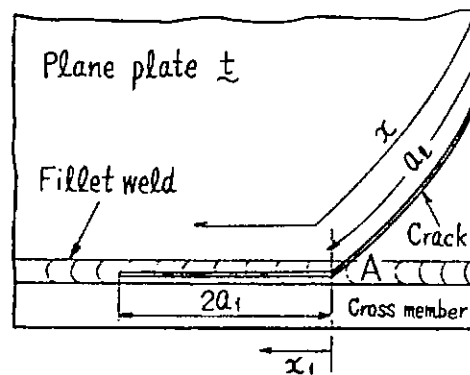


図6.18 平板部から進入したね肉溶接に沿う亀裂

表 6.1

|         | const   | $\sin^{-1}\xi$   | $\xi^i(1-\xi^2)^{1/2}$ |          |       |       | $\xi^{nj}(1-\xi^2)^{3/2}$ |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |  |
|---------|---------|------------------|------------------------|----------|-------|-------|---------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--|
|         |         |                  | $i=0$                  | $i=1$    | $i=2$ | $i=3$ | $j=0$                     | $j=1$    | $j=2$    | $j=3$    | $j=4$    | $j=5$    | $j=6$    | $j=7$    | $j=8$    | $j=9$    | $j=10$   | $j=11$   |  |
|         |         |                  | $E_0$                  | $E_1$    | $E_2$ | $E_3$ | $F_0$                     | $F_1$    | $F_2$    | $F_3$    | $F_4$    | $F_5$    | $F_6$    | $F_7$    | $F_8$    | $F_9$    | $F_{10}$ | $F_{11}$ |  |
| $k_0$   |         | $\mathfrak{D}_2$ |                        | 0.24295  |       |       |                           | 0.10310  |          | -0.12333 |          | 0.15941  |          | -0.10188 |          |          |          |          |  |
| $k_1$   | 2.14576 |                  | -2.0                   |          |       |       | -0.29630                  |          | 0.22641  |          | -0.10077 |          | 0.13861  |          | -0.09262 |          |          |          |  |
| $k_2$   |         | 1.05129          |                        | -0.94871 |       |       | -0.10257                  |          | -0.07873 |          | 0.05957  |          | -0.08500 |          | 0.12243  |          | -0.0849  |          |  |
| $k_3$   | 1.38582 |                  |                        |          | -2.0  |       | -1.38582                  |          | -0.07873 |          | 0.04883  |          | -0.07343 |          | 0.10952  |          | -0.07837 |          |  |
| $k_4$   |         | 0.77392          |                        | -0.72608 |       | -0.5  |                           | -0.04783 |          | -0.06378 |          | 0.04127  |          | -0.06461 |          | 0.09899  |          | -0.07277 |  |
| $k_0^*$ | 3.52322 | -2.24295         |                        | -0.24295 |       |       |                           | -0.10310 |          | 0.12333  |          | -0.15941 |          | 0.10188  |          |          |          |          |  |
| $k_1^*$ |         |                  | 2.0                    |          |       |       | 0.29630                   |          | -0.22641 |          | 0.10077  |          | -0.13861 |          | 0.09262  |          |          |          |  |
| $k_2^*$ | 1.65136 | -1.05129         |                        | 0.94871  |       |       |                           | 0.10257  |          | -0.05957 |          | 0.08500  |          | -0.12243 |          | 0.0849   |          |          |  |
| $k_3^*$ |         |                  |                        |          | 2.0   |       | 1.38582                   |          | 0.07873  |          | -0.04883 |          | 0.07343  |          | -0.10952 |          | 0.07837  |          |  |
| $k_4^*$ | 1.21566 | -0.77392         |                        | 0.72608  |       | 0.5   |                           | 0.04783  |          | 0.06378  |          | -0.04127 |          | 0.06461  |          | -0.09899 |          | 0.07277  |  |

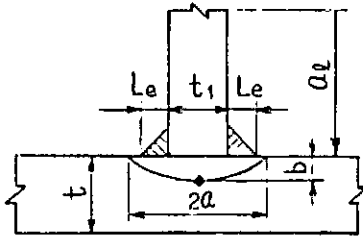


図 6.19 直交交差部材へ進入した表面亀裂

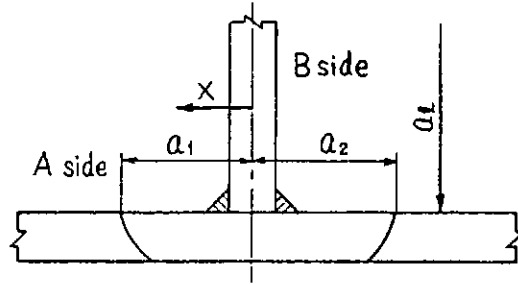


図 6.20 直交交差部材へ進入した貫通亀裂

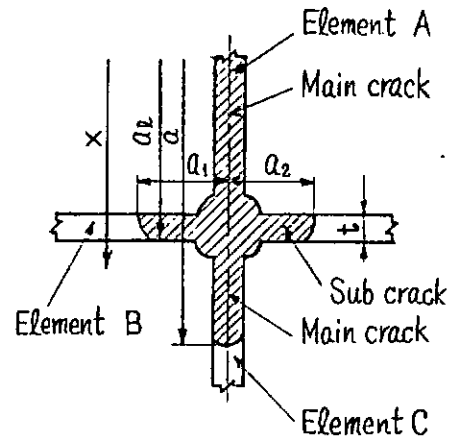
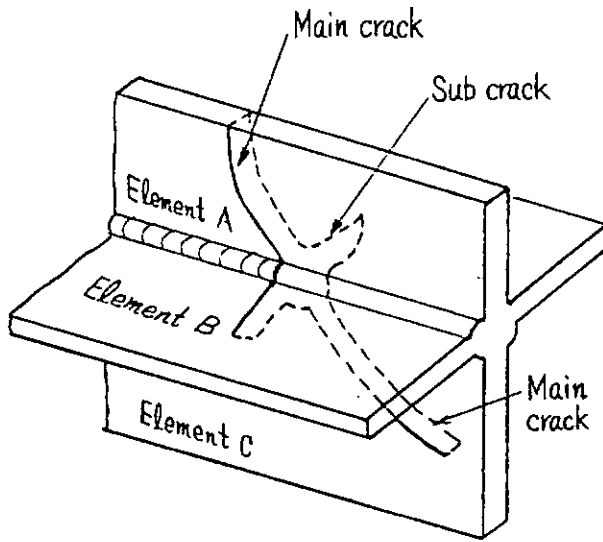


図 6.21 直交交差部材を横切った後の主亀裂

## Appendix: 構造部材のK値推定について

構造部材では種々の方向の力が一般には作用するので、電裂には一般的には、モードⅠ（開口型）、モードⅡ（面内せん断型）、モードⅢ（面外せん断型）の力が混合して作用する。ところで、モードⅠとモードⅡの混合モード下での疲労電裂伝播下においては、電裂の進展にともないモードⅡ成分が消失する方向に電裂が伝播する<sup>A1)</sup>。またモードⅢが大きく作用する部材は船殻構造ではみあたらない。いずれにしても、混合モード下での疲労電裂伝播は最もモードⅠがその伝播速度に大きな影響をおよぼす。一方、脆性破壊発生に対しても、混合モード下での実験結果では、軟鋼などの弾塑性材料では $K_{II}$ あるいは $K_{III}$ が大きくなるとより変形にエネルギーが費され、どちらかといえば $K_I = \text{const}$ で破壊するという結果になっており、<sup>A2), A3)</sup>  $K_{II}$ ,  $K_{III}$ は脆性破壊発生には殆ど寄与していないようである。したがって、ここでは $K_I$ 値についてのみ推定する方法について検討する。

周知のごとく重ね合せの原理により、 $K$ 値は電裂線上における電裂が存在しない状態で作用する応力分布を、電裂面に分布内圧として作用させることにより求めることができる。構造部材を伝播する電裂は一般的には曲がったものとなるが、簡単化のため $K$ 値を求めるに際し、そのガス長と同じ長さを有する直線電裂におきかえる。すなわち、曲がった電裂面に作用するせん断応力が $K_I$ 値に与える影響を無視し、曲がった電裂に対してはその電裂のガス長と同じ長さを有する直線電裂と仮想し、電裂のない状態で作用している電裂線上の法線応力分布（一般には主応力）を、直線仮想電裂面に内圧分布として作用させることにより $K$ 値を推定する。

さらに自由縁から入る電裂は、一般的には、自由表面に対して直角に伝播しないが、図A6-1のように自由表面に直角に直線

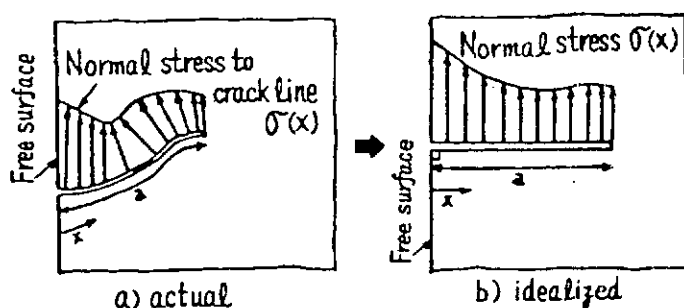
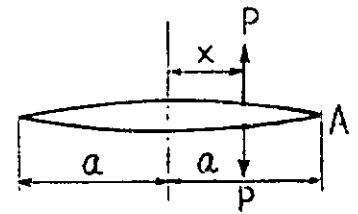


図 A6-1

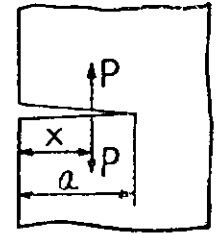
的に伝播したものと仮想してK値を求める。無限板中に長さ  $2a$  の亀裂が存在し、図A6-2に示す位置に集中荷重  $P$  が作用する場合、点AにおけるK値<sup>A4)</sup>は次式で与えられる。



図A6-2

$$K = \frac{P}{\sqrt{\pi a}} \sqrt{\frac{a+x}{a-x}} \quad \text{----- (A6-1)}$$

また、図A6-3に示すように半無限板の縁亀裂に集中荷重  $P$  が作用する場合のK値<sup>A4)</sup>は、



図A6-3

$$K = 2P \sqrt{\frac{1}{\pi a(1-\xi^2)}} \left[ 1 + (1-\xi^2)(0.2945 - 0.3912\xi^2 + 0.7685\xi^4 - 0.9942\xi^6 + 0.5094\xi^8) \right] \quad \text{----- (A6-2)}$$

$$= Pf(a, \xi)$$

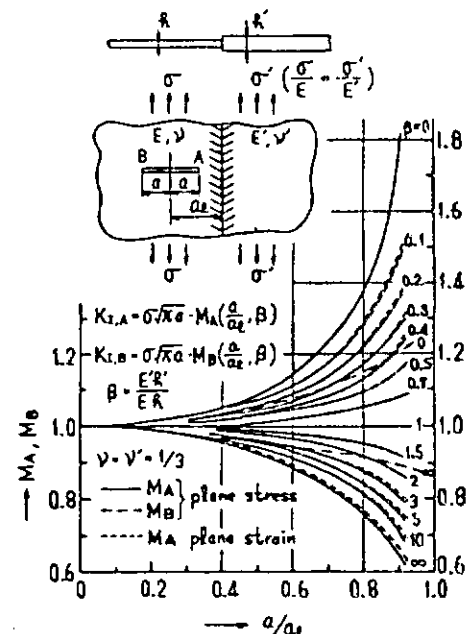
ただし、 $\xi = x/a$

と与えられる。したがって、(A6-1)式あるいは(A6-2)式の  $P$  に法線方向応力分布  $\sigma(x)dx$  を代入し、 $0 \sim a$  (あるいは  $-a \sim a$ ) まで積分することにより、無限板あるいは半無限板中のK値が得られる。船殻構造では、一般的にはこれら亀裂の前方には直交交差部材が存在する。図A6-4は厚さの異なる板材の接合部に近接するK値について解かれた結果<sup>A4)</sup>である。船殻の直交

交差部材の幅 ( $b'$ ) は平板の板厚  $b$  に比して十分大であるから、図中の  $\beta$  を  $\infty$  とし、A点の修正係数  $M_A$  を求め、上記のようにして求めたK値に  $M_A$  を乗ずることによりK値を推定する。なお、この  $M_A$  を多項式近似すると

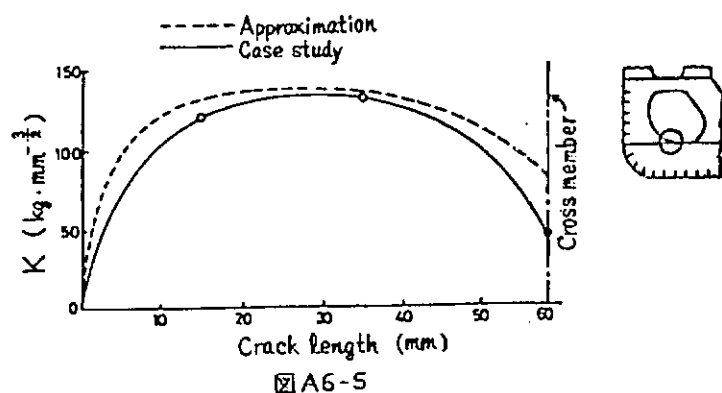
$$M_A = -0.58(a/a_2)^2 + 0.14(a/a_2) + 1 \quad \text{----- (A6-3)}$$

ただし、 $a_2$  : 直交交差部材に達したときの亀裂のガス長



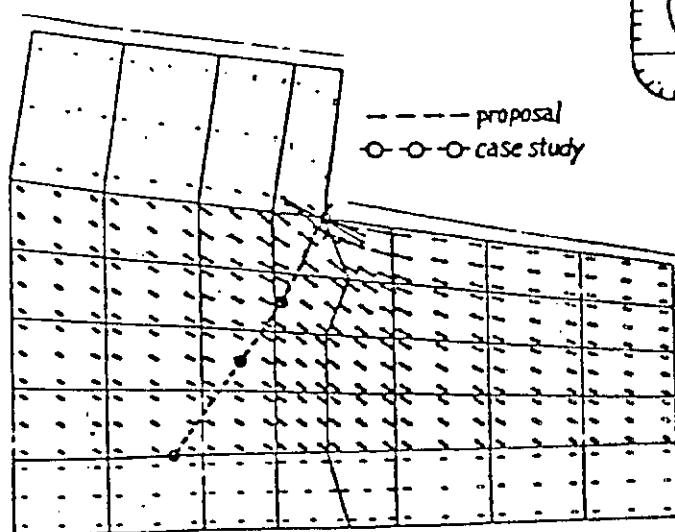
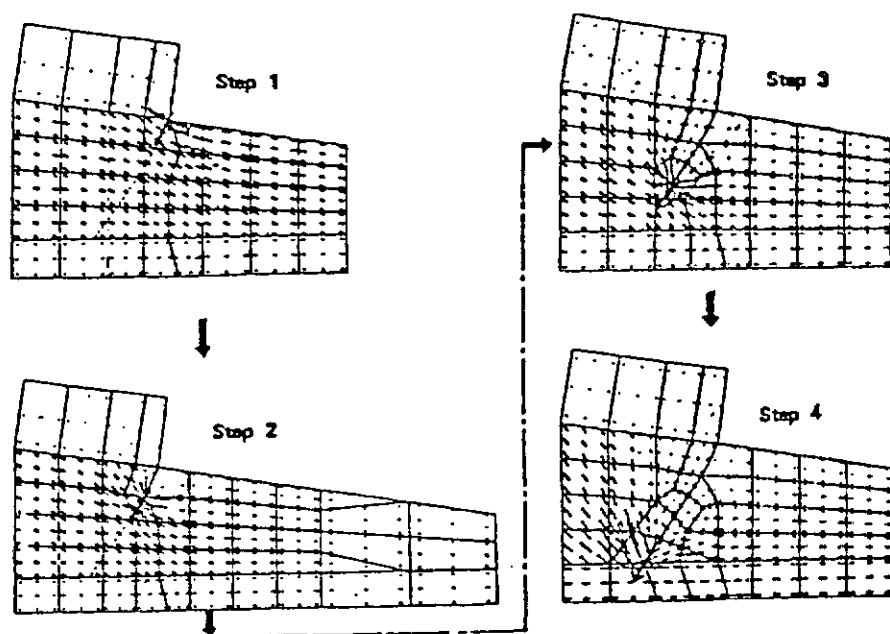
図A6-4

上記のようにして得られる自由縁からの亀裂のK値は、(6.36), (6.37)式に示すようになる。図A6-5は、図A6-6に示す棚板構造のcase studyで、アイソメトリック要素を用いた有限要素法でK値を求めた結果であり、図中には亀裂が存在しない状態で得られた亀裂予想径路線上の主応力分布を(6.36)式に代入して得た



K値の簡易推定結果も点線で示してある。上述のように大胆な仮定から推定したK値は、当然有限要素法により亀裂のK値を求めた結果とは一致はしないものの、あまり大きな誤差は与えなく、実用上は十分有効なK値を推定するものと期待できる。

ところで亀裂予想径路上の法線応力分布は多項式近似した方がK値推定



図A6-6

にとって便利であるので、法線方向応力分布を次式に示す。

$$\sigma(x) = \sum_{n=0}^4 C_n x^n \quad \text{----- (A6-4)}$$

ただし、 $x$ ：電裂発生点から電裂伝播経路に沿う長さ  
いま電裂が縁から発生・伝播したと考え、電裂伝播予想経路に沿う法線方向応力分布が

$$\left. \begin{array}{l} 0 \leq x \leq a_l \text{ で } \sigma_1(x) = \sum_{n=0}^4 C_n x^n \\ a_l < x \leq a \text{ で } \sigma_2(x) = \sum_{n=0}^4 C_n^* x^n \end{array} \right\} \quad \text{----- (A6-5)}$$

となったとする。この場合の $K$ 値は(A6-2)式より

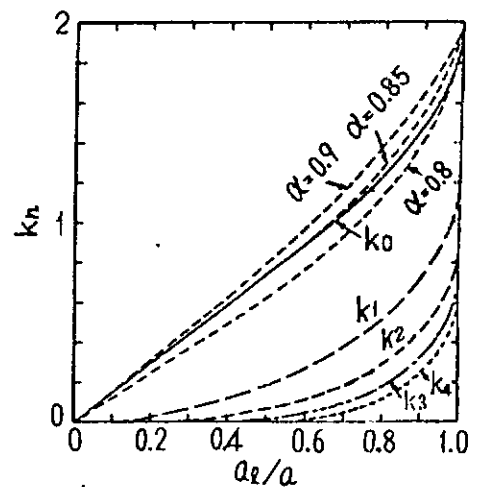
$$\begin{aligned} K &= \int_0^{a_l} \sigma_1(x) f(a, \xi) dx + \int_{a_l}^a \sigma_2(x) f(a, \xi) dx \\ &= \sum_{n=0}^4 (k_n C_n + k_n^* C_n^*) a^{n+1} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \quad \text{----- (A6-6)} \end{aligned}$$

ただし、 $\xi = x/a$

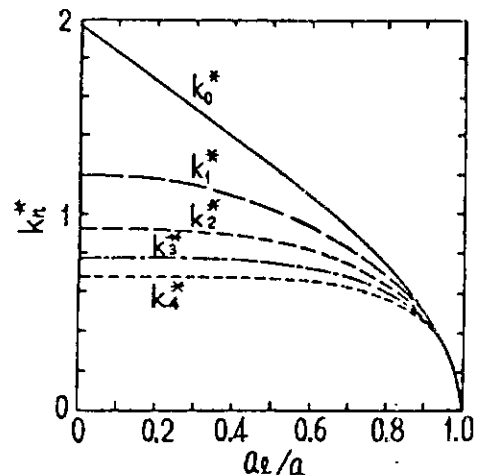
であり、 $k_n, k_n^*$ は

$$\begin{aligned} k_n, k_n^* &= D_1 + D_2 \sin^{-1} \xi \\ &\quad + \sum_{i=0}^3 E_i \xi^i (1 - \xi^2)^{\frac{1}{2}} \\ &\quad + \sum_{j=0}^{11} F_j \xi^j (1 - \xi^2)^{\frac{3}{2}} \end{aligned} \quad \text{----- (A6-7)}$$

で与えられ、上式の各係数を表6.1に示した。 $k_n, k_n^*$ の値を図示すると図A6-7のようになる。ここで  $0 \leq x \leq a_l$  における応力分布が  $a_l$  より大きな電裂に対して、 $K$ 値に与える影響を一点の集中荷重で代表させることを考える。すなわち、(A6-2)式と(A6-6)式より



(a)  $k_n$



(b)  $k_n^*$

図 A6-7

$$2P \sqrt{\frac{1}{\pi a (1-\xi^2)}} \left[ 1 + (1-\xi^2)(0.2945 - 0.3912\xi^2 + 0.7685\xi^4 - 0.9942\xi^6 + 0.5094\xi^8) \right]$$

$$= \sum_{n=0}^4 k_n C_n \cdot a^{n+1} / \sqrt{\pi a} \quad \text{----- (A6-8)}$$

ただし,  $\xi = x/a$

$x$ : 仮想的に集中荷重  $P$  を働かせる位置

で与えられる。

いま  $\sigma_1(x)$  は,  $a_2$  近傍ではなめらかな分布をしていると仮定する。K 値への集中荷重への寄与は, 亀裂先端に近い程大きいので, 一点の集中荷重で  $0 \leq x \leq a_2$  の応力分布が K 値に与える効果を代表するようにするには, (A6-8) 式の右辺の第 1 項のみを考えればよい。また, この場合仮想的に与える集中荷重  $P$  は,  $0 \sim a_2$  間における分布応力を代表するパラメータであるから,

$$P = \sigma_e a_2 \quad \text{----- (A6-9)}$$

ただし,  $\sigma_e$ : 等価応力

したがって (A6-8) 式は

$$2\sigma_e \sqrt{\frac{a\beta^2}{\pi(1-\alpha^2\beta^2)}} \left[ 1 + (1-\alpha^2\beta^2)(0.2945 - 0.3912\alpha^2\beta^2 + 0.7685\alpha^4\beta^4 - 0.9942\alpha^6\beta^6 + 0.5094\alpha^8\beta^8) \right]$$

$$= k_0 C_0 \sqrt{\frac{a}{\pi}} \quad \text{----- (A6-10)}$$

ただし,  $\alpha\beta = x/a$ ,  $\beta = a_2/a$ ,  $\alpha = x/a_2$

(A6-10) 式の左辺が  $a=a_2$  のときの K 値となるように  $\sigma_e$  を与え,  $\alpha$  に適当な値を与えて (A6-10) 式右辺の  $k_0$  値が, (A6-7) 式の  $k_0$  値と同程度になるように操作する。その結果

$$\alpha = x/a_2 = 0.85 \quad \text{----- (A6-11)}$$

とすれば, 図 A6-7 (a) に示すように両者で比較的良好一致が得られた。

したがって,  $a=a_2$  における K 値を  $K_{a_2}$  とすれば,  $\alpha=0.85$ ,  $\beta=1$  のとき (A6-10) 式の左辺が  $K_{a_2}$  となることから,  $\sigma_e$  は

$$\sigma_e = 0.445 \sqrt{a_2} \cdot K_{a_2} \quad \text{----- (A6-12)}$$

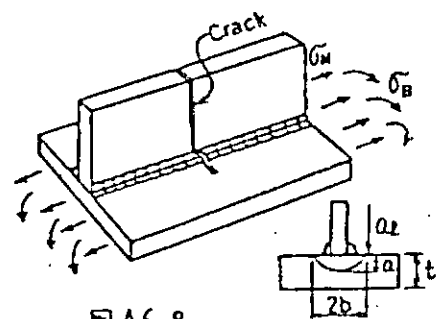
となる。

したがって、 $0 \leq x \leq a_e$ における応力分布が亀裂(亀裂長 $a > a_e$ )のK値に寄与する量 $K_p$ は、

$$K_p = 0.89 K_{a0} \sqrt{\frac{a_e}{\pi a (1 - \xi_1^2)}} \left[ 1 + (1 - \xi_1^2) (0.2945 - 0.3912 \xi_1^2 + 0.7685 \xi_1^4 - 0.9942 \xi_1^6 + 0.5094 \xi_1^8) \right] \quad \text{----- (A6-13)}$$

ただし、 $\xi_1 = 0.85 a_e/a$

一般に直交交差部材へ向かう亀裂伝播経路に沿う法線方向応力は、直交交差部材近傍ではなめらかな分布を示すから、上記の原理を使用すれば、後の亀裂のK値を推定するのに都合が良い。したがって、本章においてはこの結果を適用する。また、直交交差部材に伝播した表面欠陥状の亀裂(図A6-8参照)に対するK値は、現在のところ解析的にあるいは有限要素法などによって求められた結果は存在しないが、上記結果を使用すれば、近似的に以下のようにK値を推定できる。



図A6-8

すなわち(A6-13)式を使用して、

$$K = K_p + (\sigma_M + H_2 \sigma_B) \sqrt{\pi \frac{a}{Q}} F \quad \text{----- (A6-14)}$$

ただし、(A6-13)式の $a$ は $a_e + a$ とする。また(A6-14)式の第2項は、平板の表面欠陥のK値を表わす。(A6-14)式の具体的な結果は(6.55)式、(6.46)式に示す。

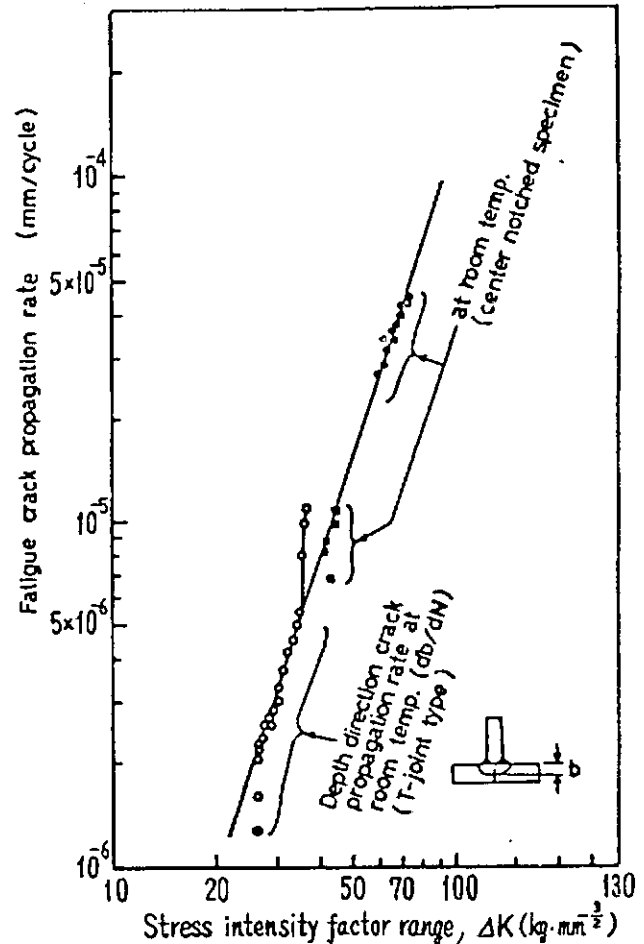
そこで、図A6-9に示すT継手を作成した。供試材は表A6-1に示したものであり、平板には表A6-2に示す条件でエレクトロスラグ溶接をしてある。そしてスチフナは、図A6-9(b)に示すように、このエレクトロスラグ溶接のボンド部に面タッチするように2枚のスチフナを配し、完全溶込みのT継手溶接が表A6-3に示す条件で溶接されてある。また図A6-9(b)の平板部と同じ継手から、図A6-9(a)に示したボンド部に貫通切欠きを配した中央貫通切欠付平板引張試験片も採取した。



ここで平板部にエレクトロスラグ溶接継手を配したのは、他の目的の試験（疲労亀裂伝播中の brittle step の発生挙動の調査）も合わせて行なったためであり、その結果はここでの目的とは異なるため言及しない。そして両者につきエレクトロスラグ溶接ボンド部における疲労亀裂伝播試験を完全片振の条件下で行なった。実験結果を図A6-10に示す。

ここで、図A6-9(b)の試験片に対しては、Irwinの tangent formula により  $K$  値を求め、図A6-9(a)の試験片に対しては (A6-14) 式 [具体的には (6.55) 式, (6.46) 式] で最深部の  $K$  値を求めた。なお深さ方向の亀裂伝播速度はビッチマークの計測結果と、板表面における亀裂長さとサイクル数の関係より、深さとサイクル数の関係を求め、求めたものである。本結果は、T継手表面亀裂の  $\Delta K$  値と亀裂伝播速度の関係が、平板貫通切欠試験でのそれらの関係とほぼ一致しており、このことより (A6-14) 式の妥当性がほぼ確認できた。

これらの関係を使用して 6.8 節の  $K$  値が導かれている。



図A6-10

## 参考文献

- A1) 樋口, 川原, 近藤, 栗原, 2次元き裂の進展シミュレーション, 日本造船学会論文集第139号(昭.51.6), p.221
- A2) 上田, 池田, 矢尾, 青木, 吉江, 白倉, 二方向荷重下での脆性破壊発生特性, 日本造船学会論文集第139号(昭.51.6), p.240
- A3) 酒井, 阪野, 混合モード状態における脆性破壊発生に関する考察, 日本造船学会論文集第139号(昭.51.6), p.257
- A4) 石田, き裂の弾性解析と応力拡大係数, 培風館(1976)

## 7. 破壊力学の応用例

### 7.1 60型タンカーの横強度部材・局部強度部材の疲労強度の検討

#### 7.1.1 緒言

タンカーの横強度部材・局部強度部材寸法は、想定した最大荷重下で生じる応力の最大値が、材料の引張強度または座屈強度に対して許容範囲であることを確認した上で決められる。

実際の設計では、局部部材不連続部での応力集中係数を小さくするような部材形状の選択という点で、間接的に疲労強度に対する配慮がなされているが、疲労損傷の破壊形態に合った疲労強度の検討は、通常行なわれない。

しかし、実際の損傷の多くは、波浪荷重などの繰返し荷重による疲労亀裂である。

したがって、実際に起り得る損傷破壊モードに対する安全率を考慮して設計する方が、より合理的であると思われる。

本研究では、破壊力学を応用して、最近の設計船である60型タンカーの代表的なトランスリングについて疲労亀裂伝播解析を試み、従来の設計基準との対比を行なう。

#### 7.1.2 解析方法

解析対象船の主要寸法は、垂線間長：227m、型幅：32.2m、型深さ：19.4m、満載吃水：12.5m、積載重量：65,550tである。

船倉平行部の典型的なトランスリングを取り出し、図7.1.1に示す。

本研究で行なったトランスリングの疲労破壊解析の手順を図7.1.2に示す。

この解析の手順は、基本的には各種モデル化に基づく破壊力学解析の手順に従うが、実際の船体構造部材の適用に際しては、若干の修正を加えた。

先ず、基準荷重条件下で最大荷重と最小荷重を設定し、その差が変動範囲であると考ええる。亀裂なしモデルの応力解析結果より得られる応力値より、応力範囲を次式で与える。

$$\Delta\sigma = |\sigma_{\max.} - \sigma_{\min.}| \text{ ----- (7.1.1)}$$

ここに、 $\sigma_{\max.}$ ：最大荷重条件下の応力

$\sigma_{\min.}$ ：最小荷重条件下の応力

(7.1.1) 式の  $\Delta\sigma$  に対応する応力拡大係数範囲を  $\Delta K$  とすると、パリス則を想定き裂伝播経路に沿って積分することにより、次式の関係が得られる。

$$N_f \cdot \alpha^m = \int_{a_0}^{a_i} \frac{da}{C(\Delta K)^m} \quad \text{--- (7.1.2)}$$

ここに、 $\alpha$  ; 基準荷重に対する倍率 (破壊応力係数)

$N_f$  ; き裂長さ  $(a_i - a_0)$  の伝播に要する寿命

累積頻度分布を考慮し、等価繰返し数から実際の繰返し数に変換する。

$\Delta K$  ; 基準荷重下での  $K$  値範囲

$C, m$  ; 材料定数 ( $m = 3.2$ ,  $C = 1.18 \times 10^{-10}$ )

$a_0$  ; 初期き裂長さ ( $a_0 = 0.5 \text{ mm}$ )

トランスリングの各部について、(7.1.2) 式の計算を行なうことにより、それぞれについて、繰返し数  $N_f$ 、破壊応力係数  $\alpha$  および疲労き裂長さ  $a_i$  の関係が求まる。

この破壊応力係数  $\alpha$  の意味は、基準荷重条件下での応力の  $\alpha$  倍の応力が  $N_f$  回繰返したときに、き裂は初期き裂  $a_0$  から特定のき裂長さ  $a_i$  まで進展するということである。

従って、 $N_f$ ,  $a_0$ ,  $a_i$  を設定すれば、 $\alpha$  は基準応力  $\Delta\sigma$  に対する疲労強度上の安全率と考えられる。

### 7.1.3. 応力解析

本解析では、船体構造部材の  $K$  値を求めるのが重要な部分をしめている。

本委員会等の研究成果より、 $K$  値の線形重ね合わせの原理を適用すれば、き裂なしの計算モデルによる応力分布より、実用上の精度を保って、 $K$  値が求まることが分かっている。そこで、ここでは  $K$  値計算のための基準データとして、き裂なしモデルの応力解析を実施する。

#### 1) 荷重条件

タンカーの横強度部材の波浪荷重による変動応力を合理的に求めるには、いわゆるトータルシステムによるなければならない。

しかし、トータルシステムによる解析は費用が高つくことと、本研究の目的から、設計的な

立場から或る基準の荷重条件を設定しなければならないことのために、以下に示す簡単な荷重条件を仮定した。

積付条件は図7.1.3に示すように、Full load conditionとHeavy ballast conditionの2状態を考え、計算対象トランスは① (Fr.72)とする。

波浪変動圧は、NK検査要領に従い、図7.1.4に示すような最大荷重と最小荷重を設定し、変動分は両者の差であると考ええる。

## 2) 解析結果

供試船のトランスリングは図7.1.1に示すようにクロスタイ1条の横桁方式であるので、トランスリングの強度に与える船の長さ方向の影響は側外板と縦通隔壁の縦部材のみにより伝達されると考え、次の手順により、トランスリングの横強度・応力解析と局部部材の応力解析を行った。

### a) 船倉部の立体骨組解析

本解析はトランスリングの平面F.E.M.解析に対する側外板と縦通隔壁位置での上下方向の境界力(剪断力)を求めるために行おう。

トランスリングの桁材、横置隔壁の水平桁および縦強度部材を梁断面梁でモデル化し、荷重条件での吃水は静水圧±波浪変動圧に相当するものとし、タンク液圧は静水圧のみで計算した。

### b) トランスリングの平面F.E.M.解析

Fr.72をトランスリングの代表と考え、各荷重条件に対する平面F.E.M.解析を行った。この場合の境界力はa)で計算された縦部材の剪断力であり、側外板と縦通隔壁位置に分布荷重として入れる。

トランスリングのウェブプレートは膜要素でモデル化し、外板、フェイスプレートおよび主要なウェブスチフナーは棒要素でモデル化した。

主な計算結果は、フェイスプレートの実合板溶接継手部または平板の表面欠陥より進展するき裂の解析に使用する。

また、トランスリングのトウ部、開孔部、ウェブスチフナーについては、実際の構造通りに

モデル化して行ったために、主要な部分についての詳細なF.E.M.応力解析モデルのブリーディング用の境界値も得る。

Full load condition の変動範囲について計算した結果の主応力分布図と棒要素の直応力図を図7.1.5, 図7.1.6に示す。

これらの図で、黒丸印がき裂発生の想定点で、主応力分布図でその黒丸に続く実線が主応力の直角方向にき裂は進展するとして描いたき裂伝播経路である。

き裂伝播経路はFull load conditionとHeavy ballast conditionとで大幅の差はなく、構造部材形式に依存して決まっている。

#### c) ボットムトランスのブラケットトウ部

実際の損傷もあり、損傷事故の重要度も高いボットムトランスのブラケットトウ部を詳細に応力解析する。

本計算モデルの要素分割図を図7.1.7に示す。

この図より分かるようにかなり細かく分割してあるので、不連続部の応力集中は計算されていると思われる。

なお、デッキトランスのブラケットトウ部は、a) のトランスリングの平面F.E.M.解析結果より、両荷重ケース共に他の部分に比較して低い応力しか発生しているもので、ここではとり上げなかった。

Full load condition の変動範囲について計算した結果の主応力分布図と棒要素の直応力図を図7.1.8, 図7.1.9に示す。

これらの応力分布図は、図7.1.7に指示した部分について描いてあり、き裂発生点、き裂伝播経路も記入した。

#### d) 縦通隔壁下部ミヌ部

本船はオイルパイプ貫通のために、センターボットムトランスのウェブ深さは低く、ブラケット部にも開孔しを設けている構造にしてあり、開孔部からのき裂、開板部からのき裂損傷が気になる。

従って、縦通隔壁下部ミヌ部のオイルパイプ開孔しとウェブスナップを実際の

構造通りにモデル化して、それらのき裂破壊強度に対する検討を行なうために詳細応力解析を行なう。

Full load condition の変動範囲について計算した結果の主応力分布図と棒要素の直応力図を図7.1.10, 図7.1.11 に示す。

パイプ開孔部と補板部に注目すると、黒丸印の C1 ~ C4 で応力値が大きくなっている。

#### 7.1.4 破壊強度解析

図7.1.14 に 2 次元破壊強度解析を行なった個所を図示するが、これらの構造上、次の3種類に分けられる。

##### 1) 補板の面材から進展するき裂

トランスリングの面材は主要部材であるが、コーナー部などに比較的大きな応力が発生する。トランスリングの平面 F.E.M. 解析の結果より、相対的に大きな応力が発生している個所と梁合わせ継手部とをき裂発生点とし、き裂伝播解析を行なった。

このき裂の伝播過程と K 値を図7.1.12 に示す。

平板中の表面き裂の K 値は J.C. Newman の三次元 F.E.M. 解析に基づき近似式を使用した。梁合わせ溶接継手部の K 値は溶接ビードによる応力集中の影響を図7.1.13 に示す 2 次元平面 F.E.M. 解析より求めた応力分布を用いて計算した値  $M_k$  を乗じて求めた。

Full load condition について、板厚が異なる場合の例として、図7.1.14 の BW7 での板厚方向の応力分布を示すと、図7.1.15 のようになる。

解析結果の例として、Full load condition での BW7 の応力拡大係数を図7.1.16 に、繰返し数  $N_f$  を指定した時のき裂長さと  $\alpha$  の関係を図7.1.17 に、 $\alpha$  を指定した時のき裂長さと繰返し数の関係を図7.1.18 に示す。

##### 2) 板端部から進展するき裂

ボットムトランスのブラケットトウ部のき裂は板端部より伝播する。

図7.1.8 に示す径路をき裂は伝播すると予想され、縦通隔壁との隅肉溶接部に達してから、主応力の方向からき裂は溶接ビードに沿うと考えられる。

K値は次式で計算する。

Step 1 縦通隔壁まで

$$K = M_p \cdot \sigma_0 \sum_{n=0}^4 k_n C_n a^n \sqrt{\pi a} \quad \text{----- (7.1.3)}$$

≧1=,  $C_n$ ; 応力分布を  $\sigma(x) = \sigma_0 \sum_{n=0}^4 C_n x^n$  で表わしたときの係数

$k_n$ ; 係数

$$M_p = -0.58(a/a_e)^2 + 0.14(a/a_e) + 1$$

Step 2 溶接ビードに沿うき裂

$$K = 2P \sqrt{\frac{1}{\pi a(1-\zeta_1^2)}} [1 + (1-\zeta_1^2)(0.2945 - 0.3912\zeta_1^2 + 0.7685\zeta_1^4 - 0.9942\zeta_1^6 + 0.5094\zeta_1^8)] + \sum_{n=0}^4 k_n^* C_n^* a^{n+1} \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \quad \text{----- (7.1.4)}$$

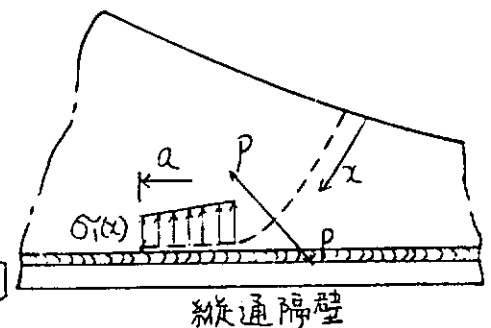
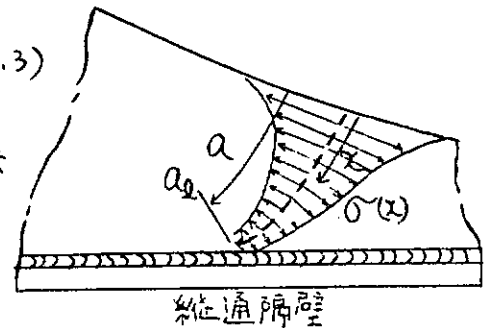
$$\Rightarrow 1=, \zeta_1 = 0.85 a_e / a$$

$$P = 0.445 \sqrt{a_e} \cdot K_{at} a = a_e$$

$a_e$ ; き裂径路に沿う縦通隔壁までの距離

$C_n^*$ ; 応力分布を  $\sigma_1(x) = \sum_{n=0}^4 C_n^* x^n$  で表わしたときの係数

$k_n^*$ ; 係数



解析結果の例として、Full load conditionで、A2の応力分布図を図7.1.19に、応力拡大係数を図7.1.20に、き裂長さとの関係を図7.1.21に、き裂長さとの繰返し数の関係を図7.1.22に示す。

### 3) 棚板継手から進展するき裂

図7.1.14に示すように、縦通隔壁下部は棚板構造となっており、これは Load carrying type の十字継手でモデル化できるので、次式に示す Frank による

K値を求め、溶接未溶着部のルートより隅肉ヒートが切断するまでの疲労破壊強度を計算した。

$$K = M \cdot \sigma \sqrt{\pi b}$$

$$M = \frac{\left\{ \sec(\pi/2) \right\}^{1/2}}{1 + 2r} [A_1 + A_2 \zeta]$$

----- (7.1.5)

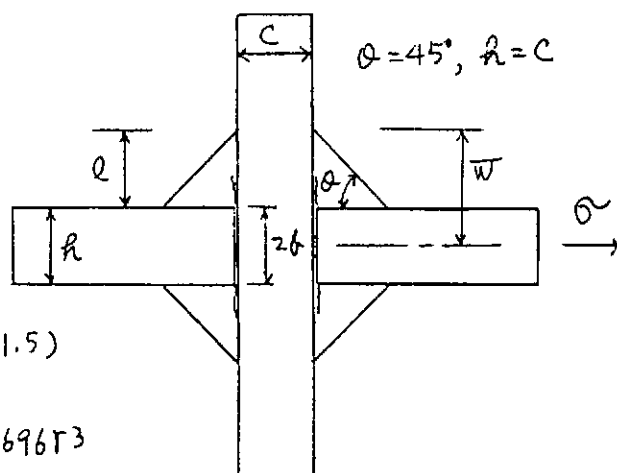
こゝに、

$$A_1 = 0.528 + 3.287r - 4.36r^2 + 3.696r^3 \\ - 1.874r^4 + 0.415r^5$$

$$A_2 = 0.218 + 2.717r - 10.171r^2 + 13.122r^3 - 7.755r^4 + 1.783r^5$$

$$r = l/R, \quad \zeta = b/w, \quad 2w = R + 2l$$

但し、本船では、 $l = 0.7R$  として計算した。



## 7.1.5 結言

破壊力学を応用した60型タンカーの横強度部材・局部強度部材の疲労破壊強度検討のまとめとして表7.1.1, 表7.1.2に、 $N_f = 10^8$ 回(20年)での各部材でき裂様式が変化ある境界点までのき裂長さでの破壊応力係数 $\alpha$ 、基準応力 $\sigma_y / \sigma_{max.}$ の値を示した。

また、図7.1.23, 図7.1.24には各部材でのき裂が面材の場合は面材が全断したとき、ブラケット部は板材に達したとき、棚板部は溶接ルートより隅肉ヒート厚が切断したときの破壊応力係数と延性破壊に対する判定値として、 $\sigma_y / \sigma_{max.}$ の値とを図示した。

通常、設計と評価値として使われる $\sigma_b$ (破壊応力)または $\sigma_y$ (降伏応力)に対する最大発生応力の比(こゝでは $\sigma_y / \sigma_{max.}$ を考えた。)と本解析で求めた破壊応力係数 $\alpha$ との相対的な比較を行なうことにより、本研究の結論を得ることが出来る。

$\sigma_y/\sigma_{max}$  と  $\alpha$  との評価値に差が生じる理由としては次のことが考えられる。

- i) 最大応力  $\sigma_{max}$  と応力範囲  $\Delta\sigma$  の関係は部材毎に異なる。
- ii)  $\sigma_y/\sigma_{max}$  はある点の最大応力値であるが、 $\alpha$  は部材の継手形式、部材形状、応力勾配の影響が考慮されている。

Full load condition では、 $\alpha$  が小さいのは、棚板部 C4、実合わせ継手の外板側の BW3, BW8 であるが、2 以下にはなっていない。

H. ballast condition では、ブラケットトウ部の A2 の  $\sigma_y/\sigma_{max}$  は 1.16 と小さいが、 $\alpha$  は  $a = 10\text{ mm}$  で 2.33、継通隔壁に達した時点で 3.9 と大きくなっている。

また、面材の非同板厚実合わせ継手は全 2、 $\alpha < \sigma_y/\sigma_{max}$  となっており、疲労強度上の評価の方が厳しくなっている。

面材部については、継手形式により、破壊応力がかなり異なることの影響が出ており、 $\Delta\sigma \times \alpha$  として求められる破壊応力で比較すると、平板の場合は約  $42 \text{ kgf/mm}^2$ 、同板厚実合わせ継手の場合は約  $30 \text{ kgf/mm}^2$ 、非同板厚実合わせ継手の場合は約  $24 \text{ kgf/mm}^2$  となっている。

従って、継手位置を決める際に、このようなことを考慮に入れれば、より合理的な設計が出来ると思われる。

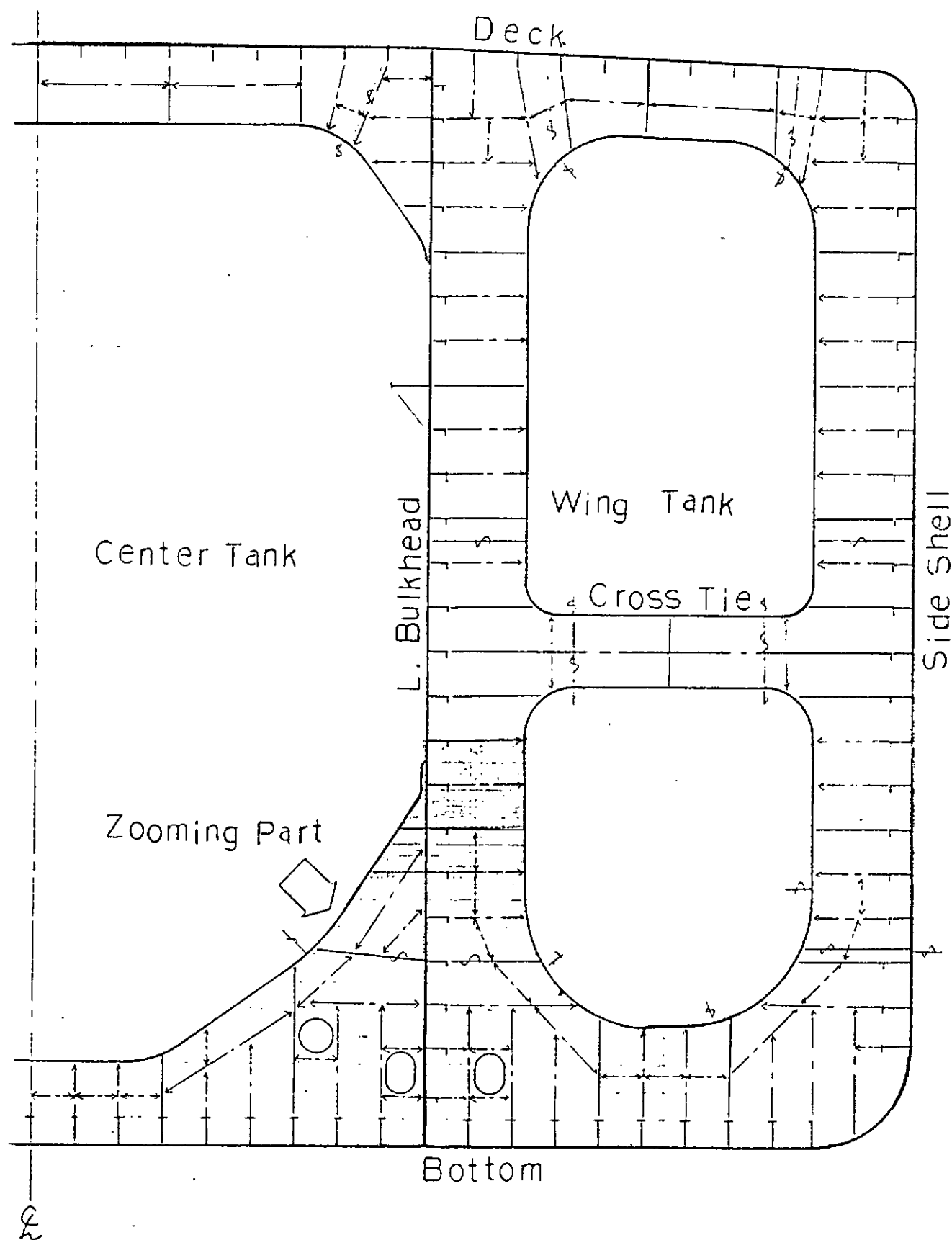


図7.1.1 60型タンカーのトランスリング

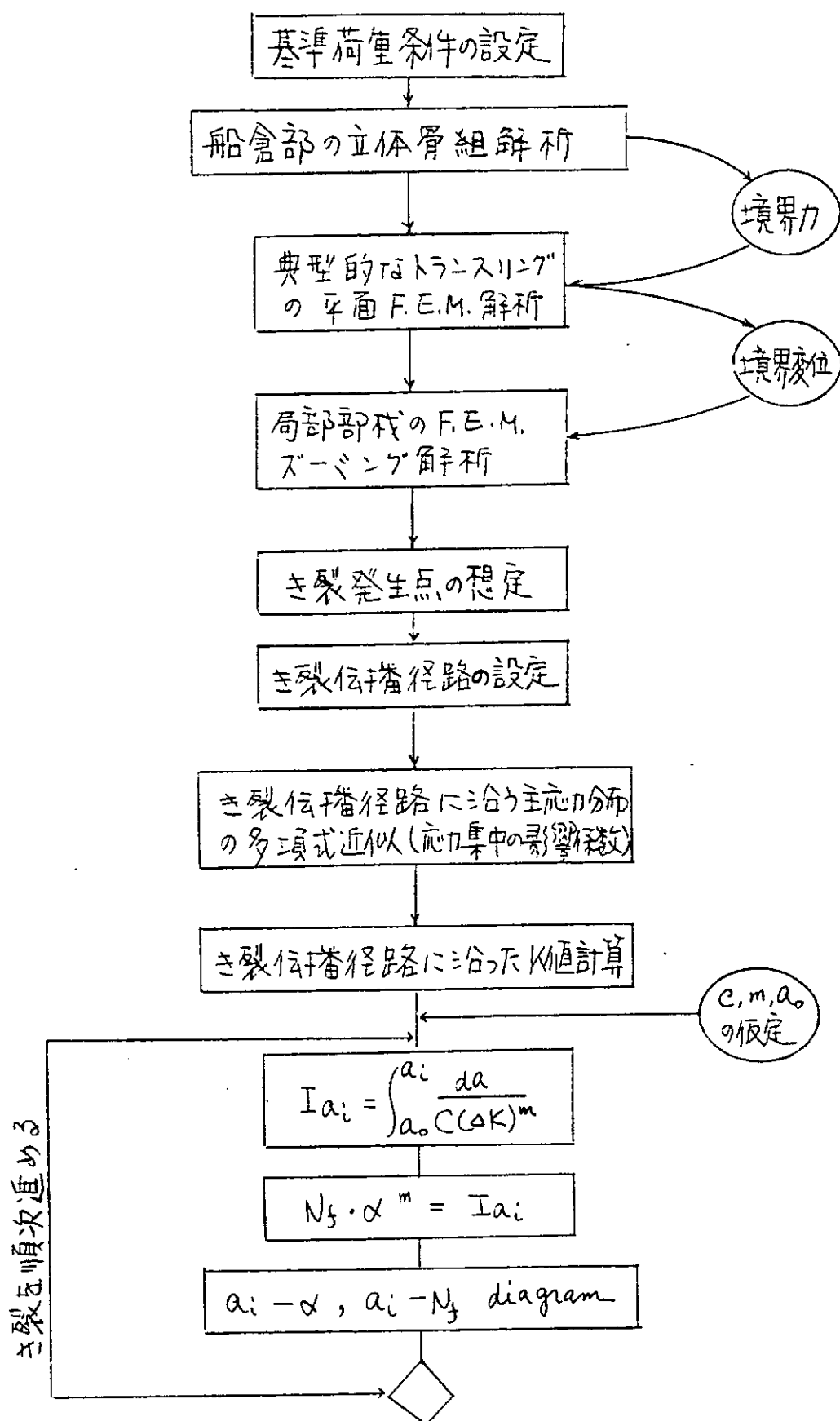
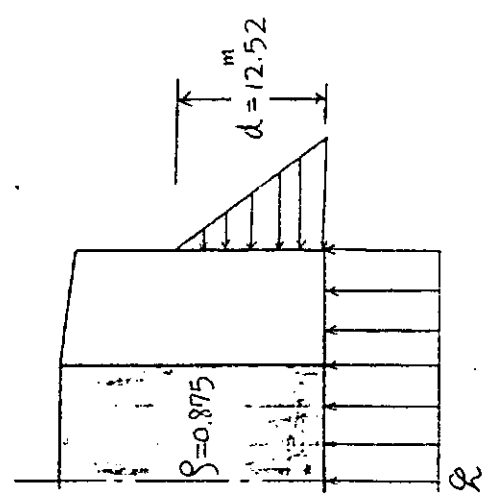
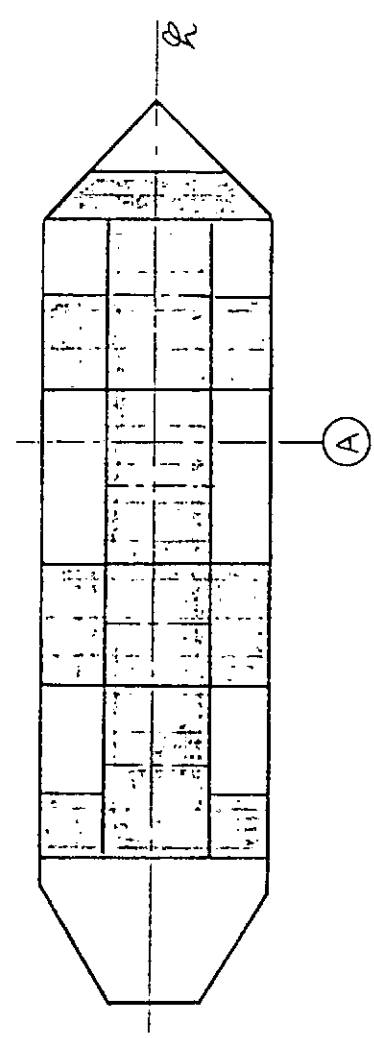


図 7.1.2 トランスリングの疲労破壊解析の手順

① 計算対象 TRANS. RING

FULL LOAD CONDITION



HEAVY BALLAST CONDITION

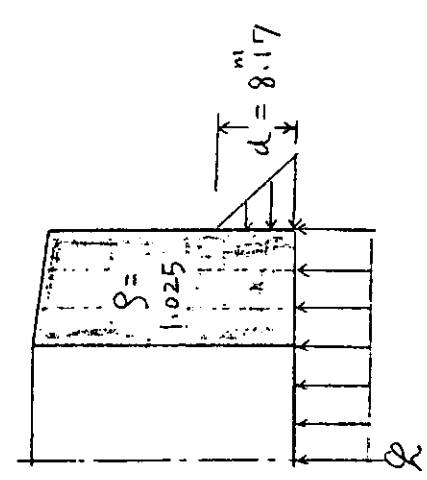
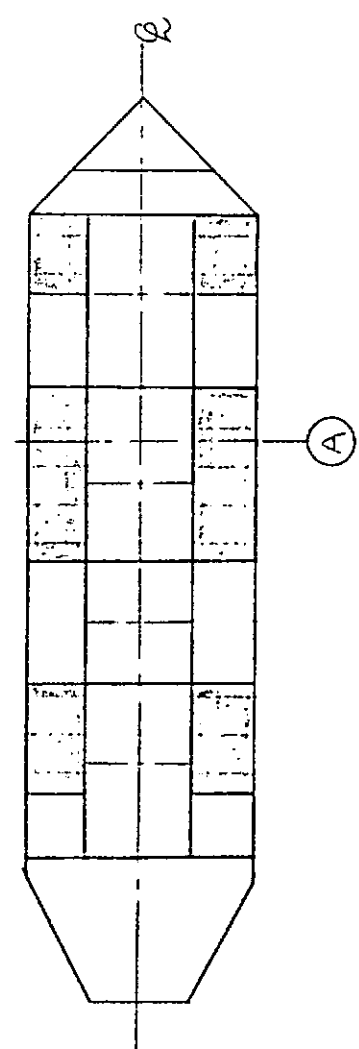
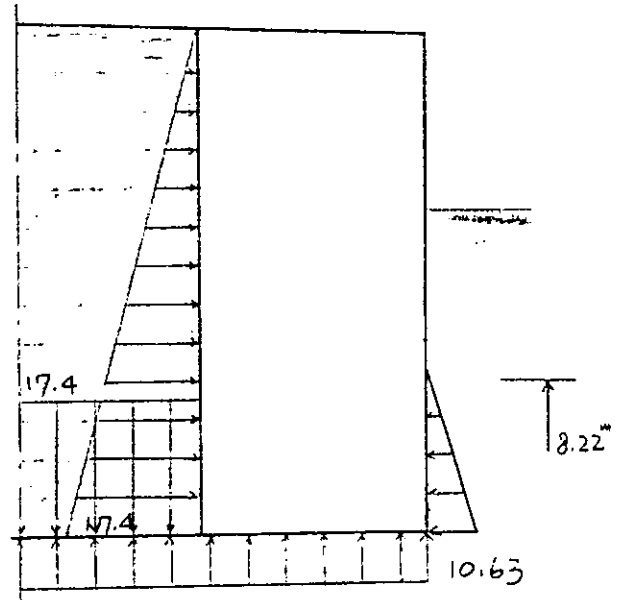
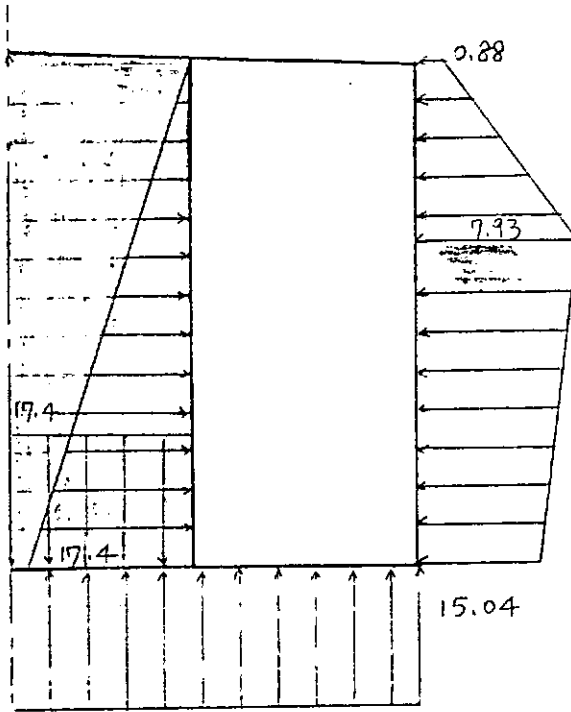


図7.1.3 積付条件

最大荷重

最小荷重

FULL LOAD COND<sup>n</sup>



单位;  $t/m^2$

H. BALLAST COND<sup>n</sup>

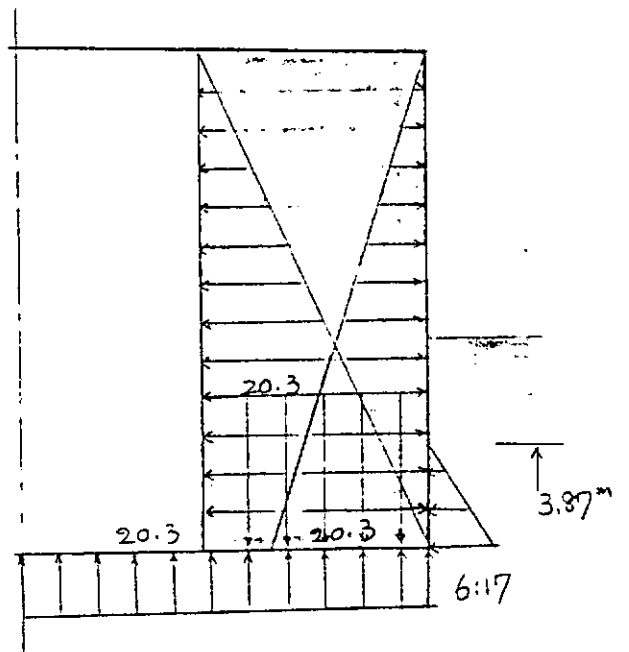
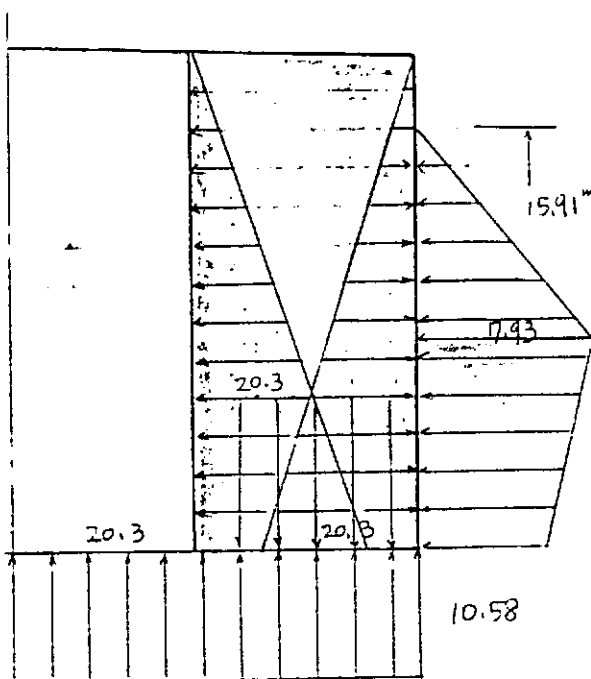


图 7.1.4 荷重条件

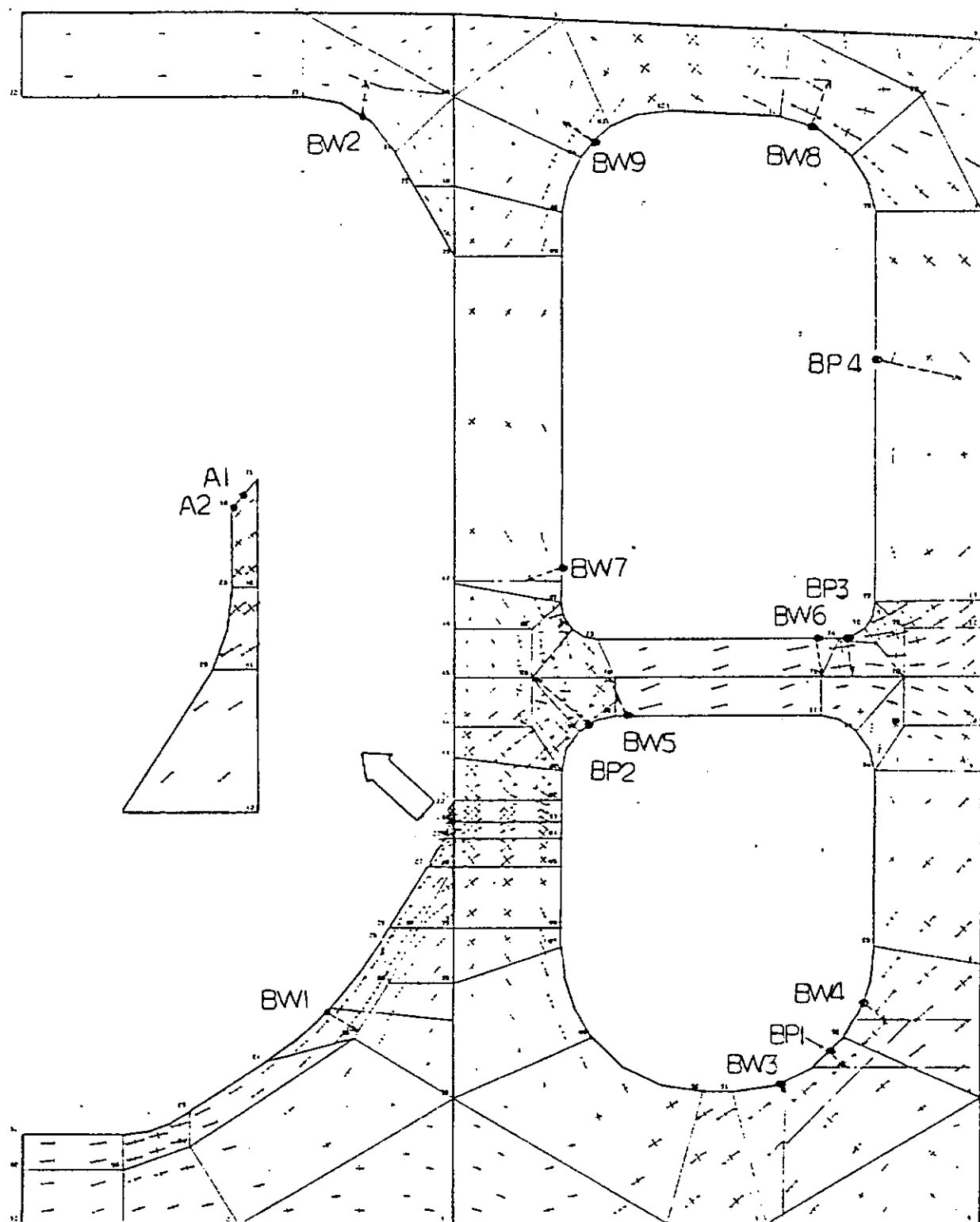
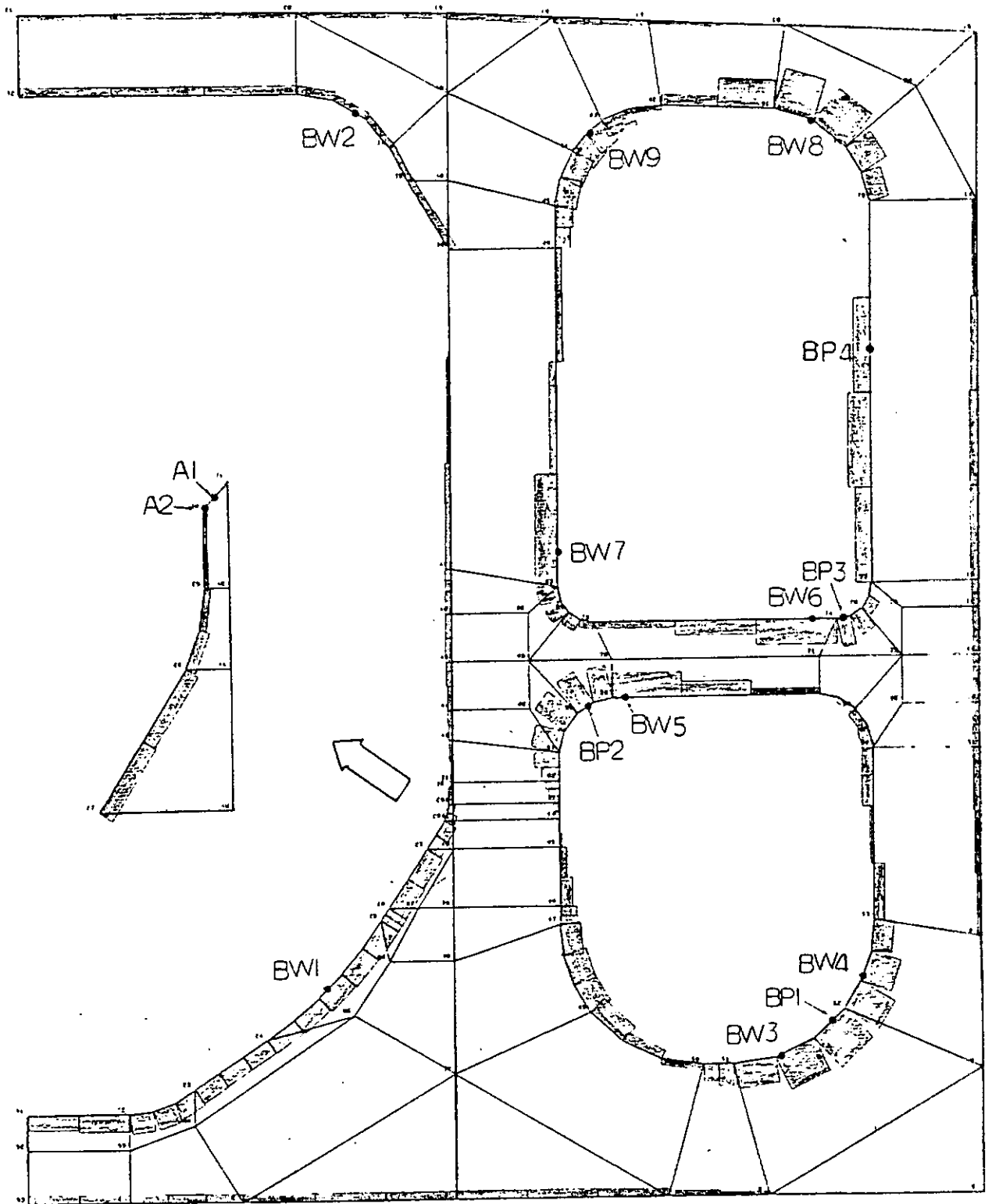


図 7.1.5 主応力分布図 (応力範囲)



Full load

STRESS  $10\text{kg/mm}^2$

图7.1.6 直应力分布图 (应力范围)

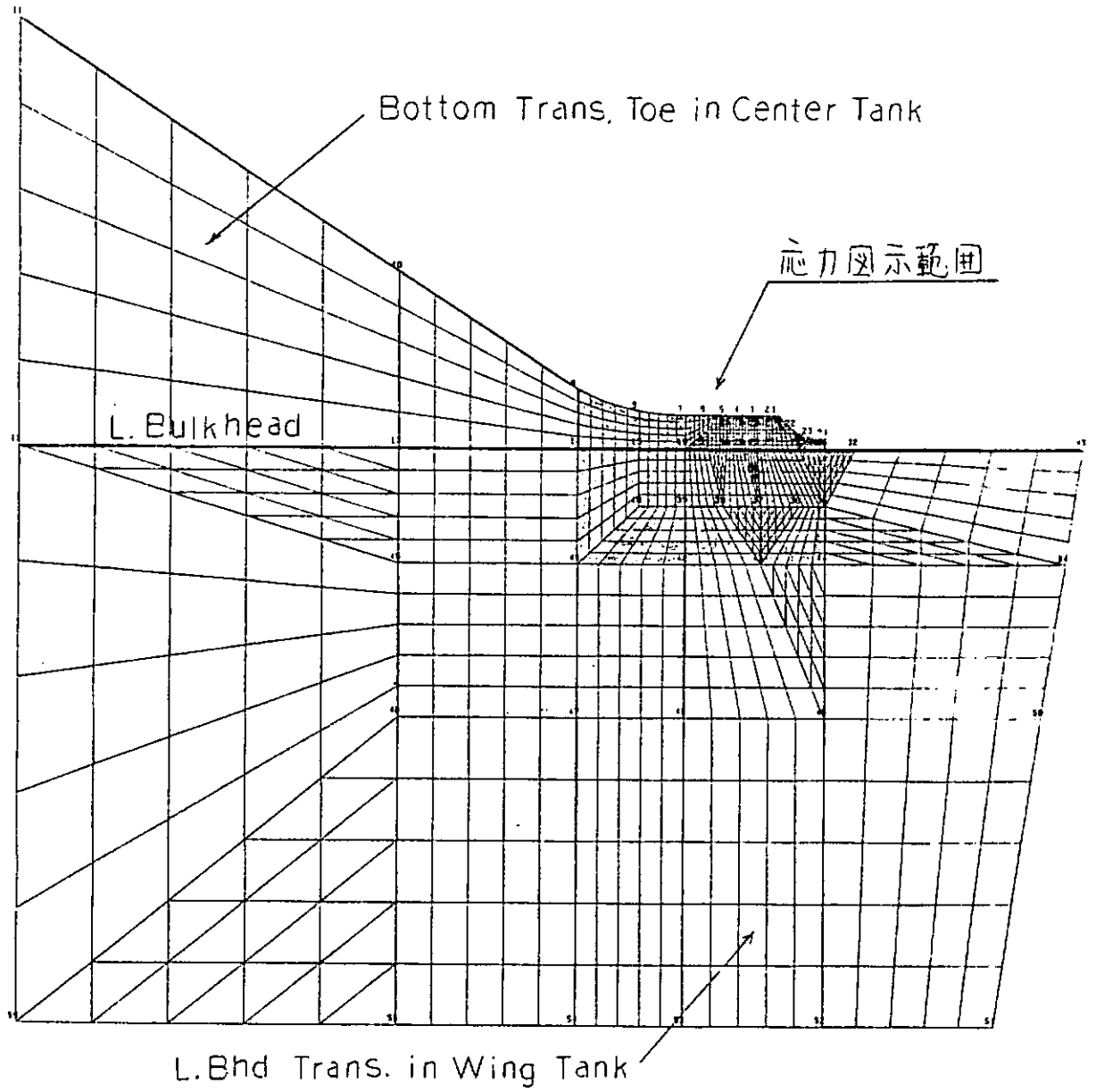
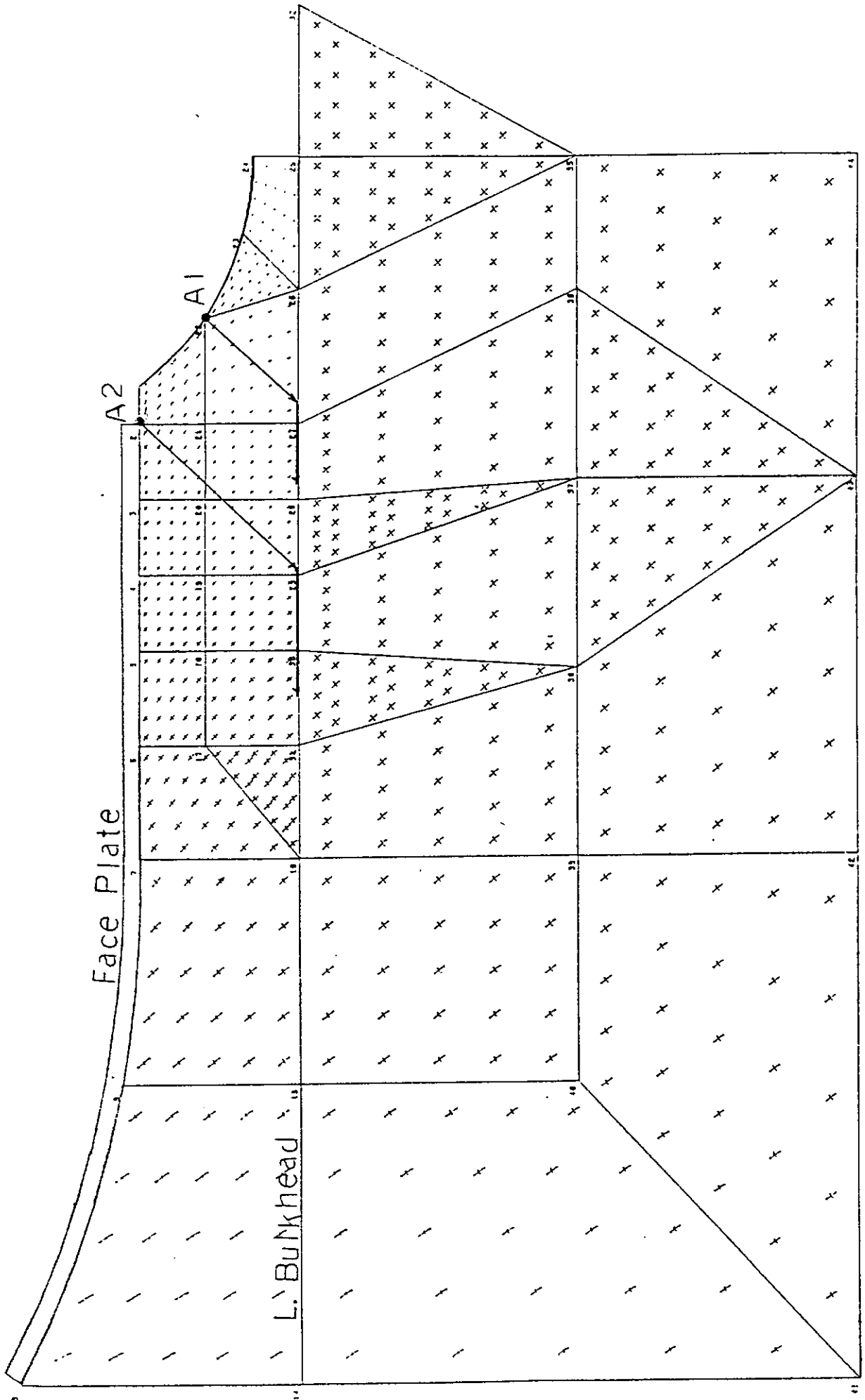


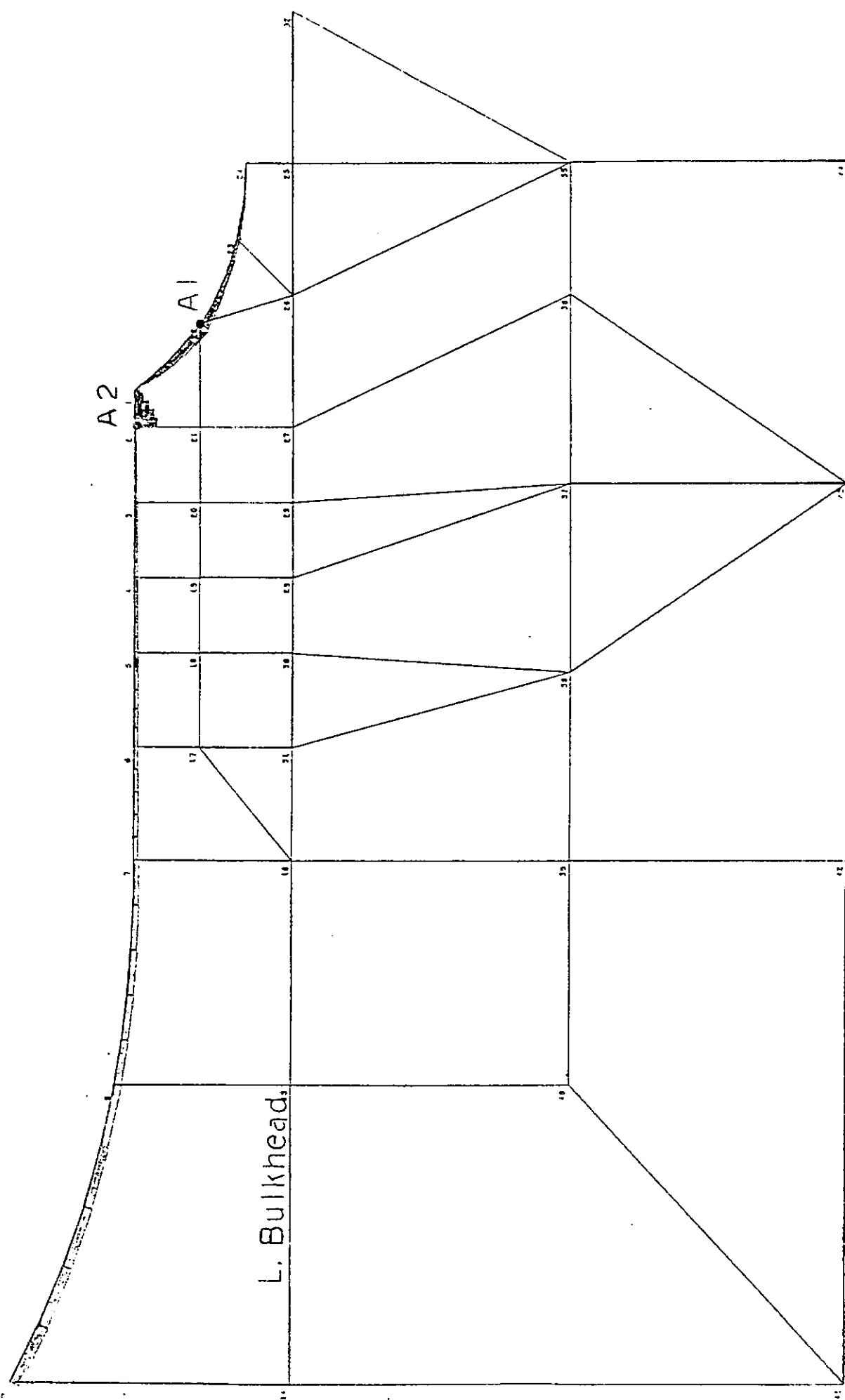
図7.1.7 ボットムトランスブラケットトウ部 要素分割図



Full load

図7.1.8 主応力分布図 (応力範囲)

STRESS : 200kg/mm<sup>2</sup>



Full load

図7.1.9 直応力分布図(応力範囲)

STRESS:  $20.0 \text{ kg/mm}^2$

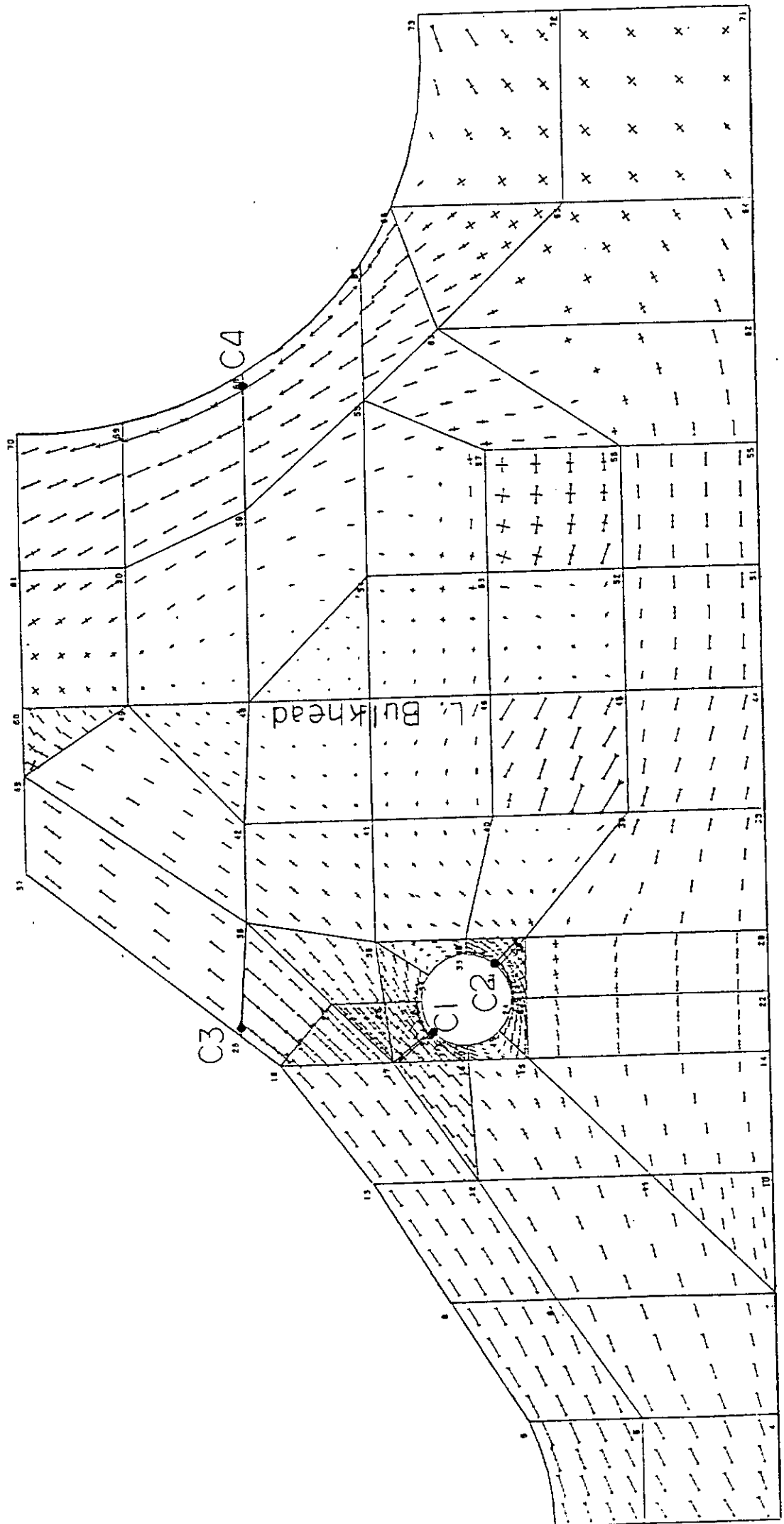
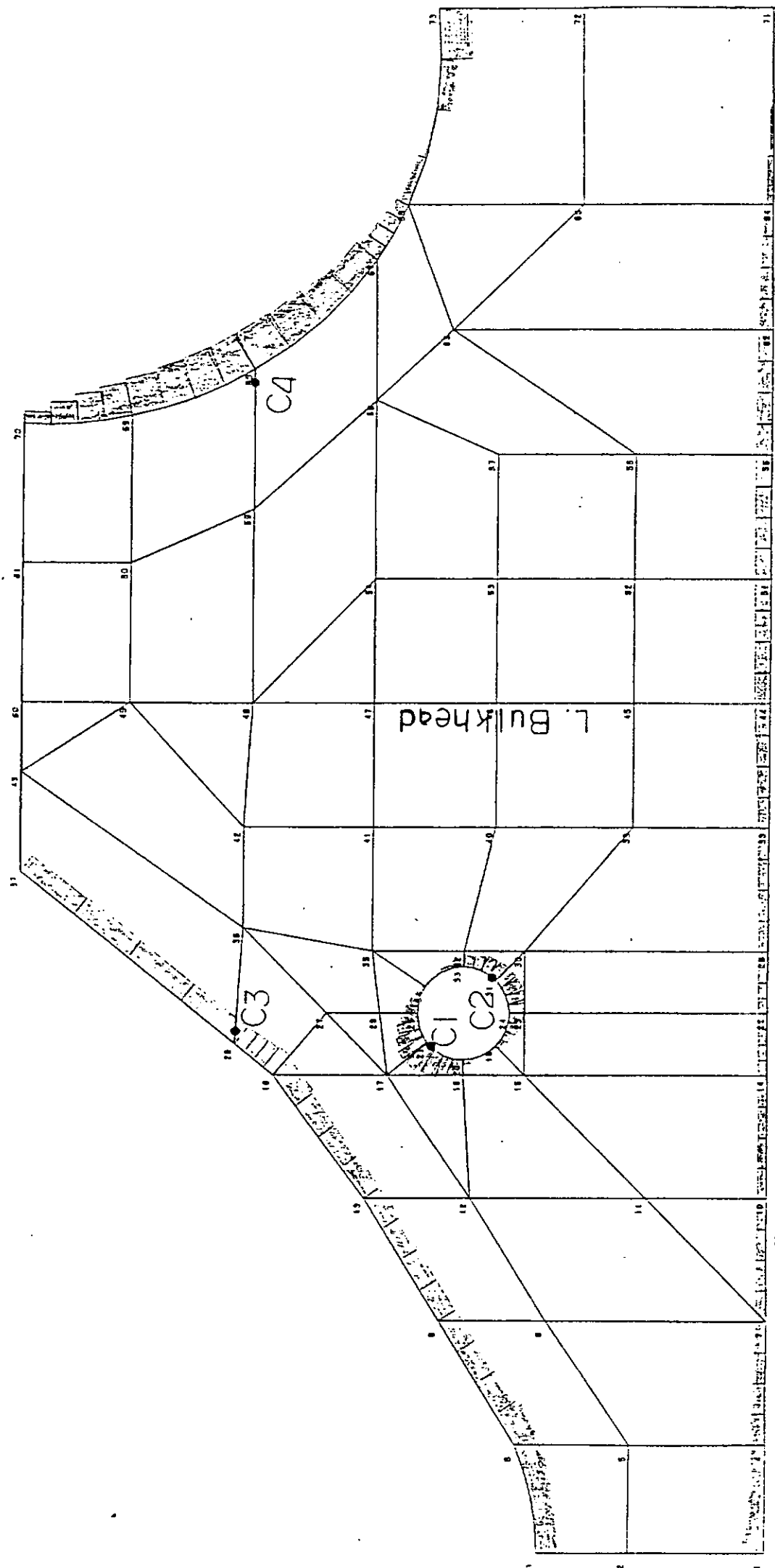


図 7.1.10 主応力分布図 (応力範囲)

STRESS : 10.0 kg/mm<sup>2</sup>

Full load

Bottom

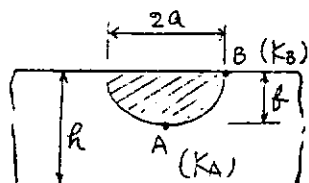


Bottom

Full load

図7.1.11 直応力分布図 (応力範囲)

STRESS : 10.0 kg/mm<sup>2</sup>



Step 1 面材表面き裂

$$K_A = M_t^A \cdot M_k \frac{\sigma \sqrt{\pi b}}{E(k)}$$

$$K_B = M_t^B \cdot M_k \frac{\sigma \sqrt{\pi b}}{E(k)}$$

$$\Delta a = \Delta b \left(0.9 \frac{K_B}{K_A}\right)^m \quad (\text{き裂形状})$$

$M_t^A, M_t^B$ ; J.C. Newmanによる平板の

表面き裂K値修正係数

$M_k$ ; 応力集中によるK値修正係数

$E(k)$ ; 第2種完全楕円積分

Step 2 面材貫通き裂

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \sqrt{\frac{2L_1}{\pi a} \tan \frac{\pi a}{2L_1}}$$

Step 3 7/7" き裂

$$K = \left[ 1.785 \sum_{n=0}^4 k_n^* C_n a^{n+1} \sqrt{\frac{1}{\pi a}} + 2P_1 \sqrt{\frac{1}{\pi a(1-\xi_1^2)}} \right]$$

$$\{1 + (1 - \xi_1^2)(0.2945 - 0.3912\xi_1^2 + 0.7685\xi_1^4 - 0.9942\xi_1^6 - 0.5094\xi_1^8)\} \cdot M_p$$

$$\xi_1 = 0.5h_1/a, P_1 = 2 \int_0^{L_1} \sigma_1(x) dx$$

$$M_p = -0.58(a/L_3)^2 + 0.14(a/L_3) + 1$$

$C_n$ ; 応力分布を多項式近似したときの係数

$k_n^*$ ; 係数

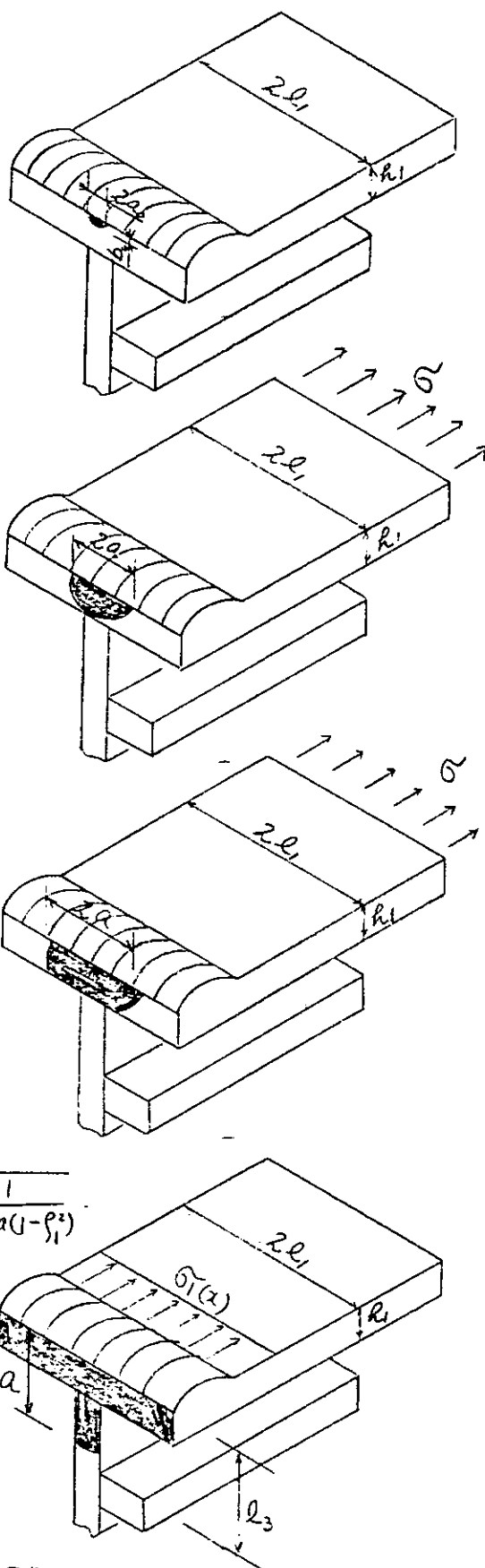


図7.1.12 面材から進展するき裂の伝播過程とK値

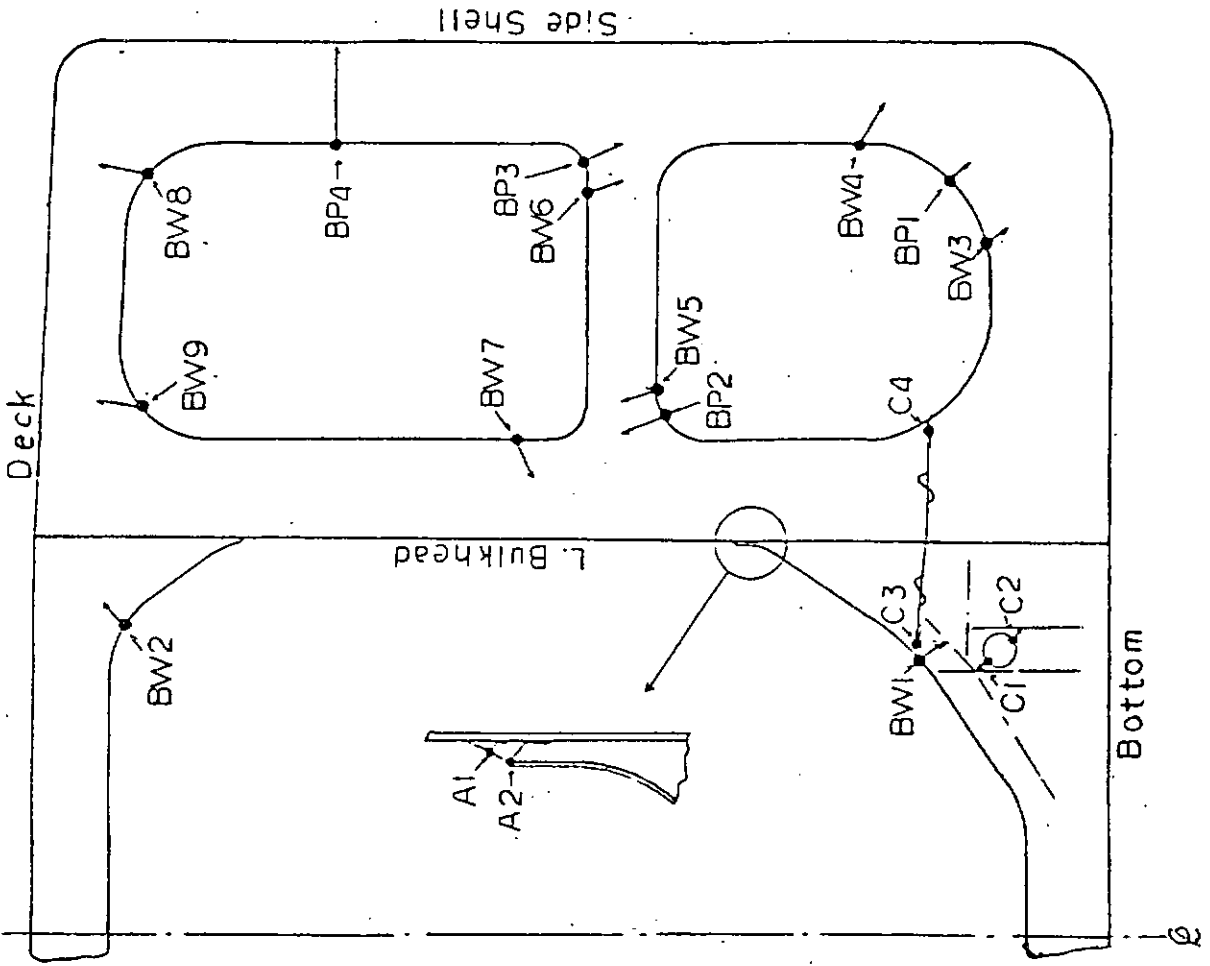


図7.1.14 疲労破壊強度・解析位置

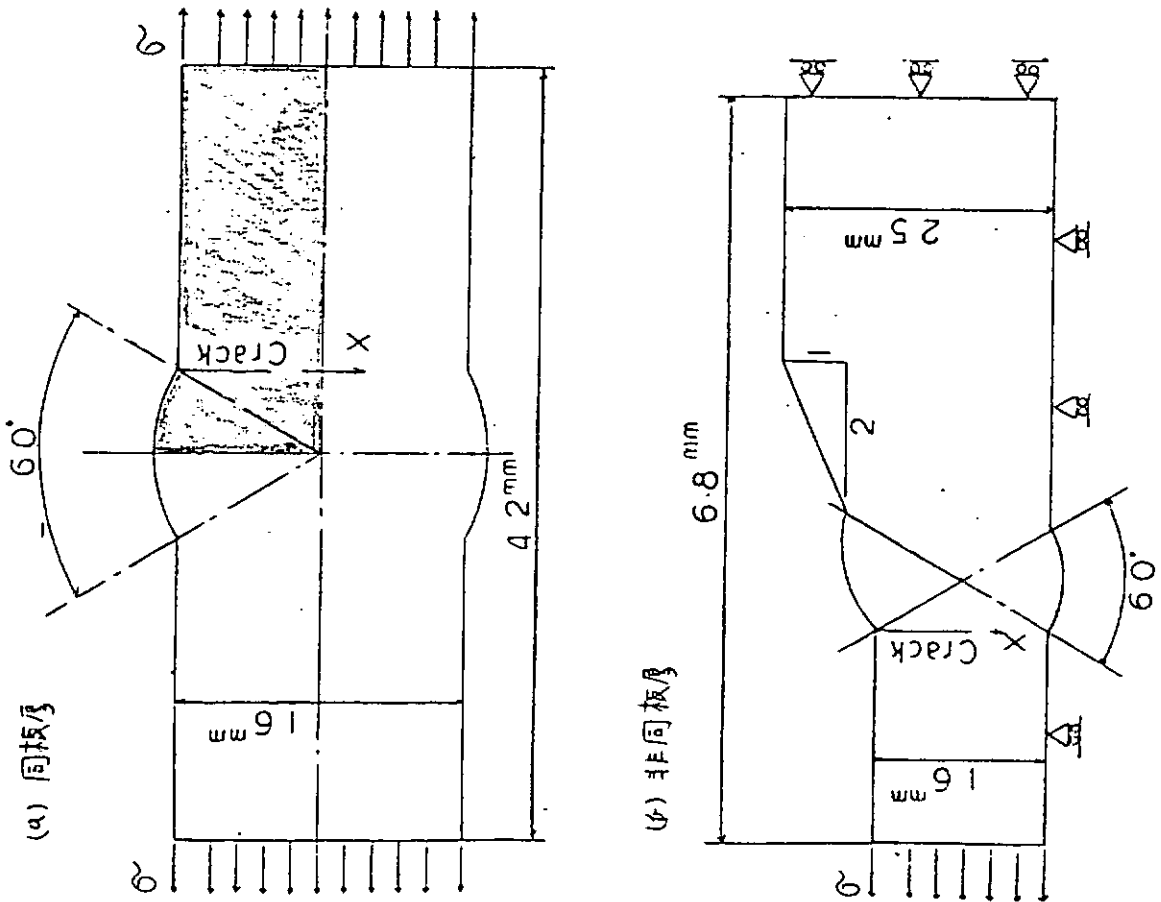
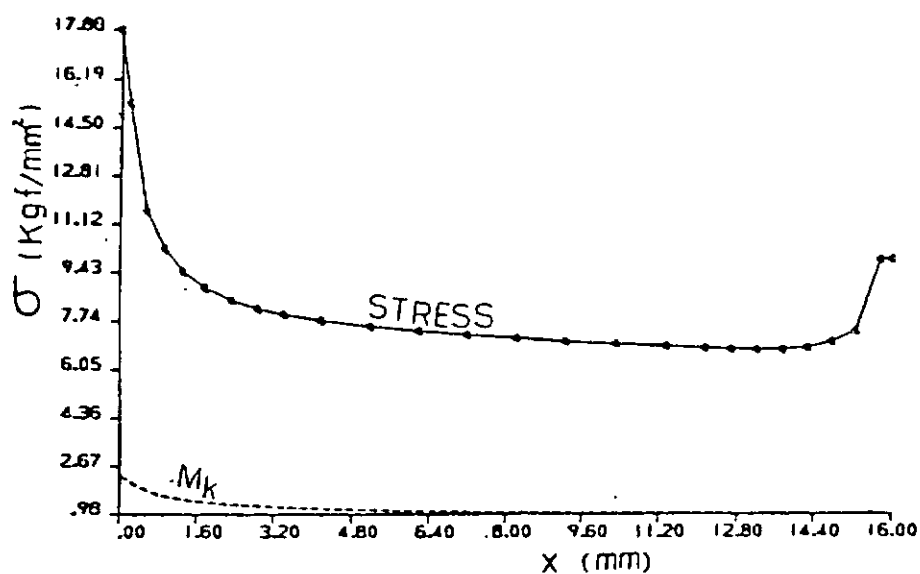


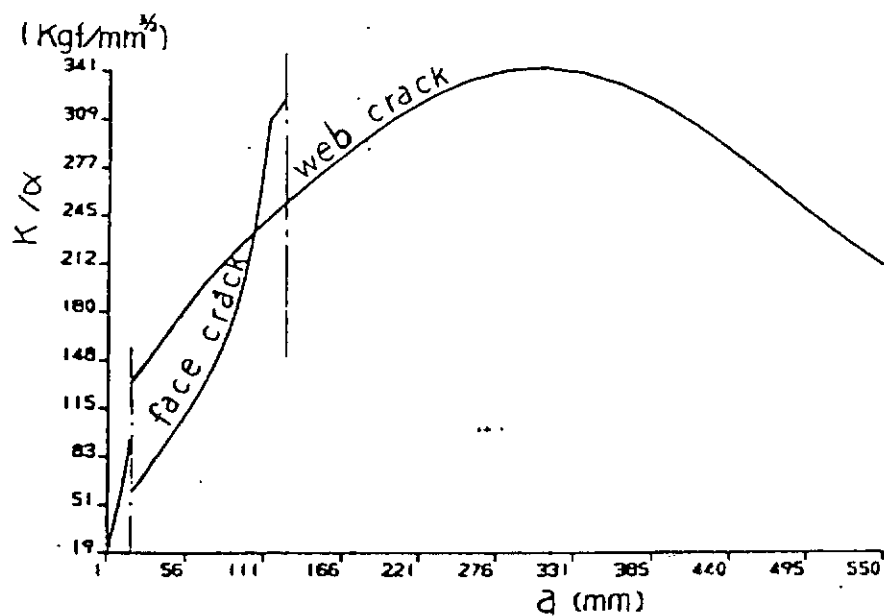
図7.1.13 突合わせ溶接継手の応力解析

TRANS FACE BW7 FULL



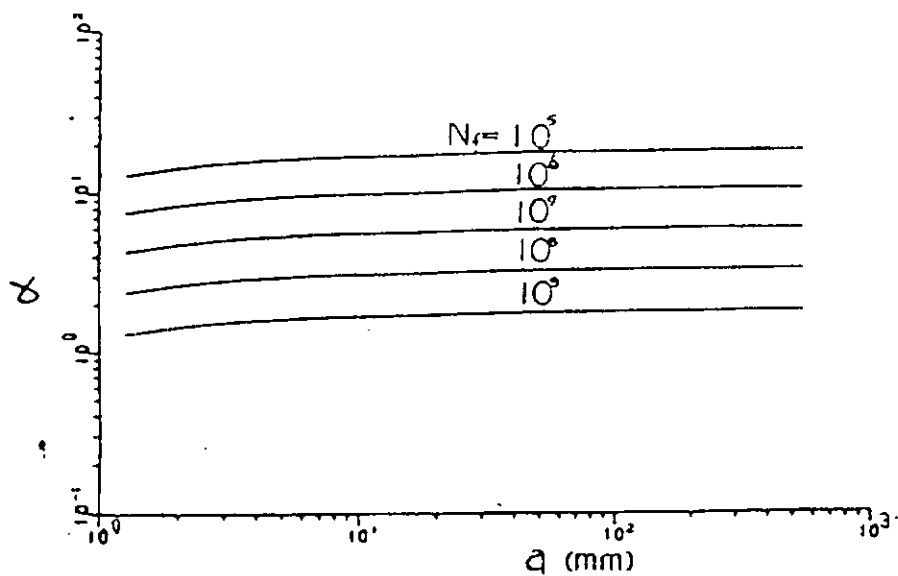
⑧ 7.1.15 PRIN STRESS DISTRIBUTION

TRANS FACE BW7 FULL



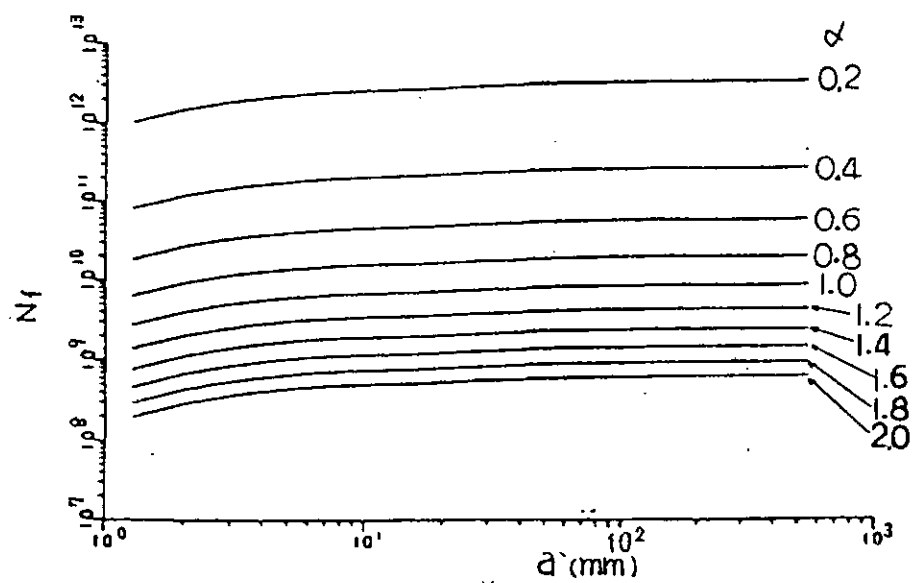
⑧ 7.1.16 STRESS INTENSITY FACTORS

TRANS FACE BW7 FULL



7.1.17 FATIGUE FRACTURE STRESS

TRANS FACE BW7 FULL



7.1.18 FATIGUE FRACTURE CYCLE

BOTTOM TRANS SNIP A2 FULL

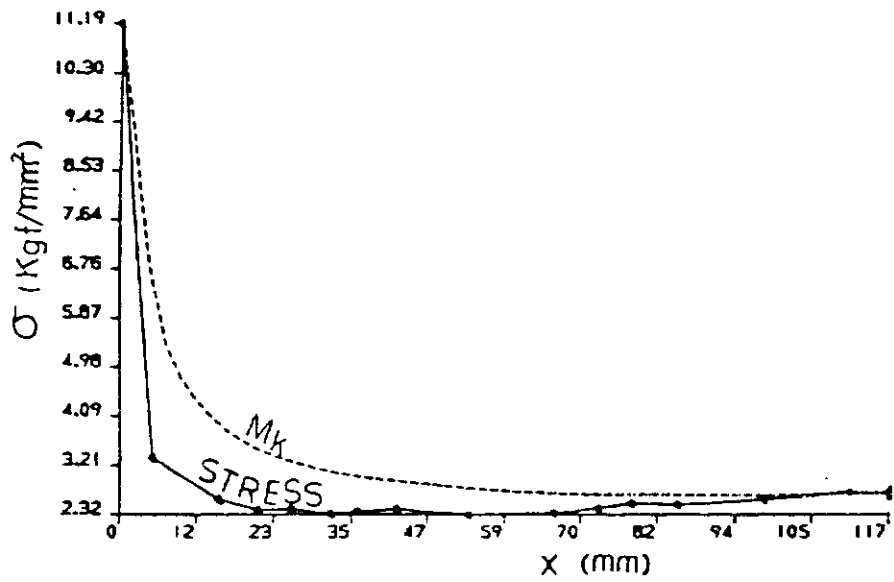


Fig. 7.1.19 PRIN. STRESS DISTRIBUTION

BOTTOM TRANS SNIP A2 FULL

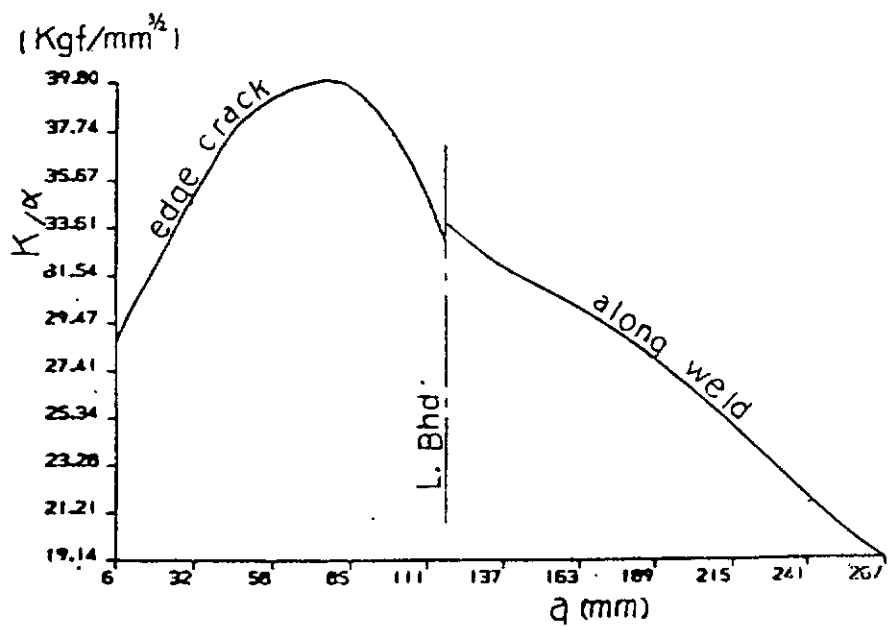
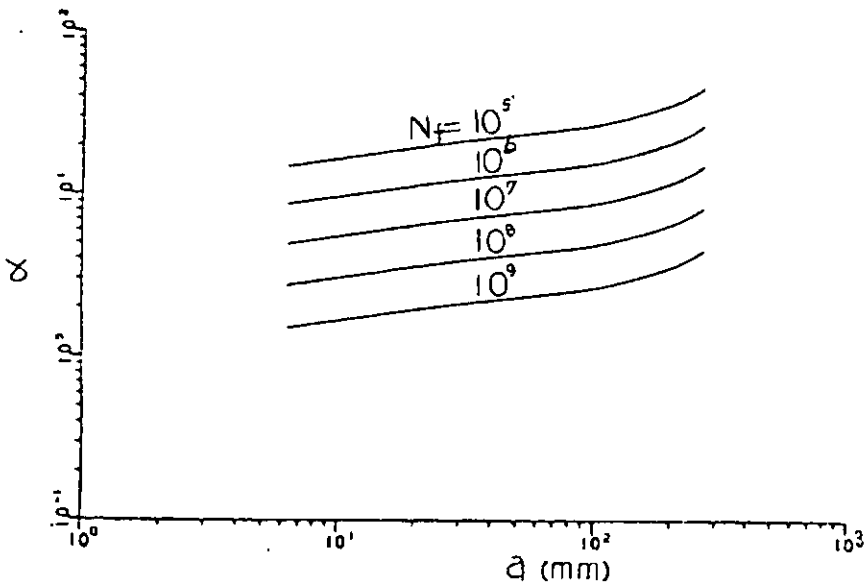


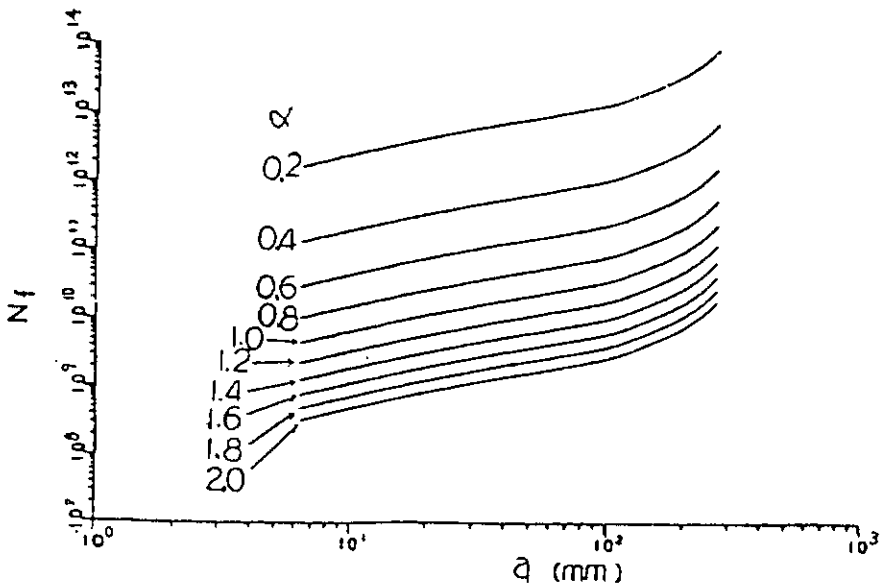
Fig. 7.1.20 STRESS INTENSITY FACTORS

BOTTOM TRANS SNIP A2 FULL



7.1.21 FATIGUE FRACTURE STRESS

BOTTOM TRANS SNIP A2 FULL



7.1.22 FATIGUE FRACTURE CYCLE

表7.1.1 トランスリング部材の疲労破壊強度 (Full load condition)  $N_f = 10^8$

| 解析対象箇所                |     | 基準応力(kgf/mm <sup>2</sup> ) |                | $\sigma_y/\sigma_{max}$ | 破壊応力係数, $\alpha$ |       |           |                      |      |                            |      |      |
|-----------------------|-----|----------------------------|----------------|-------------------------|------------------|-------|-----------|----------------------|------|----------------------------|------|------|
|                       |     | $ \sigma_{max} $           | $\Delta\sigma$ |                         | 板厚貫通             | 面材切断  | ウェブスリット位置 | $\alpha = 10^{-m/m}$ | 縦隔壁部 | $Q_1 = 165$<br>$Q_2 = 267$ | 喉厚切断 |      |
|                       |     |                            |                |                         |                  |       |           |                      |      |                            |      |      |
| 面材<br>平板              | BP1 | 7.76                       | 13.36          | 3.09                    | 3.14             | 3.16  | 3.17      | —                    | —    | —                          | —    | —    |
|                       | BP2 | 6.89                       | 12.52          | 3.48                    | 3.30             | 3.33  | 3.34      | —                    | —    | —                          | —    | —    |
|                       | BP3 | 8.54                       | 9.66           | 2.81                    | 4.33             | 4.35  | 4.36      | —                    | —    | —                          | —    | —    |
|                       | BP4 | 5.28                       | 5.69           | 4.55                    | 7.27             | 7.32  | 7.34      | —                    | —    | —                          | —    | —    |
|                       | C1  | 9.14                       | 7.27           | 2.63                    | 5.69             | 5.72  | 5.74      | —                    | —    | —                          | —    | —    |
|                       | C2  | 5.74                       | 4.70           | 4.18                    | 8.80             | 8.85  | 8.87      | —                    | —    | —                          | —    | —    |
| 面材<br>突合せ継手<br>(同板厚)  | BW1 | 8.29                       | 6.18           | 2.90                    | 4.70             | 4.76  | 4.78      | —                    | —    | —                          | —    | —    |
|                       | BW2 | 4.16                       | 2.35           | 5.77                    | 12.52            | 12.76 | 12.79     | —                    | —    | —                          | —    | —    |
|                       | BW5 | 6.86                       | 8.31           | 3.50                    | 3.52             | 3.58  | 3.59      | —                    | —    | —                          | —    | —    |
|                       | BW6 | 7.67                       | 8.23           | 3.13                    | 3.56             | 3.61  | 3.63      | —                    | —    | —                          | —    | —    |
|                       | BW8 | 12.12                      | 14.39          | 1.98                    | 2.05             | 2.08  | 2.12      | —                    | —    | —                          | —    | —    |
|                       | BW9 | 8.47                       | 8.34           | 2.83                    | 3.53             | 3.60  | 3.64      | —                    | —    | —                          | —    | —    |
| 面材<br>突合せ継手<br>(非同板厚) | BW3 | 7.39                       | 11.86          | 3.25                    | 1.97             | 2.05  | 2.08      | —                    | —    | —                          | —    | —    |
|                       | BW4 | 5.80                       | 10.49          | 4.14                    | 2.22             | 2.32  | 2.34      | —                    | —    | —                          | —    | —    |
|                       | BW7 | 4.87                       | 7.68           | 4.93                    | 3.03             | 3.17  | 3.21      | —                    | —    | —                          | —    | —    |
|                       | A1  | 3.32                       | 3.38           | 7.23                    | —                | —     | —         | 7.58                 | 8.59 | 9.70                       | —    | —    |
| ブラケット<br>トウ部          | A2  | 8.57                       | 11.19          | 2.80                    | —                | —     | —         | 2.81                 | 4.95 | 7.94                       | —    | —    |
|                       | C3  | 4.82                       | 3.23           | 4.98                    | —                | —     | —         | —                    | —    | —                          | —    | 4.61 |
| 柵板<br>構造部             | C4  | 12.95                      | 7.57           | 1.85                    | —                | —     | —         | —                    | —    | —                          | —    | 2.00 |

表7.1.2 トランスリング部材の疲労破壊強度 (H.bolllast condition)  $N_f = 10^8$

| 解析対象箇所                |     | 基準応力(kg f/mm <sup>2</sup> ) |                | $\sigma_y/\sigma_{max}$ | 破壊応力係数, $\alpha$ |       |           |                |                        |
|-----------------------|-----|-----------------------------|----------------|-------------------------|------------------|-------|-----------|----------------|------------------------|
|                       |     | $\sigma_{max}$              | $\Delta\sigma$ |                         | 板厚貫通             | 面材切断  | ウェブスチフナ位置 | $a=10^{-3}$ mm | 縦通隔壁部                  |
|                       |     |                             |                |                         |                  |       |           |                | $a_1=151$<br>$a_2=267$ |
| 面材<br>平板              | BP1 | 6.43                        | 11.00          | 3.73                    | 3.80             | 3.82  | 3.84      | —              | —                      |
|                       | BP2 | 6.19                        | 8.60           | 3.88                    | 4.81             | 4.84  | 4.86      | —              | —                      |
|                       | BP3 | 3.32                        | 5.24           | 7.23                    | 7.98             | 8.02  | 8.03      | —              | —                      |
|                       | BP4 | 3.07                        | 0.93           | 7.82                    | 44.47            | 44.79 | 44.80     | —              | —                      |
| 面材<br>突合せ継手<br>(同板厚)  | C1  | 12.79                       | 6.83           | 1.88                    | 6.06             | 6.09  | 6.11      | —              | —                      |
|                       | C2  | 8.86                        | 4.82           | 2.71                    | 8.58             | 8.63  | 8.65      | —              | —                      |
|                       | BW1 | 10.95                       | 5.30           | 2.19                    | 5.48             | 5.55  | 5.57      | —              | —                      |
|                       | BW2 | 3.81                        | 1.53           | 6.30                    | 19.23            | 19.60 | 19.63     | —              | —                      |
|                       | BW5 | 4.34                        | 6.30           | 5.53                    | 4.64             | 4.72  | 4.73      | —              | —                      |
|                       | BW6 | 4.32                        | 4.33           | 5.56                    | 6.76             | 6.86  | 6.88      | —              | —                      |
|                       | BW8 | 15.01                       | 5.17           | 1.60                    | 5.69             | 5.80  | 5.83      | —              | —                      |
|                       | BW9 | 3.90                        | 4.37           | 6.15                    | 6.73             | 6.86  | 6.91      | —              | —                      |
|                       | BW3 | 7.41                        | 10.59          | 3.24                    | 2.20             | 2.30  | 2.33      | —              | —                      |
| 面材<br>突合せ継手<br>(非同板厚) | BW4 | 5.95                        | 6.93           | 4.03                    | 3.36             | 3.51  | 3.53      | —              | —                      |
|                       | BW7 | 4.05                        | 5.73           | 5.93                    | 4.07             | 4.25  | 4.28      | —              | —                      |
|                       | A1  | 7.13                        | 4.84           | 3.37                    | —                | —     | —         | 5.29           | 6.05                   |
|                       | A2  | 20.63                       | 14.22          | 1.16                    | —                | —     | —         | 2.33           | 3.90                   |
| ブラケット<br>トウ部          | C3  | 6.26                        | 2.70           | 3.83                    | —                | —     | —         | —              | —                      |
|                       | C4  | 12.11                       | 5.30           | 1.98                    | —                | —     | —         | —              | —                      |
| 棚板<br>構造部             |     |                             |                |                         | —                | —     | —         | —              | 5.52                   |
|                       |     |                             |                |                         | —                | —     | —         | —              | 2.85                   |

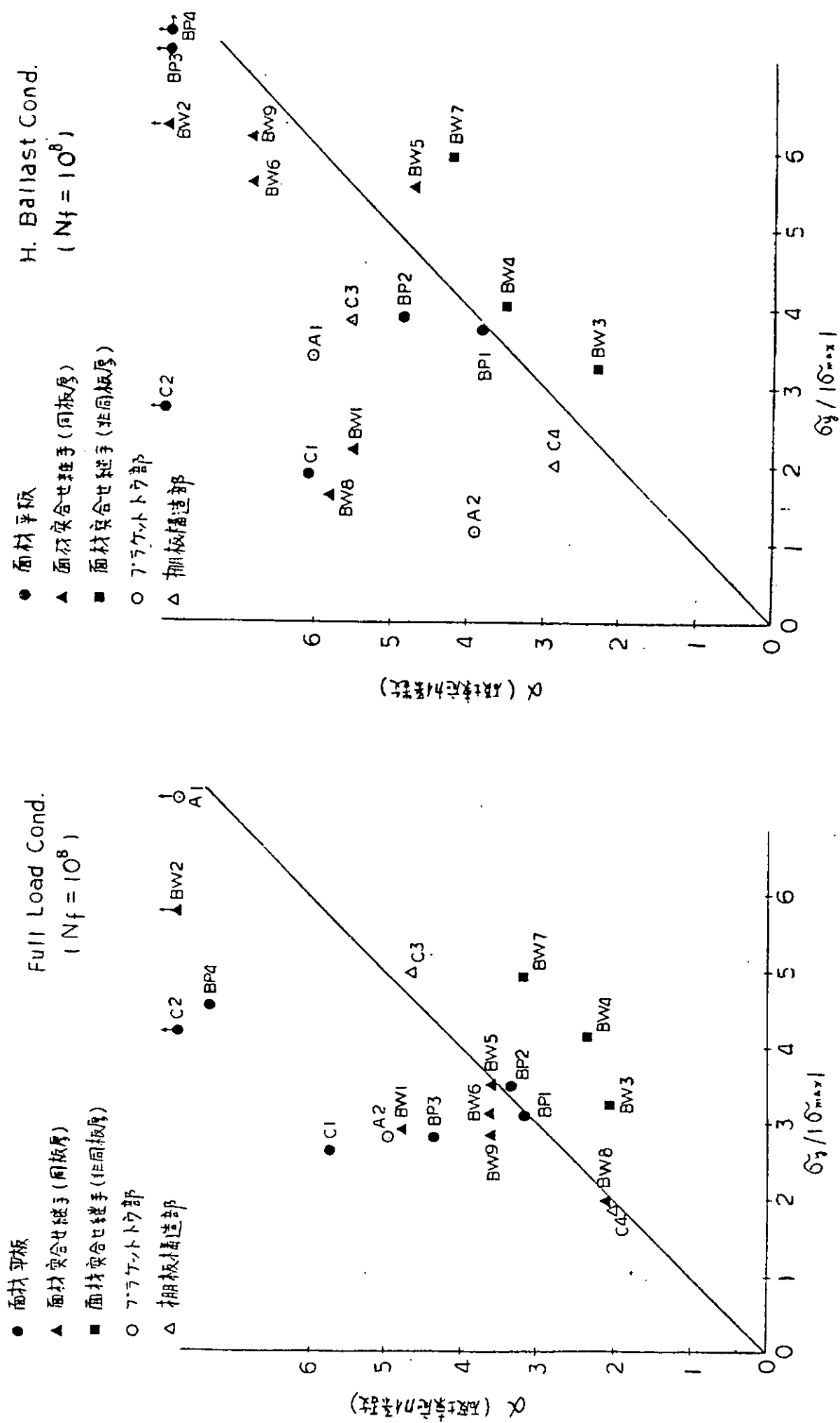


図 7.1.23 トランスリソグ部材の疲労破壊強度

図 7.1.24 トランスリソグ部材の疲労破壊強度

## 7.2 タンカーの Bottom trans. 損傷の検討

### 7.2.1 実船解析の目的

6章では船殻構造の種々のパターンに対する破壊力学解析の簡易的取り扱いについて述べられた。提案された各種の取り扱いの方法は、個々に構造模型試験等によりその有効性を吟味しつつ確立されたものである。

しかし、設計の立場からはこれらの解析法を実船に適用した場合に、現実の実構造の挙動が矛盾なく合理的に説明され、設計の道具として有効に活用されるかどうかの確認が必要である。

以上のような観点から、ここでは、これまで提案した解析法を、損傷を有するタンカーの Bottom trans. に適用し、実船との比較を行なって、その妥当性を確認するものである。

### 7.2.2 供試船の損傷履歴

#### (1) 供試船の主要目

対象とする供試船は、昭和43年に建造された155,000tのタンカーである。主要目は次のとおりである。

$$L \times B \times D \times d = 290.2 \times 48.2 \times 24 \times 18.3 \text{ ----- (7.2.1)}$$

本船は、VLCC出現の初期段階で設計されたもので、当時は十分な実績データもなく、また現在のように有効な直接計算の方法が確立されていなかった。本船は就航後、タンクパートにおびただしい亀裂が発見され、船主から相当のクレームのついた船である。

#### (2) 就航実績

本船の就航ルートは外国船主でもあり、正確に把握することはできないが、船主の説明により、主としてアルジェリア／デンマークおよびPG／希望岬／アイルランドである。

就航後、損傷が報告されるまで約9年経過している。用船者側の説明では「本船は就航4,5年で亀裂が増え始め、最近急激に目立つようになった。」

ということである。亀裂がかなりの大きさに伝播するまで放置されていた理由については明確な情報がない。

なお、本船のホールドパートはコロージョンコントロールにより、板厚を減じた船で、当時としては珍しい例である。当社への損傷報告時点でのペイントの状態は極めて良好で腐食による亀裂とは考えられないと報告がなされている。  
(82建造船)

### (3) 供試船の損傷の特徴

損傷はタンクパート全体に及んでいるが、典型的な例としてホールド中央のNo.3およびNo.4 TANKに限定する。これらの対象とする損傷の種類、分布状況、主な特徴を表7.2.1に一括して示す。

これらの損傷はNo.3 TANKとNo.4 TANKで傾向が異なるが、これはNo.3のC.TANKがCLEAN WATER BALLAST TANKとなっており、No.4 TANKの積み付け状態と相違するためである。

### 7.2.3 損傷部材の応力解析

破壊力学解析は、図7.2.1に示すフローチャートに従って解析および検討を行なう。この解析手順では疲労亀裂発生×脆性破壊の発生・停止解析は行なわれていない。本来、破壊力学解析は高応力部の検出、疲労亀裂発生と伝播、脆性破壊の発生と停止等の一連の解析を通して評価される。

しかし、ここでは提案した亀裂径路および伝播量推定のための簡易解析法の妥当性を検証することが目的であるので、伝播径路および伝播量解析に限定して実船との比較を行なう。

### (1) 外力の設定

外力条件は、就航ルートおよび積み付け状態がわかれば設定する手法が確立されている。破壊力学解析に外力の占める割合は大きく、この設定いかんにより結果はかなり異なるものとなる。通常は、設計船に予測される最も厳しい外力条件を与えて解析し、これを安全側の評価とする。

しかし、本章で行なうような実船と解析の比較・検証においては、波浪外力のはっきりわかった短期海象下での応力計測とは異なり、長期にわたって就航した実船の場合は就航中の外力状態を知ることは不可能である。したがって、ここでは外力条件を次のように仮定する。

(i) 積み付け条件

供試船の計画段階で最も載貨頻度の高い FULL LOAD CONDITION および NORMAL BALLAST CONDITION とする(図 7.2.2 参照)。

(ii) 波浪内圧

LNG 船, LPG 船で用いられる IMCO コードに従う。

(iii) 波浪外圧

LNG 船, LPG 船で用いられる NK-LNG 船基準に従う。

(iv) 変動圧位相差

最近発表された文献<sup>1)</sup>に従って変動内外圧は打ち消し合うという前提のもとに以下のように設定する。

| タンク状態 | 波浪外圧    | 波浪内圧    |
|-------|---------|---------|
| FULL  | 静圧      | 静圧 + 動圧 |
| VOID  | 静圧 + 動圧 | 静圧      |

以上の条件をもとに計算した供試船の外力を表 7.2.2 に示す。

(2) 応力解析

既に述べたように、電裂解析を有限要素法を用いて厳密に取り扱うには、電裂先端近傍の詳細な応力解析を電裂径路を追いながら逐一計算しなければならない。このような解析では、電裂先端の応力の特異性を表現するために 1mm オーダーのメッシュを用いた有限要素法計算が何回も必要である。さらに、直交交差部材に進入した電裂に対して K 値を求めるには 3次元有限要素法計算が必要であり、とうてい設計段階で計算できるようなしろものでない。

本解析では、電裂の存在しない状態での応力解析結果より、電裂の径路

および伝播量を推定するという簡易計算法を採用しているので、一度の応力解析で良い。しかし、本簡易計算法の場合でも亀裂発生子想点における応力集中の把握や径路に沿う主応力分布を必要とし、ある程度の詳細な解析が必要である。ここでは、船殻構造解析でしばしば採用するズーミングの手法を用いて応力解析を行なう。解析対象範囲である BOTTOM TRANS の応力分布を求めるための手順を以下に示す。

#### ステップ 1：縦部材格子構造計算

S.SHELL, L.B<sup>HD</sup>, TRANS RING, TRANS B<sup>HD</sup> よりなる平面格子構造モデルを用いて縦部材の相対変位を求める。

#### ステップ 2：TRANS RING 平面骨組計算

対象とする TRANS RING を平面骨組モデルを用いて計算する。  
この場合、ステップ 1 で求めた境界条件をデータとして与える。

#### ステップ 3：BOTTOM TRANS COARSE MESH FEM 計算

ステップ 2 の結果を境界条件として BOTTOM TRANS の COARSE MESH FEM 計算を行なう。

#### ステップ 4：詳細ズーミングモデル FEM 計算

亀裂想定箇所近傍について FEM 計算を行なう。この計算においてはステップ 3 で得られた変位が境界条件となる。  
各損傷に対するモデルを以下に示す。

- (a) スニップエンド (タイプ C)
- (b) ウェブ スチフナ (タイプ A)
- (c) センタータンク ボットムトランス中央 (タイプ D)
- (d) ウィングタンク ボットムトランス中央 (タイプ E)

ステップ 1 からステップ 4 までの応力解析で用いた計算モデルを図 7.2.3 および 図 7.2.4 に示す。

### (3) 局部応力解析結果

解析結果の一例を図7.2.5～7.2.8に示す。

#### 7.2.4 亀裂伝播解析結果と実船の損傷との比較

実船の場合は、①外力条件、②疲労亀裂発生、③脆性破壊の有無、④振動のような不確定要因のために、実際の損傷の経年変化を定量的に解析解と対応させることは非常に困難である。

したがって、本節で行なう実船との比較は、主として損傷現象についての解析解との定性的な比較を行ない、損傷現象が破壊解析を通じて矛盾なく説明できるかどうかポイントをしぼる。

なお、供試船では、No.3 TANKとNo.4 TANKについて、外力条件をFULL LOAD CONDITIONとNORMAL BALLAST CONDITIONとして、実船解析を行なった。その結果、No.3 TANKではNORMAL BALLAST CONDITION、No.4 TANKではFULL LOAD CONDITIONが厳しいことがわかったので、これらの厳しい荷重状態での応力解析結果を用いて、実船との比較を行なう。一例として、タイプAの損傷に対する積み付け条件の影響を図7.2.9に示す。

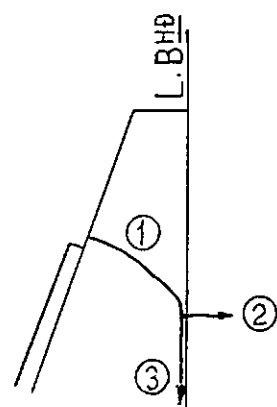
#### (1) C.TANK ボトムトランス スニップエンド(タイプC)

タイプCの亀裂はスニップエンドの面材先端のまわし溶接トウ部から発生した後、L.B<sub>HD</sub>に達する。亀裂経路と解析法の対応は次のようになる(右図参照)。

① 発生点からL.B<sub>HD</sub>まで：“亀裂発生点から直交交差部材まで平板部を伝播する亀裂”

② L.B<sub>HD</sub>へ進入：“直交交差部材へ進入した表面亀裂”

③ すみ肉に沿う：“縁亀裂が直交交差部材のすみ肉溶接に沿う場合”



解析結果を図7.2.10に示す。亀裂伝播経路と伝播量の実船との比較は

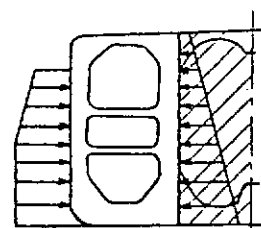
次のようになる。

| 比較項目      | 実船                              | 計算結果                                        | 比較 |
|-----------|---------------------------------|---------------------------------------------|----|
| 亀裂発生点     | まわし溶接トウ部                        | 面材先端の高応力部                                   | 一致 |
| 亀裂径路      | L.B <sup>H</sup> Dに達し、すみ肉溶接部に沿う | L.B <sup>H</sup> Dに達し、L.B <sup>H</sup> Dに沿う | 一致 |
| No.3 TANK | 損傷なし                            | 1年* で 2mm                                   | 一致 |
| No.4 TANK | 70~130mm                        | 1年 で 110mm                                  | 一致 |

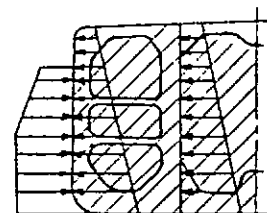
\* 供試船は損傷要因となる積み付け状態に常にさらされたわけではなく、また亀裂発生に要する期間も見込む必要があるので、必ずしも信頼できる値ではない。

No.3 TANKの変動応力成分はNo.4 TANKに比較して低く、亀裂発生がなかったものと思われる。計算結果は仮想の亀裂とみなせる。上記の比較において、このことは完全に裏付けられた。

ところで、No.3 TANKとNo.4 TANKの積み付け状態を見ると、損傷部に対して静荷重ではNo.3 TANKの方が厳しく、解析結果と矛盾するように思われる。しかし、亀裂の発生および伝播に影響するのは変動成分であり、この観点から外力を比較しなければならない。すなわち、No.3 TANKでは、変動外圧とC.TANKの変動内圧がストラットをかいてほぼ打ち消し合っている状態であるが、一方No.4 TANKでは、W.TANKおよびC.TANKの変動成分が外圧より大きくなっているため、当該部に大きな応力を発生させたものと思われる（右図参照）。



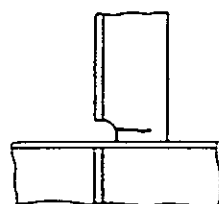
外圧, 静+動 内圧, 静+動  
No.3 Normal Ballast



外圧, 静+動 内圧, 静+動  
No.4 Full Load

## (2) ボトム トランス ウェブ スチフナ (タイプA)

タイプAの損傷は、ウェブスチフナとロンジの面材との溶接部のスキヤラップ側に亀裂が発生し、すみ肉溶接に沿って伝播する。



この亀裂の取り扱いには、“亀裂発生点から直交交差部材まで平板部を伝播する

亀裂”の手法を適用し、有限板による修正を加えて解析する。すなわち、この亀裂のK値は

$$K = \sqrt{\frac{2w}{\pi a} \tan \frac{\pi a}{2w}} K' \text{ ----- (7.2.2)}$$

に従って修正する。

ただし、 $K'$ : 4.3節で求められたK値

ただし、無限遠方に直交交差部材があるとする。

$a$ : 亀裂ガース長さ

$w$ : 自由端までの亀裂ガース長さ

解析結果を図7.2.11に示す。実船との比較は次のようになる。

| TANK |   | スチフナ<br>高さ | カラープレートの<br>有無 | 実 船  | 計 算 結 果               | 比 較 |
|------|---|------------|----------------|------|-----------------------|-----|
| No.3 | W | 175        | 無              | 破断*  | 0.1年で破断               | 一致  |
|      |   |            | 有              | 破断*  | 0.2年で143mm (82%) 破断** | 一致  |
|      | C | 145        | 無              | 破断*  | 0.9年で破断               | 一致  |
|      |   |            | 有              | 破断*  | 2年で115mm (79%) 破断**   | 一致  |
| No.4 | W | 175        | 無              | 未破断* | 0.7年で145mm (83%) 破断** | 不一致 |
|      |   |            | 有              | 未破断* | 2年で70mm (40%) 未破断     | 一致  |
|      | C | 145        | 無              | 未破断* | 1年で破断                 | 不一致 |
|      |   |            | 有              | 未破断* | 2年で60mm (41%) 未破断     | 一致  |

( )内はスチフナ高さに対する亀裂長さの比

\*: 必ずしも、全てのスチフナが同じ傾向を示すものでない。

\*\* : 亀裂長さがスチフナ高さの70%に達したとき、スチフナとして有効に作用しなくなったとして破断とみなす。

タイプAの損傷の特徴は、No.3 TANKでほとんど全てスチフナの破断に至っているが、No.4 TANKでは破断までには及んでいない部材が多い点である。一方計算結果は、No.4 TANKのカラープレート無しのスチフナの亀裂は破断に至っている。実船においては、No.4 TANKのカラープレートの無いスチフナは破断しておらず、計算結果と一致していないように思われる。この理由は

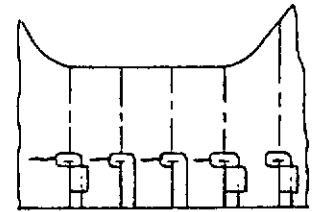
明確に説明されないが、疲労亀裂の発生をカウントしていないことも一因と思われる。これを説明したのが図7.2.12である。No.4 TANKの亀裂発生寿命はNo.3 TANKに比べて大きく、定性的に説明がつく。

一方、実船の損傷、解析結果ともにカラープレート付きのスチフナは損傷が少ないが、カラープレートの有無による損傷への影響をみたのが図7.2.13である。この結果から、カラープレートは該部の亀裂防止に寄与することがわかり、従来からスチフナの損傷に対する対策として行なわれてきたカラープレートの効果が良く説明される。

スチフナの破断は局所的であり、一見問題がないように思われるが、荷重伝達機構の観点からスロットのコーナー部（特にロンジ接続側のコーナー）に大きな影響をもつ。これは、次に述べる亀裂解析結果で示す。

### (3) スロットコーナー（タイプD）

タイプDの損傷は、No.3 C.TANKにおいて複数個のスロットのコーナーから船底にほぼ平行に伝播する亀裂である。厳密には、これらの亀裂の干渉効果を考える必要があるが、ここでは独立に取り扱う。伝播量推定には“亀裂発生点から直交交差部材まで平板部を伝播する亀裂”を用いる。



解析結果を図7.2.14に示す。この図にはスチフナが破断したものと、未破断の結果を同時に示している。明らかにスチフナが未破断のものは亀裂の進展が遅いことがわかる。この結果と実船の損傷におけるタイプDの損傷は、スチフナの破断を伴って発生していることから見て、まずスチフナが破断し、その後、該部の損傷に至るものと思われる。以下に実船との比較を行なう。

| 比較項目      | スチフナ破断の有無 | 実 船       | 計 算 結 果                 | 比 較  |
|-----------|-----------|-----------|-------------------------|------|
| 亀裂径路      | ——        | 船底にほぼ平行   | 隣接スロット半ばまで船底に平行、以後は下に向く | ほぼ一致 |
| No.3 TANK | 破断        | 400~600mm | 1年*で450mm               | 一致   |
| No.4 TANK | 未破断**     | 損傷なし      | 1年で10mm                 | 一致   |

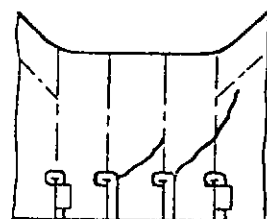
\* スチフナの破断はカウントされていない。

\*\* 実船のNo.4 TANKのスチフナは破断していないので、解析結果も未破断のものをベースとする。

以上のように、タイプDの損傷にはスチフナ破断の有無が影響しており、従来の経験的事実とよく一致している。

#### (4) スロット コーナー (タイプE)

タイプEの損傷はNo.3 TANK のみに見られる亀裂である。亀裂はスロットのロンジ接続と反対側の



コーナーから発生し、斜め上方に伝播する。さらに、隣接スロットのウェブスチフナに達し、ウェブスチフナを貫通して伝播する場合もある。

したがって、伝播量計算には、“亀裂発生点から直交交差部材に達するまで平板部を伝播する亀裂”、“直交交差部材に進入する表面亀裂”および“直交交差部材を横切った後の主亀裂”を組合せて用いる。

解析結果は図7.2.15に示す。実船との比較は以下のとおりである。

| 比較項目      | 実 船        | 計 算 結 果               | 比 較  |
|-----------|------------|-----------------------|------|
| 亀裂径路      | 図7.2.15 参照 | 実船よりやや上側              | ほぼ一致 |
| No.3 TANK | 700～1300mm | 1年でウェブスチフナを貫通(1100mm) | 一致   |
| No.4 TANK | 損傷なし       | 1年で250mm              | 一致   |

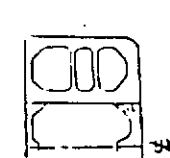
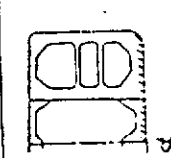
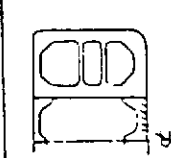
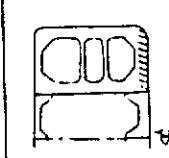
亀裂の伝播径路、No.3 TANK/No.4 TANKの損傷発生の有無、およびNo.3 TANKの伝播量とも、実船の損傷は計算で説明できることがわかった。

また、図7.2.16に示すように タイプEの損傷はスチフナ切断の有無の影響があまりなく、カラプレートと強い相関を示している。

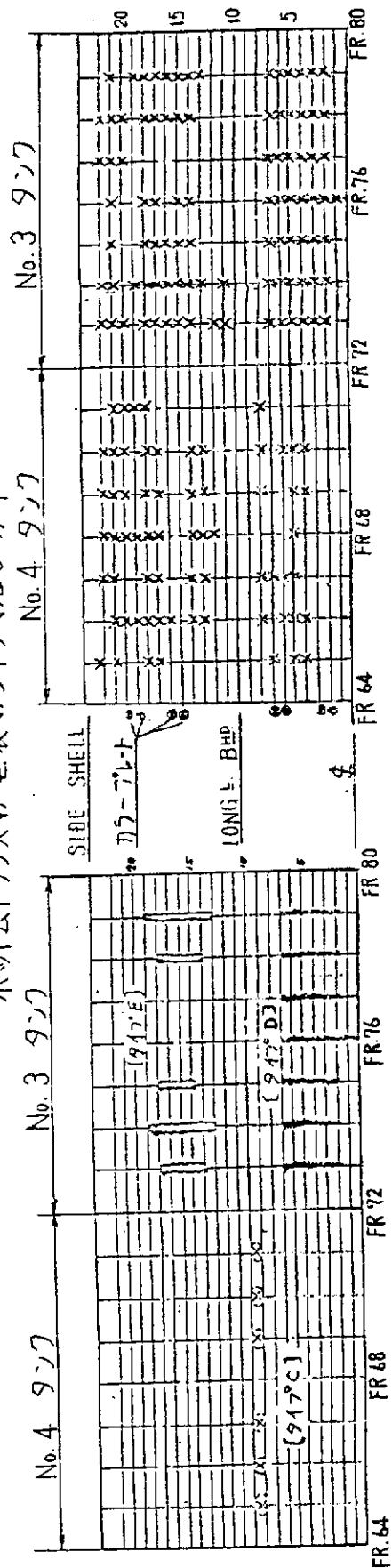
#### 参考文献

- 1) 永元, 高橋, 川村, 山下: 槽内変動圧と波浪変動圧の位相を考慮した設計荷重について, 西部造船会々報, Vol.59 (1980), p.83

表7.2.1 供試船の損傷の特徴

| タイ° | 損傷範囲および内容                                                                                                               | No.3 タンク 損傷発生状況 |         |          | No.4 タンク 損傷発生状況 |                                                                                                  |                                                | 特 徴 | 進展量 |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------|----------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-----|-----|
|     |                                                                                                                         | センタ-タンク         | ウイングタンク | センタ-タンク  | ウイングタンク         | センタ-タンク                                                                                          | ウイングタンク                                        |     |     |
| C   | <br>Bottom TRANS<br>IN CR. TANK      | 発生なし            | —       | 全トランスに発生 | —               | 1) LONG. BHP 到達後<br>すみ肉に沿う<br>2) すみ肉に沿った後の<br>進展量は小さい。                                           | 70 ~ 150 mm                                    |     |     |
| A   | <br>Bottom TRANS<br>IN CR. WING TANK | 頻 発             | 頻 発     | 頻 発      | 頻 発             | 1) No.3 タンクはスチール<br>切断に到る。<br>2) No.4 タンクは切断に到らない<br>3) No.4 タンクのカラー-プレート<br>付きの損傷は少ない。          | 1) No.3 タンク<br>切断<br>2) No.4 タンク<br>約 50 mm 程度 |     |     |
| D   | <br>Bottom TRANS<br>IN CR. TANK      | 全トランスに発生        | —       | —        | —               | 1) スチール-の切断も<br>伴っている。<br>2) カラー-プレートの有無に<br>無関係に発生                                              | 400 ~ 650 mm                                   |     |     |
| E   | <br>Bottom TRANS<br>IN CR. WING TANK | —               | —       | 全トランスに発生 | —               | 1) スチール-の切断も<br>伴っている。<br>2) カラー-プレートの多いスロート<br>から発生<br>3) 進展量が大きく、隣接の<br>ウイングタンクに貫通する<br>場合がある。 | 700 ~ 1300 mm                                  |     |     |

ボットムトランスの亀裂のタイプおよび分布



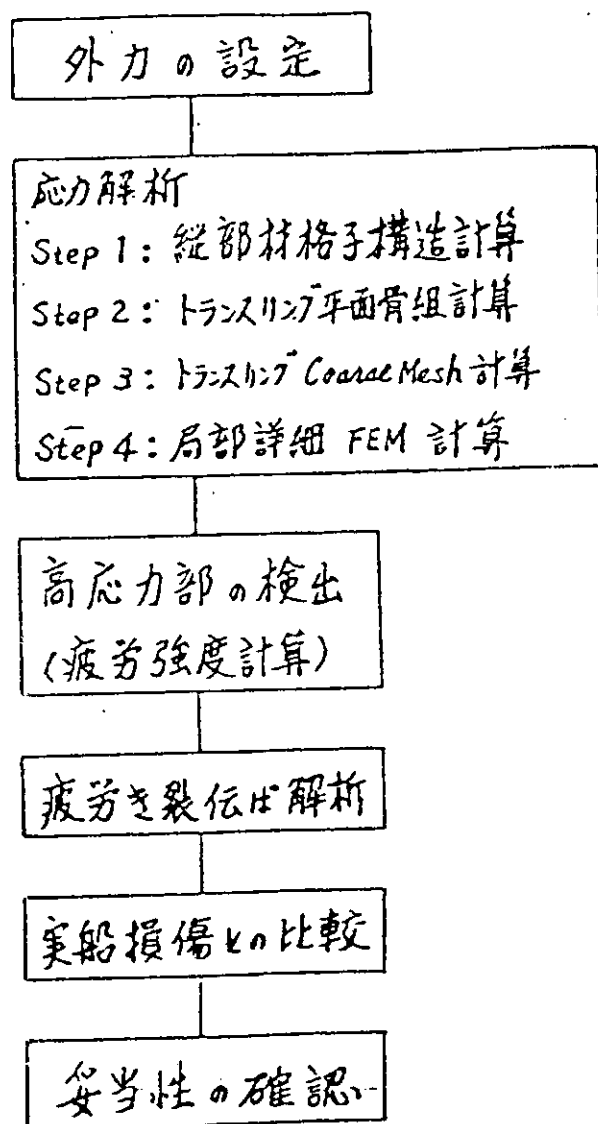


図7.2.1 破壊力学解析のフローチャート

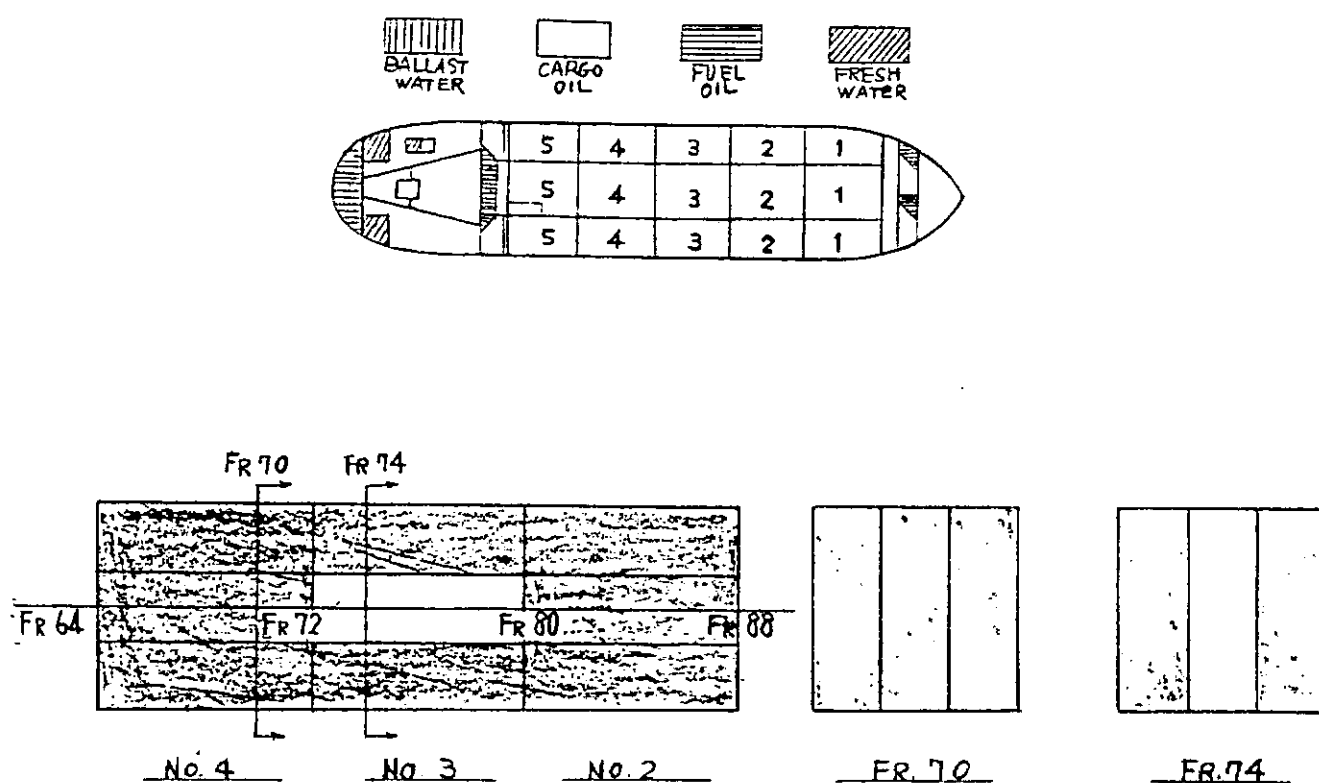
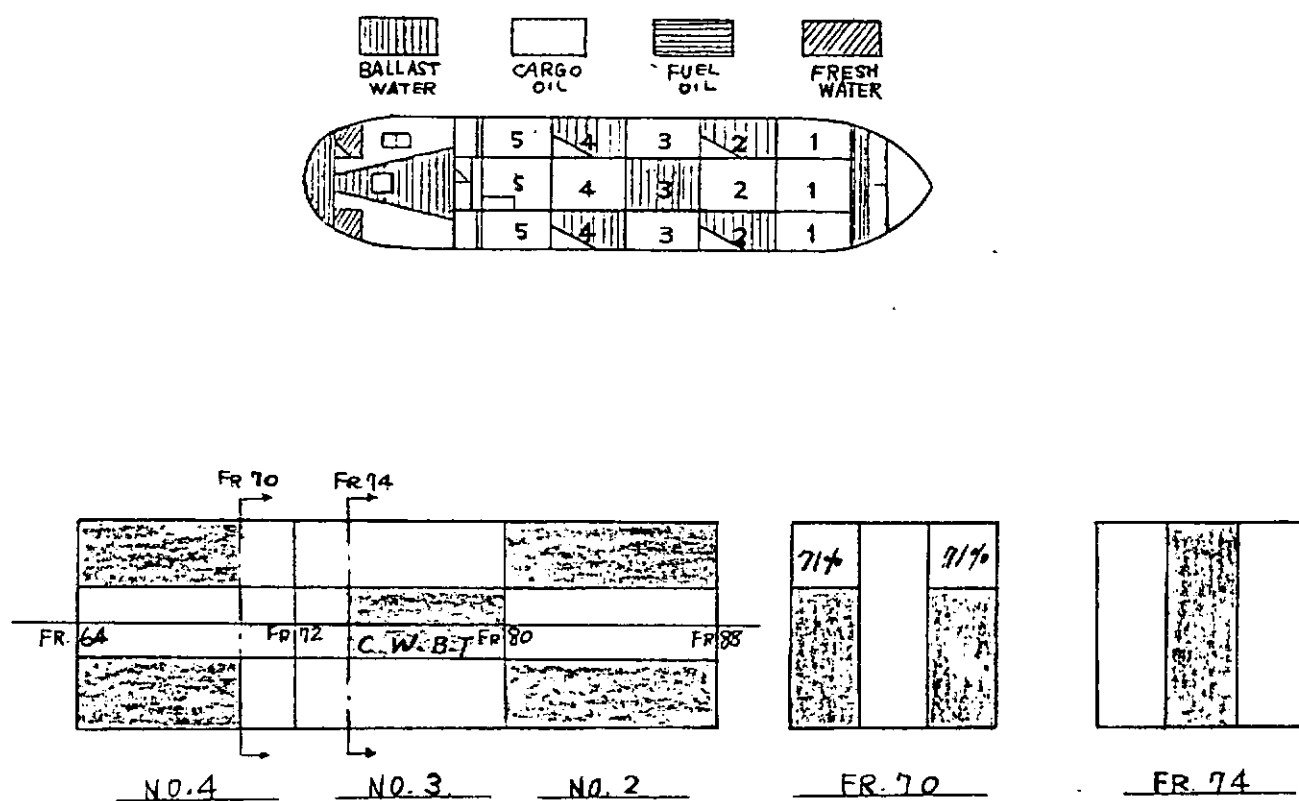
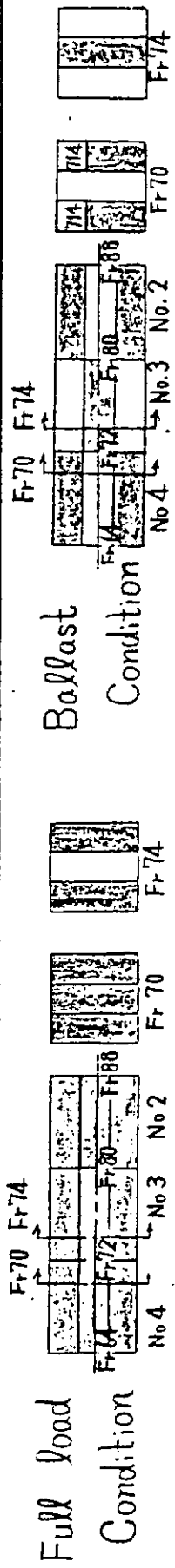
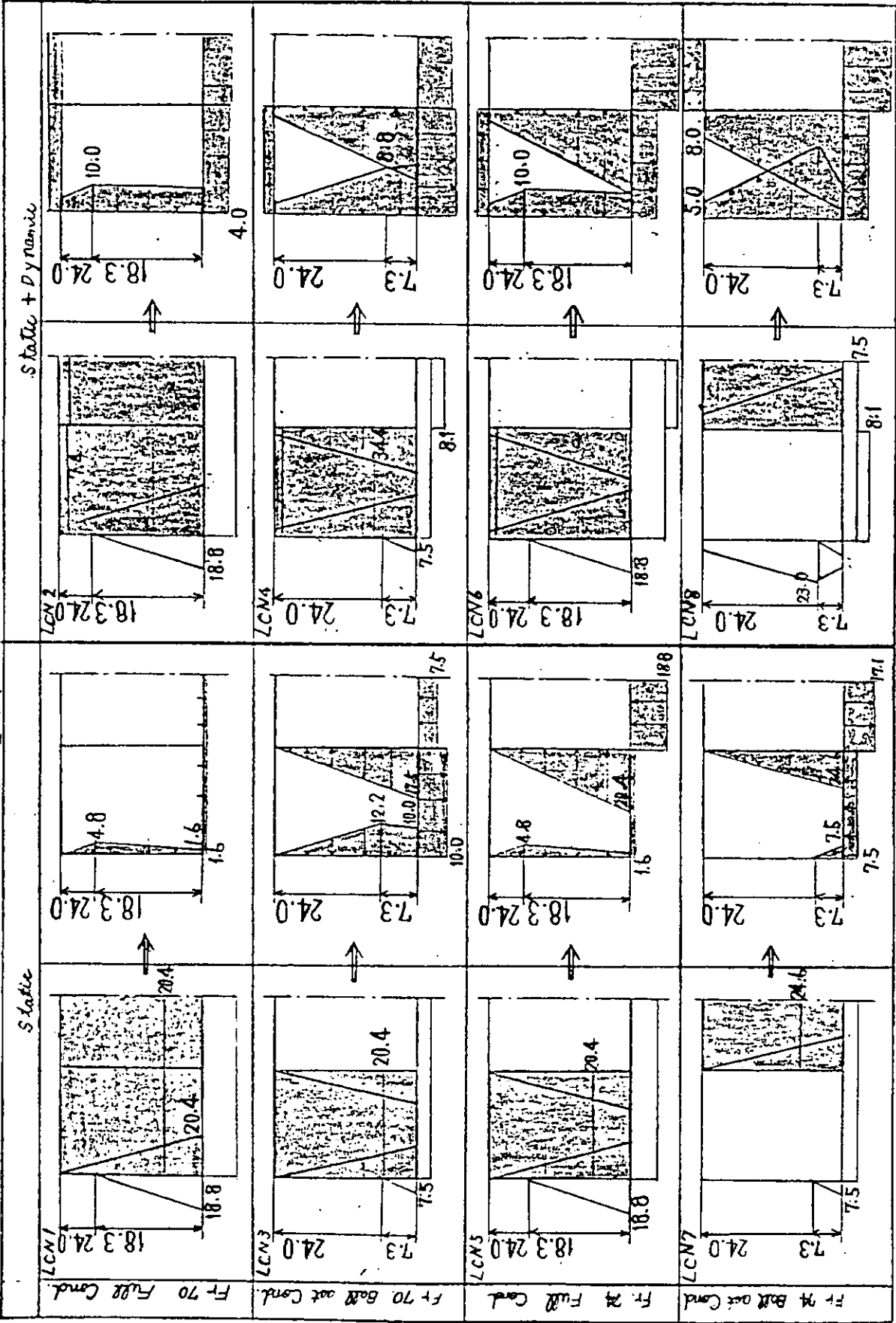
FULL LOAD CONDITIONBALLAST CONDITION

図7.2.2 供試船の積み付け状態

表 7.2.2 設定外力



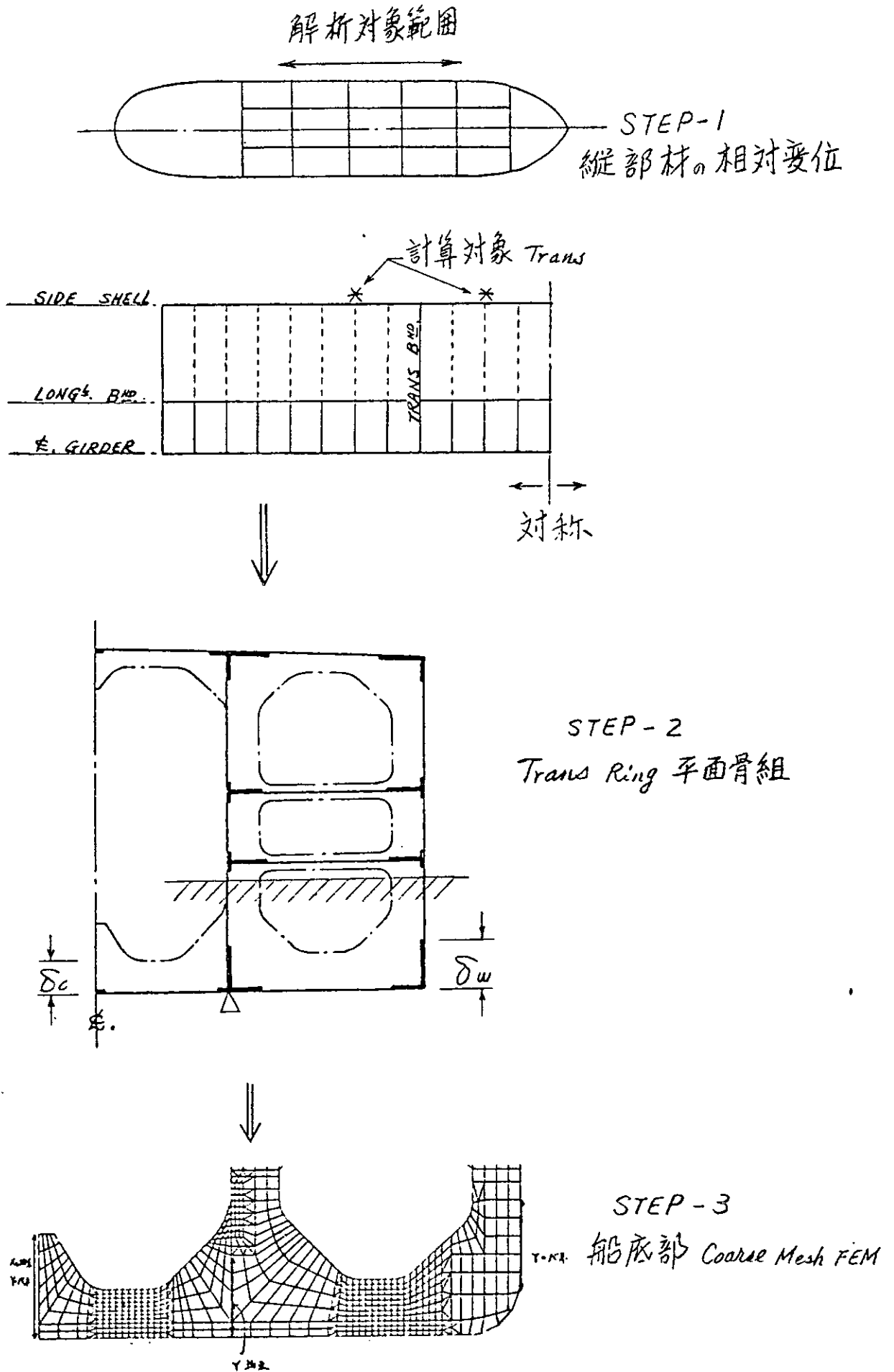


図7.2.3 き裂対象部全体解析計算ステップ

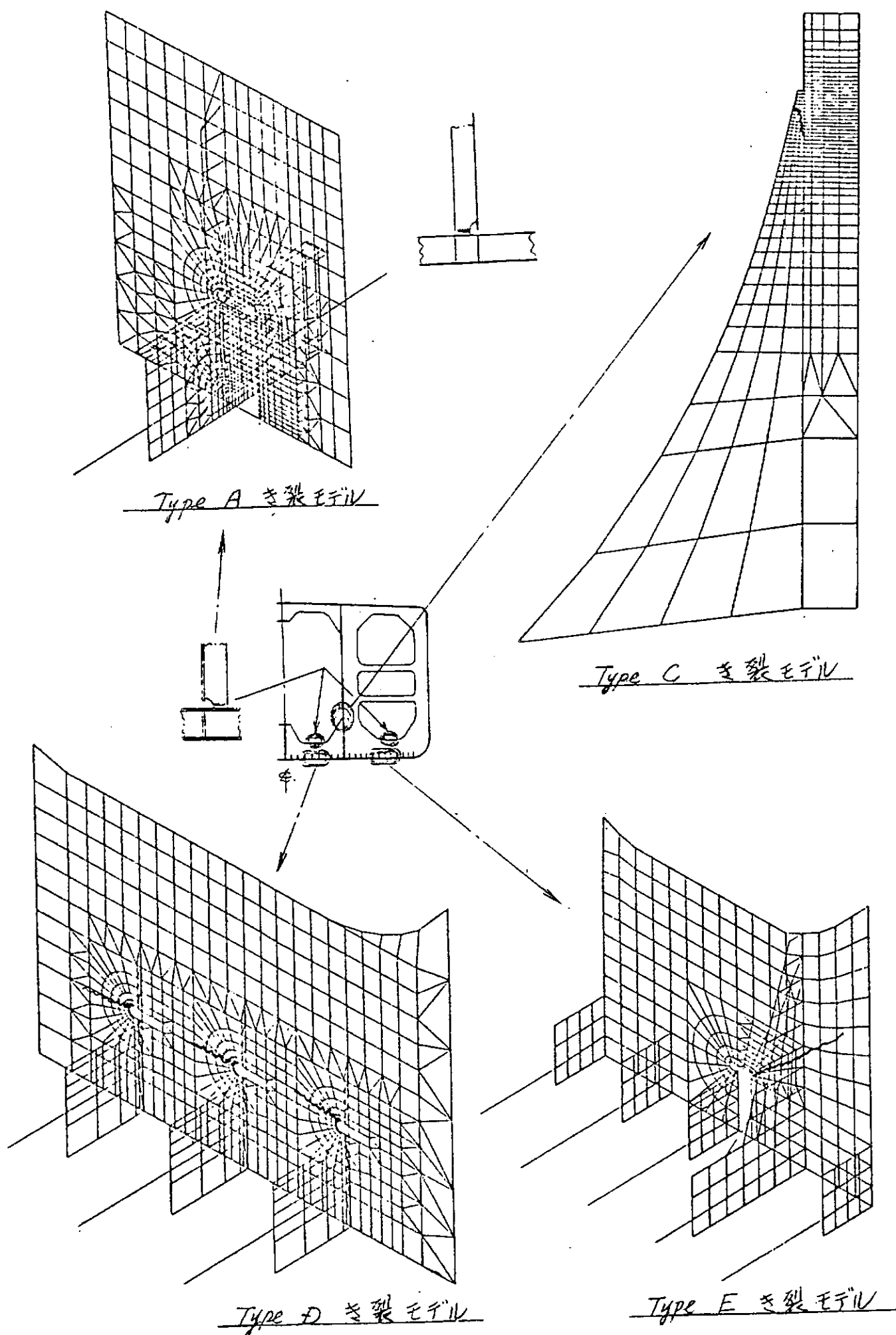
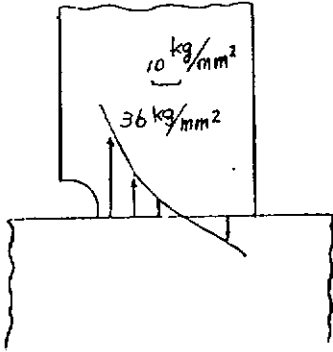
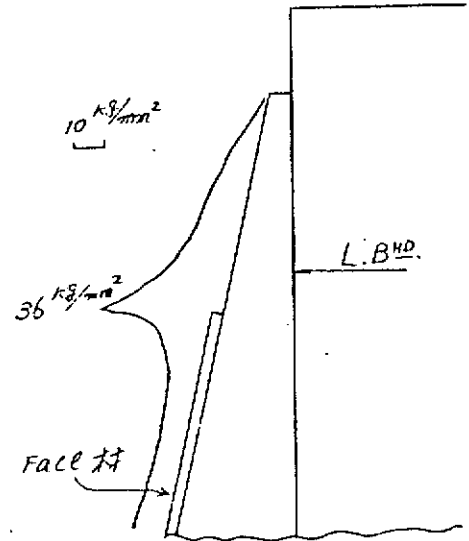


図7.2.4 解析対象き裂の局部応力詳細 FEM モデル



Type A ステッパ-基部の応力  
図 7.2.5



Type B ブラケット縁部に沿う応力  
図 7.2.6

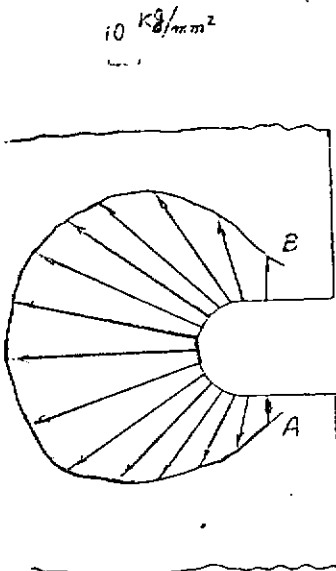
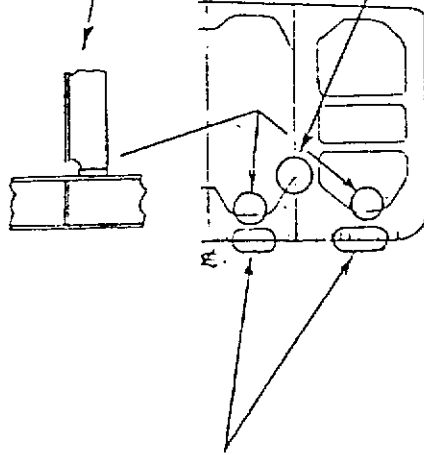


図 7.2.7

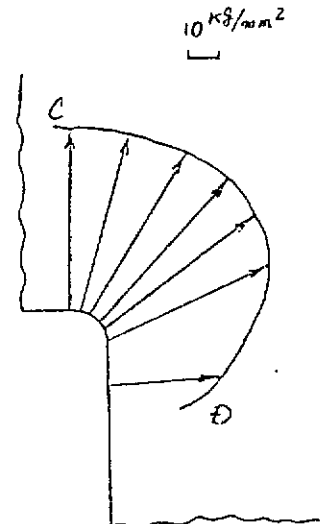
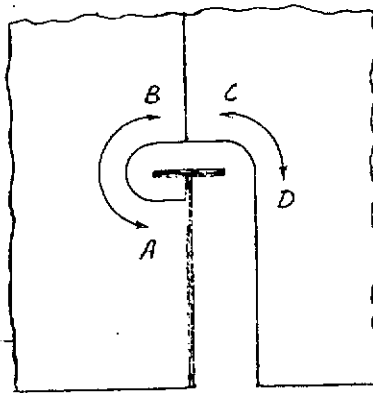


図 7.2.8

Type D & E スロットコーナー部の応力

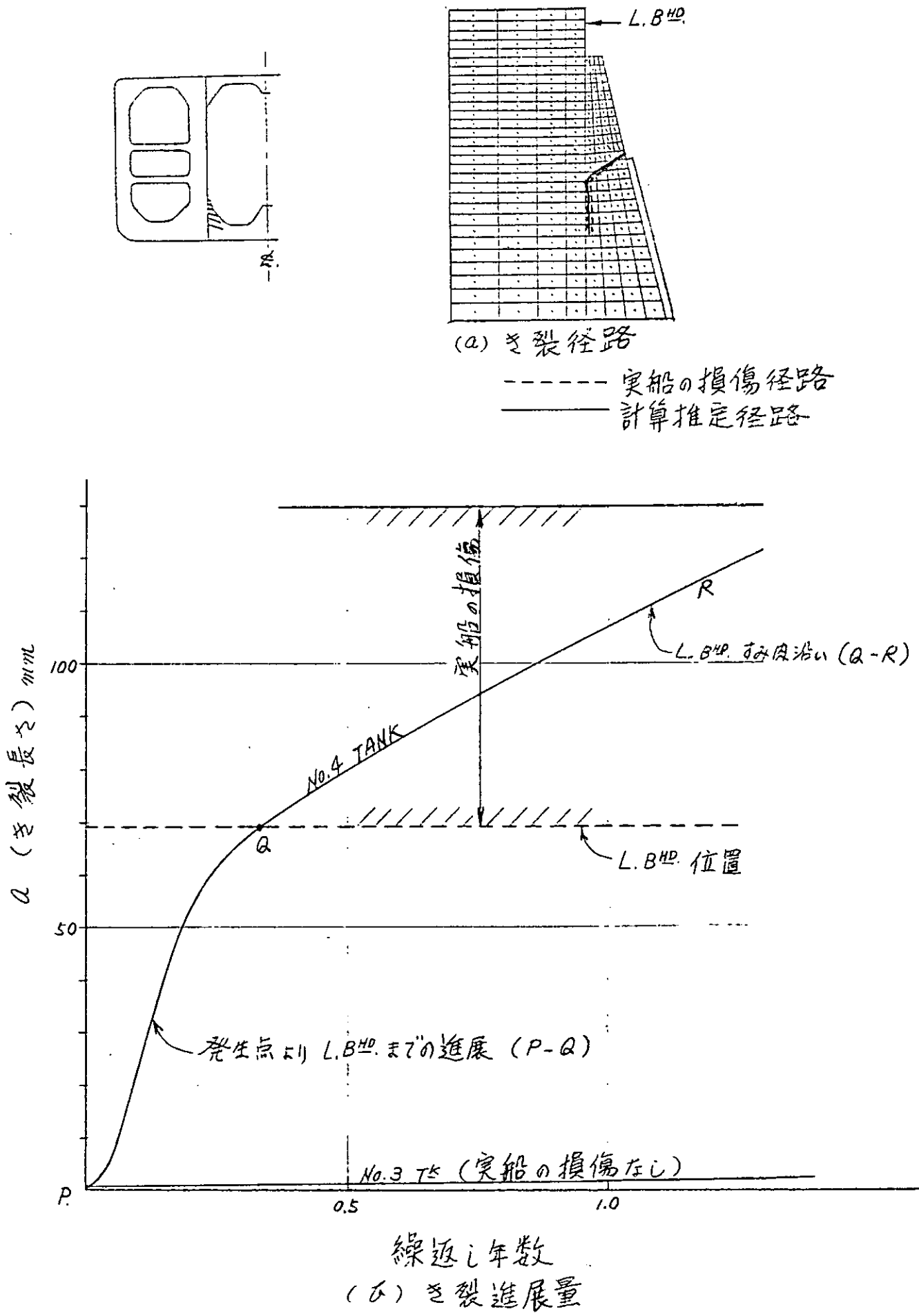


図7.2.10 Type Cのぎ裂の実船の損傷と計算値の比較

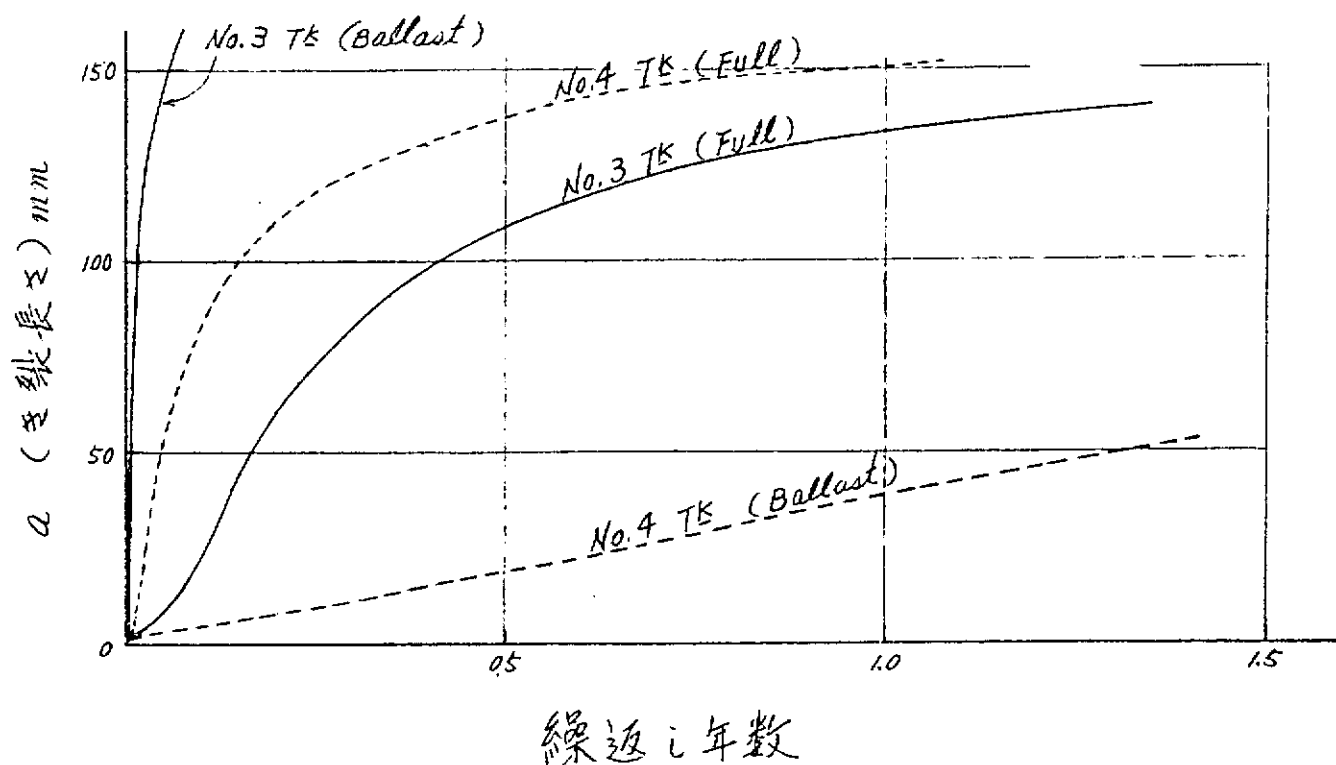


図7.2.9 Type A の損傷を引き起す荷重要因

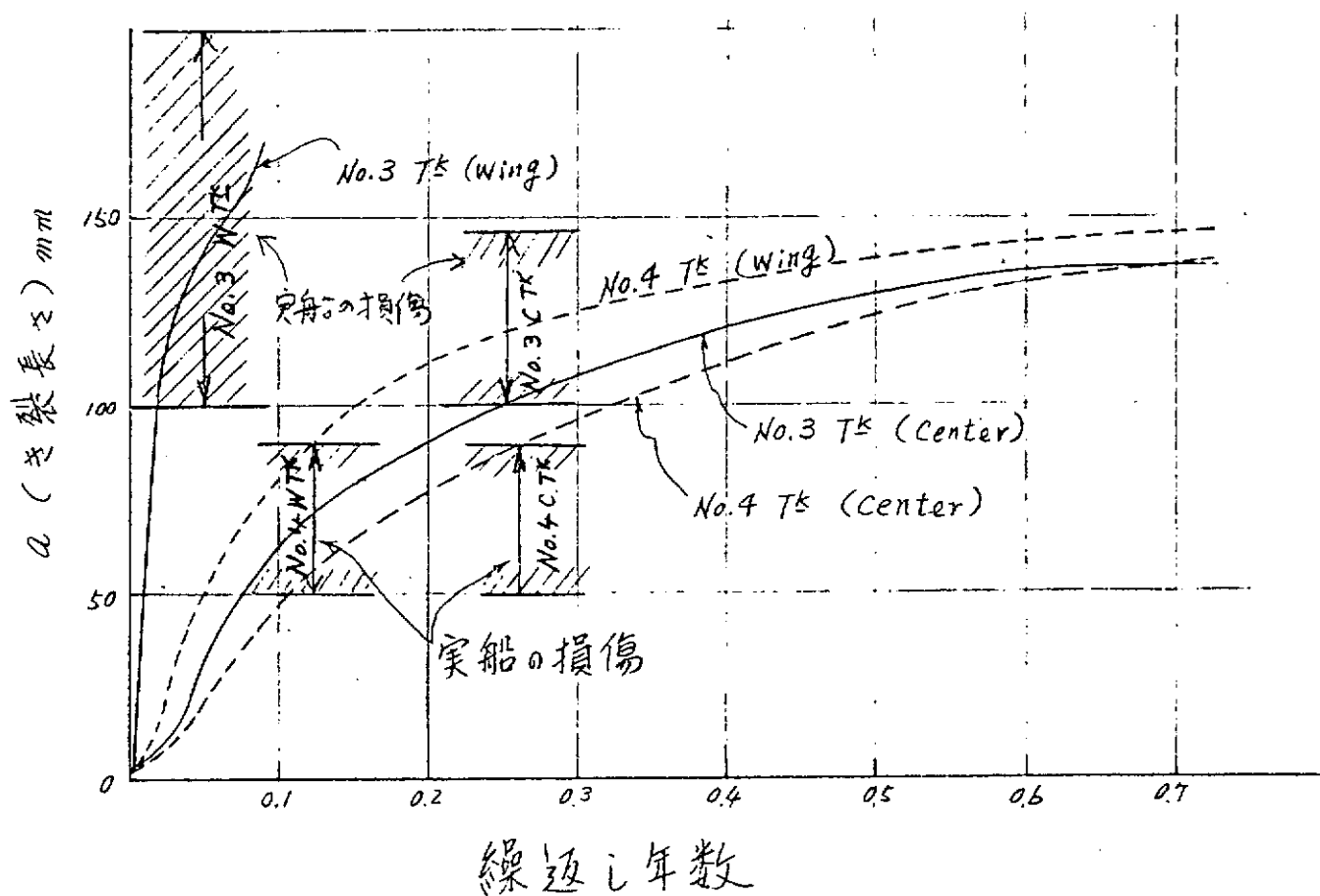


図7.2.11 Type A 損傷の実船損傷と計算値の比較

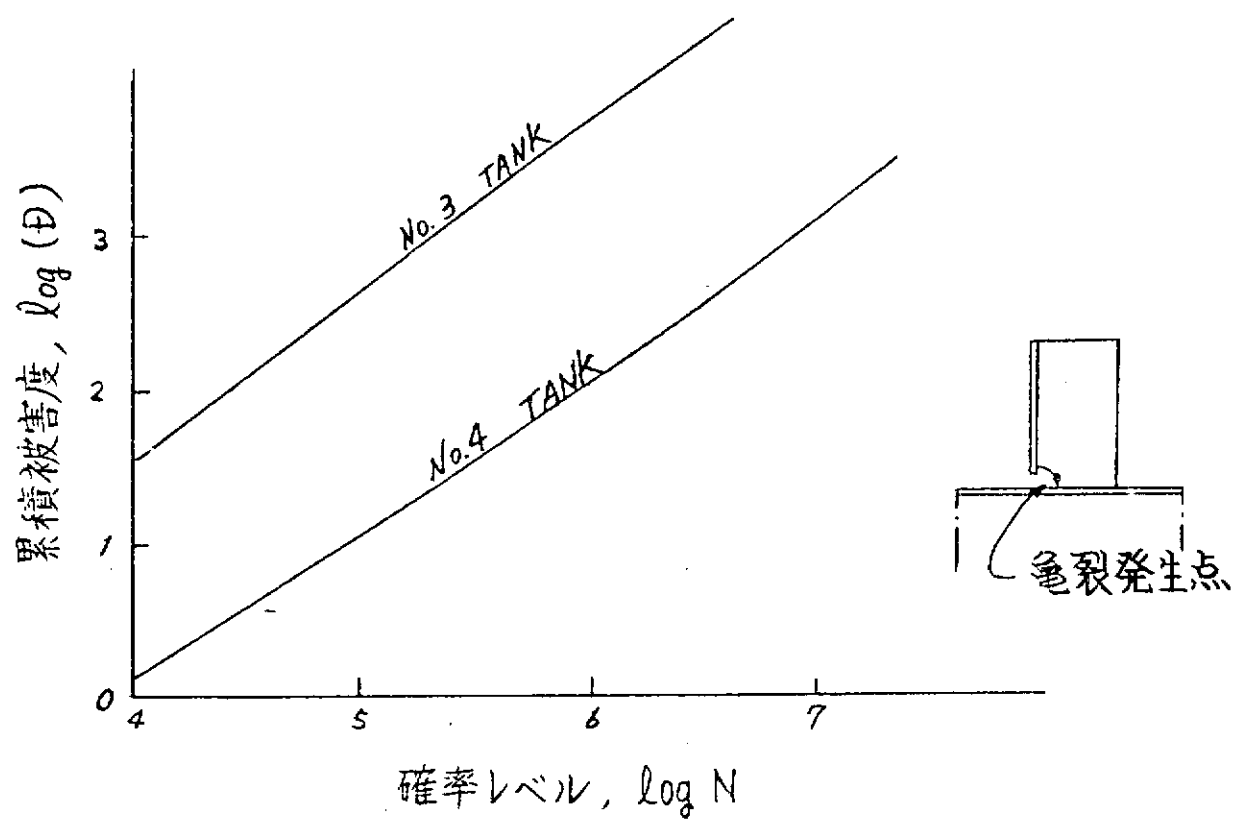
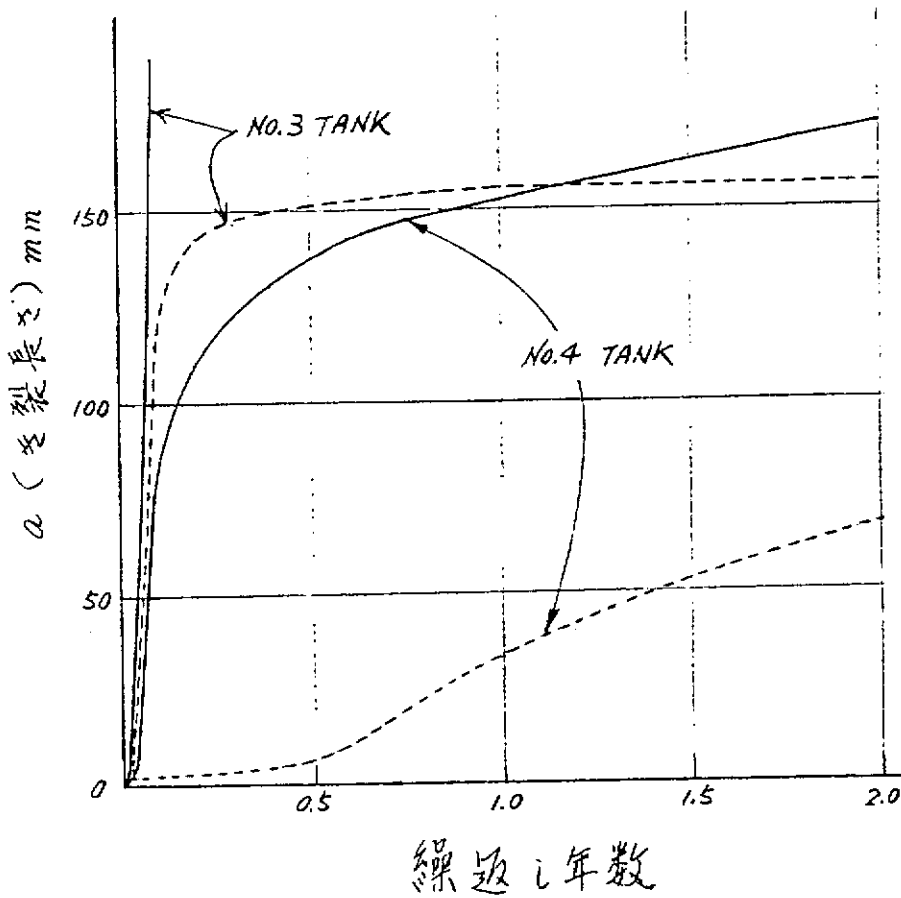
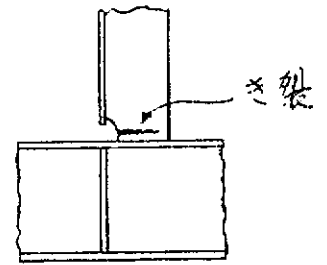


図7.2.12 Stiff.基部の亀裂に対する疲労累積被害度

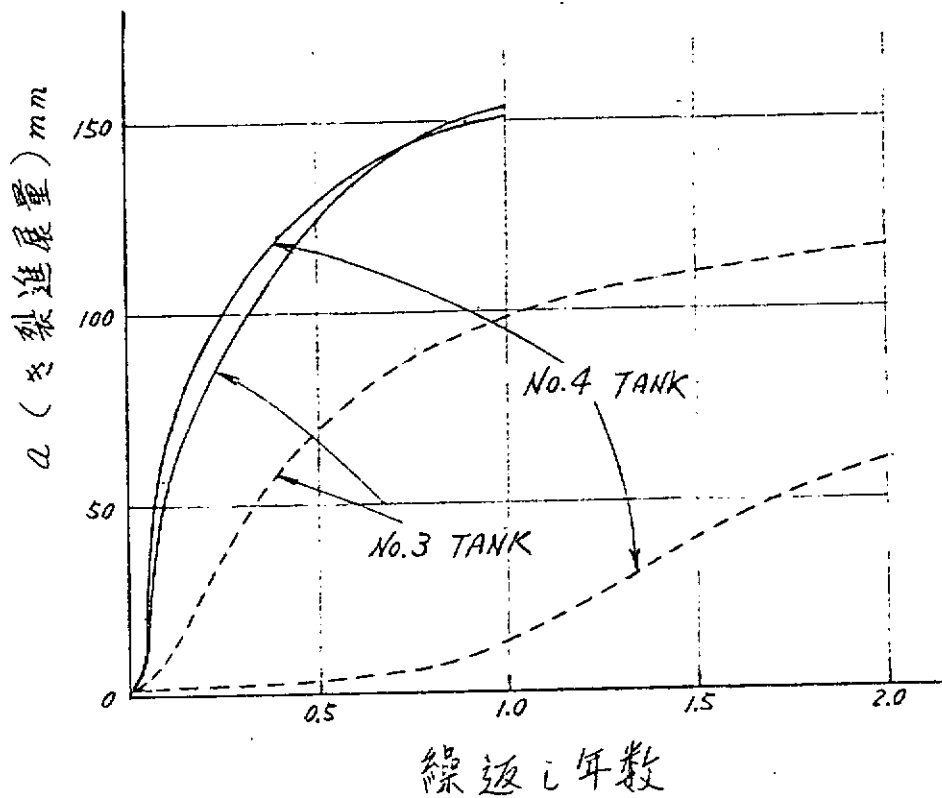


(a) Wing Tank

— Collar 無し  
 - - - Collar 有り



Type A



(b) Center Tank

— Collar 無し  
 - - - Collar 有り

図7.2.13 Type Aの損傷に対するカラークラップの有無のき裂進展量への影響

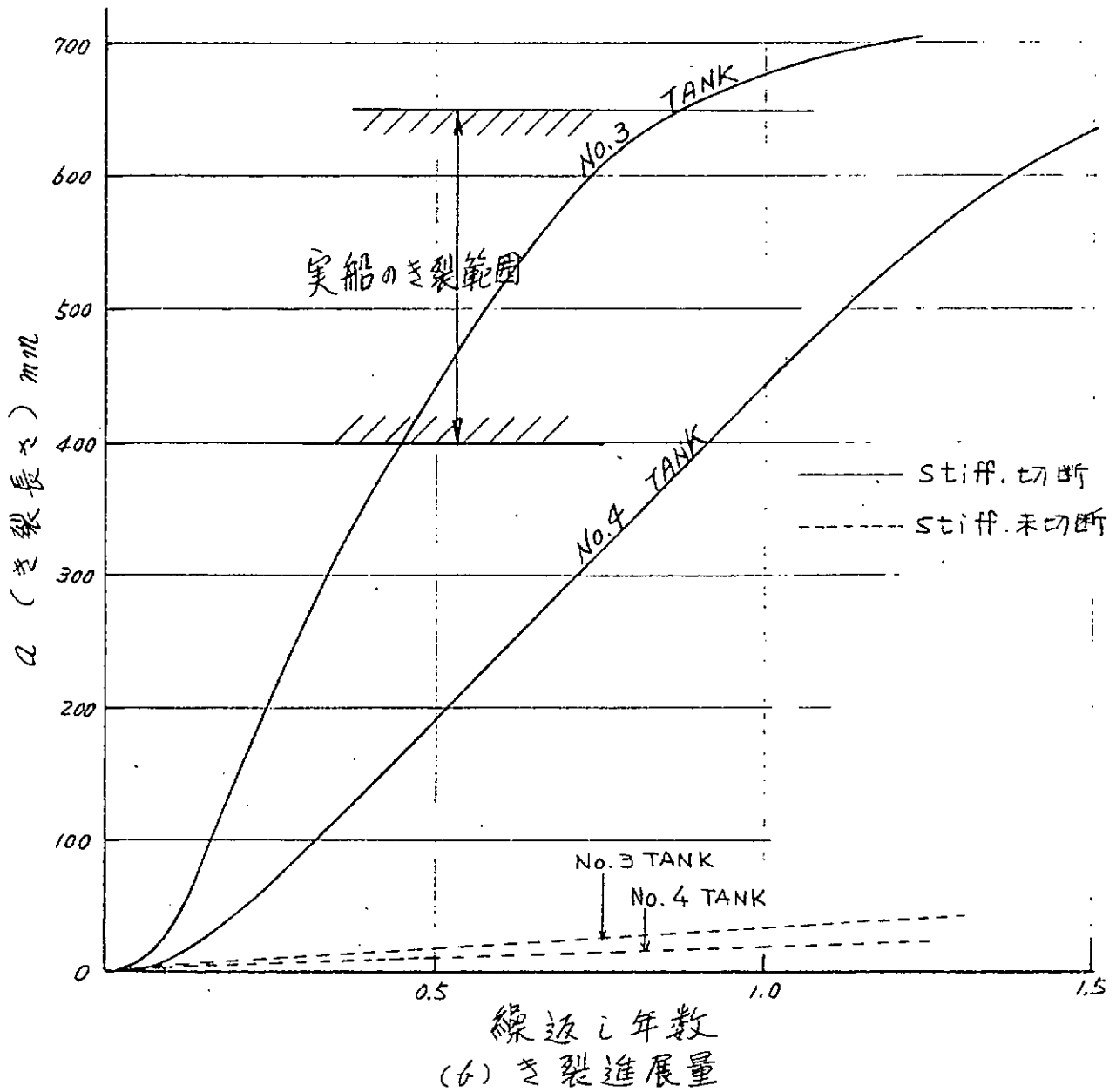
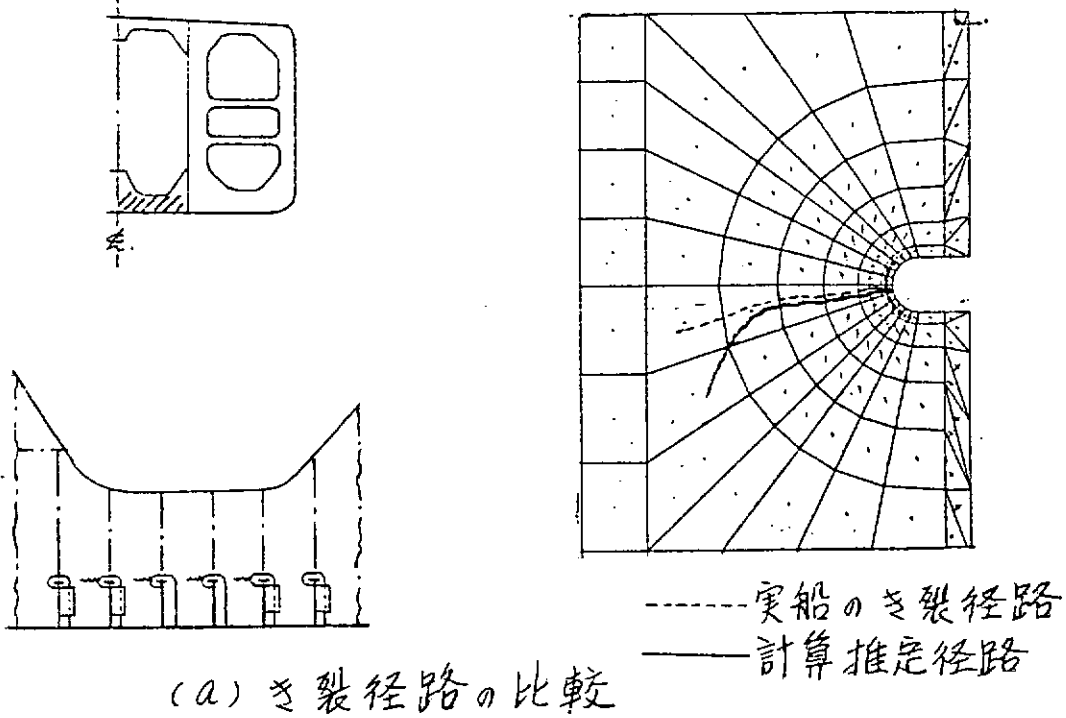
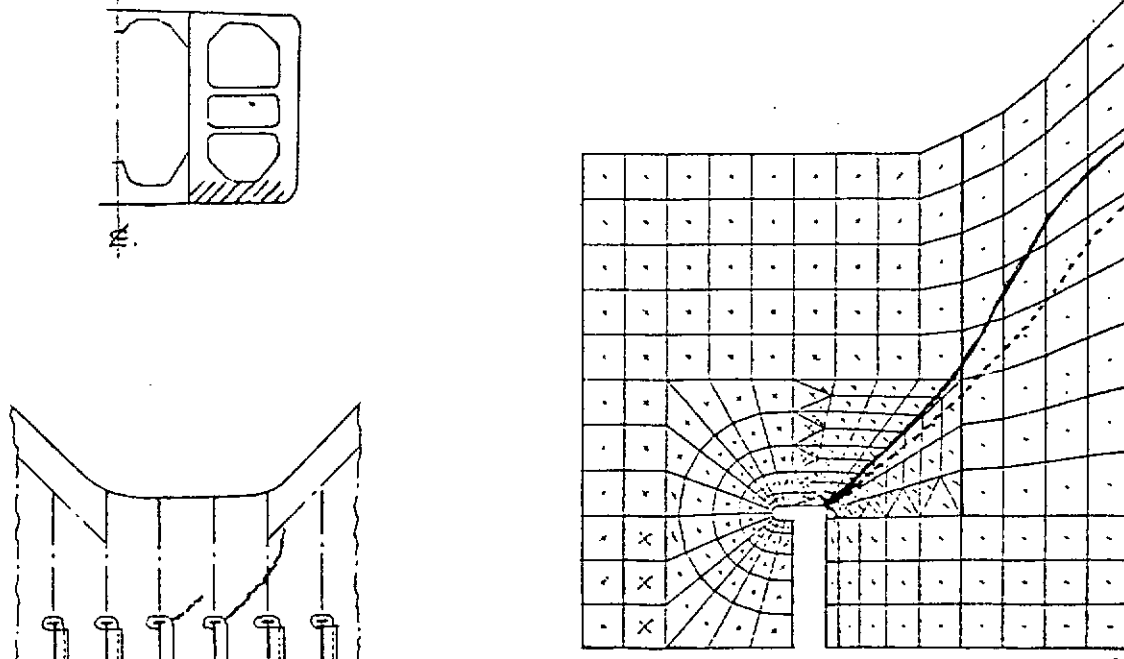


図7.2.14 Type Dのぎ裂の実船損傷と計算値の比較



(a) き裂進展経路

----- 実船のき裂経路  
 ——— 計算推定経路

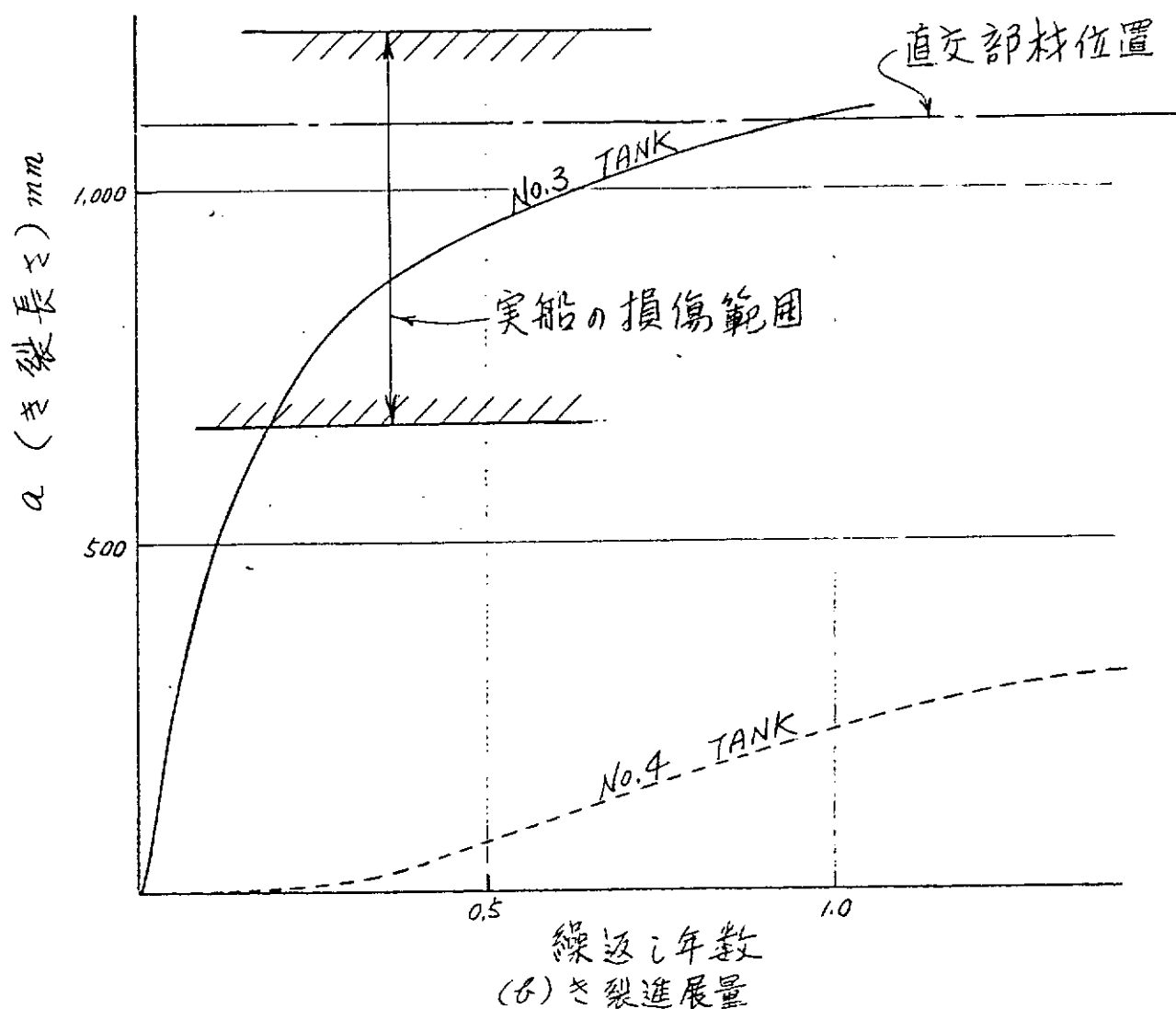


図7.2.15 Type Eのき裂の実船の損傷と計算値の比較

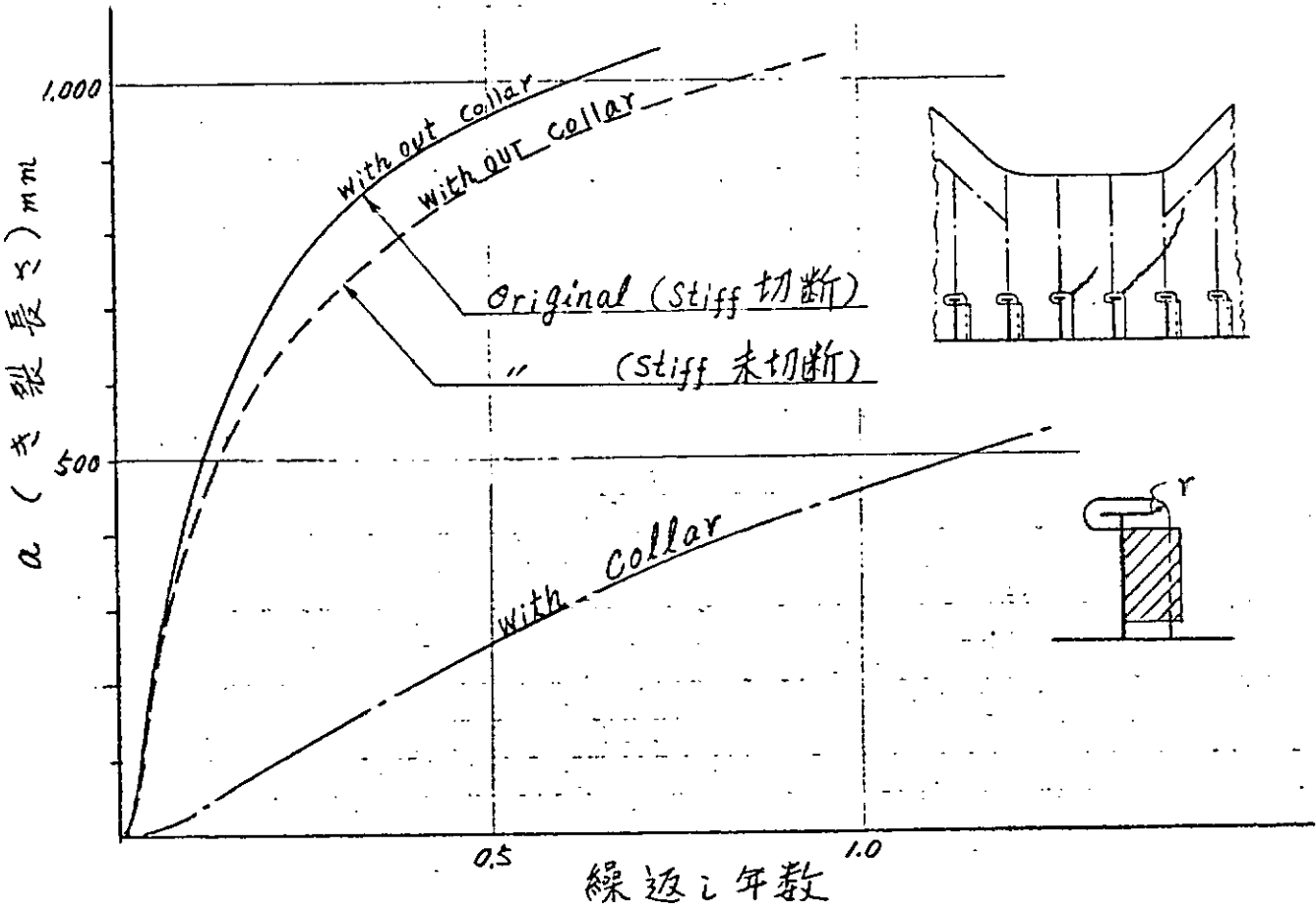


図7.2.16 Collar Plate の影響

## 7.3 外板および隔壁板の疲労破壊強度の検討

### 7.3.1 目 的

船舶では機能上、水密または油密の外板および隔壁板は重要な構造部材である。従って、それらが何らかの原因で破損し、板をき裂が貫通すると、油流出の場合は環境汚染問題を起こし、浸水の場合は船の復原性の低下を起こして、重大な事故に発展する危険性をはらんでいる。

一般船舶の外板および隔壁板の設計では、特に板の破断強度に対する考慮ははられていないので、ここでは、波浪荷重を受ける一般船舶の外板および隔壁板の板厚貫通までの疲労破壊強度を線形破壊力学を応用して検討する。

### 7.3.2 検討方法

#### (1) 対象部材および解析モデル

3.2 の計算対象範囲の設定の構造分類から、外板および隔壁板を表 7.3.1 に示す A (突合わせ継手)、B (リブ隅肉継手)、C (T 継手)、D (リブ十字継手) の 4 つの基本要素 (継手) に整理した。

表 7.3.1 には、それぞれの基本要素に対し、対象構造部材例、対象荷重の種類、損傷例を示す。荷重は大別すると、軸引張荷重と面外曲げ荷重の 2 つに分けられる。

損傷例で見ると、波浪荷重を対象にすると、B (リブ隅肉継手) の場合には構造的な不連続と隅肉帯締との相乗効果により損傷が多い。

さらに、表 7.3.1 には板厚方向のき裂の応力拡大係数を求めるために行う F.E.M. 応力解析モデルについても示した。

この応力解析モデルは A、C、D は板厚断面の 2 次元平面歪モデルで、溶接部の影響を調べ、B は立体板モデルで溶接部はモデル化せず構造的な不連続を調べる。

また、き裂を想定する板厚は 20 mm に統一し、溶接継手からのき裂は全て止端部から発生すると仮定する。

A (突合わせ継手) と D (リブ十字継手) の場合は板の表裏から同時にき裂が進展するとし、C (T 継手) の場合は板表面の片側からき裂は進展する考える。

#### (2) 応力拡大係数の計算法

6 章にのらう、溶接継手部での表面き裂の板厚方向の K 値を次式で与える。

$$K = \frac{M_K \cdot MF}{E(k)} \sigma \sqrt{\pi b} \quad (7.3.1)$$

ここに、 $b$  …… 板厚方向のき裂長さ

$E(k)$  …… 第 2 種完全楕円積分 ( $k = \sqrt{1 - (b/a)^2}$ )

$a$  …… 板表面でのき裂長さの半分

$M_K$  …… 有限板幅の影響係数

C (B) モデル: 6 章の A. S. Kobayashi の式

A、D モデル: Rice 法<sup>1)</sup>を応用し、板の両側からの表面き裂の K 値を計算し次の近似式を求めた。(  $h$  は板厚 )

$$\begin{aligned} M_K = & 1.16 - 0.71(b/h) - 0.56(b/a) - 2.71(b/h)(b/a) + 0.54(b/h)^2 \\ & + 1.48(b/a)^2 + 1.38(b/h)^3 + 0.06(b/h)^2(b/a) + 1.95(b/h)(b/a)^2 \\ & - 1.08(b/a)^3 \quad (7.3.2) \end{aligned}$$

MF …… 応力集中の影響係数

応力分布が  $\sigma_m(x) = \sigma_0 \sum_{m=0}^4 c_m x^m$  で与えられた場合の修正係数:

$$MF = \sum_{m=0}^4 \frac{k_m}{1.1215} c_m \cdot b^m \quad \text{..... (7.3.3)}$$

$k_m$  ..... 3.5節参照。

(7.3.1)式の $E(k)$ 、 $M_K$ は表面き裂形状 $b/a$ の関数であるため、き裂形状はMaddox<sup>2)</sup>による隅肉溶接部の実験値の平均線とし、 $a = 3355 + 129b$ と仮定する。

### (3) 破断応力の計算法

疲労き裂伝播則の中の次式を使う。

$$\frac{db}{dN} = C (\Delta K)^m \quad \text{..... (7.3.4)}$$

ここに、 $b$  ..... 板厚方向のき裂長さ

$N$  ..... 繰返し数

$\Delta K$  .....  $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$  に対する $K$ 値

$m, C$  ..... 材料定数(6章にしたがい、 $m = 3.2$ ,  $C = 1.35 \times 10^{-10}$ とする。)

$K$ 値を(7.3.1)の表示にし、変形すると表面き裂が板厚を貫通するまでの疲労破壊強度は次式で与えられる。

$$\sigma_f^m \cdot N_f = \frac{1-R}{C} \int_{b_0}^h \frac{db}{\left[ \frac{M_K \cdot MF}{E(k)} \sqrt{\pi b} \right]^m} \quad \text{..... (7.3.5)}$$

ここに、 $b_0$  ..... 初期き裂長さ

$h$  ..... 板厚

$\sigma_f, N_f$  ..... 表面き裂が板厚を貫通するまでの破断応力、破断繰返し数

波浪荷重の場合は、累積頻度分布を片対数直線と仮定し、20年間( $N = 10^6$ )に対する応力の最大期待値の等価繰返し数を計算すると次式で与えられる。

$$N_f = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \left\{ 10^{\frac{i-1}{n} \log N} - 10^{\frac{i-1}{n} \log N} \right\} \left( \frac{2n-2i+1}{2n} \right)^m = 6.93 \times 10^4 \quad \text{..... (7.3.6)}$$

従って、(7.3.5)式の右辺は初期き裂長さ $b_0$ を仮定すると定数となり、S-N線図の形式となっている。

また、(7.3.6)式の $N_f$ を(7.3.5)式に代入すると20年間で板厚を貫通する破断応力の最大期待値が求まる。

## 7.3.3 疲労破壊強度の計算

### (1) 溶接継手部の応力分布と $K$ 値

表 7.3.1 に示す応力解析モデルを使って、各基本要素の最大主応力分布をF.E.M.により計算した結果を図 7.3.1 ~ 図 7.3.5 に示す。

突合わせ継手の場合は余盛角を $30^\circ$ とし、Lawrence<sup>3)</sup>による計算結果も並記した(図 7.3.1)がほぼ同等の値となっている。

また、図 7.3.3 のリブ隅肉継手の場合はリブ板の高さを200, 500, 1000mmと変化させると附加物との接合点で応力集中係数が変化する。

次に、上記の応力分布を用いて、(7.3.3)式の $MF$ を計算し、 $M_K \cdot MF = K \cdot E(k) / \sigma \sqrt{\pi b}$ の形で $K$ 値を計算した結果も図 7.3.1 ~ 図 7.3.2、図 7.3.4 ~ 図 7.3.5 に示す。

リブ隅肉継手の $M_K \cdot MF$ はT継手と同じであるが、公称応力が図 7.3.3 の応力集中の分だけ大きくなっているとして $K$ 値を求める。

T継手の場合に、6章の $MF$ と比較してみたが、よく合っている(図 7.3.4)。

## (2) 疲労試験データによる検証

前節による検討方法の検証を行うために、( 7.3.5 )式で計算される S-N 線図を疲労試験データと比較した結果を図 7.3.6 ~ 図 7.3.9 に示す。

板厚を  $10^{\text{mm}}$  として、初期き裂長さ  $b_0 = 0.01^{\text{mm}}$  とすると、各種継手形式、各荷重形式に対して実験データのほぼ平均線を与えることが分かる。

実際の溶接継手部の初期欠陥寸法は  $0.1 \sim 0.5^{\text{mm}}$  程度であるといわれているが、これは ( 7.3.5 ) 式では微小き裂の時期のき裂の停留などを考慮していないためであると思われる。

以上の検討により、以下の計算では  $b_0 = 0.01^{\text{mm}}$  と仮定する。

## (3) 溶接継手部の疲労破断応力

( 7.3.5 )、( 7.3.6 ) 式から、表面き裂が、20 年間で板厚を貫通する疲労破断応力を各基本要素各荷重形式について計算した結果を図 7.3.10 に示す。

この図で、リブ隅肉継手 (B) の場合のリブ板高さは  $200^{\text{mm}}$  とした。

また、引張荷重の場合は実際の船への負荷に合わせて、両振り荷重で計算した。図 7.3.10 を見ると、板厚の増加につれて、破断応力は増加するが、それほど大きくないことが分かる。また、引張荷重の方が、曲げ荷重より低目の破断応力となっている。

継手形式による優劣はリブ隅肉継手、リブ十字継手、T 継手、突合わせ継手の順に破断応力は大きくなっている。

波浪荷重によりリブ隅肉継手に損傷例が多いという表 7.3.1 の実際例を裏付けている。

## 7.3.4 適用例

船の外板および隔壁板の安全性評価を行う場合には、これまで求めた疲労破壊強度と同時に船の航行中に生じる実働応力も知る必要がある。

しかし、この実働応力は船の種類、大きさ、場所によって異なり、汎用性のあるものはない。

従って、ここでは適用例として、20 万トンタンカーの外板および隔壁板について、疲労破断応力と実働応力とを対比させて計算したものを、図 7.3.11 ~ 図 7.3.12 に示す。

実働応力は引張応力については、いわゆるトータルシステム<sup>4)</sup>による北大西洋海域での 20 年間の最大期待値を取り、曲げ応力は NK LNG 船基準により波浪荷重を求め防撓材で囲まれるパネルにそれらの荷重がかかるとして求めた。

図 7.3.11 ~ 図 7.3.12 から、全て破断応力が実働応力を上まわっているが、リブ隅肉継手 (B) の場合はガングラム部の高応力ではあまり余裕は大きくないことが分かる。その理由は実働応力の推定値が大きすぎることも一因と思われる。

## 参 考 文 献

- 1) J.R.Rice, N.Levy, "The Part-Through Surface Crack in an Elastic Plate", Journal of Applied Mechanics, March 1972, pp.185-194
- 2) S.J.Maddox, "A Fracture Mechanics Analysis of The Fatigue Behaviour of a Fillet Welded Joint", The Welding Institute Research Report E/50/72, January 1973, pp.1-38
- 3) F.V.Lawrence, "Estimation of Fatigue-Crack Propagation Life in Butt Welds", Welding Journal Vol.52 No.5, May 1973, pp.212-220
- 4) 秋田好雄外, 「船体強度解析に関するトータルシステム」日本造船学会論文集, 第135号, 1974年6月, pp.229~238

表 7.3.1 外板および隔壁板の疲労破壊強度の検討

| 区分 | 対象構造部材例                                                                                                                | 対象荷重の種類                                   | 損傷例                                                        | 基本要素 | 応力解析モデル |
|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------|---------|
| A  | 船壳外板<br>船内内板<br>母板<br>内板<br>縦通隔壁板<br>横通隔壁板                                                                             | 船体縦曲力<br>波浪荷重<br>バウ・スタブ・スクリュー             | 破断と破断                                                      |      |         |
| B  | 隔壁板-初段0.6t<br>H-1100 PL-0.6t<br>H-1100 PL-0.6t<br>H-1100 PL-0.6t<br>H-1100 PL-0.6t<br>H-1100 PL-0.6t<br>H-1100 PL-0.6t | 船体縦曲力<br>波浪荷重<br>9=7.0t/㎡<br>バウ・スタブ・スクリュー | 多(1)<br>破断と破断<br>破断と破断<br>破断と破断<br>破断と破断<br>破断と破断<br>破断と破断 |      |         |
| C  | 外板・母板と<br>初段・縦通板<br>700-7.0t/㎡                                                                                         | 船体縦曲力<br>波浪荷重<br>9=7.0t/㎡<br>バウ・スタブ・スクリュー | 比較的少(1)<br>破断と破断<br>破断と破断<br>破断と破断                         |      |         |
| D  | 隔壁板-初段0.6t<br>母板<br>C-1100 PL-0.6t<br>H-1100 PL-0.6t                                                                   | 船体縦曲力<br>9=7.0t/㎡                         | 破断と破断                                                      |      |         |

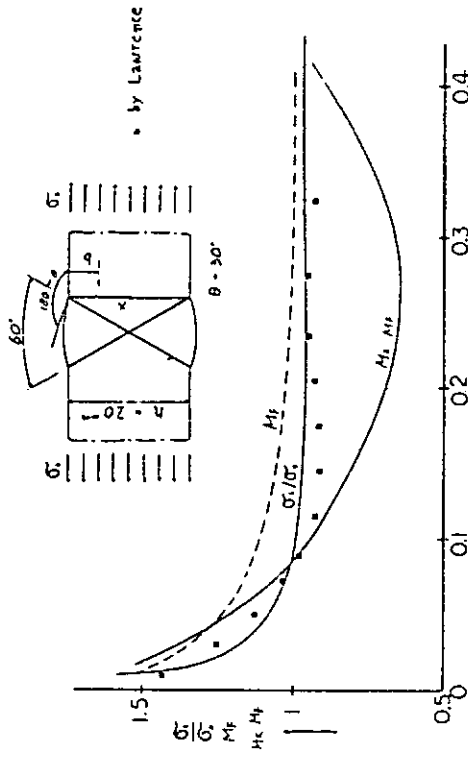


図 7.3.1 突合せ継手の主応力, K 値 (引張荷重)

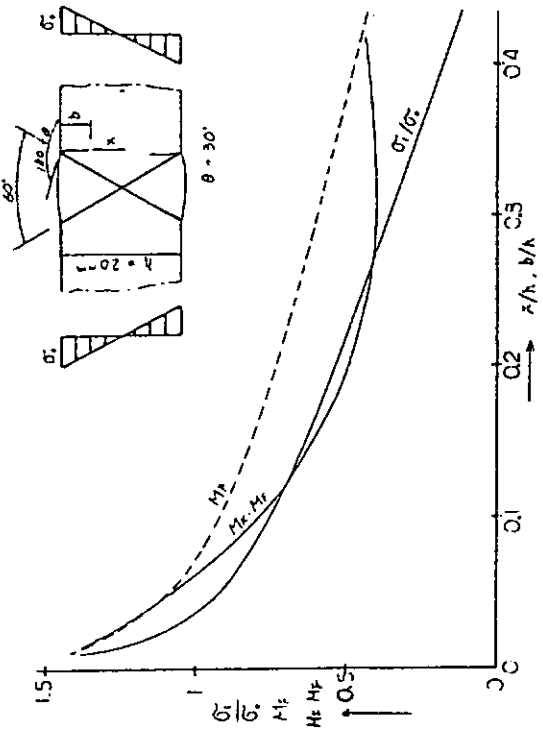


図 7.3.2 突合せ継手の主応力, K 値 (曲げ応力)



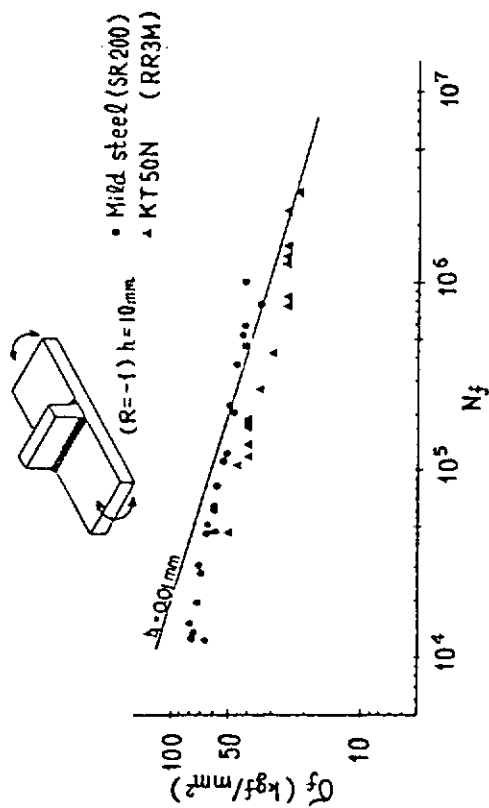


図 7.3.7 T 継手 (曲げ荷重) の  $\sigma_f$ - $N_f$  線図

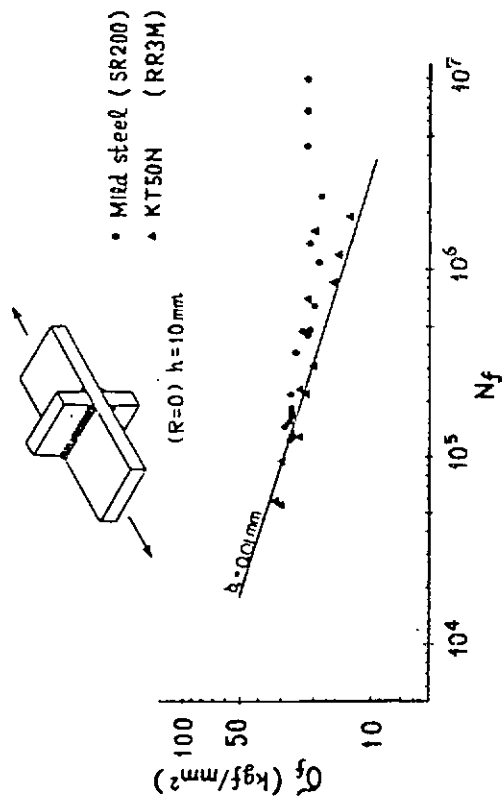


図 7.3.8 リブ十字継手 (引張荷重) の  $\sigma_f$ - $N_f$  線図

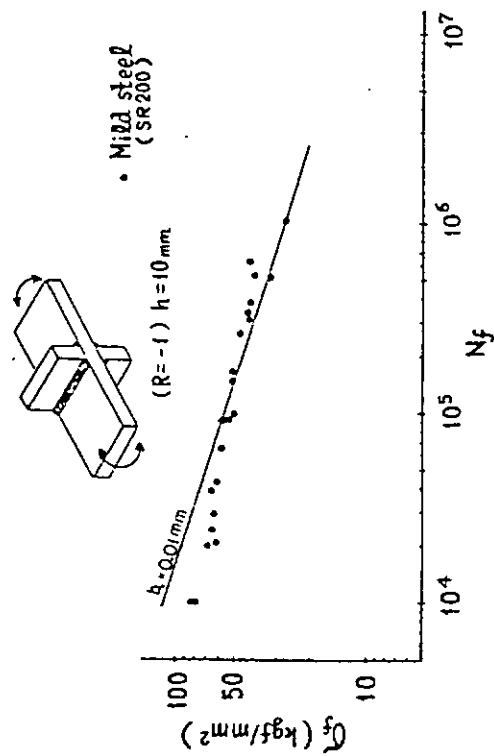


図 7.3.9 リブ十字継手 (曲げ荷重) の  $\sigma_f$ - $N_f$  線図

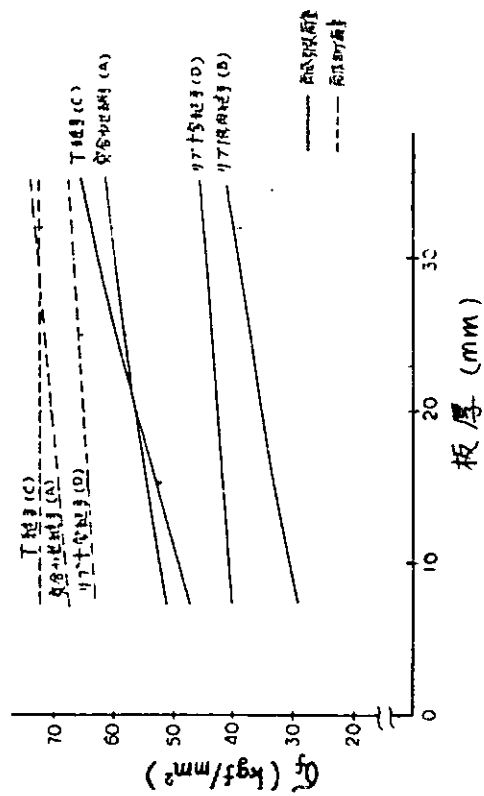


図 7.3.10 各種継手の疲労破断応力



## 7.4 船艀タンク外板の振動による亀裂損傷の検討

### 7.4.1 目 的

艀尾清水タンクの洩水事故を破壊力学を適用することにより、損傷形態と寿命について検討する。

### 7.4.2 亀裂伝播寿命

艀尾清水タンク附近は、プロペラに近く水圧変動が大きい。実船においては内構材の共振によるき裂損傷が多いが、内構材のき裂の存在が外板に伝達する振動について明確ではない。本報告では実船の損傷例と理論値を対比して前記機構を考察する。

図 7.4.1 と 2 に損傷解析手順と実船の損傷形態を示す。解析では、内構材の溶接部（ウェブフレーム）が、プロペラの水圧変動との共振で破壊しそれ以後図 7.4.1 の過程を経るものとする。即ちウェブのき裂（2C<sub>0</sub>）からタンク洩水までの機構について考える。ウェブの共振時のき裂寿命は共振時の過大応力のため短いので洩れに至るまでの寿命は、すみ肉を伝播するき裂の寿命と溶接のまわし部を伝播するき裂の寿命について検討する。検討方法は前章の簡易計算法により溶接趾端部を伝播する表面き裂のK値を採用する。

き裂伝播寿命の計算は、初期欠陥深さが板厚の $1/100$ と設定し、き裂が板を貫通するまでの寿命を求める。計算結果は図 7.4.3~5 のように板厚（t）、変動応力（σ）、初期寸法（a<sub>0</sub>）と溶接部の形状（θ）、趾端部の応力集中度（K<sub>T2</sub>）とて異なり式で求めることができる。

$$N_R = 0.1266 \times 10^6 \times C_0(t) \times C_1(\sigma) \times \bar{N}_R(\theta, K_{T2}, a_0/t) \text{ ----- (7.4.1)}$$

ただし、寿命計算では降伏点を  $24 \text{ kgf/mm}^2$  として  $m = 3.215$  とした。き裂の進展の積分には、 $1/10$  t 深さまでは  $1/1000$  t ステップ、それ以上では  $1/100$  t ステップとし、MILNE法を採用した。

### 7.4.3 すみ肉附近の応力

ウェブの損傷長さとすみ肉附近の応力と変みを図 7.4.6 のような FEM 解析をし、図 7.4.7 の結果を得た。図 7.4.7 によると、

- i 損傷が小さいと図 7.4.7 の②の応力が①のそれより大きくなり、損傷が大きいと①の応力が支配的になる。
- ii 変みは、損傷が肋骨心距の約50%以下であると損傷のないパネルの2倍程度であるが、損傷がさらに大きくなると変みは急増する。

などが判る。

### 7.4.4 損傷解析

表 7.4.1 には、各種の内構材の損傷時の洩水までの寿命を示す。同表中には、損傷解析の前提となる溶接部の詳細（a<sub>0</sub>/t, K<sub>T1</sub>, θ）と作用外力の詳細（σ<sub>0</sub>, K）と計算寿命（N<sub>R</sub>）を併せて示す。

なお同表中の変動水頭はプロペラの特性と船尾形状などの影響因子が多いため、1<sup>W</sup>と2<sup>W</sup>の間に有るものと推定され、その両者について寿命を求める。外板クラックが生じる日数は満載常用時を想定し Blade frequency を 580 cpm とした。

同表の状態 1 がウェブに損傷がない状態でその他が想定損傷状態である。

同表の結果と図 7.4.7 からウェブの損傷時には、溶接まわし部相当の外板クラックと外板のすみ肉クラックが併存する「へ」の字型のクラックの形態が予想される。一方、ウェブ損傷がない場合にはすみ肉に沿う外板クラックの形態となる。

損傷時の寿命は内構材損傷の拡大と共に短くなり、相当な損傷の場合には健全な状態の $1/10 \sim 1/100$ の寿命となり、外板クラックが容易に生じることが判り実船の洩水事故報告の傾向と合致する。

### 7.4.5 お 結 び

艀尾清水タンクの洩水事故の損傷解析を行い、洩水のトリガーとなるタンク内構材損傷の共振と外板のクラックの相互関係を明らかにした。そして実船で観察された破壊形態について考察した。



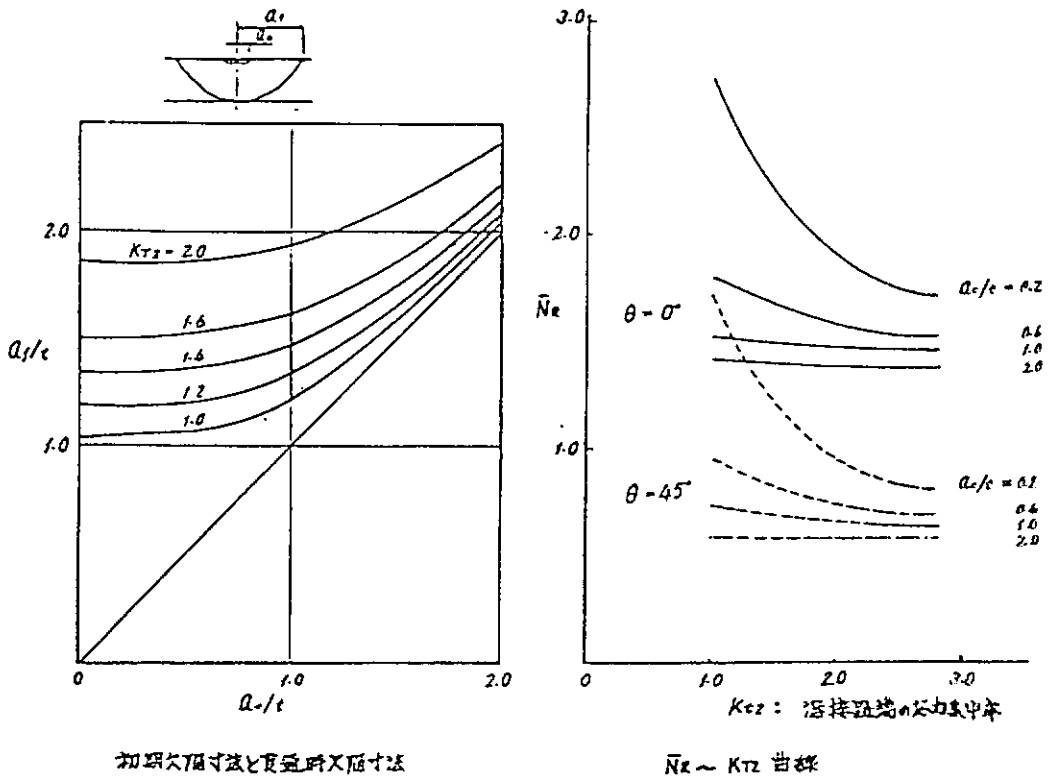


図 7.4.4  $\bar{N}_R$  と  $a_f$

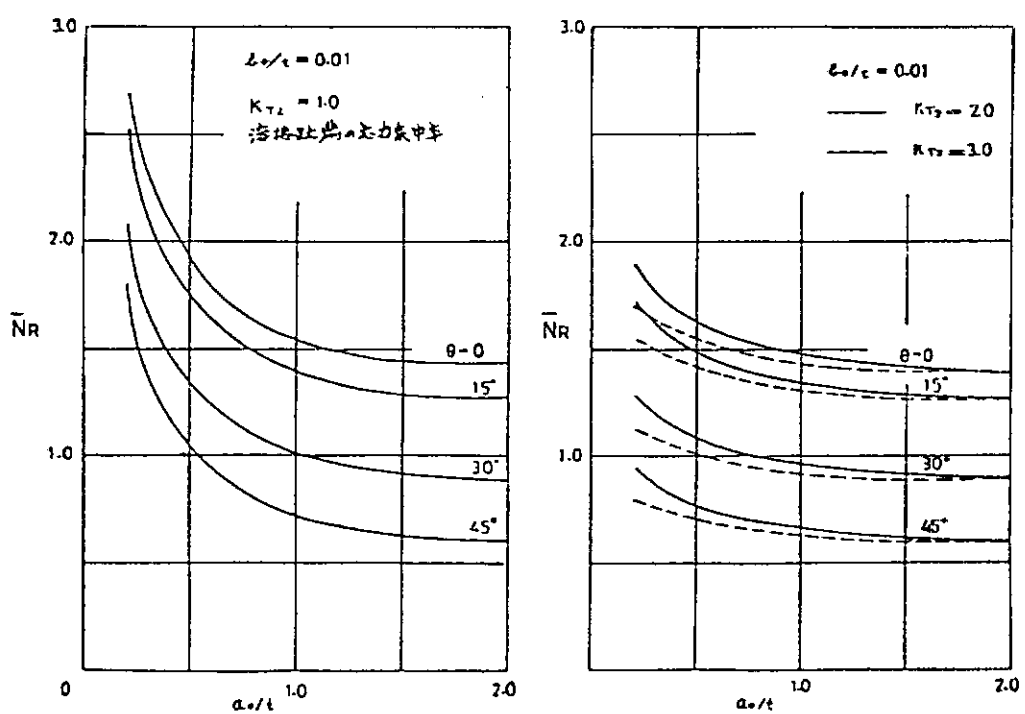


図 7.4.5 初期欠陥寸法と貫通寿命に与える  $K_{T2}$  の影響

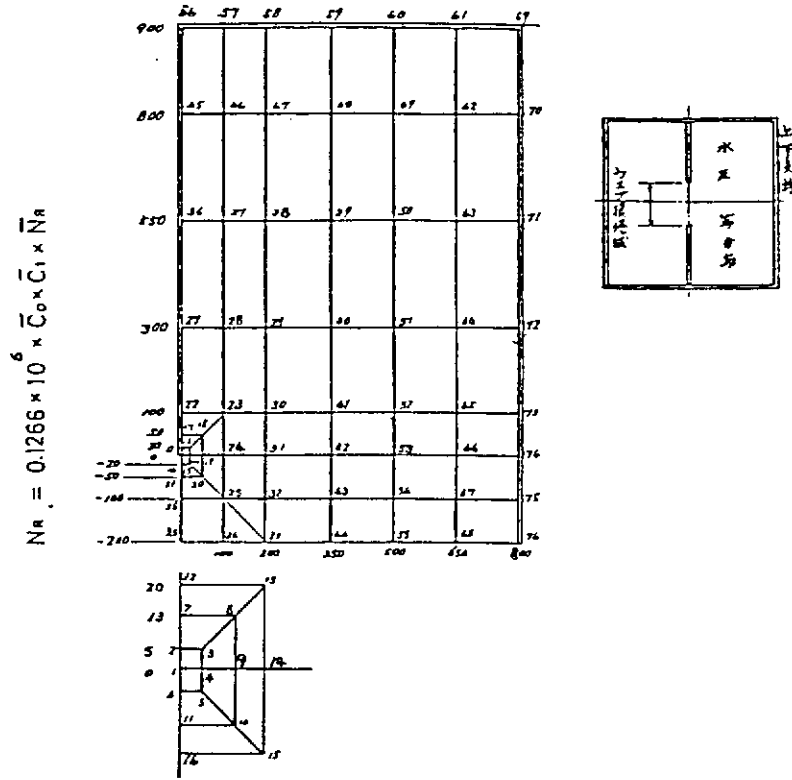


图 7.4.6 FINITE ELEMENT APPLIED

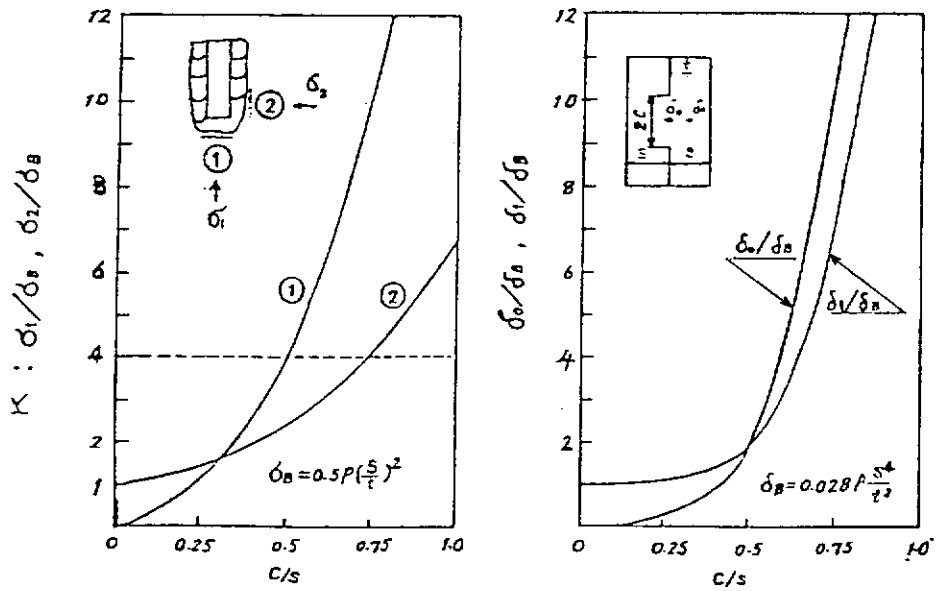


图 7.4.7 STRESS CONCENTRATION DUE TO DAMAGE IN STIFFENER



## 7.5 バルクキャリアーの内底板ナックル部損傷の検討

### 7.5.1 目的

バルクキャリアーの二重底内底板のナックル部に発生した亀裂に対して、破壊力学の手法を用いて解析を行ない、その発生原因を明らかにし、補強法に対する指針を与える。

### 7.5.2 損傷の概要

図7.5.1 に示す如く、60型バルクキャリアーの No.4 カーゴ/バラスト兼用ホールドの二重底内底板と、ヒルジホッパー斜板との交差部近傍に、フロアプレートの隅肉溶接止端部に沿って、亀裂が発生した。

亀裂は本船の就航後約1年で発見され、亀裂長さは約100～200mmであった。

本損傷は No.4 カーゴ/バラスト兼用ホールドの当該部に発生していたが、他のバラストを積まないカーゴ専用ホールドには発生していない。

### 7.5.3 応力解析

#### 7.5.3.1 横強度

船体に働く外圧及び内圧により損傷部に生ずる応力をFEM計算により求めた。FEM計算の概略を以下に示すが、詳細については、文献<sup>1)</sup>を参照されたい。

#### (1) 計算モデル

FEM全体計算モデルを図7.5.2 に示す。

図7.5.2 に示す如く、隣接タンクの影響を考慮して、2ホールドを取り出し、対称性より各ホールドの1/4をモデル化した。損傷部の応力を詳細につかむため、さらに全体モデルに対するFEM計算より得られた境界条件を用いて図7.5.2中の斜線部を取り出してズーム計算を行なった。

## (2) 荷重条件

No.4 カ-ゴ/バラスト兼用タンクにのみ損傷が発生したことより, 図7.5.3に示す如く, 本タンク特有の荷重条件であるホールドバラストコンディションについて計算を行なった。

## (3) 計算結果

### a) 変形

図7.5.4にNo.4ホールド中央のナックルライン沿いの内底板の変形を示す。

### b) 応力分布

図7.5.5にNo.4ホールド中央部のナックルライン近傍の, 内底板の主応力分布を示す。

図7.5.6にナックルライン沿いの  $\sigma_x$  (フロアに垂直方向の応力) の分布を示す。

図7.5.7にフロアから50mm離れた位置でのフロア沿いの  $\sigma_x$  (100mm幅のFEM要素の中央の応力) の分布を示す。

以上より, ナックル部の面外変形により, 亀裂の発生したナックル部近傍の内底板のフロアプレート隅肉溶接止端部には, 大きな曲げ応力, 膜応力が局部的に集中していることが判る。

図7.5.6に示す如く, FEM計算結果から外そうにより, フロアプレートの隅肉溶接止端部の内底板に生ずる最大応力を求めると,

$$\sigma_{ms}^T \text{ (静膜応力)} = 21.0 \text{ kg/mm}^2 \text{ ----- (7.5.1)}$$

$$\sigma_{bs}^T \text{ (静曲げ応力)} = 37 - 21 = 16.0 \text{ kg/mm}^2 \text{ ----- (7.5.2)}$$

となる。

### c) 変動応力成分の計算

(7.5.1), (7.5.2)式に示した応力は, 船体に働く外圧及びバラスト圧が船体運動により変化するため変動する。これらの応力は, 二重底に働く荷重にほぼ比例すると考え, また 外圧と内圧の変動成分は打ち消し

合う傾向にあることより, IMCO ガス キャリア コードに示された式より, No.4 ホールド位置での二重底に働くバラスト圧の変動量を求め, 以下に示す如く (7.5.1), (7.5.2) 式に示した応力の変動成分 ( $Q=10^{-8}$  レベル) を求めた。

$$\sigma_{md}^T \text{ (変動膜応力)} = \pm * 0.6 \sigma_{ms}^T = \pm 12.6 \text{ kg/mm}^2 \text{ ---- (7.5.3)}$$

$$\sigma_{bd}^T \text{ (変動曲げ応力)} = \pm * 0.6 \sigma_{bs}^T = \pm 9.6 \text{ kg/mm}^2 \text{ ---- (7.5.4)}$$

\* 0.6 : 二重底に働く静荷重に対するバラスト圧の変動量  
( $Q=10^{-8}$  レベル) の比

### 7.5.3.2 縦強度

損傷部には, 以上で述べた横強度面からの応力の他に, 船体の縦曲げによる応力が働く。縦曲げにより二重底内底板に生ずる静応力, 変動応力を求めると

$$\sigma_{ms}^L \text{ (静膜応力)} = M_s / Z_{INN, BM} = 2.3 \text{ kg/mm}^2 \text{ ---- (7.5.5)}$$

$$\sigma_{md}^L \text{ (変動膜応力)} = M_d / Z_{INN, BM} = \pm 6.7 \text{ kg/mm}^2 \text{ ---- (7.5.6)}$$

$M_s$  : ホールドバラストコンディションにおける No.4 ホールド位置での静縦曲げモーメント

$M_d$  : NK LNG 船規準に示された式により求めた  $Q=10^{-8}$  レベルの No.4 ホールド位置での変動縦曲げモーメント

$Z_{INN, BM}$  : 二重底内底板位置での  $I/y$

以上より, 内底板損傷部に生ずる最大応力をまとめた結果を表 7.5.1 に示す。

### 7.5.4 疲労強度解析

以下に示す条件を用いて, 疲労亀裂発生寿命解析を行なった。

#### (1) 応力

内外圧により, 損傷部近傍に働く応力は図 7.5.7 に示す如く, ナックルラインからはなれるに従い減少するが, severe side に考え, 表 7.5.1 に示す

最大応力を考え、表 7.5.2 中 A に示す応力条件を用いる。

## (2) S-N線図

文献<sup>2)</sup>に示された非荷重分担型の十字継手の S-Nc 線図を用いる。

## (3) その他

ホールドバラスト航海を全航海期間の  $1/2$  と考え、また ホールドバラスト時以外の積付での損傷部の応力が小さいため、バラスト航海時以外での疲労被害は無いものとした。また表 7.5.2 中 A に示す如く、補強を行ない内外圧により該部に生ずる応力レベルを一様に  $\alpha$  倍 ( $\alpha \leq 1$ ) に下げた場合についても計算を行なった。解析結果を図 7.5.8 に示す。

図 7.5.8 より明らかなように、 $\alpha=1$  つまり現状のままで、1年間で損傷部の疲労累積被害度 ( $C_w$ ) が 7 程度となり、非常に短期間 (1~2ヶ月程度) で疲労亀裂が発生することとなり、損傷が 1 年以内に発生したことと一致する。また図 7.5.8 より、補強により  $\alpha$  を 0.6 以下、すなわち内外圧により該部に生ずる応力を 60% 程度以下に下げれば、20年間での  $C_w$  が 0.1 以下となり、船の一生の間 (20年間) に疲労亀裂が発生する可能性は少なくなると考えられる。

## 7.5.5 表面亀裂伝播解析

### (1) 亀裂伝播経路

図 7.5.5-B に示す如く、亀裂の発生した内底板下面のフロアプレート隅肉溶接止端部には、フロアにほぼ垂直に高レベルの引張り応力が発生している。またさらに同じ方向に縦曲げ応力が働く。亀裂は引張り主応力の法線方向に進むと考えられるので、応力が最大となるナックルライン近傍のフロアプレート隅肉溶接止端部に発生した表面亀裂は、止端部に沿ってフロアに平行に伝播すると考えられ、損傷例と一致する。

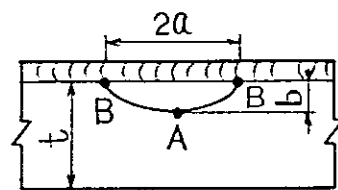
したがって、本解析では表面亀裂が隅肉溶接止端部に沿って伝播するとする。

## (2) 亀裂伝播寿命の計算

### a) 溶接止端部を伝播する表面亀裂

6章より溶接止端部の表面亀裂の伝播速度は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{da}{dN} &= C (\Delta K_B)^m \\ \frac{db}{dN} &= C (\Delta K_A)^m \end{aligned} \right\} \text{--- (7.5.7)}$$



(7.5.7)式中 $K_A, K_B$ は、それぞれ亀裂最深部及び表面端部、A、B点での $K$ 値で、次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} K_A &= M_F \cdot K_{td} (M_K \sigma_M + M_B \sigma_B) \sqrt{\pi b} / E(l_k) \\ K_B &= K_{t2} \cdot K_{td} (1.18 M_{Tf} \cdot M_{Tb} \cdot \sigma_M \sqrt{\frac{b}{a}} + M_A \cdot \sigma_B) \sqrt{\pi b} / E(l_k) \end{aligned} \right\} \text{--- (7.5.8)}$$

(記号については6章参照。ただし、6章ではNewmanらの解を用いているが、本検討ではKobayashiの解を用いた。)

### b) 表面亀裂伝播寿命の計算

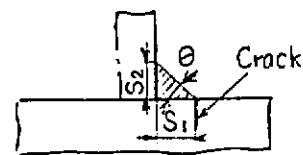
(7.5.7), (7.5.8)式を連立させて、以下の条件で、表面亀裂伝播解析を行なう(6章記載の計算条件設定基準を準用する)。

- $m = 3.22$
- $C = 1.09 \times 10^{-10}$
- 初期亀裂 :  $2a_0$  (亀裂全長)  $\times b_0$  (亀裂深さ)  
 $= 5 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$
- 板厚 :  $t = 19.5 \text{ mm}$  (内底板板厚)
- 応力条件 : 表 7.5.1 に示す損傷部での最大応力を用いる。

表 7.5.2 中 B に使用した応力条件を示す。また  
 図 7.5.9-B に示す如く、20年間に働く変動応力を  
 80ブロック(3ヶ月/1ブロック)に細分して計算を  
 行なった。

- $\Delta K_{th}$  は考慮しない。

・ K値に対する隅肉溶接の影響係数



$$K_t' = -0.0074 \left(\frac{\theta}{10}\right)^3 + 0.1444 \left(\frac{\theta}{10}\right)^2 - 0.10005 \left(\frac{\theta}{10}\right) + 1$$

$$= 2.8 \quad (\theta = 45^\circ \text{より})$$

$K_{td}$  (構造的連続による応力集中係数) = 1.0 とする

$K_{t2}$  (隅肉溶接止端部の応力集中係数の平均値)

$$= 1 + 0.8 \sqrt{S_2/S_1} = 1.8 \quad (S_1 = S_2 \text{より})$$

$M_F$  (隅肉溶接止端部に対する修正係数)

$$= 1.01(K_t' - 1)e^{-7.3\sqrt{b/t}} + 1.01 - 0.01 K_t'$$

$$= 1.818e^{-7.3\sqrt{b/t}} + 0.982 \quad (K_t' = 2.8 \text{より})$$

なお、ホールドバラスト航海を全航海期間の  $1/2$  と考え、またホールドバラスト時以外の積付での損傷部の応力は小さいため、バラスト航海時以外での亀裂進展は無いものとした。

また表 7.5.2 中 B に示す如く、補強を行ない内外圧により該部に生ずる応力レベルを一様に  $\alpha$  倍 ( $\alpha \leq 1$ ) に下げた場合についても計算を行なった。

### C) 計算結果

図 7.5.10 に計算結果を示す。

図 7.5.10 に示す如く、 $\alpha = 1$  すなわち現状のままでは隅肉溶接止端部の表面亀裂は約 1 年で内底板を貫通し、その時の亀裂表面長さは約 115 mm となる。

損傷例では就航約 1 年後の亀裂長さは 100 mm ~ 200 mm 程度であり、解析結果と損傷状況は概略一致する。

図 7.5.10 に、補強により応力レベルを下げた場合 ( $\alpha = 0.2 \sim 0.8$ ) に対する計算結果も併せて示す。

図 7.5.11 に応力レベル  $\alpha$  と表面亀裂貫通までの所要年数との関係を示す。

### 7.5.6 考察

(1) 応力解析および疲労強度解析により、ナックル部近傍のフロアプレート隅肉溶接止端部に短期間のうちに疲労亀裂が発生し、溶接止端部に沿って伝播するとの結果が得られたが、本船の損傷状況と発生点伝播経路とも一致している。

(2) 表面亀裂伝播解析により、溶接止端部に存在する表面亀裂は、約1年で内底板を貫通し、表面亀裂長さは115mm程度となるとの結果が得られたが、本船の損傷亀裂長さが就航後約1年で100~200mmに達していたのと概略一致している。

(3) 補強対策を検討するため、損傷部の応力レベルを下げた場合に対しても、疲労強度解析および表面亀裂伝播解析を行なった。

疲労強度解析により、補強によって、損傷部の応力レベル(船体に働く内外圧による応力)を60%程度に下げれば、図7.5.8に示す如く疲労亀裂発生の可能性が少なくなることが判った。

しかし、隅肉溶接止端部に全長5mm×深さ1.5mm程度の初期亀裂があったと仮定した場合、表面亀裂伝播解析を行なうと、図7.5.11に示す如く、表面亀裂貫通までの所要期間を20年間(船の一生)とするためには、該部の応力レベル(船体に働く内外圧による応力)を20%程度以下とする必要があることになる。また、図7.5.11に併記する如く、初期亀裂の深さを0.5mmとした場合でも、応力レベルを27%程度以下とする必要があることになる。

したがって、該部のような溶接止端部の初期亀裂の防止には十分注意を払う必要がある。

(4) 以上より、本損傷に対しては以下に示す補強対策を講じた。

a) 損傷部の応力レベル減少対策として図7.5.12に示す如く、ナックルライン近傍にブラケットを追加した。別途行なったFEM解析<sup>1)</sup>によれば、本補強により、損傷部の応力レベルは40%以下に下がる。

b) 損傷部近傍の内底板のフロア-プレート隅肉溶接止端部については、カラーチェックを行なって初期欠陥のないことを確認した。

### 7.5.7 結言

破壊力学の手法を用いてバルクキャリアーの内底板ナックル部の損傷亀裂に対して解析を行ない、その発生原因および補強対策の効果等を検討した。その結果、解析結果は概略損傷状況と一致し、また補強対策の効果についても定量的に評価することができた。

### 参考文献

- 1) "ナックル板を有する構造の強度", 川崎重工業技報 77号
- 2) "船体のメンテナンスフリーに関する研究", 日本造船研究協会報告 第91号

$$L \times B \times D = 220^M \times 32.2^M \times 18.5^M$$

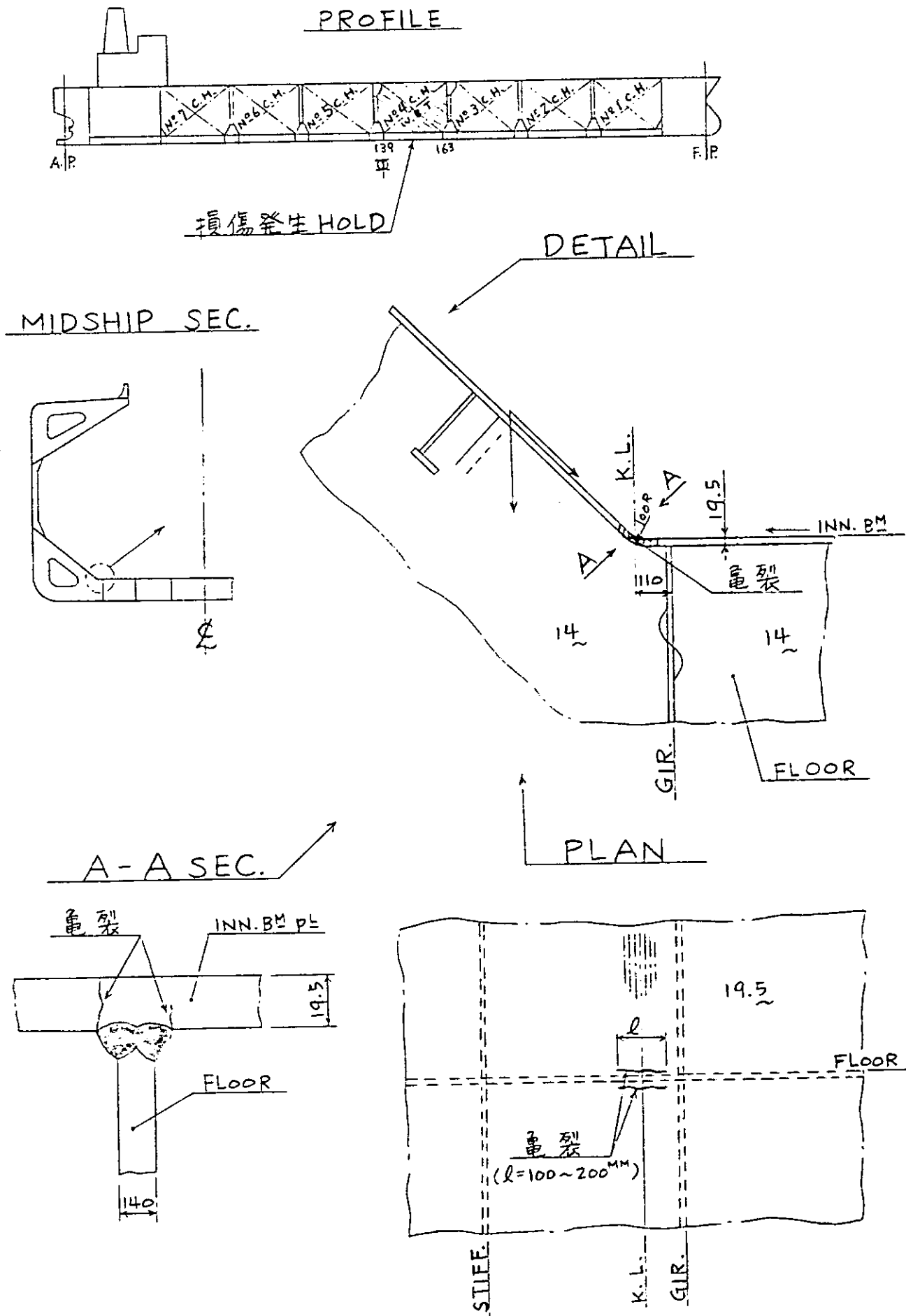
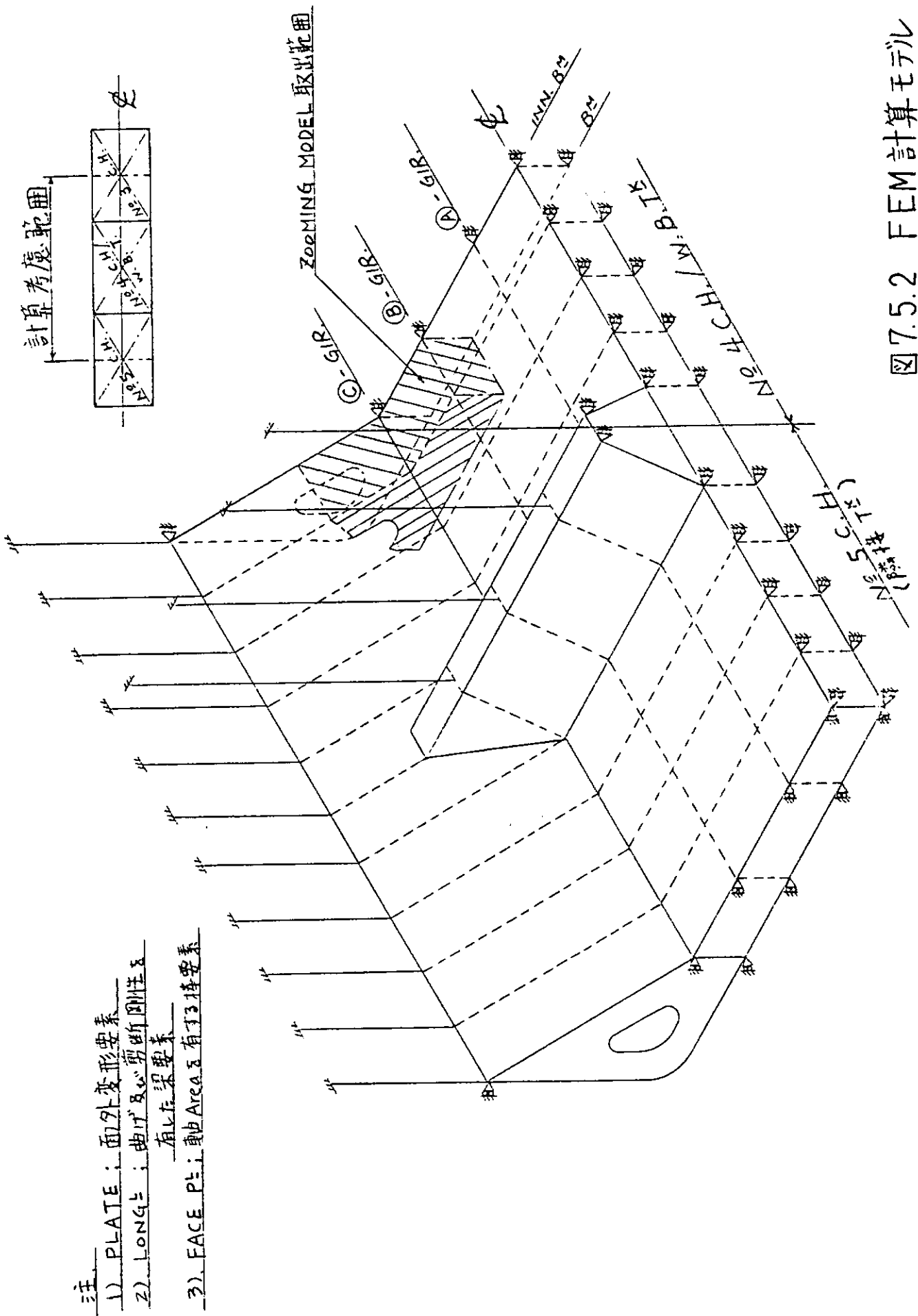


図7.5.1 損傷の概要

図 7.5.2 FEM 計算モデル



- 注
- 1) PLATE: 面外変形要素
  - 2) LONG: 曲げ及心剪断剛性  
有した梁要素
  - 3) FACE PLATE: 軸Area有した接要素

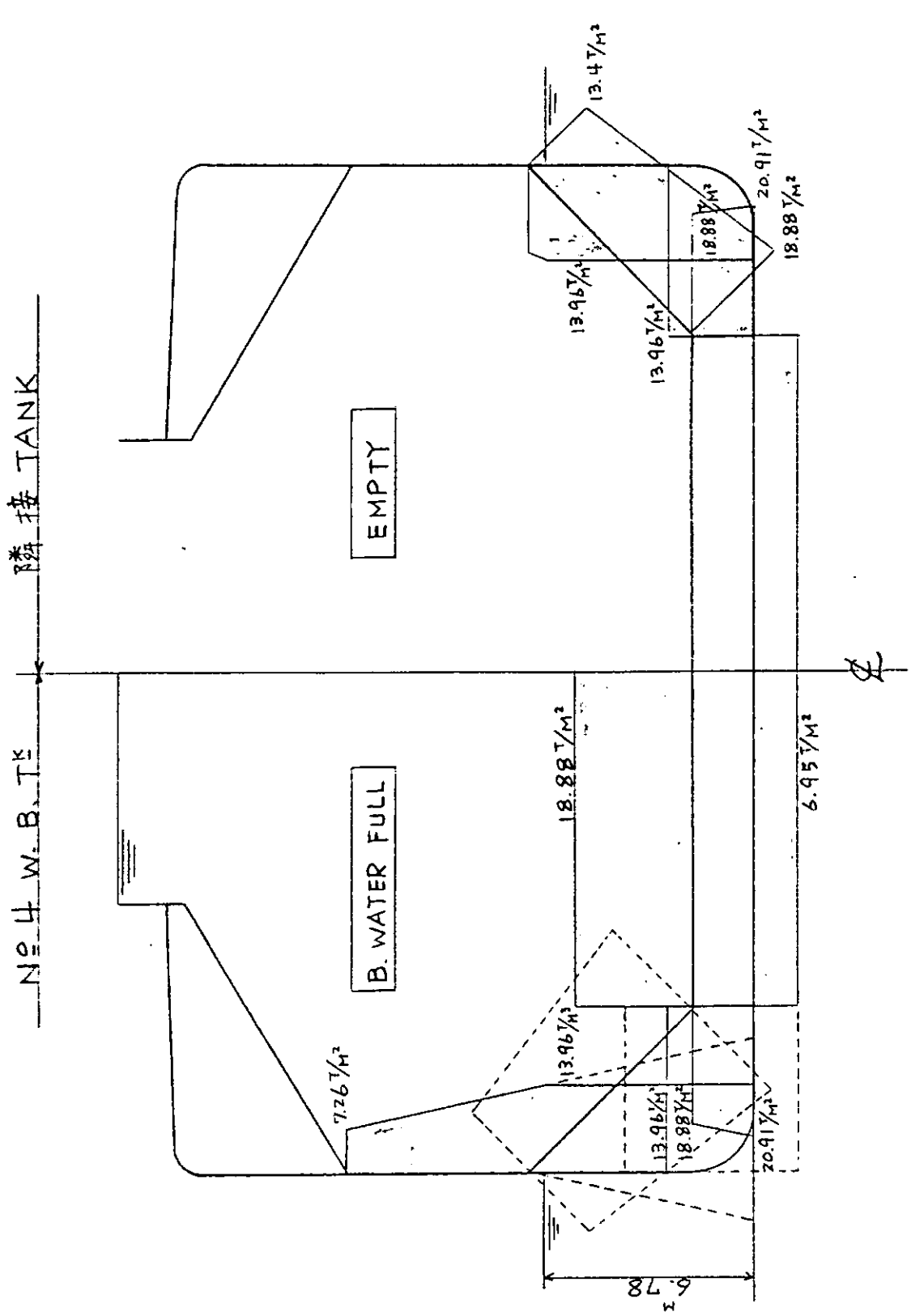


図7.5.3 FEM計算荷重条件 (HOLD BALLAST CONDITION)

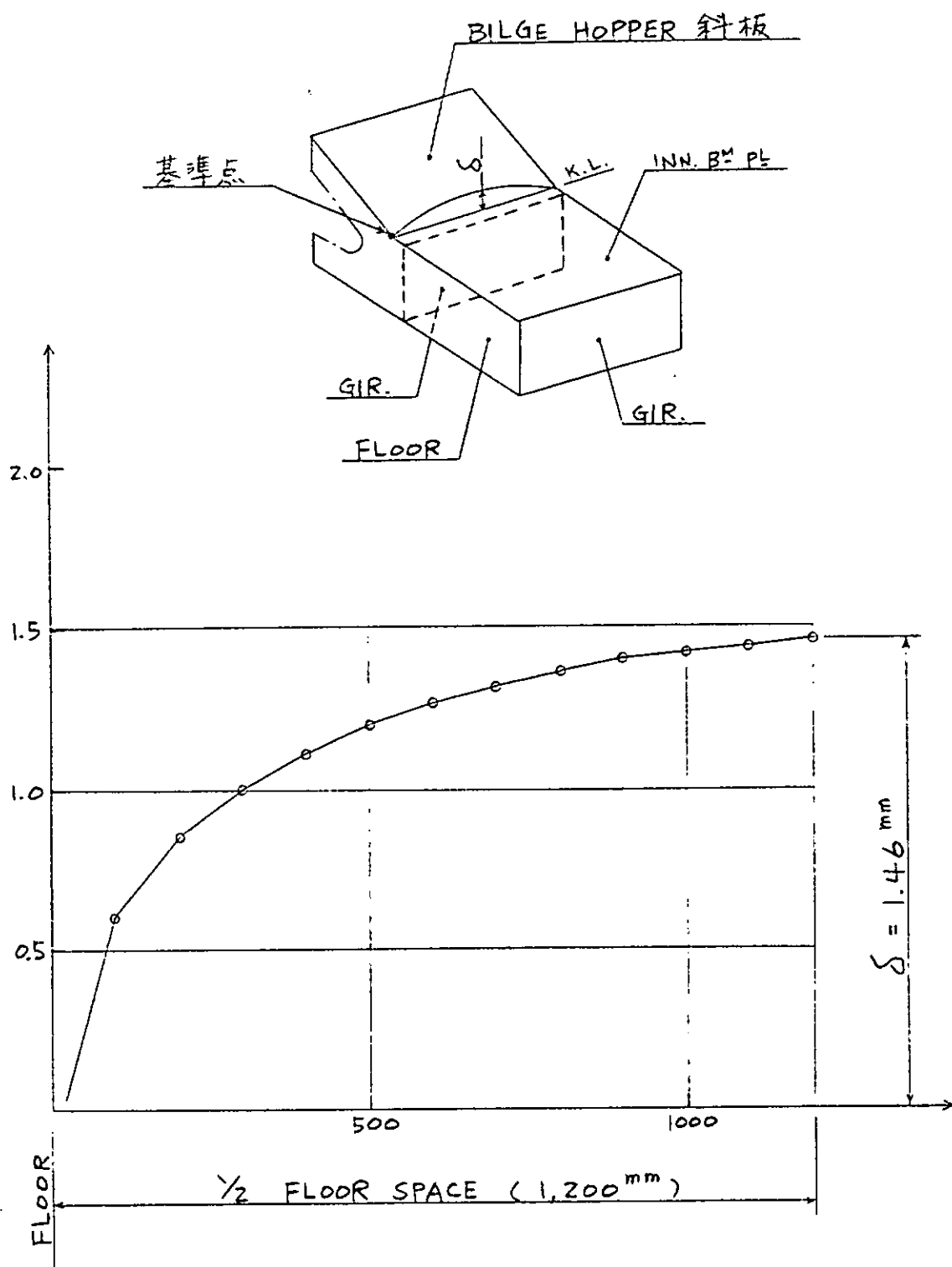
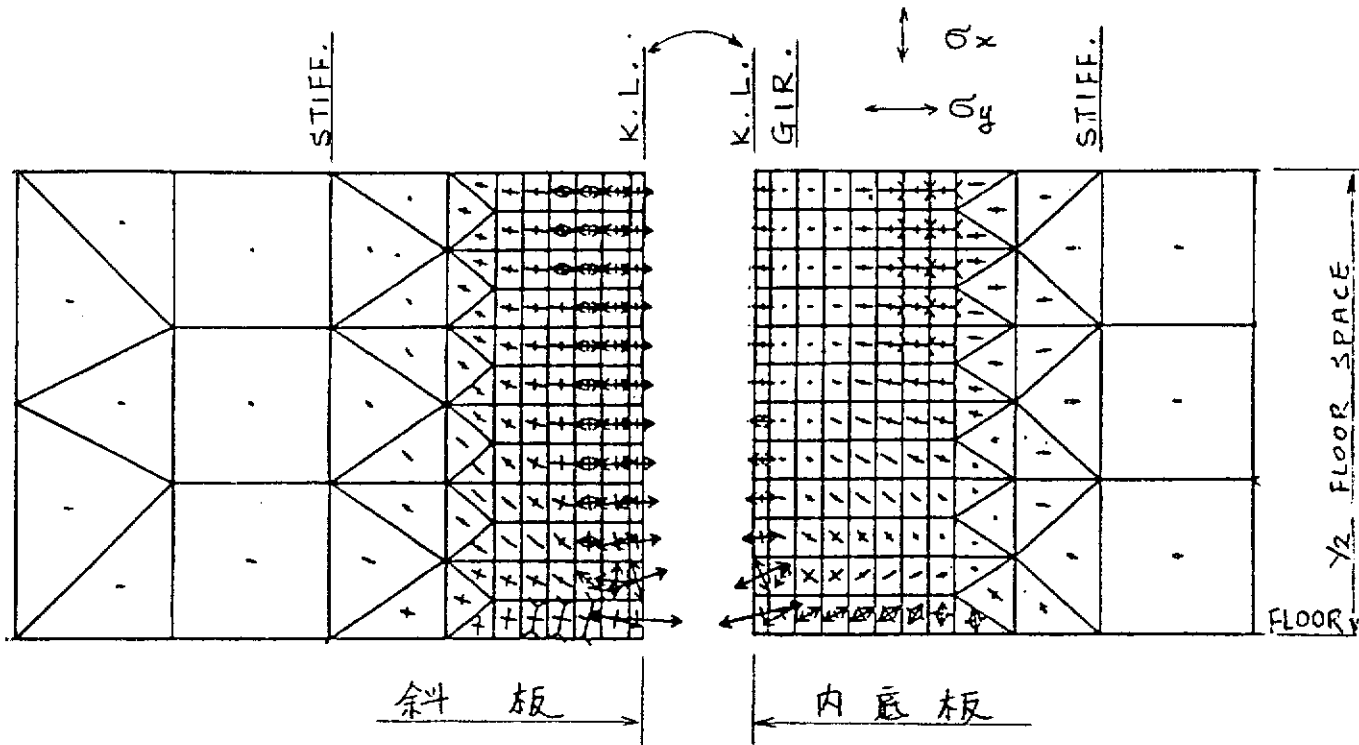
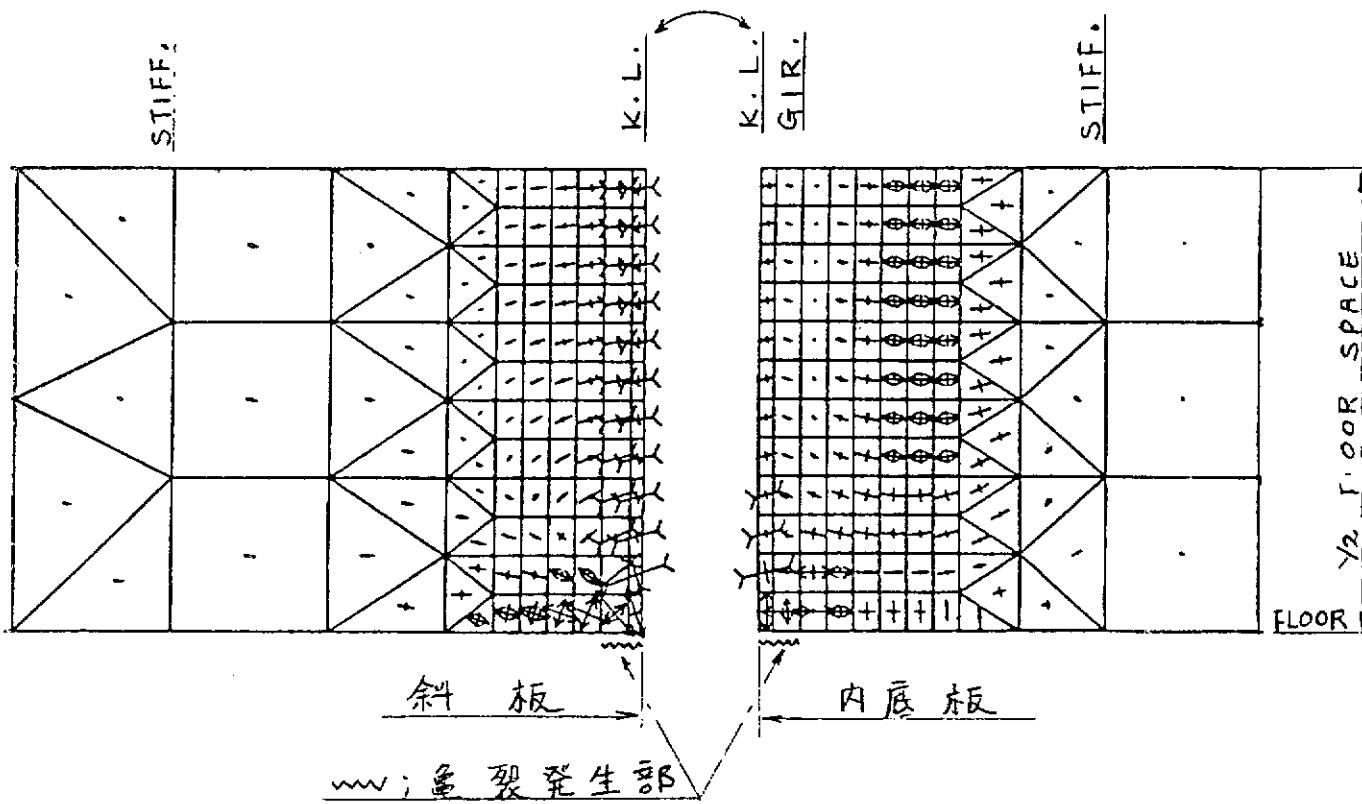


図7.5.4 ナックルライン沿いの内底板の相対変位

SIG. SCALE ;  $\frac{1}{0 \quad 20 \quad 40} \text{ kg/mm}^2$



A. 内底板上面



B. 内底板下面

図7.5.5 内底板の主応力分布

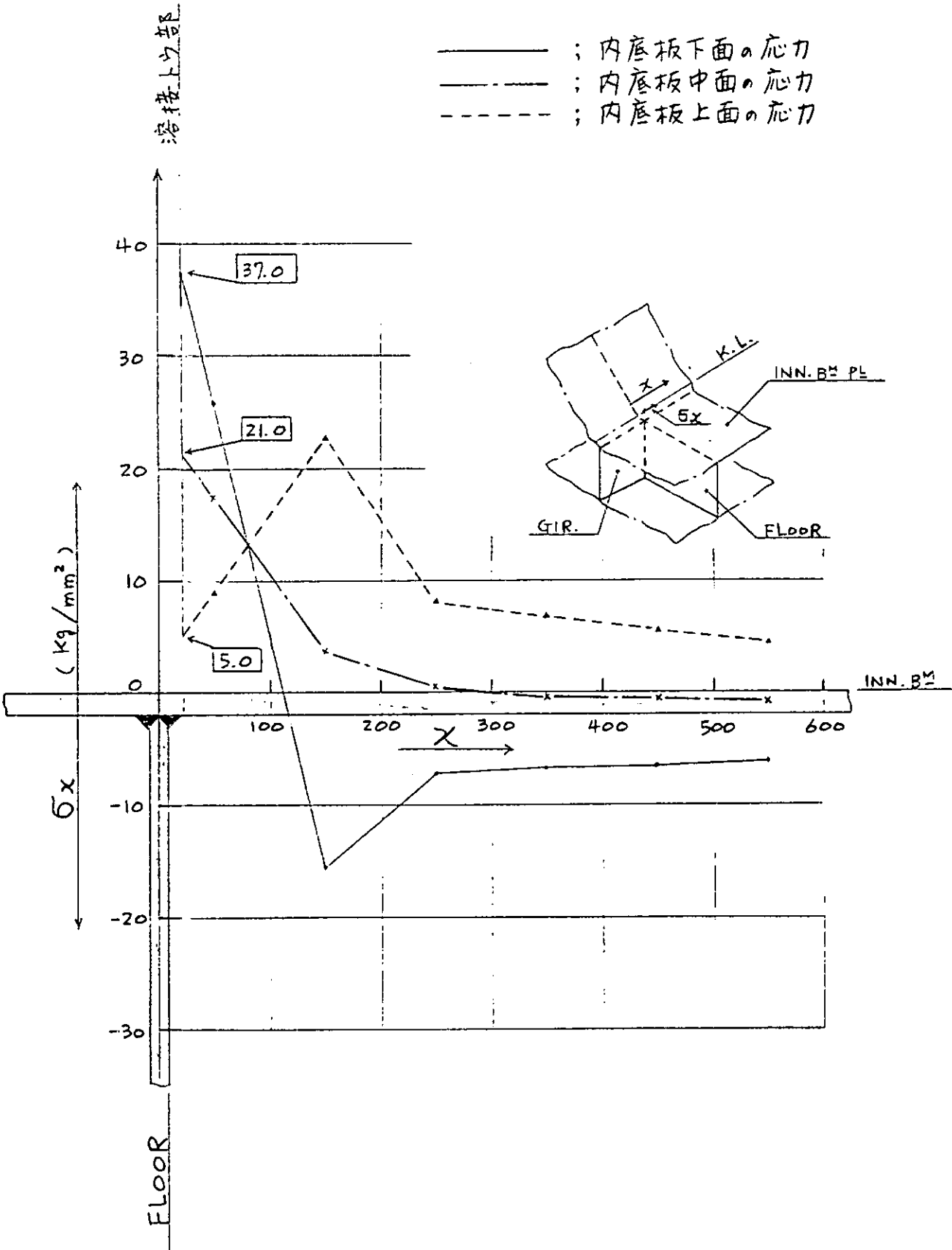


図7.5.6 ナックルライン沿いの応力( $\sigma_x$ )分布

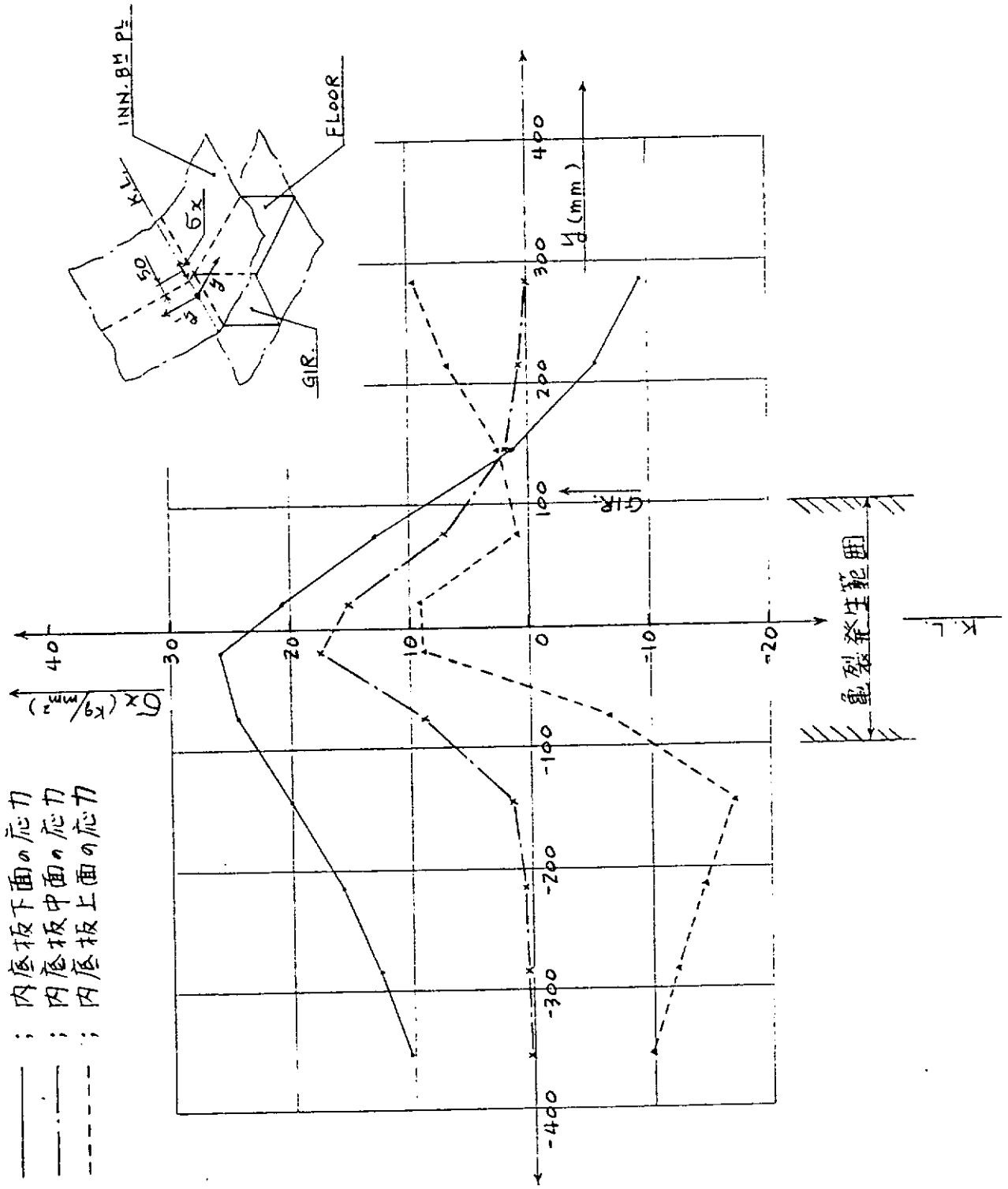
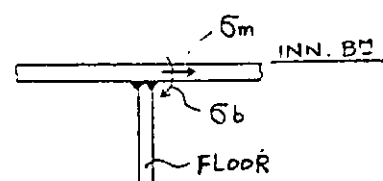


図7.5.7 FLOOR沿いの応力( $\sigma_x$ )分布

表 7.5.1 損傷部に発生する最大応力

単位 ;  $\text{kg/mm}^2$ 

|   |                        | 静 応 力                     |                           | 変 動 応 力 ( $Q=10^{-8}$ )         |                                |
|---|------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
|   |                        | 膜 応 力<br>$\sigma_{ms}$    | 曲 げ 応 力<br>$\sigma_{bs}$  | 膜 応 力<br>$\sigma_{md}$          | 曲 げ 応 力<br>$\sigma_{bd}$       |
| ① | 船体に働く<br>内外圧による<br>応力. | $\sigma_{ms}^T$<br>= 21.0 | $\sigma_{bs}^T$<br>= 16.0 | $\sigma_{md}^T$<br>= $\pm 12.6$ | $\sigma_{bd}^T$<br>= $\pm 9.6$ |
| ② | 縦曲げによる<br>応力.          | $\sigma_{ms}^L$<br>= 2.3  | —                         | $\sigma_{md}^L$<br>= $\pm 6.7$  | —                              |

表 7.5.2 破壊強度解析の応力条件

単位 ;  $\text{kg/mm}^2$ 

|   |                | 静 応 力                                                                                    | 変 動 応 力 ( $Q=10^{-8}$ )                                                                                                                                                                             |
|---|----------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   |                |                                                                                          |                                                                                                                                                                                                     |
| A | 疲労累積被<br>害度の計算 | $(\sigma_{ms}^T + \sigma_{bs}^T)\alpha + \sigma_{ms}^L$<br>= $(21.0 + 16.0)\alpha + 2.3$ | $\pm \sqrt{[(\sigma_{md}^T + \sigma_{bd}^T)\alpha]^2 + \sigma_{md}^L^2}$<br>= $\pm \sqrt{[(12.6 + 9.6)\alpha]^2 + 6.7^2}$                                                                           |
| B | 表面亀裂<br>伝播解析   | 考慮せず                                                                                     | 膜応力<br>$\Delta \sigma_m = \pm \sqrt{(\sigma_{md}^T \alpha)^2 + \sigma_{md}^L^2}$<br>= $\pm \sqrt{(12.6 \alpha)^2 + 6.7^2}$<br>曲げ応力<br>$\Delta \sigma_b = \pm \sigma_{bd}^T \alpha = \pm 9.6 \alpha$ |

$\alpha$ ; 補強により、船体に働く内外圧により生ずる応力を一様に下げたとした場合の、現状に対する応力比 ( $\alpha \leq 1$ )。

$\alpha = 1.0$  の場合が現状に対応する。

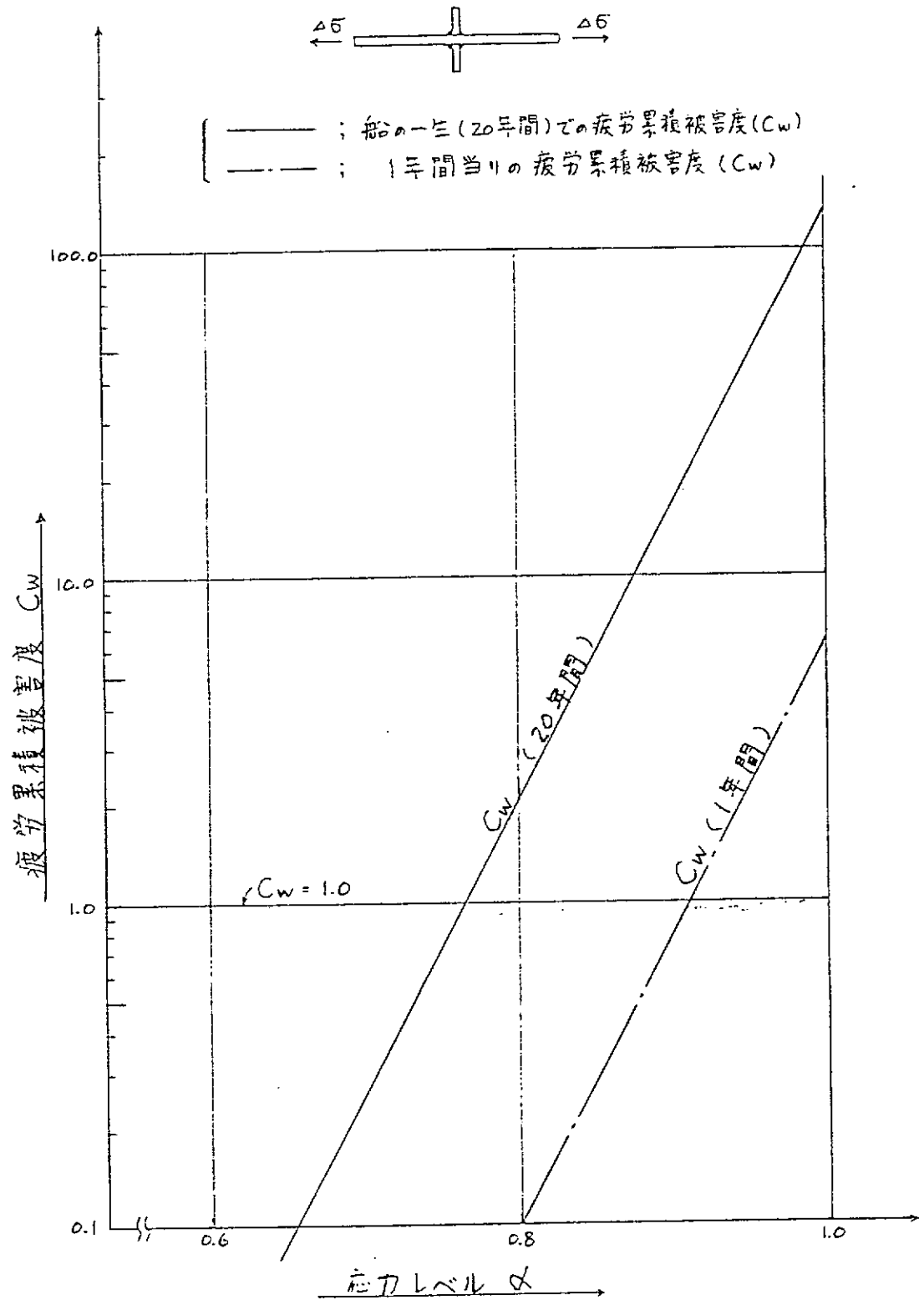
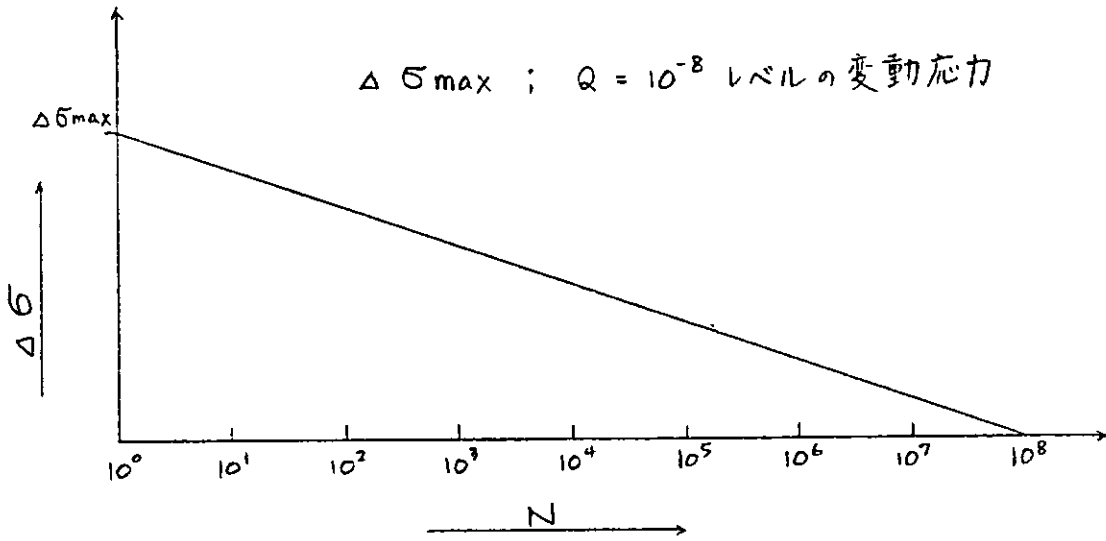
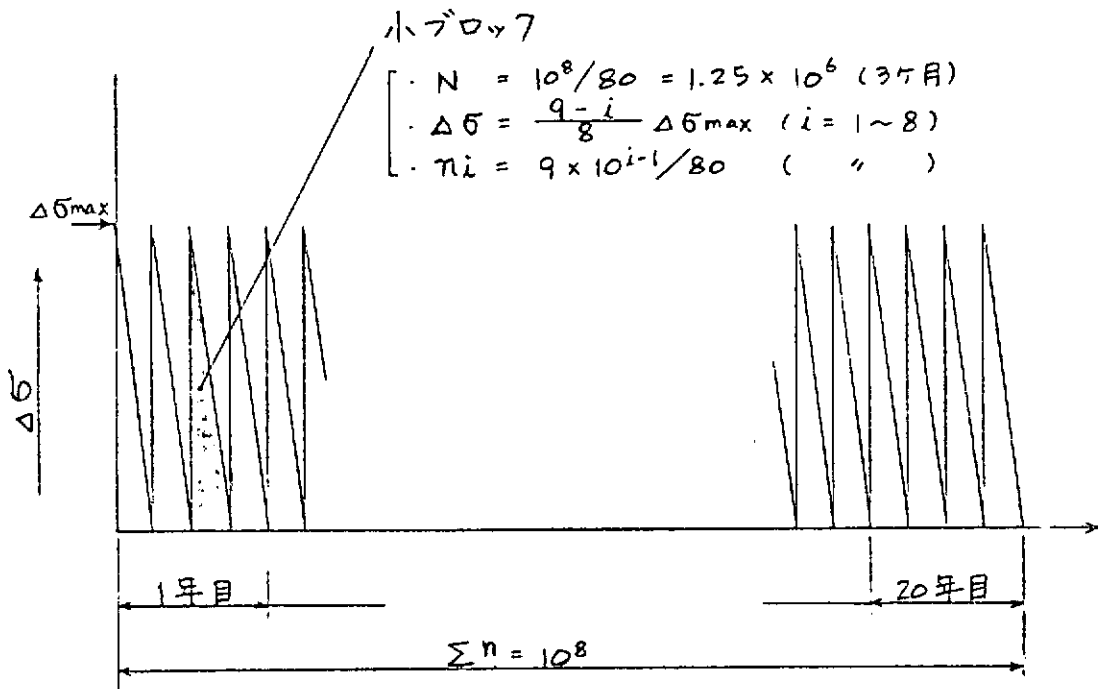


図7.5.8 応カレベルと疲労累積被害度



A. 変動応力の頻度分布



B. 亀裂伝播計算に用いた変動応力ブロック分割

図7.5.9 表面亀裂伝播解析の応力条件



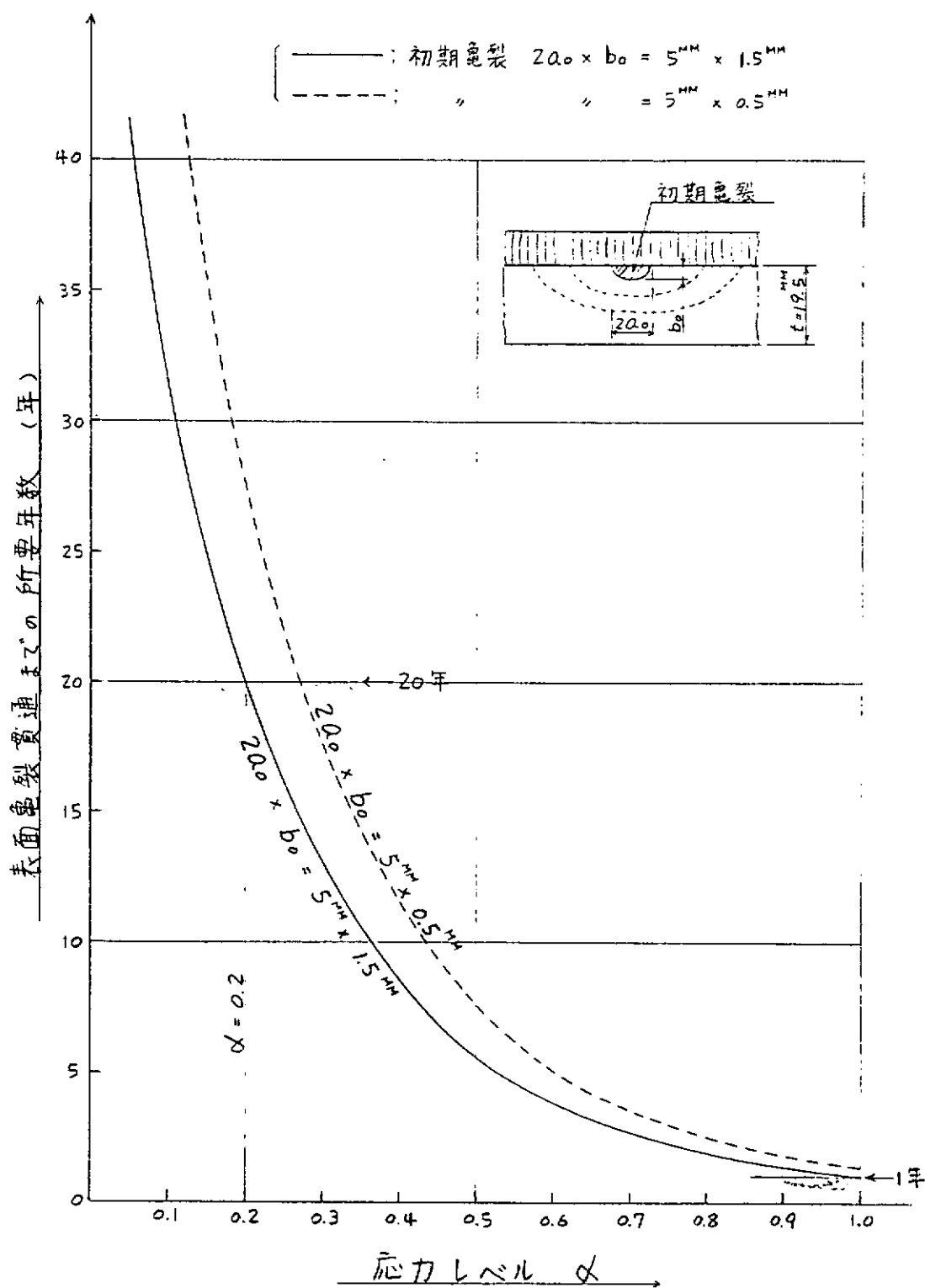


図7.5.11 応力レベルと表面亀裂貫通までの所要年数

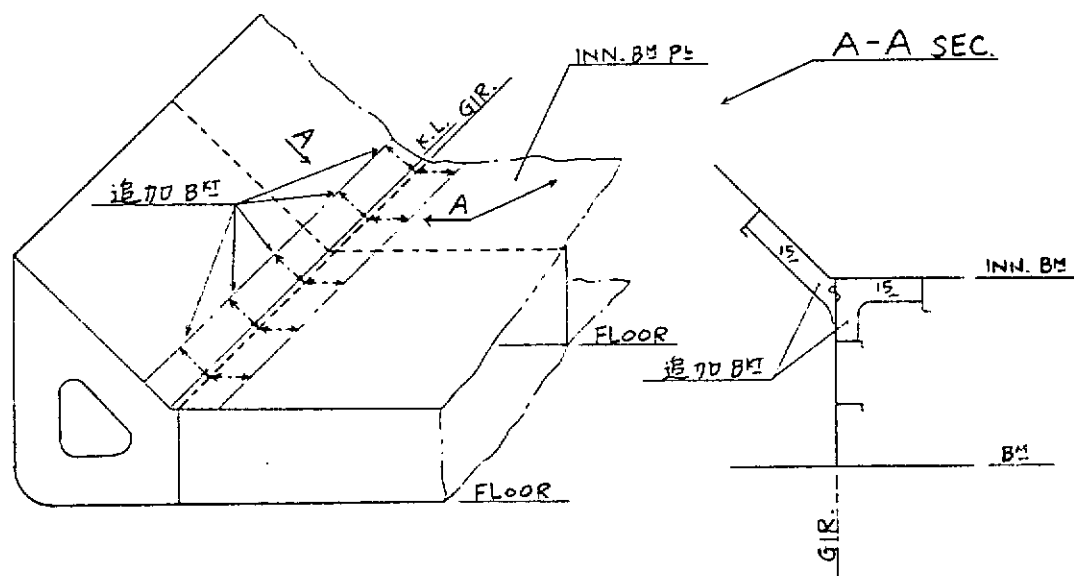


図7.5.12 ナックル部補強例

## 7.6 CAR CARRIER の DECK BEAM END BRACKET 損傷の検討

### 7.6.1 目 的

CAR CARRIER の DECK BEAM END BRACKET に発生した損傷に対して破壊力学的手法を用いて解析を行い、その発生原因等を検討する。

### 7.6.2 損傷の概要

本損傷は図 7.6.1 に示す如く、CAR CARRIER ( $L \times B \times D = 150^M \times 23.4^M \times 20.4^M$ ) の 3<sup>RD</sup> CAR DECK 及び 4<sup>TH</sup> CAR DECK の DECK BEAM END BRACKET の DECK PLATE との取合部の R 止端部近傍より CRACK が発生したもので、就航後約 7 年目に発見され、発見当時 CRACK の長さはおよそ 50 MM から 200 MM に達していた。

### 7.6.3 応力解析

#### (1) 計算モデル

FEM 計算モデルを図 7.6.2 及び図 7.6.3 に示す。解析の対象を 4<sup>TH</sup> CAR DECK BEAM END BRACKET 部とし、BRACKET 近傍は平面膜要素、その他は梁要素でモデル化した。

尚、平面膜要素使用部分の DECK PLATE、SIDE SHELL PLATE 及び SIDE FRAME 等の FLANGE 部は棒要素でモデル化している。

#### (2) 荷重条件

本損傷の主因として、DECK 本体及び DECK 上の CAR LOAD の船体運動による荷重変動により BRACKET に生ずる曲げ変動応力が考えられる。

そこで、図 7.6.4 に示す如く、4<sup>TH</sup> CAR DECK に DECK 自重及び CAR LOAD の船体運動による上下変動荷重が働いた場合を考え、応力解析を行う。

尚本変動荷重は IMCO GAS CARRIER CODE 記載の式により、 $10^{-8}$  レベル本船の船体運動による加速度を計算し求めたものである。

#### (3) 計算結果

4<sup>TH</sup> CAR DECK の DECK BEAM END BRACKET の主応力分布の計算結果を図 7.6.5 及び図 7.6.6 に示す。図 7.6.6 は図 7.6.5 の BRACKET R 部近傍を拡大したものである。これより本 BRACKET の DECK PLATE との取合部の R 止端部近傍に大きな引張り応力が発生していることがわかる。

### 7.6.4 亀裂伝播解析

#### (1) 亀裂伝播経路

図 7.6.6 に示す如く、BRACKET R 止端部の引張り応力が高く、損傷例の亀裂発生部と一致している。又同図中に亀裂が引張り主応力の法線方向に進むと仮定した場合の亀裂伝播経路を示す。本経路は、損傷例の亀裂進展方向とほぼ一致している。従って、以下の亀裂伝播解析は、R 止端部より発生した亀裂が本経路に添って進展するものとして行う。

#### (2) 亀裂先端の K 値

##### a) 亀裂伝播経路に沿った応力分布

(1) で設定した亀裂伝播経路上の引張り主応力の分布を図 7.6.7 に示す。またこの応力分布を下記の如く 4 次式で近似した結果を同図中に示す。

$$\sigma(x) = \sum_{n=0}^4 c_n x^n \quad \text{----- ( 7.6.1 )}$$

尚、係数  $c_n$  は以下に示す通りである。

$$\begin{cases} c_0 = 20.10 \\ c_1 = -0.2496 \\ c_2 = -1.544 \times 10^{-3} \\ c_3 = 4.859 \times 10^{-5} \\ c_4 = -2.503 \times 10^{-7} \end{cases}$$

#### b) 亀裂先端のK値

本亀裂は BRACKET の R-END 部自由端より発生した縁亀裂と考えられるので、任意の亀裂長さにおけるK値は(7.6.1)式を用いて以下の如く表せる。

$$K = \sum_{n=0}^4 k_n c_n a^n \sqrt{\pi a} \quad \text{-----} \quad (7.6.2)$$

ここで、 $a$  : 亀裂長さ (GIRTH長さ)、又  $k_n$  は縁亀裂として 示される以下の値を用いる。

$$\begin{cases} k_0 = 1.1215 \\ k_1 = 0.6829 \\ k_2 = 0.5255 \\ k_3 = 0.4410 \\ k_4 = 0.3868 \end{cases}$$

(7.6.2)式を用いて計算した亀裂長さとK値の関係を図7.6.8に示す。

#### (3) 亀裂伝播寿命の計算

疲労亀裂の伝播速度は以下の PARIS 式で表される。

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m \quad \text{-----} \quad (7.6.3)$$

これより繰り返し数(N)と亀裂長さ( $a$ )の関係は次式の如くなる。

$$N = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C} (a_i - a_{i-1}) \frac{1}{(R_a \Delta K)^m} \quad \text{-----} \quad (7.6.4)$$

#### a) 計算条件

(7.6.4)式を用い以下の条件で計算を行った。(6章記載の計算条件設定基準を準用する)

- $m = 4 - 0.0327 \sigma_y = 4 - 0.0327 \times 24 = 3.22$
- $C = 5.53 \times 10^{-4} / (592)^m = 5.53 \times 10^{-4} / (592)^{3.22} = 1.086 \times 10^{-9}$
- $R_a$  (等価応力係数) = 0.102 ( $m=3.22$ ,  $n=8$ より)
- $a_0$  (初期亀裂長さ) = 0.5<sup>MM</sup> (0.5<sup>MM</sup>程度の深さの潜在欠陥が存在したと仮定する)
- $\Delta K_{th}$  は考慮しない。

尚 CAR-CARRIER の特質上全航海期間の半分は CAR LOAD がなく DECK 自重のみと考えられるが、簡単化の為、全期間 DECK 自重及び CAR LOAD の両者の変動荷重が DECK に働くものとした。

#### b) 計算結果

図7.6.9に亀裂長さ( $a$ )と繰り返し数(N)の関係を示す。これより亀裂伝播速度は亀裂長さが10<sup>mm</sup>を過ぎたあたりから速くなっていることがわかる。また亀裂長さは7年でおよそ135<sup>mm</sup>に達することがわかる。

### 7.6.5 考 察

(1) 図7.6.6に示した本検討より得られた亀裂伝播経路と本船の損傷状況とは、亀裂の発生点及び進展経路

とも概略一致している。

従って、このBRACKETの損傷は、本検討で想定した如く、DECK及びDECK上のCAR LOADの船体運動による荷重変動によりBRACKETに生ずる曲げ変動応力が主因であると推定される。

- (2) 図7.6.9に示した亀裂長さとの繰返し数の関係より、7年で亀裂が $0.5^{mm}$ から $185^{mm}$ 前後に進展することとなるが、これも本船の損傷が就航後約7年で亀裂長さが $50^{mm} \sim 200^{mm}$ に達していたのとよく一致している。

- (3) 図7.6.10に本検討で用いたBRACKETに働く応力レベルが、増厚等の補強により、全体的に一様に減少したと仮定した場合の、応力レベル減少率と亀裂長さが $50^{mm}$ となるまでに要する時間との関係を示す。

同図より例えば、補強等により応力レベルを20%減少させると、亀裂が $50^{mm}$ まで進展する時間は、5年間に10年間に倍増する事となり、補強等により応力を下げる事による効果は非常に大きいという事が判る。

- (4) 図7.6.9に示す如く、亀裂は、亀裂が短い間は進展速度が非常に遅く、ある長さ以上となると、進展速度が急に早くなる。この事は初期亀裂の大きさの設定が亀裂伝播寿命に大きく影響する事を示し、又この傾向は、本件に限らず、他の損傷に於ても同様の場合も多いと考えられ、検査基準、残余寿命の推定等に対して、有益なヒントを与えるものと考えられる。

#### 7.6.6 結 言

本検討の結果、該部の損傷原因、機構を概略明らかとする事が出来、又対策等についても有益な示唆を得る事が出来た。

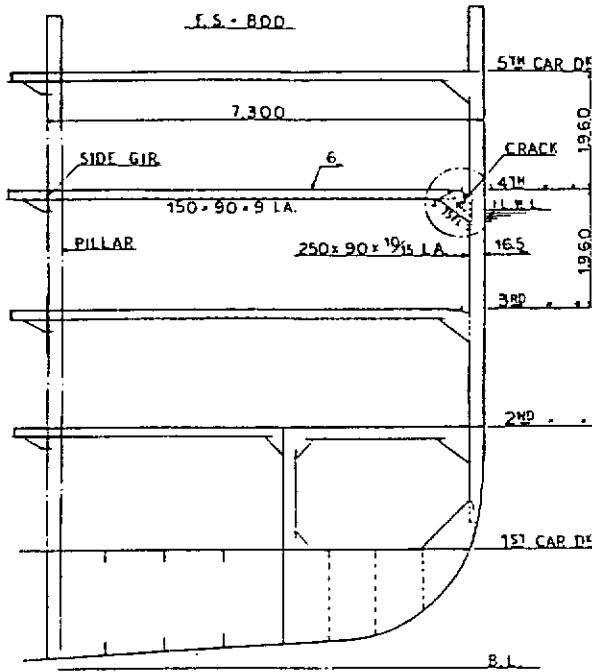


図 7.6.1 損傷の概要

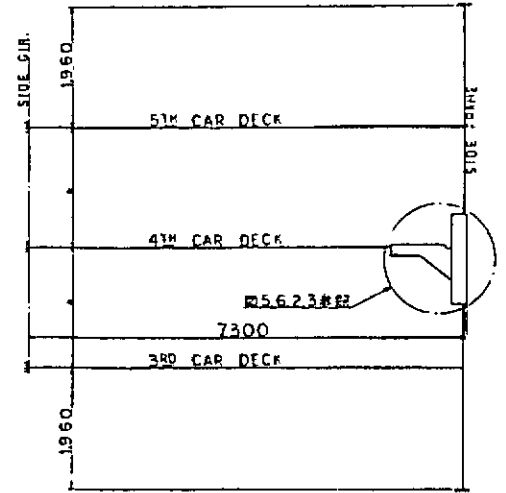


図 7.6.2 計算MODEL (全体図)

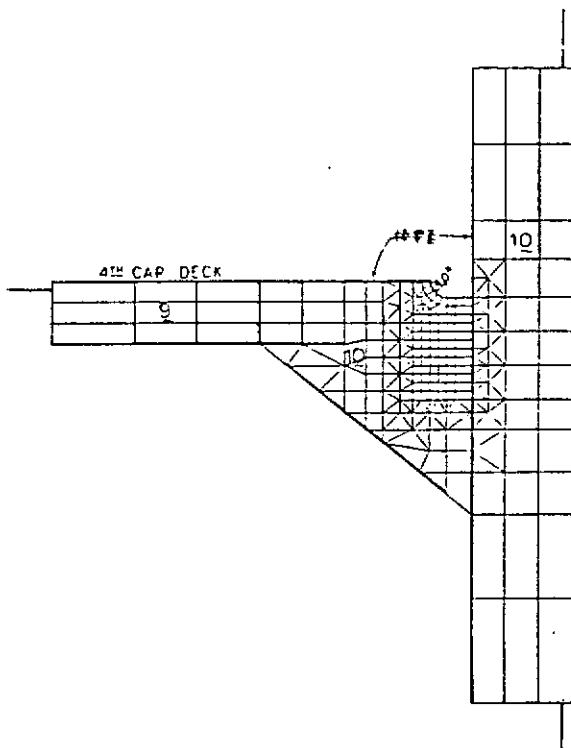
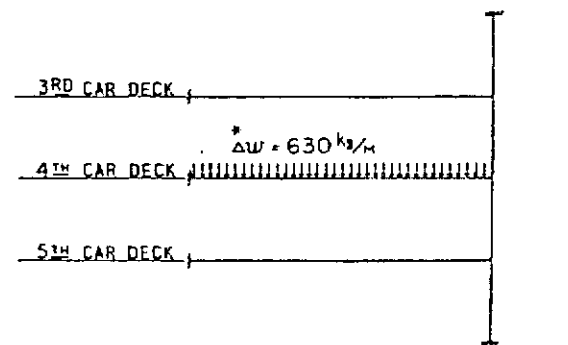


図 7.6.3 メッシュ分割図



\*  $\Delta w$ :  $10^{-6}$  レベルでの上下方向荷重変動成分

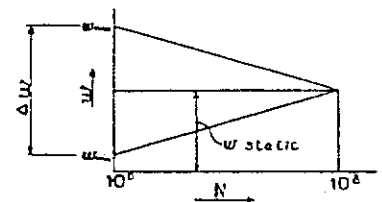


図 7.6.4 荷重条件

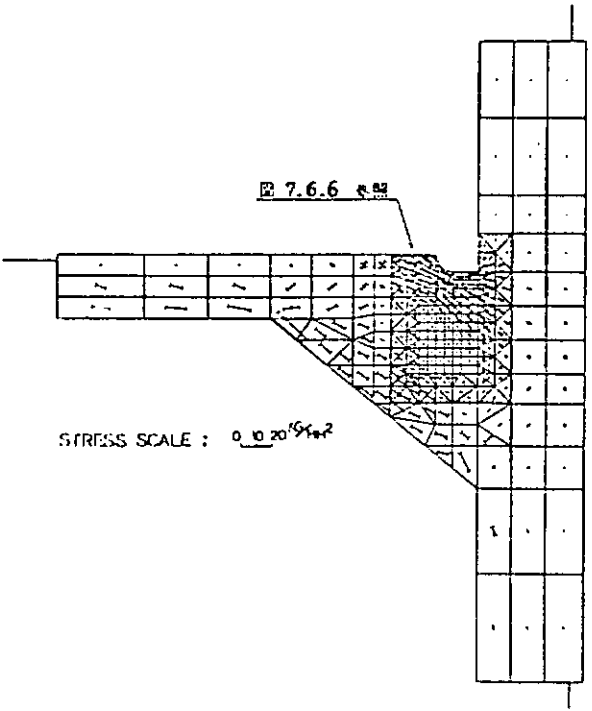


図 7.6.5 主応力分布

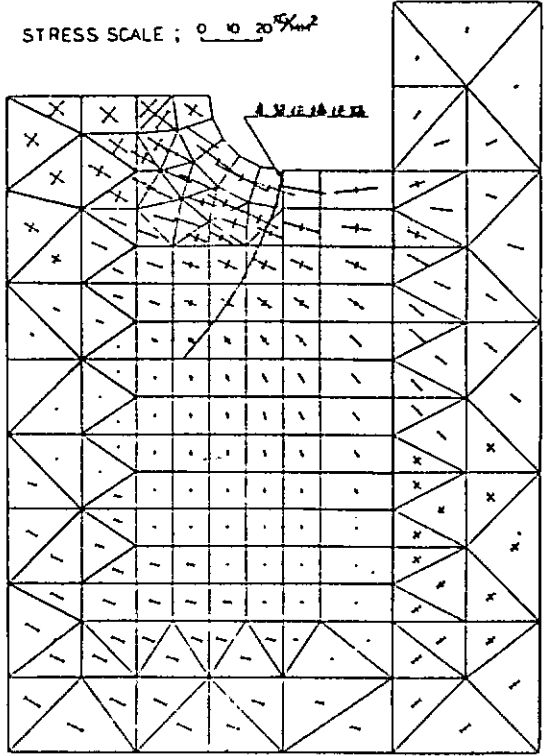


図 7.6.6 主応力分布 (拡大図)

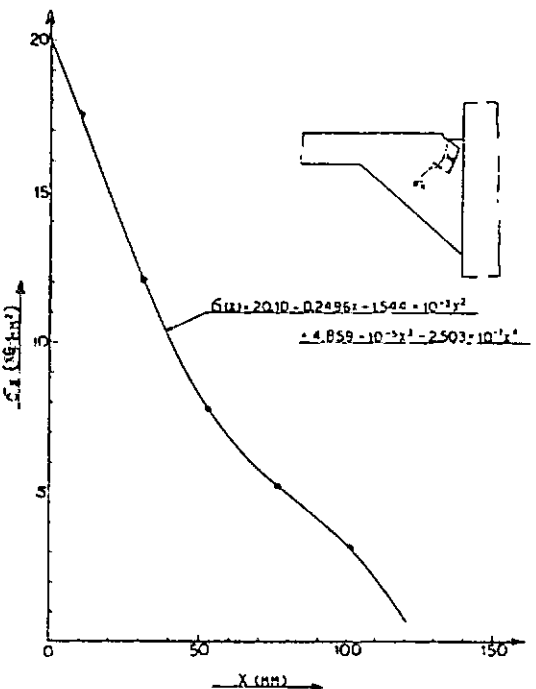


図 7.6.7 亀裂伝播経路に沿った引張主応力分布 (10<sup>-8</sup>レベル)

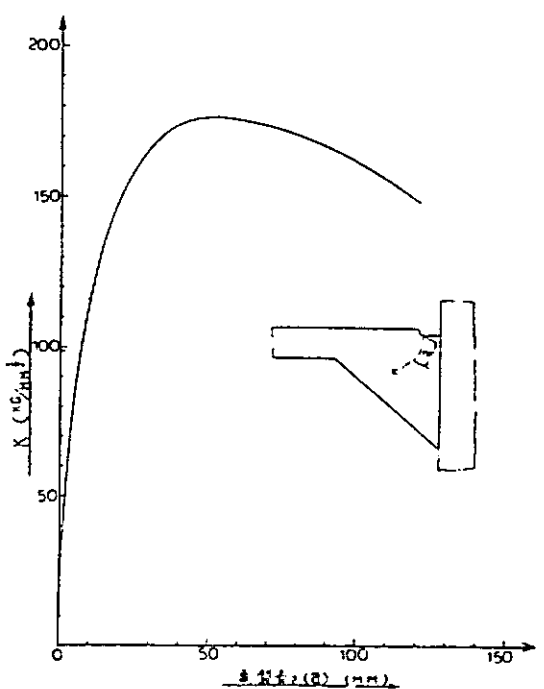


図 7.6.8 亀裂長さ(a)とK値の関係

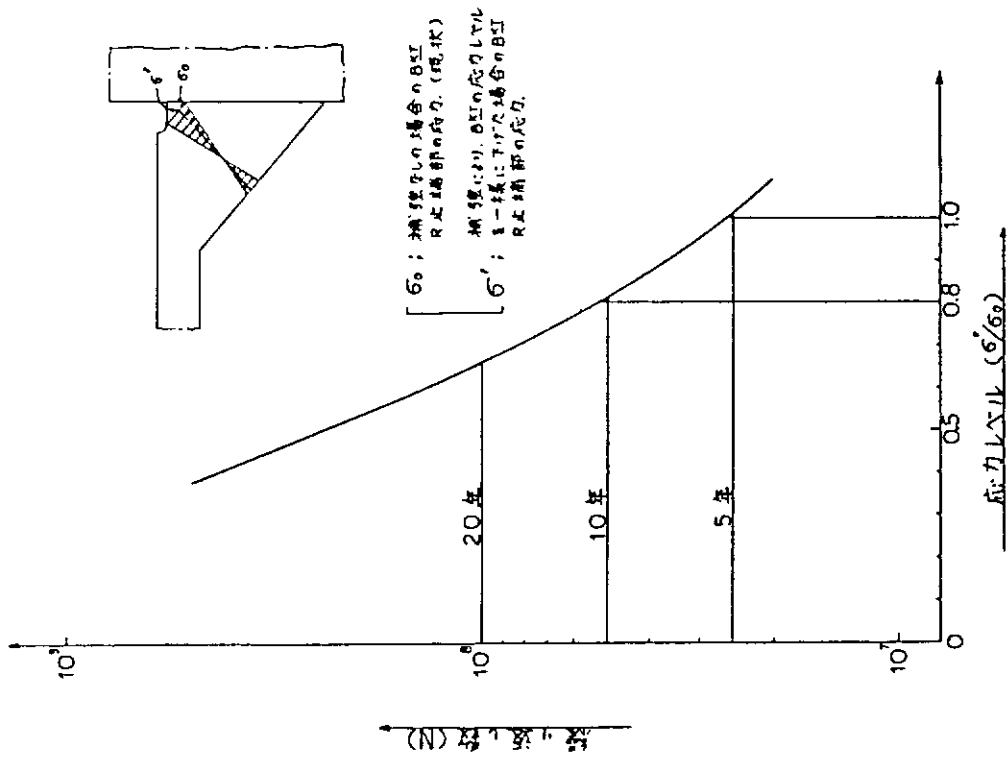


図 7.6.10 応力レベルと亀裂長 50mm となるまでの期間

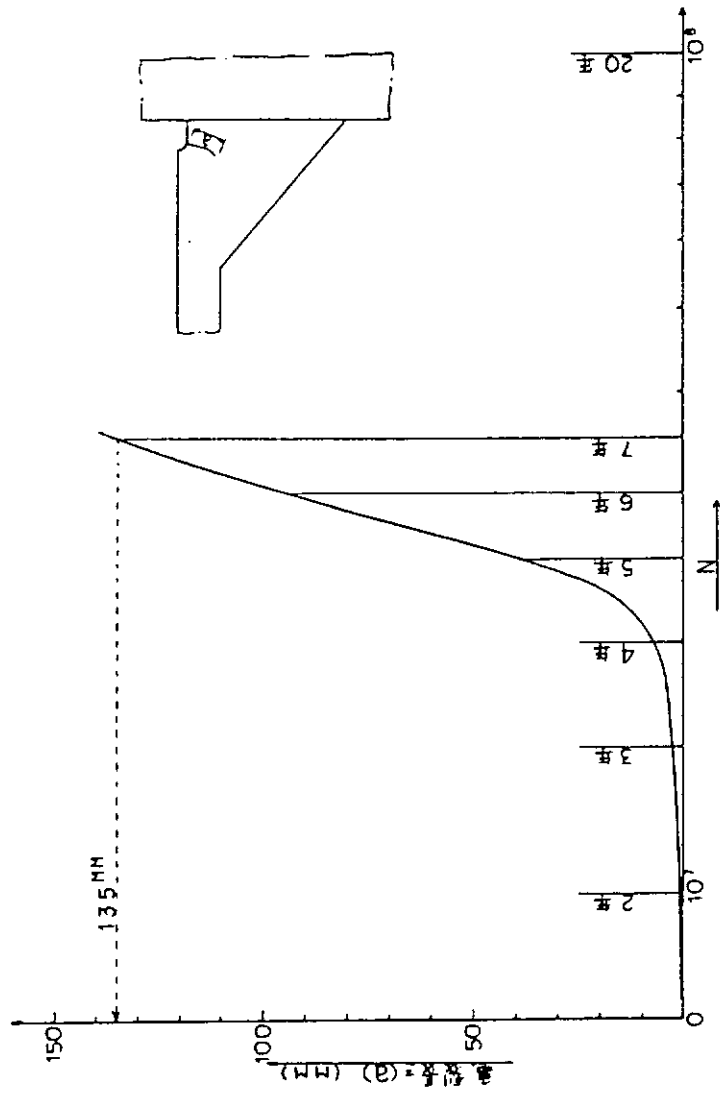


図 7.6.9 亀裂長さ(a)と繰り返し数(N)の関係

## 7.7 木材運搬船の船側構造損傷の検討

### 7.7.1 まえがき

例

破壊力学の応用例として、木材運搬船の船側構造の損傷解析を行った。

損傷は、サイドタンクのウェブ下部のマンホールから四方に発生したクラックで、約60～230mmの長さに見えていた(図7.7.1)。本損傷は、建造後4年目の定期検査時には発見されておらず、その9ヶ月後の中間検査のための入渠時に発見されたものである。

損傷の主な原因は、「タンクが長く、中間に支点となるべきウェブ・フレームが、タンク中央に1箇所しかないため、船側構造下端に、水圧の変動による大きな繰返し応力が生じたため」と考えられている。

### 7.7.2 解析手順

#### (1) 応力解析

船側構造に作用する外力は、波浪水圧によるものと仮定し、NKルールの検査要領<sup>(1)</sup>に与えられている波の山に相当する荷重(図7.7.2に示けるC)と、波の谷に相当する荷重(B)の差によって生ずる荷重を基準外力( $P_0$ )とする。この基準外力のもとで、1ホールド間の骨組構造解析を行い、各サイド・ストリンガーからウェブ・フレームに伝わる外力( $F_1, F_2, F_3$ )を求める。その結果から、ウェブ・フレームのウェブ・ストリンガー以下の部分について、平面応力解析を行い、マンホール周辺の応力分布を求める。(図7.7.3)

#### (2) き裂伝播経路の決定とK値の計算

前節で求めたマンホール周辺の応力分布から高応力が生じる点を選び、その点から、最大主応力方向の直角方向にき裂伝播経路を設定する。

そのき裂伝播経路にそった面応力の分布を多項式で近似する。すなわち、

$$\sigma(x) = \sum_{n=1}^5 c_n x^{n-1} \quad (7.7.1)$$

マンホールの自由縁から発生したき裂を、縁き裂と見なすことにより、任意のき裂長さにおけるK値は(7.7.1)式を用いて、

$$K = \sum_{n=1}^5 B_n c_n a^{n-1} \sqrt{a} \quad (7.7.2)$$

$a$  : き裂長さ

$$\begin{pmatrix} B_1 = 1.1215 \\ B_2 = 0.6829 \\ B_3 = 0.5255 \\ B_4 = 0.4410 \\ B_5 = 0.3868 \end{pmatrix}$$

と表わすことができる。

#### (3) き裂伝播寿命の計算

疲労き裂伝播速度はParisの式で表わされるものとし、材料定数はSR158<sup>(2)</sup>において、造船用軟鋼材に対して得られている値を採用する。すなわち、

$$\frac{da}{dN} = 1.44 \times 10^{-9} \Delta K^{2.5} \quad (7.7.3)$$

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$$

なお、両振り応力状態での有効な $\Delta K$ の値として $K_{\max}$ を用いる。

外力の履歴は図7.7.4に示すような片対称直線分布を仮定し、20年に1回( $Q = 10^{-8}$ )の最大期荷重 $\Delta P_{\max}$ を前述の基準外力 $P_0$ に対する比( $\alpha$ )で表示する。すなわち、

$$\Delta P_{\max} = \alpha \cdot P_0 \quad (7.7.4)$$

以下 $\alpha$ をパラメーターとして計算を行う。

伝播期間としては、最初に発見されたき裂の伝播寿命と推定される9ヶ月(繰返し数 $=375 \times 10^6$ 相当)と、定期検査の期間4ヶ月(繰返し数 $=20 \times 10^7$ 相当)を採る。それぞれのケースの応力履歴は図7.7.4のように仮定し、9ヶ月および4ヶ月間の最大期待値は、20年間の最大期待値 $\Delta P_{\max}$ の0.822および0.913とする。

上記のような分布外力のもとでの等価応力係数 $R_\alpha$ は(7.7.5)式で表わされるが、 $m=2.5$ とした時の値は、図7.7.5のようになる。

$$R_\alpha = \left[ \frac{\lim_{k \rightarrow \infty} \left( \frac{2k-2i+1}{2k} \right)^m \left\{ 10^{\frac{n}{k}i} - 10^{\frac{n}{k}(i-1)} \right\}^{1/m}}{10^{n^*}} \right] \quad (7.7.5)$$

#### (4) き裂発生寿命の計算

素材の疲労強度特性として、堀田ら<sup>3)</sup>によって得られているSS41に対する値を用いる。すなわち

$$\Delta \varepsilon_f = 0.0082 N_c^{-0.111} + 0.44 N_c^{-0.535} \quad (7.7.6)$$

ここで  $\Delta \varepsilon_f$  : 全歪範囲

(7.7.6)式右辺の第一項、第二項は、それぞれ弾性歪範囲( $\Delta \varepsilon_e$ )、塑性歪範囲( $\Delta \varepsilon_p$ )に対応しており、

$$\left. \begin{aligned} \Delta \varepsilon_e &= 0.0082 N_c^{-0.111} \\ \Delta \varepsilon_p &= 0.44 N_c^{-0.535} \end{aligned} \right\} \quad (7.7.7)$$

となる。したがって  $\Delta \varepsilon_p$  と  $\Delta \sigma$  の関係、および  $N_c$  と  $\Delta \sigma$  の関係は次のようになる。

$$\Delta \varepsilon_p = 0.44 \left( \frac{\Delta \sigma}{0.0082 E} \right)^{4.82} \quad (7.7.8)$$

$$\Delta \sigma = 0.0082 E \cdot N_c^{-0.111} \quad (7.7.9)$$

ここで  $\Delta \sigma$  : 応力範囲

$E$  : ヤング率

疲労被害度は線型被害則を仮定して次式で表わされる。

$$D = \frac{\sum n_i}{N_i} = \sum n_i / \left( \frac{\Delta \sigma_i}{0.0082 E} \right)^{-9.01} \quad (7.7.10)$$

$n_i$  : 応力範囲  $\Delta \sigma_i$  の繰返し数

$N_i$  : 応力範囲  $\Delta \sigma_i$  に対応する疲労寿命

### 7.7.3 解析結果とその考察

パネル1, 2における主応力分布を図7.7.6, 7に示す。両パネルとも図中のA~D点において同程度の高応力が得られている。本結果は波浪による外力の変動幅に対するものであり、静止時の平均応力は管内荷重等の考慮が複雑なため考慮していない。したがって、各点は両振り状態にあると仮定する。損傷報告によると各点による差違は明記されておらず不明であるが、少なくともき裂は各点で発見されている。

き裂の伝播経路は図7.7.6, 7に示すように予想されるが、この結果は実際の損傷と一致している。したがって、該当パネルには大きな曲げ応力と、それと同程度の剪断応力が作用し、特にマンホール周辺においては剪断力による応力集中が大きく、き裂発生の原因となっていると考えられる。

疲労き裂伝播解析の結果の例を図7.7.8, 9に示す。

計算結果を表7.7.4にまとめた。4年間におけるマンホール周辺部の疲労被害度Dは高い値を示し、き裂発生寿命は2.8～14.8年となっている。また10mmのき裂は9ヶ月後には60～120mmに成長し、4年ではウェブプレートは破損に至らしめるという結果が得られた。

同表には $\sigma=0.6$ とした時の20年間における疲労被害度および4年後のき裂長さを同時に示した。疲労被害度はいずれの点においても0.1以下となっており、また10mmのき裂は4年後には110～190mmに生長するが、ウェブの破損には至らないことがわかる。したがって、損傷対策に際しては、応力レベルを6割程度に低減すれば十分であると考えられる。

実際の損傷対策としては、マンホール周辺のダブリングプレートによる補強、ウェブフレームの増設等が採用されており、効果を得ている。

特にタンク隔壁とウェブフレームとの中間にウェブフレームを増設することにより、応力値は5割程度に減少するという結果が得られており、有効であると思われる。

#### 7.7.4 ま と め

以上の損傷解析の結果、以下のことがわかった。

- (1) 解析の結果予想されるき裂伝播経路は実船の損傷例と一致しており、損傷部には大きな曲げ応力と剪断応力が作用している。また、この応力状態は船体作用する変動水圧によるものと考えられる。
- (2) マンホール周辺部での疲労き裂発生寿命は2.8～14.8年となり、20年間で疲労被害度Dが0.1以下となるためには、該部の応力値を6割程度に低減する必要がある。
- (3) 初期長さ10mmのき裂は、9ヶ月後には60～120mmのき裂となり、4年間ではウェブプレートは破損に至る。また、応力値を6割に低減すると、4年間でき裂は110～190mmとなるが、ウェブプレートの破損には至らない。

## 参考文献

- 1) 「鋼船規則集検査要領」、日本海事協会、昭和54年
- 2) 「厚鋼板大入熱溶接継手の脆性破壊強度および疲労強度に関する研究」 日本造船研究協会資料、No 267-2、昭和52年8月
- 3) 堀田外「鋼材の歪制御低サイクル疲労強度推定に関する研究(第3報)」 日本造船学会論文集、第128号、昭和45-12



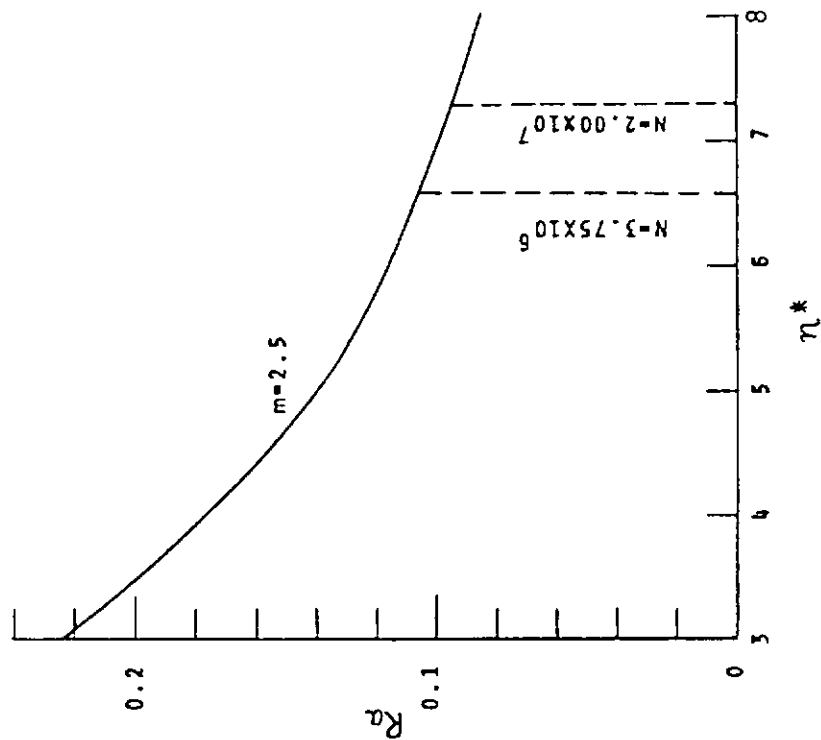


図 7.7.5 等価応力係数  $R_a$  ( $m=2.5$ )

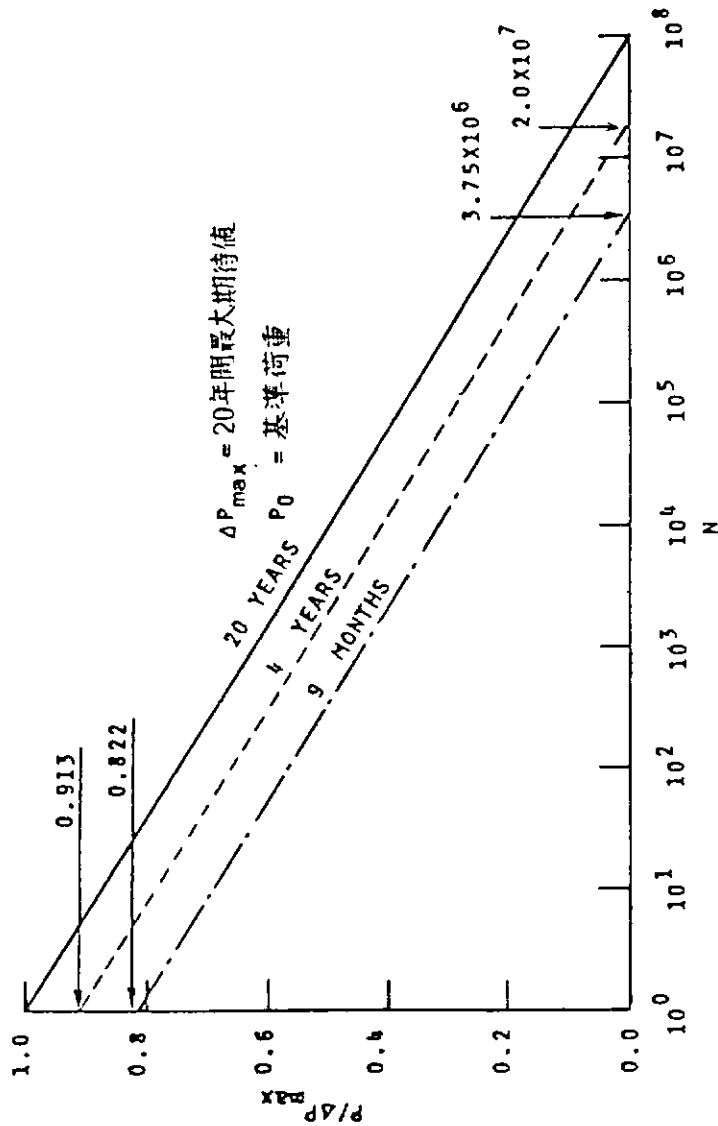
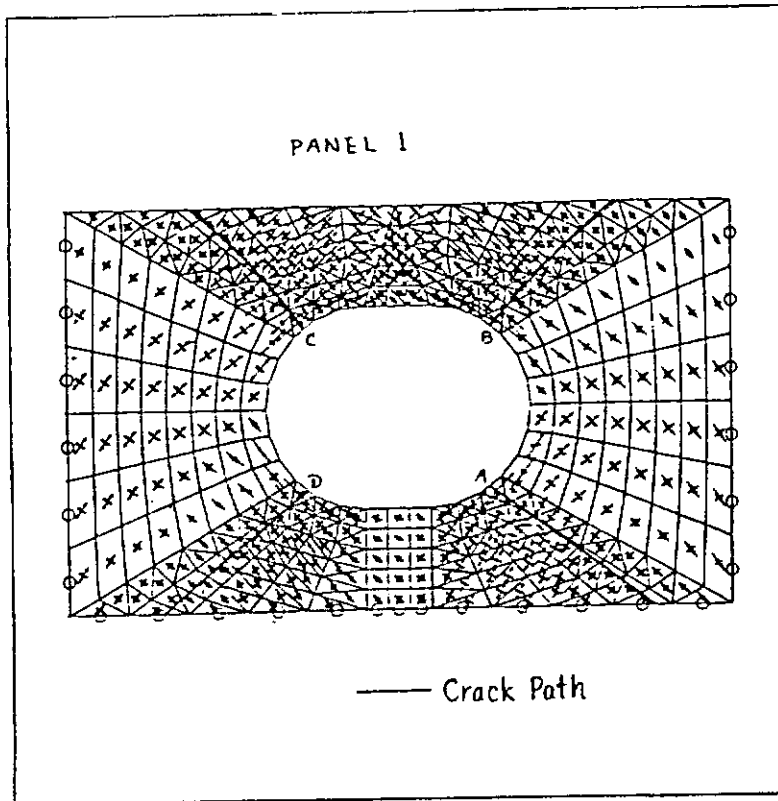
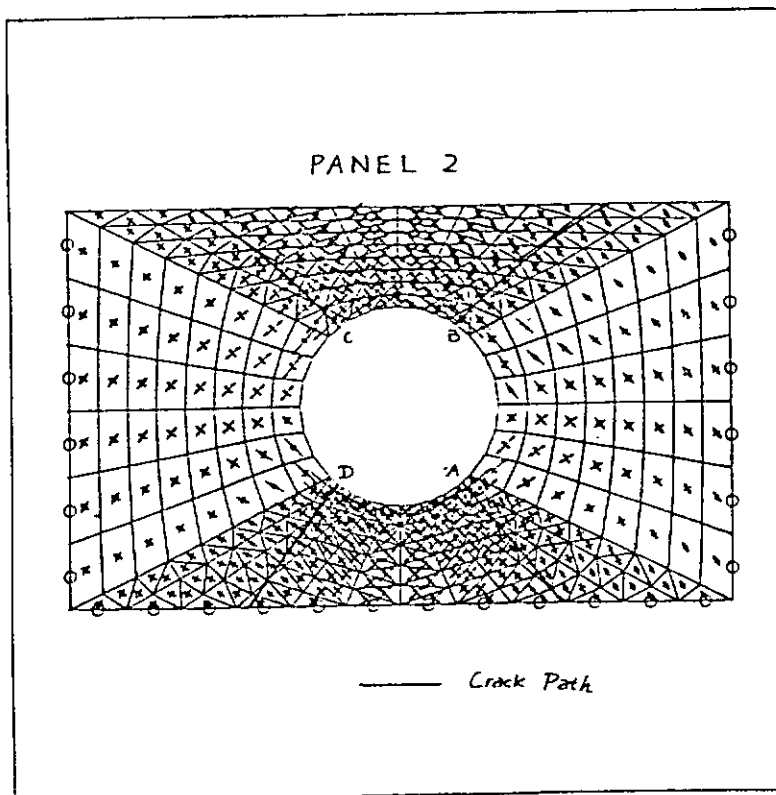


図 7.7.4 外力の長期分布



|                |                             |
|----------------|-----------------------------|
| SCALE          |                             |
| STRUCTURE      | 178-254 mm                  |
| PR. STRESS     | 204.197 MPa/mm <sup>2</sup> |
|                |                             |
| SR169          |                             |
| TITLE          | A3                          |
| VIEW           | C-OF SPHERE                 |
| POINT          | Q3=10.00                    |
|                | Q=1.00                      |
|                | Q=0.00                      |
|                | Q=0.00                      |
| PART           |                             |
| SSD3           |                             |
| LOAD           | LC01                        |
| REST.          | REC01                       |
| FIGURE NO.     | 2                           |
| DRAWING NO.    |                             |
| DATE: 84.10.1. |                             |
| TIME: 17.39.   |                             |

図 7.7.6 主応力分布 (パネル 1)



|                |                             |
|----------------|-----------------------------|
| SCALE          |                             |
| STRUCTURE      | 178-254 mm                  |
| PR. STRESS     | 211.479 MPa/mm <sup>2</sup> |
|                |                             |
| SR169          |                             |
| TITLE          | A3                          |
| VIEW           | C-OF SPHERE                 |
| POINT          | Q3=10.00                    |
|                | Q=1.00                      |
|                | Q=0.00                      |
|                | Q=0.00                      |
| PART           |                             |
| SSD2           |                             |
| LOAD           | LC01                        |
| REST.          | REC01                       |
| FIGURE NO.     | 3                           |
| DRAWING NO.    |                             |
| DATE: 84.10.1. |                             |
| TIME: 17.39.   |                             |

図 7.7.7 主応力分布 (パネル 2)

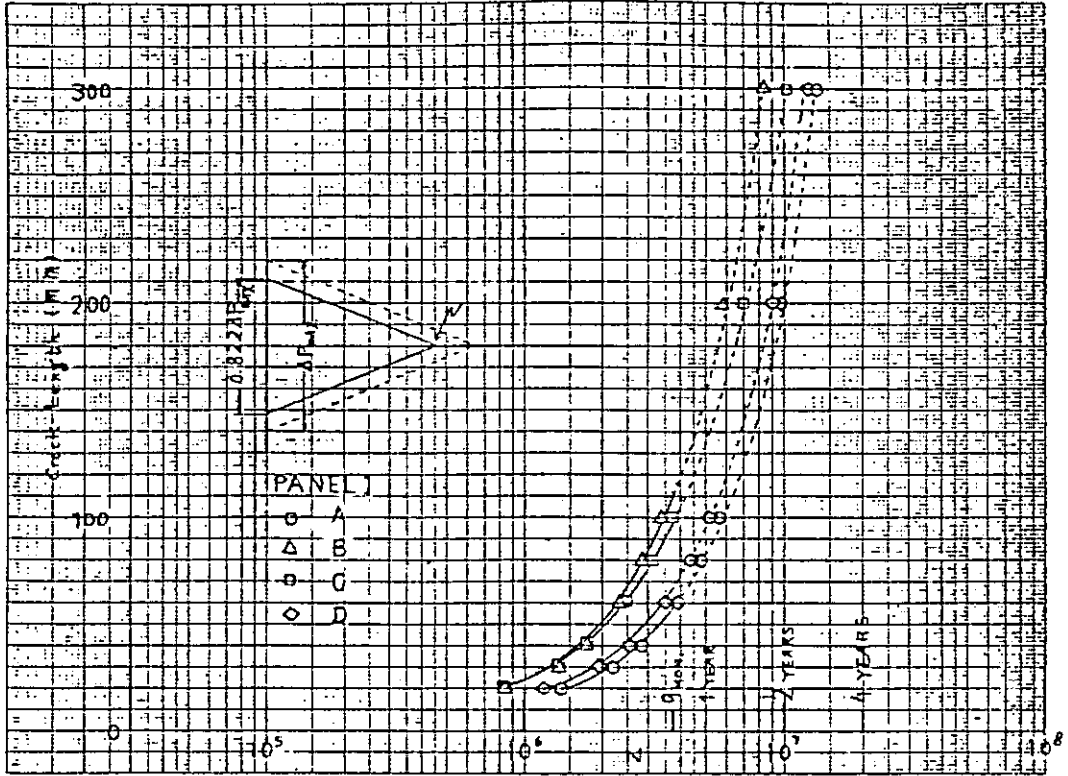


図 7.7.8 き裂伝播計算結果 (パネル 1)

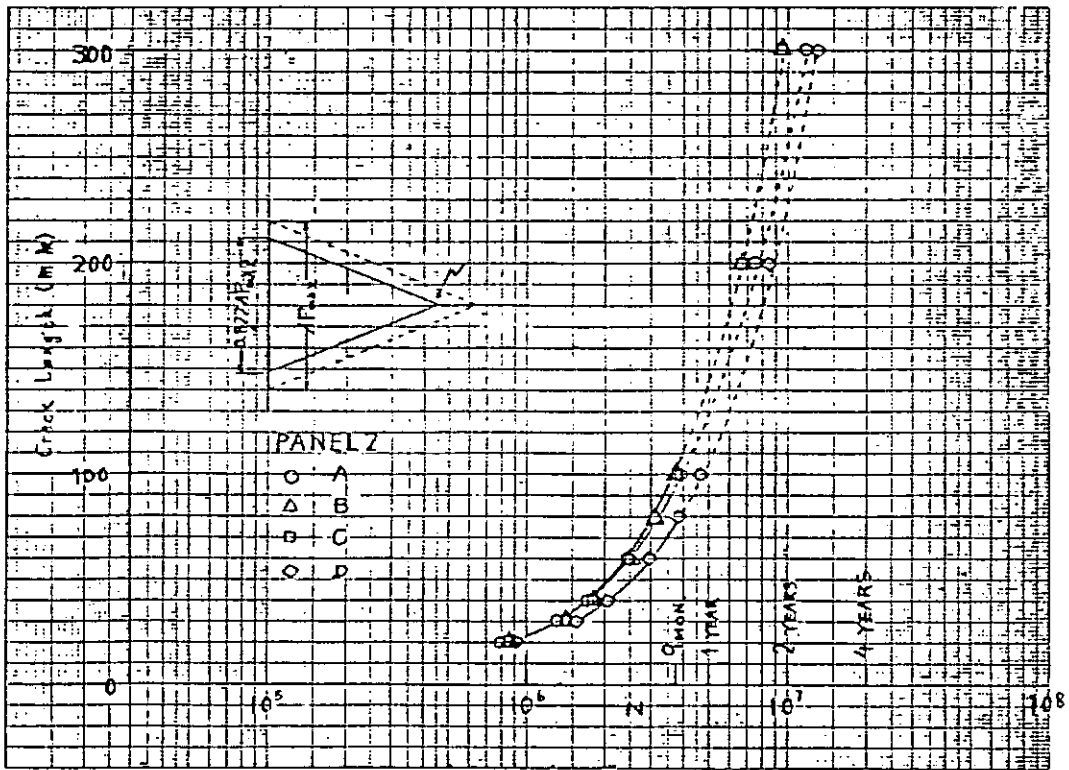


図 7.7.9 き裂伝播計算結果 (パネル 2)

表 7.7.1 計 算 結 果

| PANEL | POSITION | D       |          | A (MM)  |          | A (MM)  |         | D        |         | A (MM)  |         |
|-------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|
|       |          | 4 YEARS | 9 MONTHS | 4 YEARS | 20 YEARS | 4 YEARS | 4 YEARS | 20 YEARS | 4 YEARS | 4 YEARS | 4 YEARS |
| 1     | A        | 0.27    | 60.0     | -       | 0.014    | -       | -       | 0.014    | -       | -       | 100.0   |
| 1     | B        | 1.45    | 120.0    | -       | 0.077    | -       | -       | 0.077    | -       | -       | 190.0   |
| 1     | C        | 1.63    | 100.0    | -       | 0.085    | -       | -       | 0.085    | -       | -       | 160.0   |
| 1     | D        | 0.56    | 70.0     | -       | 0.029    | -       | -       | 0.029    | -       | -       | 110.0   |
| 2     | A        | 1.77    | 90.0     | -       | 0.095    | -       | -       | 0.095    | -       | -       | 150.0   |
| 2     | B        | 1.65    | 100.0    | -       | 0.085    | -       | -       | 0.085    | -       | -       | 165.0   |
| 2     | C        | 1.65    | 100.0    | -       | 0.085    | -       | -       | 0.085    | -       | -       | 160.0   |
| 2     | D        | 1.73    | 80.0     | -       | 0.091    | -       | -       | 0.091    | -       | -       | 125.0   |

#1) D= CUMULATIVE FATIGUE DAMAGE  
#2) A= CRACK LENGTH (INITIAL LENGTH = 10.0 MM)  
#3) -- FAILURE OF WEB PLATE

## 7.8 破壊力学の適用による許容欠陥寸法の算定

### 7.8.1 まえがき

実構造物においては、溶接部等には何らかの欠陥が存在する。また、非破壊検査による検出可能な欠陥の大きさにも限度がある。したがって、最初から欠陥が存在するものとして、安全性の評価を行なうことが必要となる。

実際の設計に際しては、検出可能な欠陥の寸法、応力レベル等に応じて許容される欠陥寸法が決定されるべきである。

欠陥の強度に及ぼす影響については、欠陥の形状、残留応力分布、材質変化等多くの影響因子を考慮する必要がある、欠陥の種類、溶接方法、材質(母材、溶接棒)等により異なるものと思われる。

しかしながら、上記諸因子に関する情報は、まだまだ不十分であり、今後の研究を待たなければならない。

ここでは、欠陥を半楕円形の表面亀裂であると仮定し、破壊力学の適用により疲労亀裂伝播解析を行ない、その結果より許容欠陥寸法を求めた。

### 7.8.2 解析手順

許容欠陥寸法は以下の手順および仮定により求める。

- 1) 欠陥は半楕円形の表面亀裂で、膜応力と曲げ応力の組合せ荷重を受けるものとする(図7.8.1)。
- 2) 初期欠陥からは、直ちに疲労亀裂の伝播が開始し、その亀裂が板厚を貫通するまでを寿命とする。ただし、曲げ応力成分比  $R_B$  が 0.8 より大きい場合には、板厚の80%の深さまで亀裂が進展した時点を貫通とみなす。
- 3) 表面亀裂の伝播解析においては、Newman-Raju の式<sup>1)</sup>より算出した最深部の  $\Delta K$  値を用いて、Paris 則を適用し、深さ  $b$  の進展量を求め、表面における長さ  $a$  は、川原らの式<sup>2)</sup>により求める。
- 4) 平均応力、 $\Delta K_{th}$  の影響は考慮しない。

### 7.8.3 表面亀裂の貫通寿命を支配するパラメータ

前項の手順により，表面亀裂の解析を行なう場合に，貫通寿命を支配するパラメータについて考察する。疲労亀裂伝播速度は(7.8.1)式で与えられる。

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m \quad \text{----- (7.8.1)}$$

表面亀裂最深部のK値は，Newman-Rajuにより以下のように表わせる<sup>1)</sup>

$$\begin{aligned} \Delta K &= (\Delta \sigma_t + H \cdot \Delta \sigma_b) \cdot F \sqrt{\pi b} / E(k) \\ &= \Delta \sigma \left\{ (1 - R_B) + H \cdot R_B \right\} F \cdot \sqrt{\pi b} / E(k) \end{aligned}$$

$$\text{ここで, } E(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta} \, d\theta, \quad k^2 = 1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2$$

$$F = \left[ M_1 + M_2 \left(\frac{b}{t}\right)^2 + M_3 \left(\frac{b}{t}\right)^4 \right]$$

$$M_1 = 1.13 - 0.09 \left(\frac{b}{a}\right)$$

$$M_2 = -0.54 + \frac{0.891}{0.2 + \frac{b}{a}}$$

$$M_3 = 0.5 - \frac{1.0}{0.65 + \frac{b}{a}} + 14 \left(1.0 - \frac{b}{a}\right)^{24}$$

$$\begin{aligned} H &= 1 - \left(1.22 + 0.12 \frac{b}{a}\right) \left(\frac{b}{t}\right) \\ &\quad + \left\{ 0.55 - 1.05 \left(\frac{b}{a}\right)^{0.75} + 0.47 \left(\frac{b}{a}\right)^{1.5} \right\} \left(\frac{b}{t}\right)^2 \end{aligned}$$

----- (7.8.2)

$\Delta \sigma_t$  : 膜応力の変動幅

$\Delta \sigma_b$  : 曲げ応力の変動幅

$$\Delta \sigma = \Delta \sigma_t + \Delta \sigma_b$$

$$R_B = \Delta \sigma_b / \Delta \sigma$$

(7.8.1), (7.8.2)式より，最深部の亀裂進展量が決定され，表面における長さ  $a$  は，(7.8.3)式より求められる。

$b_0/a_0 < A - B b_0/t$  のとき

$$a = \left\{ \left( \frac{b}{A - B b/t} \right)^n + a_0^n - \left( \frac{b_0}{A - B b_0/t} \right)^n \right\}^{\frac{1}{n}}$$

$b_0/a_0 = A - B b_0/t$  のとき

$$a = \frac{b}{A - B b/t}$$

$b_0/a_0 > A - B b_0/t$  のとき

$$a = \left\{ b^n - b_0^n + a_0^n \left( A - B \frac{b_0}{t} \right)^n \right\}^{\frac{1}{n}} / \left( A - B \frac{b}{t} \right)$$

$$\text{ここで } A = 0.98 + 0.07 R_B$$

$$B = 0.06 + 0.94 R_B$$

$$n = \frac{m}{2} + 1$$

----- (7.8.3)

(7.8.3)式より, 伝播過程において, 表面における長さ  $a$  と深さ  $b$  の比 ( $b/a$ ) は,  $b_0/a_0$ ,  $b_0/t$ ,  $R_B$  と  $b/t$  の関数となる。

すなわち,

$$\frac{b}{a} = f_{ab} (R_B, b_0/a_0, b_0/t, b/t) \text{----- (7.8.4)}$$

したがって, (7.8.2)式で表わされる  $\Delta K$  値も,  $b_0/a_0$ ,  $b_0/t$ ,  $R_B$ ,  $b/t$  の関数として, 次式の形で表わされる。

$$\Delta K = \Delta \sigma \cdot f_K (R_B, \frac{b_0}{a_0}, \frac{b_0}{t}, \frac{b}{t}) \sqrt{\pi b} \text{----- (7.8.5)}$$

$2a_0 \times b_0$  なる初期亀裂が板厚を貫通するまでの寿命  $N_p$  は (7.8.1), (7.8.5)式より次のようになる。

$$\begin{aligned} N_p &= \int_{b_0}^{b_{cr}} \frac{db}{C(\Delta K)^m} = \int_{b_0}^{b_{cr}} \frac{db}{C(\Delta \sigma f_K \sqrt{\pi b})^m} \\ &= \int_{b_0/t}^{b_{cr}/t} \frac{t d(\frac{b}{t})}{C(\Delta \sigma f_K \sqrt{\pi \frac{b}{t}} \sqrt{t})^m} \\ &= \frac{t}{(\Delta \sigma \cdot \sqrt{t})^m} \int_{b_0/t}^{b_{cr}/t} \frac{d(\frac{b}{t})}{C(f_K \sqrt{\pi \frac{b}{t}})^m} \\ &= \frac{1}{\Delta \sigma^m t^{\frac{m}{2}-1}} \hat{f}_N (R_B, \frac{b_0}{a_0}, \frac{b_0}{t}) \end{aligned} \text{----- (7.8.6)}$$

ここで,  $b_{cr}/t = 1.0 \quad (R_B \leq 0.8)$

$b_{cr}/t = 0.8 \quad (R_B > 0.8)$

(7.8.6)式より, 貫通寿命  $N_p$  を支配するパラメータは,  $R_B$ ,  $\frac{b_0}{a_0}$ ,  $\frac{b_0}{t}$  と,  $\Delta\sigma^m t^{\frac{m}{2}-1}$  の4個である。

次に作用応力が繰返し数  $10^{n^*}$  回の片対数直線分布に従う場合は, (7.8.6)式における  $\Delta\sigma$  を, 等価な一定応力変動幅  $\Delta\sigma_{eq}$  と置き換えればよい。

すなわち,

$$\left. \begin{aligned} N_p &= \frac{1}{\Delta\sigma_{eq}^m t^{\frac{m}{2}-1}} f_N(R_B, \frac{b_0}{a_0}, \frac{b_0}{t}) \\ \text{ここで, } \Delta\sigma_{eq} &= R_a \cdot \Delta\sigma_{max} \\ R_a &= \frac{\lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^k \left\{ \frac{2k-2i+1}{2k} \right\}^m \left\{ 10^{\frac{n^* i}{k}} - 10^{\frac{n^*(i-1)}{k}} \right\}^{\frac{1}{m}}}{10^{n^*}} \end{aligned} \right\} (7.8.7)$$

$\Delta\sigma_{max}$ ; 応力変動幅の  $10^{-n^*}$  最大期待値

$t = t_0$  の場合を基準と考えると, 任意の厚さ  $t$  の平板に作用する応力変動幅  $\Delta\sigma_{max}$  を,  $t = t_0$  における等価な(同じ寿命  $N_p$  を与える)応力変動幅  $\Delta\sigma_{max,0}$  に次式により換算することができる。

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{max,0} &= \Delta\sigma_{max} (t/t_0)^{\frac{m-2}{2m}} \\ &= R_t \cdot \Delta\sigma^{\frac{m-2}{2m}} \end{aligned} \quad \text{----- (7.8.8)}$$

以上より,  $t = t_0$ ,  $n^* = n_0^*$  なる標準条件について,  $R_B$ ,  $b_0/a_0$  をパラメータとして,  $N_p = N_{p0}$  なる伝播寿命を与えた  $\Delta\sigma_{max,0}$  と  $b_0/t$  の関係を求めておけば, 任意の場合について,  $R_a, R_t$  なる修正係数を求めることにより,  $\Delta\sigma_{max}$  と  $b_0/t$  の関係を知ることができる。

#### 7.8.4 標準条件における解析結果

造船用軟鋼材, 液化ガス運搬船用タンク材料 KL-24B, 耐蝕アルミ合金 A5083 材について, 標準条件を設定し, 疲労亀裂伝播解析を行なった。

解析に用いた各材料の材料定数は, 表 7.8.1<sup>3), 4), 5)</sup> に示す。

また, 設定した標準条件は以下の通りである。

すなわち，

1) 板厚  $t_0 = 10 \text{ mm}$  とする。

2) 応力の頻度分布は，総繰返し数  $10^8$  回の片対数直線分布で表わされる。 $n_0^* = 8$

3) 貫通寿命  $N_P = 10^8$  とする。

以上の標準条件下の解析結果を図 7.8.2, 図 7.8.3, 図 7.8.4 に示す。同図は，標準条件のもとに許容される欠陥寸法 ( $b_0/t$ ) と，応力変動幅の  $10^{-8}$  最大期待値 ( $\Delta \sigma_{\max, 0}$ ) の関係を， $R_B, b_0/a_0$  をパラメーターとして示している。

本解析結果より，上記標準以外の条件下での許容欠陥寸法，許容応力，貫通寿命を推定することができる。

#### 7.8.5 標準条件以外の場合における許容欠陥寸法，許容応力，貫通寿命の推定方法

前項のように標準条件を設定すると，任意のケースにおける修正係数は次のようになる。

1) 板厚による修正

$t_0 = 10$  として (7.8.8) 式より

$$R_t = \left(\frac{t}{10}\right)^{\frac{m-2}{2m}} \text{ ----- (7.8.9)}$$

(7.8.9) 式で表わされる  $R_t$  を図 7.8.5 に示す。

2) 応力頻度分布における総繰返し数  $10^{n^*}$  による修正

$n_0^* = 8$  とすると，(7.8.7) 式より

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_{\max}(n^* = 8) &= \frac{R_a(n^*)}{R_a(n^* = 8)} \Delta \sigma_{\max}(n^*) \\ &= R_\sigma \Delta \sigma_{\max}(n^*) \text{ ----- (7.8.10)} \end{aligned}$$

(7.8.10) 式で表わされる  $R_\sigma$  を図 7.8.6 に示す。

3) 貫通寿命  $N_p$  による修正

(7.8.7), (7.8.8) 式より,  $N_p$  は,  $\Delta\sigma_{\max}^{-m}$  に比例することがわかる。したがって,  $N_p = 10^8$  のときの許容応力を  $\Delta\sigma_{\max,0}$  とすると, 任意の  $N_p$  に対する許容応力は,

$$\begin{aligned}\Delta\sigma_{\max} &= \left(\frac{N_p}{10^8}\right)^{-m} \Delta\sigma_{\max,0} \\ &= R_p \cdot \Delta\sigma_{\max,0} \text{----- (7.8.11)}\end{aligned}$$

となる。

(7.8.11) 式で表わされる  $R_p$  を図 7.8.6 に示す。

以上の修正係数を用いて, ① 欠陥寸法が与えられた場合の許容応力, ② 応力が与えられた場合の許容欠陥寸法, ③ 欠陥寸法, 応力が与えられた場合の貫通寿命等を求めることができる。それぞれの場合の計算フローを図 7.8.7 ~ 図 7.8.9 に示す。

以下に計算例を示す。

例 1. "15 mm 厚の軟鋼材に  $a_0 = 2.5$  mm,  $b_0 = 1.5$  mm の表面欠陥が存在する場合の許容応力を求める。

外力は膜応力のみ作用し, 総繰返し数  $10^{n^*} = 10^8$  の片対数直線分布に従うものとする。貫通寿命  $N_p$  は  $10^8$  とする。" (図 7.8.7)  
 $\frac{b_0}{t} = 0.1$ ,  $\frac{b_0}{a_0} = 0.6$ ,  $R_B = 0.0$  より  $\Delta\sigma_{\max,0} = 23.3 \text{ kg/mm}^2$ ,  $t = 15$ ,  
 $n^* = 8$ ,  $N_p = 10^8$  より

$$R_t = 1.04, R_\sigma = 1.0, N_p = 1.0$$

$$\text{したがって, } \Delta\sigma_{\max} = \frac{23.3}{1.04} = 22.4 \text{ kg/mm}^2$$

例 2. "20 mm 厚の軟鋼材に,  $10^{-8}$  レベルで  $\Delta\sigma_t = 8 \text{ kg/mm}^2$ ,

$\Delta\sigma_b = 12 \text{ kg/mm}^2$  になる応力が作用する場合, 10 年間 ( $N_p = 5 \times 10^7$ ) では貫通しない欠陥寸法を求める。" (図 7.8.8)

$$t = 20, n^* = 8, N_p = 5 \times 10^7 \text{ より}$$

$$R_t = 1.07, R_\sigma = 1.0, R_p = 1.32$$

$$\Delta\sigma_{\max,0} = \frac{1.07}{1.32} \times 20 = 16.2 \text{ kg/mm}^2$$

$$R_B = 0.6$$

したがって、許容される欠陥寸法は次のようになる。

$$\frac{b_0}{a_0} = 0.0 \text{ の場合 } \frac{b_0}{t} = 0.05$$

$$a_0 = \infty, b_0 = 1 \text{ mm}$$

$$\frac{b_0}{a_0} = 0.1 \text{ の場合 } \frac{b_0}{t} = 0.24$$

$$a_0 = 48 \text{ mm}, b_0 = 4.8 \text{ mm}$$

$$\frac{b_0}{a_0} = 0.2 \text{ の場合 } \frac{b_0}{t} = 0.4$$

$$a_0 = 40 \text{ mm}, b_0 = 8 \text{ mm}$$

例 3. “40 mm 厚の A5083 材に  $\frac{1}{2 \times 10^5}$  レベルで  $\Delta \sigma_t = 2.0 \text{ kg/mm}^2$ ,

$\Delta \sigma_b = 8.0 \text{ kg/mm}^2$  なる応力が作用する場合,

$a_0 = 20 \text{ mm}$ ,  $b_0 = 4 \text{ mm}$  なる亀裂の貫通寿命の  $N_p$  を求める。”

(図 7.8.9)

$$\frac{b_0}{t} = 0.1, \frac{b_0}{a_0} = 0.2, R_B = 0.8 \text{ より } \Delta \sigma_{\max, 0} = 10.8 \text{ kg/mm}^2$$

$$t = 40, n^* = 5.3 \text{ より } R_t = 1.26, R_\sigma = 1.50$$

したがって,

$$\begin{aligned} N_p &= 1.0 \times 10^8 \left( \frac{10.8}{1.5 \times 1.26 \times 10.0} \right)^{3.04} \\ &= \underline{1.82 \times 10^7} \end{aligned}$$

### 7.8.6 あとがき

半橢円形状に仮定した表面亀裂の板厚貫通までの寿命を支配するパラメーターを明らかにし、設定した標準条件のもとで許容される応力条件と欠陥寸法の関係をもとめた。さらに標準条件における結果を用いて任意の場合の許容欠陥寸法、許容応力あるいは貫通寿命を推定する方法を示した。

## 参考文献

- 1) J.C. Newman, L.S. Raju, "Analysis of Surface Cracks in Finite Plates under Tension or Bending Loads", NASA Technical Paper 1578
- 2) 川原, 栗原, "表面欠陥からの疲労による伝播成長過程に関する予備的考察", 日本造船学会論文集 第137号 (昭.50.6)
- 3) 日本造船研究協会 第153研究部会, "巨大タンカ-用厚鋼板大入熱溶接継手の脆性破壊強度および疲労強度に関する研究", 研究資料No. 249 (昭.51.3)
- 4) 日本造船研究協会 第3基準研究部会, "危険物の特性および運搬船の特殊設備に関する調査研究報告書", 研究資料No. 68R (昭.53.3)
- 5) 日本造船研究協会 第8基準研究部会, "LNG 運搬船の安全基準に関する調査研究報告書(そのⅡ)" 研究資料No.51R (昭.51.3)

表 7.8.1 材料定数

| 材料                   | $c$                   | $m$  | $\Delta K_{th}$ |
|----------------------|-----------------------|------|-----------------|
| 軟鋼 <sup>3)</sup>     | $1.44 \times 10^{-9}$ | 2.5  | 0.0             |
| KT-50N <sup>4)</sup> | $2.2 \times 10^{-10}$ | 3.0  |                 |
| A5083 <sup>5)</sup>  | $1.03 \times 10^{-8}$ | 3.04 |                 |

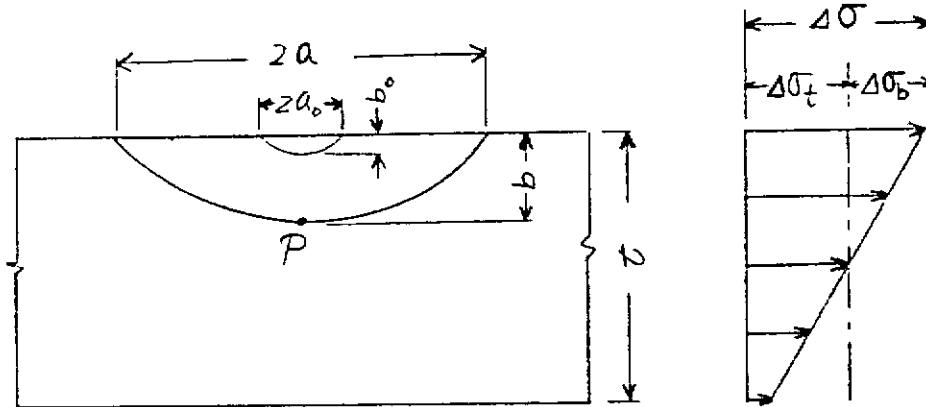


図 7.8.1 欠陥寸法と応力成分

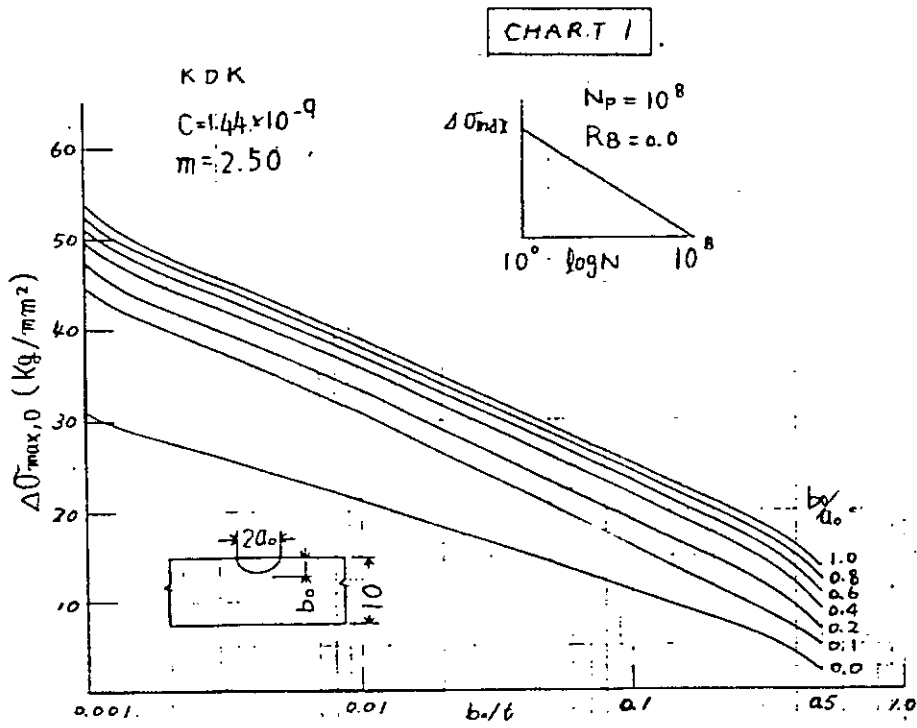


図7.8.2(a) 許容欠陥寸法 (SS41,  $R_B = 0.0$ )

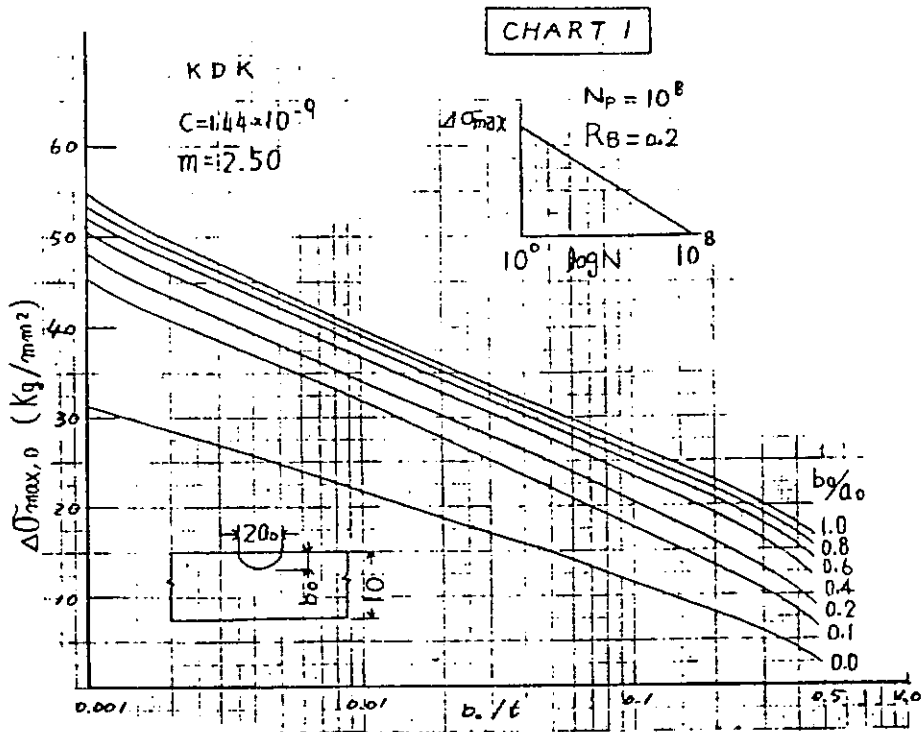


図7.8.2(b) 許容欠陥寸法 (SS41,  $R_B = 0.2$ )

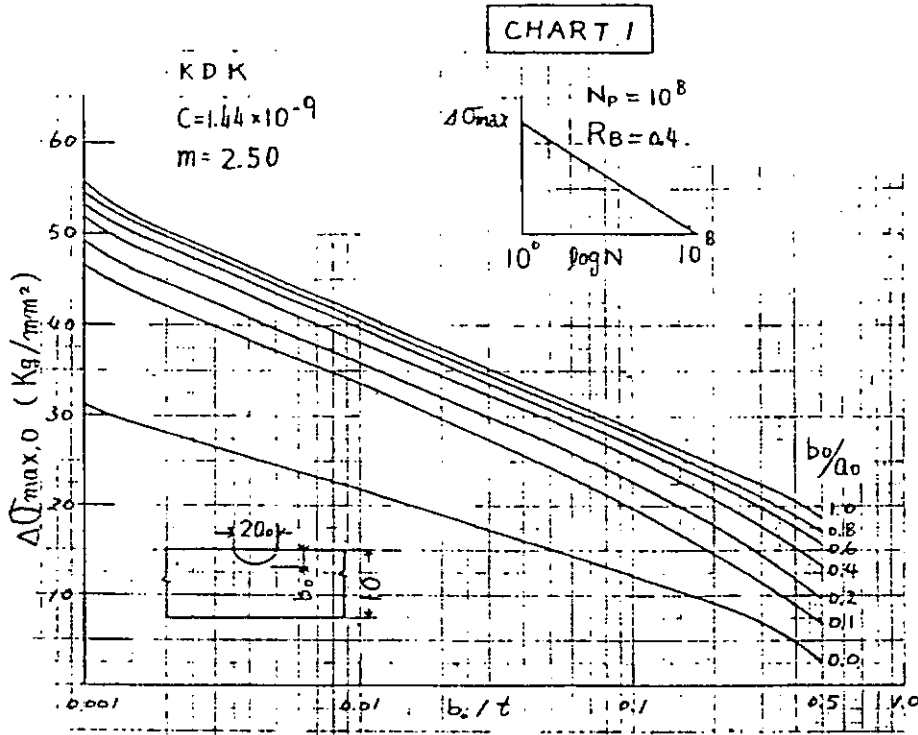


図7.8.2(c) 許容欠陥寸法 (SS41,  $R_B = 0.4$ )

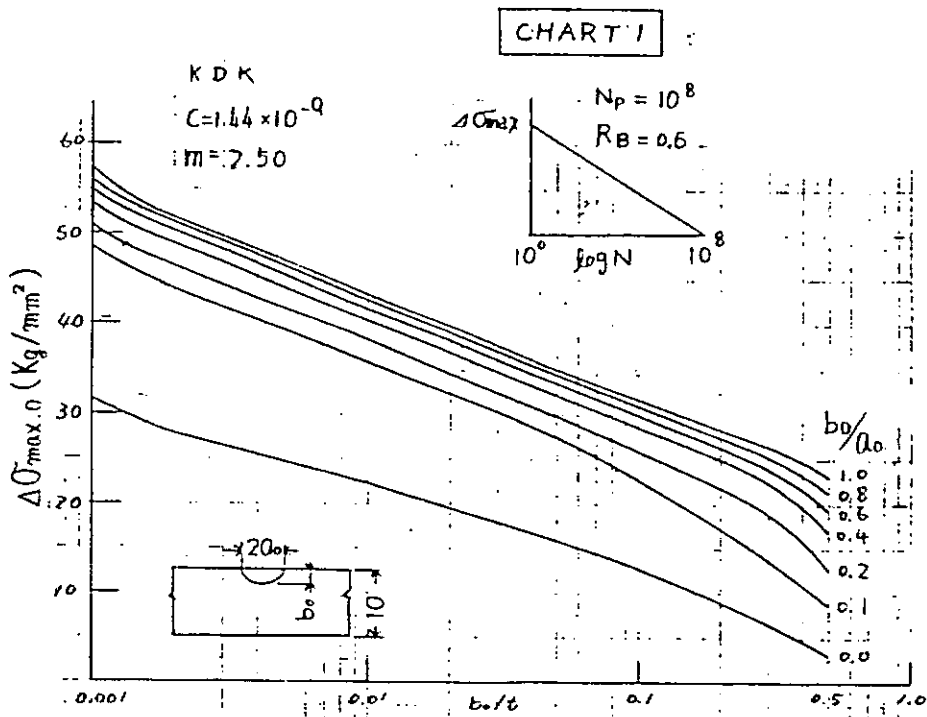


図7.8.2(d) 許容欠陥寸法 (SS41,  $R_B = 0.6$ )

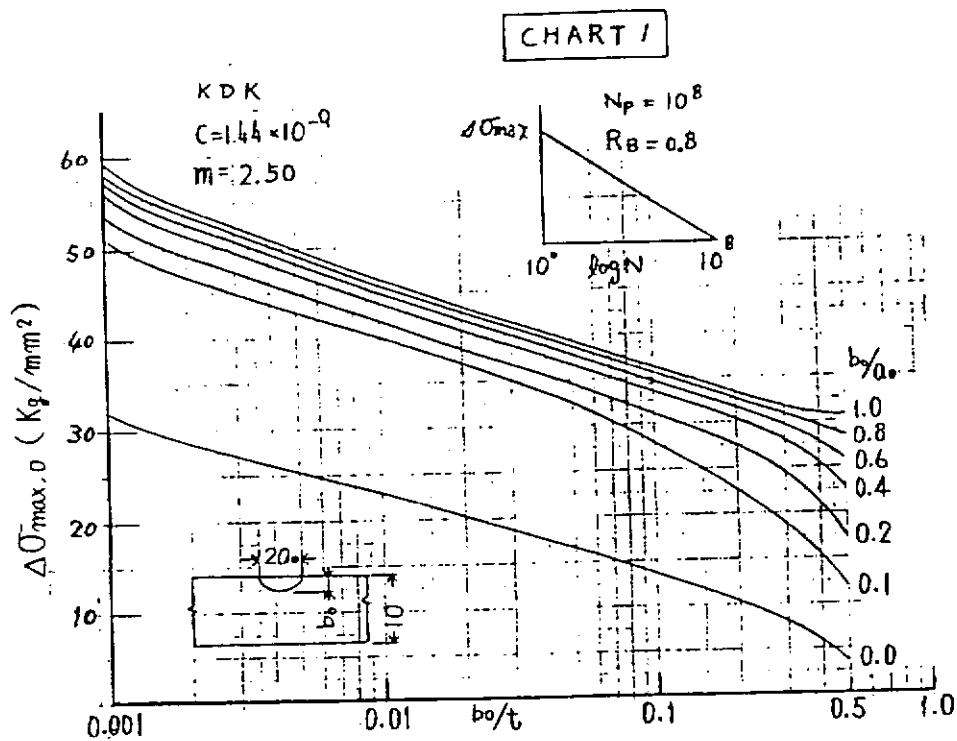


図7.8.2(e) 許容欠陥寸法 (SS41,  $R_B = 0.8$ )

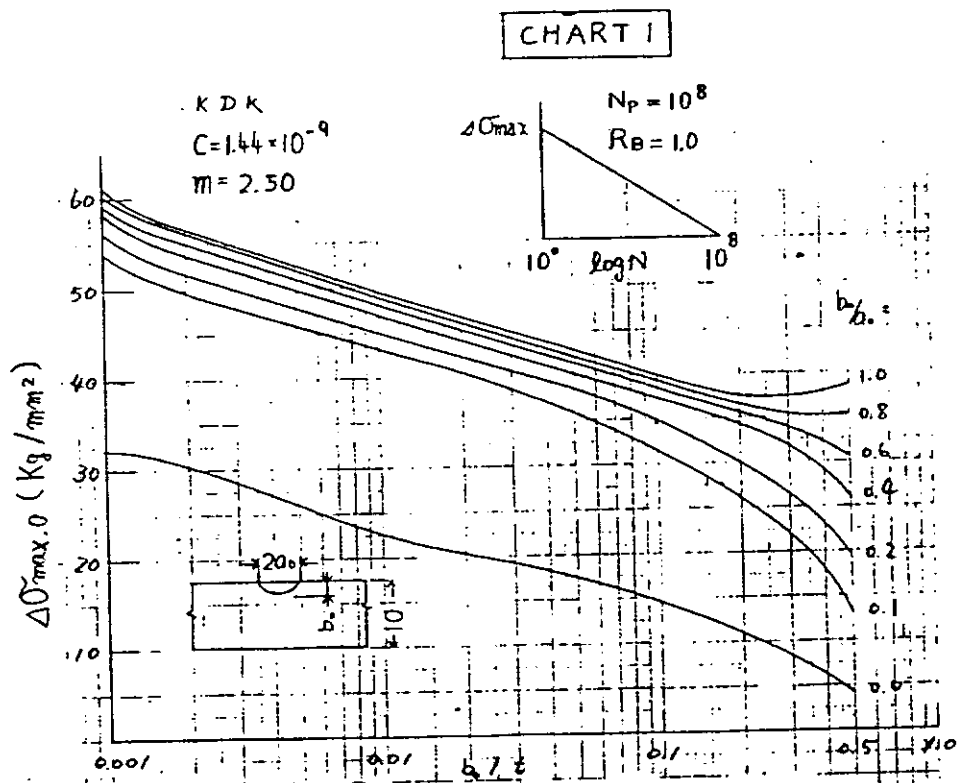


図7.8.2(f) 許容欠陥寸法 (SS41,  $R_B = 1.0$ )

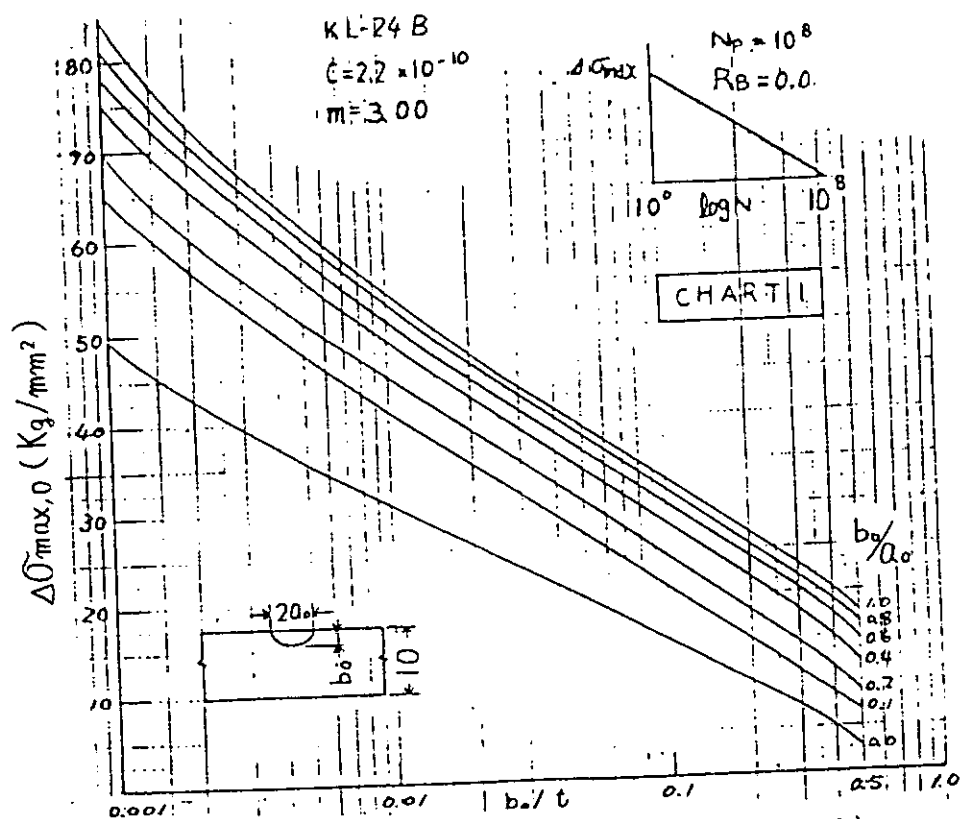


図7.8.3(a) 許容欠陥寸法(KL-24B,  $R_B = 0.0$ )

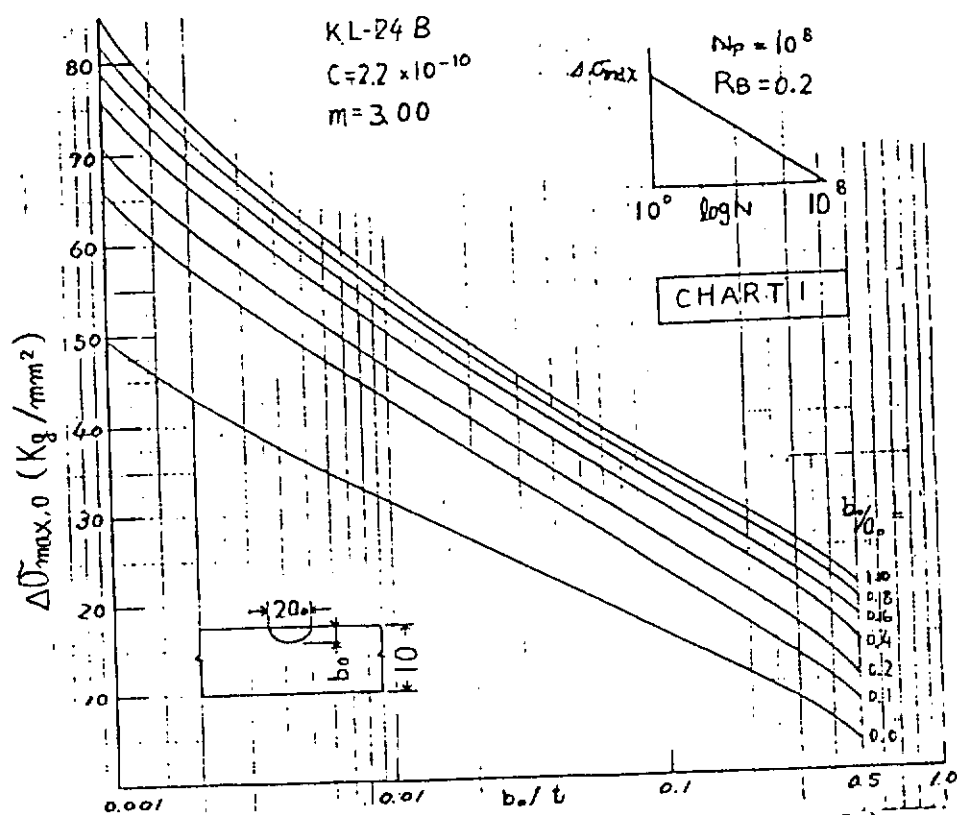


図7.8.3(b) 許容欠陥寸法(KL-24B,  $R_B = 0.2$ )

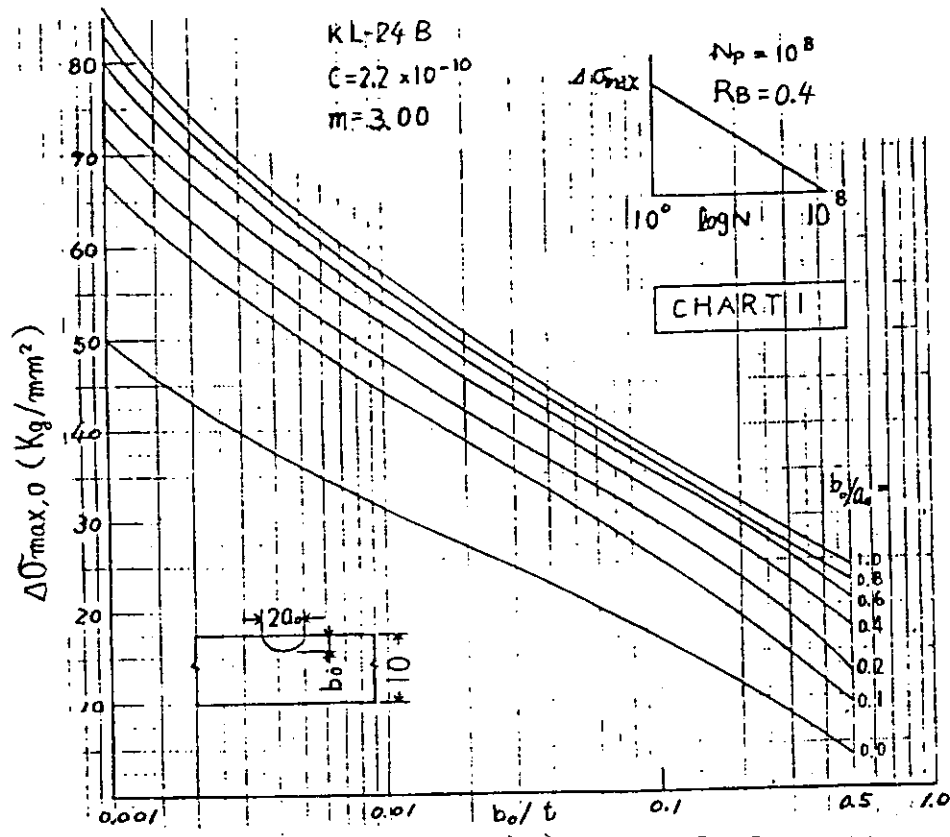


図7.8.3(c) 許容欠陥寸法(KL-24B,  $R_B = 0.4$ )

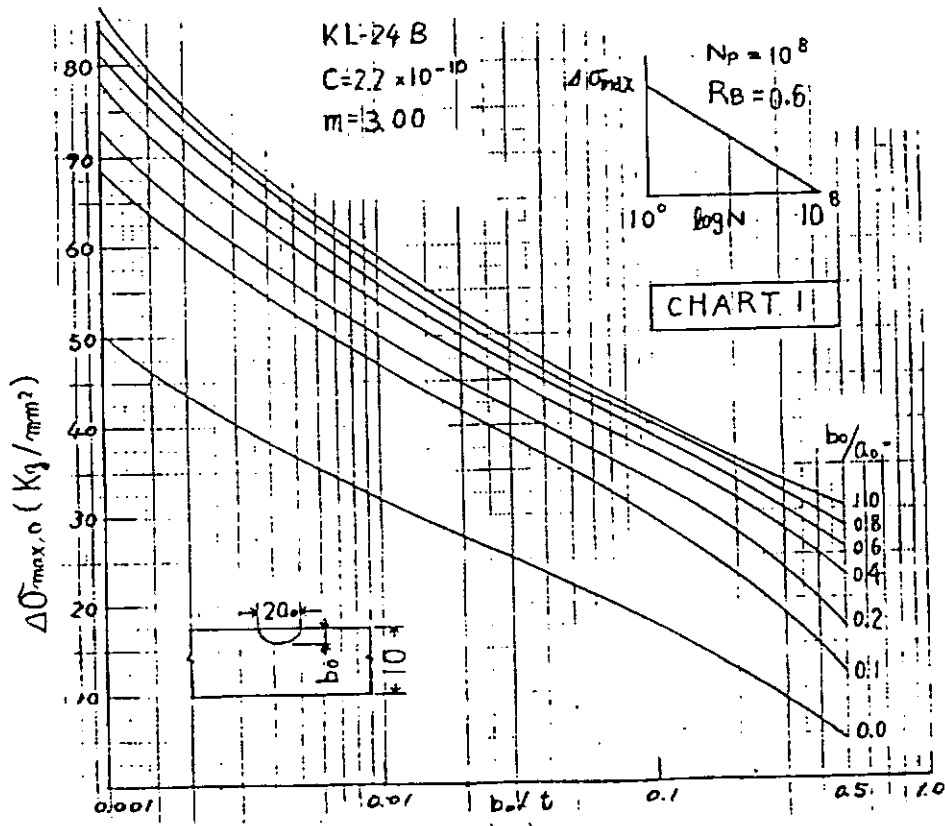


図7.8.3(d) 許容欠陥寸法(KL-24B,  $R_B = 0.6$ )

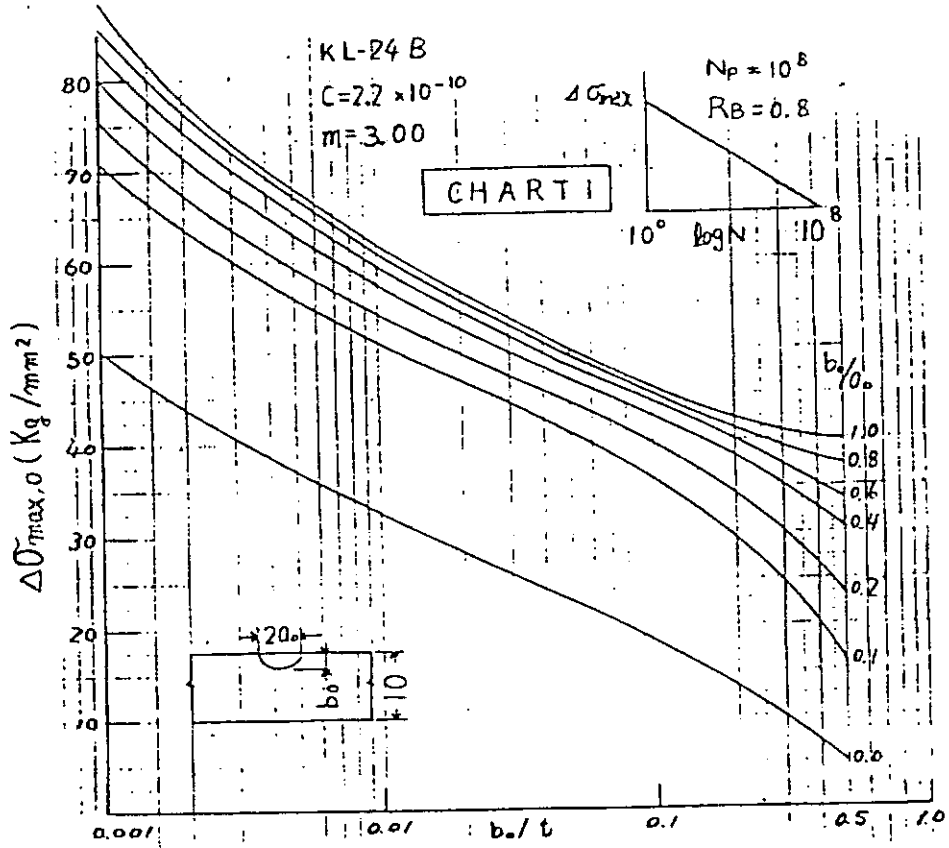


圖 7.8.3 (e) 許容欠陷寸法 (KL-24B,  $R_B=0.8$ )

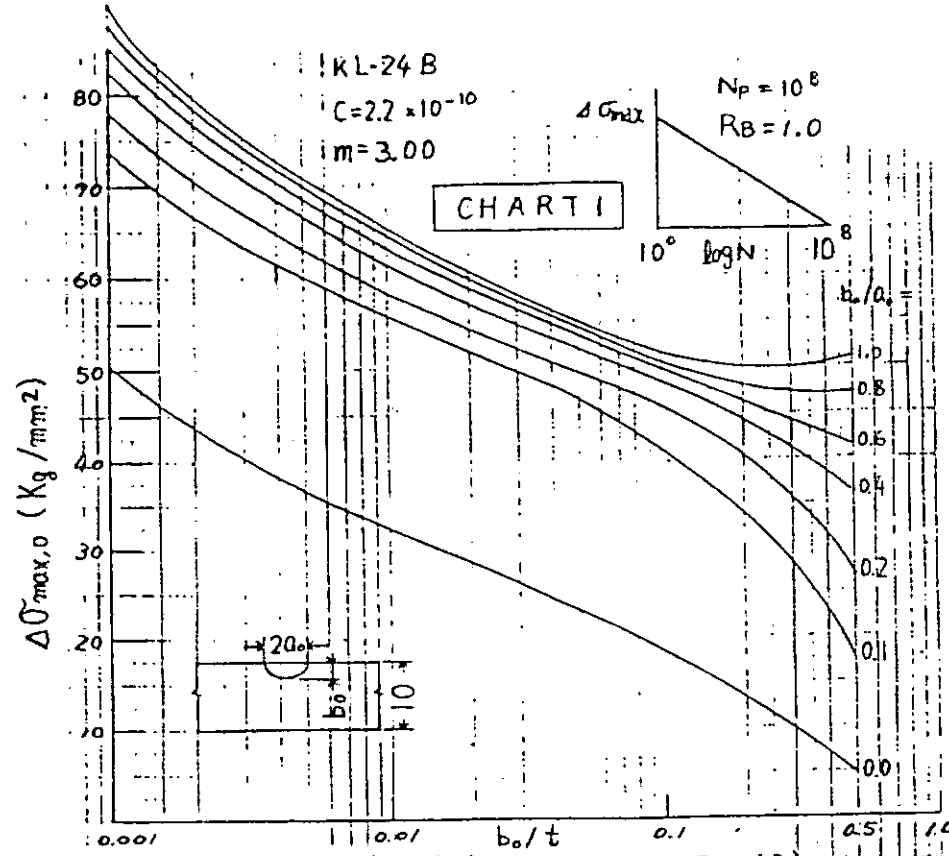


圖 7.8.3 (f) 許容欠陷寸法 (KL-24B,  $R_B=1.0$ )

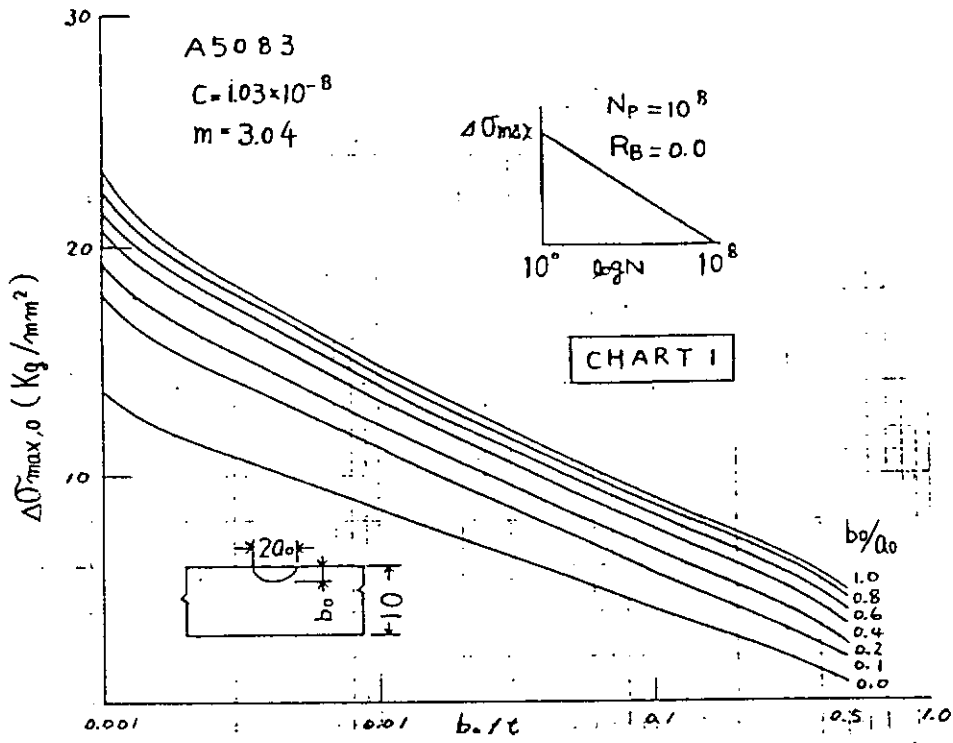


図7.8.4(a) 許容欠陥寸法 (A5083,  $R_B = 0.0$ )

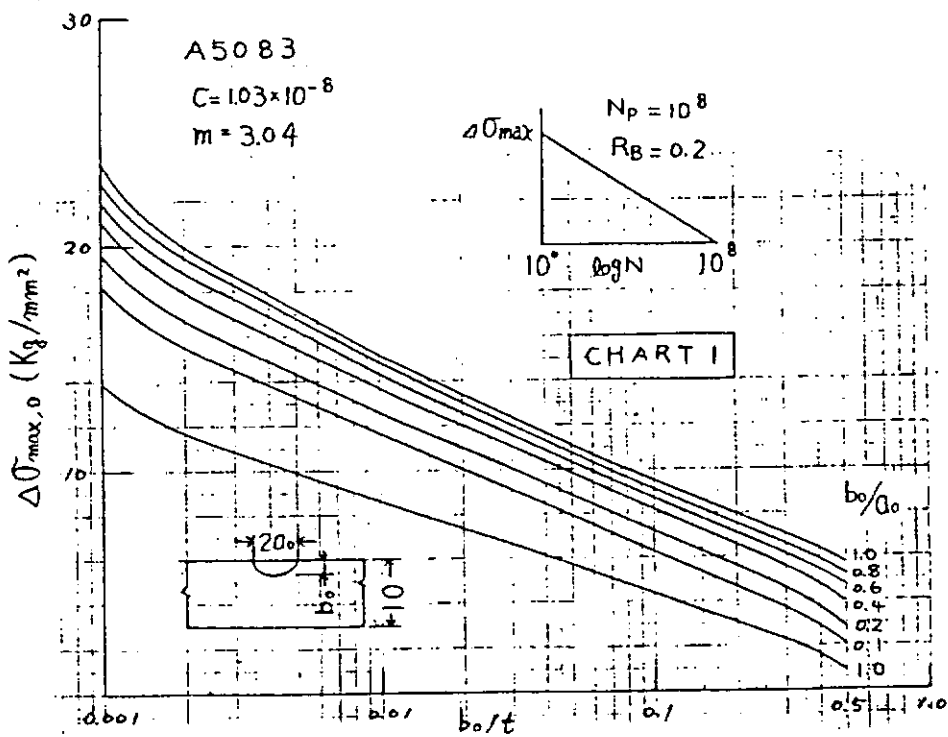


図7.8.4(b) 許容欠陥寸法 (A5083,  $R_B = 0.2$ )

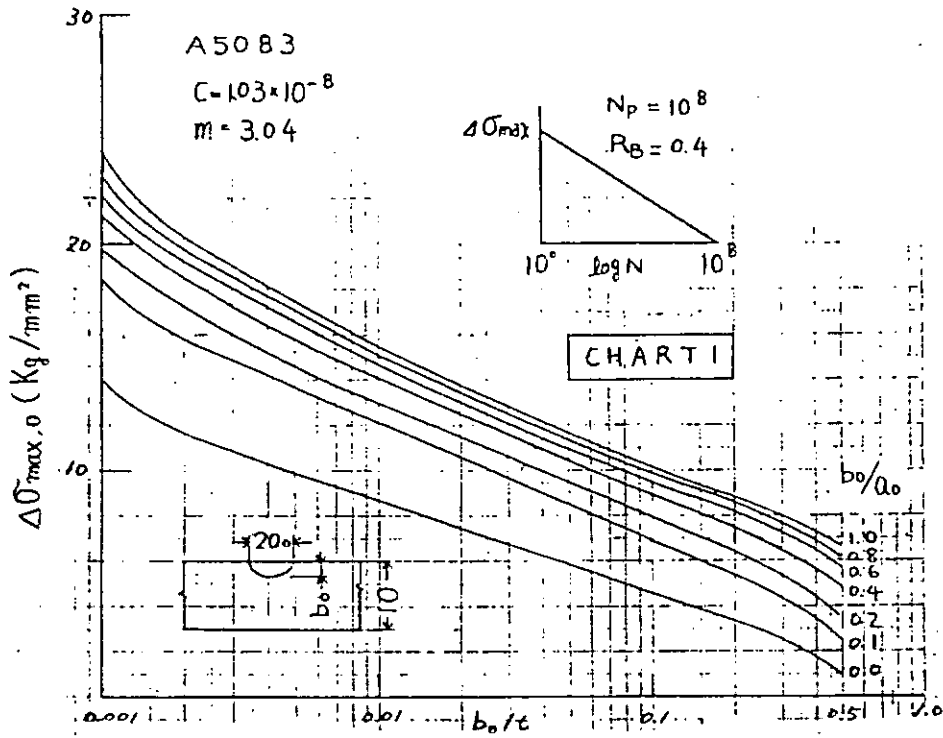


図7.8.4(c) 許容欠陥寸法 (A5083,  $R_B = 0.4$ )

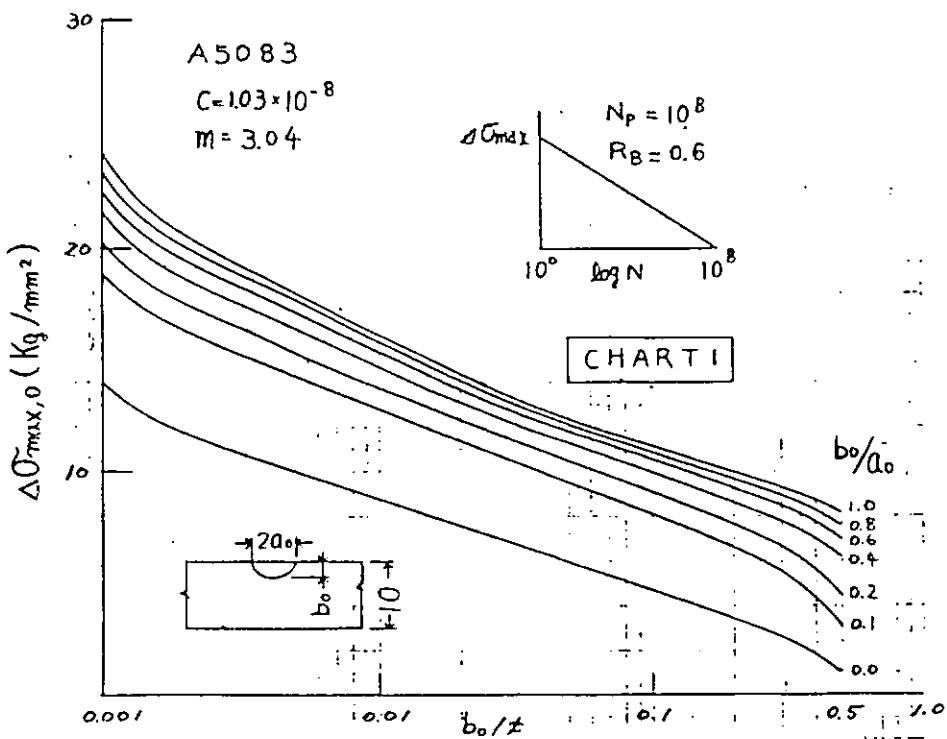


図7.8.4(d) 許容欠陥寸法 (A5083,  $R_B = 0.6$ )

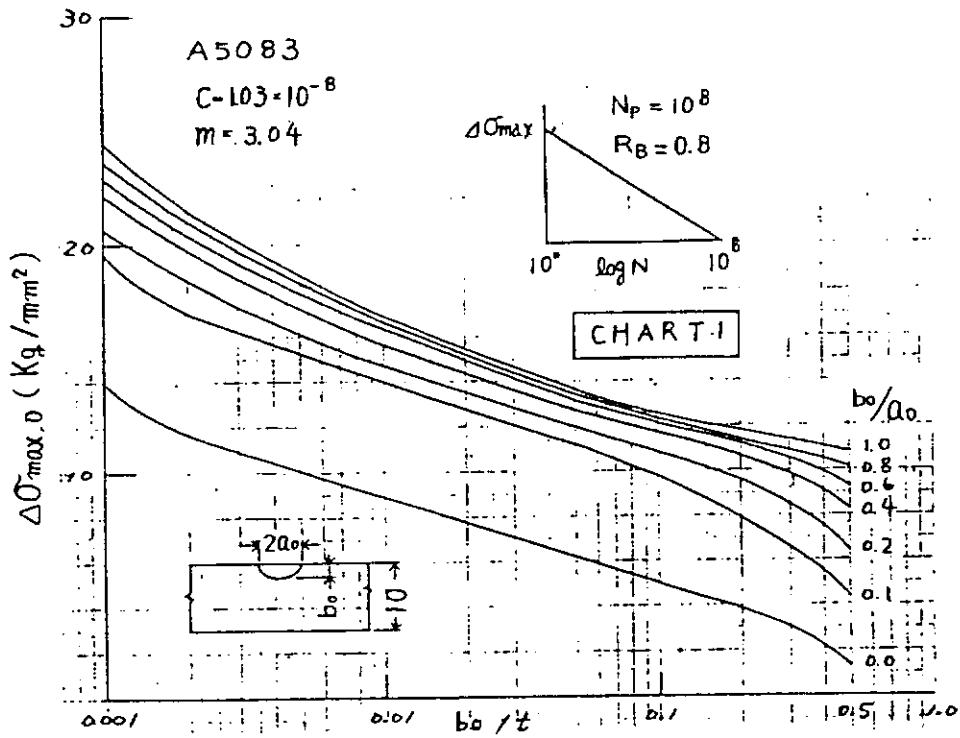


図7.8.4(e) 許容欠陥寸法 (A5083,  $R_B=0.8$ )

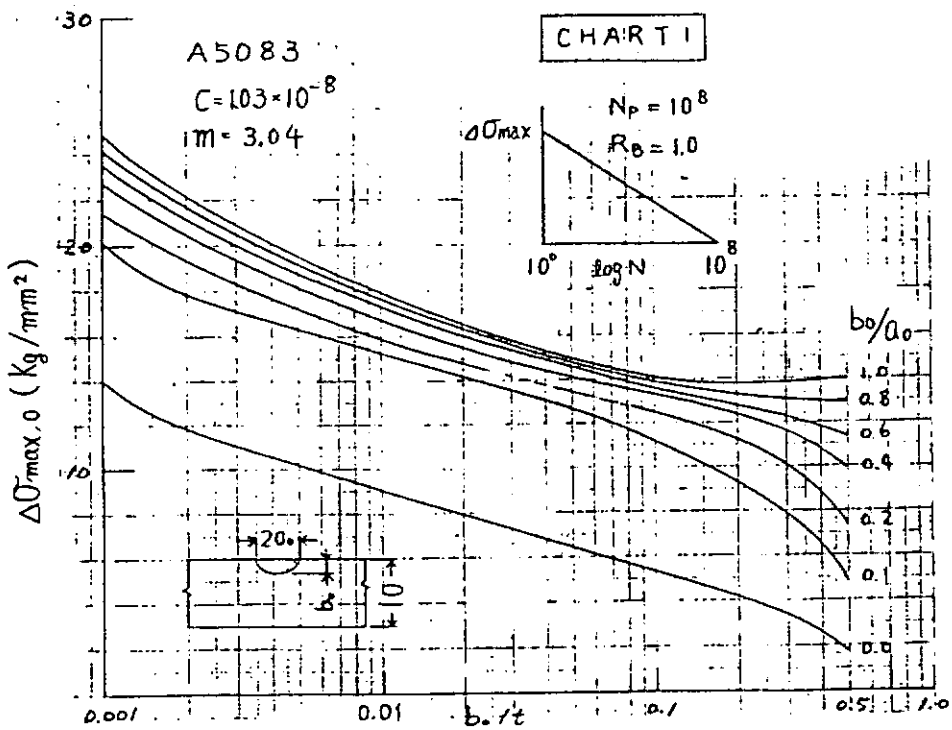
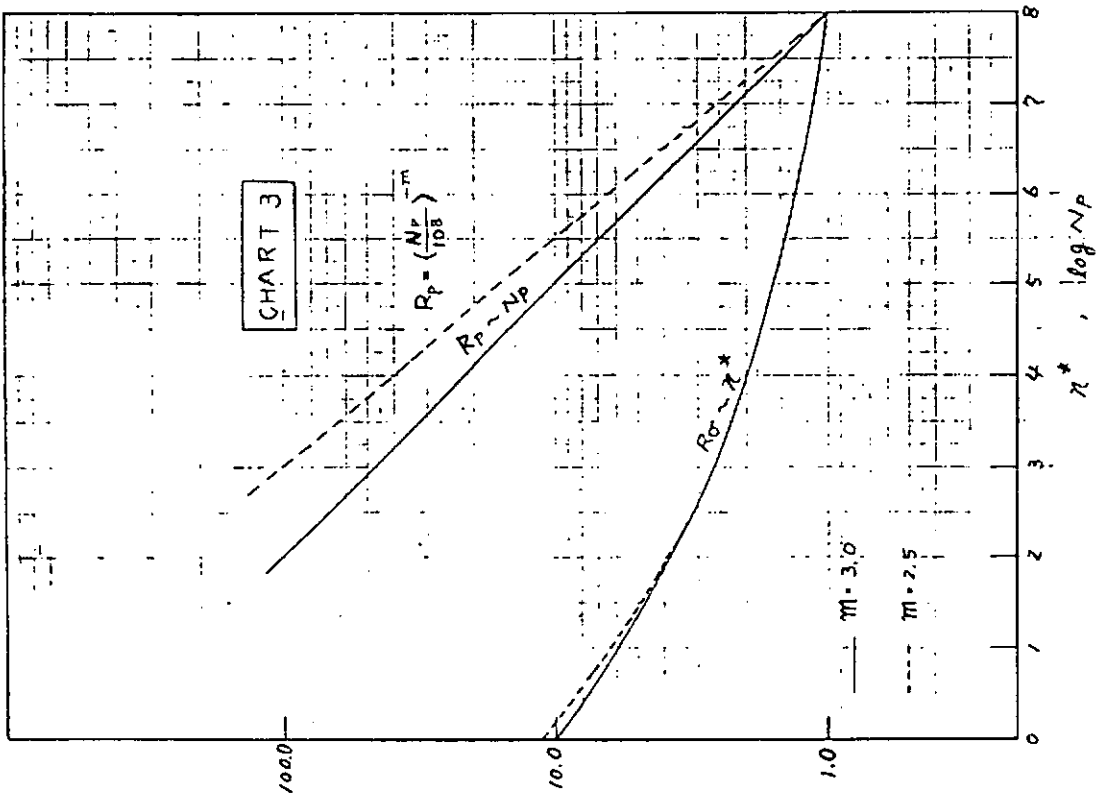
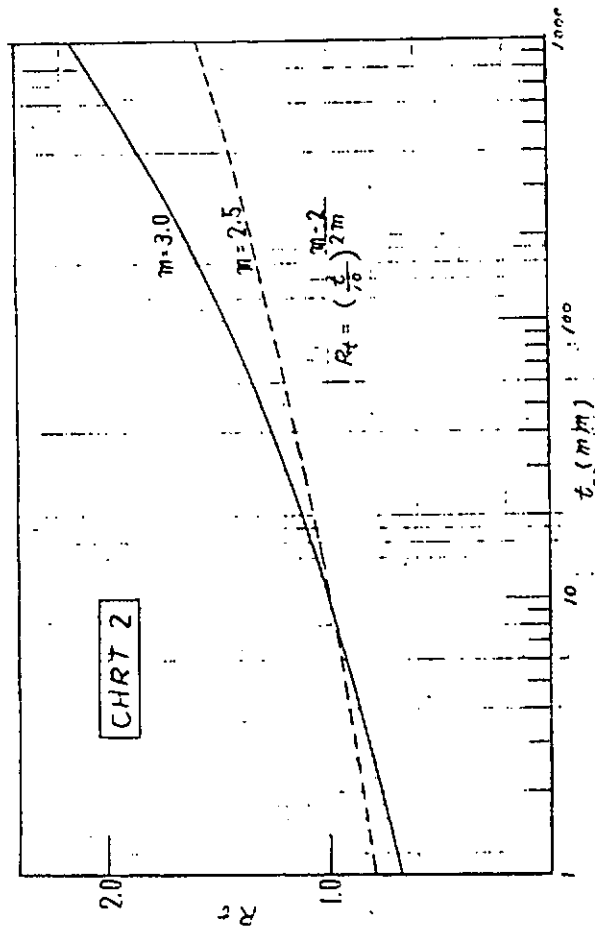


図7.8.4(f) 許容欠陥寸法 (A5083,  $R_B=1.0$ )



7.8.6  $R \sim N^*$ ,  $R_p \sim N_p$



7.8.5  $R_t \sim t$  ( $t_0 = 10^4 \text{ min}$ )

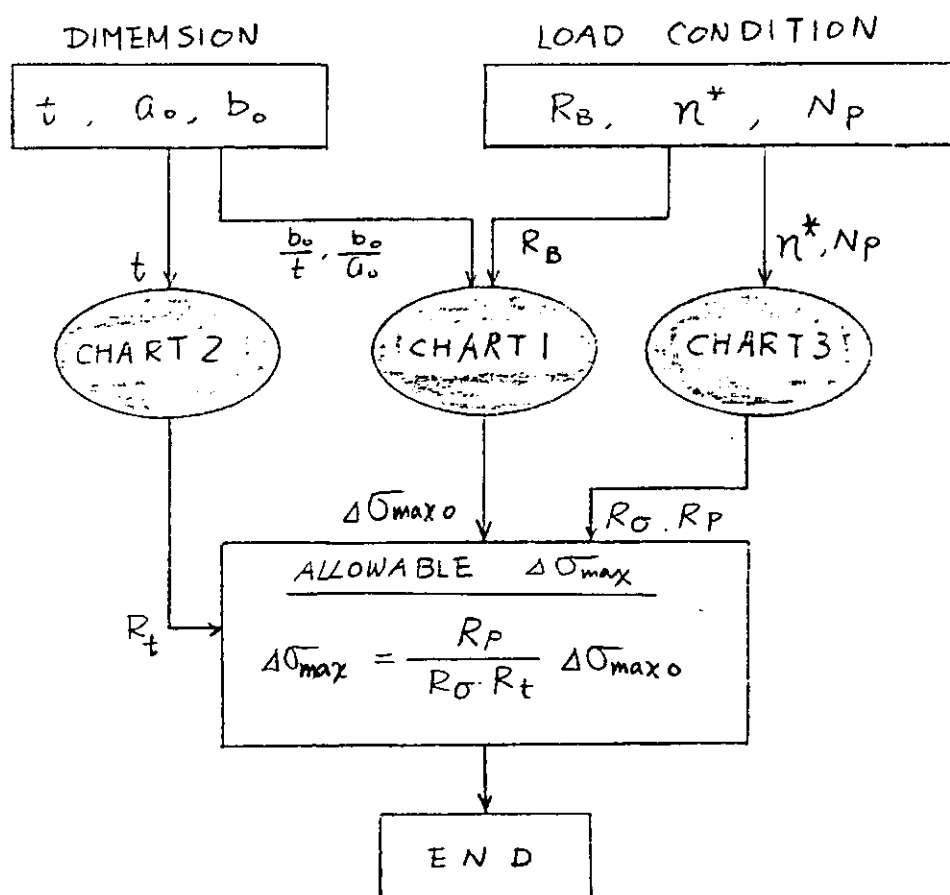


図7.8.7 許容応力を求めるためのフロー

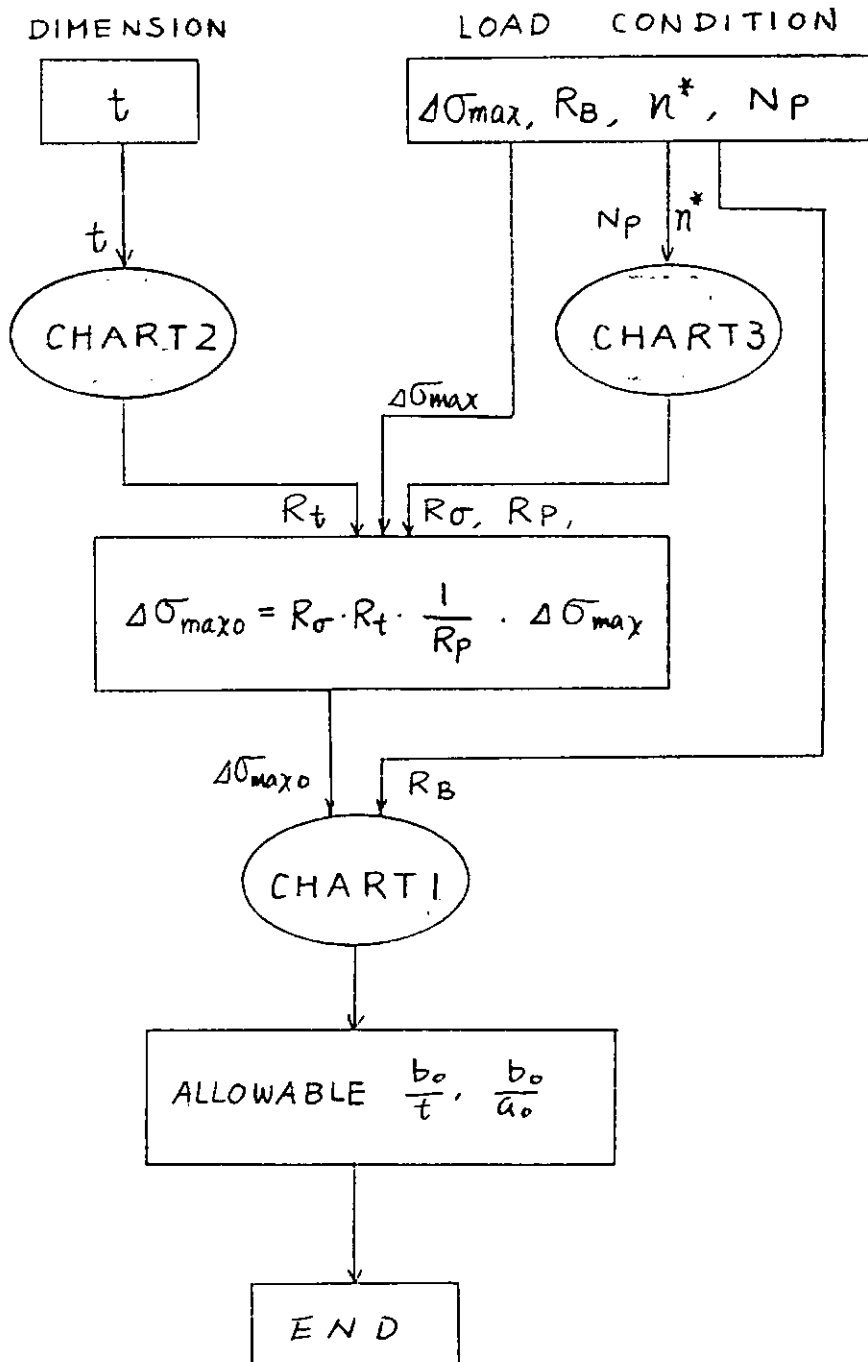


図 7.8.8 許容応力法を求めたためのフロー

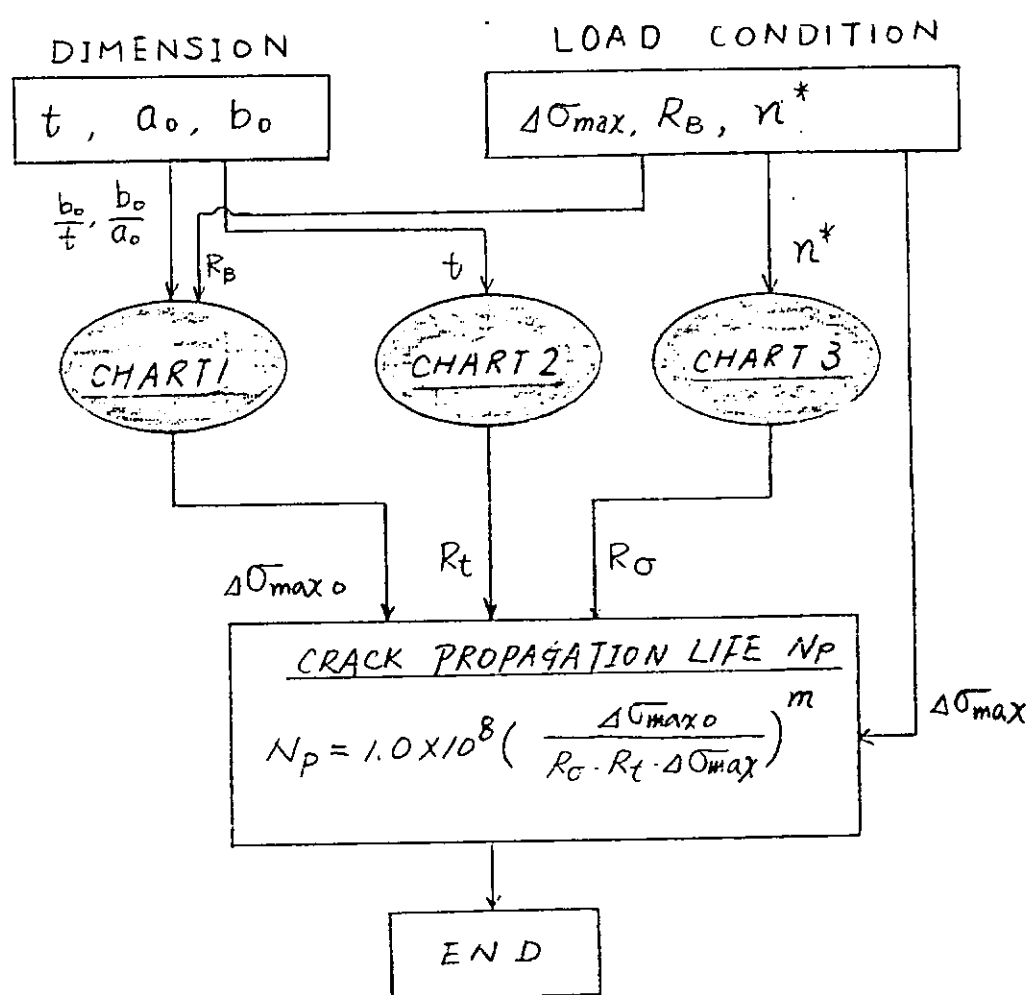


図 7.8.9 貫通寿命  $N_P$  を求めるためのフロー

## 7.9 疲労寿命推定マニュアルの検討

### 7.9.1 はじめに

船殻設計者にとって、破壊力学的手法は、Bタイプ LPGC, MRV方式 LNGC のような液化ガスばら積船の安全性検討に使われるだけでなく、一般船の就航時損傷対策及び船殻構造様式、寸法決定等の際にも必要不可欠な技術となりつつある。

しかし、破壊力学手法を設計に適用するためには、

1) 破壊力学に関する専門的知識を必要とすること。

2) コンピュータ等による煩雑な計算とかなりの検討期間を要すること。

の2点が障害となり、実際には限られた一部の設計に対し、限られた一部の設計者のみが使用しているのが現状ではないかと思われる。

本報告は、上記障害を取り除くため、独特のモデル化により、設計的には十分な精度を有し、かつ非常に簡便なため、専門的知識を持たない一般設計者でも十分に使いこなせる“破壊力学設計マニュアル”をとりまとめたものである。

本マニュアルの特徴は、

1) 疲労亀裂が無い状態における応力分布のみから、

2) 煩雑、難解な応力拡大係数 $K$ 値の解析無しに、

直接伝播寿命を推定できることである。

さらに、疲労亀裂発生寿命の検討にも適用可能と考えられる。

### 7.9.2 疲労寿命推定マニュアル

#### 7.9.2.1 適用範囲

初期亀裂長 $a_0$  (mm)の亀裂が、任意の亀裂長 $a_f$  (mm)に達するまでの疲労亀裂伝播寿命 $V_p$  (航海)または伝播繰返し数 $N_p$  (回)を求める。

表面亀裂の伝播に関しても、設計的には十分な精度で適用可能である(7.9.5.2 参照)。

さらに、疲労亀裂発生寿命推定にも近似的に用いることができる(7.9.3.5 参照)。

ただし、本マニュアルでは荷重分担の再配分は考慮していないため、荷重再配分の激しい部材(例えばスロット部 ウェブスチフナ)の場合には、7.9.5.5の方法を用いて寿命を推定する(7.9.5.5の方法は亀裂の前方に直交交差部材がある場合の検討にも使用できる)。

本マニュアルは、設計者が使いやすいうようにするため、7.9.3に示す方法にて寿命推定を行っており、伝播に関する材料定数としては平均的な値を用い、疲労亀裂発生検討に使用するS-N線図としては破壊確率50%の値を用いている。また、平均応力の影響も無視している。したがって、本マニュアルを使用して設計または安全性判定を行なう場合には、推定寿命に適切な安全率を考慮する必要がある。

### 7.9.2.2 検討に必要なデータ

- 1) 初期亀裂長  $a_0$  (mm), (図7.9.1 参照)

表面亀裂の場合は、亀裂深さを  $a_0$  とする。

- 2) 亀裂が無い状態における、該部の発生確率  $Q=10^{-8}$  の応力分布: FEM 解析解または応力集中係数と応力傾斜に関するデータ。

### 7.9.2.3 伝播寿命の推定手順

- (1) 応力分布から、次の3つのパラメータを求める。

- 応力集中係数 :  $K_t$  ( $= \Delta \sigma_{\max} / \Delta \sigma_n$ )
- 応力傾斜係数 :  $l_g$  (mm)
- 公称応力範囲 :  $\Delta \sigma_n$  (kgf/mm<sup>2</sup>)

$l_g$  は応力傾斜のパラメータであり、応力集中部における標準的な応力分布図7.9.2において、切欠部の応力傾斜の底辺の長さ  $\overline{OQ}$  として定義する。

この際、直線PIは、応力分布曲線との間に形成される凹凸部面積

(斜線部)がほぼ等しくなるように引かれるものとする。

## (2) 伝播寿命を求める。

伝播荷重繰返し数  $N_p$  (回) および伝播寿命  $V_p$  (航海) は、次式により求めることができる。

$$N_p = f_{mN} \times f_{Kt} \times f_{\Delta\sigma_n} \times f_{l_g} \text{ ----- (7.9.1)}$$

$$V_p = f_{mV} \times f_{Kt} \times f_{\Delta\sigma_n} \times f_{l_g} \text{ ----- (7.9.2)}$$

$f_{mN}$  および  $f_{mV}$  : 材料定数  $C, m$  より決定する定数

$$f_{mN} = 3.29 \times 10^3 : \text{軟鋼 (MS)} \text{ ----- (7.9.3)}$$

$$f_{mN} = 4.87 \times 10^3 : \text{高張力鋼 (降伏応力 } \sigma_Y \geq 32 \text{ (kgf/mm}^2\text{))}$$

以後 HT50 と称する) ----- (7.9.4)

$$f_{mV} = 9.47 : \text{MS} \text{ ----- (7.9.5)}$$

$$f_{mV} = 10.1 : \text{HT50} \text{ ----- (7.9.6)}$$

$f_{Kt}$  : 応力集中係数の影響を表わす係数で、 $K_t$  および

$\alpha_o \equiv a_o/l$ ,  $\alpha_L \equiv a_L/l$  より次式を用いて求める。

$$f_{Kt} = G(\alpha_o) - G(\alpha_f) = [G(\alpha)]_{\alpha_f}^{\alpha_o} \text{ ----- (7.9.7)}$$

$G(\alpha_o), G(\alpha_f)$  : 各々、初期亀裂長  $a_o$  および任意の

到達亀裂長  $a_f$  に対応する関数で

図 7.9.3 または表 7.9.1 より読み取る。

$f_{\Delta\sigma_n}$  : 公称応力範囲  $\Delta\sigma_n$  の影響を表わす係数で (7.9.8) 式

または 図 7.9.4 より求める。

$$f_{\Delta\sigma_n} = (24/\Delta\sigma_n)^m \text{ ----- (7.9.8)}$$

$\Delta\sigma_n$  :  $Q=10^{-8}$  相当の公称応力範囲

短期航海での伝播速度を検討する際は安全率

1.5 を乗じる。

$f_{l_g}$  : 応力傾斜の影響を表わす係数で、(7.9.9)式または図7.9.5より求める。

$$f_{l_g} = (100/l_g)^{\frac{m}{2}-1} \quad \text{-----} \quad (7.9.9)$$

#### 7.9.2.4 疲労亀裂発生寿命の推定手順

疲労亀裂発生荷重繰返し数  $N_c$  (回) および発生寿命  $V_c$  (航海) は、次式より求める。

$$N_c = f_{mN} \times f_{K_t} \times f_{\Delta\sigma_n} \times f_{l_g} \quad \text{-----} \quad (7.9.10)$$

$$V_c = f_{mV} \times f_{K_t} \times f_{\Delta\sigma_n} \times f_{l_g} \quad \text{-----} \quad (7.9.11)$$

$N_c, V_c$  は、(7.9.1), (7.9.2) 式と同一の右辺を持つ。ただし、 $f_{K_t}$  を求める際の  $a_o, a_f$  として、亀裂の発生場所に応じて次の値を用いる。

$$a_o = 0.0261 \quad (\text{mm}) : \text{MS 突合せ継手止端部} \quad \text{-----} \quad (7.9.12)$$

$$a_o = 0.0653 \quad (\text{mm}) : \text{MS 隅肉溶接止端部} \quad \text{-----} \quad (7.9.13)$$

$$a_o = 0.00219 \quad (\text{mm}) : \text{MS 母材} \quad \text{-----} \quad (7.9.14)$$

$$a_o = 0.0139 \quad (\text{mm}) : \text{HT50 突合せ継手止端部} \quad \text{-----} \quad (7.9.15)$$

$$a_o = 0.0395 \quad (\text{mm}) : \text{HT50 隅肉溶接止端部} \quad \text{-----} \quad (7.9.16)$$

$$a_o = 8.59 \times 10^{-4} \quad (\text{mm}) : \text{HT50 母材} \quad \text{-----} \quad (7.9.17)$$

また、 $a_f$  としては共通に

$$a_f = 0.5 \quad (\text{mm}) \quad \text{-----} \quad (7.9.18)$$

を使用する。

#### 7.9.3 マニュアルの解説および理論的根拠

##### 7.9.3.1 理論的誘導

疲労亀裂伝播速度は、Paris 則を用いて次式で表わせる。

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m \quad \text{-----} \quad (7.9.19)$$

$\frac{da}{dN}$  : 疲労亀裂の伝播速度 ( $\text{mm}/\text{荷重1回, 1サイクル}$ )

$C, m$ : 材料定数で、次式で求める。<sup>1)</sup>

$$C = 5.53 \times 10^{-5} / 59.2^m \quad \text{-----} (7.9.20)$$

$$m = 4 - 0.0327 \sigma_Y \quad \text{-----} (7.9.21)$$

$\sigma_Y$ : 降伏応力 ( $\text{kgf}/\text{mm}^2$ )

K値の表示式としては、次式を用いる。

$$\Delta K = f(a) \times \Delta \sigma_n \times \sqrt{\pi a} \quad \text{-----} (7.9.22)$$

$\Delta K$ : 応力拡大係数 K 値の範囲 ( $\text{kgf} \cdot \text{mm}^{-\frac{3}{2}}$ )

$f(a)$ : 応力分布, 境界条件により決定する亀裂長  $a$  の関数

$\Delta \sigma_n$ : 作用公称応力範囲 ( $\text{kgf}/\text{mm}^2$ )

$a$ : 亀裂長 (mm)

(7.9.19), (7.9.22) 式より

$$\begin{aligned} \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{(f(a)\sqrt{a})^m} &= C \times N_p \times \sqrt{\pi}^m \times \Delta \sigma_n^m \\ &\equiv [F(a)]_{a_0}^{a_f} \quad \text{-----} (7.9.23) \end{aligned}$$

$$N_p = \frac{[F(a)]_{a_0}^{a_f}}{C \sqrt{\pi}^m} \Delta \sigma_n^{-m} \quad \text{-----} (7.9.24)$$

$N_p$ : 亀裂長  $a_0$  が  $a_f$  に達するまでに要する荷重繰返し数(回)

また, 船の寿命を 20 年, 200 航海と仮定すると, 伝播寿命  $V_p$  (航海) は次式で求められる。

$$V_p = N_p \times \frac{200}{n_e} \quad \text{-----} (7.9.25)$$

$n_e$ : 等価荷重頻度(回)

等価荷重頻度とは, 寿命計算を容易にするために, 片対数直線の応力頻度分布を持つ船の一生での, 総荷重頻度  $10^8$  回の応力による伝播寿命と,  $Q=10^{-8}$  の最大公称応力範囲  $\Delta \sigma_n$  だけが,  $n_e$  回作用した時の伝播寿命が等しくなるように定めた,

等価な荷重頻度で次式で求めることができる。

$$n_e = \sum_{i=1}^j 10^{\frac{8}{j}-i} \times (1 - 10^{-\frac{8}{j}}) \left( \frac{j+0.5-i}{j} \right)^m \quad (7.9.26)$$

$j$  は応力頻度の分割数で、 $NV$  は  $j=8$  としているが、本便覧では  $j=100$  として求めた。

$n_e$  を材料定数  $m$  に対してグラフ化したものを

図 7.9.6 に示す。

### 7.9.3.2 $K$ 値表示式の設計的取扱い

(7.9.22) 式における  $f(a)$  は、本来各亀裂の応力条件および境界条件により異なる性格のものであるが、これを近似的に次のように取扱う。

$$f(a) = 1.1215 \left\{ 1.0 + (K_t - 1) \exp(-0.9388 \times a/l_g) \right\} \quad (7.9.27)$$

(7.9.27) 式の誘導およびその精度については、7.9.4.1 で述べる。

(7.9.23) 式より

$$[F(a)]_{a_0}^{a_f} = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{(f(a)\sqrt{a})^m} - \int_0^{a_0} \frac{da}{(f(a)\sqrt{a})^m} \quad (7.9.28)$$

(7.9.28) 式は数値積分により計算しなければならないが、それでも  $a \rightarrow 0$  では  $\infty$  となって計算不能となる。そこで、(7.9.28) 式を工夫して書き直すと

$$\begin{aligned} [F(a)]_{a_0}^{a_f} &= \int_{\infty}^{a_0} \frac{da}{(f(a)\sqrt{a})^m} - \int_{\infty}^{a_f} \frac{da}{(f(a)\sqrt{a})^m} \\ &= \left\{ \int_{\infty}^{x_0} \frac{dx}{(f(x)\sqrt{x})^m} - \int_{\infty}^{x_f} \frac{dx}{(f(x)\sqrt{x})^m} \right\} \times l_g^{(1-\frac{m}{2})} \\ &\equiv [G(x)]_{x_f}^{x_0} \times l_g^{(1-\frac{m}{2})} \\ &\equiv \{ G(x_0) - G(x_f) \} \times l_g^{(1-\frac{m}{2})} \quad (7.9.29) \end{aligned}$$

(7.9.29) 式で定義される  $G(x)$  を便宜的に  $G$  関数と呼べば、 $G$  関数は、材料定数  $m$  と応力集中係数  $K_t$ 、そして  $x \equiv a/l_g$  によって決まり、一度計算して便覧化しておくと、 $K$  値の追跡解析と同等のものが、一目で読み取れる非常に

便利なもので、これを図7.9.3および表7.9.1に示す。

G関数とは、応力集中 $K_t$ 、応力傾斜係数 $l_g$ 、亀裂長 $a$ の亀裂の残余寿命を表わす関数で、 $a_0$ に対応するG関数(≡残余寿命)から $a_f$ に対応するG関数を差し引くことにより、亀裂長 $a_0$ から $a_f$ までの伝播寿命を求めることができる。

G関数を求める際には、(7.9.29)式からわかるように $a/l_g = \infty$ から $a/l_g = a/l_g$ まで積分する必要があるが、G関数は前記の如く、必ず“G関数の差”として使用するものであるから、 $a/l_g = \infty$ から積分する代りに、実用範囲をカバーした適当な $a/l_g$ から積分しても構わない性格のものである。

実用的には、 $a/l_g$ は10から0.01の範囲の使用頻度が高いようである。

G関数に及ぼす応力集中 $K_t$ の影響は当然のことながら、亀裂長が大きくなると弱くなり、 $\alpha > 4$ では $K_t = 1$ の値に漸近する。したがって、 $\alpha \geq 10$ では $K_t$ の値に関わりなく、 $K_t = 1$ に対する理論解(7.9.30)式を用いることができる。

$$G(\alpha) = \frac{1.1215^{-m}}{(\frac{m}{2} - 1)} \times \alpha^{(1-\frac{m}{2})} \quad \text{----- (7.9.30)}$$

$$[G(\alpha)]_{\alpha_f}^{\alpha_0} = \frac{1.1215^{-m}}{(\frac{m}{2} - 1)} \left\{ \alpha_0^{(1-\frac{m}{2})} - \alpha_f^{(1-\frac{m}{2})} \right\} \quad \text{----- (7.9.31)}$$

### 7.9.3.3 伝播寿命の推定算式

7.9.3.2のG関数を用いて(7.9.24)、(7.9.25)式を書き直すと

$$\begin{aligned} N_p &= \frac{1}{C\sqrt{\pi}^m} \times [G(\alpha)]_{\alpha_f}^{\alpha_0} \times \Delta\sigma_n^{-m} \times l_g^{(1-\frac{m}{2})} \\ &= \frac{24^{-m} \times 100^{(1-\frac{m}{2})}}{C\sqrt{\pi}^m} \times [G(\alpha)]_{\alpha_f}^{\alpha_0} \times \left(\frac{24}{\Delta\sigma_n}\right)^m \times \left(\frac{100}{l_g}\right)^{\frac{m}{2}-1} \\ &= f_{mN} \times f_{K_t} \times f_{\Delta\sigma_n} \times f_{l_g} \quad \text{----- (7.9.32)} \end{aligned}$$

$$V_p = \frac{200 \times 24^{-m} \times 100^{(1-\frac{m}{2})}}{n_e \times C \sqrt{\pi}^m} \times [G(x)]_{x_f}^{x_o} \times \left(\frac{24}{\Delta \sigma_n}\right)^m \times \left(\frac{100}{l_g}\right)^{\frac{m}{2}-1}$$

$$= f_{mV} \times f_{K_t} \times f_{\Delta \sigma_n} \times f_{l_g} \text{----- (7.9.33)}$$

ただし,  $f_{mN} = \frac{24^{-m} \times 100^{(1-\frac{m}{2})}}{C \sqrt{\pi}^m} \text{ (図 7.9.7) ----- (7.9.34)}$

$$f_{mV} = \frac{200 \times 24^{-m} \times 100^{(1-\frac{m}{2})}}{n_e \times C \sqrt{\pi}^m} \text{ (図 7.9.8) ----- (7.9.35)}$$

$$f_{K_t} = [G(x)]_{x_f}^{x_o} \text{----- (7.9.36)}$$

$$f_{\Delta \sigma_n} = \left(\frac{24}{\Delta \sigma_n}\right)^m \text{----- (7.9.37)}$$

$$f_{l_g} = \left(\frac{100}{l_g}\right)^{\frac{m}{2}-1} \text{----- (7.9.38)}$$

#### 7.9.3.4 MSおよびHT50への適用例

(7.9.32), (7.9.33)式を用いて, MSおよびHT50に対する疲労亀裂伝播寿命  $V_p$  (航海) および伝播荷重繰返し数  $N_p$  (回)を求める便覧7.9.2を作成した。

用いた材料定数 および等価荷重頻度は

$$\text{MS} : \begin{cases} m = 3.2, C = 1.18 \times 10^{-10} \text{----- (7.9.39)} \\ n_e = 6.94 \times 10^4 \text{----- (7.9.40)} \end{cases}$$

$$\text{HT50} : \begin{cases} m = 3.0, C = 2.67 \times 10^{-10} \text{----- (7.9.41)} \\ n_e = 1.01 \times 10^5 \text{----- (7.9.42)} \end{cases}$$

また, 7.9.2.3において, 短期航海の応力安全率を1.5と定めたのは, 図7.9.9に示すように, 短期航海における最悪の海象条件を考慮したものである。

#### 7.9.3.5 疲労亀裂発生寿命推定への応用

疲労亀裂発生寿命推定は, 造船設計者にとっては, 疲労亀裂伝播寿命推定以上に必要性の高い技術分野であり, 推定精度向上のために種々の

試みがなされている。

ただし、疲労亀裂発生と伝播に関しては、未だ明確な境界は無く、疲労亀裂の発生に対応する亀裂長についても、確立されたものは無い現状である。

本報告では、疲労亀裂発生に対応する亀裂長として 0.5 mm を仮定し<sup>2)</sup> (表面亀裂の場合は亀裂深さを 0.5 mm とする)、母材、突合せ継手および十字継手の S-N 線図から逆算される等価な初期欠陥長  $a_i$  を用いることにより、近似的に疲労亀裂発生寿命  $V_c$  (航海)、発生荷重繰返し数  $N_c$  (回) を求めるものである。(的場等<sup>3)</sup> は、表面亀裂長 10 mm をもって疲労亀裂発生と定義しており、これに対応する亀裂深さは、約 1 mm であると報告している。)

#### (1) 等価初期欠陥長 $a_i$ について

等価初期欠陥長を仮定して S-N 線図と対応させる、または S-N 線図より  $a_i$  を逆算する試み<sup>2)</sup> は数多くなされている。

本報告では、砂本等<sup>2)</sup> の考え方にに基づき、応力集中を構造的な応力集中係数 (= 二次応力係数  $K_s$ ) とビード止端部の局所的なピーク応力集中係数 ( $K_p$ ) に分解する。

この  $K_s$  が本報告中の  $K_t$  と同性格のものであり、伝播寿命を支配し、 $K_p$  は疲労亀裂発生に対してのみ寄与すると仮定する。(H.P. Lieurade<sup>4)</sup> も余盛影響は亀裂深さが 0.5 mm 以上では殆ど無いと報告している。)

さらに“応力  $K_p \times \Delta \sigma_n$  が  $N_c$  回働いた時、 $a_c = 0.5$  mm の深さの亀裂が生じる現象と、応力集中が無い応力場 ( $K_t = K_p = 1$ ) で公称応力範囲  $\Delta \sigma_n$  が  $N_c$  回作用した時、初期欠陥長  $a$  が  $a_c = 0.5$  mm まで進展する現象とを、等価であると仮定する。”

上記仮定により定まる初期欠陥長を、等価初期欠陥長  $a_i$  と呼ぶことにすると、 $a_i$  は次式で表わせる。

$$a_i = \left\{ a_c^{(1-\frac{m}{2})} + N_c \times \Delta \sigma_n^m \times C \times 1.1215^m \times \pi^{(\frac{m}{2})} \times \left( \frac{m}{2} - 1 \right) \right\}^{\frac{1}{(1-\frac{m}{2})}} \text{---- (7.9.43)}$$

また、突合せ継手および十字継手の平均的な疲労強度として次の値<sup>2)</sup>を用いる。

$$\text{突合せ継手} : \Delta\sigma_n = 15 \text{ kgf/mm}^2 \quad \text{at } N = 2 \times 10^6 \text{ ----- (7.9.44)}$$

$$\text{十字継手} : \Delta\sigma_n = 12 \text{ kgf/mm}^2 \quad \text{at } N = 2 \times 10^6 \text{ ----- (7.9.45)}$$

母材に対しても同様の手法を用いると、

$$\text{母材} : \Delta\sigma_n = 25 \text{ kgf/mm}^2 \quad \text{at } N = 2 \times 10^6 \text{ ----- (7.9.46)}$$

(7.9.44)～(7.9.46)式は MS に対する値であるが、通常疲労亀裂発生が問題となるような応力集中部においては、HT50 の優位性はあまり認められないことから暫定的に、HT50 に対しても、同じ値を用いることにする。

材料定数  $C, m$  と (7.9.43)～(7.9.46) 式から MS と HT50 に対応する  $Q_i$  を求めたのが (7.9.12)～(7.9.17) 式である。

これ等の  $Q_i$  と  $Q_c$  を用いれば、任意の応力集中部に対する疲労強度発生寿命を簡単に求めることができ、 $Q_o = Q_i$ 、 $Q_f = Q_c$  としてマニュアルを使用、さらに連続して疲労亀裂伝播の検討も行なえる。

## (2) 材料定数 $m$ の影響について

疲労亀裂寿命を発生から伝播まで連続して考える際に、問題となるのが S-Nc 線図と S-Np 線図との傾斜の相違、すなわち  $m$  の差であり、一般的には、発生に対応する  $m = m_c$  と伝播の  $m = m_p$  を比較すると、

$$m_p < m_c \text{ ----- (7.9.47)}$$

であるため、 $m = m_p$  を一貫して用いると誤差を生じる。

例えば、突合せ継手の S-Nc 線図から求められる  $m_c$  はほぼ 4 であるので、 $m = 3.2$  と  $m = 4$  を比較する。

船の一生、20年後に亀裂が発生するような応力を許容応力  $\sigma_{all}$  と呼べば、 $K_t = 1$  に対する  $\sigma_{all}$  は次式で与えられる。

$$\sigma_{all} = \left\{ \frac{Q_i^{(1-\frac{m}{2})} - Q_c^{(1-\frac{m}{2})}}{C \times 1.1215^m \times \pi^{\frac{m}{2}} \times \left(\frac{m}{2} - 1\right) \times n_e} \right\}^{\frac{1}{m}} \text{ ----- (7.9.48)}$$

Butt 継手の  $m=4$  と  $3.2$  の場合に対し,  $\sigma_{all}$  (ただし, 安全率は考慮していない) を求めると,

$$(\sigma_{all})_{m=4} = 46.9 \text{ kgf/mm}^2 \text{ ----- (7.9.49)}$$

$$(\sigma_{all})_{m=3.2} = 42.9 \text{ kgf/mm}^2 \text{ ----- (7.9.50)}$$

である。すなわち, 小さな  $m$  を用いると安全側の検討となり,  $m=4$  に対しては応力安全率約  $1.1$  を考慮したことになる。

このため, 本便覧では安全側の値として  $m=m_p$  を一貫して用いることとする。

#### 7.9.4 マニュアルの近似 $K$ 値の精度について

##### 7.9.4.1 (7.9.27) 式の設定根拠

応力拡大係数  $K$  値の一般的表示式 (7.9.22), (7.9.27) 式は, 次の4点より設定した。

1) 縁亀裂では  $a \rightarrow 0$  においては理論的に

$$f(a) = 1.1215 K_t \text{ ----- (7.9.51)}$$

2) 亀裂長が十分長くなると初期切欠の応力集中の影響は無視できることから, 縁亀裂を想定すれば,

$$f(a) = 1.1215 \text{ ----- (7.9.52)}$$

3) 応力集中の減衰の度合は指数分布に似ていること。

4) 指数分布の減衰係数は, 図 7.9.2 において, 直線  $PI$  の応力分布に対する理論解  $K$  値を  $a=l_g$  にて一致するように定める。

すなわち, 応力集中部の標準的応力分布 (図 7.9.2) に対しては,  $a \rightarrow 0, a \rightarrow \infty$  の2箇所について正解を, また,  $a=l_g$  においてはほぼ正解を与え, 応力集中の減衰についてもかなり良い近似を得ることができるため, 設計的には十分な精度を持っていると考えられる。

#### 7.9.4.2 円孔まわりの亀裂での精度と他の切欠への応用

円孔まわりの亀裂に関し、理論解と本マニュアルの近似解の比較を図7.9.10に示すが、全領域にわたり $\pm 10\%$ 以内の推定精度が得られている。

円孔については、応力分布から応力傾斜係数 $l_g$ は約 $0.5R$  ( $R$ :半径)であることがわかるが、円孔以外の切欠の場合における近似的な $l$ の求め方について考えてみることにする。

切欠先端での応力傾斜については、西田<sup>5)</sup>が無次元化した応力傾斜 $I$ を次のように与えている。

$$I = \frac{\rho}{\sigma_{\max}} \times \frac{d\sigma}{dx} = 2 \quad : \text{双曲線両側ノッチ} \text{-----} (7.9.53)$$

$$= \frac{4a+3b}{2a+b} \quad : \text{楕円孔 (長辺 } 2a, \text{短辺 } 2b) \text{---} (7.9.54)$$

$$= \frac{7}{3} \quad : \text{円孔} \text{-----} (7.9.55)$$

ただし、 $\rho$  : 切欠半径

$\sigma_{\max}$  : 最大応力

$\frac{d\sigma}{dx}$  : 切欠先端の応力傾斜

書き直すと

$$\frac{d\sigma}{dx} = \frac{\sigma_{\max}}{\rho/I} = \frac{K_t \sigma_n}{\rho/I} \text{-----} (7.9.56)$$

すなわち、図7.9.11で言えば、切欠先端の応力傾斜に対応する底辺の長さ( $\overline{OC}$ )が $\rho/I$ であることを示しており、一方、本報告における $l_g$ は、(7.9.57)式に示すように応力集中部の平均的な応力傾斜 $\frac{\overline{d\sigma}}{dx}$ に対応するものである。

$$\frac{\overline{d\sigma}}{dx} = \frac{(K_t-1)\sigma_n}{l_g} \text{-----} (7.9.57)$$

このように、応力傾斜自身は異なるものであり、 $\rho/I$ に対応する応力傾斜は疲労亀裂に対応し、 $l_g$ は疲労亀裂伝播に対応すると見ることもできるが、底辺の長さに関しては円孔の対応から考えて、設計的には漸定的に

$$l_g \div 1.2 \times \rho/I \text{-----} (7.9.58)$$

(ただし、 $I$ は(7.9.53)~(7.9.55)式による)

と近似することにする。

(7.9.58)式を使うことにより,  $K_t$  と  $\rho$  の既知なる切欠<sup>5)</sup>からの亀裂発生伝播寿命は非常に容易に検討することができる。

### 7.9.4.3 多項式近似応力分布における精度

図 7.9.12 に示すような多項式近似の応力分布に対し, 理論解と近似解を比較したが, 同図中に示すように良好な一致を得た。

逆に言うと, 本マニュアルの近似解は図 7.9.12 のような応力減衰を想定していることになり, 図 7.9.12 に似た応力分布に対し精度が高い。

### 7.9.4.4 直線応力分布に対する精度

縁亀裂に対する  $K$  値解は次式で表わせる。

$$\sigma(x) = \sigma_0 \sum_{n=0}^4 C_n x^n \text{ ----- (7.9.59)}$$

$$K = \sigma_0 \sum_{n=0}^4 k_n C_n a^n \sqrt{\pi a} \text{ ----- (7.9.60)}$$

$$k_0 = 1.1215, k_1 = 0.6829, k_2 = 0.5255, k_3 = 0.4410, k_4 = 0.3868 \text{ -- (7.9.61)}$$

(7.9.59)~(7.9.61)式を直線応力分布に適用すると (7.9.62)式を得る。

$$\Delta K = \Delta \sigma_n \sqrt{\pi a} \times \{1.1215 K_t - 0.6829 (K_t - 1) \times (a/l_g)\} \text{ ----- (7.9.62)}$$

近似解 (7.9.27) 式による値と比較したのが表 7.9.2 である。

7.9.4.1 より明らかなように  $a \rightarrow 0$  と  $a/l_g = 1$  の 2 点では, 両者は完全に一致し,  $0 < a/l_g < 1$  においても  $\pm 10\%$  以内の精度であることがわかる。

( $a_f \div l_g$  となるように  $\Delta \sigma_n$  を設定する。)

### 7.9.4.5 Car Carrier 損傷部への適用例

SR169 “船体構造の破壊管理制御設計に関する研究” 昭和54年度報告<sup>1)</sup>で報告されている, Car Carrier 損傷部解析例に対して適用し,  $K$  値表示で比較したのが 図 7.9.13 で良好な一致をみている。

## 7.9.5 マニュアルの適用例

### 7.9.5.1 就航時に発見された疲労亀裂の伝播速度推定例

直径450 mmの円孔の縁から両側二箇所には30 mmの長さの亀裂が発見され、100 mmに達するまでの寿命を知りたい時、( $\Delta\sigma_n = 10 \text{ kg/mm}^2$  とする。)

7.9.2.3 の推定手順に沿って検討すると、

- 1)  $a_0 = 30 \text{ (mm)}$
- 2)  $K_t = 3$  (円孔の応力集中係数)
- 3)  $l_g = 0.5 \times \frac{450}{2} = 112.5 \text{ (mm)}$
- 4)  $\Delta\sigma_n = 10 \text{ (kg/mm}^2\text{)} \quad (Q = 10^{-8})$
- 5)  $f_{m\sigma} = 9.47 \quad ((7.9.5)\text{式より})$
- 6)  $\alpha_0 = a_0/l_g = 0.267$   
 $\alpha_f = a_f/l_g = 0.889$
- 7)  $f_{K_t} = 0.10 \quad (\text{図7.9.3 又は表7.9.1より})$
- 8)  $f_{\Delta\sigma_n} = 16.5 \quad (\text{図7.9.4 又は(7.9.8)式より})$
- 9)  $f_{l_g} = 0.932 \quad (\text{図7.9.5 又は(7.9.9)式より})$
- 10)  $\nabla_P = f_{m\sigma} \times f_{K_t} \times f_{\Delta\sigma_n} \times f_{l_g} = 14.6 \text{ (航海)} \quad ((7.9.2)\text{式より})$
- 11) 10)で求めた寿命 $\nabla_P$ は平均的な海象を想定した場合の推定値であり、7.9.2.3 (2)のように短期海象での安全率1.5を考慮した場合は、 $f_{\Delta\sigma_n}$  が4.50となり、 $\nabla_P$ も4.0 (航海)となる。  
 したがって、30 mmの亀裂が100 mmまで成長する伝播寿命は、およそ4.0~14.6 航海と推定される。

### 7.9.5.2 表面亀裂への適用例

表面亀裂の伝播速度については、正確には A.S. Kobayashi<sup>5)</sup> の解等を用いて計算することができるが、本マニュアルを用いても設計的には十分な精度で推定することができる。

図 7.9.14 に示すような初期表面亀裂が板厚を貫通するまでの寿命を推定するには、

$$a_0 = b_i \quad (= \text{亀裂深さ}) \quad \text{-----} \quad (7.9.63)$$

$$a_f = t \quad \text{-----} \quad (7.9.64)$$

として寿命を求めれば良い。

(この際、 $l_g$  は任意の値で良いが  $l_g = 1 \text{ mm}$  としておけば読みとりやすい)

本マニュアルによる推定値を図 7.9.14 に示すが、精密解に比べ常に安全側であり、且つ設計的には十分な精度であると考えられる。

又、板厚貫通時に  $a = t$  の貫通亀裂になると考えれば板厚貫通後も連続的に伝播速度を追跡できる。

### 7.9.5.3 疲労亀裂発生と伝播の連続追跡例

従来、疲労亀裂発生又は伝播に関する寿命検討は数多くなされているが、発生と伝播を連続的に追跡した研究<sup>7)</sup> は少ないようである。

ここでは、突合せ継手および十字継手に関し 疲労亀裂発生及び伝播寿命を推定し、疲労試験結果<sup>8)</sup> と比較した。

結果を表 7.9.3 に示すが、疲労試験のパラツキを考慮すれば、設計的には本マニュアルによる発生、伝播連続追跡も使用可能な範囲にあると考えられる。

#### 7.9.5.4 PCCのBulkhead 開口隅部の疲労許容応力の検討例

図7.9.15 に示すような PCCの Bulkhead 開口部の疲労許容応力を Fail Safe Design の考え方をを用いて検討した。

すなわち、溶接止端部又はカスノッチ部に深さ  $0.5\text{ mm}$  の亀裂が先在していたとしても、船の一生、20年後に  $200\text{ mm}$  までしか進展しないようであれば良いと考える。

図7.9.16 より、

$$K_t = 6, \quad l_g = 218 \text{ (mm)}$$

$$\text{であるから } a_0/l_g = 2.3 \times 10^{-3}, \quad a_f/l_g = 0.92$$

$$\begin{aligned} \nabla_P &= 9.47 \times 0.16 \times (24/\Delta\sigma_{all})^{3.2} \times (100/218)^{0.6} \\ &= 200 \end{aligned}$$

従って、

$$\Delta\sigma_{all} = 4.5 \text{ kg/mm}^2 \quad ; \text{ 公称応力}$$

$$\Delta\sigma_{max-all} = 27.0 \text{ kg/mm}^2 \quad ; \text{ 最大応力}$$

となる。

#### 7.9.5.5 直交交差部材がある場合及び荷重分担率が変化する場合の適用法

本マニュアルは半無限板中の縁亀裂に任意の応力分布が加わった場合を基本的境界条件として想定している為、有限幅の部材に亀裂を生じ、その荷重分担率が変化する場合（例えばスロット部ウェブスチフナでは亀裂進展と共に荷重分担率は大幅に減少する<sup>7)</sup>）、及び亀裂の前方に直交部材が存在する場合には非常に安全側の寿命推定となる。

そこで、両ケース共に実質的には荷重分担率の変化、すなわち  $\Delta\sigma_n$  の変化として捕えることができることに着目すれば、寿命検討範囲  $a_0 \sim a_f$  を適当に分割することによって、手計算にて荷重分担率変化影響を考慮することができる。

荷重分担率変化を  $\eta(a/l_g)$  で表わせば、

$$f_{kt} = \sum_{i=1}^j \left\{ G(a_i/l_g) - G(a_{i-1}/l_g) \right\} \times \left\{ \eta(a_{i-1}/l_g) \right\}^{-m} \quad \text{--- (7.9.65)}$$

$$\text{但し } a_i = a_0 + (a_j - a_0) \times i/j \quad \text{--- (7.9.66)}$$

$j$ ; 分割数 (任意であるが 5 程度で十分)

となる。

従って  $\eta(a/l_g)$  さえ与えられれば, (7.9.65) 式より明らかな様に, 分担率変化が無い場合は亀裂の始終点  $a_0, a_j$  の 2 点の  $G$  関数の差として与えられた  $f_{kt}$  が, 今度は  $(j+1)$  個の  $G$  関数で求められる (7.9.65) 式の  $f_{kt}$  に代るだけの簡単な作業で分担率変化影響又は直交部材影響<sup>2)</sup>を考慮することができる。

直交部材影響<sup>2)</sup>による  $\eta(a/l_g)$  は次式で求められる。<sup>1)</sup>

$$\eta(a/l_g) = 1 + 0.14 \times (a/l_g) \times (l_g/d) - 0.58 \times (a/l_g)^2 \times (l_g/d)^2 \quad \text{--- (7.9.67)}$$

但し

$d$ ; 亀裂始点から直交部材までの亀裂に沿った  
ガス長さ (mm)

(亀裂は最大主応力に直交する方向に進展するとして  
求める)

## 7.9.6 まとめ

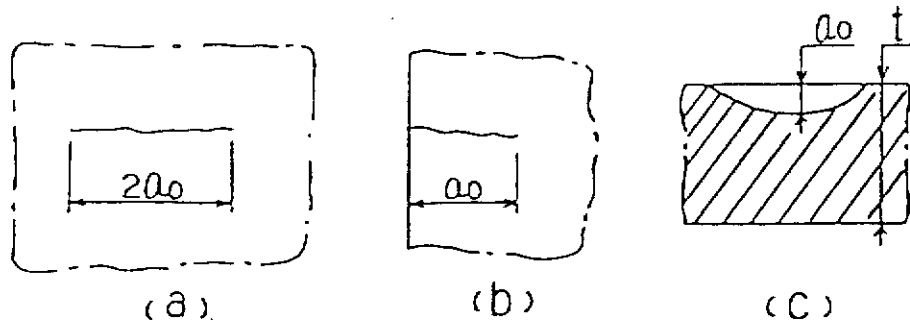
破壊力学手法の設計への適用を検討し下記成果を得た。

- 1) 破壊力学解析の最大の難関である  $K$  値の推定に関し, 応力集中部に於る応力分布の特性及び,  $K$  値理論解の特性を組み合わせるにより, 汎用的な  $K$  値表示式を作成した。
- 2)  $K$  値の亀裂長変化に伴う追跡解析に関しては,  $G$  関数と称する亀裂の残余寿命に対応する新しい概念を導入し, 図表化しておくことにより簡略推定を可能とした。

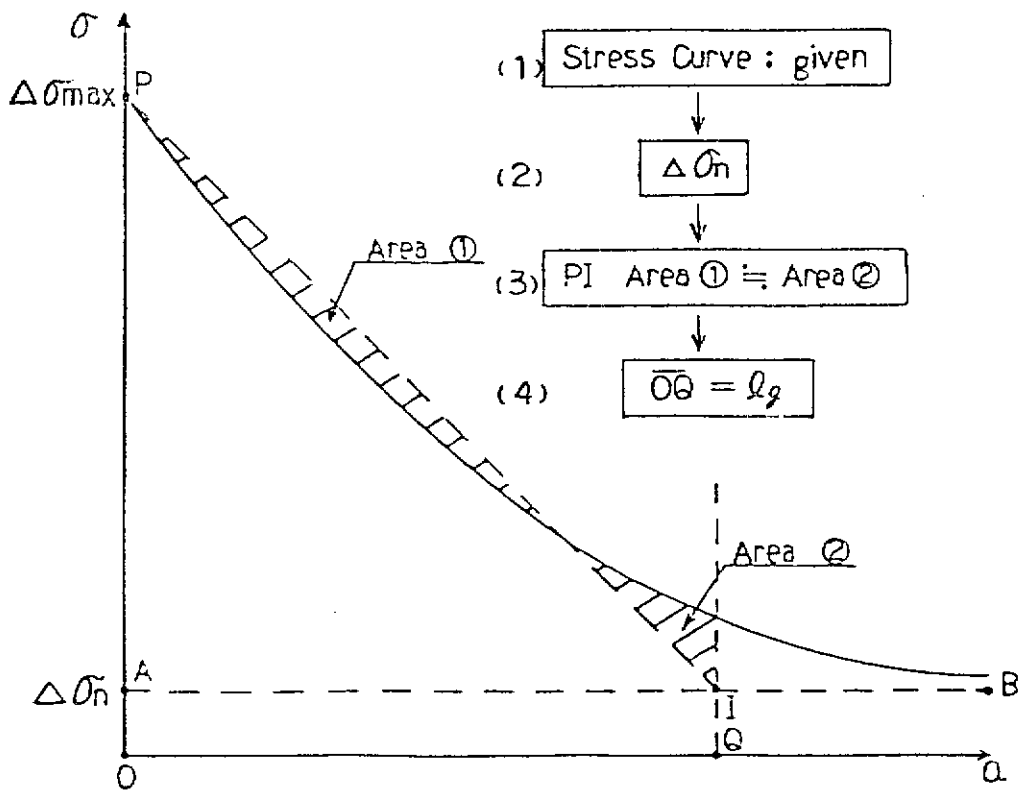
- 3) 疲労亀裂発生寿命推定に関しても、等価初期欠陥長  $a_i$  を既知  $S-N$  線図から逆算して定めておくことにより、伝播寿命と同様の手法の適用を可能とした。
- 4) 1)へ3)より、破壊力学の知見を持たない一般設計者でも容易に疲労亀裂発生寿命、伝播寿命を推定できる“破壊力学設計手法”を作成し、適用例を示した。
- 5) 提案した簡略手法による  $K$  値の推定精度を、種々のケースでチェックし、設計的に十分な精度であることを確認した。
- 6) 提案手法は、表面亀裂解析にも設計的には十分な精度で適用可能である。
- 7) 亀裂の前方に直交交差部材がある場合、 $K$  値の減少効果が知られているが、この影響を考慮するための手法を示した。又この手法はスロット部ウェブスチフナのように亀裂進展と共に荷重分担率が変化する部材の亀裂解析にも用いることができる。
- 8) 応力集中部の応力傾斜に関して考察し、西田が提案している無次元化応力傾斜と、本手法で提案した亀裂伝播に効く応力傾斜を比較した。

## 参考文献

- 1) 日本造船研究協会 第169研究部会“船体構造の破壊管理制御設計に関する研究報告書”, 研究資料 No.326 (昭和55年3月)
- 2) 砂本, 山内, 的場, “溶接継手の疲れ強さに関する新しい評価法の検討” 三菱重工技報 Vol.16 No.3 (昭和54年5月)
- 3) 的場正明, “模型疲労試験と基礎継手疲労試験の関連についての考察”, 日本造船学会論文集, 第138号 (昭和50年12月)
- 4) H.P. Lieurade, “Utilisation de la Mecanique de la Rupture Pour le Calcul de la Resistance a la Fatigue des Assemblages Soudes”, IIW-XIII-840-77 (1977)
- 5) 西田正孝, “応力集中”, 森北出版
- 6) A.S. Kobayashi, “Crack Opening Displacement in Surface Flawed Plate Subjected to Tension or Plate Bending”, Proc. of the 2nd Int. Conf. on Mechanical Behavior of Materials, Boston (1976.8.16-20)
- 7) 牛島, 阪井, “横桁スロット部の疲労強度について”, 西部造船会々報 第47号 (昭和49年2月)
- 8) 山本, 矢島, 井上, “溶接継手止端部からの疲労亀裂発生寿命について” 三菱重工社内報告 (未発表)



☒ 7.9.1 Initial Crack Length ;  $a_0$



☒ 7.9.2 Stress Gradient Factor ;  $l_g$

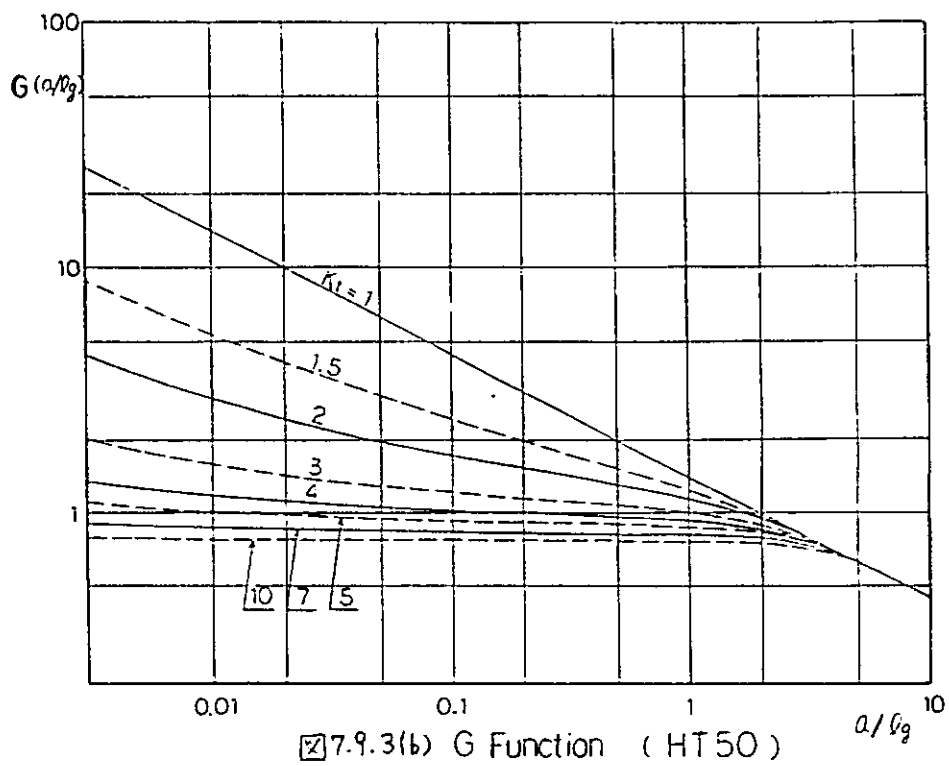
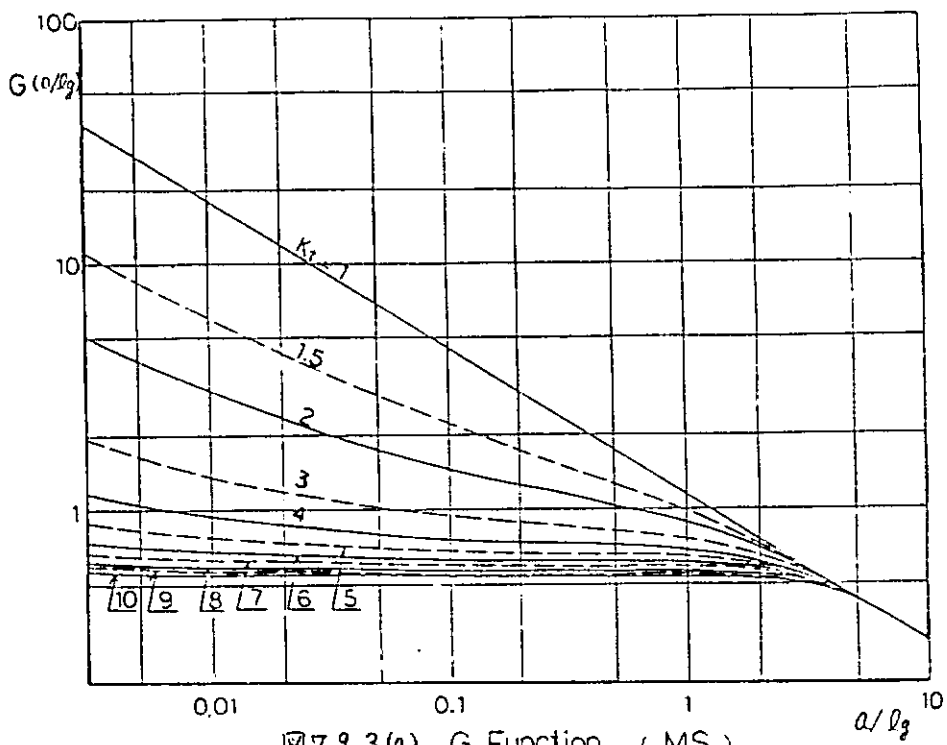


表 7.9.1(a) G Function (MS)

| Kt<br>a/q <sub>3</sub> | Kt                   |                      |                      |                      |                      |                      |                      |                      |                      |                      |                      |
|------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                        | 1                    | 1.5                  | 2                    | 3                    | 4                    | 5                    | 6                    | 7                    | 8                    | 9                    | 10                   |
| 10                     | 2.901 <sup>E-1</sup> | 2.901 <sup>E-1</sup> | 2.901 <sup>E-1</sup> | 2.901 <sup>E-1</sup> | 2.901 <sup>E-1</sup> | 2.901 <sup>E-1</sup> | 2.901 <sup>E-1</sup> | 2.901 <sup>E-1</sup> | 2.901 <sup>E-1</sup> | 2.901 <sup>E-1</sup> | 2.901 <sup>E-1</sup> |
| 9                      | 3.090°               | 3.090°               | 3.090°               | 3.090°               | 3.090°               | 3.090°               | 3.090°               | 3.090°               | 3.090°               | 3.090°               | 3.090°               |
| 8                      | 3.317°               | 3.316°               | 3.316°               | 3.316°               | 3.316°               | 3.315°               | 3.315°               | 3.315°               | 3.315°               | 3.314°               | 3.314°               |
| 7                      | 3.593°               | 3.593°               | 3.592°               | 3.590°               | 3.590°               | 3.589°               | 3.587°               | 3.586°               | 3.585°               | 3.586°               | 3.583°               |
| 6                      | 3.961°               | 3.939°               | 3.938°               | 3.930°               | 3.930°               | 3.926°               | 3.923°               | 3.919°               | 3.915°               | 3.912°               | 3.908°               |
| 5                      | 4.397°               | 4.391°               | 4.386°               | 4.372°               | 4.360°               | 4.348°               | 4.337°               | 4.326°               | 4.315°               | 4.306°               | 4.293°               |
| 4                      | 5.027°               | 5.005°               | 4.986°               | 4.963°               | 4.905°               | 4.868°               | 4.833°               | 4.800°               | 4.769°               | 4.739°               | 4.710°               |
| 3                      | 5.974°               | 5.896°               | 5.819°               | 5.685°               | 5.566°               | 5.461°               | 5.367°               | 5.283°               | 5.207°               | 5.137°               | 5.074°               |
| 2                      | 7.619°               | 7.296°               | 7.072°               | 6.596°               | 6.273°               | 6.022°               | 5.821°               | 5.655°               | 5.516°               | 5.397°               | 5.296°               |
| 1                      | 1.155                | 9.908°               | 8.861°               | 7.612°               | 6.898°               | 6.433°               | 6.106°               | 5.860°               | 5.669°               | 5.514°               | 5.386°               |
| 0.9                    | 1.230 <sup>E0</sup>  | 1.032 <sup>E0</sup>  | 9.112°               | 7.723°               | 6.955°               | 6.467°               | 6.127°               | 5.875°               | 5.679°               | 5.521°               | 5.391°               |
| 0.8                    | 1.320°               | 1.079°               | 9.385°               | 7.838°               | 7.016°               | 6.500°               | 6.148°               | 5.888°               | 5.688°               | 5.528°               | 5.396°               |
| 0.7                    | 1.430°               | 1.134°               | 9.689°               | 7.960°               | 7.073°               | 6.533°               | 6.168°               | 5.902°               | 5.697°               | 5.535°               | 5.401°               |
| 0.6                    | 1.569°               | 1.198°               | 1.003 <sup>E0</sup>  | 8.091°               | 7.136°               | 6.568°               | 6.189°               | 5.915°               | 5.706°               | 5.541°               | 5.406°               |
| 0.5                    | 1.750°               | 1.276°               | 1.046°               | 8.238°               | 7.204°               | 6.606°               | 6.210°               | 5.929°               | 5.716°               | 5.548°               | 5.410°               |
| 0.4                    | 2.000°               | 1.377°               | 1.094°               | 8.409°               | 7.281°               | 6.645°               | 6.234°               | 5.944°               | 5.726°               | 5.555°               | 5.416°               |
| 0.3                    | 2.378°               | 1.518°               | 1.160°               | 8.625°               | 7.375°               | 6.694°               | 6.263°               | 5.962°               | 5.738°               | 5.563°               | 5.422°               |
| 0.2                    | 3.033°               | 1.742°               | 1.261°               | 8.937°               | 7.508°               | 6.761°               | 6.301°               | 5.986°               | 5.754°               | 5.574°               | 5.430°               |
| 0.1                    | 4.597°               | 2.231°               | 1.470°               | 9.550°               | 7.761°               | 6.888°               | 6.373°               | 6.030°               | 5.783°               | 5.592°               | 5.446°               |
| 0.09                   | 4.897°               | 2.321°               | 1.508°               | 9.658°               | 7.805°               | 6.910°               | 6.386°               | 6.038°               | 5.788°               | 5.598°               | 5.446°               |
| 0.08                   | 5.255°               | 2.427°               | 1.557°               | 9.784°               | 7.856°               | 6.935°               | 6.400°               | 6.067°               | 5.794°               | 5.602°               | 5.449°               |
| 0.07                   | 5.696°               | 2.556°               | 1.605°               | 9.935°               | 7.918°               | 6.966°               | 6.417°               | 6.057°               | 5.801°               | 5.606°               | 5.453°               |
| 0.06                   | 6.245°               | 2.717°               | 1.671°               | 1.012 <sup>E0</sup>  | 7.993°               | 7.003°               | 6.438°               | 6.070°               | 5.809°               | 5.612°               | 5.457°               |
| 0.05                   | 6.967°               | 2.925°               | 1.756°               | 1.036°               | 8.090°               | 7.051°               | 6.465°               | 6.086°               | 5.820°               | 5.619°               | 5.462°               |
| 0.04                   | 7.766°               | 3.210°               | 1.872°               | 1.069°               | 8.221°               | 7.115°               | 6.501°               | 6.109°               | 5.834°               | 5.629°               | 5.469°               |
| 0.03                   | 8.666°               | 3.635°               | 2.064°               | 1.116°               | 8.413°               | 7.210°               | 6.554°               | 6.141°               | 5.855°               | 5.644°               | 5.480°               |
| 0.02                   | 1.207 <sup>E+1</sup> | 4.364°               | 2.339°               | 1.198°               | 8.739°               | 7.370°               | 6.643°               | 6.196°               | 5.891°               | 5.669°               | 5.497°               |
| 0.01                   | 1.830°               | 6.089°               | 3.031°               | 1.388°               | 9.500°               | 7.744°               | 6.852°               | 6.323°               | 5.974°               | 5.726°               | 5.538°               |
| 0.009                  | 1.969°               | 6.419°               | 3.162°               | 1.424°               | 9.644°               | 7.814°               | 6.892°               | 6.348°               | 5.990°               | 5.737°               | 5.546°               |
| 0.008                  | 2.092°               | 6.812°               | 3.320°               | 1.467°               | 9.817°               | 7.899°               | 6.939°               | 6.376°               | 6.009°               | 5.749°               | 5.551°               |
| 0.007                  | 2.267°               | 7.293°               | 3.512°               | 1.520°               | 1.003 <sup>E0</sup>  | 8.002°               | 6.996°               | 6.411°               | 6.032°               | 5.765°               | 5.566°               |
| 0.006                  | 2.486°               | 7.897°               | 3.753°               | 1.586°               | 1.029°               | 8.131°               | 7.069°               | 6.456°               | 6.061°               | 5.785°               | 5.580°               |
| 0.005                  | 2.774°               | 8.686°               | 4.069°               | 1.673°               | 1.064°               | 8.300°               | 7.163°               | 6.513°               | 6.098°               | 5.811°               | 5.599°               |
| 0.004                  | 3.171°               | 9.777°               | 4.504°               | 1.792°               | 1.111°               | 8.533°               | 7.293°               | 6.593°               | 6.150°               | 5.846°               | 5.624°               |
| 0.003                  | 3.769°               | 1.162 <sup>E+1</sup> | 5.157°               | 1.971°               | 1.182°               | 8.882°               | 7.488°               | 6.712°               | 6.228°               | 5.900°               | 5.662°               |
| 0.002                  | 4.807°               | 1.426°               | 6.291°               | 2.281°               | 1.306°               | 9.488°               | 7.826°               | 6.918°               | 6.362°               | 5.992°               | 5.728°               |
| 0.001                  | 7.785°               | 2.104°               | 8.996°               | 3.020°               | 1.600°               | 1.093 <sup>E0</sup>  | 8.630°               | 7.409°               | 6.683°               | 6.212°               | 5.885°               |
| 0.0009                 | 7.761°               | 2.234°               | 9.512°               | 3.161°               | 1.657°               | 1.121°               | 8.785°               | 7.504°               | 6.764°               | 6.254°               | 5.915°               |
| 0.0008                 | 8.329°               | 2.389°               | 1.013 <sup>E+1</sup> | 3.331°               | 1.724°               | 1.154°               | 8.969°               | 7.616°               | 6.818°               | 6.304°               | 5.951°               |
| 0.0007                 | 9.024°               | 2.579°               | 1.089°               | 3.538°               | 1.802°               | 1.194°               | 9.194°               | 7.756°               | 6.908°               | 6.366°               | 5.995°               |
| 0.0006                 | 9.898°               | 2.818°               | 1.184°               | 3.798°               | 1.910°               | 1.245°               | 9.678°               | 7.927°               | 7.020°               | 6.443°               | 6.050°               |
| 0.0005                 | 1.104 <sup>E+2</sup> | 3.131°               | 1.309°               | 4.138°               | 2.046°               | 1.311°               | 9.848°               | 8.153°               | 7.168°               | 6.545°               | 6.123°               |
| 0.0004                 | 1.263°               | 3.564°               | 1.481°               | 4.609°               | 2.233°               | 1.403°               | 1.036 <sup>E0</sup>  | 8.466°               | 7.372°               | 6.685°               | 6.222°               |
| 0.0003                 | 1.500°               | 4.214°               | 1.760°               | 5.317°               | 2.515°               | 1.541°               | 1.113°               | 8.936°               | 7.679°               | 6.895°               | 6.373°               |
| 0.0002                 | 1.916°               | 5.343°               | 2.190°               | 6.547°               | 3.005°               | 1.781°               | 1.247°               | 9.753°               | 8.212°               | 7.261°               | 6.634°               |
| 0.0001                 | 2.900°               | 8.039°               | 3.266°               | 9.480°               | 4.174°               | 2.353°               | 1.566°               | 1.170 <sup>E0</sup>  | 9.484°               | 8.133°               | 7.256°               |

表 7.9.1(b) G Function (HT50)

| Kt    | Kt                   |                      |                      |                      |                      |                      |                      |                      |                      |                      |                      |
|-------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|       | 1                    | 1.5                  | 2                    | 3                    | 4                    | 5                    | 6                    | 7                    | 8                    | 9                    | 10                   |
| 10    | 4.684 <sup>E-1</sup> | 4.684 <sup>E-1</sup> | 4.684 <sup>E-1</sup> | 4.684 <sup>E-1</sup> | 4.684 <sup>E-1</sup> | 4.684 <sup>E-1</sup> | 4.684 <sup>E-1</sup> | 4.684 <sup>E-1</sup> | 4.684 <sup>E-1</sup> | 4.684 <sup>E-1</sup> | 4.684 <sup>E-1</sup> |
| 9     | 4.727                | 4.727                | 4.726                | 4.726                | 4.726                | 4.726                | 4.726                | 4.726                | 4.726                | 4.726                | 4.723                |
| 8     | 5.013                | 5.013                | 5.013                | 5.012                | 5.012                | 5.012                | 5.011                | 5.011                | 5.010                | 5.001                | 5.010                |
| 7     | 5.359                | 5.359                | 5.358                | 5.356                | 5.355                | 5.354                | 5.353                | 5.351                | 5.350                | 5.349                | 5.347                |
| 6     | 5.789                | 5.787                | 5.786                | 5.780                | 5.776                | 5.771                | 5.767                | 5.763                | 5.759                | 5.755                | 5.750                |
| 5     | 6.341                | 6.334                | 6.327                | 6.313                | 6.299                | 6.286                | 6.272                | 6.259                | 6.247                | 6.234                | 6.222                |
| 4     | 7.090                | 7.065                | 7.041                | 6.996                | 6.952                | 6.911                | 6.871                | 6.834                | 6.798                | 6.763                | 6.730                |
| 3     | 8.186                | 8.099                | 8.017                | 7.868                | 7.736                | 7.618                | 7.513                | 7.417                | 7.330                | 7.251                | 7.178                |
| 2     | 1.003 <sup>E0</sup>  | 9.681                | 9.389                | 8.925                | 8.570                | 8.290                | 8.062                | 7.873                | 7.716                | 7.577                | 7.457                |
| 1     | 1.418                | 1.752 <sup>E0</sup>  | 1.143 <sup>E0</sup>  | 1.010 <sup>E0</sup>  | 9.313                | 8.792                | 8.418                | 8.135                | 7.912                | 7.731                | 7.580                |
| 0.9   | 1.494                | 1.296                | 1.171                | 1.023                | 9.382                | 8.833                | 8.445                | 8.154                | 7.926                | 7.741                | 7.587                |
| 8     | 1.585                | 1.345                | 1.200                | 1.036                | 9.452                | 8.875                | 8.472                | 8.171                | 7.938                | 7.750                | 7.594                |
| 7     | 1.694                | 1.401                | 1.233                | 1.050                | 9.523                | 8.916                | 8.498                | 8.189                | 7.951                | 7.759                | 7.601                |
| 6     | 1.830                | 1.467                | 1.270                | 1.065                | 9.597                | 8.958                | 8.524                | 8.206                | 7.963                | 7.768                | 7.607                |
| 5     | 2.005                | 1.547                | 1.313                | 1.081                | 9.678                | 9.003                | 8.552                | 8.225                | 7.975                | 7.777                | 7.616                |
| 4     | 2.241                | 1.648                | 1.365                | 1.100                | 9.768                | 9.053                | 8.582                | 8.244                | 7.993                | 7.787                | 7.621                |
| 3     | 2.588                | 1.785                | 1.433                | 1.124                | 9.877                | 9.112                | 8.617                | 8.267                | 8.005                | 7.798                | 7.630                |
| 2     | 3.170                | 1.998                | 1.533                | 1.158                | 1.003 <sup>E0</sup>  | 9.192                | 8.665                | 8.297                | 8.025                | 7.812                | 7.640                |
| 0.1   | 4.423                | 2.440                | 1.732                | 1.221                | 1.030                | 9.336                | 8.749                | 8.351                | 8.061                | 7.838                | 7.659                |
| 0.09  | 4.725                | 2.518                | 1.765                | 1.231                | 1.035                | 9.360                | 8.763                | 8.360                | 8.067                | 7.842                | 7.662                |
| 8     | 5.012                | 2.610                | 1.807                | 1.244                | 1.040                | 9.387                | 8.779                | 8.370                | 8.076                | 7.847                | 7.666                |
| 7     | 5.358                | 2.720                | 1.855                | 1.259                | 1.047                | 9.420                | 8.798                | 8.382                | 8.082                | 7.853                | 7.670                |
| 6     | 5.788                | 2.855                | 1.913                | 1.276                | 1.054                | 9.460                | 8.822                | 8.397                | 8.092                | 7.860                | 7.675                |
| 5     | 6.340                | 3.027                | 1.988                | 1.299                | 1.064                | 9.510                | 8.851                | 8.415                | 8.105                | 7.868                | 7.681                |
| 4     | 7.028                | 3.258                | 2.088                | 1.329                | 1.077                | 9.576                | 8.889                | 8.440                | 8.121                | 7.880                | 7.690                |
| 3     | 8.185                | 3.594                | 2.231                | 1.373                | 1.095                | 9.671                | 8.944                | 8.474                | 8.144                | 7.896                | 7.702                |
| 2     | 1.003 <sup>E11</sup> | 4.152                | 2.469                | 1.446                | 1.126                | 9.826                | 9.034                | 8.531                | 8.182                | 7.923                | 7.721                |
| 0.1   | 1.418                | 4.398                | 2.999                | 1.601                | 1.192                | 1.017 <sup>E0</sup>  | 9.233                | 8.657                | 8.266                | 7.982                | 7.764                |
| 0.09  | 1.495                | 4.628                | 3.096                | 1.630                | 1.205                | 1.023                | 9.269                | 8.679                | 8.282                | 7.993                | 7.772                |
| 8     | 1.585                | 4.898                | 3.211                | 1.664                | 1.219                | 1.031                | 9.312                | 8.706                | 8.300                | 8.006                | 7.781                |
| 7     | 1.695                | 6.225                | 3.349                | 1.706                | 1.236                | 1.040                | 9.364                | 8.739                | 8.322                | 8.021                | 7.793                |
| 6     | 1.830                | 6.630                | 3.520                | 1.756                | 1.258                | 1.051                | 9.428                | 8.779                | 8.369                | 8.040                | 7.806                |
| 5     | 2.005                | 7.150                | 3.740                | 1.822                | 1.286                | 1.065                | 9.509                | 8.831                | 8.383                | 8.064                | 7.824                |
| 4     | 2.242                | 7.854                | 4.038                | 1.910                | 1.323                | 1.084                | 9.62                 | 8.901                | 8.430                | 8.097                | 7.848                |
| 3     | 2.589                | 8.885                | 4.474                | 2.039                | 1.377                | 1.112                | 9.782                | 9.002                | 8.498                | 8.145                | 7.883                |
| 2     | 3.171                | 1.061 <sup>E11</sup> | 5.203                | 2.256                | 1.468                | 1.159                | 1.005 <sup>E0</sup>  | 9.173                | 8.612                | 8.225                | 7.942                |
| 0.1   | 1.418                | 4.683                | 1.451                | 6.848                | 2.763                | 1.674                | 1.264                | 1.066                | 9.557                | 8.870                | 8.406                |
| 0.09  | 1.495                | 4.726                | 1.523                | 7.151                | 2.833                | 1.712                | 1.283                | 1.078                | 9.628                | 8.917                | 8.439                |
| 8     | 1.585                | 4.898                | 1.608                | 7.510                | 2.940                | 1.757                | 1.306                | 1.091                | 9.712                | 8.973                | 8.479                |
| 7     | 1.695                | 4.711                | 1.711                | 7.94                 | 3.068                | 1.811                | 1.334                | 1.107                | 9.813                | 9.041                | 8.526                |
| 6     | 1.830                | 4.838                | 1.838                | 8.48                 | 3.227                | 1.878                | 1.368                | 1.127                | 9.938                | 9.125                | 8.585                |
| 5     | 2.005                | 4.001                | 1.972                | 9.172                | 3.432                | 1.965                | 1.413                | 1.152                | 1.010 <sup>E0</sup>  | 9.233                | 8.661                |
| 4     | 2.242                | 4.223                | 1.011 <sup>E11</sup> | 3.710                | 2.082                | 1.472                | 1.187                | 1.032                | 9.380                | 8.764                | 8.334                |
| 3     | 2.585                | 4.549                | 1.148                | 4.116                | 2.253                | 1.560                | 1.238                | 1.066                | 9.594                | 8.915                | 8.444                |
| 2     | 3.171                | 3.094                | 1.378                | 4.798                | 2.541                | 1.707                | 1.323                | 1.118                | 9.953                | 9.167                | 8.628                |
| 0.001 | 1.417                | 4.324                | 1.897                | 6.336                | 3.190                | 2.060                | 1.515                | 1.239                | 1.077 <sup>E0</sup>  | 9.737                | 9.043                |

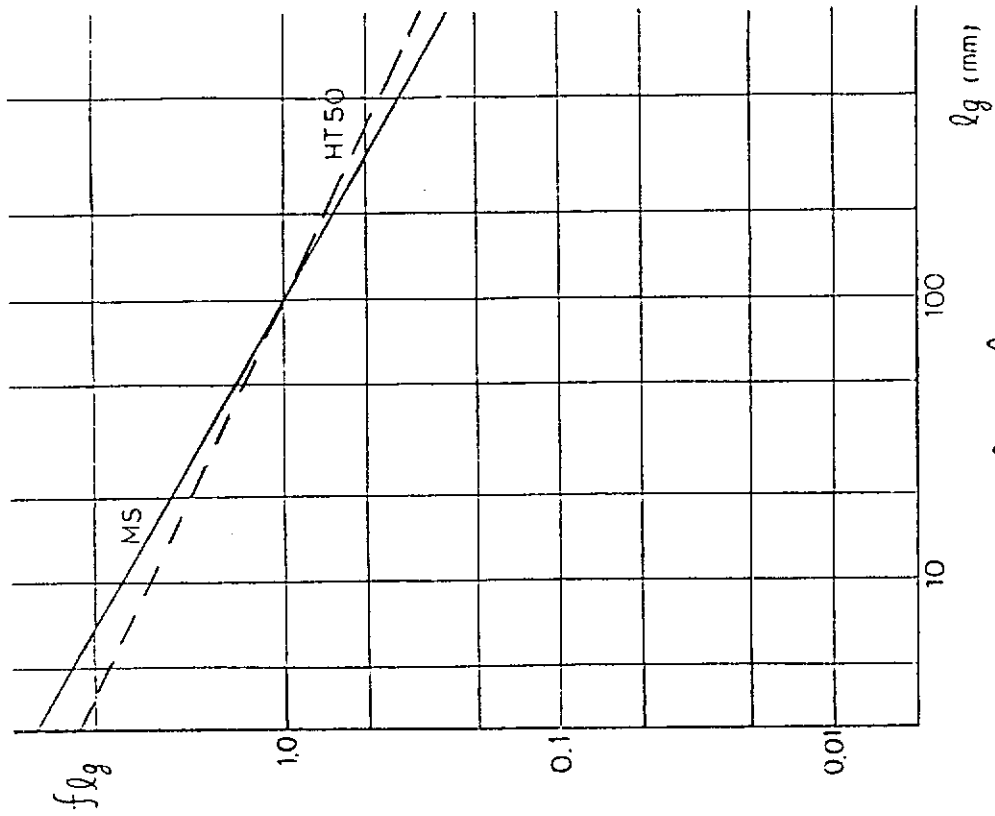


Fig 7.9.5  $f_{lg} - l_g$  Curve

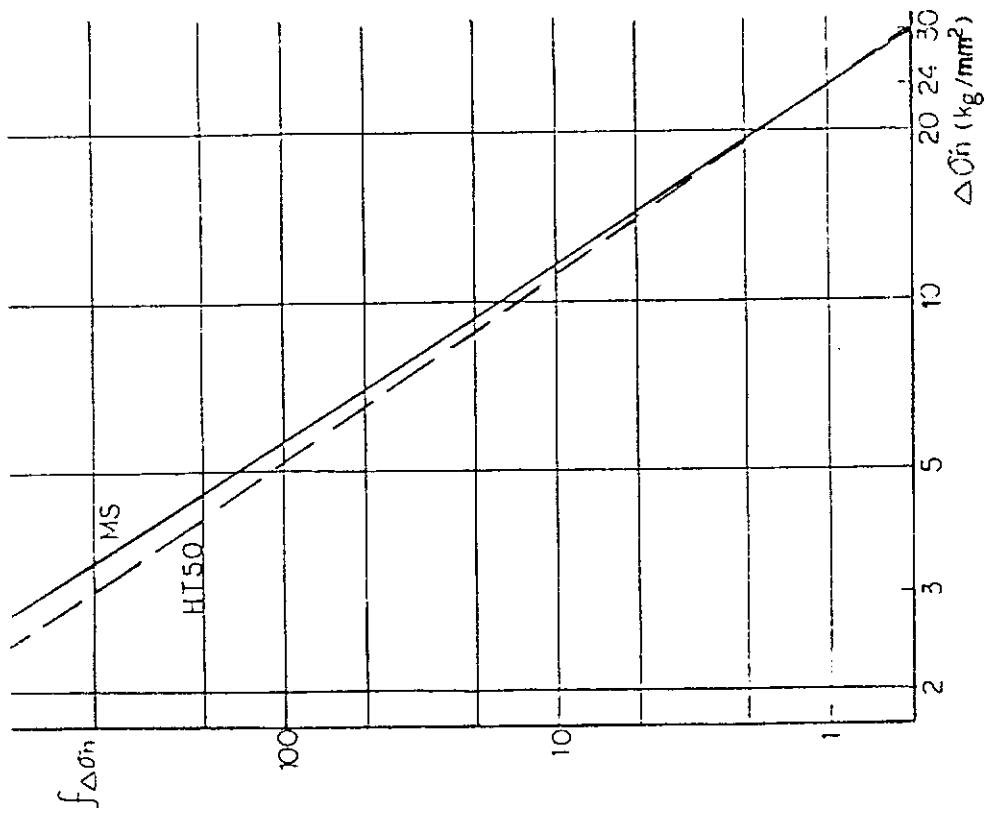


Fig 7.9.4  $f_{\Delta\sigma n} - \Delta\sigma n$  Curve

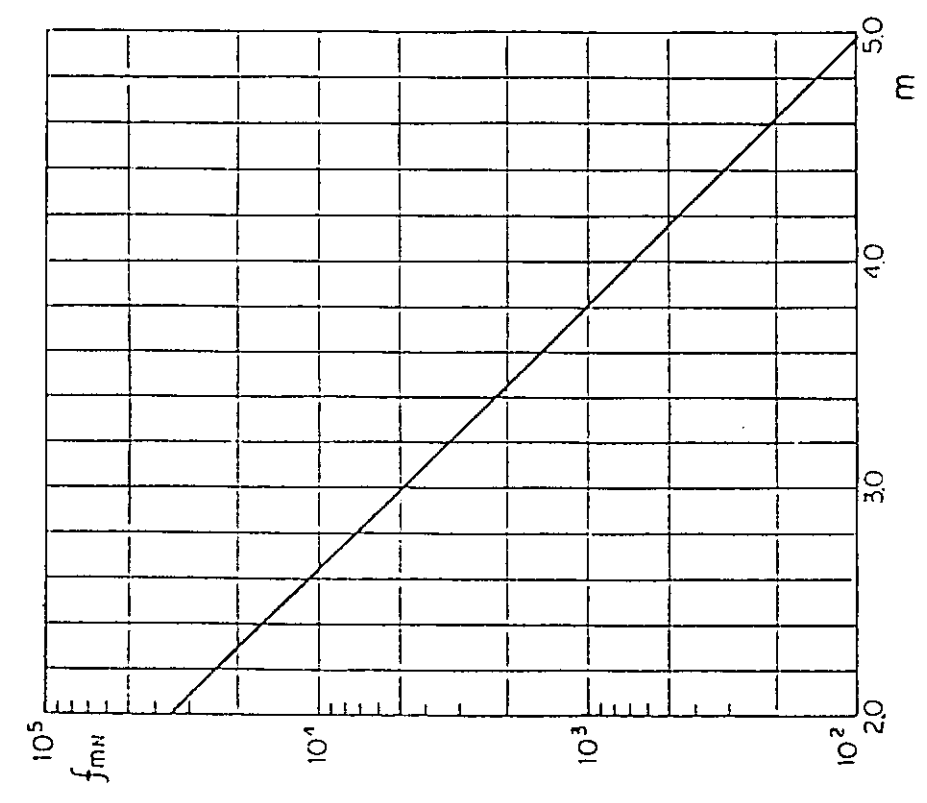


Fig 7.9.7  $f_{mN}$  -  $m$  Curve

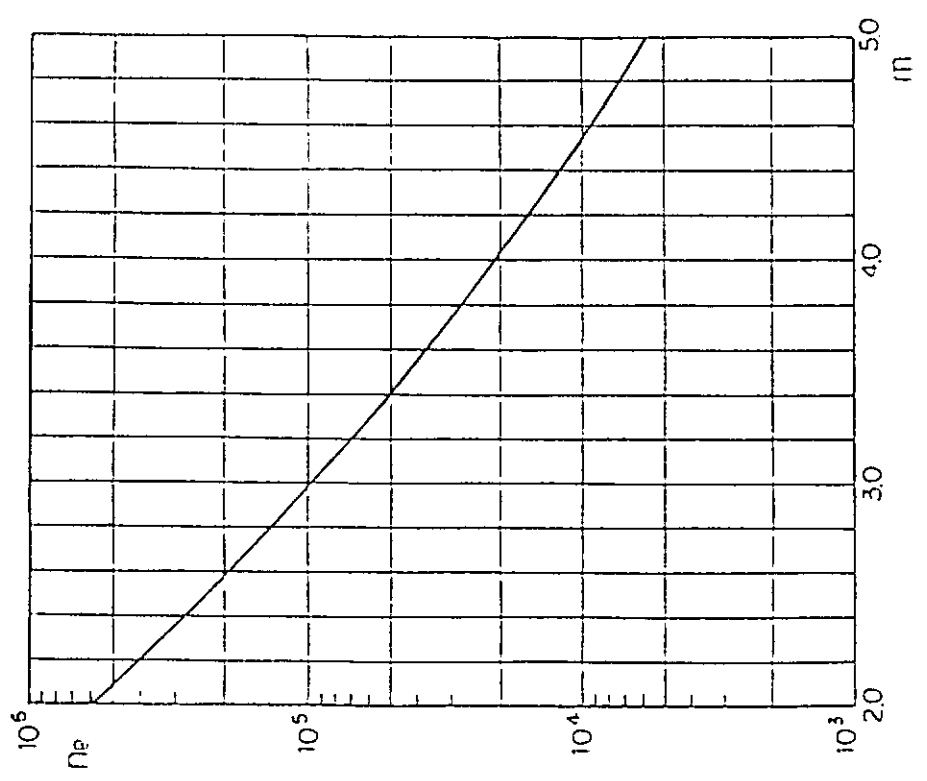


Fig 7.9.6  $n_e$  -  $m$  Curve

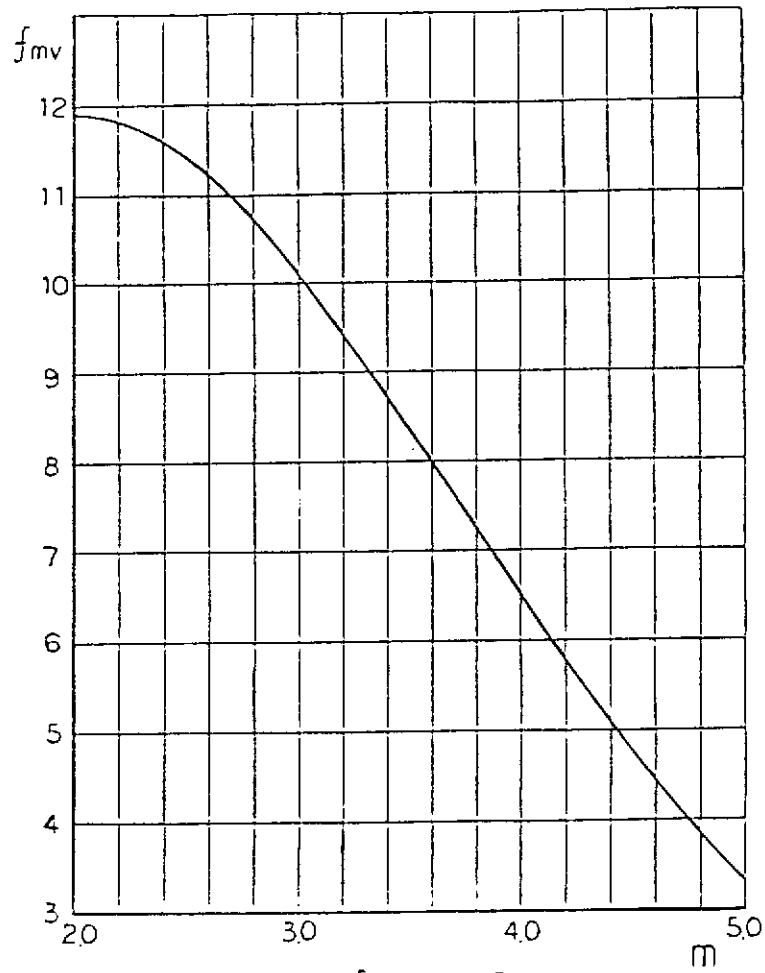


Fig 7.9.8  $f_{mv} - m$  Curve

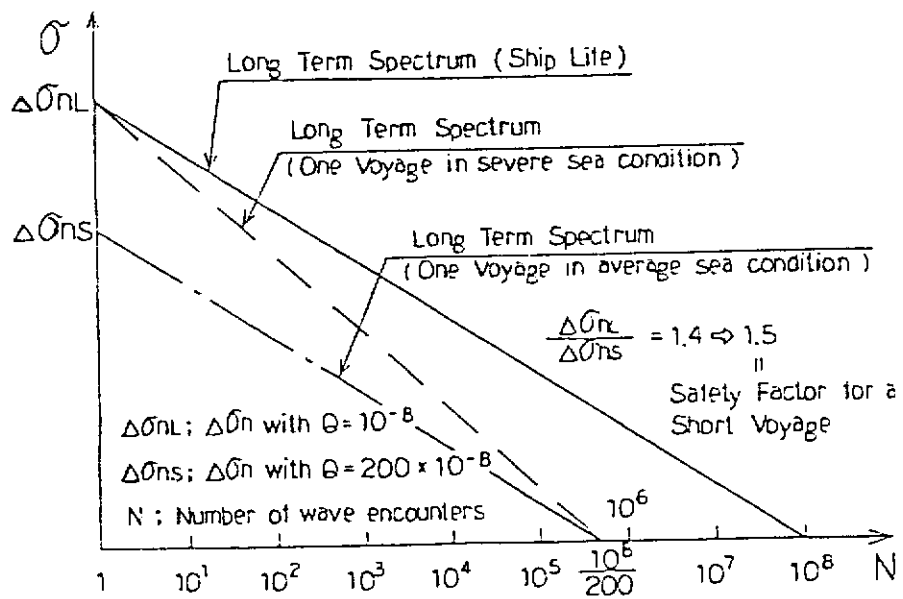


Fig 7.9.9 Safety Factor for a Short Voyage

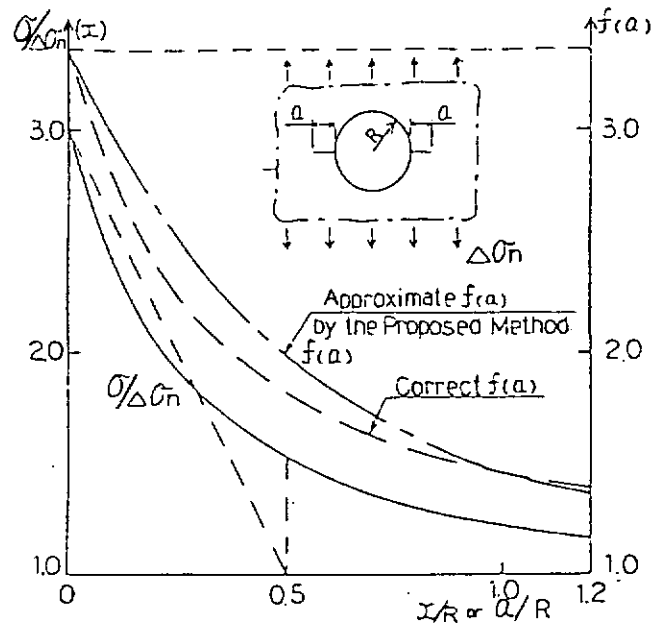


图 7.9.10  $f(a)$  for Cracks around a Hole

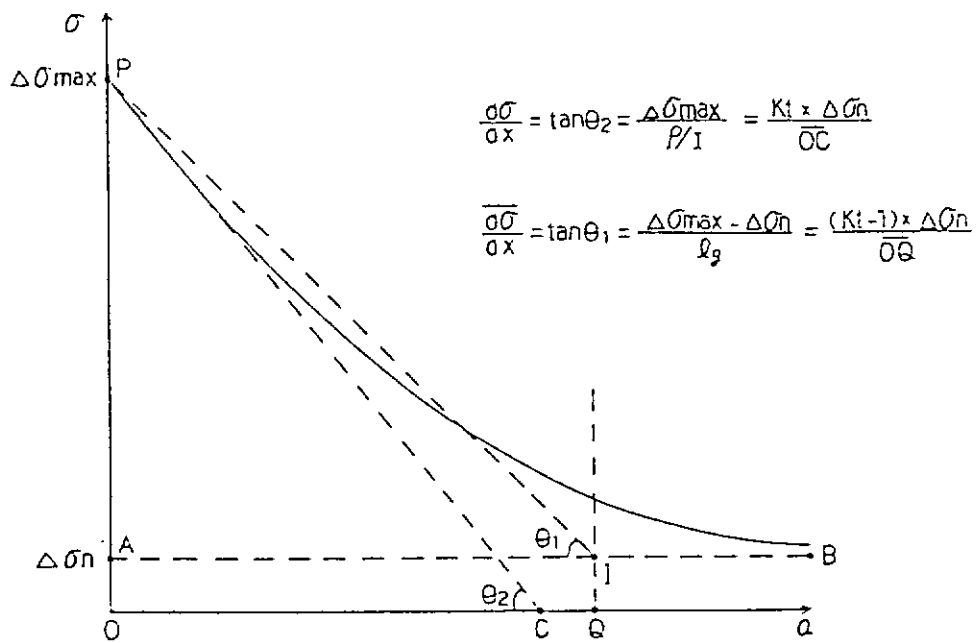


图 7.9.11 Comparison between  $l_g$  and  $P/I$

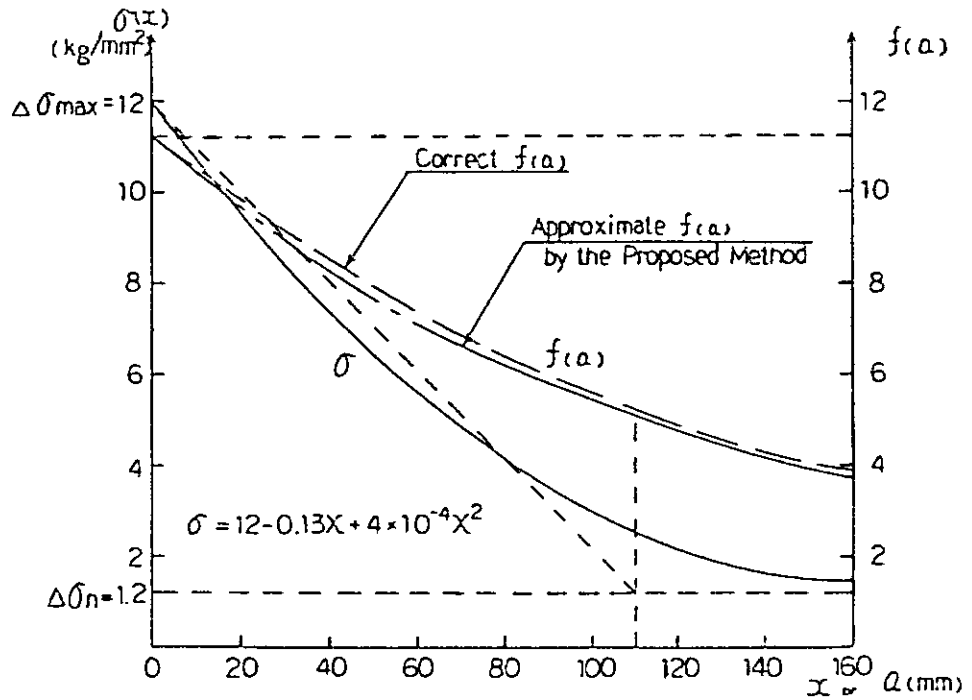


图 7.9.12  $f(a)$  for a Crack in  $\sigma = c_2 x^2 + c_1 x + c_0$

表 7.9.2  $f(a)$  in case  $\sigma = c_1 x + c_0$

| $a/l_0$ | $K_I = 3$ |          |                   | $K_I = 5$ |          |                   | $K_I = 7$ |          |                   | $K_I = 10$ |          |                   |
|---------|-----------|----------|-------------------|-----------|----------|-------------------|-----------|----------|-------------------|------------|----------|-------------------|
|         | $f(a)_T$  | $f(a)_E$ | $f(a)_E / f(a)_T$ | $f(a)_T$  | $f(a)_E$ | $f(a)_E / f(a)_T$ | $f(a)_T$  | $f(a)_E$ | $f(a)_E / f(a)_T$ | $f(a)_T$   | $f(a)_E$ | $f(a)_E / f(a)_T$ |
| 0       | 3.36      | 3.36     | 100               | 5.61      | 5.61     | 100               | 7.85      | 7.85     | 100               | 11.2       | 11.2     | 100               |
| 0.1     | 3.23      | 3.16     | 98                | 5.34      | 5.20     | 97                | 7.44      | 7.24     | 97                | 10.6       | 10.3     | 97                |
| 0.2     | 3.10      | 2.98     | 96                | 5.06      | 4.84     | 96                | 7.03      | 6.70     | 95                | 9.98       | 9.49     | 95                |
| 0.3     | 2.95      | 2.81     | 95                | 4.79      | 4.51     | 94                | 6.62      | 6.20     | 94                | 9.38       | 8.74     | 93                |
| 0.4     | 2.81      | 2.66     | 94                | 4.52      | 4.21     | 93                | 6.21      | 5.74     | 92                | 8.76       | 8.05     | 92                |
| 0.5     | 2.68      | 2.52     | 94                | 4.24      | 3.93     | 93                | 5.80      | 5.33     | 92                | 8.14       | 7.44     | 91                |
| 0.6     | 2.55      | 2.40     | 94                | 3.97      | 3.68     | 93                | 5.39      | 4.96     | 92                | 7.53       | 6.86     | 91                |
| 0.7     | 2.41      | 2.29     | 95                | 3.70      | 3.44     | 93                | 4.98      | 4.61     | 93                | 6.91       | 6.35     | 92                |
| 0.8     | 2.28      | 2.18     | 95                | 3.42      | 3.24     | 95                | 4.58      | 4.30     | 94                | 6.30       | 5.89     | 93                |
| 0.9     | 2.13      | 2.09     | 98                | 3.15      | 3.05     | 97                | 4.16      | 4.01     | 96                | 5.69       | 5.46     | 96                |
| 1.0     | 2.00      | 2.00     | 100               | 2.87      | 2.87     | 100               | 3.76      | 3.76     | 100               | 5.07       | 5.07     | 100               |
| 1.1     | 1.86      | 1.92     | 100               | 2.60      | 2.71     | 104               | 3.34      | 3.52     | 105               | 4.45       | 4.71     | 105               |

$f(a)_T$  ;  $f(a)$  Theoretical

$f(a)_E$  ;  $f(a)$  by the Proposed Method

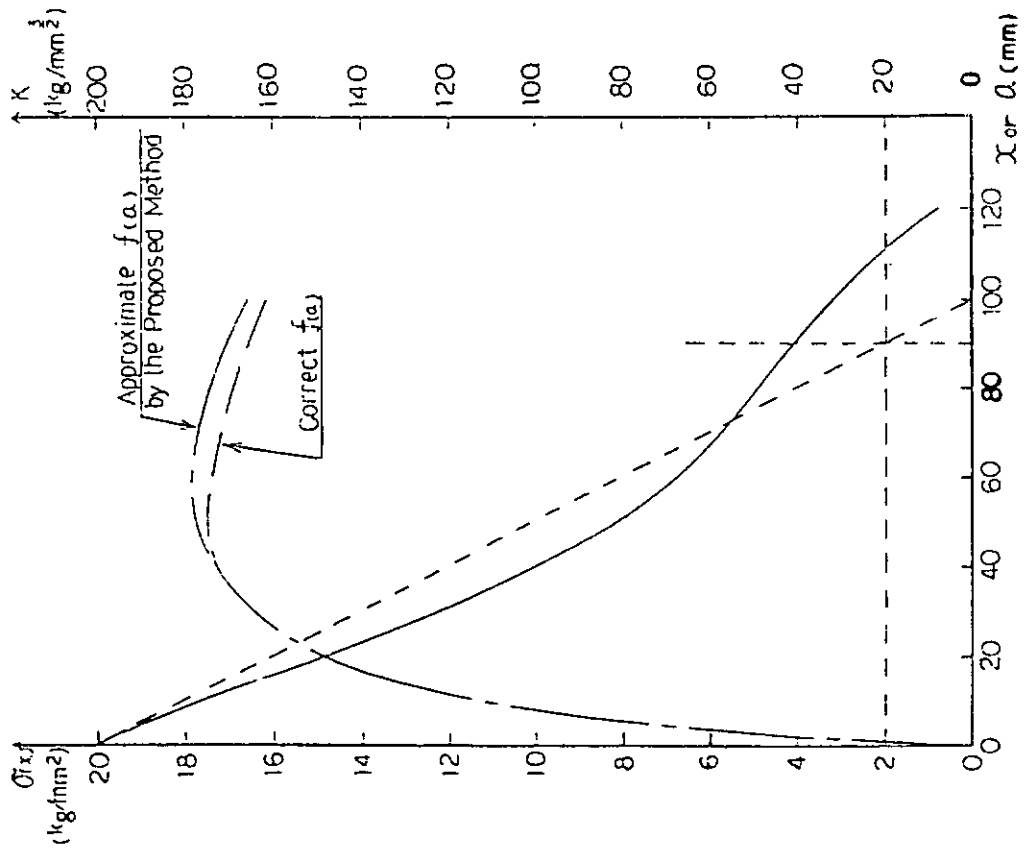


Fig 7.9.13 K Value of a Crack at a Deck Beam End Bracket in a Car Carrier

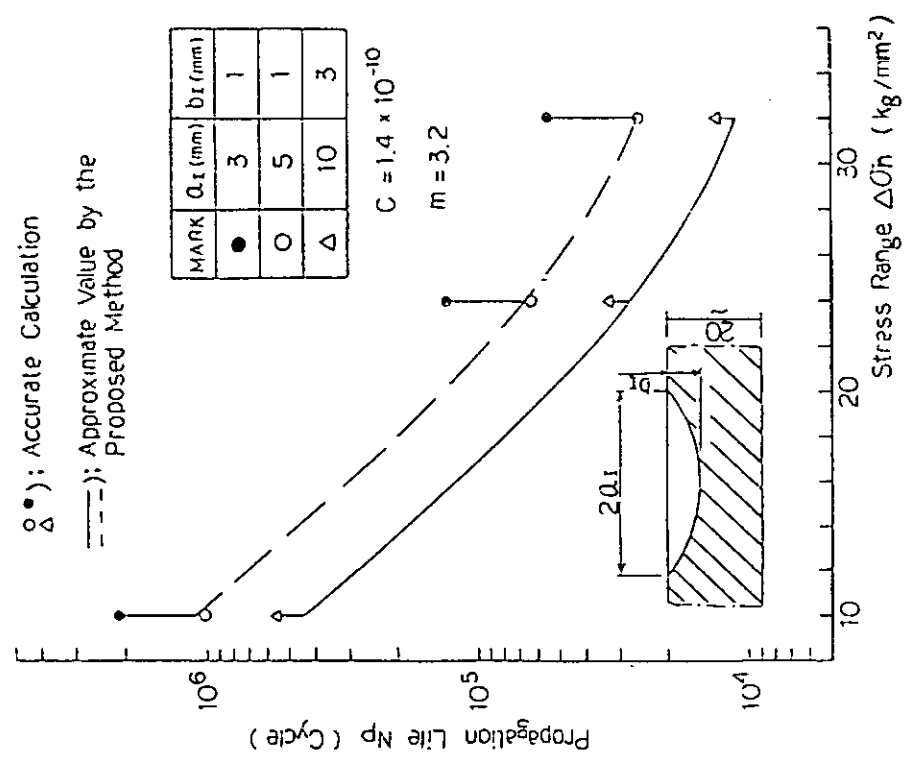


Fig 7.9.14 Crack Propagation Life  $N_p$  of a Surface Crack

表7.9.3 Nc and Np in Butt Joint and Cross Joint

|                     | $\left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}\right)$<br>$\Delta\sigma_n$ | NC ( $a_c \approx 0.5 \text{ mm}$ ) |                   | Np ( $a = 0.5 \Rightarrow 10 \text{ mm}$ ) |                        | Cal./<br>Exp.     |      |
|---------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------------------|------------------------|-------------------|------|
|                     |                                                                  | Experiment                          | Calculation       | Cal./<br>Exp.                              | Experiment/Calculation |                   |      |
| B U T T J O I N T   | 14.4                                                             | $1.9 \times 10^6$                   | $2.3 \times 10^6$ | 1.2                                        | $5.1 \times 10^5$      | $3.9 \times 10^5$ | 0.76 |
|                     | 16.1                                                             | $8.8 \times 10^5$                   | $1.6 \times 10^6$ | 1.8                                        | $4.9 \times 10^5$      | $2.7 \times 10^5$ | 0.55 |
|                     | 17.5                                                             | $1.2 \times 10^6$                   | $1.2 \times 10^6$ | 1.0                                        | $7.8 \times 10^5$      | $2.1 \times 10^5$ | 0.27 |
|                     | 19.5                                                             | $5.5 \times 10^5$                   | $8.7 \times 10^5$ | 1.6                                        | $3.3 \times 10^5$      | $1.5 \times 10^5$ | 0.45 |
|                     | 21.7                                                             | $3.9 \times 10^5$                   | $6.2 \times 10^5$ | 1.6                                        | $2.0 \times 10^5$      | $1.0 \times 10^5$ | 0.50 |
|                     | 26.1                                                             | $2.0 \times 10^5$                   | $3.4 \times 10^5$ | 1.7                                        | $6.3 \times 10^4$      | $5.8 \times 10^4$ | 0.92 |
| C R O S S J O I N T | 14.4                                                             | $1.5 \times 10^6$                   | $1.1 \times 10^6$ | 0.73                                       | $8.8 \times 10^5$      | $4.0 \times 10^5$ | 0.45 |
|                     | 17.3                                                             | $5.2 \times 10^5$                   | $6.2 \times 10^5$ | 1.2                                        | $4.3 \times 10^5$      | $2.2 \times 10^5$ | 0.51 |
|                     | 21.9                                                             | $1.4 \times 10^5$                   | $2.9 \times 10^5$ | 2.1                                        | $1.3 \times 10^5$      | $1.0 \times 10^5$ | 0.77 |
|                     | 26.3                                                             | $7.0 \times 10^4$                   | $1.6 \times 10^5$ | 2.3                                        | $8.7 \times 10^4$      | $5.8 \times 10^4$ | 0.67 |
|                     | 27.9                                                             | $5.3 \times 10^4$                   | $1.3 \times 10^5$ | 2.5                                        | $5.8 \times 10^4$      | $4.8 \times 10^4$ | 0.83 |

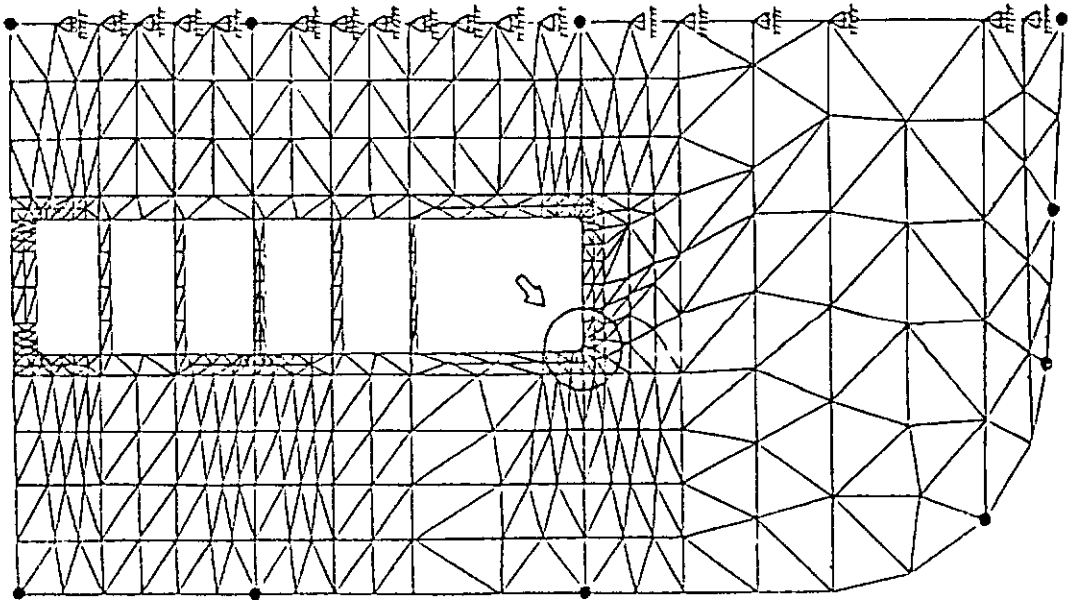
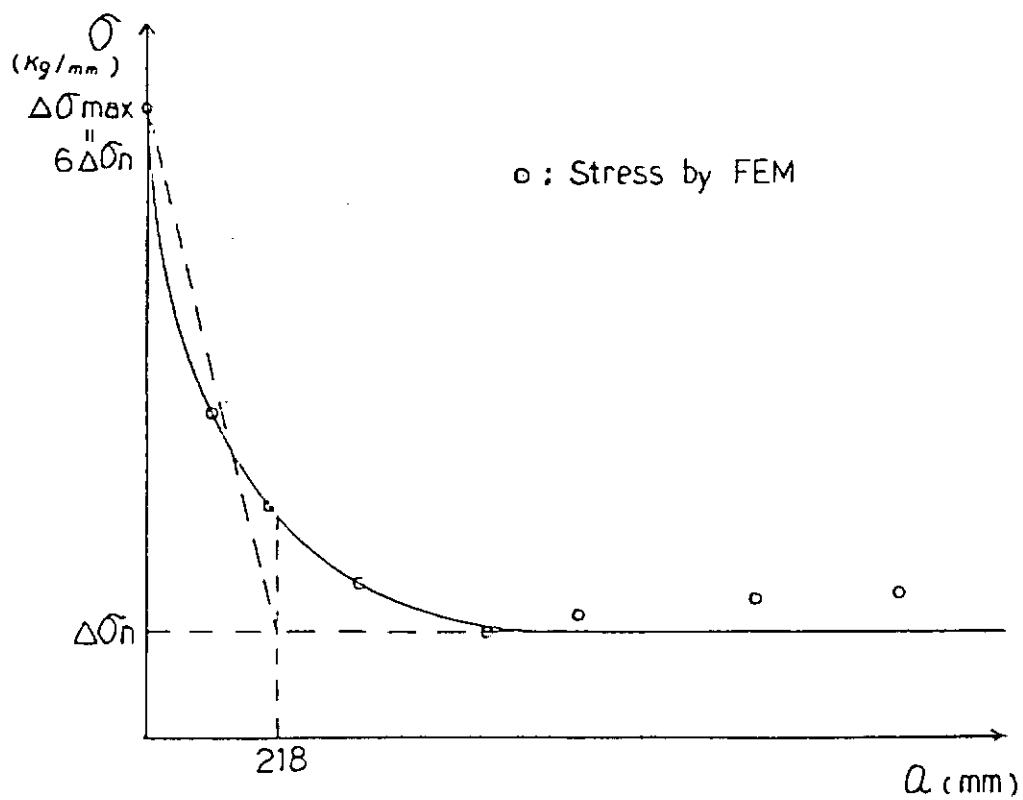


图7.9.15 Structural Model of a Bulkhead in a PCC



7.9.16 Stress Distribution at a Corner of an Opening in a PCC

## 7.10 海洋構造物 HT 60 溶接継手の脆性破壊に対する安全性の評価

### 7.10.1 目 的

海洋構造物用として HT 60 鋼厚板 (板厚 445mm および 635mm) の使用が検討され, その溶接継手について脆性破壊に対し許容し得るか, 応力除去焼鈍を行うべきか否かについて判定することとなった。

HT 60 溶接継手の破壊靱性値を得るために, 比較的小型で簡便な 3 点曲げ COD 試験を実施した。その結果より, 破壊力学的手法, 特に日本溶接協会 WES 2805 規格の手法を応用して許容欠陥寸法を求め, 安全性についての検討を行った。

### 7.10.2 HT 60 溶接継手の破壊靱性値

HT 60 溶接継手について, 次のような条件で, 3 点曲げ COD 試験を行い破壊靱性値  $\delta_c$  を求めた。即ち

- ① 板 厚 : 635mm, 445mm
- ② 切欠位置: 溶接金属, HAZ
- ③ 方 向 : 圧延平行方向 L, 圧延直角方向 C
- ④ 応力除去焼鈍: 有り, なし

の組合せ  $2 \times 2 \times 2$  で, それぞれ 4 繰返し, 計 64 本の試験を行った。

溶接条件を表 7.10.1, 2 に示す。応力除去焼鈍の条件は,  $565 \pm 15^\circ\text{C} \times 2.5\text{h}$  保持で行った。

3 点曲げ COD 試験の試験片寸法は ASTM-E 399 および BS1 DD19 に従った標準的なものであり, その詳細を図 7.10.1, 2, 3 に示す。試験温度は, 本海洋構造物の最低使用温度と考えられる  $7^\circ\text{C}$  ( $45^\circ\text{F}$ ) である。

表 7.10.3 に 3 点曲げ COD 試験で得られた結果を示す。いずれも  $7^\circ\text{C}$  を実施した 4 本の試験の平均値である。

脆性破壊はいずれの試験片も塑性拘束の最も大きな板厚中央部から発生しており, 亀裂は全断面を破断することなく停止している。しかし破面はいずれも完全脆性を呈している。

### 7.10.3 許容欠陥寸法パラメータ $\bar{a}$

表 7.10.3 に示した破壊靱性値  $\delta_c$  から, 日本溶接協会 WES-2805 規格に従って, 欠陥部に働く歪  $\varepsilon$  と許容欠陥パラメータ  $\bar{a}$  とについての算定を行った。

許容欠陥寸法パラメータ  $\bar{a}$  とは, 許容欠陥の大きさを代表するパラメータであり, 無限板中の板厚貫通欠陥の場合にはそのまゝ欠陥長さの  $1/2$  となる量である。

一方, 欠陥部に働く歪  $\varepsilon$  とは, 設計応力から換算される歪に溶接残留歪と構造形状に対する歪集中を加えたものである。

WES-2805 規格では  $\delta_c$ ,  $\bar{a}$ ,  $\varepsilon$  は次式のように与えられる。

$$\bar{a} = \frac{1}{2.5 (\varepsilon / \varepsilon_Y)} (\delta_c / \varepsilon_Y) \quad \text{----- (7.10.1)}$$

ただし,  $\varepsilon_Y$  は降伏歪である。降伏点を  $\sigma_Y$ , ヤング率を  $E$  とすると

$$\varepsilon_Y = \sigma_Y / E \quad \text{----- (7.10.2)}$$

また,  $\varepsilon$  は次のように与えられる。

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = \sigma_1 / E + \sigma_2 / E + \sigma_3 / E \quad \text{----- (7.10.3)}$$

ここで  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  はそれぞれ設計歪, 溶接残留歪, 歪集中による歪をあらわす。 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  はそれぞれ  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  に対応した応力値であって, 次のように与えられる。

$$\sigma_1 = \sigma_{\text{membrane}} + \alpha_b \sigma_{\text{bending}} \quad \text{----- (7.10.4)}$$

$\alpha_b$  : 欠陥の種類で定まる定数

貫通欠陥 0.50, 埋設欠陥 0.25, 表面欠陥 0.75

$$\sigma_2 = \left\{ \begin{array}{l} 0.6\sigma_Y : \text{溶接まゝ, 溶接線に直角な欠陥} \\ 0.2\sigma_Y : \text{溶接まゝ, 溶接線に平行な欠陥} \\ 0 : \text{応力除去焼鈍} \end{array} \right\} \text{----- (7.10.5)}$$

$$\sigma_3 = (k_t - 1)\sigma_1 \text{----- (7.10.6)}$$

ここで  $k_t$  は応力集中係数であり、別途に与えられる。

(7.10.1)式における  $\bar{a}$  と  $\varepsilon$  の関係の例を図 7.10.4, 図 7.10.5 に示す。

今、設計応力  $\sigma_1$  を  $\sigma_Y$  とし、欠陥の存在箇所に応力集中がない ( $k_t = 1$ ) と仮定して、応力除去焼鈍のありなしによる許容欠陥寸法パラメータ  $\bar{a}$  の差異を対比したのが表 7.10.4 である。

表 7.10.4 に見られるように、応力除去焼鈍は、全体として  $\bar{a}$  を大きくする傾向にあるけれども、その効果はあまり顕著でない。破壊靱性値  $\delta_c$  は、応力除去焼鈍により低下する場合があります、残留応力の除去が必ずしもそのまゝ、安全性を高めることになっていないこととなる。

#### 7.10.4 溶接継手における許容欠陥寸法

欠陥の存在位置が応力集中部でない ( $k_t = 1$ ) 場合は、前項 7.10.3 での表 7.10.4 に示した  $\bar{a}$  が板厚貫通き裂の  $\frac{1}{2}$  に相当し、そのまゝで許容欠陥寸法が求められたこととなる。

しかし、一般の溶接継手の場合は、さまざまな応力集中があり、欠陥形状も板厚貫通き裂、埋設き裂、表面き裂と多様に変化する。

ここでは、板厚 6.3 mm の溶接金属について、溶接まゝと、応力除去焼鈍を行ったものとの比較を行うこととする。溶接継手の形式としては、突き合せ溶接継手 (横継手および縦継手)、十字隅肉継手、隅肉継手のまわし溶接部の 4 つのケースの算定を行う。

応力集中係数  $k_t$  および溶接残留応力は、WSD 規格 (案) に従い以下のように設定されることとなる。

##### (1) 横 継 手

表面欠陥の場合、欠陥深さを  $b$ 、板厚を  $t$  として、

$$b \leq 0.15t \text{ のとき } k_t = 1.5$$

$$b > 0.15t \text{ のとき } k_t = 1.0$$

$$\sigma_2 = 0.2\sigma_Y$$

埋設欠陥および余盛なしの場合は

$$k_t = 1.0, \quad \sigma_2 = 0$$

##### (2) 縦 継 手

$$k_t = 1.0, \quad \sigma_2 = 0.6\sigma_Y$$

##### (3) 十字隅肉継手

表面欠陥の場合

$$b \leq 0.10t \text{ のとき } k_t = 3.0$$

$$b > 0.10t \text{ のとき } k_t = 2.0$$

$$\sigma_2 = 0.6\sigma_Y$$

埋設欠陥、貫通欠陥の場合

$$k_t = 2.0, \quad \sigma_2 = 0$$

なお完全溶込みの場合は、(1)の横継手（突合せ）の場合と同等とみなす。

#### (4) 隅肉継手まわし溶接部

補強板の高さを  $h$  として、

$$h \geq t \quad \text{のとき} \quad k_t = 3.0$$

$$h < t \quad \text{のとき} \quad k_t = 2.0$$

$$\sigma_t = 0.6 \sigma_T$$

許容欠陥寸法パラメータ  $\bar{a}$  から、表面欠陥、埋没欠陥の欠陥長さ、深さへの換算は、欠陥先端での  $K$  値を媒介として作成された図 7.10.6, 7 により行った。

図 7.10.8~11 に、上に挙げた(1)~(4)のケースの表面欠陥の場合の許容欠陥寸法と設計応力の関係を示す。埋没欠陥については今回測定された破壊靱性値  $\delta_c$  に対して全て許容されるので、グラフに示していない。

図 7.10.8 の横継手に示されるように、欠陥が溶接線に平行に存在する場合は、残留応力の影響が小さく、応力除去焼鈍により、破壊靱性値  $\delta_c$  がいくらか低下すると、許容欠陥寸法が小さくなってしまう可能性があることは注意を要する。

### 7.10.5 結 論

HT60 溶接継手の脆性破壊に対する許容欠陥寸法について、日本溶接協会 WES-2805 規格にもとづき検討を行った。特に設計、工作関係者が理解しやすいように、各種の溶接継手形式、欠陥位置、欠陥形状に対して、設計応力と許容欠陥寸法の関係をグラフ化した。

また、溶接部の応力除去焼鈍が許容欠陥寸法に及ぼす影響について考察した。応力除去焼鈍の採否は、設計者、工作者が、溶接法と許容欠陥寸法との関係、その他の要因を考慮して決定すべきであるが、一般に高強度の調質鋼では、応力除去焼鈍が靱性の劣化を招きやすく、溶接継に平行方向の欠陥に対して逆に許容欠陥寸法を小さくする場合があることに注意すべきである。

表 7.10.1 63.5 mm 厚材の溶接条件

| 溶 接 法   | SAW      | 溶 接 交 勢 | 1G (Flat)     |
|---------|----------|---------|---------------|
| 開 先 形 状 | Double V | 両 側     | 2.5° (63.5mm) |

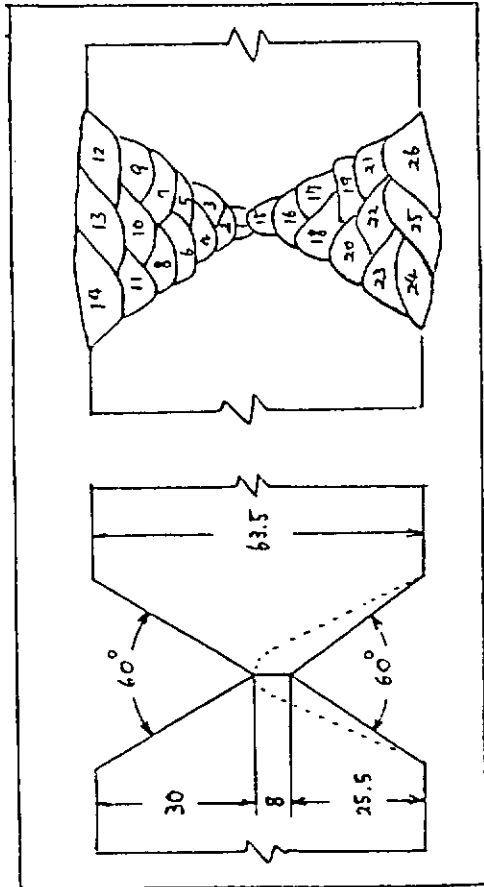
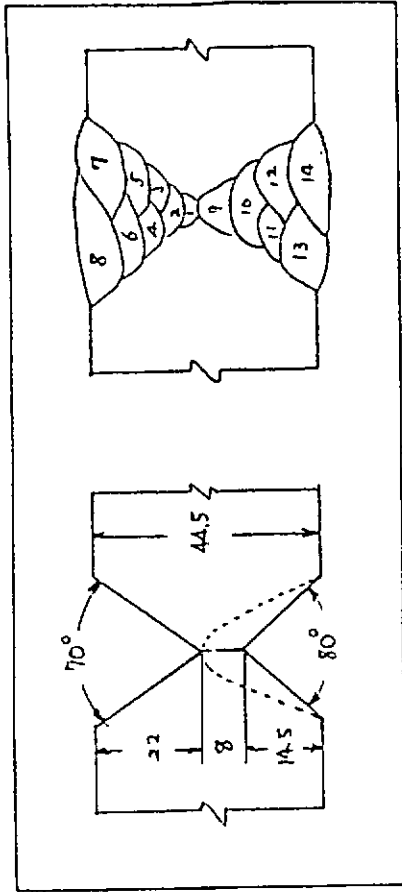


表 7.10.2 44.5 mm 厚材の溶接条件

| 溶 接 法   | SAW      | 溶 接 交 勢 | 1G (Flat)      |
|---------|----------|---------|----------------|
| 開 先 形 状 | Double V | 両 側     | 1.75° (44.5mm) |

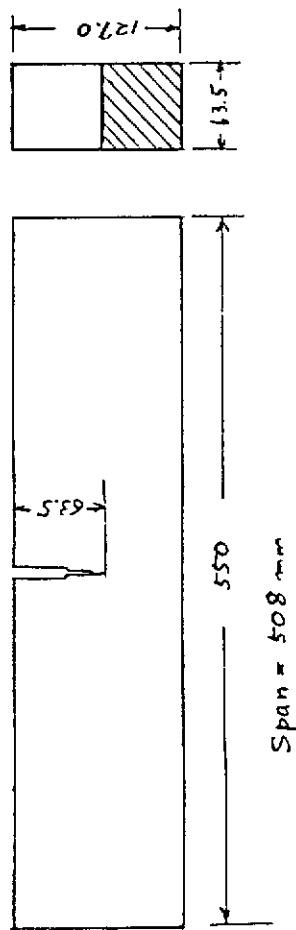


溶 接 条 件

| パス番号  | 開 先 形 状  |                             | 電 圧 (V) | 電 流 (A) | 進 速 (mm/min) | 溶 接 法        |
|-------|----------|-----------------------------|---------|---------|--------------|--------------|
|       | 溝 深 (mm) | 溝 角 (°)                     |         |         |              |              |
| 1     | 4.8      | US48(HS-60)<br>US50B(HS-64) | 88      | 680     | 85           | SAW          |
| 2     | ?        | ?                           | 84      | 700     | 35           | ?            |
| 3~13  | ?        | ?                           | 84      | 740     | 35           | ?            |
| 14    | ?        | ?                           | 86      | 740     | 32           | ?            |
| 15    | ?        | ?                           | 86      | 740     | 35           | ?            |
| 16~23 | ?        | ?                           | 84      | 740     | 35           | ?            |
| 24    | ?        | ?                           | 86      | 740     | 32           | ?            |
|       |          | 許容範囲                        | 82~86   | 650~750 | 32~50        | (50 KJ/cm以下) |

溶 接 条 件

| パス番号  | 開 先 形 状  |                             | 電 圧 (V) | 電 流 (A) | 進 速 (mm/min) | 溶 接 法       |
|-------|----------|-----------------------------|---------|---------|--------------|-------------|
|       | 溝 深 (mm) | 溝 角 (°)                     |         |         |              |             |
| 1     | 4.8      | US48(HS-60)<br>US50B(HS-64) | 88      | 680     | 85           | SAW         |
| 2~7   | ?        | ?                           | 84      | 740     | 35           | ?           |
| 8     | ?        | ?                           | 86      | 740     | 32           | ?           |
| 9     | ?        | ?                           | 88      | 680     | 35           | ?           |
| 10    | ?        | ?                           | 84      | 700     | 35           | ?           |
| 11~13 | ?        | ?                           | 84      | 740     | 35           | ?           |
| 14    | ?        | ?                           | 86      | 740     | 32           | ?           |
|       |          | 許容範囲                        | 82~86   | 650~750 | 32~40        | (5 KJ/cm以下) |

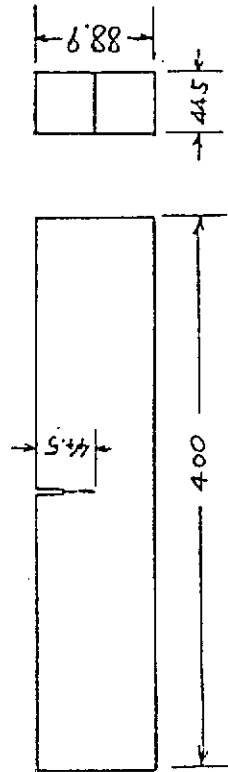


Span = 550 mm

Fatigue Pre-cracking Condition

- (1)  $a = 60.5 \sim 62.5 \text{ mm}$   
 $P = 100 \sim 5100 \text{ Kgf}$   
 $K = 1.5 \sim 72.7 \text{ Kgf} \cdot \text{mm}^{-2/3}$
- (2)  $a = 62.5 \sim 63.5 \text{ mm}$   
 $P = 200 \sim 4800 \text{ Kgf}$   
 $K = 3.0 \sim 71.2 \text{ Kgf} \cdot \text{mm}^{-2/3}$
- 

図 7.10.1 63.5mm (2.5") 厚材の試験片形状



Span = 355.6 mm

Fatigue Pre-cracking Condition

- (1)  $a = 41.5 \sim 43.5 \text{ mm}$   
 $P = 100 \sim 3600 \text{ Kgf}$   
 $K = 2.5 \sim 88.3 \text{ Kgf} \cdot \text{mm}^{-2/3}$
- (2)  $a = 43.5 \sim 44.5 \text{ mm}$   
 $P = 100 \sim 3100 \text{ Kgf}$   
 $K = 2.5 \sim 78.5 \text{ Kgf} \cdot \text{mm}^{-2/3}$
- 

図 7.10.2 44.5mm (1.75") 厚材の試験片形状

表 7.10.3 COD 試験結果

試験温度 45°C (7°C)

| 試 験 片 | COD (mm) |        |
|-------|----------|--------|
|       | 荷重主、     | 応力除去後純 |
| L-1-W | 0.840    | 0.236  |
| L-1-H | 0.805    | 0.414  |
| C-1-W | 0.282    | 0.877  |
| C-1-H | 0.867    | 0.486  |
| L-2-W | 0.246    | 0.189  |
| L-2-H | 0.781    | 1.322  |
| C-2-W | 0.423    | 0.246  |
| C-2-H | 0.448    | 0.555  |

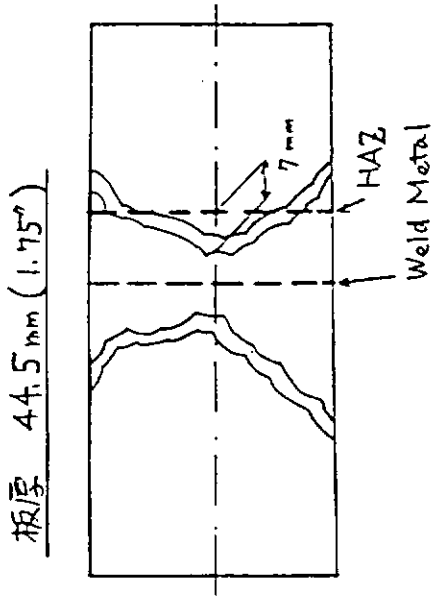
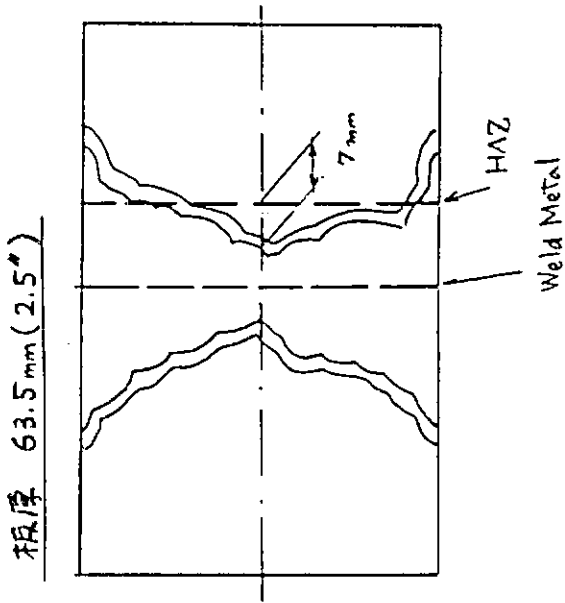


図 7.10.3 COD試験片での亀裂先端位置

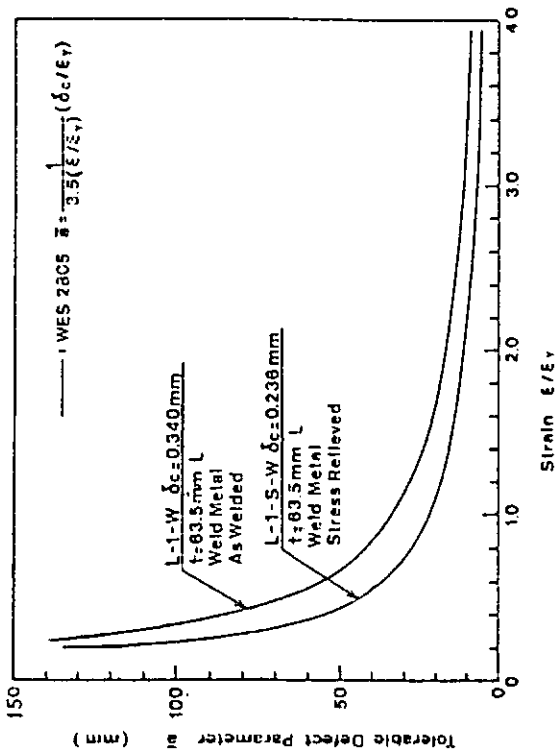


図 7.10.4 許容欠陥寸法パラメータと歪との関係：63.5mm厚材，溶接金属

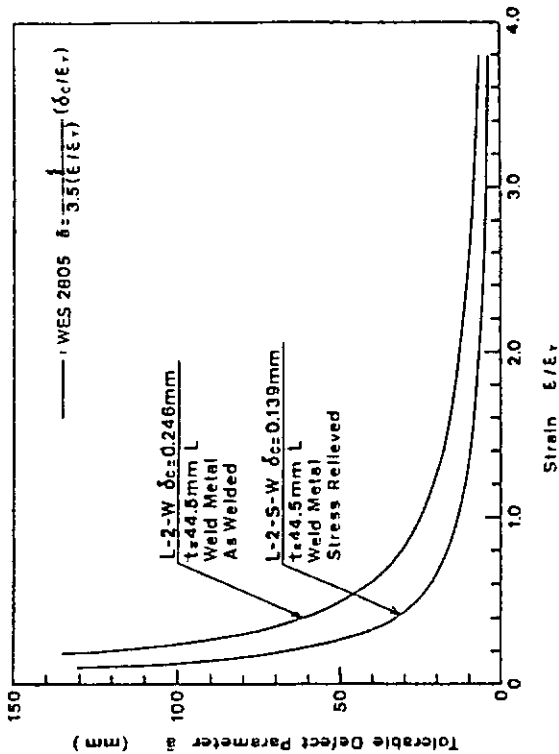


図 7.10.5 許容欠陥寸法パラメータと歪との関係：44.5mm厚材，溶接金属

表 7.10.4 許容欠陥寸法パラメータ

| 試 験 片 | COD (mm) |        | 許容欠陥寸法パラメータ $\bar{a}$ (mm) |        |
|-------|----------|--------|----------------------------|--------|
|       | 市役所      | 電力除去焼鈍 | 市役所                        | 電力除去焼鈍 |
| L-1-W | 0.840    | 0.286  | 2.64                       | 8.80   |
| L-1-H | 0.805    | 0.414  | 6.64                       | 6.52   |
| C-1-W | 0.282    | 0.877  | 2.48                       | 5.27   |
| C-1-H | 0.867    | 0.486  | 3.08                       | 7.01   |
| L-2-W | 0.246    | 0.189  | 1.85                       | 1.88   |
| L-2-H | 0.781    | 1.322  | 6.55                       | 20.89  |
| C-2-W | 0.428    | 0.246  | 3.85                       | 3.51   |
| C-2-H | 0.466    | 0.556  | 3.29                       | 8.24   |

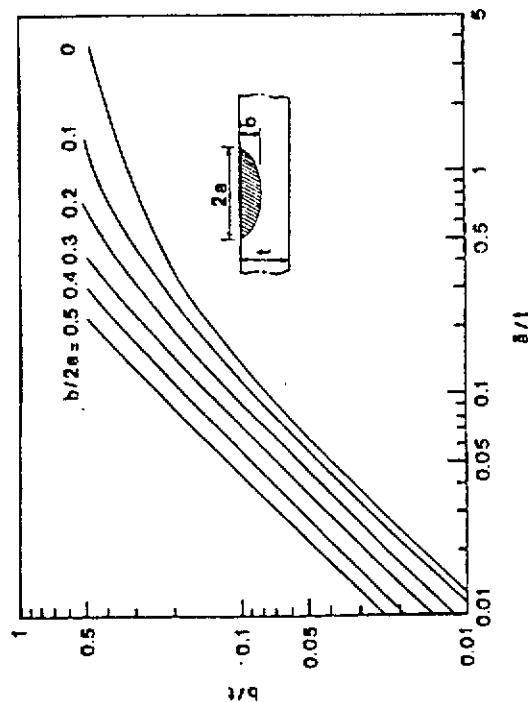


図 7.10.6 欠陥寸法と許容欠陥寸法パラメータとの関係：表面亀裂

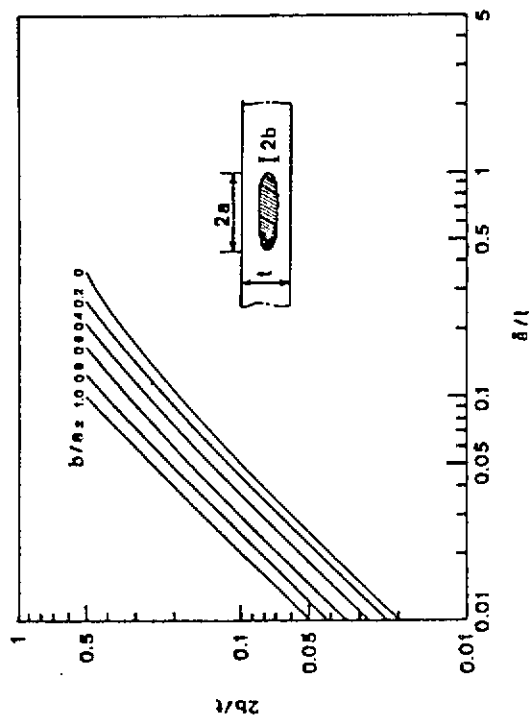


図 7.10.7 欠陥寸法と許容欠陥寸法パラメータとの関係：埋設欠陥

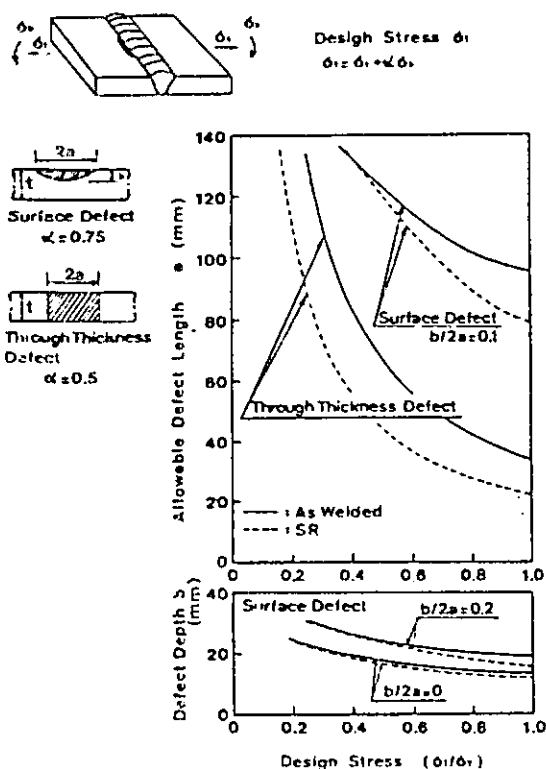


図 7.10.8 突き合せ継手についての設計曲線

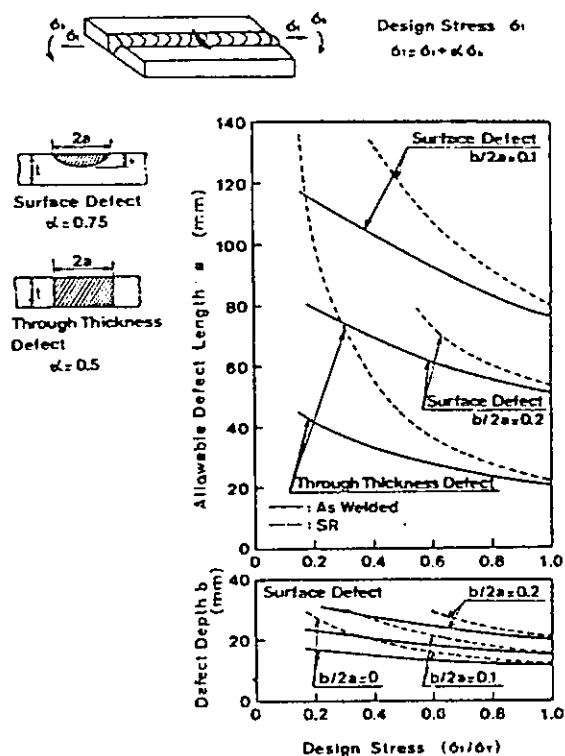


図 7.10.9 突合せ継手のための設計曲線：縦継手

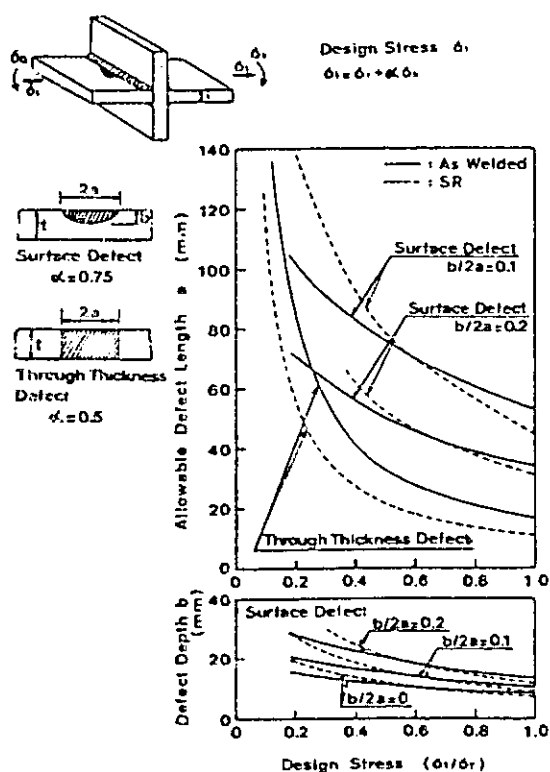


図 7.10.10 十字継手のための設計曲線

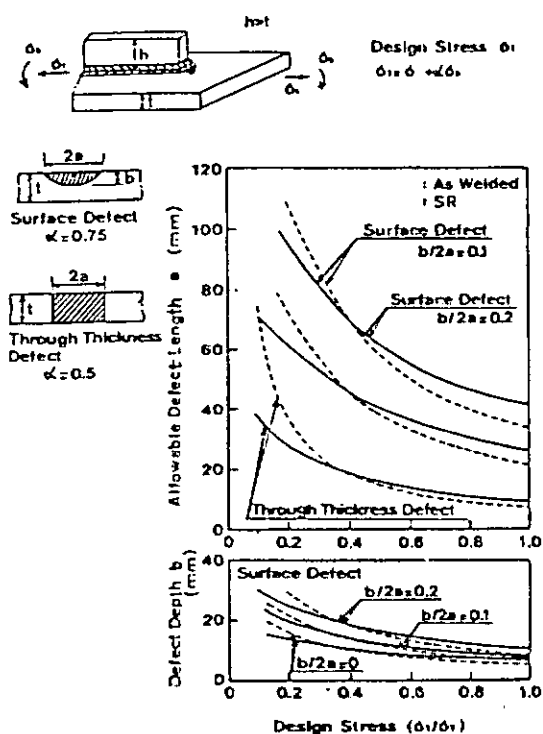


図 7.10.11 隅肉継手のための設計曲線

## 7.11 靱性を考慮した船殻材選定の考え方

### 7.11.1 目的

低温式液化ガス運搬船のタンク材料のように、各国船級協会規則などにおいて、使用基準が明記されているものもある。しかし、大量に使用されている一般船体用圧延鋼材が、どのくらい低温まで使用可能であるかに関しては、いまだ確立された考え方がないのが実状である。

一方、極地資源の開発に相まって、寒冷海域で使用する船舶や各種大形鋼構造物の需要が増加している。しかしながら、それらについては未経験からくる材質選定上の問題も少なくない。したがって、破壊防止の観点から、構造物の使用条件（特に温度と応力）と、使用できる材質との関係を明確にすることは重要課題であるといえよう。

本節では、一般船体用軟鋼板および降伏点  $32 \text{ kgf/mm}^2$  級の船体用 50 キロ級高張力鋼板を対象に、従来の船殻上甲板での使用実績を基礎に、K 概念ならびに COD 概念を適用して、靱性を考慮した材質選定の考え方を提案する。

板厚  $10 \text{ mm} \sim 50 \text{ mm}$  の国際船級協会統一規格鋼板を対象に、脆性破壊発生防止の観点から、鋼種、グレード、設計応力（使用応力）、使用温度（取りあえず  $0^\circ\text{C} \sim -50^\circ\text{C}$  とした）および適用溶接施工条件（取りあえず手溶接と多層盛サブマージアーク溶接）などをパラメータとした、使用できる最大板厚（使用限界板厚）の決め方を紹介する。換言すれば、ある鋼種（グレード）のある板厚材（溶接継手部も含めて）に対して、使用できる限界条件（温度、応力）を推定する方法を紹介する。

すなわち、各グレード材の V-ノッチシャルピー吸収エネルギーに対する国際船級協会統一規格値から推定した最低破壊靱性値と、船殻上甲板での実績を基礎とした設計条件から要求される要求破壊靱性値との比較により、靱性を考慮した材質選定の考え方を述べる。

## 7.11.2 材料選定の基本的な考え方

船殻に使用される船体用圧延鋼板は、国際船級協会(IACS)規則<sup>1)</sup>あるいは各国船級協会規則〔我国では日本海事協会(NK)規則<sup>2)</sup>〕により、靱性によってグレード分けされており、各グレード別に各設定温度におけるV-ノッチシャルピー吸収エネルギーが規定されている。しかも板厚50mmまでは、板厚にかかわらず同一の吸収エネルギーが要求されているのが実状である。しかしながら、板厚が脆性破壊発生特性値に大きな影響を及ぼすことは良く知られていることであり、ここで紹介する材質選定の考え方では、板厚を重要なパラメータと考えている。すなわち、

- (1) 船級協会規則による船殻材に対するV-ノッチシャルピー吸収エネルギーの規格値と、これまでに蓄積されている破壊靱性試験結果から、母材に対しては、鋼種、グレード、板厚および温度別に、また溶接継手部に対しては、鋼種、溶接法、グレード、板厚および温度別に、それぞれ最低破壊靱性値( $K_c$ ,  $\delta_c$ )を推定する。
- (2) 設計条件〔応力(設計応力と溶接残留応力)、最低使用温度、船殻上甲板での実績を基礎とした想定(許容)亀裂長さ〕より、船殻材に必要とされる破壊靱性値、すなわち要求破壊靱性値( $K_{c(r)}$ ,  $\delta_{c(r)}$ )を設定する。
- (3) 上記(1)の最低破壊靱性値( $K_c$ ,  $\delta_c$ )と、上記(2)の要求破壊靱性値( $K_{c(r)}$ ,  $\delta_{c(r)}$ )との比較により、船殻材の鋼種、溶接法、グレード、使用応力および使用温度別に、使用できる最大板厚、すなわち使用限界板厚を決定する。

などである(図7.11.1参照)<sup>3)</sup>

以下図7.11.1に示した流れ図に沿って紹介する。

## 7.11.3 K概念を適用した材質選定の考え方

### 7.11.3.1 船体用鋼板の最低破壊靱性値の推定

船体用鋼板(母材)の靱性値は、国際船級協会(IACS)規則あるいは各国船級協会規則により、各グレード別に各設定温度におけるV-ノッチシャルピー吸収

エネルギーによって規定されている。したがって、規格要求吸収エネルギーから推定される破壊靱性値は、その鋼板の有する最低破壊靱性値を示すことになると考えられる。

V-ノッチシャルピー衝撃試験結果での、或る温度 $[T(^{\circ}\text{C})]$ における吸収エネルギー $[vE_T (\text{kgf}\cdot\text{m})]$ と吸収エネルギー遷移温度 $[vT_{RE} (^{\circ}\text{C})]$ との関係が次式のように導かれている(図7.11.2 参照)<sup>4)</sup>

$$vE_T = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{T-vT_{RE}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{T-vT_{RE}}{20} \right)^2 \right\} dT \quad (\text{kgf}\cdot\text{m}) \quad \text{---- (7.11.1)}$$

したがって、図7.11.2に示したマスターカーブを使えば、任意の温度での吸収エネルギー $(vE_T)$ から $vT_{RE}$ が容易に推定できる。図7.11.3は、各グレードの船体用鋼板のV-ノッチシャルピー衝撃試験結果の吸収エネルギー～温度遷移曲線より求めた規格要求試験温度 $[T(^{\circ}\text{C})]$ での吸収エネルギー $[vE_T (\text{kgf}\cdot\text{m})]$ と、 $vT_{RE}$  ( $T-vT_{RE}$  で表示してある)との関係を示したものである。さらに図7.11.3には(7.11.1)式による $vE_T$ と $T-vT_{RE}$ との関係(マスターカーブ)も実線で示してある。図7.11.3から明らかなように、 $vE_T$ が約14~15 kgf·m以下では、 $T-vT_{RE}$ の実績値はマスターカーブより高温側の値となっており、マスターカーブによる $vE_T$ からの $vT_{RE}$ の推定が安全側の評価になっていることを示している。さらに、 $vT_{RE}$ と50%脆性破面遷移温度( $vT_{RS}$ )とはほぼ等しいことが確認されている<sup>5)</sup>

以上により、船体用鋼板(母材)の規格要求吸収エネルギーを満足する $vT_{RS}$ が推定できるわけである。

次に、溶接継手部についてであるが、溶接継手部の $vT_{RS}$ は、溶接入熱の影響により母材の $vT_{RS}$ より高温側に存在(靱性劣化)するのが常であり、特にボンド近傍の熱影響部が最も靱性劣化している場合が多い。すなわち、溶接継手ボンド部の $vT_{RS}$  ( $vT_{RS, \text{ボンド}}$ )は母材の $vT_{RS}$  ( $vT_{RS, \text{母材}}$ )より劣化量( $\Delta vT_{RS}$ )だけ高温側の値となる。すなわち、

$$vT_{RS, \text{ボンド}} = vT_{RS, \text{母材}} + \Delta vT_{RS} \quad (^{\circ}\text{C}) \quad \text{----- (7.11.2)}$$

で表示される。なお、 $\Delta vT_{RS}$ は実験結果の実績値によって定めることにする。

$\Delta vTrs$ と溶接入熱との関係の例を図7.11.4に示す。

さて、次に以上により推定した $vTrs$ から、脆性破壊発生特性値である破壊靱性値( $Kc$ )を推定する。

まず、 $vTrs$ と、機械切削ノッチからの脆性破壊発生試験(ディープノッチ試験)結果の応力場  $\frac{1}{2}\sigma_y$  ( $\sigma_y$ :公称降伏点)における許容亀裂長さ( $2a$ )80mmに対する破壊発生限界温度( $\sigma=\frac{1}{2}\sigma_y$ ,  $[Ti]_{a=40}$ , 以後  $iTk$  と表示する)との関係が、母材および溶接継手ボンド部に対してそれぞれ次のように求められている<sup>5),6)</sup>

母材の場合

$$iT_k = (0.00321\sigma_y + 0.391)vTrs, \text{母材} + 2.74\sqrt{t} - 5.44 \quad (^\circ K) \quad (7.11.3)$$

ボンド部の場合

$$iT_k = (0.00321\sigma_y + 0.391)vTrs, \text{ボンド} + 2.74\sqrt{t} + 4.96 \quad (^\circ K)$$

ただし、 $t$ :板厚(mm)

また、 $iTk$  ( $^\circ K$ )における破壊靱性値( $Kc$  at  $iTk$ )は次式によって求められる。

$$Kc \text{ at } iT_k = \frac{1}{2}\sigma_y \sqrt{40\pi} \quad (kgf\sqrt{mm}/mm^2) \quad (7.11.4)$$

一般に、破壊靱性値( $Kc$ )と温度との関係は次式のように表わされる。

$$Kc = K_0 \exp(-k_0/T_k) \quad (kgf\sqrt{mm}/mm^2) \quad (7.11.5)$$

ただし、 $T_k$ :温度( $^\circ K$ )

$K_0, k_0$ :材料定数

材料定数  $k_0$  は、一般船体用軟鋼板および降伏点  $32 kgf/mm^2$  級の船体用50キロ級高張力鋼板を対象とした場合、平均的な値として、

$$k_0 = 562 \quad (^\circ K) \quad (7.11.6)$$

となる<sup>3)</sup>

さらに、材料定数  $K_0$  は、 $iTk$  を用い、(7.11.4)式~(7.11.6)式より次のように求められる。

$$K_0 = Kc / \exp(-k_0/T_k) = 5.60\sigma_y / \exp(-562/iTk) \quad (kgf\sqrt{mm}/mm^2) \quad (7.11.7)$$

したがって、機械切削ノッチ(machined notch)に対する  $Kc$  値と温度との関係は、 $iTk$  を用い、(7.11.5)式~(7.11.7)式から次式によって求められる。

$$K_c = 5.60 \sigma_{y0} \exp(-562/T_k) / \exp(-562/1T_k)$$

$$= 5.60 \sigma_{y0} \exp \left\{ 562 \left( \frac{1}{1T_k} - \frac{1}{T_k} \right) \right\} \quad (\text{kgf}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2) \text{ --- (7.11.8)}$$

さらに(7.11.8)式は、疲労亀裂 (fatigue cracked notch) からの脆性破壊発生特性に関しては次のように修正しなければならない。<sup>6), 7)</sup>

$$K_c = F \cdot 5.60 \sigma_{y0} \exp \left\{ 562 \left( \frac{1}{1T_k} - \frac{1}{T_k} \right) \right\} \quad (\text{kgf}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2) \text{ ----- (7.11.9)}$$

$$F = \frac{K_{c \text{ fatigue cracked notch}}}{K_{c \text{ machined notch}}} = 0.68 \text{ ----- (7.11.10)}$$

以上により、船体用鋼板母材および溶接継手部(ボンド部)の最低破壊靱性値 ( $K_c$ ) を、母材の規格要求吸収エネルギーから、(7.11.1)式~(7.11.3)式および(7.11.9)式、(7.11.10)式によって推定することができる。

図7.11.5は、板厚 30mm の 50キロ級高張力鋼 D32鋼板 11チャージについて行なった、V-ノッチシャルピー衝撃試験結果と、機械切削ノッチ付きディープノッチ試験結果である。図中には(7.11.1)式で求めたマスターカーブならびに、(7.11.3)式、(7.11.8)式で求めた  $K_c$  値と温度との関係式が示してある。図より上述の方法による最低破壊靱性値の推定が妥当であることがわかる。

さらに図7.11.6は、板厚 25.4mm の 50キロ級高張力鋼 D32鋼板の手溶接継手ボンド部および多層盛サブマージーク溶接継手ボンド部の、機械切削ノッチ付き(中央切欠き型)ディープノッチ試験結果である。図中には母材の V-ノッチシャルピー衝撃試験結果の  $vTrs$  から、図7.11.4および(7.11.3)式、(7.11.8)式などにより求めた  $K_c$  値と温度との関係式が示してある。図より上述の方法による溶接継手ボンド部の破壊靱性値の推定が妥当であることがわかる。

以上の考え方に従い、船体用鋼板の最低破壊靱性値を求めてみよう。国際船級協会 (IACS) 規格材を検討の対象とする。また、溶接継手部としては、手溶接継手ボンド部および多層盛サブマージーク溶接継手ボンド部を検討の対象とする。

表7.11.1に、IACSによる規格要求吸収エネルギーおよび(7.11.1)式(マスターカーブ)による母材の $vTrE$  ( $\div vTrs$ )推定値および(7.11.2)式によるボンド部の $vTrs$ 推定値を示す。また、表7.11.1中の $\Delta vTrs$ は、先に図7.11.4に示したV-ノッチシャルピー衝撃試験結果より当該入熱量に対応した値として求めたものである。この $vTrs$ より、(7.11.3)式、(7.11.9)式および(7.11.10)式を用いて、船体用鋼板の母材および溶接継手ボンド部の最低破壊靱性値( $Kc$ )を推定する。表7.11.2~表7.11.4に、鋼種、溶接法およびグレード別に、板厚10mm~50mm、使用温度0℃~-50℃に対する、推定した $Kc$ 値の例を示す。

### 7.11.3.2 船体用鋼板に要求すべき破壊靱性値

設計条件に対応して船体用鋼板に最小限必要とみなされる破壊靱性値(要求破壊靱性値, $Kc(r)$ )は、設計応力、溶接残留応力および想定(許容)亀裂長さを考慮して次式で表わされる。

$$Kc(r) = (\sigma_D + \sigma_R) \sqrt{\pi a} \quad (\text{kgf}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2) \quad \text{-----} (7.11.11)$$

ただし、 $\sigma_D$  : 設計応力 ( $\text{kgf}/\text{mm}^2$ )

$\sigma_R$  : 溶接残留応力 ( $\text{kgf}/\text{mm}^2$ )

$a$  : 想定(許容)亀裂長さの $1/2$  (mm)

設計応力( $\sigma_D$ )は、汎用性を考慮し公称降伏点( $\sigma_{y0}$ )を基準に次式で表わす。

$$\sigma_D = \alpha \sigma_{y0} \quad \text{-----} (7.11.12)$$

ただし、 $\alpha$  : 設計応力係数

亀裂に作用する溶接残留応力は、溶接継手部と亀裂先端位置との関係によって変化する。ここでは、溶接継手と亀裂位置との関係を図7.11.7に示すように設定した。

図7.11.7に示したような想定において、破壊発生に寄与する溶接残留応力( $\sigma_R$ )の大きさは、軟鋼および50キロ級高張力鋼を対象とした場合、次のような値となる<sup>3),4)</sup>。

$$\left. \begin{array}{l} \text{母材の場合} \quad : \sigma_R = 0.6 \sigma_{y0} \\ \text{溶接継手ボンド部の場合} : \sigma_R = 0.3 \sigma_{y0} \end{array} \right\} \text{----- (7.11.13)}$$

なお、(7.11.13)式における定数を、以後溶接残留応力の破壊発生への有効係数として“ $\beta$ ”で表示する。

さて、次に想定(許容)亀裂長さの設定であるが、これは構造物としての機能を果す上で許容できるか否かの論議に基づいた許容亀裂長さではなく、鋼板の材質を判定するために想定する欠陥パラメータである。したがって、以下に述べる想定(許容)亀裂長さ(2a)は、上述の諸式をもとに、安全使用実績のある基準<sup>2),8),9)</sup>(NK規則による上甲板の鋼材使用区分と許容応力値)より推定し設定したものである。

すなわち、

• 軟鋼

$$\left. \begin{array}{ll} \text{母材} & : 2a = 240 \text{ mm} \\ \text{手溶接継手ボンド部 (H.I. = 20 kJ/cm)} & : 2a = 140 \text{ mm} \\ \text{サブマージーク溶接継手ボンド部 (H.I. = 50 kJ/cm)} & : 2a = 100 \text{ mm} \end{array} \right\} \text{----- (7.11.14)}$$

• 降伏点 32 kgf/mm<sup>2</sup> 級 50 キロ級高張力鋼

$$\left. \begin{array}{ll} \text{母材} & : 2a = 240 \text{ mm} \\ \text{手溶接継手ボンド部 (H.I. = 20 kJ/cm)} & : 2a = 120 \text{ mm} \\ \text{サブマージーク溶接継手ボンド部 (H.I. = 50 kJ/cm)} & : 2a = 70 \text{ mm} \end{array} \right\}$$

と設定した。

そこで、設計条件に対応して船体用鋼板に要求すべき破壊靱性値( $K_{c(r)}$ )は、以上述べてきた(7.11.11)式～(7.11.14)式により次のように求められる。

$$K_{c(r)} = (\alpha + \beta) \sigma_{y0} \sqrt{\pi a} \quad (\text{kgf}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2) \text{----- (7.11.15)}$$

ここで、公称降伏点を軟鋼の場合“24 kgf/mm<sup>2</sup>”，50 キロ級高張力鋼の場合“32 kgf/mm<sup>2</sup>”とし、 $\alpha$ を“0.8”，“0.4”，および“0.2”とした場合の要求破壊靱性値を表7.11.5に示す。

### 7.11.3.3 船体用鋼板の使用できる限界

先に推定した船体用鋼板の最低破壊靱性値 ( $K_c$ , 表7.11.2~表7.11.4)と、上述の設計条件に対応して船体用鋼板に要求すべき破壊靱性値 ( $K_{c(r)}$ , 表7.11.5)との比較により、船体用鋼板の使用できる限界板厚が決定できる。すなわち、母材、溶接継手ボンド部に対して、鋼種、グレード、設計応力(使用応力)および使用温度別に、

$$K_{c(r)} \leq K_c \text{ ----- (7.11.16)}$$

を満足する最大板厚を求める。

しかしながら、(7.11.16)式で得られる最大板厚は、鋼種、グレード、設計応力および使用温度が同一条件内であっても、想定する欠陥位置(母材、溶接継手ボンド部)、溶接法(手溶接、サブマージアーク溶接)によって異なる。したがって、使用できる限界板厚は、鋼種、グレード、設計応力(使用応力)および使用温度の同一条件内で、溶接法および想定電裂位置にかかわらず最も厳しい条件(使用板厚が最も薄くなる条件)を選択する。

表7.11.6に、上述の条件を考慮して決定した船体用鋼板〔母材、溶接継手ボンド部(入熱量  $\leq 50 \text{ kJ/cm}$ )〕の使用できる限界板厚を示す。ただし、表7.11.6には、設計応力(使用応力)を“ $0.8\sigma_{y0}$ ”、“ $0.4\sigma_{y0}$ ”および“ $0.2\sigma_{y0}$ ”の3条件に限定した場合についてのみ示してある。

## 7.11.4 COD概念を適用した材質選定の考え方

### 7.11.4.1 船体用鋼板の最低破壊靱性値の推定

先にK概念を用いた船体用鋼板の最低破壊靱性値推定法を述べたが、COD概念を用いた場合も基本的な考え方は同様である。すなわち、船体用鋼板の規格要求吸収エネルギーから最低破壊靱性値(最低限界COD値)を推定する。

規格要求吸収エネルギーからの母材および溶接継手部の  $vTr_E (\equiv vTr_s)$  推定には、先に示した(7.11.1)式(マスターカーブ)および(7.11.2)式を用いる。

次に、 $vTr_s$  と無限板単一電裂一様引張応力場  $\frac{1}{2}\sigma_{y0}$  における許容電裂

長さ(2a)80mmに対する機械切削ノッチからの破壊発生限界温度( $\sigma = \frac{1}{2}\sigma_y [T_s]_{a=40}$ , 以後 ${}_1T_s$ と表示する)との関係が, 母材および溶接継手ボンド部に対して次のように求められている<sup>5)</sup>

$${}_1T_s = (0.00534 \sigma_y + 0.4138) \sqrt{Trs} + 9.07 \sqrt{E} - 71.1 \quad (^\circ K) \quad (7.11.17)$$

ただし, 母材 :  $\sqrt{Trs} = \sqrt{Trs}_{母材}$

溶接継手ボンド部 :  $\sqrt{Trs} = \sqrt{Trs}_{ボンド} = \sqrt{Trs}_{母材} + \Delta \sqrt{Trs}$

また,  ${}_1T_s$  (°K) における限界COD ( $\delta_c$  at  ${}_1T_s$ ) 値は, 次式によって求められる。

$$\delta_c \text{ at } {}_1T_s = \delta_c^* = \frac{320 \sigma_y^*}{\pi E} \ln \left\{ \sec \left( \frac{\pi \sigma_{y0}}{4 \sigma_y^*} \right) \right\} \quad (mm) \quad (7.11.18)$$

ただし,  $\sigma_y^*$  :  ${}_1T_s$  (°K) における降伏点 (kgf/mm<sup>2</sup>)

E : ヤング率 (kgf/mm<sup>2</sup>)

限界COD値 ( $\delta_c$ ) と温度との関係は次式のように表わされる<sup>5)</sup>。

$$\delta_c = m \frac{8 \sigma_y}{\pi E} \left( \frac{T_k}{100} \right)^n \quad (mm) \quad (7.11.19)$$

ただし,  $\sigma_y$  :  $T_k$  (°K) における降伏点 (kgf/mm<sup>2</sup>)

m, n : 材料定数

材料定数 n は, 一般船体用軟鋼板および降伏点 32 kgf/mm<sup>2</sup> 級の船体用 50キロ級高張力鋼板を対象とした場合,

$$n = 5 \quad (7.11.20)$$

となる<sup>3)</sup>

さらに材料定数 m は,  ${}_1T_s$  を用い (7.11.18) 式 ~ (7.11.20) 式より次のように求められる。

$$m = \frac{\delta_c \pi E}{8 \sigma_y} \left/ \left( \frac{T_k}{100} \right)^n \right. = 40 \ln \left\{ \sec \left( \frac{\pi \sigma_{y0}}{4 \sigma_y^*} \right) \right\} \left/ \left( \frac{{}_1T_s}{100} \right)^5 \right. \quad (7.11.21)$$

したがって, 機械切削ノッチ (machined notch) に対する  $\delta_c$  値と温度の関係は,  ${}_1T_s$  を用い (7.11.19) 式 ~ (7.11.21) 式によって求められる。

$$\begin{aligned} \delta_c &= 40 \ln \left\{ \sec \left( \frac{\pi \sigma_{y0}}{4 \sigma_y^*} \right) \right\} \cdot \frac{8 \sigma_y}{\pi E} \left( \frac{T_k}{100} \right)^5 \left/ \left( \frac{{}_1T_s}{100} \right)^5 \right. \\ &= \frac{320 \sigma_y}{\pi E} \ln \left\{ \sec \left( \frac{\pi \sigma_{y0}}{4 \sigma_y^*} \right) \right\} \left( \frac{T_k}{{}_1T_s} \right)^5 \quad (mm) \quad (7.11.22) \end{aligned}$$

ここで、任意の温度  $[T_k (^{\circ}K)]$  における  $\sigma_y$  ( $\sigma_{yT}$ ) は、 $\sigma_{y0}$  (公称降伏点) と次式によって推定される<sup>5)</sup>。

$$\sigma_{yT} = \sigma_{y0} \cdot \exp \left\{ (329.6 - 66.5 \ln \sigma_{y0}) \left( \frac{1}{T_k} - \frac{1}{293} \right) \right\} \quad (\text{kgf/mm}^2) \text{---(7.11.23)}$$

さらに(7.11.22)式は、疲労電裂 (fatigue cracked notch) からの脆性破壊発生特性に関しては次のように修正しなければならない<sup>10)</sup>。

$$\delta_c = F \cdot \frac{320\sigma_y}{\pi E} \ln \left\{ \sec \left( \frac{\pi \sigma_{y0}}{4\sigma_y^*} \right) \right\} \left( \frac{T_k}{1T8} \right)^5 \quad (\text{mm}) \text{-----(7.11.24)}$$

$$F = \frac{\delta_{c \text{ fatigue cracked notch}}}{\delta_{c \text{ machined notch}}} = 0.34 \text{----- (7.11.25)}$$

以上により、船体用鋼板母材および溶接継手ボンド部の限界COD値 ( $\delta_c$ ) は、母材の規格要求吸収エネルギーより、(7.11.1)式、(7.11.2)式、(7.11.17)式および(7.11.23)式～(7.11.25)式によって推定することができる。

図7.11.8は、板厚25.4mmの軟鋼A鋼板3チャージ、板厚35mmの軟鋼D鋼板2チャージ、および板厚25.4mmの50キロ級高張力鋼D32鋼板3チャージについて行なった、V-ノッチシャルピー衝撃試験結果と、機械切削ノッチ付きCOD曲げ試験結果である。図中には、V-ノッチシャルピー衝撃試験結果のほぼ最低値に対応する遷移曲線と、その  $v_{TrE}$  ( $\div v_{Trs}$ ) 値から(7.11.17)式、(7.11.19)式、(7.11.20)式、(7.11.21)式、(7.11.23)式などで求めた  $\delta_c$  値と温度との関係式が示してある。図より上述の方法による限界COD値の推定が妥当であることがわかる。

さらに図7.11.9には、板厚20mmの軟鋼A鋼板と軟鋼E鋼板についての疲労電裂切欠き付き曲げCOD試験結果<sup>7)</sup>と、それと同一チャージ材で行なわれたV-ノッチシャルピー衝撃試験結果の  $v_{Trs}$  から、(7.11.17)式、(7.11.20)式、(7.11.23)式、(7.11.24)式および(7.11.25)式などにより求めた  $\delta_c$  値と温度との関係式が示してある。図より上述の方法による限界COD値の推定が妥当であることがわかる。

以上の結果をもとに、船体用鋼板の限界COD値を決定する。

船体用鋼板母材および溶接継手ボンド部の限界COD値の推定に当っては、

その条件を、先に述べた K 概念を用いた場合と合わせることにした。すなわち、表 7.11.1 の条件より、(7.11.17) 式および (7.11.23) 式～(7.11.25) 式を用い、限界 COD 値を求めた。表 7.11.7～表 7.11.9 に、鋼種、溶接法およびグレード別に、板厚 10mm～50mm、使用温度 0℃～-50℃ に対する、推定した限界 COD 値の例を示す。

#### 7.11.4.2 船体用鋼板に要求すべき破壊靱性値

設計条件に対応して船体用鋼板に最小限必要とみなされる破壊靱性値 (要求 COD 値,  $\delta_{c(r)}$ ) は、先に述べたと同様に、設計応力、溶接残留応力および想定(許容)亀裂長さを考慮し、次式で表わされる<sup>4)</sup>。

$$\delta_{c(r)} = 3.5a (\sigma_D + \sigma_R) / E \quad (\text{mm}) \quad \text{-----} (7.11.26)$$

ただし、 $\sigma_D$  : 設計応力 ( $\text{kgf}/\text{mm}^2$ )

$\sigma_R$  : 溶接残留応力 ( $\text{kgf}/\text{mm}^2$ )

$a$  : 想定(許容)亀裂長さの  $1/2$  (mm)

$E$  : ヤング率 ( $\text{kgf}/\text{mm}^2$ )

亀裂に作用する応力( $\sigma$ )としては、設計応力( $\sigma_D$ )と溶接残留応力( $\sigma_R$ )が考えられる。すなわち、

$$\sigma = \sigma_D + \sigma_R \quad (\text{kgf}/\text{mm}^2) \quad \text{-----} (7.11.27)$$

である。

また、(7.11.27) 式は、次のように表わせる。

$$\sigma = (\alpha + \beta) \sigma_y \quad (\text{kgf}/\text{mm}^2) \quad \text{-----} (7.11.28)$$

ただし、 $\alpha$  : 設計応力係数 ( $\sigma_D / \sigma_y$ )

$\beta$  : 破壊発生に対する溶接残留応力の有効係数

母材の場合 : 0.6

溶接継手ボンド部の場合 : 0.3

さて、許容亀裂長さとしては、先に述べたような理由により、上述の諸式をもとに安全使用実績のある基準<sup>2), 8), 9)</sup> (NK 規則による上甲板の鋼材使用区分と許容

応力値)より推定し,設定した。すなわち,

• 軟鋼

母材 :  $2a = 60 \text{ mm}$

手溶接継手ボンド部 (H.I. =  $20 \text{ KJ/cm}$ ) :  $2a = 60 \text{ mm}$

サブマージアーク溶接継手ボンド部 (H.I. =  $50 \text{ KJ/cm}$ ) :  $2a = 50 \text{ mm}$

• 降伏点  $32 \text{ kgf/mm}^2$  級 50 級高張力鋼

母材 :  $2a = 60 \text{ mm}$

手溶接継手ボンド部 (H.I. =  $20 \text{ KJ/cm}$ ) :  $2a = 50 \text{ mm}$

サブマージアーク溶接継手ボンド部 (H.I. =  $50 \text{ KJ/cm}$ ) :  $2a = 40 \text{ mm}$

--(7.11.29)

と設定した。

そこで, 設計条件に対応して船体用鋼板に要求すべき破壊靱性値 (要求 COD 値,  $\delta_{c(r)}$ ) は, 以上述べてきた (7.11.26) 式 ~ (7.11.29) 式より次のように求められる。

$$\delta_{c(r)} = 3.5a (\alpha + \beta) \sigma_y / E \quad (\text{mm}) \quad \text{-----} (7.11.30)$$

表 7.11.10 に,  $\alpha$  を "0.8", "0.4" および "0.2" とした場合の要求 COD 値を示す。

#### 7.11.4.3 船体用鋼板の使用できる限界

先に推定した船体用鋼板の最低限界 COD 値 ( $\delta_c$ , 表 7.11.7 ~ 表 7.11.9) と, 上述の設計条件に対応して船体用鋼板に要求すべき COD 値 ( $\delta_{c(r)}$ , 表 7.11.10) との比較により, 船体用鋼板の使用できる限界板厚が決定できる。すなわち, 母材, 溶接継手ボンド部に対して, 鋼種, グレード, 設計応力 (使用応力) および使用温度別に,

$$\delta_{c(r)} \leq \delta_c \quad \text{-----} (7.11.31)$$

を満足する最大板厚を求める。

なお, 使用できる限界板厚は, 鋼種, グレード, 設計応力 (使用応力) および使用温度の同一条件内で, 溶接法および想定電裂位置にかかわらず最も厳しい条件 (使用板厚が最も薄くなる条件) を選択する。

表 7.11.11 に, 上述の条件を考慮して決定した船体用鋼板 [母材および溶接継手

ボンド部（入熱量  $\leq 50 \text{ kJ/cm}$ ）の使用できる限界板厚を示す。ただし、表7.11.11には、設計応力（使用応力）を“ $0.8\sigma_y$ ”、“ $0.4\sigma_y$ ” および “ $0.2\sigma_y$ ” の3条件に限定した場合についてのみ示してある。先に表7.11.6に示したK概念を適用した場合の使用できる限界板厚と比較すると、設計応力（使用応力）が高い場合はCOD概念を適用した場合の方がより厚板の使用が可能になっており、設計応力（使用応力）が低い場合は逆の結果となっている。

### 7.11.5 まとめ

一般船体用軟鋼板および降伏点  $32 \text{ kgf/mm}^2$  級の船体用50キロ級高張力鋼板を対象に、K概念ならびにCOD概念を適用した材質選定の考え方を紹介した。すなわち、従来の船殻上甲板での使用実績を基礎に、脆性破壊発生防止の観点から、鋼種、グレード、設計応力（使用応力）、使用温度および適用溶接施工条件などをパラメータとして、船体用鋼板の使用できる最大板厚（使用限界板厚）の設定を試みた。換言すれば、ある鋼種（グレード）のある板厚材（溶接継手部も含めて）に対して、使用可能な温度および応力の範囲を推定する方法を紹介した。

現時点では、K概念を適用した検討結果（表7.11.6）とCOD概念を適用した検討結果（表7.11.11）を、完全に一致させることは困難である。また、実際の設計時点での材質選定には、温度・応力の設計上の定義や、材料・工作法の改良・進歩などを総合的に考察することが必要である。しかしながら、以上紹介してきた考え方が、実際に材質選定作業に直面した場合の一助となれば幸いである。

## 参考文献

- 1) "IACS Requirements for Normal and High Strength Hull Structural Steel", IACS Working Party on Materials and Welding (1979.2)
- 2) 日本海事協会, "鋼船規則集", 昭和54年
- 3) 矢島 浩, 多田益男, "じん性を考慮した船殻材の選定" 三菱重工技報 Vol.17 No5, 昭和55年9月
- 4) 日本溶接協会鉄鋼部会技術委員会JI委員会, "WES 3003 (旧 WES 136) G種改訂案について", 昭和52年2月
- 5) 日本溶接協会鉄鋼部会技術委員会BE委員会, "溶接構造用鋼板のボンド脆化に関する研究", 昭和50年7月
- 6) 第3基準研究部会, "危険物の特性および運搬船の特殊設備に関する調査研究報告書", 日本造船研究協会研究資料No. 78R, 昭和54年3月
- 7) 第3基準研究部会, "危険物の特性および運搬船の特殊設備に関する調査研究報告書(別冊)——危険物専用船の船体構造材の研究——", 日本造船研究協会研究資料No. 59R, 昭和52年3月
- 8) 日本海事協会, "昭和47年版鋼船規則改正およびその技術規則の解説", 昭和47年
- 9) 日本海事協会, "鋼船規則集検査要領", 昭和54年
- 10) 豊貞雅宏, "曲げCOD試験片におけるNotch Acuity効果の定量化に関する一提案", 日本造船学会論文集 第143号, 昭和53年6月

船体協会による鋼材規格値  
 $v_{ET}$ : 試験温度 (°C) における吸収エネルギー値  
 $v_{TR}$ : 吸収エネルギー-遷移温度  
 $v_{TS}$ : 50%脆性破壊遷移温度

| 鋼種                                                         | グレード | T (°C) | $v_{ET}$<br>(kgf・m)<br>T方向 |
|------------------------------------------------------------|------|--------|----------------------------|
| 軟鋼                                                         | A    | —      | —                          |
|                                                            | B    | 0      | ≥ 2.8                      |
|                                                            | D    | -10    | ≥ 2.0                      |
|                                                            | E    | -40    | —                          |
| 降伏強度 275kgf/mm <sup>2</sup><br>引張強度 490kgf/mm <sup>2</sup> | A32  | 0      | ≥ 3.2                      |
|                                                            | D32  | -20    | ≥ 2.2                      |
|                                                            | E32  | -40    | —                          |

$v_{ET}$  より  $v_{TR}$  (母材) を推定する。  
 (吸収エネルギー-遷移温度曲線のマスターカーブ使用)  
 $v_{TR}$ : 吸収エネルギー-遷移温度  
 $v_{TS}$ : 50%脆性破壊遷移温度

母材の推定  $v_{TR}$  より溶接継手ボルト部の  $v_{TR}$  を推定する。  
 $v_{TR} \text{ ボルト} = v_{TR} \text{ 母材} + \Delta v_{TR}$   
 $\Delta v_{TR} = v_{TR} \text{ ボルト試験} - v_{TR} \text{ 母材試験}$   
 (実験結果より推定)

K-concept

$v_{TR}$  より  $\sigma_{TS} (T)_{a=40} = \tau T_K$  を推定する。  
 (機械切削/ナタ付き面) COD試験結果および DBモデルによる検討と  $v_{TR}$  との相関関係から求める)  
 $\sigma_{TS} (T)_{a=40} = \tau T_K$ : 長さ (20) 80mm の亀裂を有する無限板に  
 一様応力  $\sigma_{TS}$  ( $\sigma_{TS}$ : 公称降伏点) が作用  
 する場合の脆性破壊発生限界温度  
 ( $\sigma_{TS}$ ,  $v_{TR}$ , t (板厚) の関数として表示される)

$\tau T_K$  より  $K_C \sim T_K$  の関係式を推定する。  
 $K_C = K_0 \exp(-k_0/T_K)$   
 $K_C$ : 破壊靱性値 (kgf/mm<sup>2</sup>)  
 (ただし、疲労亀裂からの脆性破壊発生に対する破壊靱性に修正する)  
 $T_K$ : 温度 (°K)  
 $K_0, k_0$ : 材料定数

鋼種、溶接法、グレード、板厚、温度別に  $K_C$  を求める

COD-concept

$v_{TR}$  より  $\sigma_{TS} (T)_{a=40} = \tau T_K$  を推定する。  
 (機械切削/ナタ付き面) COD試験結果および DBモデルによる検討と  $v_{TR}$  との相関関係から求める)  
 $\sigma_{TS} (T)_{a=40} = \tau T_K$ : 長さ (20) 80mm の亀裂を有する無限板に  
 一様応力  $\sigma_{TS}$  ( $\sigma_{TS}$ : 公称降伏点) が作用  
 する場合の脆性破壊発生限界温度  
 ( $\sigma_{TS}$ ,  $v_{TR}$ , t (板厚) の関数として表示される)

$\tau T_K$  より  $\delta_c \sim T_K$  の関係を推定する  
 $\delta_c = m \frac{80\sqrt{T_K}}{\pi E}$   
 $\delta_c$ : 限界 COD 値 (mm)  
 (ただし、疲労亀裂からの脆性破壊発生に対する限界 COD 値に修正する)  
 $T_K$ : 温度 (°K)  $\sigma_{TS} (T_K)$  における降伏点 (kgf/mm<sup>2</sup>)  
 $E$ : ヤング率 (kgf/mm<sup>2</sup>),  $m, n$ : 材料定数

鋼種、溶接法、グレード、板厚、温度別に  $\delta_c$  を求める

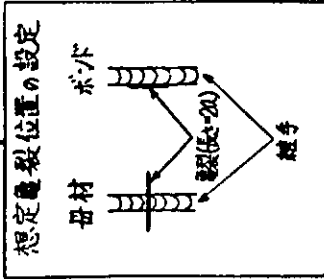
最低  $K_C$  値と  $K_{CM}$  値の比較  
 $K_C \geq K_{CM}$  であるならば使用可能

最低  $\delta_c$  値と  $\delta_{CM}$  値の比較  
 $\delta_c \geq \delta_{CM}$  であるならば使用可能

使用限界板厚の決定  
 鋼種、溶接法、グレード、設計(使用)応力、設計(使用)温度別に使用する限界(最大)板厚を求める

設計条件の設定  
 $\sigma_s = \alpha \sigma_{ys}$   
 $\sigma_s$ : 設計応力  
 $\sigma_{ys}$ : 公称降伏点

想定(許容)亀裂



想定亀裂長さ (20) の設定

想定亀裂に作用する残留応力 ( $\sigma_R$ ) の設定  
 $\sigma_R = \beta \sigma_{ys}$   
 ただし、 $\beta = 0.6$  (母材)  
 $\beta = 0.3$  (ボルト)

想定亀裂に作用する応力 ( $\sigma$ )  
 $\sigma = \sigma_s + \sigma_R$   
 $= (\alpha + \beta) \sigma_{ys}$

K-concept

要求破壊靱性値 ( $K_{CM}$ ) の決定  
 $K_{CM} = \sigma \sqrt{\pi a}$   
 $= (\alpha + \beta) \sigma_{ys} \sqrt{\pi a}$

COD-concept

要求破壊靱性値 ( $\delta_{CM}$ ) の決定  
 $\delta_{CM} = 3.5 \sigma \sqrt{a}$   
 $= 3.5 (\alpha + \beta) \sigma_{ys} \sqrt{a}$

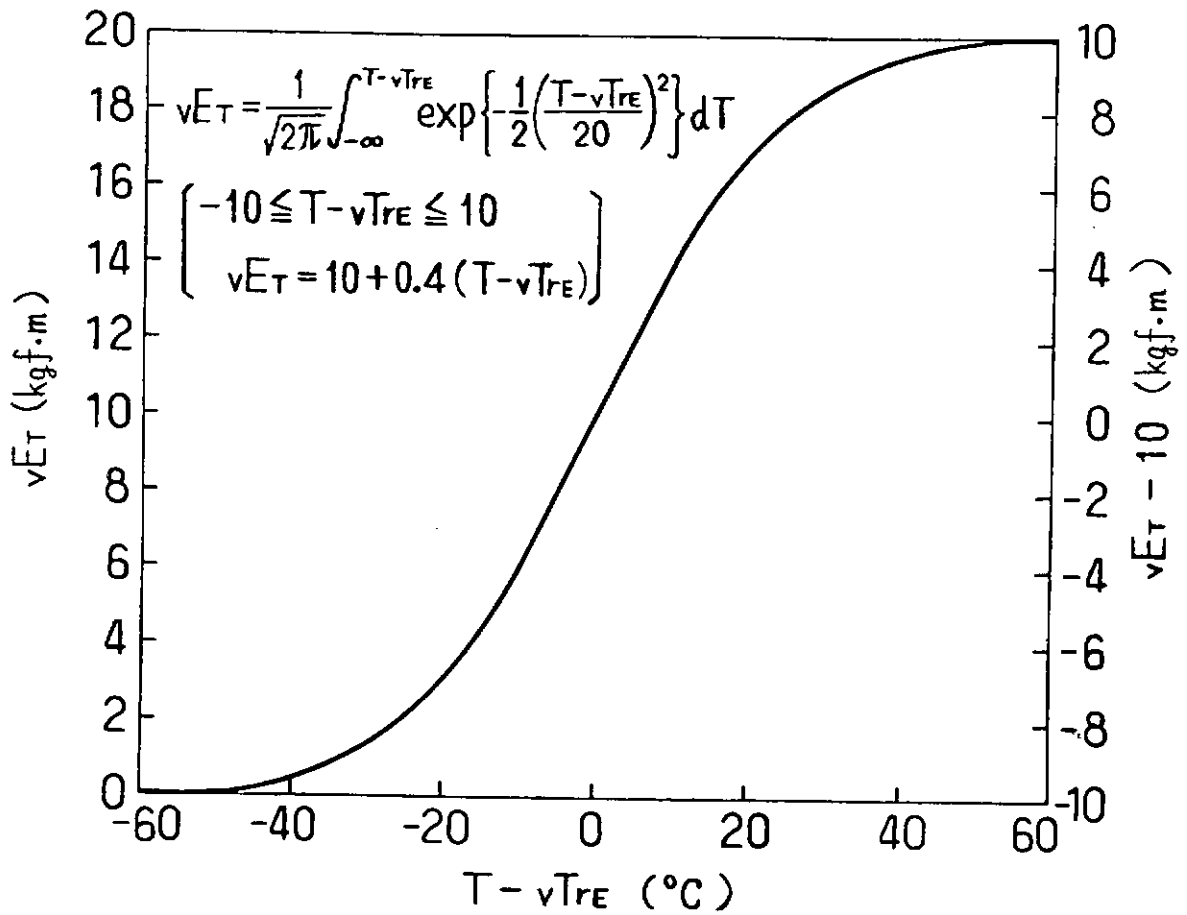
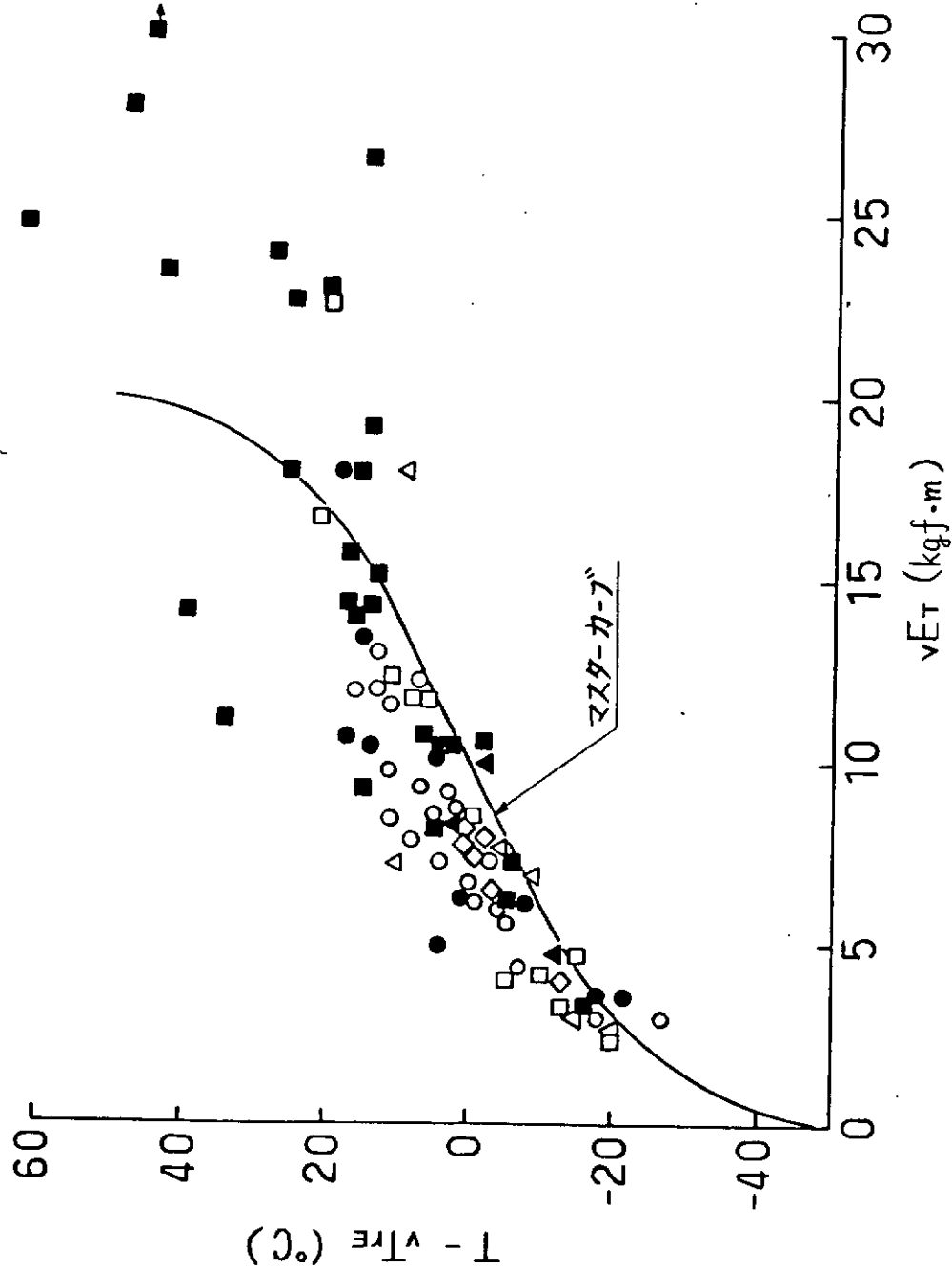


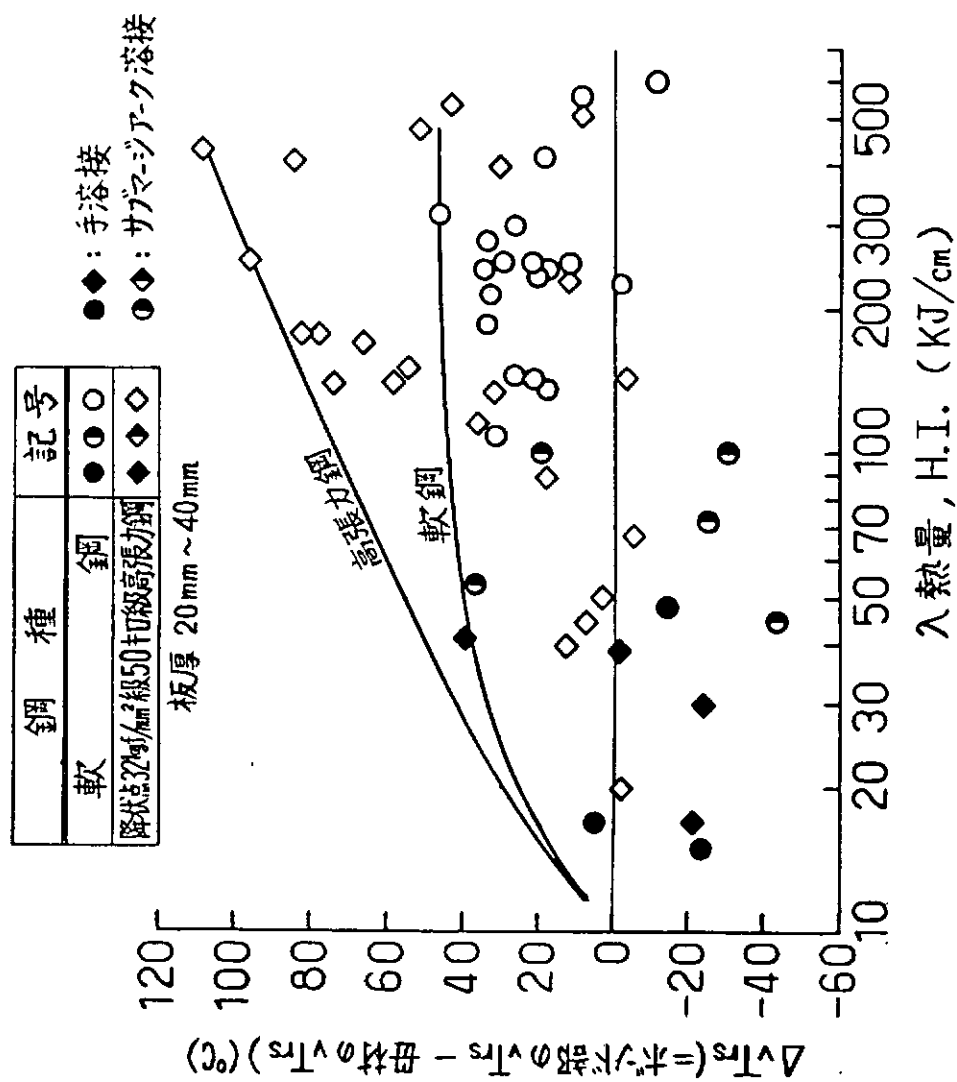
図7.11.2 V-ノッチシャルピー衝撃試験結果の標準吸収エネルギー-遷移曲線  
(マスターカーブ)



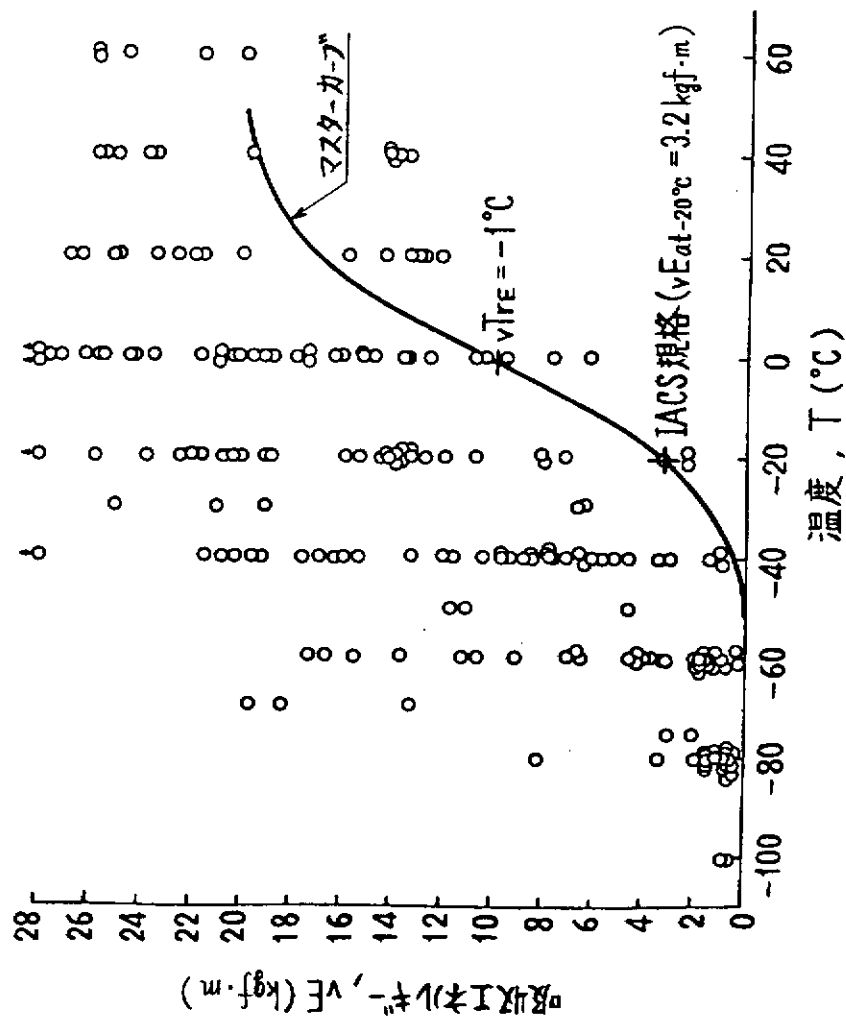
| 鋼種                                                        | グレード | 規格要求試験温度<br>(°C) | 記号 |
|-----------------------------------------------------------|------|------------------|----|
| 軟鋼                                                        | A    | 10*              | ○  |
|                                                           | B    | 0                | ◇  |
|                                                           | D    | -10              | □  |
|                                                           | E    | -40              | △  |
|                                                           | A32  | 0                | ●  |
| 降伏値32kgf/mm <sup>2</sup> 級<br>50kgf/mm <sup>2</sup> 級高張力鋼 | B32  | -20              | ■  |
|                                                           | D32  | -40              | ▲  |

\*)グレードAに関しては規格値なし。  
とりあえず10°Cと仮定した。

図7.11.3 船体用鋼板のV-ノッチシャルピー衝撃試験結果

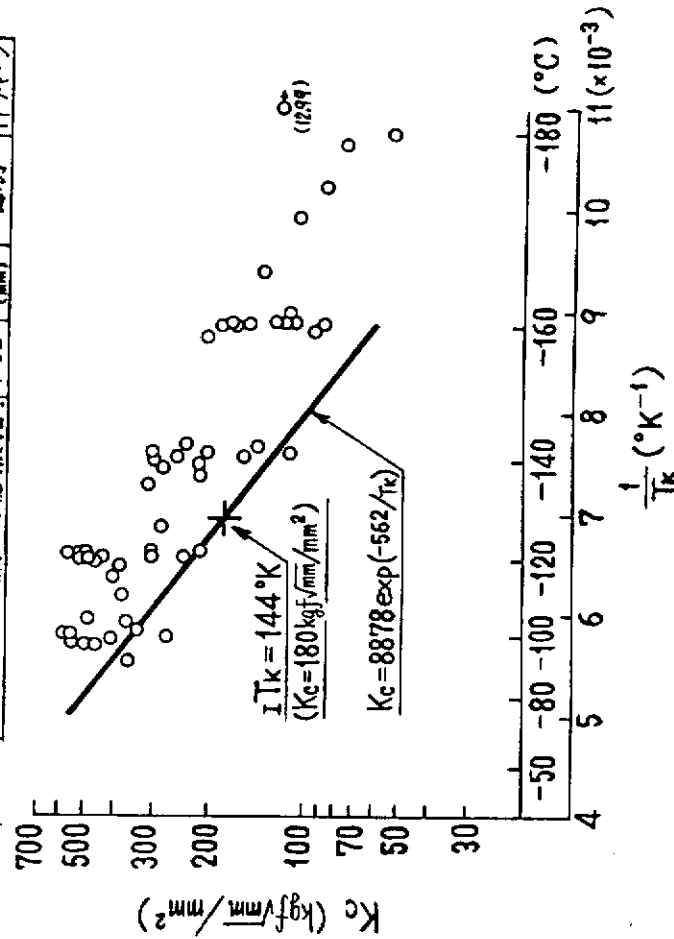
図7.11.4 溶接入熱量と  $\Delta vTrs$  との関係の例

| 鋼種                                                    | グレード | 板厚      | ノッチ位置 | データ数   |
|-------------------------------------------------------|------|---------|-------|--------|
| 降伏点32kgf/mm <sup>2</sup> 級50kgf/mm <sup>2</sup> 級高張力鋼 | D32  | 30 (mm) | 母材    | 11チャージ |



V-ノッチシャルピー衝撃試験結果

| 鋼種                                                    | グレード | 板厚      | ノッチ位置 | データ数   |
|-------------------------------------------------------|------|---------|-------|--------|
| 降伏点32kgf/mm <sup>2</sup> 級50kgf/mm <sup>2</sup> 級高張力鋼 | D32  | 30 (mm) | 母材    | 11チャージ |



ダイブノッチ試験結果(機械切削ノッチ付き試験片使用)

図7.11.5 船体用50kgf/mm<sup>2</sup>級高張力鋼板(D32鋼板,板厚30mm)の破壊靱性値

| 番号 | 記号 | グレード | 板厚<br>(mm) | 母材の $\sigma_{ys}$<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | 母材の $T_{Trs}$<br>(°C) | 溶接法                | 入熱量<br>(KJ/cm) | $\Delta T_{Trs}$ <sup>(3)</sup><br>(°C) | 溶接部の $T_{Trs}$<br>(°C) | $T_K$<br>(°K) |
|----|----|------|------------|---------------------------------------------|-----------------------|--------------------|----------------|-----------------------------------------|------------------------|---------------|
| ①  | ○  | Φ32  | 25.4       | 34                                          | -35                   | MMA <sup>(1)</sup> | 39             | 48                                      | 13                     | 162           |
| ②  | ●  | Φ32  | 25.4       | 35                                          | -24                   | SAW <sup>(2)</sup> | 68             | 64                                      | 40                     | 176           |

注 (1) MMA ; 手溶接  
 (2) SAW ; 多層盛サブマージアーク溶接  
 (3) 図 7.11.4 より推定

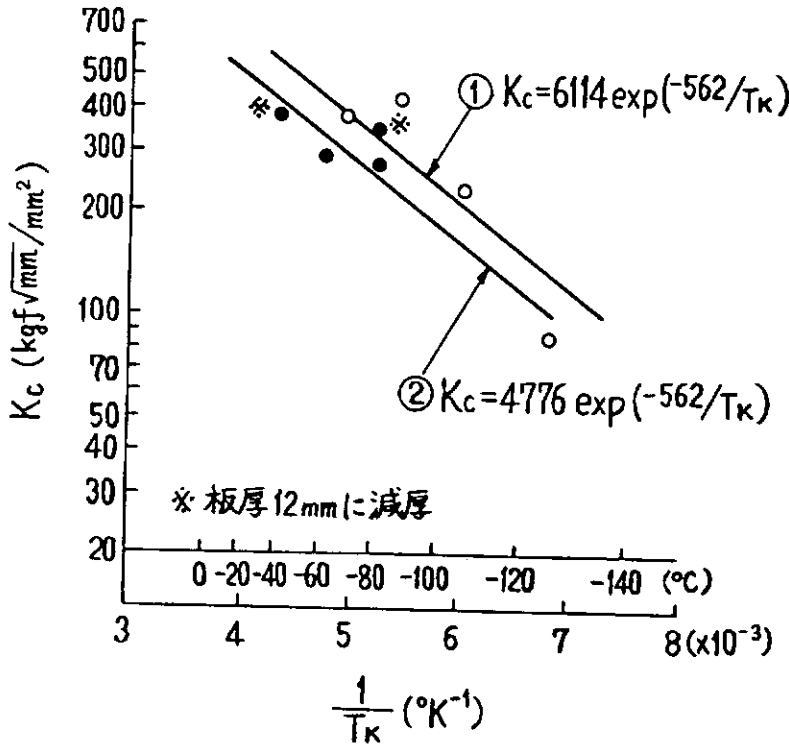


図7.11.6 船体用50キロ級高張力鋼板(Φ32鋼板, 板厚25.4mm)  
 溶接継手ボンド部の破壊靱性値(機械切削ノッチ付き  
 中央切欠き型ディープノッチ試験結果)

表7.11.1 船体用鋼板母材に対するIACS規格要求吸収エネルギーからの母材および溶接継手ボンド部の $vTrs$ 推定値

| 鋼種                                      | グレード | IACS規格要求吸収エネルギー                |                                       | $vTrs$ ( $\equiv vTre$ ) 推定値 ( $^{\circ}C$ ) |                            |        |                           |        |
|-----------------------------------------|------|--------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------|--------|---------------------------|--------|
|                                         |      | 試験温度<br>$T$<br>( $^{\circ}C$ ) | 吸収エネルギー<br>$vEt$<br>( $kgf \cdot m$ ) | 母材<br>$vTre$<br>( $\equiv vTrs$ )            | 手溶接継手ボンド部<br>$\Delta vTrs$ | $vTrs$ | 溶接継手ボンド部<br>$\Delta vTrs$ | $vTrs$ |
| 軟鋼                                      | A    | (10) <sup>1)</sup>             | $\geq 2.8$                            | (31)                                         | 25<br>(H.I. $\geq 20\%$ )  | (56)   | 40<br>(H.I. $\geq 50\%$ ) | (71)   |
|                                         | B    | 0                              |                                       | 21                                           |                            | 46     |                           | 61     |
|                                         | D    | -10                            |                                       | 11                                           |                            | 36     |                           | 51     |
|                                         | E    | -40                            |                                       | -19                                          |                            | 6      |                           | 21     |
| 降伏点 $32kgf/mm^2$ 級<br>50 $\sigma$ 級高張力鋼 | A32  | 0                              | $\geq 3.2$                            | 19                                           | 30<br>(H.I. $\geq 20\%$ )  | 49     | 55<br>(H.I. $\geq 50\%$ ) | 74     |
|                                         | D32  | -20                            |                                       | -1                                           |                            | 29     |                           | 54     |
|                                         | E32  | -40                            |                                       | -21                                          |                            | 9      |                           | 34     |

注 1) IACS規格には定められていない。仮定値である。

2) (7.11.1)式(マスターカーブ)により求めた値

3) 図7.11.4より推定した値

表7.11.2 IACS規格船体用鋼板母材の最低破壊靱性値( $Kc$ 値)(単位:  $kgf \cdot mm^{3/2}$ )

| グレード | 温度<br>( $^{\circ}C$ ) | 板厚<br>( $mm$ ) |      |      |     |     |
|------|-----------------------|----------------|------|------|-----|-----|
|      |                       | 10             | 20   | 30   | 40  | 50  |
| D    | 0                     | 727            | 646  | 611  | 563 | 534 |
|      | -10                   | 672            | 597  | 565  | 520 | 493 |
|      | -20                   | 618            | 549  | 519  | 478 | 453 |
|      | -30                   | 564            | 501  | 473  | 436 | 414 |
|      | -40                   | 511            | 454  | 429  | 395 | 375 |
|      | -50                   | 458            | 407  | 385  | 355 | 336 |
| E    | 0                     | 1168           | 1009 | 941  | 851 | 798 |
|      | -10                   | 1080           | 933  | 870  | 787 | 738 |
|      | -20                   | 993            | 858  | 800  | 723 | 678 |
|      | -30                   | 906            | 783  | 730  | 660 | 619 |
|      | -40                   | 820            | 709  | 661  | 598 | 560 |
|      | -50                   | 736            | 636  | 593  | 536 | 503 |
| D32  | 0                     | 913            | 837  | 770  | 730 | 693 |
|      | -10                   | 844            | 774  | 712  | 675 | 641 |
|      | -20                   | 776            | 711  | 655  | 621 | 589 |
|      | -30                   | 708            | 649  | 598  | 566 | 538 |
|      | -40                   | 641            | 588  | 541  | 513 | 487 |
|      | -50                   | 575            | 528  | 486  | 460 | 437 |
| E32  | 0                     | 1255           | 1135 | 1031 | 969 | 913 |
|      | -10                   | 1160           | 1049 | 953  | 896 | 844 |
|      | -20                   | 1066           | 964  | 876  | 824 | 776 |
|      | -30                   | 973            | 880  | 800  | 752 | 708 |
|      | -40                   | 881            | 797  | 724  | 681 | 641 |
|      | -50                   | 791            | 715  | 650  | 611 | 575 |

表7.11.4 IACS規格船体用鋼板多層盛サバニアーク溶接継手  
ボンド部の最低破壊靱性値(K<sub>IC</sub>値)  
(単位:kJ/mm<sup>3/2</sup>)

| グレード | 温度<br>(°C) | 板厚<br>(mm) |     |     |     |
|------|------------|------------|-----|-----|-----|
|      |            | 10         | 20  | 30  | 50  |
| D    | 0          | 352        | 324 | 306 | 295 |
|      | -10        | 325        | 300 | 283 | 273 |
|      | -20        | 299        | 276 | 260 | 251 |
|      | -30        | 273        | 252 | 237 | 229 |
|      | -40        | 247        | 228 | 215 | 207 |
| E    | -50        | 222        | 204 | 193 | 186 |
|      | 0          | 482        | 438 | 409 | 391 |
|      | -10        | 446        | 405 | 378 | 362 |
|      | -20        | 410        | 372 | 348 | 332 |
|      | -30        | 374        | 340 | 317 | 303 |
| D32  | -40        | 339        | 308 | 287 | 275 |
|      | -50        | 304        | 276 | 258 | 247 |
|      | 0          | 386        | 359 | 347 | 330 |
|      | -10        | 357        | 332 | 321 | 305 |
|      | -20        | 328        | 305 | 295 | 280 |
| E32  | -30        | 299        | 279 | 269 | 256 |
|      | -40        | 271        | 252 | 244 | 232 |
|      | -50        | 243        | 226 | 219 | 208 |
|      | 0          | 469        | 433 | 408 | 393 |
|      | -10        | 434        | 400 | 377 | 364 |
|      | -20        | 398        | 368 | 347 | 334 |
|      | -30        | 364        | 335 | 317 | 305 |
|      | -40        | 329        | 304 | 287 | 276 |
|      | -50        | 296        | 273 | 257 | 248 |
|      |            |            |     |     | 239 |

表7.11.3 IACS規格船体用鋼板溶接継手ボンド部の最低破壊靱性値(K<sub>IC</sub>値)  
(単位:kJ/mm<sup>3/2</sup>)

| グレード | 温度<br>(°C) | 板厚<br>(mm) |     |     |     |
|------|------------|------------|-----|-----|-----|
|      |            | 10         | 20  | 30  | 50  |
| D    | 0          | 409        | 375 | 352 | 338 |
|      | -10        | 378        | 346 | 325 | 312 |
|      | -20        | 348        | 318 | 299 | 287 |
|      | -30        | 317        | 290 | 273 | 262 |
|      | -40        | 287        | 263 | 247 | 237 |
| E    | -50        | 258        | 236 | 222 | 213 |
|      | 0          | 578        | 520 | 482 | 459 |
|      | -10        | 534        | 481 | 446 | 425 |
|      | -20        | 491        | 442 | 410 | 390 |
|      | -30        | 448        | 403 | 374 | 356 |
| D32  | -40        | 406        | 365 | 339 | 323 |
|      | -50        | 364        | 328 | 304 | 290 |
|      | 0          | 489        | 459 | 433 | 416 |
|      | -10        | 452        | 425 | 400 | 385 |
|      | -20        | 415        | 390 | 368 | 354 |
| E32  | -30        | 379        | 356 | 335 | 323 |
|      | -40        | 343        | 323 | 304 | 292 |
|      | -50        | 308        | 290 | 273 | 262 |
|      | 0          | 612        | 571 | 533 | 499 |
|      | -10        | 566        | 528 | 493 | 462 |
|      | -20        | 520        | 485 | 453 | 424 |
|      | -30        | 475        | 443 | 414 | 387 |
|      | -40        | 430        | 401 | 374 | 351 |
|      | -50        | 386        | 360 | 336 | 315 |
|      |            |            |     |     | 302 |

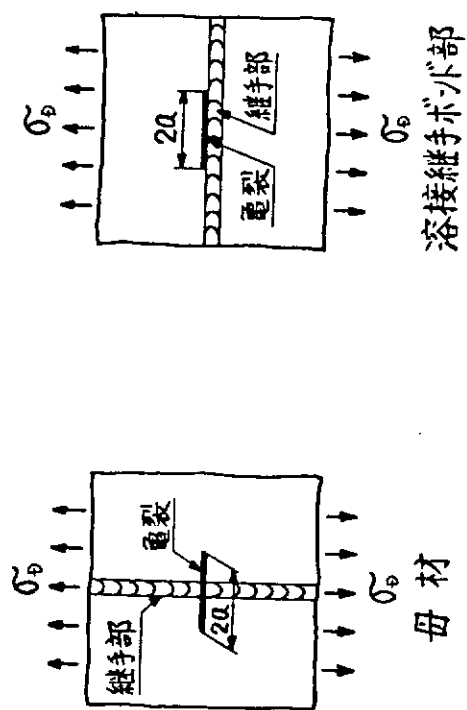
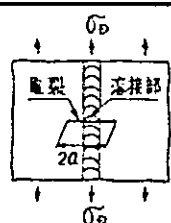
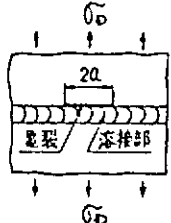


図7.11.7 溶接継手と亀裂位置との関係

表 7.11.5 要求破壊靱性値 ( $K_{ICR}$  値)

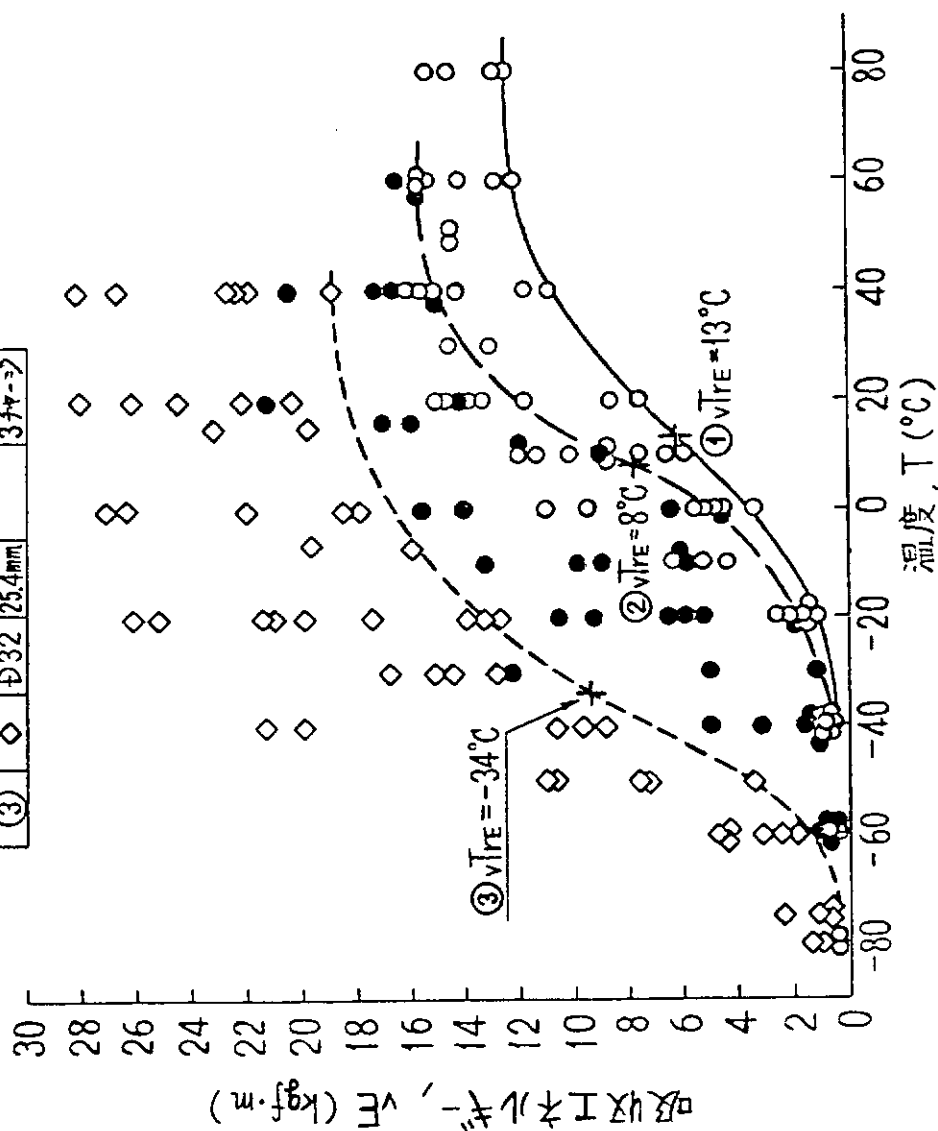
| 想定亀裂位置   |                                                                                   | 残留応力係数<br>$\beta^{1)}$ | 想定(許容)<br>亀裂長さ<br>$2a$<br>(mm)                            | 鋼 種                                                       | 公称降伏点<br>$\sigma_{yo}$<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | 設計応力係数<br>$\alpha (= \frac{\sigma_e}{\sigma_{yo}})$ | 要求破壊靱性値<br>$K_{IC(r)}$<br>(kgf√mm/mm <sup>2</sup> ) |  |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--|
| 母 材      |  | 0.6                    | 240                                                       | 軟鋼                                                        | 24                                               | 0.8                                                 | 652                                                 |  |
|          |                                                                                   |                        |                                                           |                                                           |                                                  | 0.4                                                 | 466                                                 |  |
|          |                                                                                   |                        |                                                           |                                                           |                                                  | 0.2                                                 | 373                                                 |  |
|          |                                                                                   |                        |                                                           | 降伏点32kgf/mm <sup>2</sup> 級<br>50kgf/mm <sup>2</sup> 級高張力鋼 | 32                                               | 0.8                                                 | 870                                                 |  |
|          |                                                                                   |                        |                                                           |                                                           |                                                  | 0.4                                                 | 621                                                 |  |
|          |                                                                                   |                        |                                                           |                                                           |                                                  | 0.2                                                 | 497                                                 |  |
| 溶接継手ボンド部 |  | 0.3                    | 140                                                       | 軟鋼                                                        | 24                                               | 0.8                                                 | 391                                                 |  |
|          |                                                                                   |                        |                                                           |                                                           |                                                  | 0.4                                                 | 249                                                 |  |
|          |                                                                                   |                        |                                                           |                                                           |                                                  | 0.2                                                 | 178                                                 |  |
|          |                                                                                   |                        | 120                                                       | 降伏点32kgf/mm <sup>2</sup> 級<br>50kgf/mm <sup>2</sup> 級高張力鋼 | 32                                               | 0.8                                                 | 483                                                 |  |
|          |                                                                                   |                        |                                                           |                                                           |                                                  | 0.4                                                 | 307                                                 |  |
|          |                                                                                   |                        |                                                           |                                                           |                                                  | 0.2                                                 | 220                                                 |  |
|          | サブマージ<br>アーク溶接<br>(H.I.=50kgf/cm)                                                 |                        | 100                                                       | 軟鋼                                                        | 24                                               | 0.8                                                 | 330                                                 |  |
|          |                                                                                   |                        |                                                           |                                                           |                                                  | 0.4                                                 | 211                                                 |  |
|          |                                                                                   |                        |                                                           |                                                           |                                                  | 0.2                                                 | 150                                                 |  |
|          | 70                                                                                |                        | 降伏点32kgf/mm <sup>2</sup> 級<br>50kgf/mm <sup>2</sup> 級高張力鋼 | 32                                                        | 0.8                                              | 369                                                 |                                                     |  |
|          |                                                                                   |                        |                                                           |                                                           | 0.4                                              | 235                                                 |                                                     |  |
|          |                                                                                   |                        |                                                           |                                                           | 0.2                                              | 168                                                 |                                                     |  |

注: 1)  $\beta = \sigma_R / \sigma_{yo}$ ,  $\sigma_R$ : 破壊発生に寄与する溶接残留応力2)  $K_{ICR} = (\alpha + \beta) \sigma_{yo} \sqrt{\pi a}$ 表 7.11.6 K概念を適用した場合の船体用鋼板の使用できる限界板厚の例  
[母材, 溶接継手ボルト部 (H.I. ≤ 50 kJ/cm)] (単位: mm)

| 鋼 種                                                               | グ レード  | 使用応力<br>(/mm <sup>2</sup> ) | 使 用 温 度 (°C) |     |     |     |     |     |
|-------------------------------------------------------------------|--------|-----------------------------|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                                                   |        |                             | 0            | -10 | -20 | -30 | -40 | -50 |
| 軟 鋼                                                               | ※<br>A | 0.8 $\sigma_{yo}$           | —            | —   | —   | —   | —   | —   |
|                                                                   |        | 0.4 $\sigma_{yo}$           | 30           | 20  | 10  | —   | —   | —   |
|                                                                   |        | 0.2 $\sigma_{yo}$           | 50           | 50  | 40  | 25  | 15  | —   |
|                                                                   | B      | 0.8 $\sigma_{yo}$           | —            | —   | —   | —   | —   | —   |
|                                                                   |        | 0.4 $\sigma_{yo}$           | 50           | 40  | 25  | 10  | —   | —   |
|                                                                   |        | 0.2 $\sigma_{yo}$           | 50           | 50  | 50  | 45  | 30  | 15  |
|                                                                   | D      | 0.8 $\sigma_{yo}$           | 15           | —   | —   | —   | —   | —   |
|                                                                   |        | 0.4 $\sigma_{yo}$           | 50           | 50  | 45  | 30  | 15  | —   |
|                                                                   |        | 0.2 $\sigma_{yo}$           | 50           | 50  | 50  | 50  | 50  | 30  |
|                                                                   | E      | 0.8 $\sigma_{yo}$           | 50           | 50  | 35  | 25  | 10  | —   |
|                                                                   |        | 0.4 $\sigma_{yo}$           | 50           | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  |
|                                                                   |        | 0.2 $\sigma_{yo}$           | 50           | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  |
| 降伏点<br>32kgf/mm <sup>2</sup> 級<br>50kgf/mm <sup>2</sup> 級<br>高張力鋼 | A32    | 0.8 $\sigma_{yo}$           | —            | —   | —   | —   | —   | —   |
|                                                                   |        | 0.4 $\sigma_{yo}$           | 25           | 15  | —   | —   | —   | —   |
|                                                                   |        | 0.2 $\sigma_{yo}$           | 50           | 50  | 30  | 20  | 10  | —   |
|                                                                   | D32    | 0.8 $\sigma_{yo}$           | 10           | —   | —   | —   | —   | —   |
|                                                                   |        | 0.4 $\sigma_{yo}$           | 50           | 50  | 40  | 20  | 15  | —   |
|                                                                   |        | 0.2 $\sigma_{yo}$           | 50           | 50  | 50  | 50  | 45  | 25  |
|                                                                   | E32    | 0.8 $\sigma_{yo}$           | 45           | 30  | 15  | —   | —   | —   |
|                                                                   |        | 0.4 $\sigma_{yo}$           | 50           | 50  | 50  | 50  | 50  | 35  |
|                                                                   |        | 0.2 $\sigma_{yo}$           | 50           | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  |

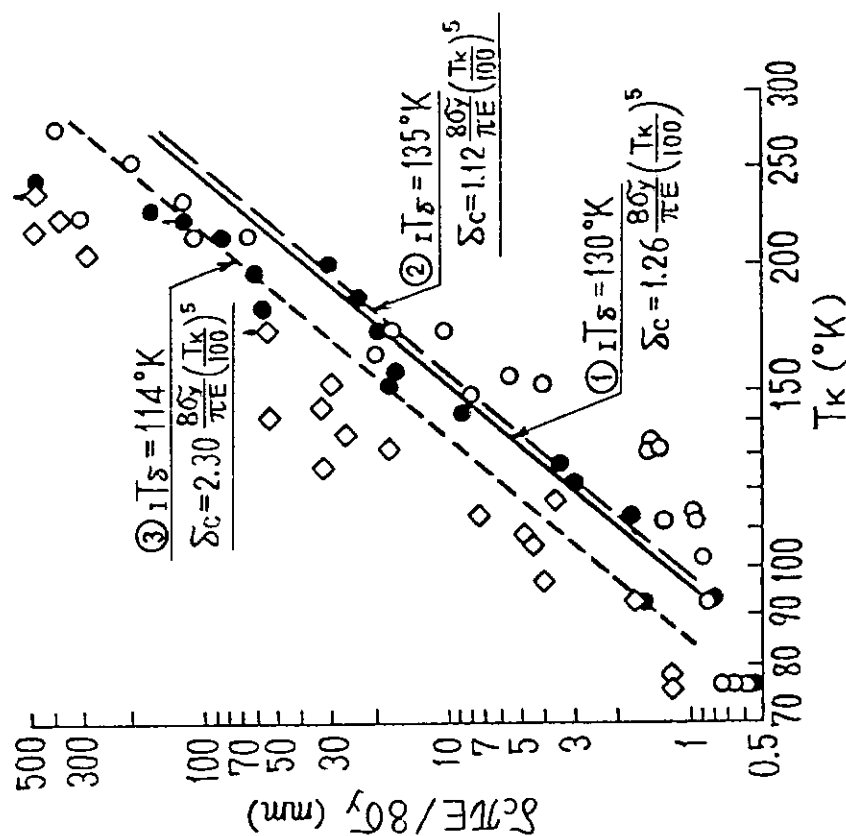
※: グレードAに関しては仮定値である。

| 番号 | 記号 | グレード | 板厚     | ノッチ位置 | データ数 |
|----|----|------|--------|-------|------|
| ①  | ○  | A    | 25.4mm | 母材    | 347  |
| ②  | ●  | D    | 35 mm  |       | 247  |
| ③  | ◇  | D32  | 25.4mm |       | 347  |



V-ノッチヤルビ-衝撃試験結果

| 番号 | 記号 | グレード | 板厚     | ノッチ位置 | データ数 |
|----|----|------|--------|-------|------|
| ①  | ○  | A    | 25.4mm | 母材    | 347  |
| ②  | ●  | D    | 35 mm  |       | 247  |
| ③  | ◇  | D32  | 25.4mm |       | 347  |



COD曲げ試験結果(機械切削ノッチ付き試験片使用)

図7.11.8 船体用鋼板の破壊靱性値

| 番号 | 記号 | グレード | 板厚<br>(mm) | 母材の $\sigma_{y0}$<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | 母材の $\sigma_{T5}$<br>(°C) | $\sigma_{T5}$<br>(°K) | m     | n |
|----|----|------|------------|---------------------------------------------|---------------------------|-----------------------|-------|---|
| ①  | ○  | A    | 20         | 28                                          | - 8                       | 119                   | 0.624 | 5 |
| ②  | ●  | E    | 20         | 31                                          | -41                       | 104                   | 1.02  | 5 |

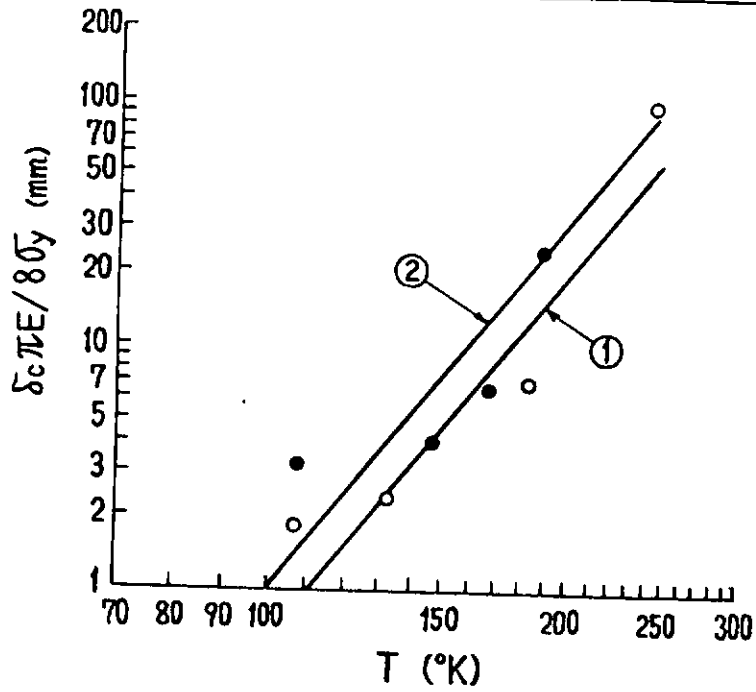


図 7.11.9 一般船体用軟鋼板(A鋼板, E鋼板, 板厚20mm)の  
曲げCOD試験結果(疲労亀裂ノッチ付き試験片使用)

表 7.11.7 IACS規格船体用鋼板母材の限界COD値 (Sc値)  
(単位: mm)

| グレード | 温度<br>(°C) | 板 厚<br>(mm)           |                       |                       |                       |
|------|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|      |            | 10                    | 20                    | 30                    | 50                    |
| D    | 0          | $3.06 \times 10^{-1}$ | $2.28 \times 10^{-1}$ | $1.83 \times 10^{-1}$ | $1.53 \times 10^{-1}$ |
|      | -10        | $2.58 \times 10^{-1}$ | $1.92 \times 10^{-1}$ | $1.54 \times 10^{-1}$ | $1.29 \times 10^{-1}$ |
|      | -20        | $2.16 \times 10^{-1}$ | $1.61 \times 10^{-1}$ | $1.29 \times 10^{-1}$ | $1.08 \times 10^{-1}$ |
|      | -30        | $1.80 \times 10^{-1}$ | $1.34 \times 10^{-1}$ | $1.08 \times 10^{-1}$ | $9.00 \times 10^{-2}$ |
|      | -40        | $1.49 \times 10^{-1}$ | $1.11 \times 10^{-1}$ | $8.92 \times 10^{-2}$ | $7.45 \times 10^{-2}$ |
|      | -50        | $1.23 \times 10^{-1}$ | $9.12 \times 10^{-2}$ | $7.32 \times 10^{-2}$ | $6.12 \times 10^{-2}$ |
| E    | 0          | $4.64 \times 10^{-1}$ | $3.42 \times 10^{-1}$ | $2.71 \times 10^{-1}$ | $2.25 \times 10^{-1}$ |
|      | -10        | $3.91 \times 10^{-1}$ | $2.88 \times 10^{-1}$ | $2.29 \times 10^{-1}$ | $1.89 \times 10^{-1}$ |
|      | -20        | $3.28 \times 10^{-1}$ | $2.42 \times 10^{-1}$ | $1.92 \times 10^{-1}$ | $1.59 \times 10^{-1}$ |
|      | -30        | $2.74 \times 10^{-1}$ | $2.01 \times 10^{-1}$ | $1.60 \times 10^{-1}$ | $1.32 \times 10^{-1}$ |
|      | -40        | $2.26 \times 10^{-1}$ | $1.67 \times 10^{-1}$ | $1.32 \times 10^{-1}$ | $1.10 \times 10^{-1}$ |
|      | -50        | $1.86 \times 10^{-1}$ | $1.37 \times 10^{-1}$ | $1.09 \times 10^{-1}$ | $9.00 \times 10^{-2}$ |
| D32  | 0          | $4.38 \times 10^{-1}$ | $3.18 \times 10^{-1}$ | $2.51 \times 10^{-1}$ | $2.07 \times 10^{-1}$ |
|      | -10        | $3.68 \times 10^{-1}$ | $2.67 \times 10^{-1}$ | $2.11 \times 10^{-1}$ | $1.74 \times 10^{-1}$ |
|      | -20        | $3.08 \times 10^{-1}$ | $2.23 \times 10^{-1}$ | $1.77 \times 10^{-1}$ | $1.46 \times 10^{-1}$ |
|      | -30        | $2.56 \times 10^{-1}$ | $1.86 \times 10^{-1}$ | $1.47 \times 10^{-1}$ | $1.21 \times 10^{-1}$ |
|      | -40        | $2.11 \times 10^{-1}$ | $1.53 \times 10^{-1}$ | $1.21 \times 10^{-1}$ | $9.99 \times 10^{-2}$ |
|      | -50        | $1.73 \times 10^{-1}$ | $1.25 \times 10^{-1}$ | $9.90 \times 10^{-2}$ | $8.18 \times 10^{-2}$ |
| E32  | 0          | $6.10 \times 10^{-1}$ | $4.36 \times 10^{-1}$ | $3.40 \times 10^{-1}$ | $2.78 \times 10^{-1}$ |
|      | -10        | $5.13 \times 10^{-1}$ | $3.67 \times 10^{-1}$ | $2.86 \times 10^{-1}$ | $2.34 \times 10^{-1}$ |
|      | -20        | $4.29 \times 10^{-1}$ | $3.06 \times 10^{-1}$ | $2.39 \times 10^{-1}$ | $1.96 \times 10^{-1}$ |
|      | -30        | $3.57 \times 10^{-1}$ | $2.55 \times 10^{-1}$ | $1.99 \times 10^{-1}$ | $1.63 \times 10^{-1}$ |
|      | -40        | $2.94 \times 10^{-1}$ | $2.10 \times 10^{-1}$ | $1.64 \times 10^{-1}$ | $1.34 \times 10^{-1}$ |
|      | -50        | $2.41 \times 10^{-1}$ | $1.72 \times 10^{-1}$ | $1.34 \times 10^{-1}$ | $1.10 \times 10^{-1}$ |

表 7.11.8 IACS規格船体用鋼板手溶接継手ノド部の限界COD値 (Sc値)  
(単位: mm)

| グレード | 温度<br>(°C) | 板 厚<br>(mm)           |                       |                       |                       |
|------|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|      |            | 10                    | 20                    | 30                    | 50                    |
| D    | 0          | $2.19 \times 10^{-1}$ | $1.65 \times 10^{-1}$ | $1.34 \times 10^{-1}$ | $1.13 \times 10^{-1}$ |
|      | -10        | $1.84 \times 10^{-1}$ | $1.39 \times 10^{-1}$ | $1.13 \times 10^{-1}$ | $9.50 \times 10^{-2}$ |
|      | -20        | $1.55 \times 10^{-1}$ | $1.16 \times 10^{-1}$ | $9.45 \times 10^{-2}$ | $7.96 \times 10^{-2}$ |
|      | -30        | $1.29 \times 10^{-1}$ | $9.71 \times 10^{-2}$ | $7.87 \times 10^{-2}$ | $6.64 \times 10^{-2}$ |
|      | -40        | $1.07 \times 10^{-1}$ | $8.03 \times 10^{-2}$ | $6.52 \times 10^{-2}$ | $5.49 \times 10^{-2}$ |
|      | -50        | $8.76 \times 10^{-2}$ | $6.60 \times 10^{-2}$ | $5.35 \times 10^{-2}$ | $4.51 \times 10^{-2}$ |
| E    | 0          | $3.28 \times 10^{-1}$ | $2.43 \times 10^{-1}$ | $1.95 \times 10^{-1}$ | $1.63 \times 10^{-1}$ |
|      | -10        | $2.76 \times 10^{-1}$ | $2.05 \times 10^{-1}$ | $1.64 \times 10^{-1}$ | $1.37 \times 10^{-1}$ |
|      | -20        | $2.32 \times 10^{-1}$ | $1.72 \times 10^{-1}$ | $1.38 \times 10^{-1}$ | $1.15 \times 10^{-1}$ |
|      | -30        | $1.93 \times 10^{-1}$ | $1.43 \times 10^{-1}$ | $1.15 \times 10^{-1}$ | $9.58 \times 10^{-2}$ |
|      | -40        | $1.60 \times 10^{-1}$ | $1.19 \times 10^{-1}$ | $9.51 \times 10^{-2}$ | $7.93 \times 10^{-2}$ |
|      | -50        | $1.31 \times 10^{-1}$ | $9.75 \times 10^{-2}$ | $7.81 \times 10^{-2}$ | $6.52 \times 10^{-2}$ |
| D32  | 0          | $2.74 \times 10^{-1}$ | $2.04 \times 10^{-1}$ | $1.64 \times 10^{-1}$ | $1.37 \times 10^{-1}$ |
|      | -10        | $2.31 \times 10^{-1}$ | $1.71 \times 10^{-1}$ | $1.38 \times 10^{-1}$ | $1.15 \times 10^{-1}$ |
|      | -20        | $1.93 \times 10^{-1}$ | $1.43 \times 10^{-1}$ | $1.15 \times 10^{-1}$ | $9.65 \times 10^{-2}$ |
|      | -30        | $1.60 \times 10^{-1}$ | $1.19 \times 10^{-1}$ | $9.57 \times 10^{-2}$ | $8.01 \times 10^{-2}$ |
|      | -40        | $1.32 \times 10^{-1}$ | $9.82 \times 10^{-2}$ | $7.89 \times 10^{-2}$ | $6.61 \times 10^{-2}$ |
|      | -50        | $1.08 \times 10^{-1}$ | $8.03 \times 10^{-2}$ | $6.46 \times 10^{-2}$ | $5.41 \times 10^{-2}$ |
| E32  | 0          | $3.73 \times 10^{-1}$ | $2.73 \times 10^{-1}$ | $2.17 \times 10^{-1}$ | $1.80 \times 10^{-1}$ |
|      | -10        | $3.14 \times 10^{-1}$ | $2.30 \times 10^{-1}$ | $1.83 \times 10^{-1}$ | $1.51 \times 10^{-1}$ |
|      | -20        | $2.63 \times 10^{-1}$ | $1.92 \times 10^{-1}$ | $1.53 \times 10^{-1}$ | $1.27 \times 10^{-1}$ |
|      | -30        | $2.18 \times 10^{-1}$ | $1.59 \times 10^{-1}$ | $1.27 \times 10^{-1}$ | $1.05 \times 10^{-1}$ |
|      | -40        | $1.80 \times 10^{-1}$ | $1.32 \times 10^{-1}$ | $1.05 \times 10^{-1}$ | $8.68 \times 10^{-2}$ |
|      | -50        | $1.47 \times 10^{-1}$ | $1.08 \times 10^{-1}$ | $8.56 \times 10^{-2}$ | $7.10 \times 10^{-2}$ |

表7.11.9 IACS規格船体用鋼板多層盛サマージアーク溶接継手ボンド部の限界COD値( $\delta_c$ 値)  
(単位: mm)

| グレード | 温度<br>(°C) | 板厚<br>(mm)            |                       |                       |                       |                       |
|------|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|      |            | 10                    | 20                    | 30                    | 40                    | 50                    |
| D    | 0          | $1.80 \times 10^{-1}$ | $1.37 \times 10^{-1}$ | $1.11 \times 10^{-1}$ | $9.44 \times 10^{-2}$ | $8.19 \times 10^{-2}$ |
|      | -10        | $1.52 \times 10^{-1}$ | $1.15 \times 10^{-1}$ | $9.40 \times 10^{-2}$ | $7.96 \times 10^{-2}$ | $6.91 \times 10^{-2}$ |
|      | -20        | $1.27 \times 10^{-1}$ | $9.66 \times 10^{-2}$ | $7.89 \times 10^{-2}$ | $6.68 \times 10^{-2}$ | $5.79 \times 10^{-2}$ |
|      | -30        | $1.06 \times 10^{-1}$ | $8.05 \times 10^{-2}$ | $6.57 \times 10^{-2}$ | $5.56 \times 10^{-2}$ | $4.83 \times 10^{-2}$ |
|      | -40        | $8.77 \times 10^{-2}$ | $6.66 \times 10^{-2}$ | $5.44 \times 10^{-2}$ | $4.61 \times 10^{-2}$ | $3.99 \times 10^{-2}$ |
|      | -50        | $7.21 \times 10^{-2}$ | $5.47 \times 10^{-2}$ | $4.47 \times 10^{-2}$ | $3.78 \times 10^{-2}$ | $3.28 \times 10^{-2}$ |
| E    | 0          | $2.67 \times 10^{-1}$ | $2.00 \times 10^{-1}$ | $1.61 \times 10^{-1}$ | $1.35 \times 10^{-1}$ | $1.16 \times 10^{-1}$ |
|      | -10        | $2.25 \times 10^{-1}$ | $1.68 \times 10^{-1}$ | $1.36 \times 10^{-1}$ | $1.14 \times 10^{-1}$ | $9.78 \times 10^{-2}$ |
|      | -20        | $1.89 \times 10^{-1}$ | $1.41 \times 10^{-1}$ | $1.14 \times 10^{-1}$ | $9.54 \times 10^{-2}$ | $8.20 \times 10^{-2}$ |
|      | -30        | $1.57 \times 10^{-1}$ | $1.18 \times 10^{-1}$ | $9.49 \times 10^{-2}$ | $7.95 \times 10^{-2}$ | $6.84 \times 10^{-2}$ |
|      | -40        | $1.30 \times 10^{-1}$ | $9.74 \times 10^{-2}$ | $7.85 \times 10^{-2}$ | $6.58 \times 10^{-2}$ | $5.66 \times 10^{-2}$ |
|      | -50        | $1.07 \times 10^{-1}$ | $8.00 \times 10^{-2}$ | $6.45 \times 10^{-2}$ | $5.41 \times 10^{-2}$ | $4.65 \times 10^{-2}$ |
| D32  | 0          | $1.91 \times 10^{-1}$ | $1.44 \times 10^{-1}$ | $1.17 \times 10^{-1}$ | $9.94 \times 10^{-2}$ | $8.61 \times 10^{-2}$ |
|      | -10        | $1.60 \times 10^{-1}$ | $1.21 \times 10^{-1}$ | $9.88 \times 10^{-2}$ | $8.36 \times 10^{-2}$ | $7.25 \times 10^{-2}$ |
|      | -20        | $1.34 \times 10^{-1}$ | $1.01 \times 10^{-1}$ | $8.26 \times 10^{-2}$ | $6.99 \times 10^{-2}$ | $6.06 \times 10^{-2}$ |
|      | -30        | $1.11 \times 10^{-1}$ | $8.42 \times 10^{-2}$ | $6.86 \times 10^{-2}$ | $5.81 \times 10^{-2}$ | $5.03 \times 10^{-2}$ |
|      | -40        | $9.18 \times 10^{-2}$ | $6.95 \times 10^{-2}$ | $5.66 \times 10^{-2}$ | $4.79 \times 10^{-2}$ | $4.15 \times 10^{-2}$ |
|      | -50        | $7.52 \times 10^{-2}$ | $5.69 \times 10^{-2}$ | $4.63 \times 10^{-2}$ | $3.92 \times 10^{-2}$ | $3.40 \times 10^{-2}$ |
| E32  | 0          | $2.54 \times 10^{-1}$ | $1.90 \times 10^{-1}$ | $1.53 \times 10^{-1}$ | $1.28 \times 10^{-1}$ | $1.11 \times 10^{-1}$ |
|      | -10        | $2.14 \times 10^{-1}$ | $1.60 \times 10^{-1}$ | $1.29 \times 10^{-1}$ | $1.08 \times 10^{-1}$ | $9.30 \times 10^{-2}$ |
|      | -20        | $1.79 \times 10^{-1}$ | $1.33 \times 10^{-1}$ | $1.08 \times 10^{-1}$ | $9.03 \times 10^{-2}$ | $7.77 \times 10^{-2}$ |
|      | -30        | $1.49 \times 10^{-1}$ | $1.11 \times 10^{-1}$ | $8.94 \times 10^{-2}$ | $7.50 \times 10^{-2}$ | $6.46 \times 10^{-2}$ |
|      | -40        | $1.23 \times 10^{-1}$ | $9.14 \times 10^{-2}$ | $7.37 \times 10^{-2}$ | $6.19 \times 10^{-2}$ | $5.33 \times 10^{-2}$ |
|      | -50        | $1.00 \times 10^{-1}$ | $7.48 \times 10^{-2}$ | $6.03 \times 10^{-2}$ | $5.06 \times 10^{-2}$ | $4.36 \times 10^{-2}$ |

表 7.11.10 要求 COD 値 ( $\delta_{cr}$  値)

| 想定亀裂位置   |                              | 残留応力係数<br>$\beta^{1)}$ | 想定(許容)<br>亀裂長さ<br>$2a$<br>(mm) | 鋼種                                                           | 公称降伏点<br>$\sigma_y$<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | 設計応力係数<br>$\alpha (= \frac{\sigma_0}{\sigma_y})$ | 要求 COD 値<br>$\delta_{ctr}^{2)}$<br>(mm) |  |
|----------|------------------------------|------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------|--|
| 母材       |                              | 0.6                    | 60                             | 軟鋼                                                           | 24                                            | 0.8                                              | $1.68 \times 10^{-1}$                   |  |
|          |                              |                        |                                |                                                              |                                               | 0.4                                              | $1.20 \times 10^{-1}$                   |  |
|          |                              |                        |                                |                                                              |                                               | 0.2                                              | $9.60 \times 10^{-2}$                   |  |
|          |                              |                        |                                | 降伏点 32 kgf/mm <sup>2</sup> 級<br>50 kgf/mm <sup>2</sup> 級高張力鋼 | 32                                            | 0.8                                              | $2.24 \times 10^{-1}$                   |  |
|          |                              |                        |                                |                                                              |                                               | 0.4                                              | $1.60 \times 10^{-1}$                   |  |
|          |                              |                        |                                |                                                              |                                               | 0.2                                              | $1.28 \times 10^{-1}$                   |  |
| 溶接継手ボンド部 | 手溶接<br>(H.I.=20%)            | 0.3                    | 60                             | 軟鋼                                                           | 24                                            | 0.8                                              | $1.32 \times 10^{-1}$                   |  |
|          |                              |                        |                                |                                                              |                                               | 0.4                                              | $8.40 \times 10^{-2}$                   |  |
|          |                              |                        |                                |                                                              |                                               | 0.2                                              | $6.00 \times 10^{-2}$                   |  |
|          |                              |                        |                                | 降伏点 32 kgf/mm <sup>2</sup> 級<br>50 kgf/mm <sup>2</sup> 級高張力鋼 | 32                                            | 0.8                                              | $1.47 \times 10^{-1}$                   |  |
|          |                              |                        |                                |                                                              |                                               | 0.4                                              | $9.33 \times 10^{-2}$                   |  |
|          |                              |                        |                                |                                                              |                                               | 0.2                                              | $6.67 \times 10^{-2}$                   |  |
|          | サブマージ<br>アーク溶接<br>(H.I.=50%) |                        | 50                             | 軟鋼                                                           | 24                                            | 0.8                                              | $1.10 \times 10^{-1}$                   |  |
|          |                              |                        |                                |                                                              |                                               | 0.4                                              | $7.00 \times 10^{-2}$                   |  |
|          |                              |                        |                                |                                                              |                                               | 0.2                                              | $5.00 \times 10^{-2}$                   |  |
|          |                              |                        |                                | 降伏点 32 kgf/mm <sup>2</sup> 級<br>50 kgf/mm <sup>2</sup> 級高張力鋼 | 32                                            | 0.8                                              | $1.17 \times 10^{-1}$                   |  |
|          |                              |                        |                                |                                                              |                                               | 0.4                                              | $7.47 \times 10^{-2}$                   |  |
|          |                              |                        |                                |                                                              |                                               | 0.2                                              | $5.33 \times 10^{-2}$                   |  |

注 1):  $\beta = \sigma_R / \sigma_{ys}$ ,  $\sigma_R$ : 破壊発生に寄与する溶接残留応力2):  $\delta_{cr} = 3.5a(\alpha + \beta)\sigma_{ys} / E$ 表 7.11.11 COD 概念を適用した場合の船体用鋼板の使用できる限界板厚の例  
(母材, 溶接継手ボンド部 (H.I.  $\leq 50$  kg/cm<sup>2</sup>)) (単位: mm)

| 鋼種                                                                  | グレード | 使用応力<br>(kg/mm <sup>2</sup> ) | 使用温度 (°C) |     |     |     |     |     |
|---------------------------------------------------------------------|------|-------------------------------|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                                                     |      |                               | 0         | -10 | -20 | -30 | -40 | -50 |
| 軟鋼                                                                  | A*   | $0.8\sigma_{ys}$              | 15        | 10  | —   | —   | —   | —   |
|                                                                     |      | $0.4\sigma_{ys}$              | 35        | 30  | 20  | 10  | —   | —   |
|                                                                     |      | $0.2\sigma_{ys}$              | 50        | 40  | 30  | 20  | 15  | —   |
|                                                                     | B    | $0.8\sigma_{ys}$              | 20        | 15  | 10  | —   | —   | —   |
|                                                                     |      | $0.4\sigma_{ys}$              | 45        | 35  | 25  | 15  | 10  | —   |
|                                                                     |      | $0.2\sigma_{ys}$              | 50        | 50  | 35  | 25  | 20  | 10  |
|                                                                     | D    | $0.8\sigma_{ys}$              | 30        | 20  | 10  | —   | —   | —   |
|                                                                     |      | $0.4\sigma_{ys}$              | 50        | 40  | 30  | 20  | 15  | 10  |
|                                                                     |      | $0.2\sigma_{ys}$              | 50        | 50  | 45  | 35  | 25  | 15  |
|                                                                     | E    | $0.8\sigma_{ys}$              | 50        | 40  | 30  | 20  | 15  | —   |
|                                                                     |      | $0.4\sigma_{ys}$              | 50        | 50  | 50  | 45  | 35  | 25  |
|                                                                     |      | $0.2\sigma_{ys}$              | 50        | 50  | 50  | 50  | 45  | 35  |
| 降伏点<br>32 kgf/mm <sup>2</sup> 級<br>50 kgf/mm <sup>2</sup> 級<br>高張力鋼 | A32  | $0.8\sigma_{ys}$              | 15        | 10  | —   | —   | —   | —   |
|                                                                     |      | $0.4\sigma_{ys}$              | 35        | 25  | 20  | 10  | —   | —   |
|                                                                     |      | $0.2\sigma_{ys}$              | 50        | 40  | 30  | 20  | 15  | —   |
|                                                                     | D32  | $0.8\sigma_{ys}$              | 30        | 20  | 10  | —   | —   | —   |
|                                                                     |      | $0.4\sigma_{ys}$              | 50        | 45  | 35  | 25  | 15  | 10  |
|                                                                     |      | $0.2\sigma_{ys}$              | 50        | 50  | 45  | 35  | 25  | 15  |
|                                                                     | E32  | $0.8\sigma_{ys}$              | 45        | 35  | 25  | 15  | 10  | —   |
|                                                                     |      | $0.4\sigma_{ys}$              | 50        | 50  | 50  | 40  | 25  | 20  |
|                                                                     |      | $0.2\sigma_{ys}$              | 50        | 50  | 50  | 50  | 40  | 30  |

※ グレード A に関しては仮定値である。

## 8. 破壊力学解析の詳細解析実例集

### 8.1I ダブルハル構造部の試計算 (その1)

#### 8.1I.1 目的

依據管理制御設計を確立する第一歩として、船殻破壊強度試計算を行なう。

船殻構造における局所的損傷の防止対策に際しては、構造強度の検討段階において、その構造の持つ剛性の不連続性や構造の不連続部における応力集中等を十分考慮しなければならない。

実船におけるダブルハル構造は、二重底やコンテナ船舷側構造等にみられるが、そのような構造の中から計算にうまく適合し、実験との対応もとれる部分について強度試計算を行なう。

本報告ではマンホールより生じる亀裂の進展シミュレーションと疲労破壊強度との関係を、破壊力学を適用して求め、今後の依據管理制御設計の第一歩となることを目的とする。

#### 8.1I.2 試計算対象構造物と外荷重条件

本節で取り扱う試計算対象構造物の寸法を図8.1I.1に示す。

図8.1I.1に示した構造物に作用する支配的外荷重条件を図8.1I.2に示す。

I型……一様せん断力 $F_s$ と、そのモーメントとしてのディファレンスにみちみち面内彎曲モーメント $(M_B)_1$ が作用する場合。

II型……面内彎曲モーメント $(M_B)_2$ のみが作用する場合。

III型……一様せん断力 $F_s$ のみが作用する場合。

以上の荷重が相互に組み合わさり、任意の応力場を作り出している。

図8.1I.3から図8.1I.5は各型の最大主応力等高線図を示しているが、これらの結果より亀裂がマンホールの縁の高応力集中部に発生し、maximum stress criterionにより進展すると考えると、予想される亀裂進展ゾーン内においては、I型とIII型はほぼ同型と考えられる。

従って本報告において、荷重条件はI型でIII型を兼用させ、I型とII型との線形的組み合わせによる応力場を考える。

尚、II型、あるいはII型の影響の強い組み合わせではスカラーップ<sup>o</sup>まわりにも高応力集中部がみられるが、本節では計算の対象外とした。

#### 8.1I.3 亀裂進展挙動の解析

まず、亀裂なしでの応力分布を通常の有限要素法で解析する。その結果より、マンホールの縁の高応力集中部に亀裂が発生すると考え、更にmaximum stress criterionにより亀裂進展経路の第一次予測を行ない、亀裂進展ゾーンを決定する。

次に、亀裂進展ゾーン内に亀裂を発生、進展させ、亀裂材の種々の強度問題に重要な役割を成すK値を、特異性を含むサブストラクチャーを用いた有限要素法で求める。

##### (1) 亀裂発生個所の予測

外荷重条件を次のパラメーターR

$$R = \frac{(M_B)_2}{(M_B)_1 + (M_B)_2} \quad \text{----- (8.1I.1)}$$

で整理し、各Rについてマンホールの縁の高応力集中部を求めると図8.1I.6のようになる。帯状の中が各Rについての高応力集中部で、実斜線の部分の方が、破斜線のそれより応力集中度は高い。

従って各Rについて亀裂は実斜線の部分に発生すると考える。 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ は図8.1I.1で $(M_B)_1$ 、 $(M_B)_2$ は図8.1I.2で示したものである。

## (2) 亀裂進展の第一次予測(亀裂進展ゾーンの決定)

図 8.11.6 より、本節では代表的な以下の 4 通りの場合について計算を行った。

Case 1 ( $R=0.0$ )、Case 2 ( $R=1.0$ )、Case 3 ( $R=0.667$ )、Case 4 ( $R=0.875$ )。図 8.11.7 ~ 図 8.11.10 に各 Case の主応力図を示す。これらの結果をもとに maximum stress criterion により亀裂進展ゾーンを決定する。線の内部が亀裂進展ゾーンである。

## (3) 特異性を含むサブストラクチャーによる K 値解析

本節では、亀裂先端近傍に特異な応力変位分布を有する要素(これを特異性を含むサブストラクチャーと呼ぶことにする。)を用いて、Walsh の理論を一般化した特異要素法に基づいて K 値を求める。

図 8.11.41 に特異性を含むサブストラクチャーの形状を示す。サブストラクチャー内の破線で囲まれた部分が特異要素である。破線の外側は 8 個の普通要素から成っており、破線境界上の 9 節点において変位が連続としている。このようにサブストラクチャーの内部と外部を 9 個の節点で結ぶことによって、サブストラクチャー全体の剛性マトリックスを計算し、このサブストラクチャーを、全体として 9 個の節点を持った一つの有限要素として扱う。詳細は参考文献 1)、2)に譲ることとする。

次に、亀裂の進展方向の決定であるが、これは亀裂は最大主応力と直角方向に進展して行くという考え方に基づいた maximum stress criterion による。maximum stress criterion によれば、亀裂の進展方向  $\theta$  と応力拡大係数  $K_I$ 、 $K_{II}$  との間には次のような関係式がある。

$$K_I \sin \theta + K_{II} (3 \cos \theta - 1) = 0 \quad (8.11.2)$$

従って、 $K_I$  と  $K_{II}$  が求まれば進展方向は容易に計算できる。

また、亀裂の自動進展方法は、図 8.11.12 に示すように A 点にあった亀裂先端が  $\theta$  の方向に進む場合、線分  $lm$  との交点まで直線的に進むと仮定し、交点 B において再び次の進展方向を計算するという方法をとる。

以上の方法により求めた各 Case の K 値及び進展シミュレーションの結果を図 8.11.13 から図 8.11.40 に示す。

## 8.11.4 疲労亀裂伝播速度と残余寿命

疲労 1 サイクルにおける応力拡大係数の変化幅  $\Delta K$  と、亀裂の伝播速度  $da/dN$  との間には次に示す実験式がある。

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m \quad (8.11.3)$$

(8.11.3) 式において  $C$  と  $m$  は材料定数と考えられるパラメーターであり、北川らは  $C$  と  $m$  との間に次式

$$C = A / B^m \quad (8.11.4)$$

で示すような相関関係があり、鋼材について  $A = 0.5 \times 10^{-4}$ 、 $B = 5.5$  という値を求めている。

本報告では(8.11.3)式、(8.11.4)式を適用して外荷重条件の基本となる Case 1、Case 2 について疲労伝播速度と残余寿命を求めた。その際 Case 1 については図 8.11.13 より  $K_{II}$  値は  $K_I$  値に比べて小さいので  $\Delta K$  の計算は  $K_I$  値のみで行なった。その結果を図 8.11.41 から図 8.11.43 に示す。

## 8.11.5 緑亀裂をもつ半無限板による解との比較

Stallybrass は図 8.11.44 に示すような半無限板の緑亀裂に沿っての直応力分布を多項式で表わした時の、 $K_I$  値の実用式を導いているが、本節ではそれを適用して緑亀裂に沿う直応力分布を次のような多項式で表わした。

$$\sigma_N(x) = \sigma_0 \sum_{n=0}^4 C_n x^n \quad (8.11.5)$$

半無限板の縁亀裂に沿っての直応力分布を(8.11.5)式のように表現すると、 $K_I$  値は次の式で与えられる。

$$K_I = (1.1215 C_0 + 0.6829 C_1 \cdot a + 0.5255 C_2 \cdot a^2 + 0.4410 C_3 \cdot a^3 + 0.3868 C_4 \cdot a^4) \sigma_0 \sqrt{\pi a}$$

--- (8.11.6)

本節では(8.11.5)式、(8.11.6)式を亀裂なしの応力分布に適用して $K_I$  値の評価を試みた。その際、縁亀裂の全長は一本の直線では置換でき、 $K_I$  値の誤差が有限要素法による $K_I$  値と20%以内におさまる範囲とした。その結果を各Caseごとに、図8.11.13、図8.11.20、図8.11.27、図8.11.34に一点鎖線で示す。

8.11.6 試計算結果の検討および考察

亀裂進展シミュレーションの結果より、通常の有限要素法による亀裂なしの応力解析で、亀裂進展経路を十分予測することができ、Case 1、Case 3では亀裂長さがマンホールの半径の $\frac{1}{2}$ 以下の範囲で、Case 2、Case 4では亀裂長さがマンホールの半径以下の範囲で、高応力集中部の亀裂発生箇所においては法線方向に亀裂は進展することがわかる。

また、その範囲内では、縁亀裂をもつ半無限板による解法に基づく $K_I$  値は有限要素法によるそれと、20%以下の誤差範囲におさまっていることがわかる。

更に、I型あるいは、I型の影響の強い組み合わせでは、マンホールの半径の $\frac{1}{2}$ 以内を、II型あるいはII型の影響の強い組み合わせではマンホールの半径以内を、それぞれ亀裂長さの近似推定範囲とすると、図8.11.42と図8.11.43の残余寿命の結果より亀裂が亀裂長さの最大近似推定範囲まで進展すると残余寿命は、Case 1では、たとえば亀裂長さが20mmの時の約0.4%に、Case 2では約0.1%になっていることがわかる。

以上のことを考え合わせると、亀裂長さの近似推定範囲内では亀裂なしの応力解析で、マンホールの縁の高応力集中部に亀裂を発生させ、その箇所において法線方向に亀裂を仮想進展させ、縁亀裂をもつ半無限板による解法で、十分残余寿命を評価できる有効な範囲の $K_I$  値を求めることができると思われる。

本来、この種の解析に際しては三次元的取り扱いが必要であり、今後はスカラーラップ<sup>9</sup>から生じる亀裂や、亀裂が境界に接近した場合の挙動等、実験を考慮し、別の面からのアプローチが必要かと思われる。

また、このような構造の局部的損傷を考えると重要なことは基本方針をどこにおくかということである。即ち、亀裂を発生させない構造を考えるのか、それとも亀裂が発生してもそれが重大な事故に結びつかない限り、これを容認するのか。また、どこまで容認できるのかということである。これにより、自と対策の方法も違ってくるだろう。

#### 8.11.7 ま と め

ダブルヘル構造部の破壊強度試算を行ない、次の所見を得た。

- (1) 通常の有限要素法による亀裂なしの応力解析で、亀裂の発生・進展の第一次予測が十分に行なえた。
- (2) (1)の結果より特異性を含むサブストラクチャーを用いた有限要素法で $K$  値を求めた。
- (3) (2)の結果より疲労亀裂伝播速度と残余寿命を求めた。
- (4) 亀裂なしの応力分布に適用した、縁亀裂をもつ半無限板による解法の有効性を確認し、その有効性を満足する亀裂長さの近似推定範囲を求めた。
- (5) 今後問題点としては、スカラーラップ<sup>9</sup>から生じる亀裂や、亀裂が境界に接近した場合の挙動の解析が必要である。

## 参 考 文 献

- 1) 樋口、川原、近藤、"特異性を含むサブストラクチャーによる応力拡大係数の解析"、日本造船学会論文集第135号(1974)、PP327~335
- 2) 樋口、川原、近藤、栗原、"2次元亀裂の進展シミュレーション"、日本造船学会論文集第139号(1976)、PP233~238
- 3) 越賀、川原、"疲労亀裂伝播に着目した設計基準に関する二、三の考察"、日本造船学会論文集第133号(1973)、PP249~256
- 4) 石田、"亀裂の弾性解析と応力拡大係数"、培風館

$E = 21000 \text{ kg/mm}^2$   
 $\nu = 0.3$

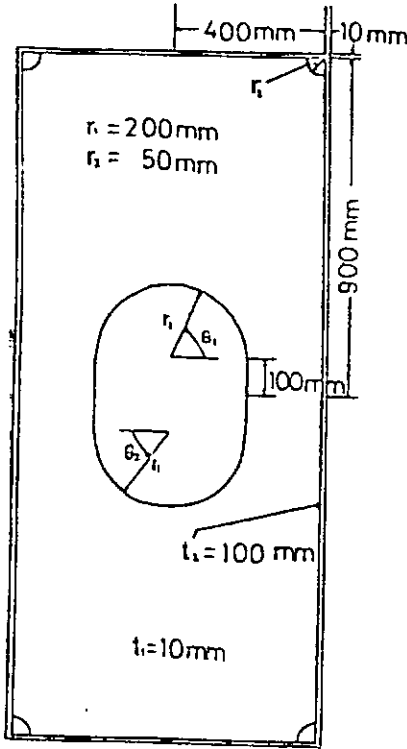


図 8.1.1 試計算対象構造物寸法図

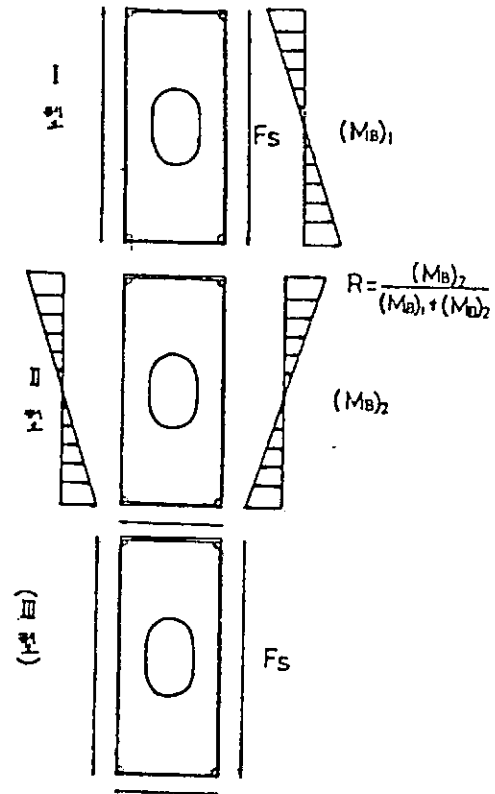


図 8.1.2 外荷重条件

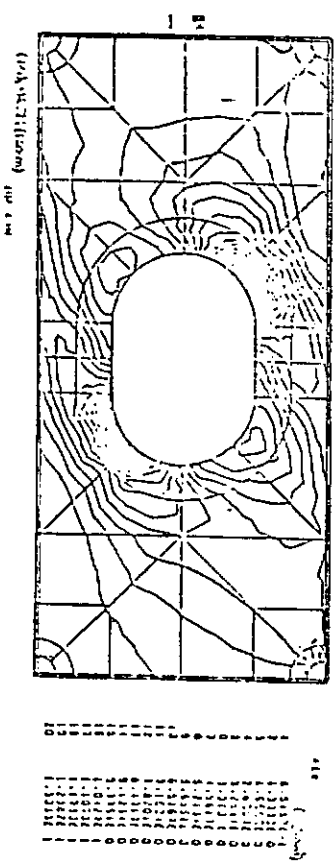


図 8.1.3 Max. Principal Stress Contour

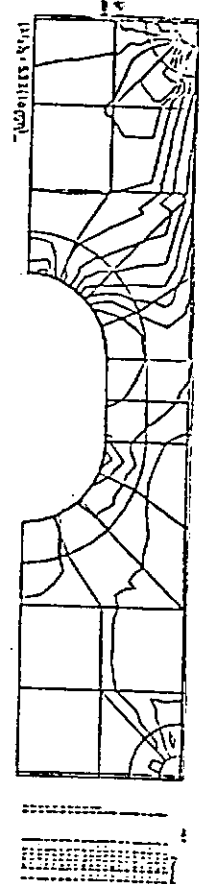
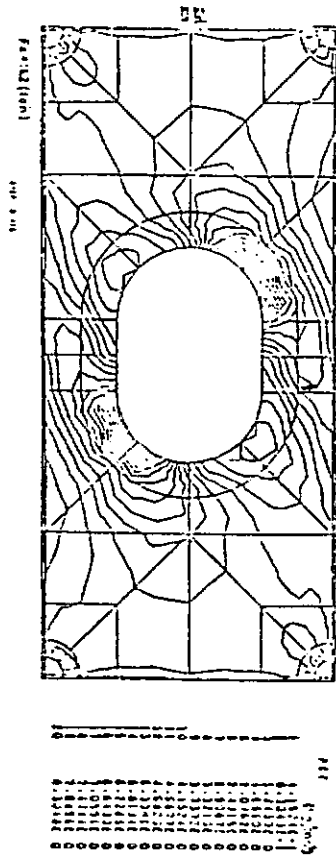
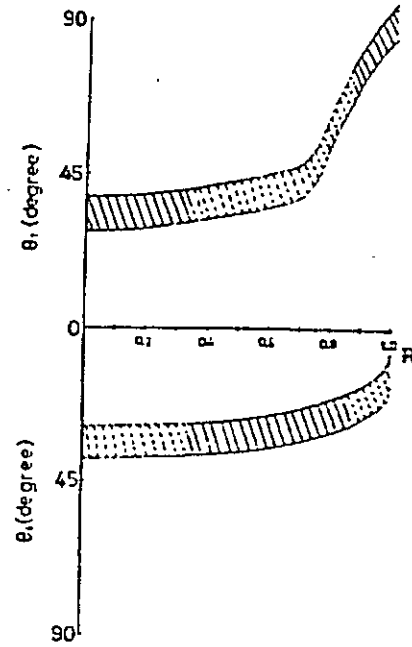


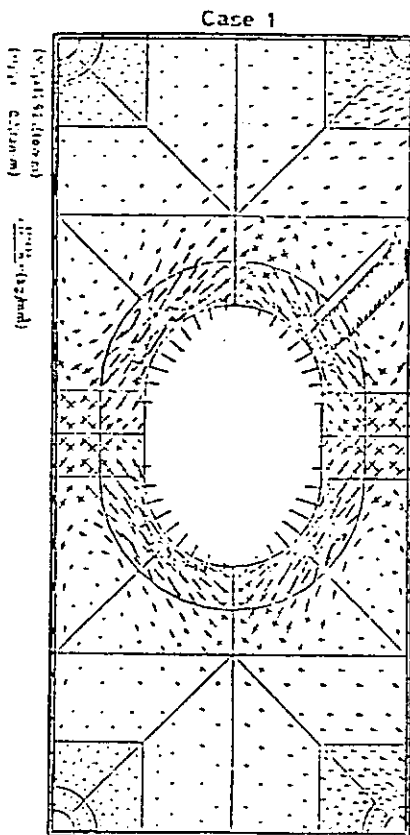
図 8.1.4 Max. Principal Stress Contour



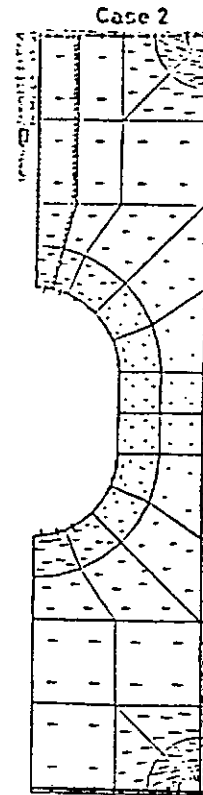
8.11.5 Max. Principal Stress Contour



8.11.6 High Stress Concentration Zone



8.11.7 Principal Stress Diagram



8.11.8 Principal Stress Diagram

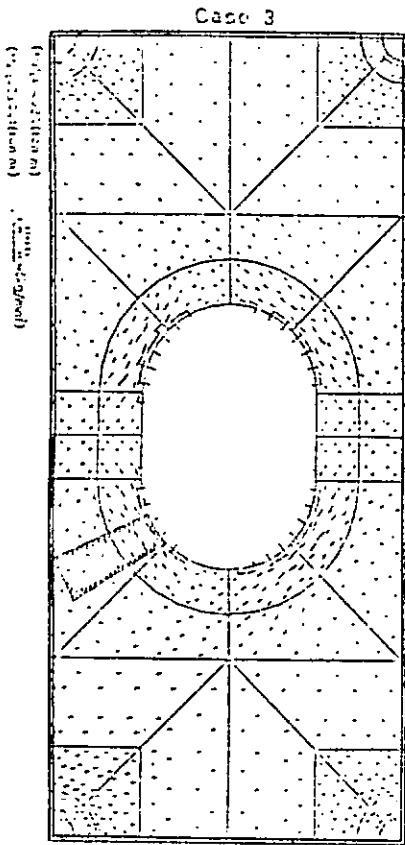


図 8.11.9 Principal Stress Diagram

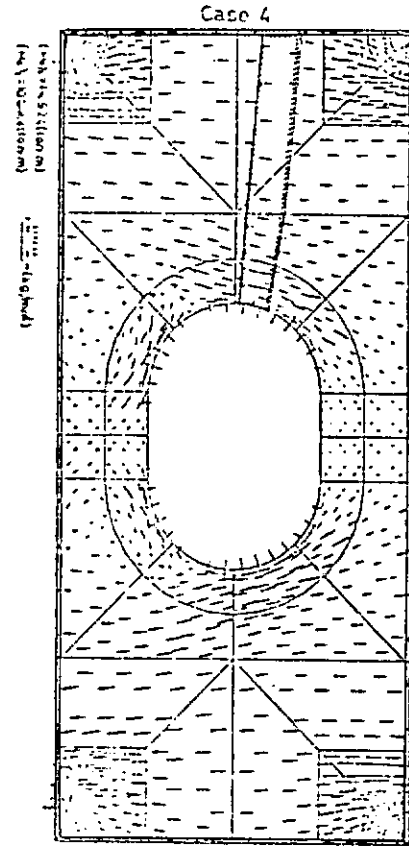


図 8.11.10 Principal Stress Diagram

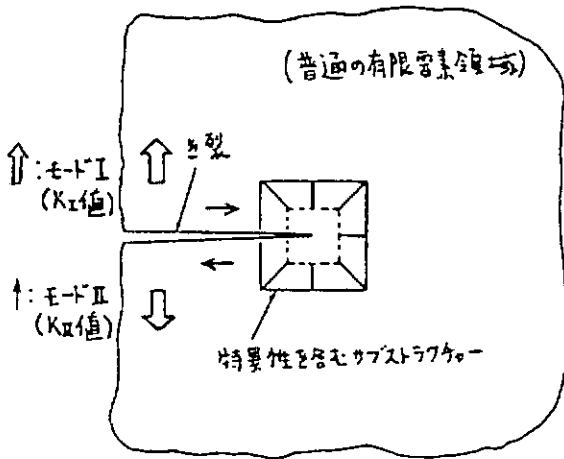


図 8.11.11 特異性を含むサブストラクチャー

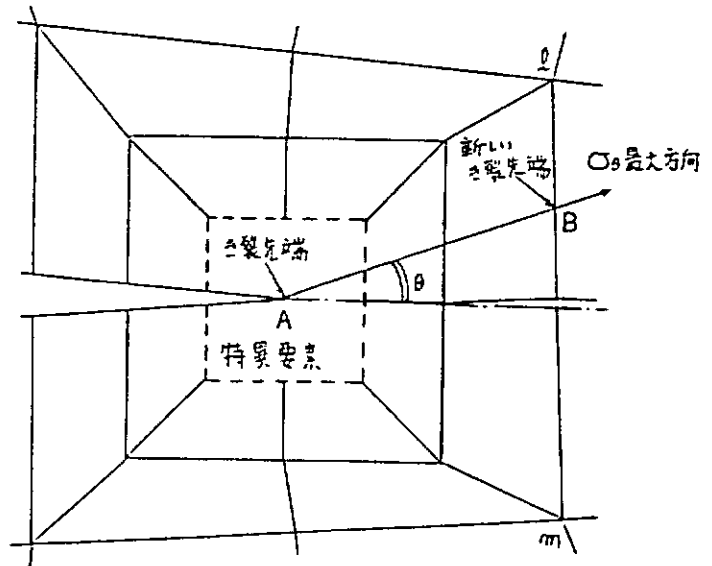


図 8.11.12 亀裂の自動進展

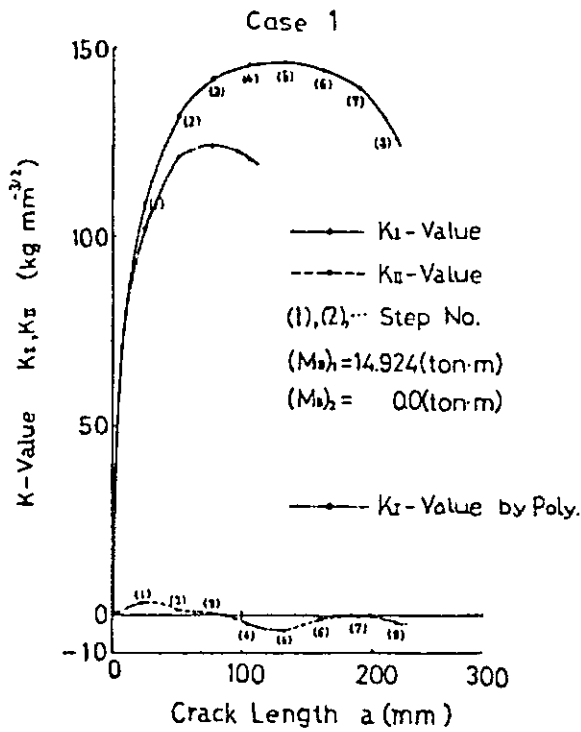


図 8.11.13 Correlation between  $\bar{a}$  and  $K_I$ ,  $K_{II}$

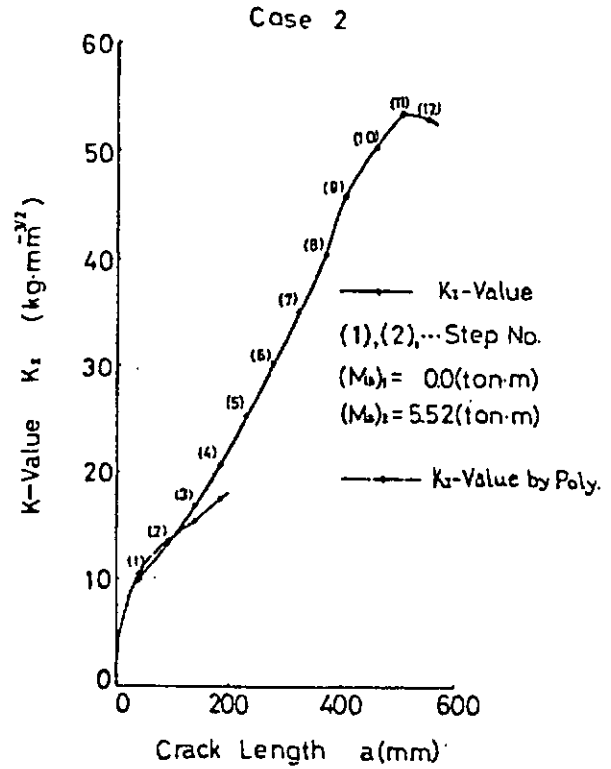


図 8.11.20 Correlation between  $\bar{a}$  and  $K_I$

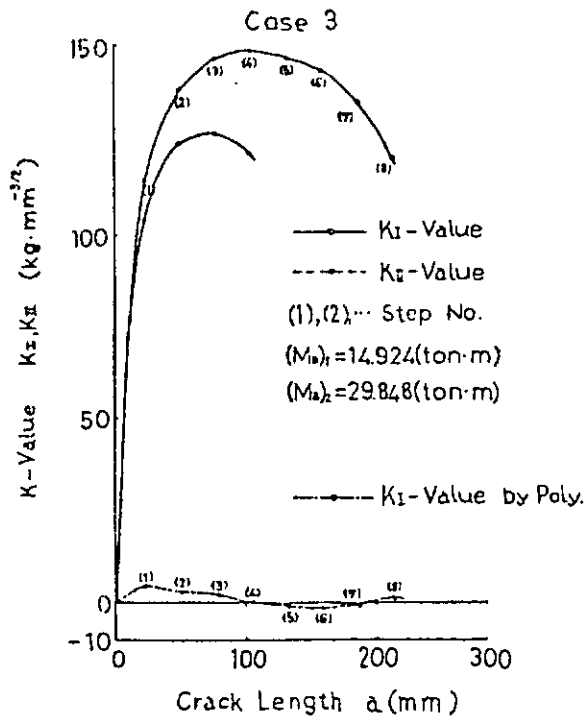


図 8.11.27 Correlation between  $\bar{a}$  and  $K_I$ ,  $K_{II}$

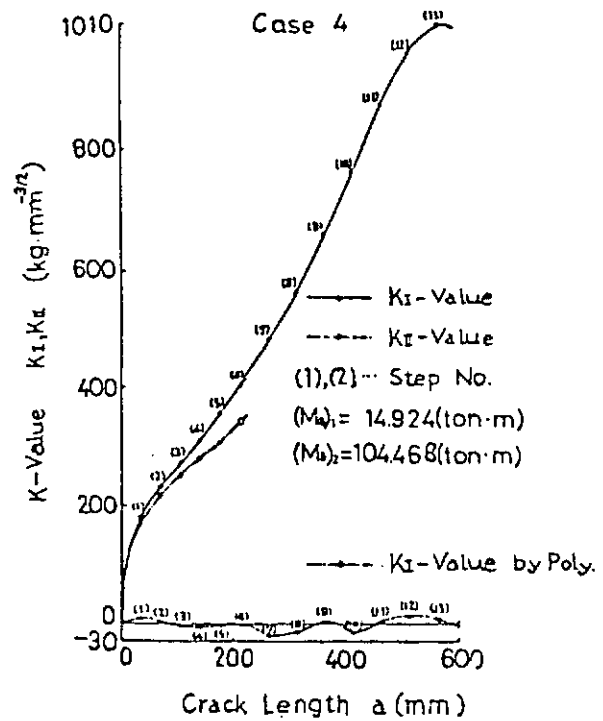
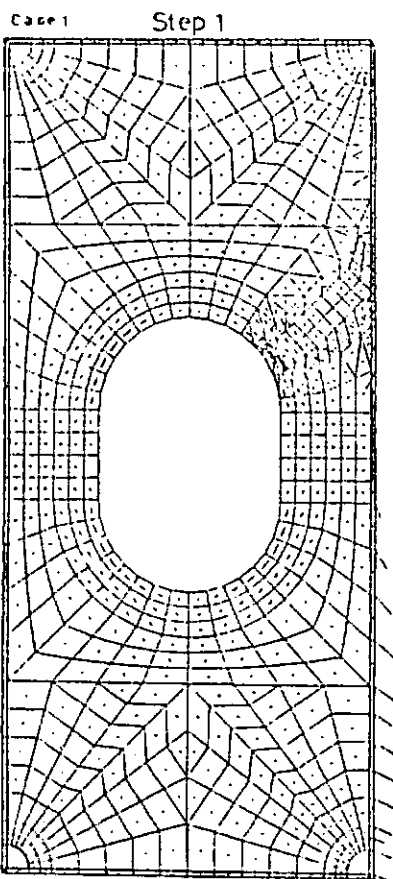
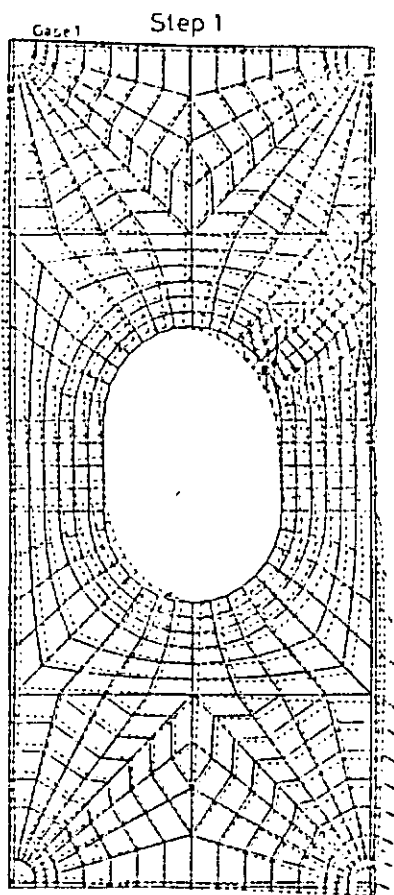


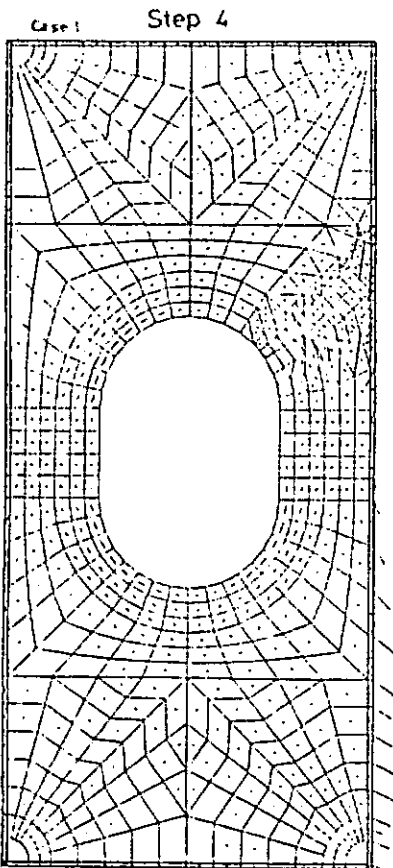
図 8.11.34 Correlation between  $\bar{a}$  and  $K_I$ ,  $K_{II}$



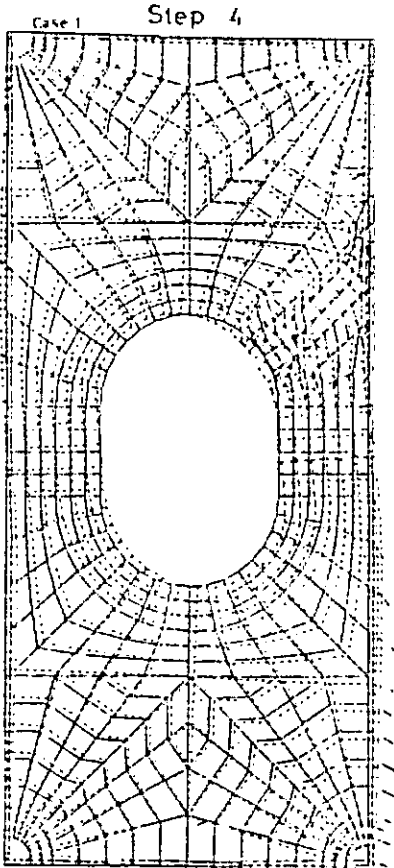
8.11.14 Principal Stress Diagram



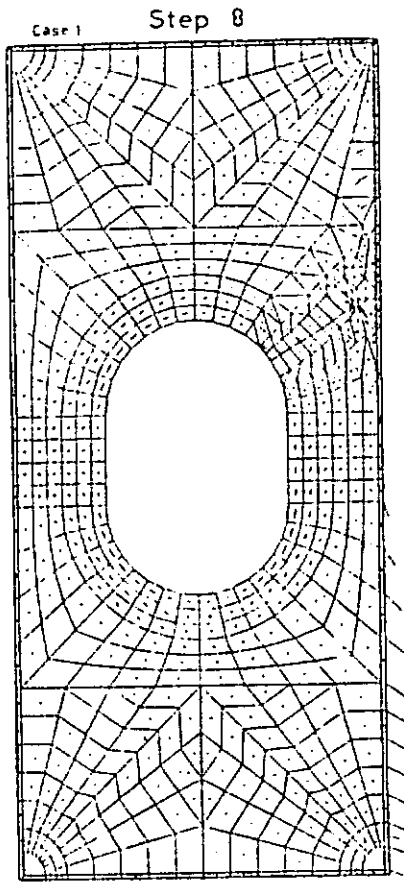
8.11.15 Displacement Diagram



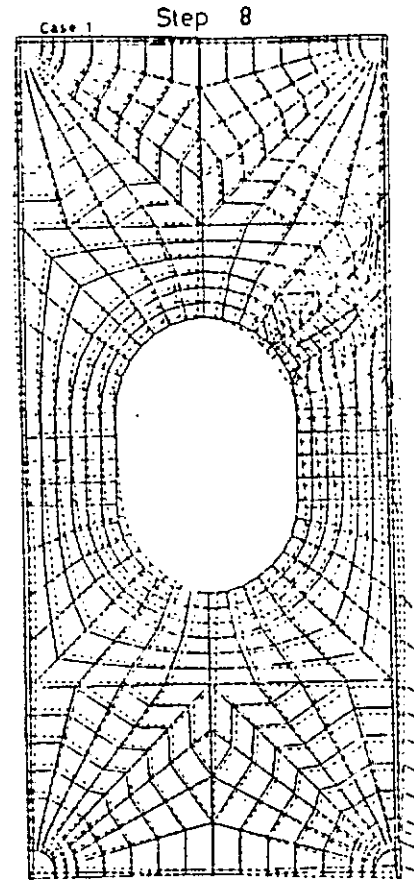
8.11.16 Principal Stress Diagram



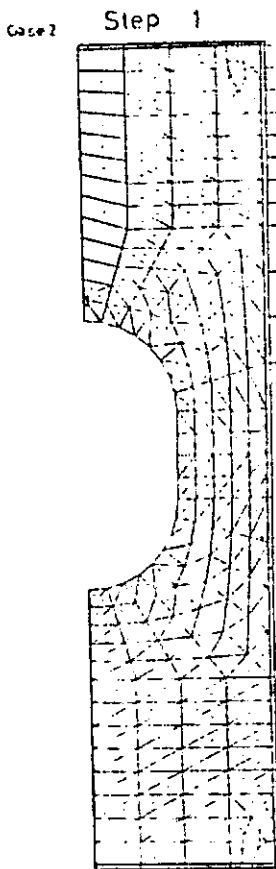
8.11.17 Displacement Diagram



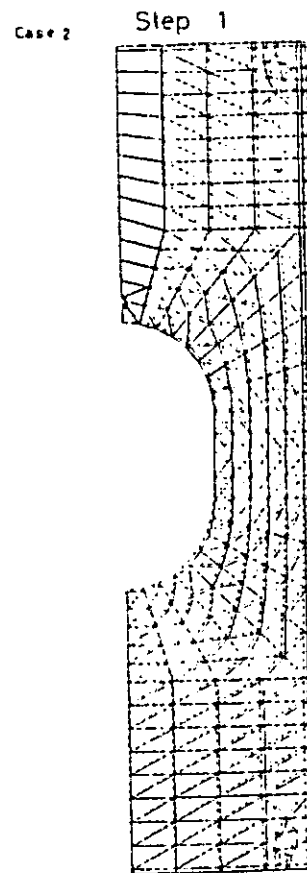
8.11.18 Principal Stress Diagram



8.11.19 Displacement Diagram



8.11.21 Principal Stress Diagram



8.11.22 Displacement Diagram

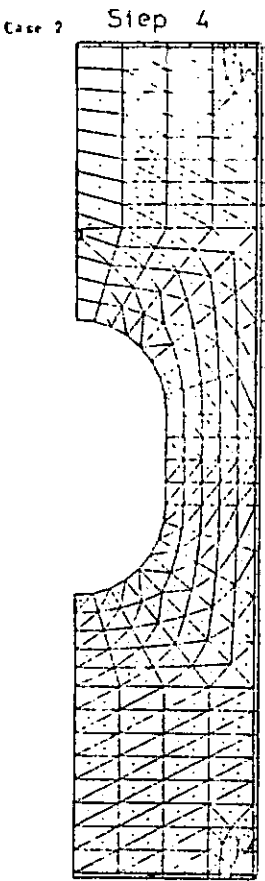


图 8.11.23 Principal Stress Diagram

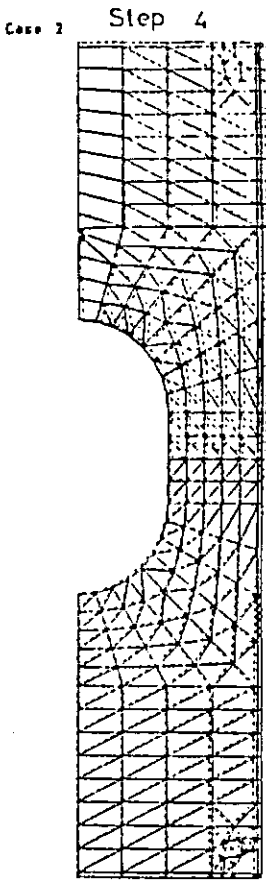


图 8.11.24 Displacement Diagram

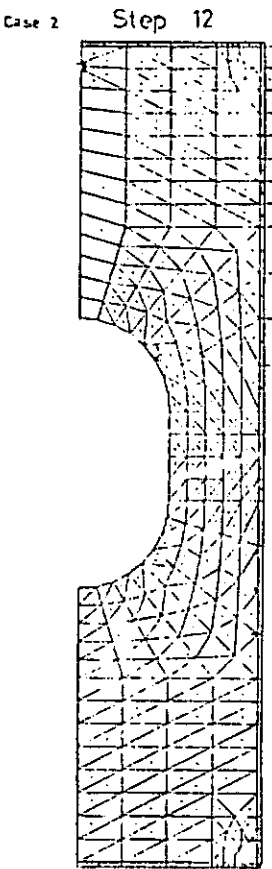


图 8.11.25 Principal Stress Diagram

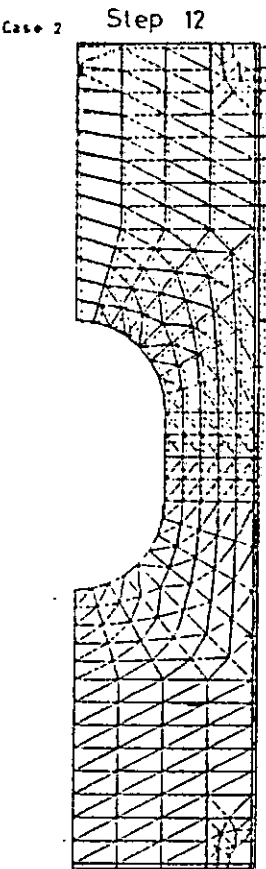
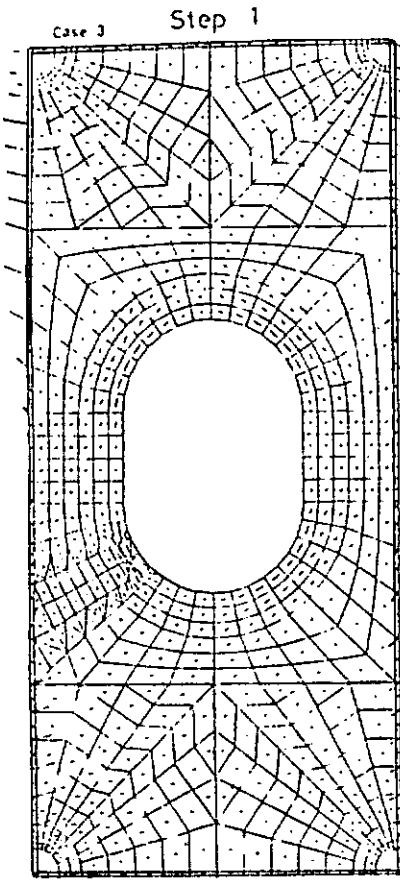
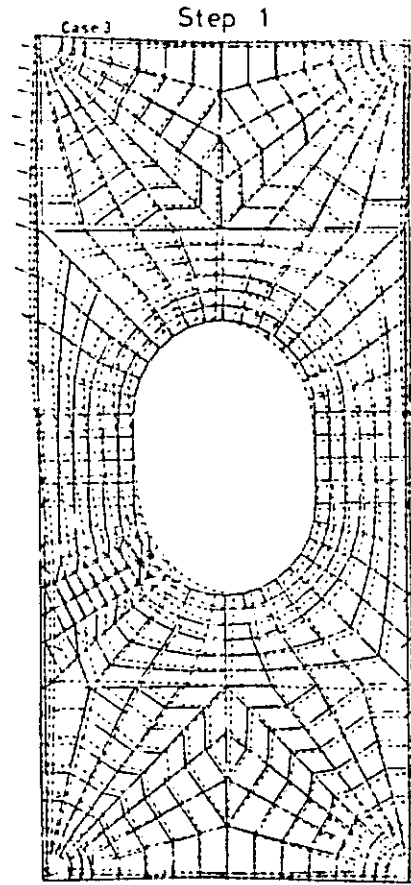


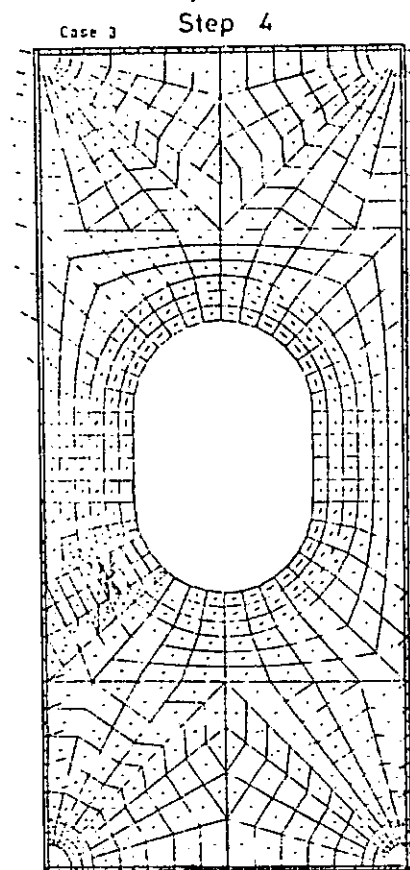
图 8.11.26 Displacement Diagram



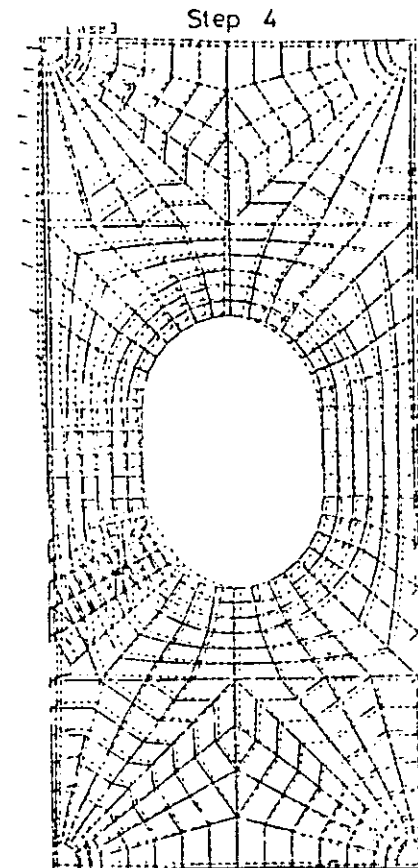
8.11.28 Principal Stress Diagram



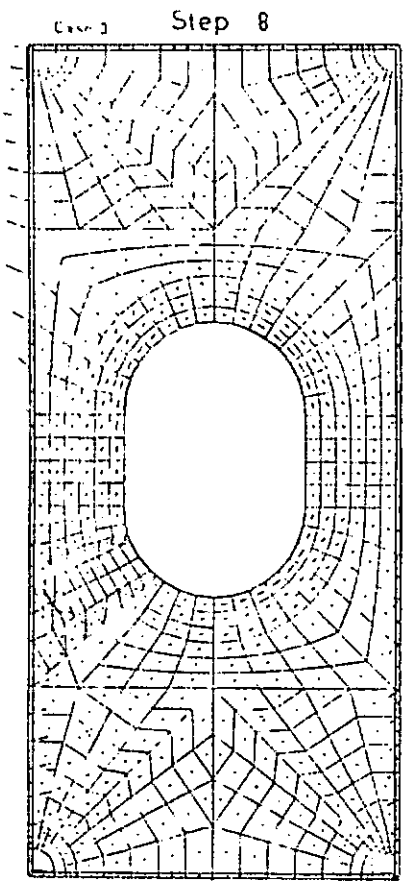
8.11.29 Displacement Diagram



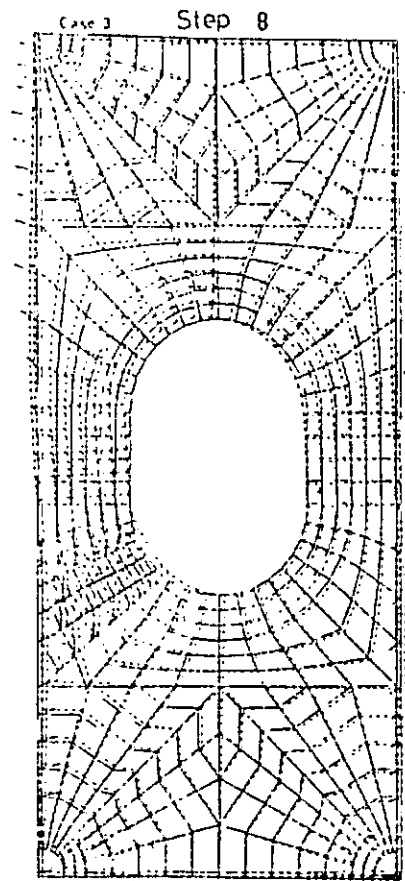
8.11.30 Principal Stress Diagram



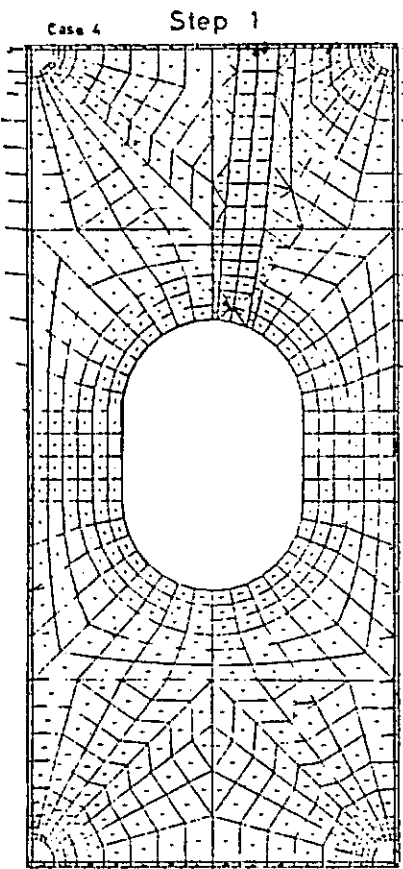
8.11.31 Displacement Diagram



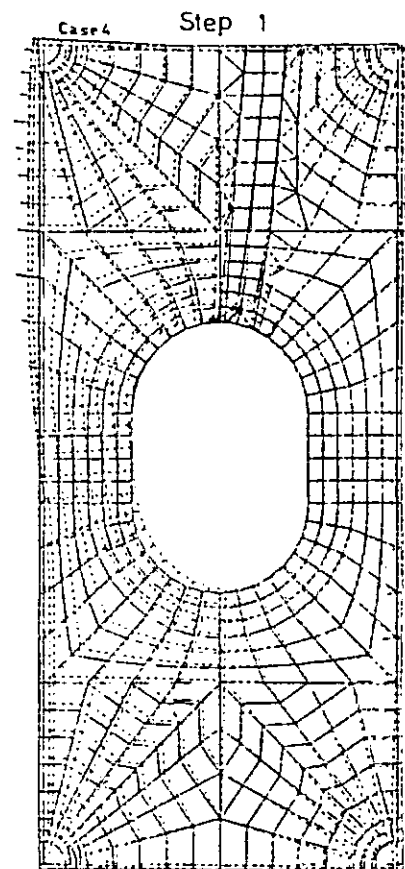
8.11.32 Principal Stress Diagram



8.11.33 Displacement Diagram



8.11.35 Principal Stress Diagram



8.11.36 Displacement Diagram

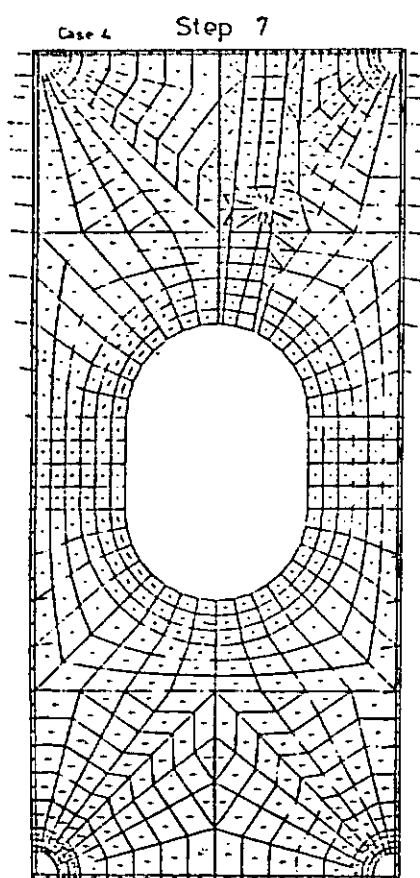


图 6.11.37 Principal Stress Diagram

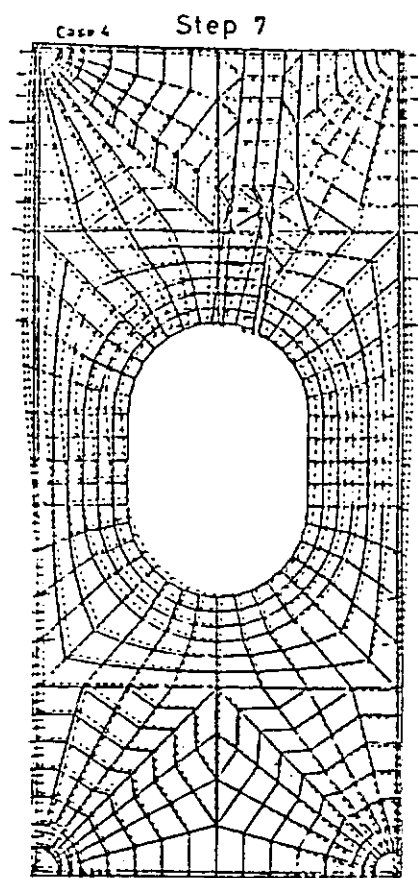


图 8.11.38 Displacement Diagram

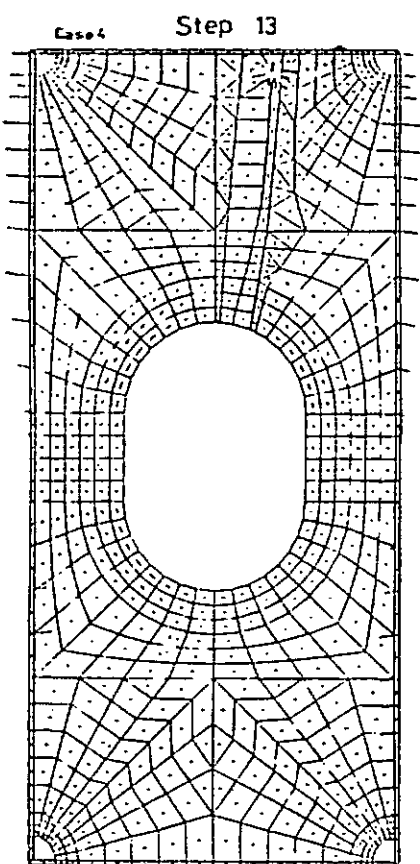


图 8.11.39 Principal Stress Diagram

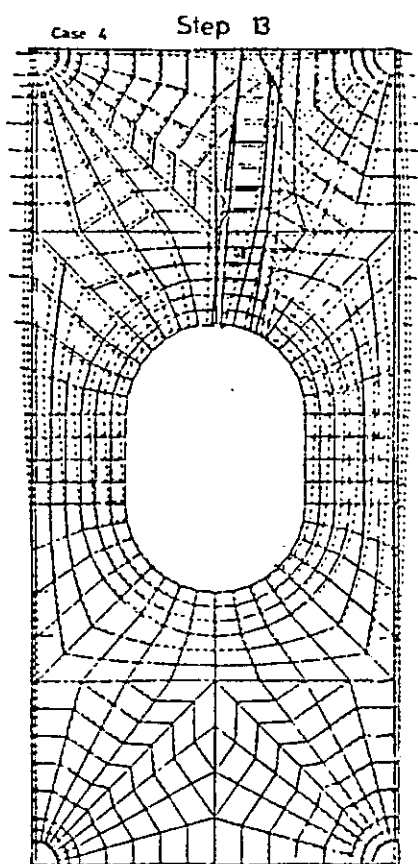


图 8.11.40 Displacement Diagram

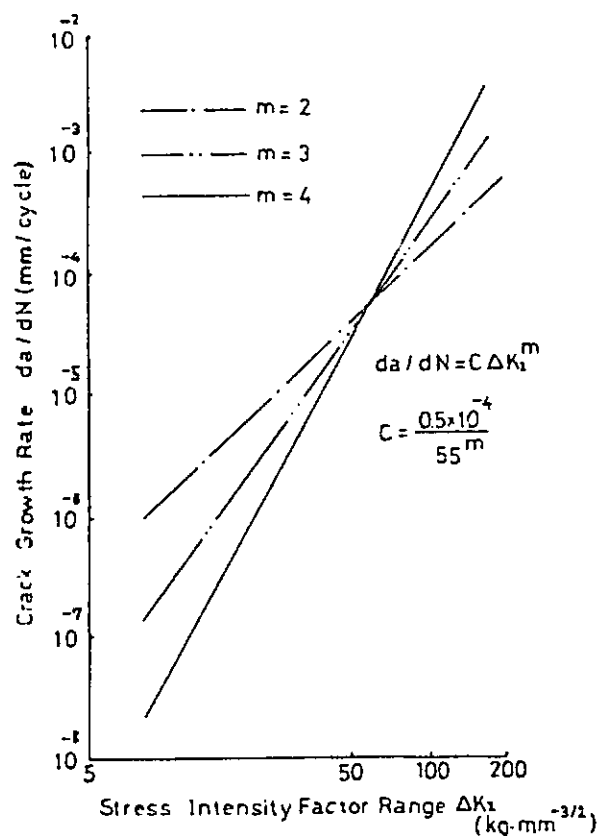


図 8.11.41 Correlation between  $\Delta K_I$  and  $da/dN$

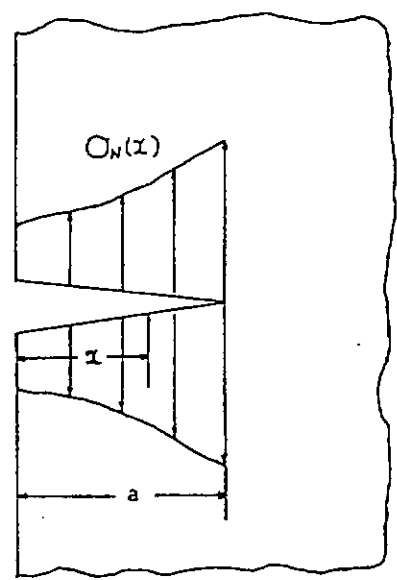


図 8.11.44 繰返し裂をもつ半無限板

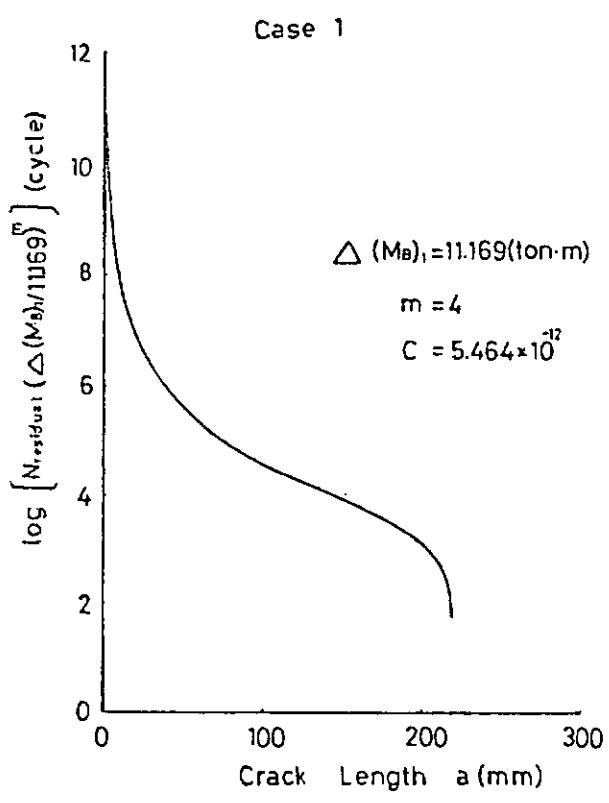


図 8.11.42 Correlation between  $a$  and  $N_{\text{residual}}$

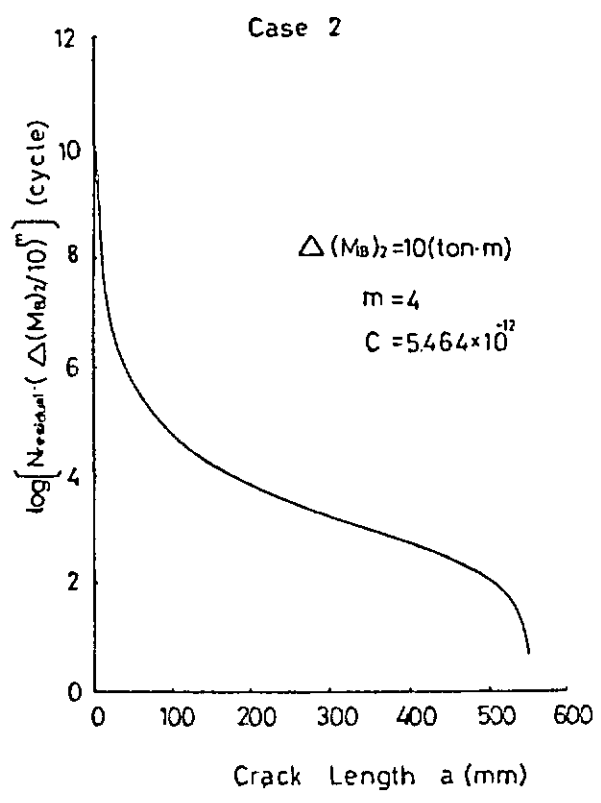


図 8.11.43 Correlation between  $a$  and  $N_{\text{residual}}$

## 8.1Ⅱ ダブルハル構造部の試計算（その2）

— 直交交差部材に近接する亀裂の伝播挙動の解析 —

### 8.1Ⅱ.1 目 的

その1において、ダブルハル構造部の試計算<sup>1)</sup>においてマシ・ホールのあるウェブ材に生じた亀裂が周辺の直交交差材に近接してきた時の挙動に不明な点が多く残された。又、直交交差材に斜めに進入してくる亀裂の直交交差材近傍での伝播経路を求めた例が今までにほとんどみられない。

従って本報告ではウェブ、フランジよりなる直交交差部材を例にとりウェブ材に設定した欠陥よりフランジ部に向かって斜めに伝播する亀裂の挙動を2次元モデルで解析する。

### 8.1Ⅱ.2 試計算対象構造物と外荷重条件

本報告で取り扱う試計算対象構造物と外荷重条件を図8.1Ⅱ.1に示す。Case 1、Case 2ともウェブ、フランジよりなる直交交差部材を2次元モデル化したものである。ウェブ材のヤング係数を $E$ 、ポアソン比を $\nu$ 、板厚を $t$ 、フランジ部のヤング係数を $E'$ 、ポアソン比を $\nu'$ 、板厚を $t'$ （実際はウェブ材に垂直方向のフランジ部の幅であるが、その1と同様に特異性を含むサブストラクチャーを用いた2次元の有限要素法<sup>1)</sup>で解析を行なうのでこれを板厚と考える。実際の板厚は $W'$ に相当する。）とし、 $L/W=2.0$ 、 $W'/W=0.1$ 、 $E'/E=1.0$ 、 $\nu'/\nu=1.0$ 、 $t'/t=10.0$ のもとで $a_0/W=0.75$ の大きさの欠陥を設定しそこからフランジ部に向かって角度 $\beta$ をもって伝播する亀裂の挙動を解析する。

Case 1 は全周辺 free の境界条件のもとで引張り応力 $\sigma_1$ のみが作用する場合であり、Case 2 は3辺 free 1辺 roller の境界条件のもとで引張り応力 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ の組み合わせ応力（応力比 $\gamma=\sigma_2/(\sigma_1+\sigma_2)$ ）が作用する場合である。

### 8.1Ⅱ.3 直交交差部材近傍での亀裂伝播挙動の解析

図8.1Ⅱ.2に示すように長さ $a_0$ の初期欠陥から角度 $\beta$ をもってフランジ部へ亀裂を順次伝播させ、計算点 $\alpha$ （ $\alpha$ は亀裂先端の位置を表わす。 $\alpha=(a-a_0)/(W-a_0)$ ）において maximum stress criterion により亀裂伝播方向 $\theta$ を求め、その位置まで角度 $\beta$ で伝播してきた亀裂のそれから以後の伝播方向 $\theta$ の傾向を探る。

数値計算は前年度と同様、特異性を含むサブストラクチャーを用いた2次元の有限要素法を用い、 $W=100$  mm、 $E=21000$  Kg/mm<sup>2</sup>、 $\nu=0.3$ 、 $t=10$  mm、 $\sigma_1=1.0$  Kg/mm<sup>2</sup>、plane stress conditions のもとで表8.1Ⅱ.4に示すように18ケースについて解析を試みた。

結果を図8.1Ⅱ.3～図8.1Ⅱ.40、表8.1Ⅱ.2～表8.1Ⅱ.19に示す。K値の単位はKg/mm<sup>1.5</sup>、 $\theta$ の単位はdegreeである。なお図8.1Ⅱ.39、図8.1Ⅱ.40において $\theta=\beta+\theta$ である。

### 8.1Ⅱ.4 直交交差部材近傍での亀裂伝播経路の推定

8.1Ⅱ.3項においてフランジ部に向かって斜めに伝播してくる亀裂の伝播挙動が明らかにされたので、角度 $\beta$ で $\alpha$ まで亀裂が伝播してきた時のそれから以後の伝播経路を推定する。

#### (1) 主応力方向による推定

いままで通り亀裂は最大主応力に直角な方向に伝播すると考えて主応力分布より伝播経路を推定する。

#### (2) 複数個の方向固定の解による内挿

同一荷重条件下で方向を固定された亀裂の解（ $\beta=30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ ）が得られているので、これらの解を各ステップごとに内挿を行ない伝播経路を推定する。

(1)、(2)の推定方法により求めた亀裂伝播経路に差異はあまりみられないので、内挿ができる範囲は後者を、できない範囲は前者を用いて亀裂伝播経路を近似的に求めた。

結果を図8.1Ⅱ.41～図8.1Ⅱ.46に示す。

### (3) 亀裂伝播径路の検証

(1), (2)より推定した亀裂伝播径路がどの程度有効であるか、具体的に3ケースについて検証を行なった。

結果を図8.1Ⅱ.47～図8.1Ⅱ.52, 表8.1Ⅱ.20～表8.1Ⅱ.22に示す。破線が(1), (2)より求めた伝播径路であり実線が有限要素法で実際に解析した結果である。

### 8.1Ⅱ.5 試計算結果の検討および考察

8.1Ⅱ.3の結果より亀裂が直交交差材に近接してきても伝播方向 $\theta$ は極端に変化せず、連続的に変化してくると思われる。又境界条件の違いによる伝播方向 $\theta$ の差異は全周辺 free の場合が、より大きな $\theta$ の値で亀裂は直交交差材に向かって伝播して行くと考えられる。

亀裂伝播径路の簡便な推定法には前年度行なった亀裂なしの主応力分布より推定する方法があるが、これには明らかに限界がある。8.1Ⅱ.4(3)の結果より亀裂が直交交差材に近接してきた場合は、方向固定の亀裂の解による推定法が有効であると考えられる。

図8.1Ⅱ.53は $\alpha=1.0$ すなわち亀裂がフランジ部にぶつかった時の $\theta=0$ となるような角度 $\beta$ と $\gamma$ の関係を図8.1Ⅱ.39と図8.1Ⅱ.40とにより外挿して求めたものであるが $\theta$ の定義より $\alpha=1.0$ においては $\theta>0$ の時、亀裂はフランジ部に進入する方向へ進むものと考えられ $\theta<0$ の時、亀裂はフランジ部から離れる方向へ進むものと考えられる。従って図8.1Ⅱ.53において曲線の上側の領域に属する亀裂はフランジ部に進入する方向へ進み、下側の領域に属する亀裂はフランジ部から離れる方向へ進むものと考えられる。

図8.1Ⅱ.53においては $\sigma_2>0$ の場合であるが、 $\sigma_2<0$ の時、すなわちウェブ材を圧縮するような荷重が作用する時は $\beta$ はさらに小さな値をとると考えられる。

前年度解析したマン・ホールより生じる亀裂の解における主応力分布、 $K_I$ と $K_{II}$ との比を調らべ、本年度で行なった解析結果よりマン・ホールより生じた亀裂が周辺の直交交差材に近接してきた時はCase 1 ( $R=0.0$ ), Case 3 ( $R=0.667$ ), Case 4 ( $R=0.875$ )とも $\beta$ が $50^\circ$ 以上の領域に相当し、荷重条件は $\sigma_2<0$ の時と考えられるので3ケースとも周辺の直交交差材に進入する方向へ進むものと考えられる。

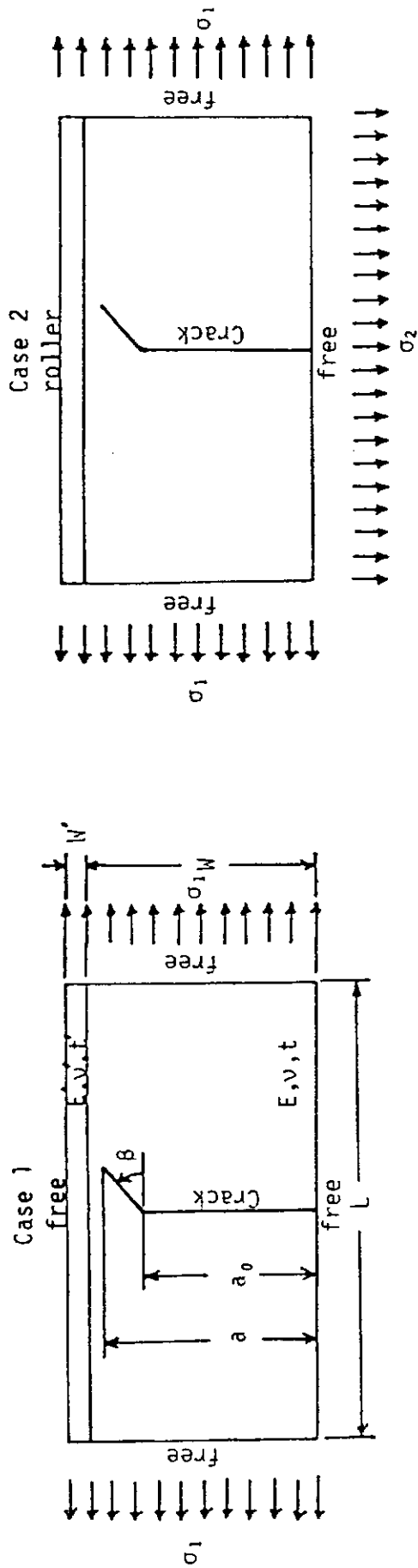
### 8.1Ⅱ.6 ま と め

直交交差部材に近接する亀裂の伝播挙動の解析を行ない次の所見を得た。

- (1) 亀裂が直交交差材に近接してきても亀裂伝播方向に極端な変化はみられない。
- (2) 直交交差部材近傍での亀裂伝播径路の推定には方向固定の亀裂の解を用いる方法が有効である。
- (3) 亀裂が直交交差材に近接しつづけるための亀裂方向と応力比に関する条件を求めた。
- (4) その1で行なったダブルハルレ構造部の試計算においては全ケースとも周辺の直交交差材に近接しつづけると考えられる。

### 参 考 文 献

- 1) 日本造船研究協会第169研究部会, “船体構造の環境管理制御設計に関する研究”, 日本造船研究協会資料№297, 昭和53年3月



## 8.11.1 Models for the Present Analysis

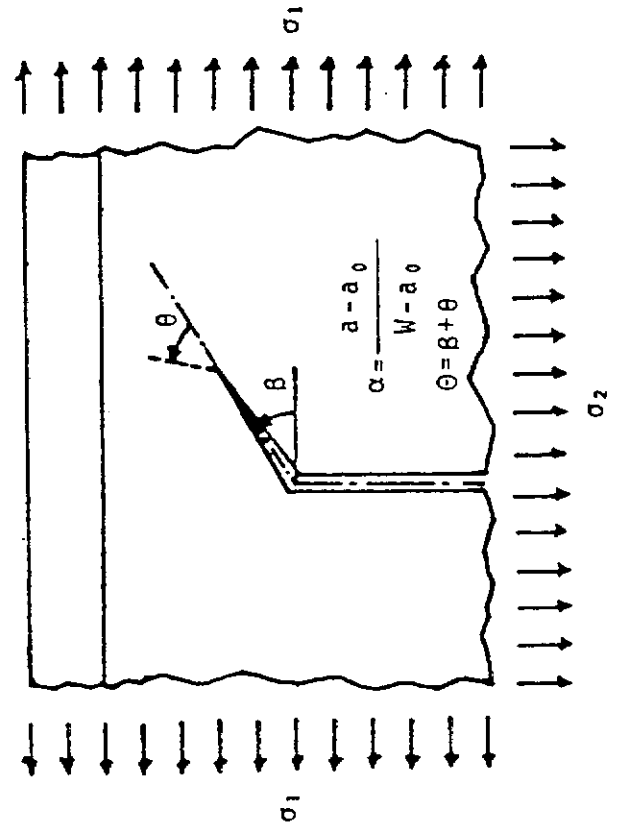


Fig. 1.2 Max.  $\sigma_0$  Direction

## 表8.1Ⅱ.1 Examples of Calculation

| Case No. | $B$ (°) | $\sigma_1 : \sigma_2$<br>(%) |
|----------|---------|------------------------------|
| 1        | 1       |                              |
|          | 2       | 1 0                          |
|          | 3       | (0.0)                        |
| 2        | 1       |                              |
|          | 2       | 1 0                          |
|          | 3       | (0.0)                        |
|          | 1       |                              |
|          | 2       | 1 0.5                        |
|          | 3       | (1/3)                        |
|          | 1       |                              |
|          | 2       | 1 1                          |
|          | 3       | (0.5)                        |
| 4        | 1       |                              |
|          | 2       | 1 2                          |
|          | 3       | (2/3)                        |
| 5        | 1       |                              |
|          | 2       | 0 1                          |
|          | 3       | (1.0)                        |

$$\gamma_2 = \frac{\sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2}$$

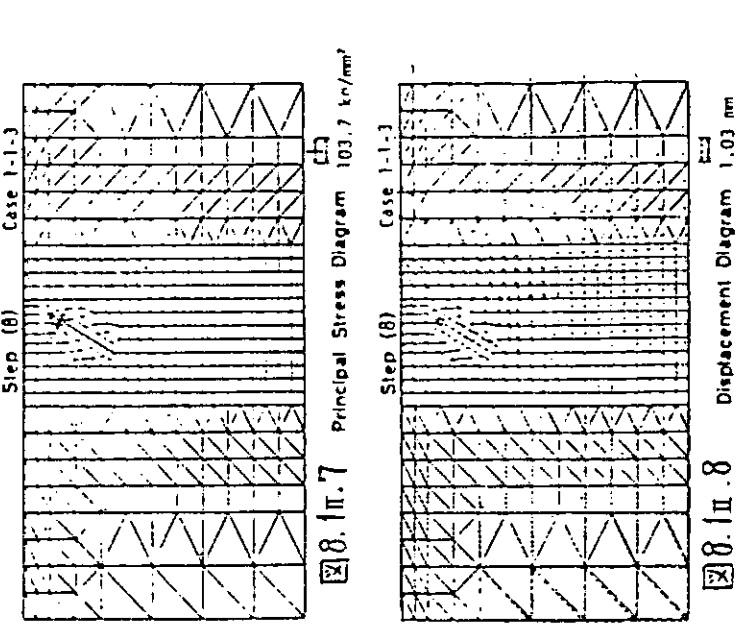
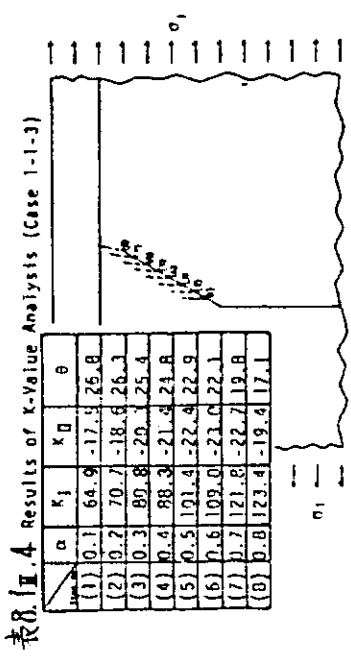
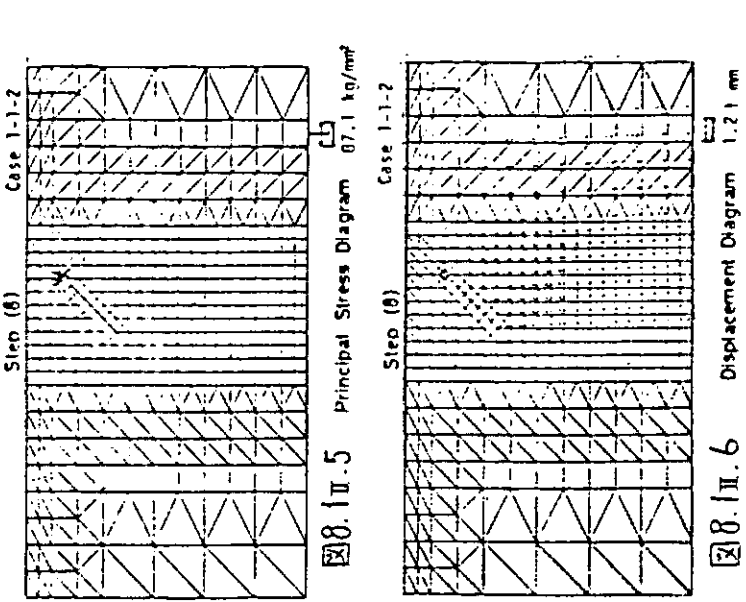
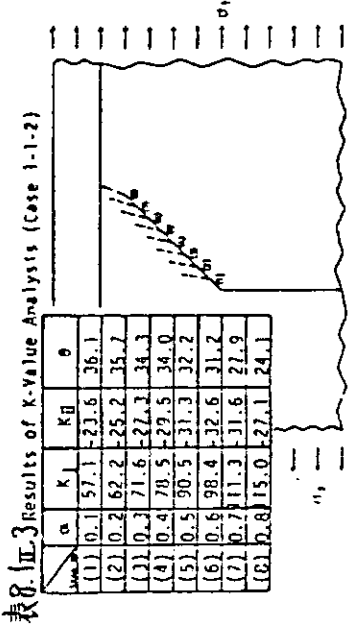
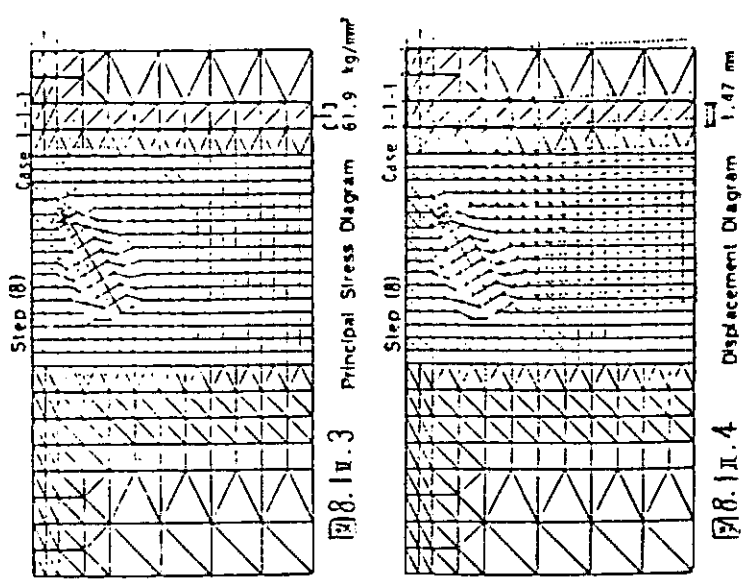
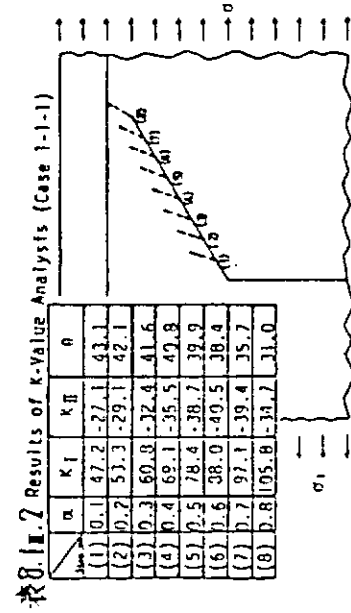


表8.11.5 Results of K-Value Analysis (Case 2-1-1)

|     | $\alpha$ | $K_I$ | $K_{II}$ | $\theta$ |
|-----|----------|-------|----------|----------|
| (1) | 0.1      | 14.4  | -6.4     | 37.7     |
| (2) | 0.2      | 15.6  | -5.6     | 32.9     |
| (3) | 0.3      | 17.1  | -5.0     | 28.7     |
| (4) | 0.4      | 18.4  | -4.2     | 23.7     |
| (5) | 0.5      | 19.9  | -3.3     | 18.1     |
| (6) | 0.6      | 21.3  | -2.1     | 11.1     |
| (7) | 0.7      | 22.6  | -0.6     | 3.0      |
| (8) | 0.8      | 24.0  | 1.3      | -6.3     |

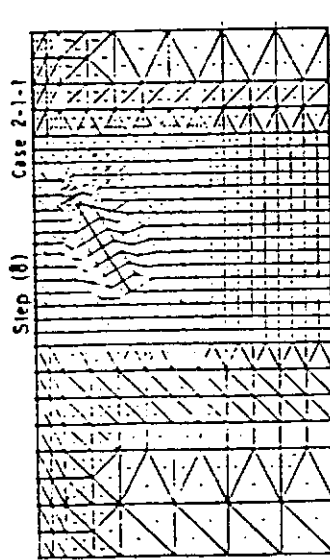
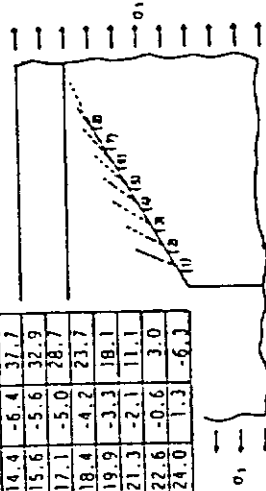
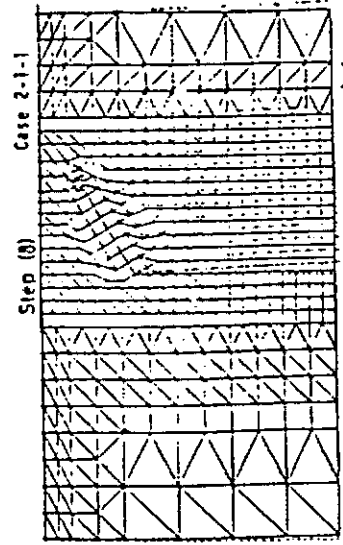
图8.11.9 Principal Stress Diagram 18.1 kg/mm<sup>2</sup>

图8.11.10 Displacement Diagram 0.10 mm

表8.11.6 Results of K-Value Analysis (Case 2-1-2)

|     | $\alpha$ | $K_I$ | $K_{II}$ | $\theta$ |
|-----|----------|-------|----------|----------|
| (1) | 0.1      | 16.5  | -5.6     | 31.9     |
| (2) | 0.2      | 16.6  | -4.8     | 28.5     |
| (3) | 0.3      | 17.7  | -4.1     | 24.0     |
| (4) | 0.4      | 17.8  | -3.4     | 20.3     |
| (5) | 0.5      | 18.8  | -2.6     | 15.1     |
| (6) | 0.6      | 18.7  | -1.7     | 10.0     |
| (7) | 0.7      | 19.5  | -0.5     | 3.0      |
| (8) | 0.8      | 18.8  | 0.8      | -5.0     |

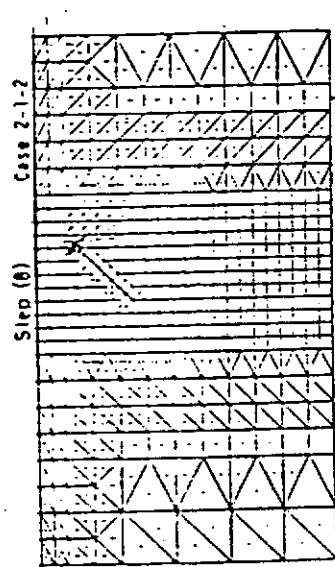
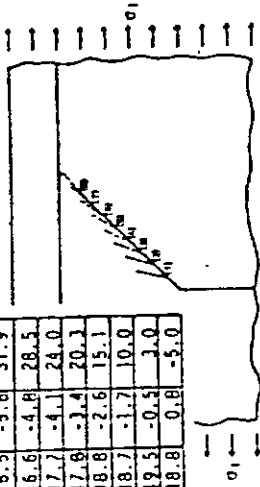
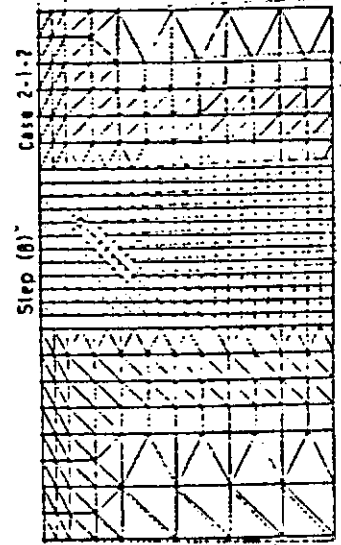
图8.11.11 Principal Stress Diagram 16.1 kg/mm<sup>2</sup>

图8.11.12 Displacement Diagram 0.07 mm

表8.11.7 Results of K-Value Analysis (Case 2-1-3)

|     | $\alpha$ | $K_I$ | $K_{II}$ | $\theta$ |
|-----|----------|-------|----------|----------|
| (1) | 0.1      | 18.0  | -4.1     | 23.5     |
| (2) | 0.2      | 17.8  | -3.5     | 20.8     |
| (3) | 0.3      | 18.4  | -3.0     | 17.6     |
| (4) | 0.4      | 18.2  | -2.4     | 14.3     |
| (5) | 0.5      | 18.7  | -1.7     | 10.1     |
| (6) | 0.6      | 18.1  | -1.0     | 6.2      |
| (7) | 0.7      | 18.3  | -0.3     | 1.6      |
| (8) | 0.8      | 17.1  | 0.7      | -4.7     |

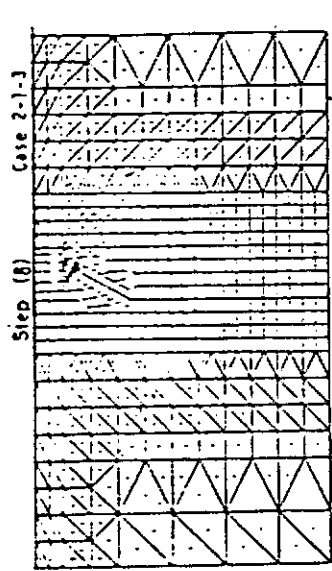
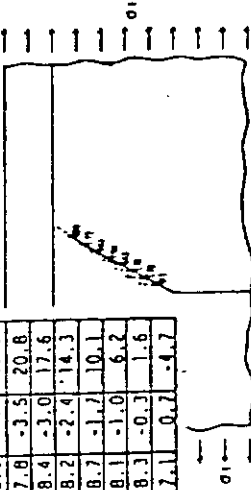
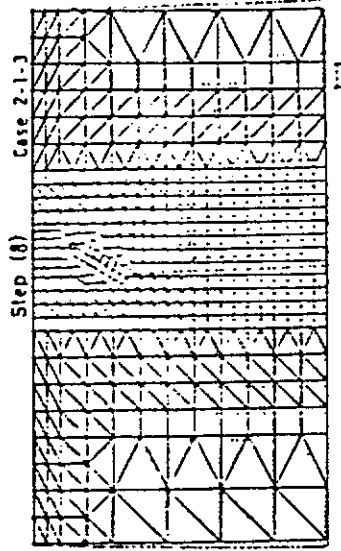
图8.11.13 Principal Stress Diagram 15.3 kg/mm<sup>2</sup>

图8.11.14 Displacement Diagram 0.06 mm

表 8.1 II. 8 Results of K-Value Analysis (Case 2-2-1)

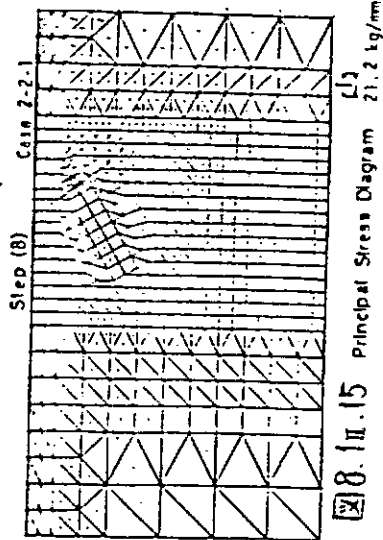
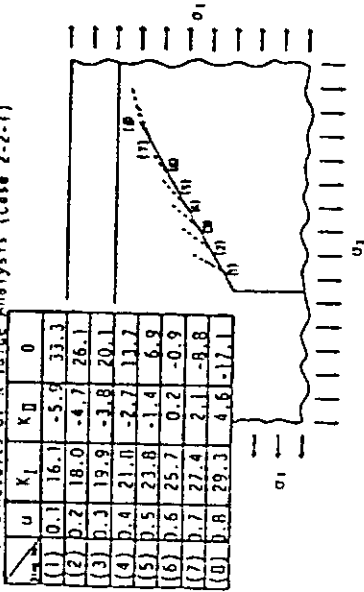


图 8.1 II. 15

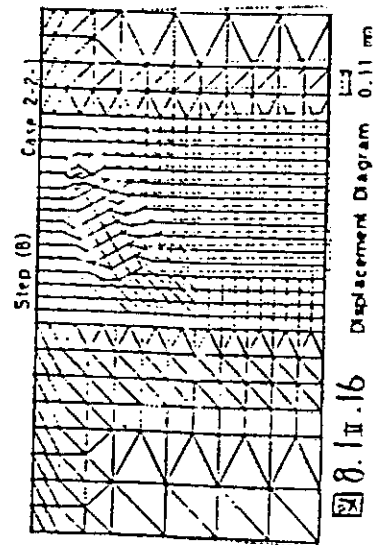
Principal Stress Diagram 21.2 kg/mm<sup>2</sup>

图 8.1 II. 16

Displacement Diagram 0.11 mm

表 8.1 II. 9 Results of K-Value Analysis (Case 2-2-2)

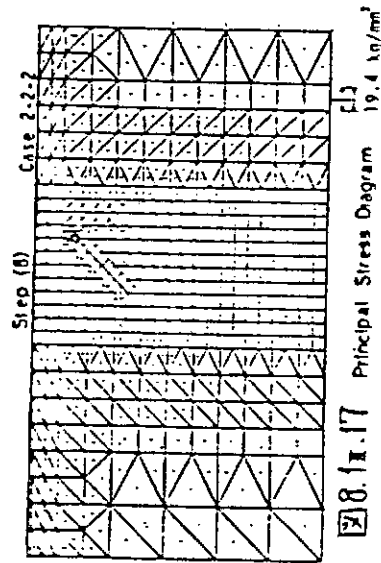
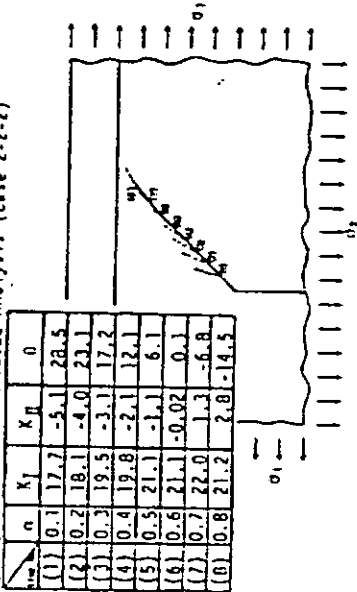


图 8.1 II. 17

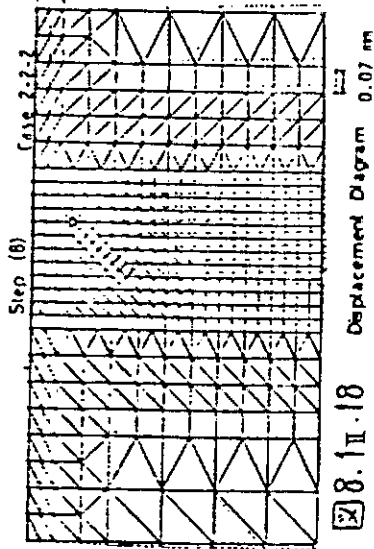
Principal Stress Diagram 19.4 kg/mm<sup>2</sup>

图 8.1 II. 18

Displacement Diagram 0.07 mm

表 8.1 II. 10 Results of K-Value Analysis (Case 2-2-3)

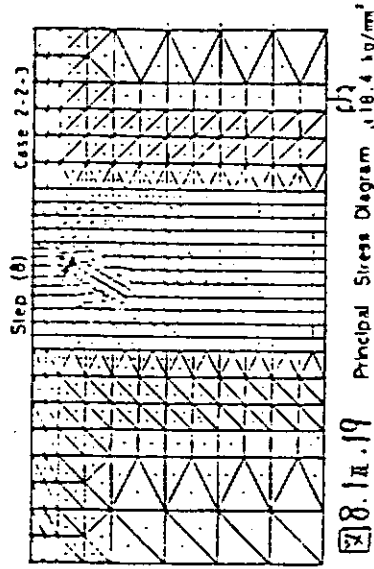
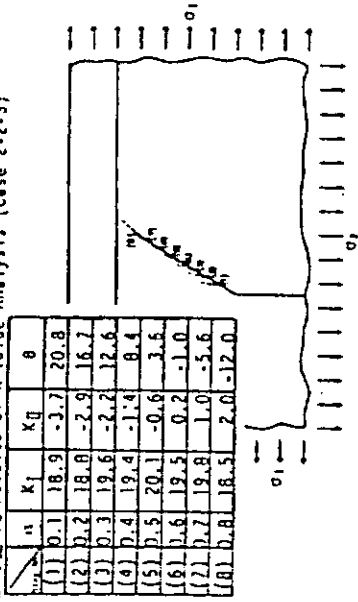


图 8.1 II. 19

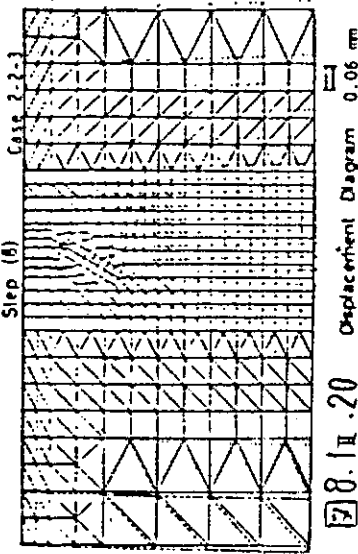
Principal Stress Diagram 18.4 kg/mm<sup>2</sup>

图 8.1 II. 20

Displacement Diagram 0.06 mm

表8.11.11 Results of X-Value Analysis (Case 2-3-1)

| $\alpha$ | $K_I$ | $K_{II}$ | $\theta$ |
|----------|-------|----------|----------|
| (1) 0.1  | 17.8  | -5.1     | 29.0     |
| (2) 0.2  | 20.3  | -3.7     | 19.7     |
| (3) 0.3  | 22.8  | -2.5     | 12.5     |
| (4) 0.4  | 25.2  | -1.4     | 5.2      |
| (5) 0.5  | 27.6  | 0.5      | -1.9     |
| (6) 0.6  | 30.1  | 2.5      | -9.4     |
| (7) 0.7  | 32.3  | 4.5      | -16.5    |
| (8) 0.8  | 34.6  | 7.9      | -23.5    |

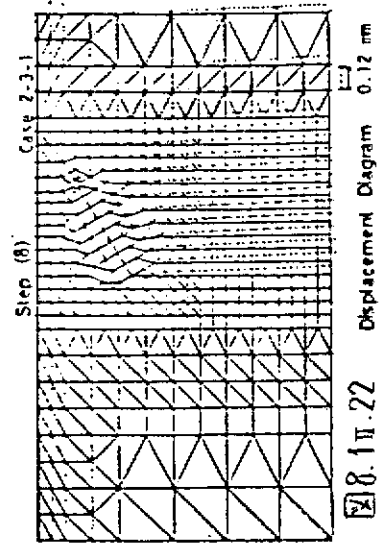
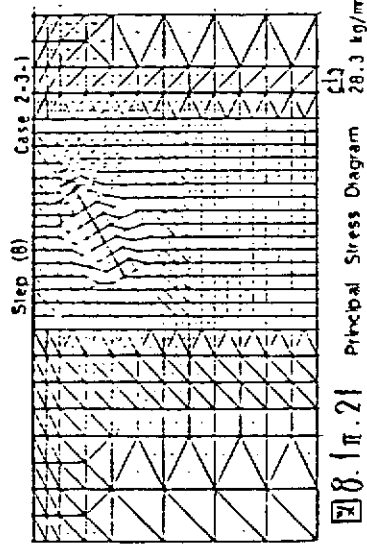
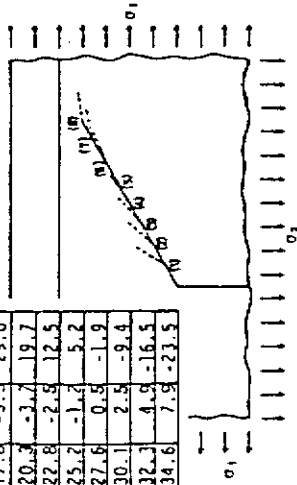


表8.11.12 Results of X-Value Analysis (Case 2-3-2)

| $\alpha$ | $K_I$ | $K_{II}$ | $\theta$ |
|----------|-------|----------|----------|
| (1) 0.1  | 18.8  | -4.6     | 25.0     |
| (2) 0.2  | 19.6  | -3.2     | 17.8     |
| (3) 0.3  | 21.3  | -2.0     | 10.8     |
| (4) 0.4  | 21.8  | -0.9     | 4.7      |
| (5) 0.5  | 23.3  | 0.3      | -1.6     |
| (6) 0.6  | 23.4  | 1.6      | -7.8     |
| (7) 0.7  | 24.5  | 3.1      | -14.1    |
| (8) 0.8  | 23.7  | 4.8      | -21.2    |

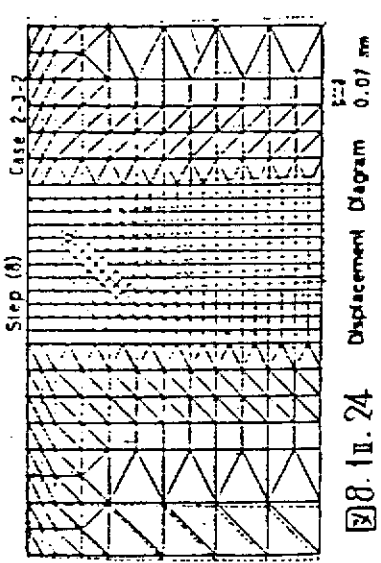
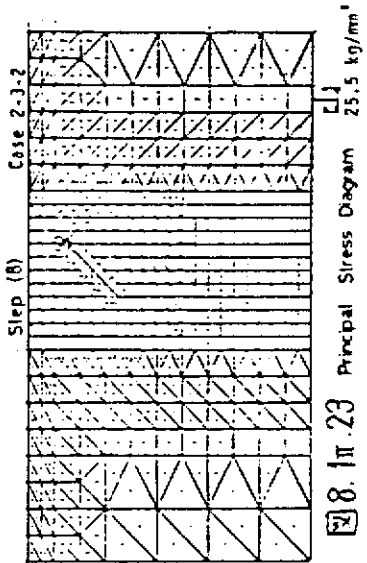
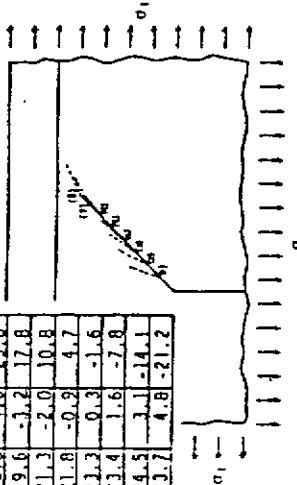


表8.11.13 Results of X-Value Analysis (Case 2-3-3)

| $\alpha$ | $K_I$ | $K_{II}$ | $\theta$ |
|----------|-------|----------|----------|
| (1) 0.1  | 19.7  | -3.3     | 18.2     |
| (2) 0.2  | 19.8  | -2.3     | 12.8     |
| (3) 0.3  | 20.8  | -1.4     | 7.9      |
| (4) 0.4  | 20.6  | -0.5     | 2.8      |
| (5) 0.5  | 21.4  | 0.4      | -2.2     |
| (6) 0.6  | 20.9  | 1.3      | -7.1     |
| (7) 0.7  | 21.2  | 2.2      | -11.5    |
| (8) 0.8  | 19.9  | 3.3      | -17.8    |

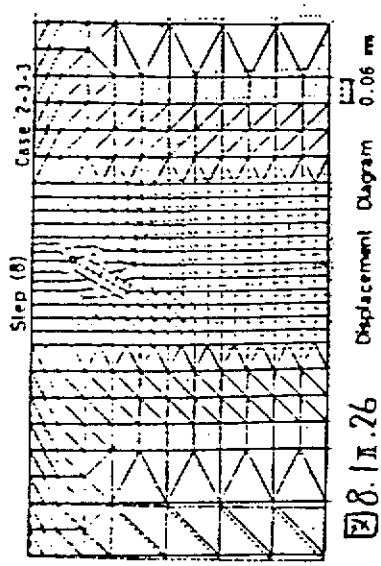
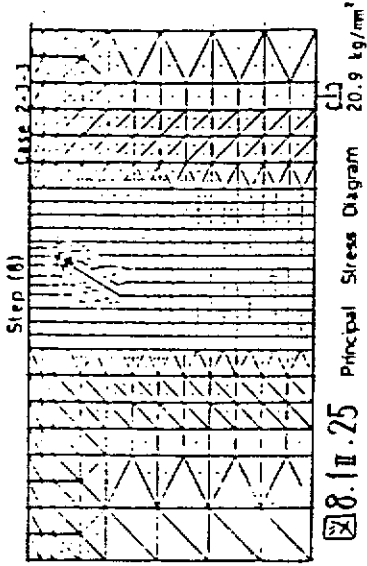
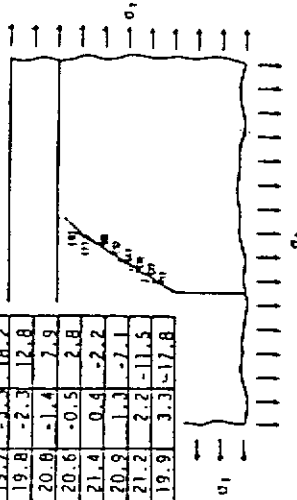


表8.11.14 Results of K-Value Analysis (Case 2-4-1)

|     | $\alpha$ | $K_I$ | $K_{II}$ | $\theta$ |
|-----|----------|-------|----------|----------|
| (1) | 0.1      | 21.1  | -4.2     | 21.0     |
| (2) | 0.2      | 24.4  | -1.9     | 8.6      |
| (3) | 0.3      | 28.9  | -0.1     | 0.3      |
| (4) | 0.4      | 32.0  | 1.5      | -6.9     |
| (5) | 0.5      | 35.4  | 4.2      | -13.1    |
| (6) | 0.6      | 38.9  | 7.1      | -19.5    |
| (7) | 0.7      | 41.9  | 10.3     | -25.1    |
| (8) | 0.8      | 45.1  | 14.4     | -30.4    |

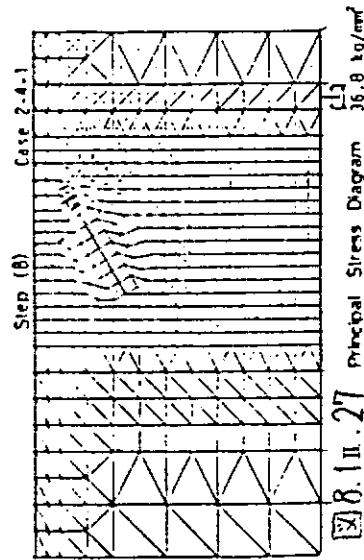
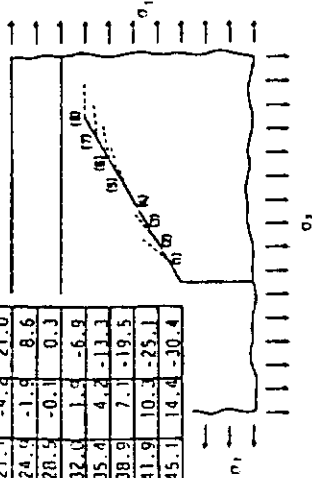
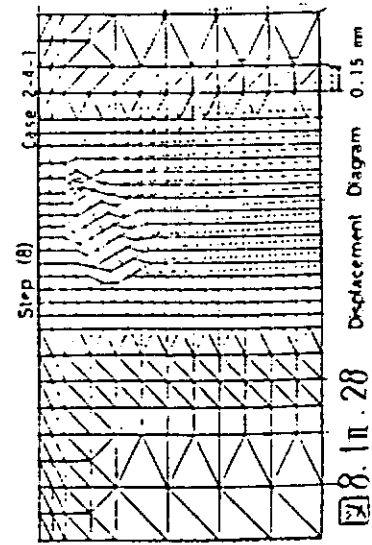
图8.11.27 Principal Stress Diagram 36.8 kg/mm<sup>2</sup>

图8.11.28 Displacement Diagram 0.15 mm

表8.11.15 Results of K-Value Analysis (Case 2-4-2)

|     | $\alpha$ | $K_I$ | $K_{II}$ | $\theta$ |
|-----|----------|-------|----------|----------|
| (1) | 0.1      | 21.2  | -3.6     | 18.4     |
| (2) | 0.2      | 22.6  | -1.6     | 8.0      |
| (3) | 0.3      | 24.9  | 0.1      | -0.2     |
| (4) | 0.4      | 25.8  | 1.6      | -7.2     |
| (5) | 0.5      | 27.8  | 3.2      | -12.9    |
| (6) | 0.6      | 28.1  | 4.9      | -16.7    |
| (7) | 0.7      | 29.5  | 6.8      | -23.6    |
| (8) | 0.8      | 28.6  | 8.7      | -29.4    |

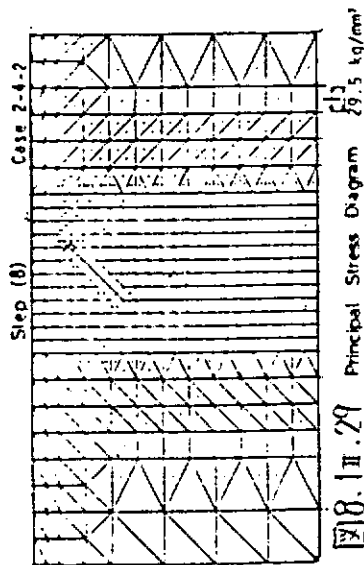
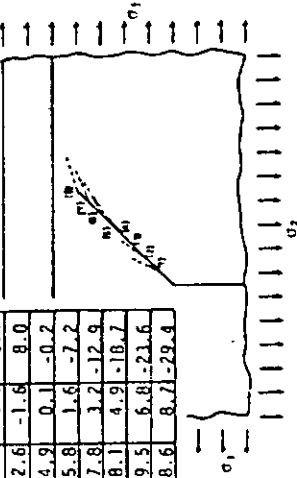
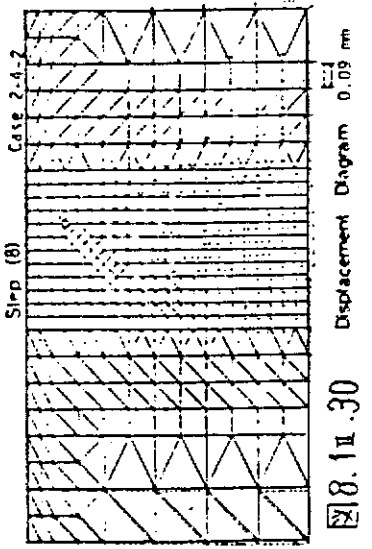
图8.11.29 Principal Stress Diagram 29.5 kg/mm<sup>2</sup>

图8.11.30 Displacement Diagram 0.09 mm

表8.11.16 Results of K-Value Analysis (Case 2-4-3)

|     | $\alpha$ | $K_I$ | $K_{II}$ | $\theta$ |
|-----|----------|-------|----------|----------|
| (1) | 0.1      | 21.4  | -2.6     | 13.3     |
| (2) | 0.2      | 21.8  | -1.1     | 5.5      |
| (3) | 0.3      | 23.1  | 0.1      | -0.6     |
| (4) | 0.4      | 23.1  | 1.4      | -6.6     |
| (5) | 0.5      | 24.2  | 2.5      | -11.6    |
| (6) | 0.6      | 23.6  | 3.6      | -16.6    |
| (7) | 0.7      | 24.1  | 4.6      | -20.3    |
| (8) | 0.8      | 22.6  | 5.8      | -25.9    |

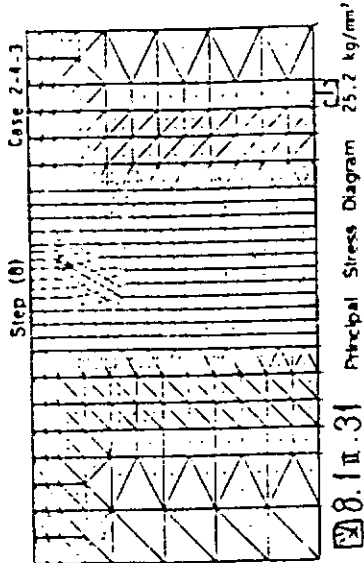
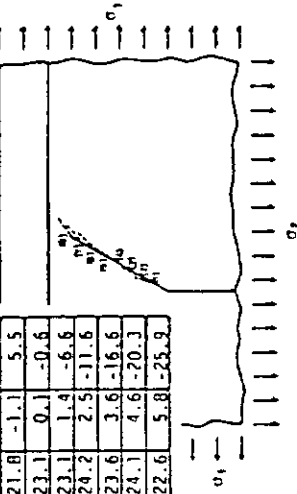
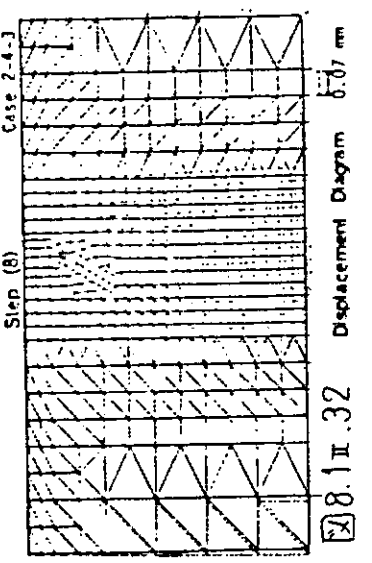
图8.11.31 Principal Stress Diagram 25.2 kg/mm<sup>2</sup>

图8.11.32 Displacement Diagram 0.07 mm

表 8.11.17 Results of K-Value Analysis (Case 2-5-1)

| $\alpha$ | $K_I$ | $K_{II}$ | $\theta$ |
|----------|-------|----------|----------|
| (1) 0.1  | 3.3   | 1.1      | -31.6    |
| (2) 0.2  | 4.6   | 1.8      | -35.3    |
| (3) 0.3  | 5.7   | 2.5      | -36.9    |
| (4) 0.4  | 6.8   | 3.1      | -38.2    |
| (5) 0.5  | 7.8   | 3.8      | -39.6    |
| (6) 0.6  | 8.8   | 4.6      | -41.3    |
| (7) 0.7  | 9.6   | 5.5      | -42.9    |
| (8) 0.8  | 10.6  | 6.5      | -44.6    |

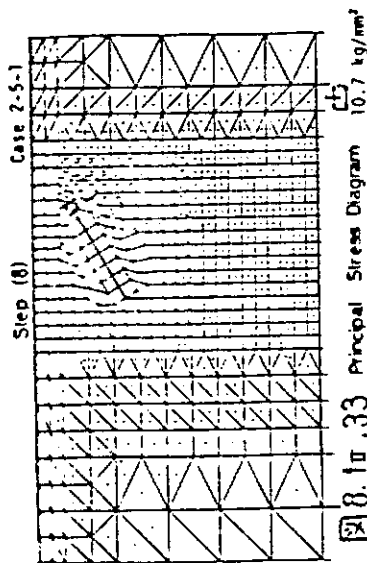
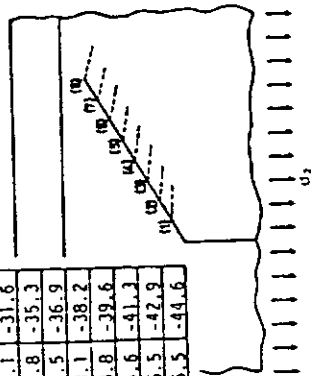
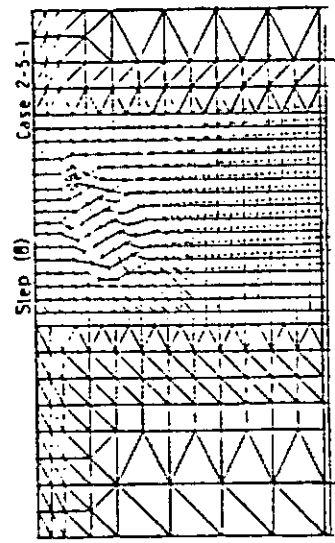
图 8.11.33 Principal Stress Diagram 10.7 kg/mm<sup>2</sup>

图 8.11.34 Displacement Diagram 0.03 mm

表 8.11.18 Results of K-Value Analysis (Case 2-5-2)

| $\alpha$ | $K_I$ | $K_{II}$ | $\theta$ |
|----------|-------|----------|----------|
| (1) 0.1  | 2.3   | 1.0      | -37.0    |
| (2) 0.2  | 3.0   | 1.6      | -42.2    |
| (3) 0.3  | 3.6   | 2.1      | -43.4    |
| (4) 0.4  | 4.0   | 2.5      | -45.1    |
| (5) 0.5  | 4.5   | 2.9      | -45.6    |
| (6) 0.6  | 4.7   | 3.3      | -47.1    |
| (7) 0.7  | 5.0   | 3.6      | -47.8    |
| (8) 0.8  | 4.9   | 3.9      | -49.5    |

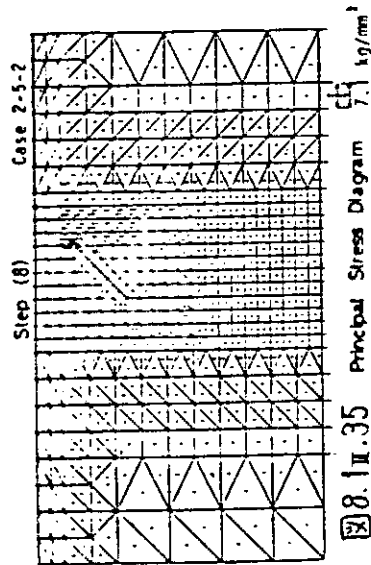
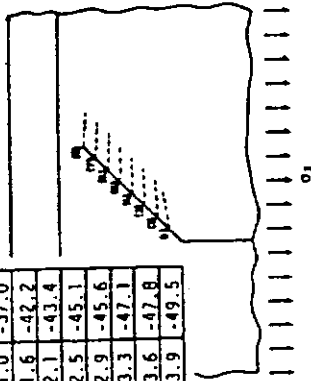
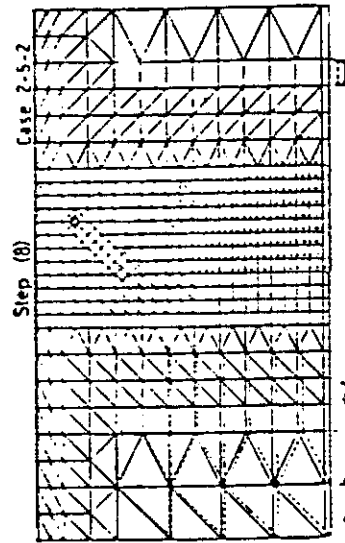
图 8.11.35 Principal Stress Diagram 7.1 kg/mm<sup>2</sup>

图 8.11.36 Displacement Diagram 0.02 mm

表 8.11.19 Results of K-Value Analysis (Case 2-5-3)

| $\alpha$ | $K_I$ | $K_{II}$ | $\theta$ |
|----------|-------|----------|----------|
| (1) 0.1  | 1.7   | 0.8      | -38.0    |
| (2) 0.2  | 2.0   | 1.2      | -44.5    |
| (3) 0.3  | 2.3   | 1.6      | -46.3    |
| (4) 0.4  | 2.5   | 1.9      | -48.2    |
| (5) 0.5  | 2.7   | 2.1      | -48.7    |
| (6) 0.6  | 2.8   | 2.3      | -50.1    |
| (7) 0.7  | 2.9   | 2.4      | -50.3    |
| (8) 0.8  | 2.8   | 2.6      | -51.9    |

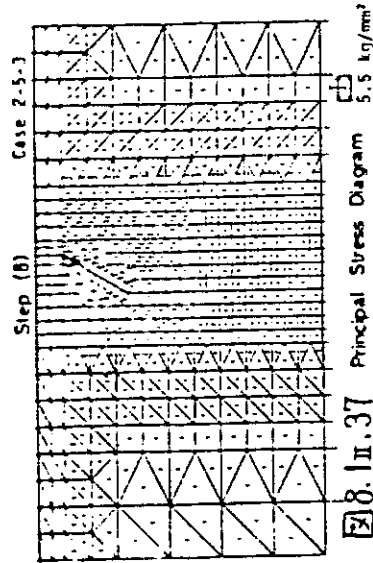
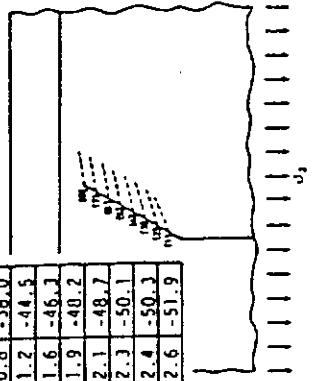
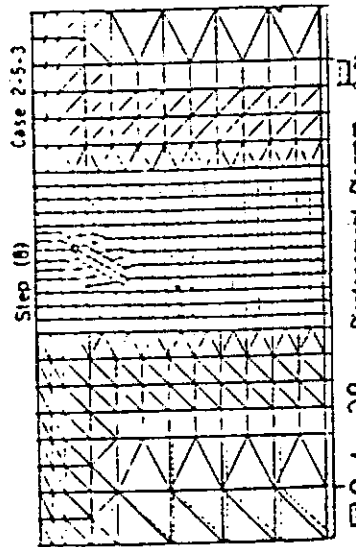
图 8.11.37 Principal Stress Diagram 5.5 kg/mm<sup>2</sup>

图 8.11.38 Displacement Diagram 0.01 mm

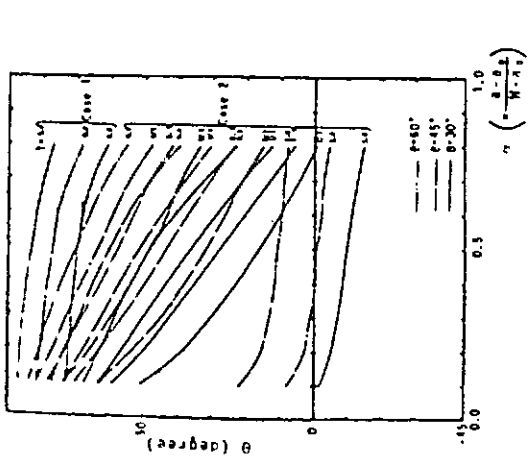


图 8.11.37 Relation between  $\alpha$  and  $\theta$

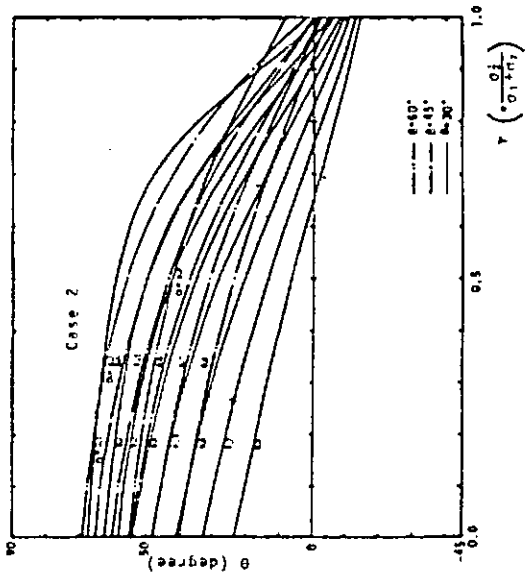


图 8.11.40 Relation between  $\gamma$  and  $\theta$

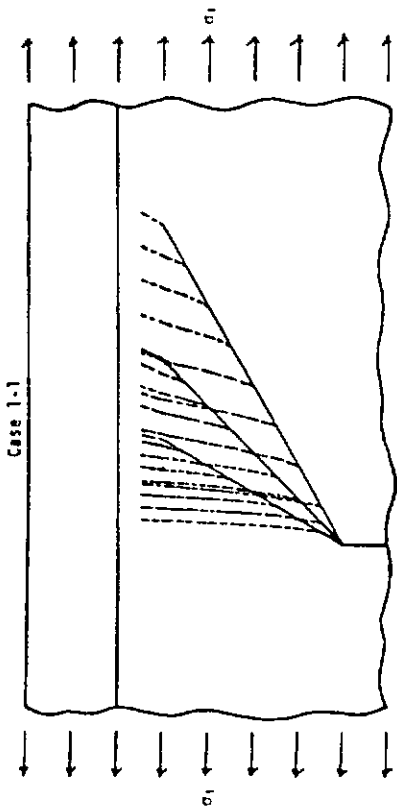


图 8.11.41 Diagram of the Forecasted Crack Path

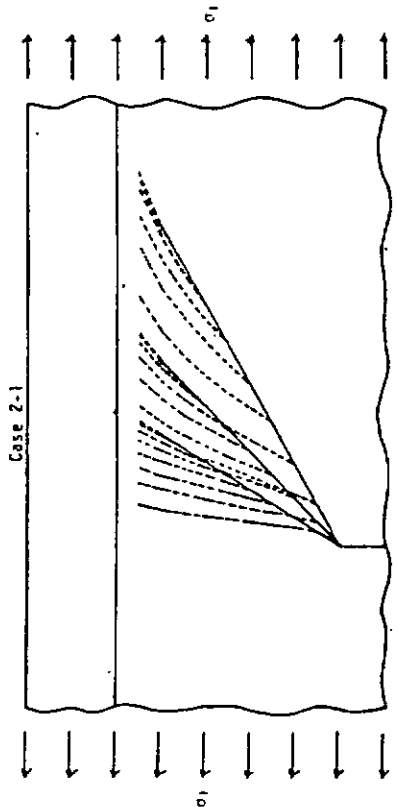


图 8.11.42 Diagram of the Forecasted Crack Path

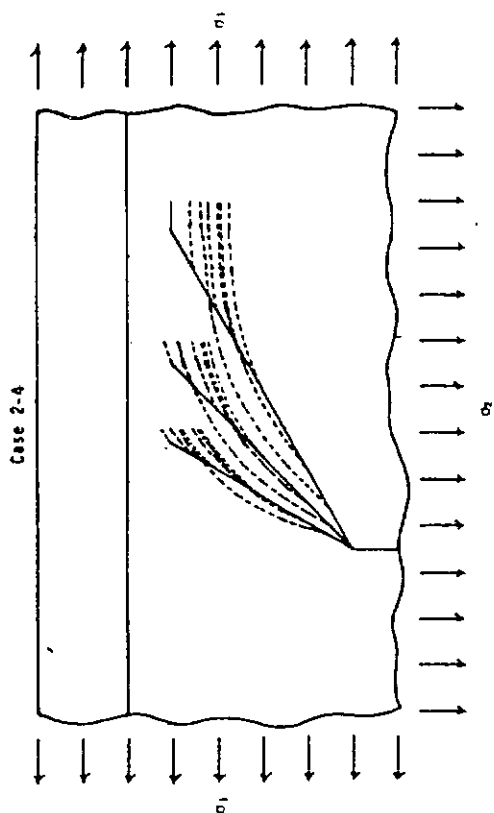


图8.11.45 Diagram of the Forecasted Crack Path

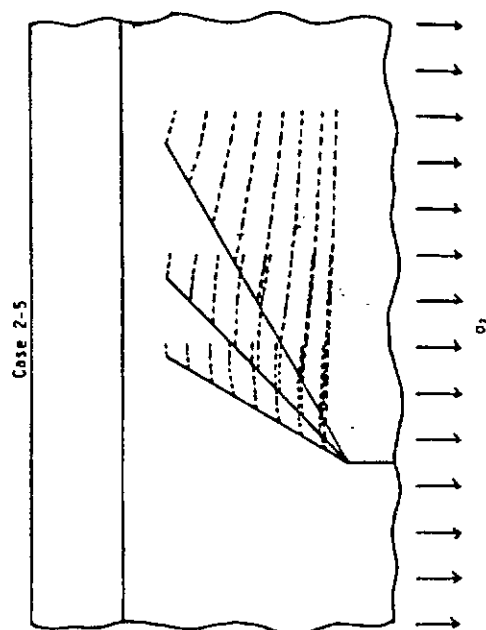


图8.11.46 Diagram of the Forecasted Crack Path

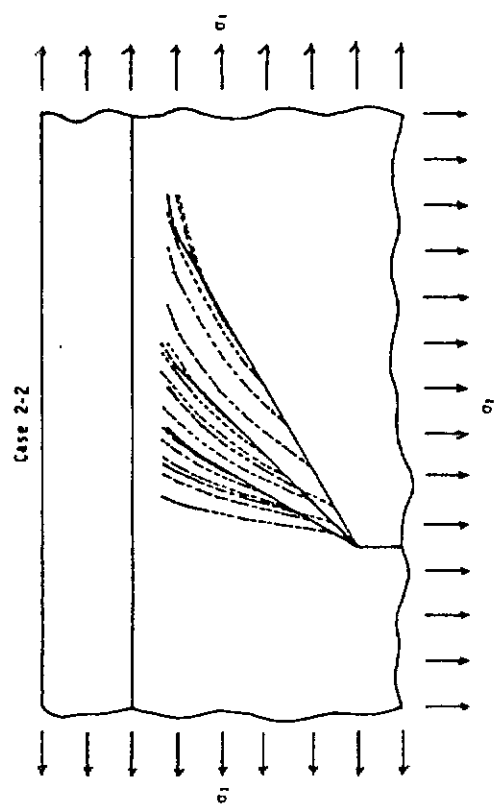


图8.11.43 Diagram of the Forecasted Crack Path

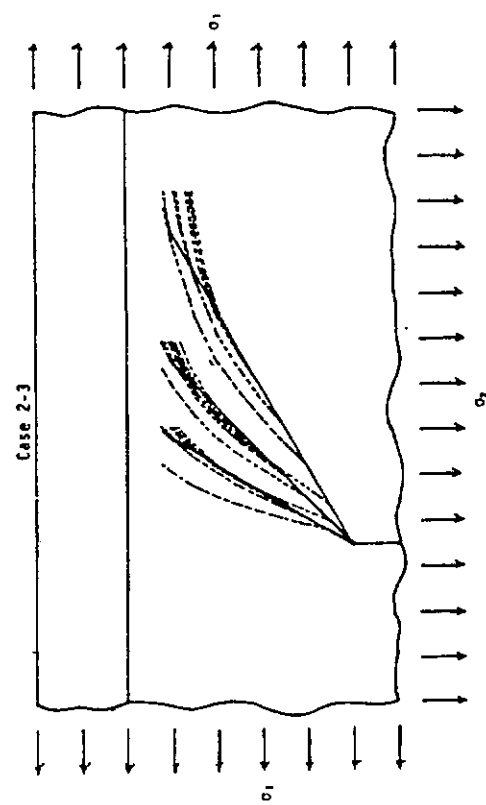


图8.11.44 Diagram of the Forecasted Crack Path

表 8.11.20 Verification of the Crack Path  
(from Step (2) of Case 2-1-1)

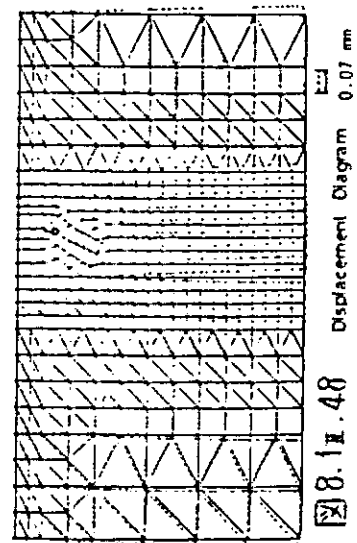
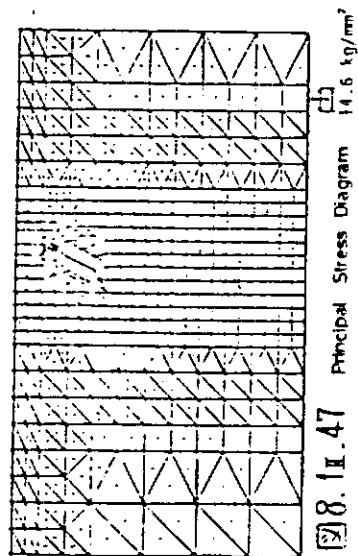
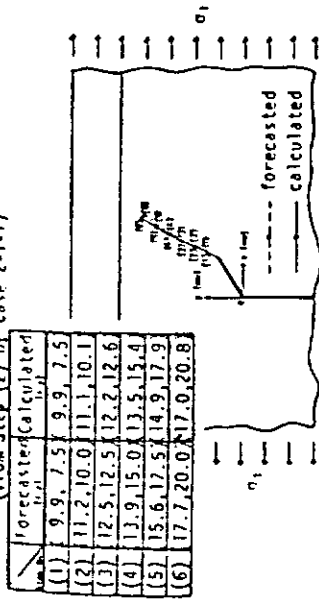


表 8.11.21 Verification of the Crack Path  
(from Step (2) of Case 2-3-1)

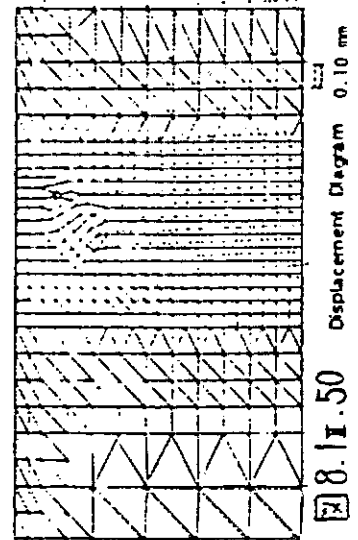
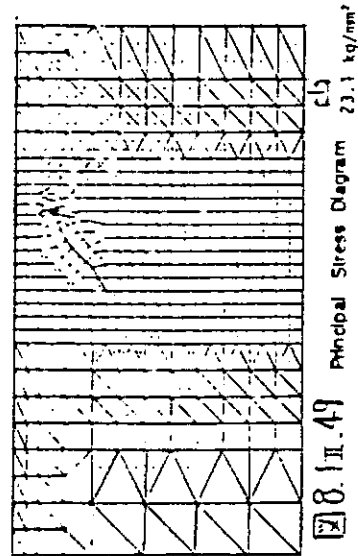
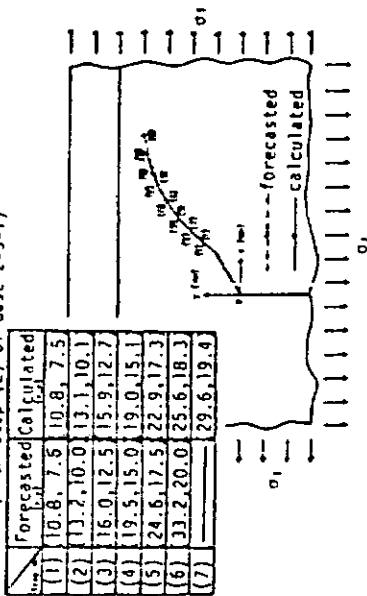
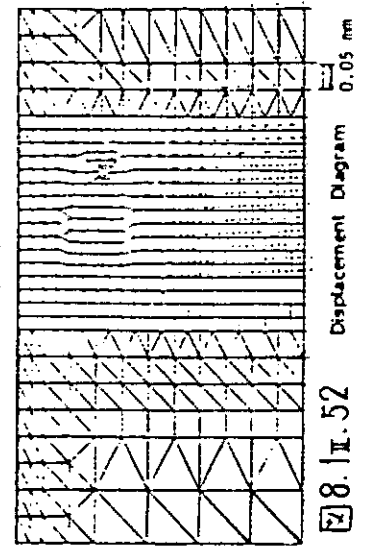
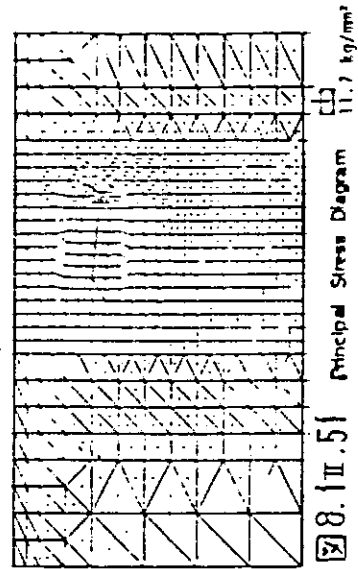
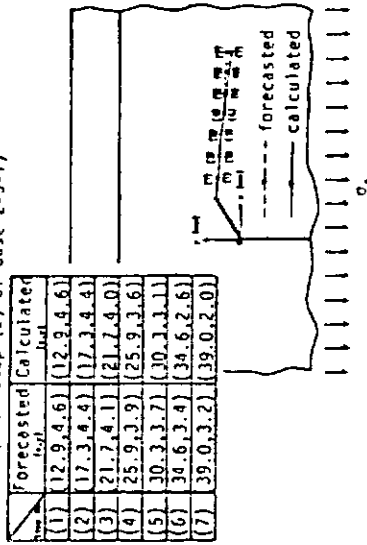
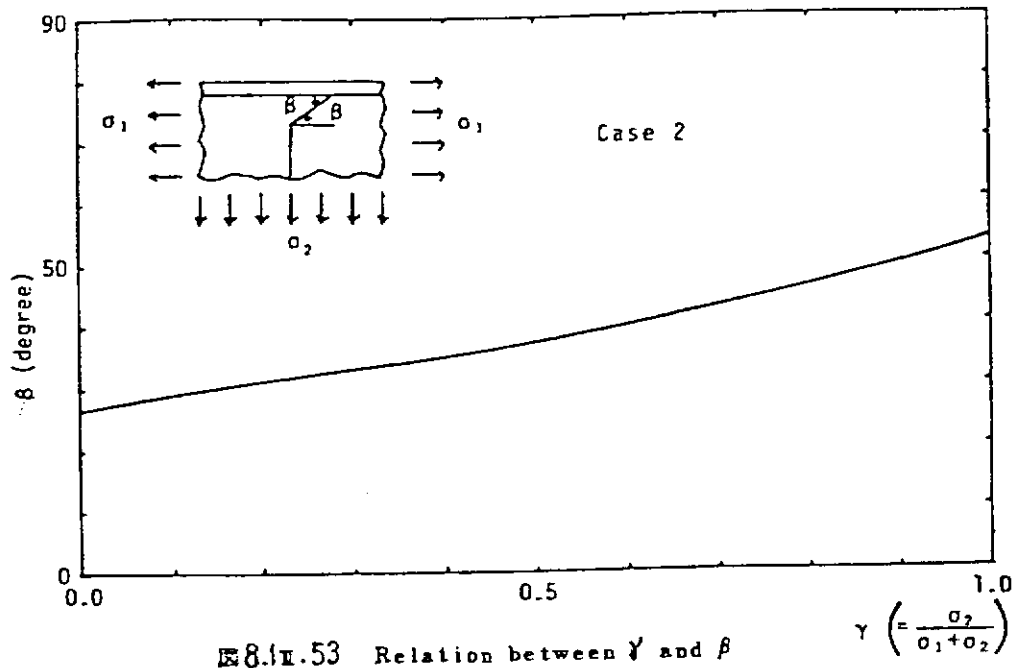


表 8.11.22 Verification of the Crack Path  
(from Step (2) of Case 2-5-1)





## 8.2 サイドフレーム下端と内底板交差部のソフトウ周辺

### 8.2.1 目的

突給の疲労損傷という点では、かなり多く見受けられる面材端部のすみ肉溶接トウ部より生じる疲労亀裂の進展挙動を解析し、脆性破壊の可能性を調査し、さらには立体交差部に亀裂が進入してきた時のクラックの径路を定める方法をさぐり、これらの情報から、破壊管理制御設計に適用する手法を見出す基礎データを得ることを目的にした。

### 8.2.2 構造モデルと外力系

SR153 鉛酸破壊強度検討小委員会 (SR153SF) で取上げた鉋石運搬給の棚板上部 (図8.2.1) を試算の対象に取上げた。SR153SF小委では検討の最初だったこともあり、外力系としては引張、曲げ、剪断および水圧の4つがそれぞれ統計量で与えられることからそれらの組合せ方により、クラックの進行径路が大きく変化するかも知れないという事で、それらを独立に外力として与えることにした。そしてそれらの検討に時間を費したため、殆んど試算が進まなかった。SR153SF小委での検討では本構造モデルの場合、クラック発生の設定場所から充分離れた位置で外力を与えているため、上記4つの外力によって亀裂の径路は殆んど変化しないことがほぼ確認された。そこで本節においては一番シビヤな case ということから、4つの外力の位相が同じである場合について検討した。外力は超過確率  $P=10^{-8}$  レベルに対応するものとして吃水が±6mの範疇の変化に対応する変動荷重 (図8.2.2) を想定することにした。

### 8.2.3 試算結果

構造モデルの要素分割を図8.2.3に示す。面材および棚板は板厚の異なる平面要素を使用した。また亀裂を進めていく段階では、亀裂のない状態での応力解析結果より求まる境界上の変位を強制変位として与えた。計算に使用した要素はSR153SFで使用したアイソ・パラメトリック要素である。計算はクラックを進展させる毎にクラック近傍の要素分割を変え、クラック先端ではアイソ・パラメトリック要素の節点を要素の一边の $1/4$ のところにもつて  $1/\sqrt{r}$  (クラック先端からの距離:  $r$ ) の応力特異性をもたせた。また本構造モデルは亀裂のない状態ではすでに解かれており、それによると面材端部の開口部について  $1/\sqrt{r}$  の特異性があるので、<sup>1)</sup> 亀裂のない状態においても面材端部の開口部には  $1/\sqrt{r}$  の特異性をもたせた要素を使用した。

#### a) 応力解析結果

##### ① step 1

図8.2.4には等価応力のコンター図、図8.2.5に主応力図を示す。この主応力図からクラックの伝播径路は図8.2.5に点線で示すように進行すると考えられる。

##### ② step 2

図8.2.5に示した亀裂伝播径路をもとに、亀裂を面材端部より入れて解析した。その結果を図8.2.6, 図8.2.7に示す。図8.2.7には図8.2.5で主応力図から予想される亀裂伝播径路もあわせて記入した。本図から明らかな様に亀裂の進展に伴う応力のみだれは亀裂近傍だけであり、さらに次のstepに進む亀裂の方向もほぼstep1で予想される方向に進行するものと考えられる。

##### ③ step 3

step2の結果からクラックの進行方向はstep1における予想とほぼ一致したので、step1での予想亀裂径路上にstep2よりさらに亀裂を伝播させて解析した。その結果を図8.2.8, 図8.2.9に示す。本結果からも亀裂成長径路はstep1での予想とほとんど変わらないことがわかる。

## ④ step 4

このstepにおいては亀裂を棚板にまでぶっつけて応力解析を行なった。その結果図8.2.10, 図8.2.11に示す。

次に亀裂が棚板に進入するのか、棚板とブラケットのすみ肉溶接に沿うのかが問題となる。そこでSR153で行なわれた直交交差部材に疲労亀裂が進行していく実験(図8.2.12)で、 $\theta$ が $20^\circ$ より大のときに、疲労亀裂はすみ肉を沿い、 $20^\circ$ 以下の時に直交部材に亀裂が進入していたことから、 $\theta = 20^\circ$ の試験片につき応力解析を行なった。試験片はタブに溶接されていたことから、試験片の上下には剛性を無限大とした梁要素を配して、そこに一様応力を与えて解析した。図8.2.13は単位応力を与えて解析した変位図である。XY平面に垂直な直交部材はXY平面に関して対称であるから、XY平面上で与えている。(X、Yの変位だけが自由度をもち、その他の自由度はすべて拘束した)。なお直交部材にはシェル要素を配置している。また主応力分布図を図8.2.14に示す。図8.2.15は主応力と直交交差部材とのなす角度 $\varphi$ の交差部材に沿う分布を求めた結果であり、亀裂からの距離 $r$ が大になるにしたがい急激に $\varphi$ が小さくなり、この試験片の場合 $r = 30\text{ mm} \sim 50\text{ mm}$ のところではほぼ一定となっている。さらに $r$ が大なるところではタブの影響を受けているものと考えられる。このように $r = 30\text{ mm} \sim 50\text{ mm}$ での $\varphi$ がほぼ一定であることから、この領域の $\varphi$ が亀裂の進行径路を決定するものと考えても一次的近似としては良いと考えられる。すなわちこの試験片がすみ肉を沿うか、直交交差部材に亀裂が伝播していくかの境界にあることから、交差部材と主応力の角度がほぼ一様となる領域で $30.5$ 度を境にして後の伝播径路が変化すると考えられる。

すなわち、

$$\left. \begin{array}{l} \varphi \geq 30.5^\circ (0.532\text{ rad}) \text{ のとき、すみ溶接部に沿う} \\ \varphi < 30.5^\circ (0.532\text{ rad}) \text{ のとき、直交交差部材へ伝播} \end{array} \right\} \text{----- (8.2.1)}$$

と考えられる。

図8.2.14における $\varphi$ はほぼ一様となる領域ではほぼ $38^\circ$ であり、上記の結果より、このstep以後の亀裂は棚板のすみ肉溶接に沿って伝播するものと考えられる。

## b) K値解析結果

本試計算においてはアイソパラメトリック要素を使用しており、亀裂先端要素においては中間節点を一辺の $1/4$ に配し、応力分布は $1/\sqrt{r}$ の特異性を有している。この場合亀裂先端を原点とした $(r, \theta)$ 座標をとると、

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_\theta = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} (1 - \sin \theta \sin \frac{\theta}{2}) \\ \sigma_z = \frac{-K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} (2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}) \end{array} \right\} \text{----- (8.2.2)}$$

ただし、

$\sigma_z$  : 亀裂方向応力

$K_I$  : 引張型K値

$K_{II}$  : せん断型K値

と与えられる。そこでstep2の先端要素(図8.2.7中でうすくめりつぶした要素)につき(8.2.2)式よりアイソパラメトリック要素の形状関数(SR153SF報告参照)を使用して $\theta$ を変えて $K_I$ 、 $K_{II}$ を求めた。その結果を図8.2.16に示す。要素境界における応力分布より計算された $K_I$ 値は低めの値を与えている境界から離れた要素内部の応力分布より求めた $K_I$ 値、 $K_{II}$ 値はほぼ一定の値を与えている。すなわち要素境

界上では応力不連続となるため真のK値が求められないが、要素内部の応力分布からはかなりの精度でK値が求まることがわかる。また  $K_{II}$  値は棚板から亀裂先端が離れているためほぼ0となっている。

前項 a) の応力解析での step の進め方は  $\sigma_{\theta}$  最大説による Erdogan の解を使用して<sup>2)</sup>

$$K_I \sin \theta + K_{II} (3 \cos \theta - 1) = 0 \quad \text{-----} (8.2.3)$$

を満たすように亀裂進行方向を決定したものであり、step1の主応力分布に垂直に亀裂伝播経路を予想したものとよく一致した。

上記のようにして(8.2.2)式より求めた  $K_I$  値の結果を図8.2.17に示す。 $K_I$  値は亀裂が進行するにしたがい大きくなるが棚板に近づくにつれて減少することがわかる。

そこで  $K_I$  値の近似的計算法について考えてみる。図8.2.18は棚板の存在を無視した場合のK値解析のモデル化である。すなわち亀裂予想経路上の垂直応力分布を、splitting forceにみなし重ね合わせの原理よりK値を求める。ただしこの時自由端から入る亀裂の角度の影響は無視し、さらに簡単のため図8.2.18b)に示す如く応力分布を、A部とB部の面積が同じとなる直線で近似できると仮定する。すなわちこの時のK値  $K_I$  は<sup>3)</sup>

$$K_I = 1.122 \sigma_1 \sqrt{a} + 1.210 \left(1 - \frac{2}{\pi}\right) \sigma_2 \sqrt{a} \quad \text{-----} (8.2.4)$$

ところで棚板に亀裂が近づくと棚板の影響でK値は減少する。図8.2.19は二つの異なる板材の直線接合部に近接する亀裂のK値の magnification factor の解析結果である。<sup>4)</sup> 棚板の幅は150mmであり、ブラケットの板厚が14mmであるから図中の  $\alpha$  は10.7となる。そこで  $\alpha = 10$  の magnification factor  $F_{IA}$  値を使用して

$$K = K_I \cdot F_{IA} \quad \text{-----} (8.2.5)$$

をもって本試計算の近似解と考える。ただし  $d$  は予想亀裂経路に沿う長さとする。

図8.2.20は亀裂伝播予想経路上の主応力分布をstep1の解析結果より求めた結果である。図8.2.5(step1の主応力分布図)においては要素の Gauss Point における主応力が求められている。そこで図8.2.20においては亀裂予想経路をはさむ近接 Gauss Point の主応力を示した。そこで(8.2.4)式を使用して図8.2.20よりK値を求めた。その結果を図8.2.17に点線で示す。ただし図8.2.19において  $a/d \leq 0.9$  の範囲の  $F_{IA}$  値が求まっているので、 $a/d > 0.9$  については安全側という見地から  $a/d = 0.9$  におけるK値の勾配をもつとして延長した。この近似解はFEMの解析結果より多少大きくになっているが、ほぼよい近似を与えていることがわかる。なおstep4におけるFEMで求めたK値はブラケット側の要素を使用した結果である。

#### c) 残予寿命と脆性破壊発生の可能性

本試計算モデルで与えた境界力は超過確率  $Q = 10^{-4}$  に対する最大期待値である。そこで個々の境界力の頻度分布を図8.2.21に示すような片対数直線であると仮定し、個々の境界力の位相差が安全側という見地より一致するものと仮定する。このように仮定すれば任意の点の応力頻度分布も図8.2.21のような片対数直線で近似される。すなわち任意の点の応力頻度分布は、

$$S = S_{\max} \left(1 - \frac{1}{n} \log N\right) \quad \text{-----} (8.2.6)$$

ただし  $n = 8$

$N$  : Sレベルの発現サイクル数

$S_{\max}$  : 最大期待値 ( $Q = 10^{-4}$ )

一方疲れ亀裂伝播式は

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m \quad \text{-----} (8.2.7)$$

①の累積応力頻度分布を振幅の大なる方から順次小なる方へ応力を作用させると図8.2.22の $\Rightarrow$ で示す過程で亀裂が成長する。一方逆に作用させると図8.2.22の $\Leftarrow$ で示す過程で亀裂が成長する。そして $\Delta K_{th}$ が存在しないと仮定すれば $10^8$ サイクル作用させた時の最終亀裂長さ( $a_f$ )は同じ値となる。そして実際にはこの中間の過程で亀裂が成長することになる。

そこで一定応力振幅で $10^8$ サイクル作用した時、 $a_f$ に達する場合の一定応力振幅 $S_{eq}$ を考える。すなわち $S_{eq}$ は $10^8$ サイクル作用する場合の平均亀裂伝播挙動を与えることになる。(8.2.6)、(8.2.7)式より

$$\frac{1}{C} \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{(\sqrt{\pi a})^m} = S_{\max}^m \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^k \left( \frac{2k-2i+1}{2k} \right)^m \left( 10^{\frac{ni}{k}} - 10^{\frac{n(i-1)}{k}} \right) = S_{eq}^m \cdot 10^8$$

$$\therefore \frac{S_{eq}}{S_{\max}} = R_2 = \left[ \frac{\lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^k \left( \frac{2k-2i+1}{2k} \right)^m \left( 10^{\frac{ni}{k}} - 10^{\frac{n(i-1)}{k}} \right)}{10^8} \right]^{\frac{1}{m}}$$

ただし  $a_0$ : initial crack length ----- (8.2.8)

すなわちこの $R_2$ は最大期待値で計算された場合に、平均的伝播寿命を与える場合の応力補正項を与えることになる。今 $C$ 、 $m$ 値として造船用鋼板(40kg/mm<sup>2</sup>級)の値をSR153の結果より用いると、

$$C = 1.44 \times 10^{-8}, \quad m = 2.5 \quad \text{----- (8.2.9)}$$

となり  $n = 8$  とすれば

$$R_2 = 0.0878 \quad \text{----- (8.2.10)}$$

となる。したがって図8.2.17の $K$ 値に $R_2$ を乗じて(8.2.7)式より平均的亀裂成長計算ができる。

図8.2.23は上記のようにして計算した棚板に亀裂が到達するまでの残予寿命であり、実験が求まる近似 $K$ 値から求めたものである。(8.2.5)式をもとに計算した結果はFEM解析結果から求めた結果の約6割の寿命を与えている。これらの結果は $\Delta K_{th}$ を無視したものであり、実際より速い寿命予測を与えているにもかかわらず、棚板に亀裂が到達するまでの寿命は非常に長く、この結果より本試計算モデルにおける亀裂は疲労の観点からは何ら問題とならないものと考えられる。

一方材料の靱性値として、温度環境として0℃を考え、さらに大入熱溶接継手(安全側という見地より)を想定すればSR153の結果より、

$$K_c = 600 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-\frac{3}{2}} \quad \text{----- (8.2.11)}$$

図8.2.17は最大期待値に対するものであり、亀裂が棚板に到達するまでにはせいぜい $140 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-\frac{3}{2}}$ しかない。したがって脆性破壊に対しても本試計算モデルでは問題にしないでよいと考えられる。

## 8.2.4 ま と め

ブラケット先端部から入る亀裂の挙動について試計算を行ない、以下の知見を得た。

- 1) 本構造モデルでは、亀裂発生場所から充分離れた所に境界力を与えており、亀裂を含まない応力解析(step 1)で求めた主応力分布から、主応力に直交に亀裂伝播経路を予想した結果と、 $\sigma_\theta$  応力最大説で亀裂を伝播させた経路とはよく一致した。
- 2) 棚板に到達した亀裂が棚板に進入するか、すみ肉溶接を沿うかの判定として、モデル実験を行なった結果を解析し、棚板に沿う主応力と棚板とのなす角度が一定となる領域で、その角度が30.5度(0.532 rad)以上であればすみ肉に沿い、それ以下であると棚板に進入するという仮説を提案した。そして本試計算の場合棚板のすみ肉に沿うという結果を得た。

上記の角度は亀裂の存在しないモデル(step 1)より小さくなるので亀裂を挿入したモデルにつき応力解

析が必要となるので、これを計算しないで判定する手法の開発が望まれる。

3) 面材端部から入る亀裂のK値は、図8.2.18のモデル化と図8.2.19の図をもとに、亀裂を含まないモデルの応力解析結果から近似的に求めることが出来る。

4) 本試計算結果によると本モデルでは疲労および脆性破壊に対して十分な抵抗性をもっていると判断される。

#### 参 考 文 献

- 1) 井上武彦、近藤公雄 " 桁材スニップエンド部の応力分布と疲労解析 "、西部造船会会報、第51号(昭和51年3月) P 41
- 2) F. Erdogan and G.C.Sih " On the Crack Extension Plates under Plane Loading and Transverse Shear ", Trans. ASME, J. Basic Eng. 85D(1963)
- 3) H. Tada " The Stress Analysis of Crack Handbook ", DEL Research Corporation
- 4) M. Isida, Eng. Frac. Mech., Vol. 2, No. 1, (1970) P 61

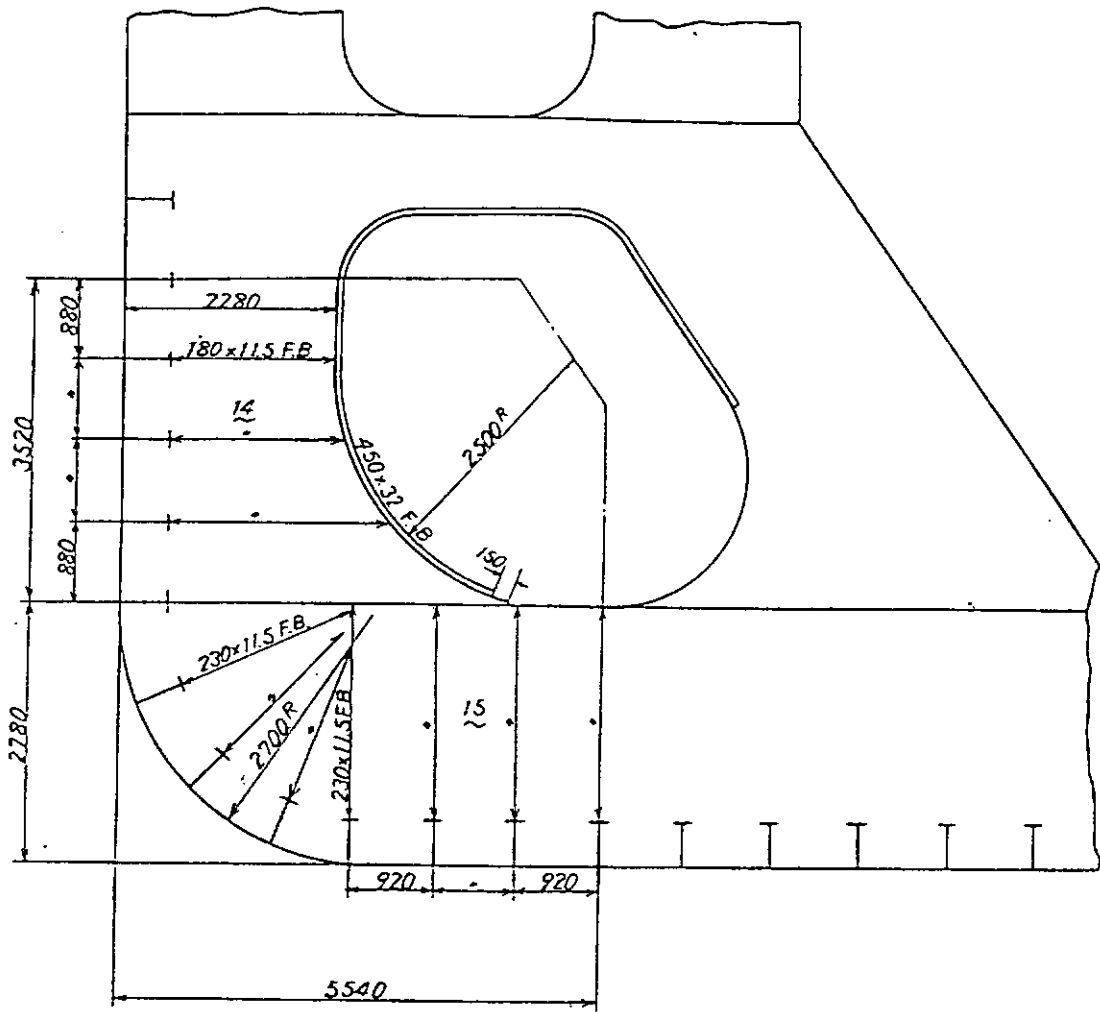


図 8.2.1 トランスバークヘッドのコーナ部

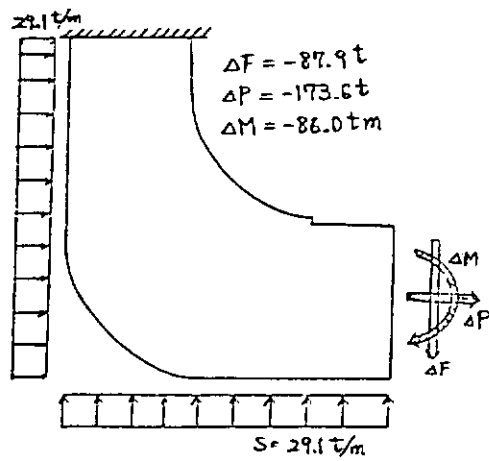


図 8.2.2 吃水が±6 m 変化する場合に対応する境界条件

Crack Analysis

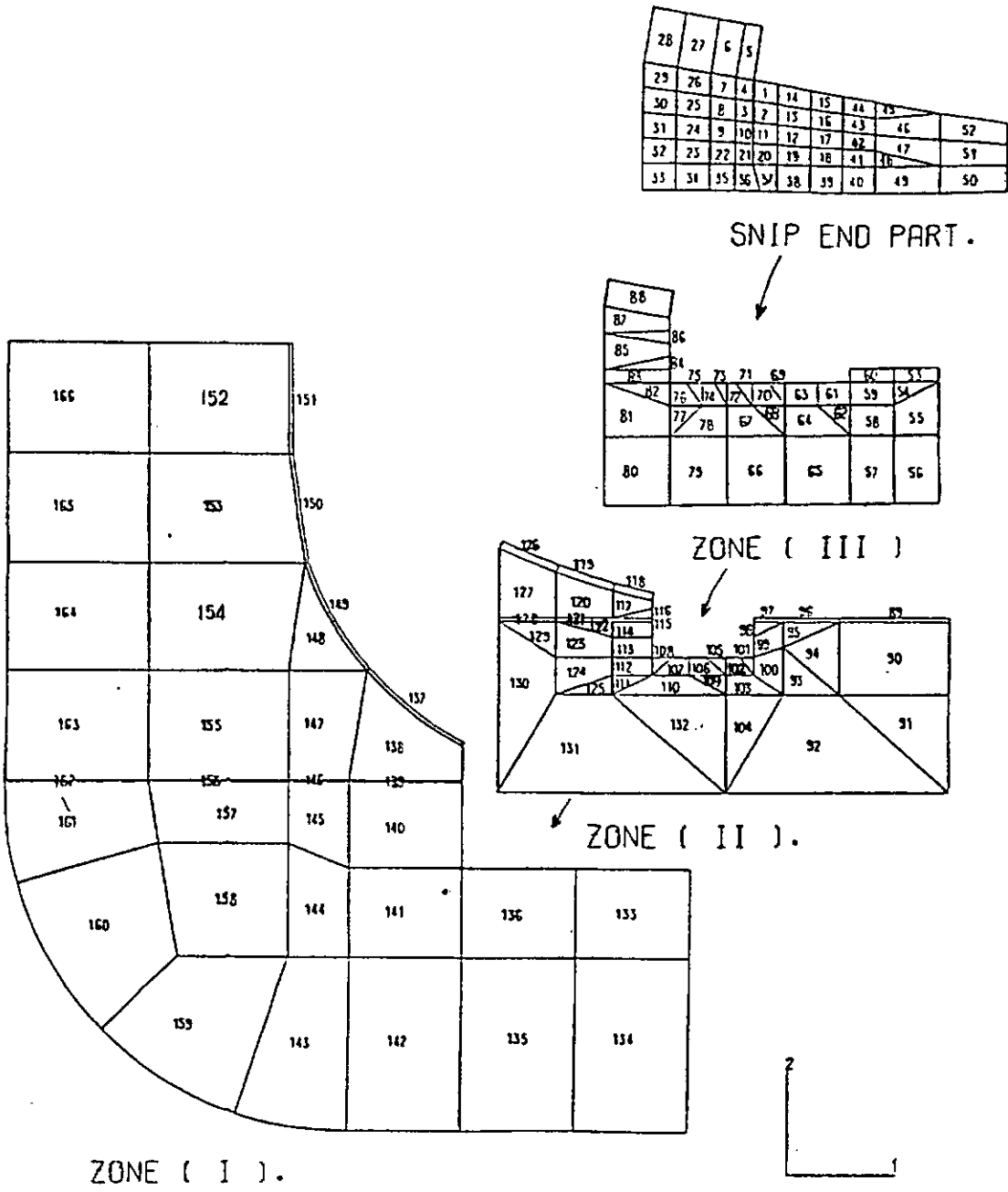


图 8.2.3 要素分割

SIG.1 STRESS CONTOURS ( TYPE.1 )

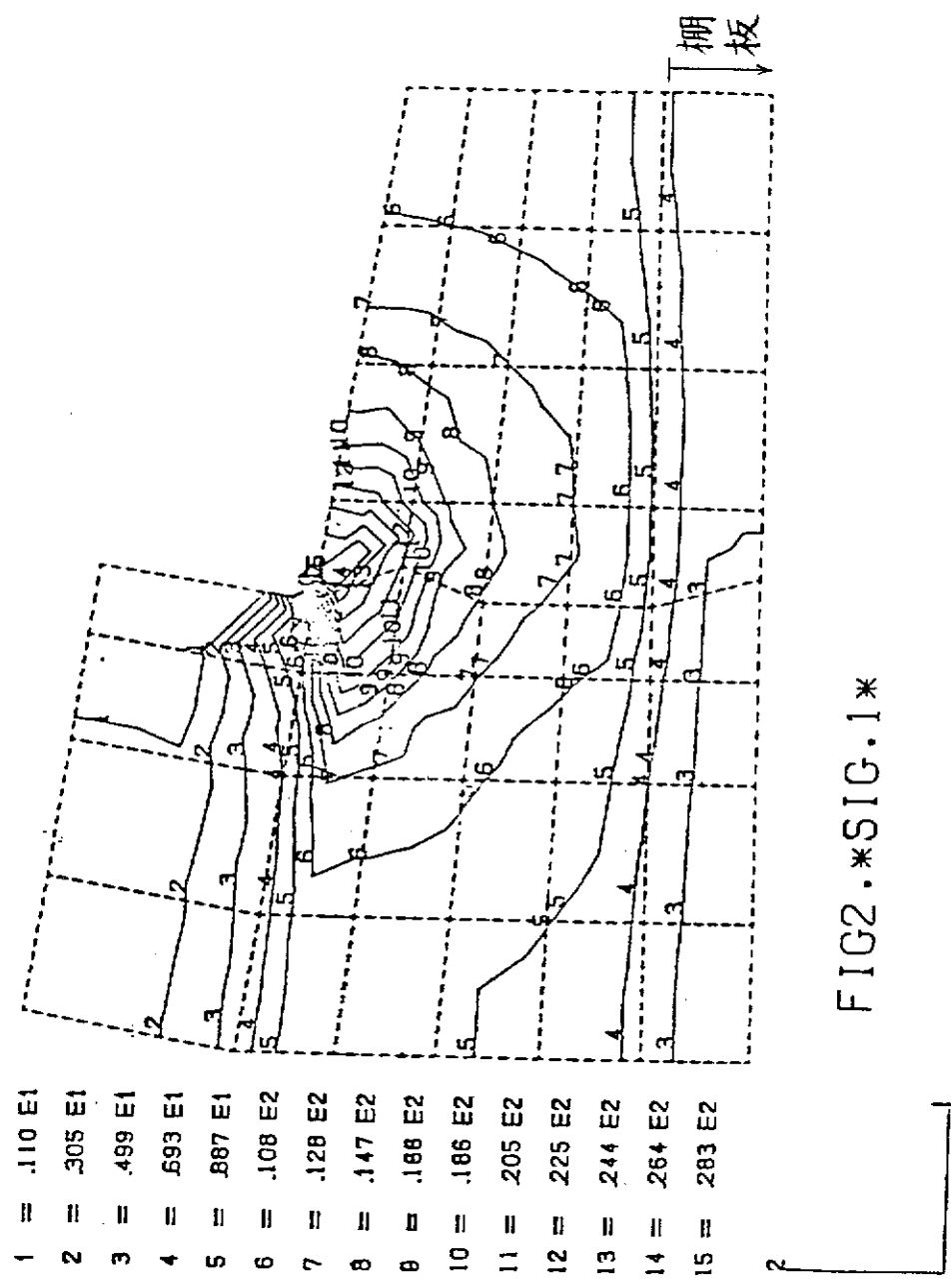
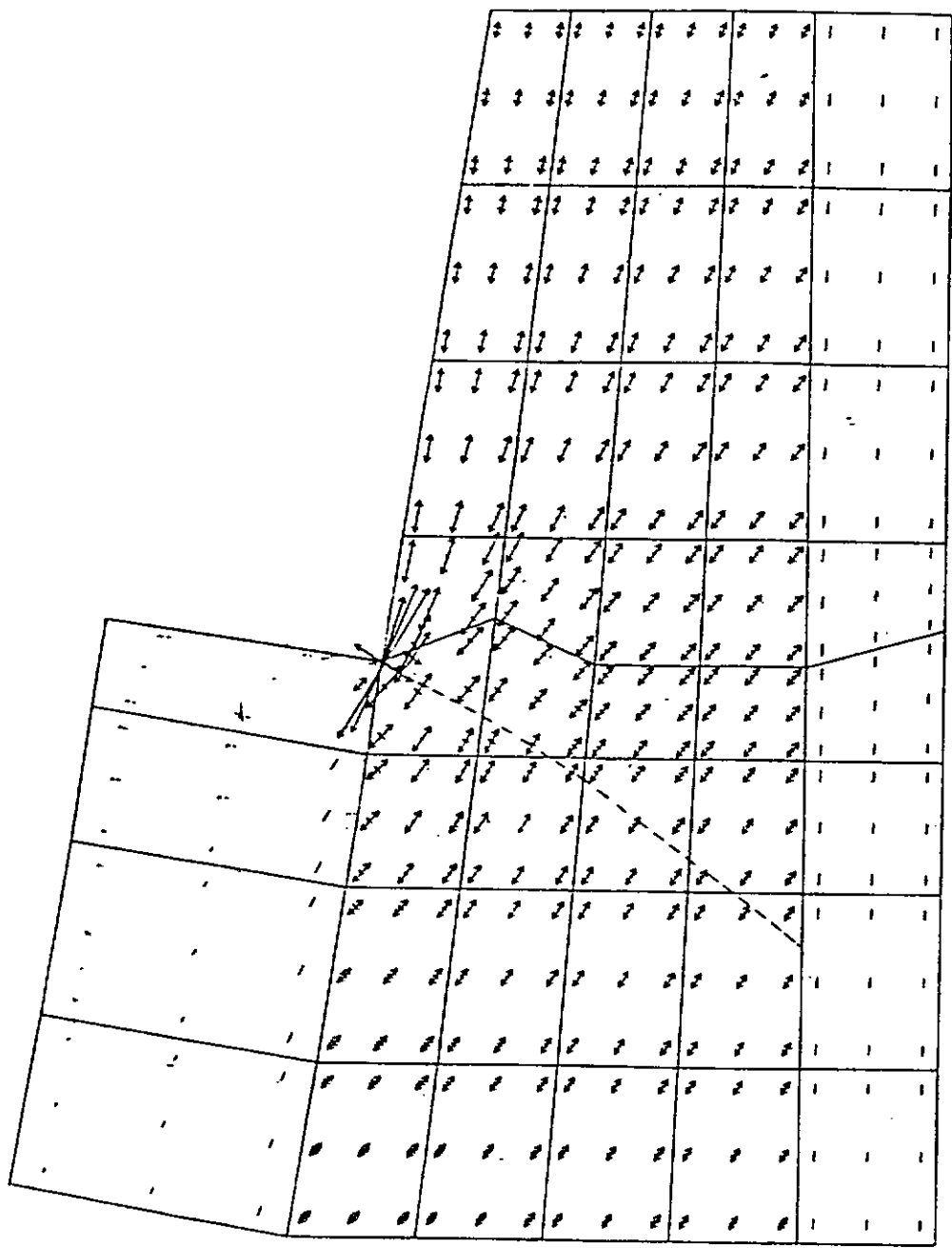


図8.2.4

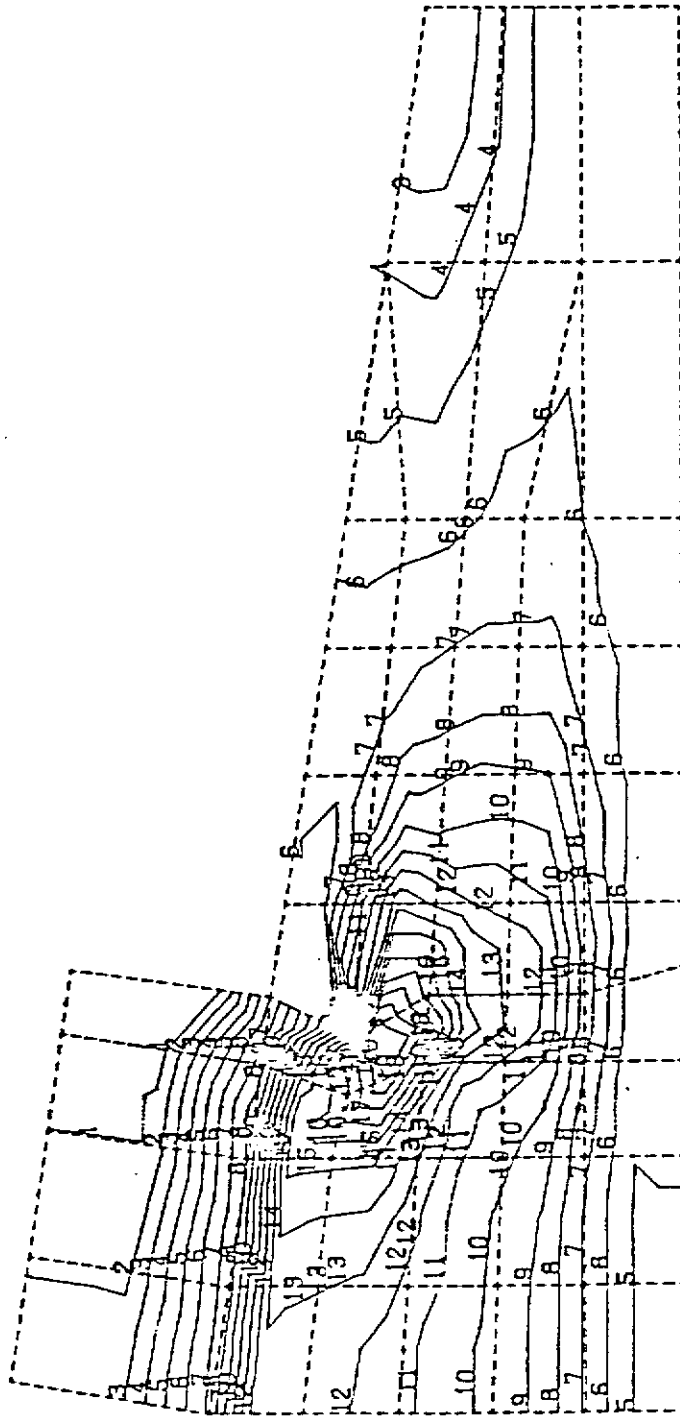


CRACK ANALYSIS (STEP.1) PRINCIPAL STRESS

8.2.5

$\bar{\sigma}$  STRESS CONTOUR FIGURE

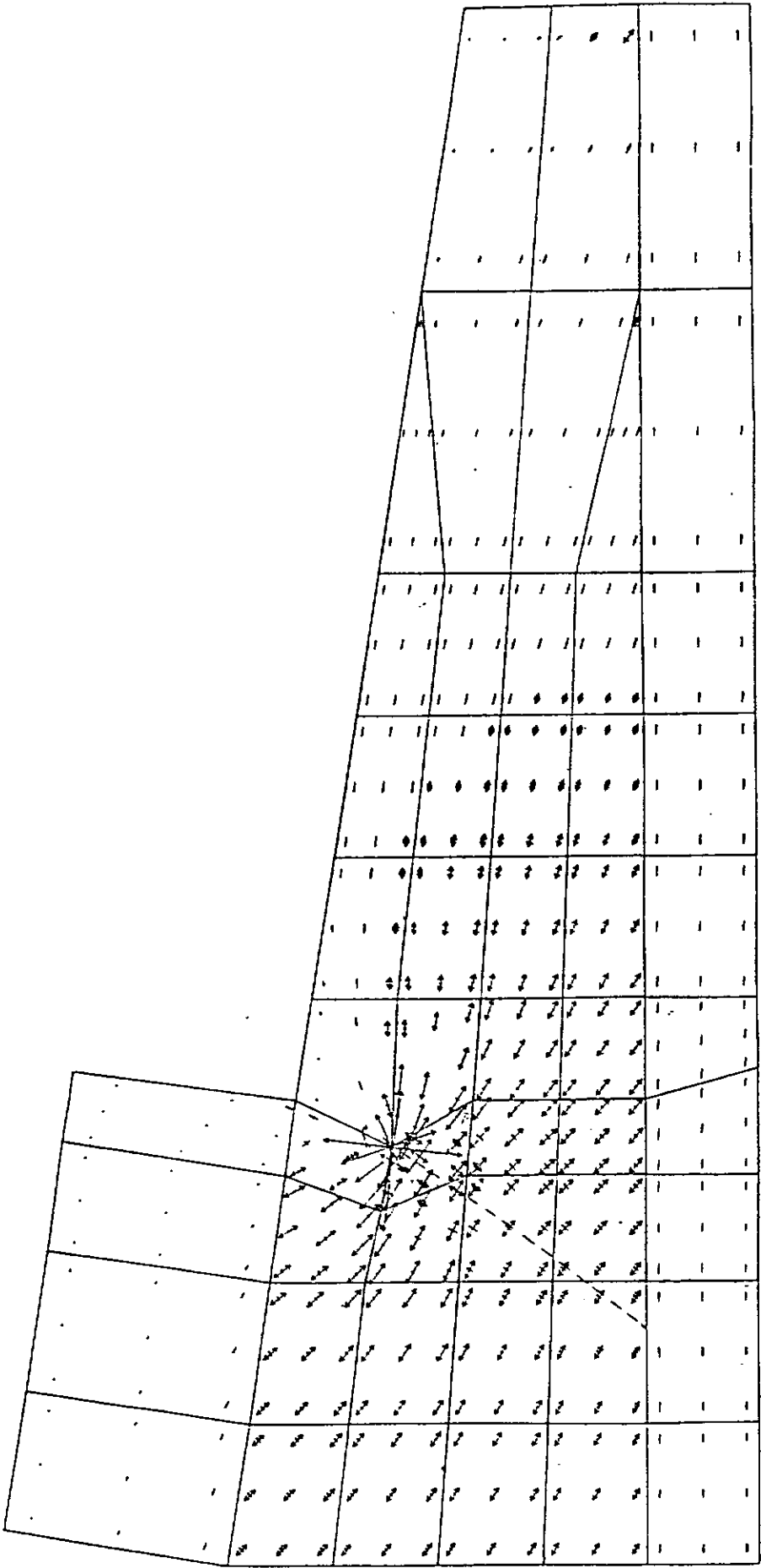
- 1 = .951 E0
- 2 = .184 E1
- 3 = .273 E1
- 4 = .361 E1
- 5 = .449 E1
- 6 = .537 E1
- 7 = .626 E1
- 8 = .714 E1
- 9 = .802 E1
- 10 = .890 E1
- 11 = .979 E1
- 12 = .107 E2
- 13 = .116 E2
- 14 = .124 E2
- 15 = .133 E2
- 16 = .142 E2
- 17 = .151 E2
- 18 = .160 E2
- 19 = .168 E2
- 20 = .177 E2



2  
1

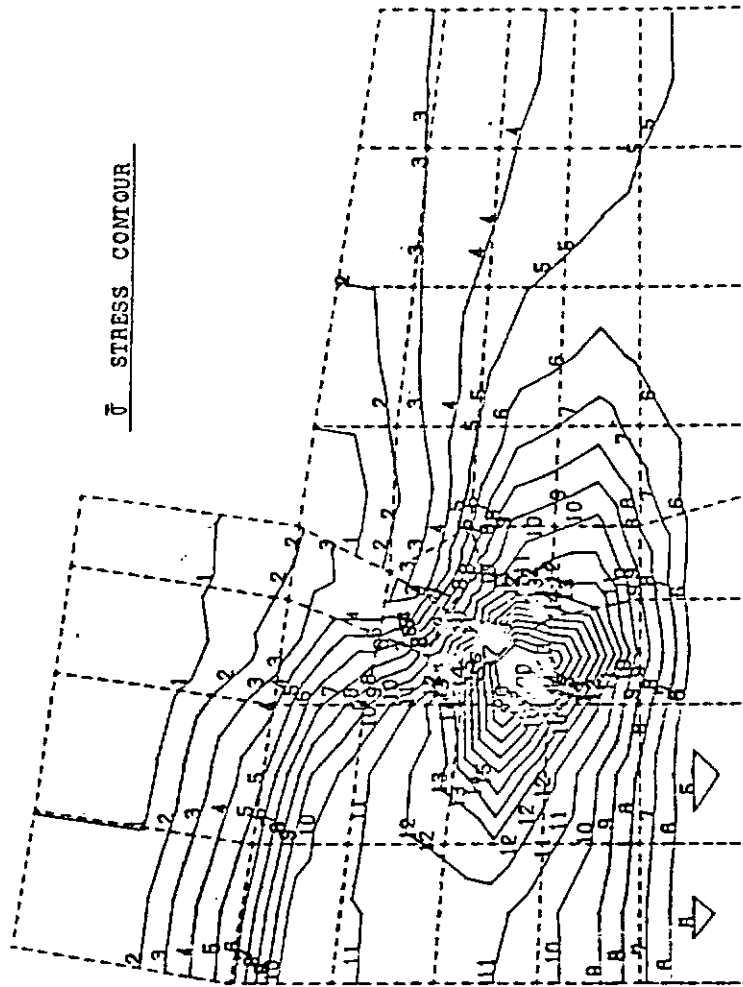
EQUIVALENT MISES STRESS

8.2.6



CRACK ANALYSIS (STEP 2) PRINCIPAL STRESS

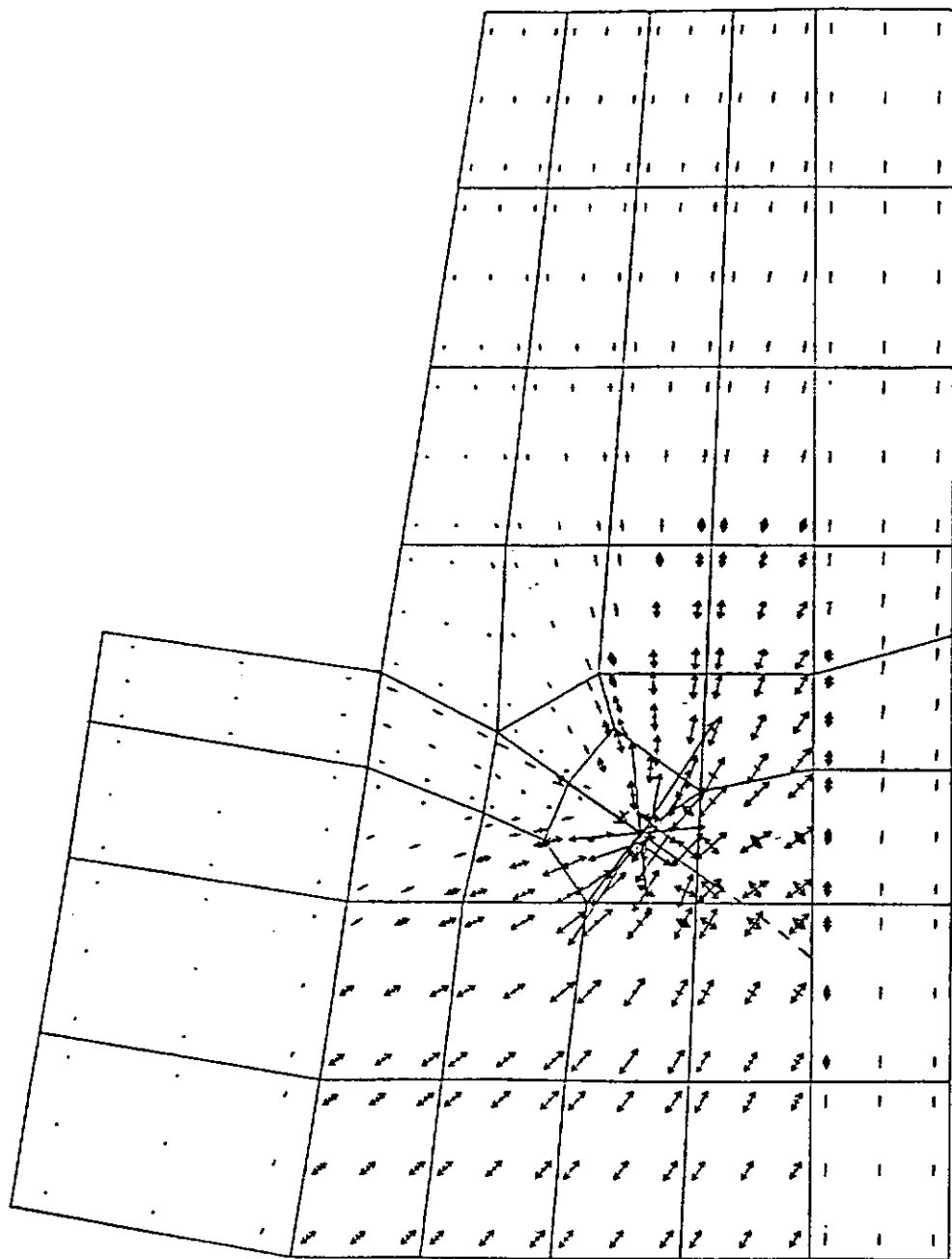
8.2.7



- 1 = .815 E0
- 2 = .103 E1
- 3 = .205 E1
- 4 = .306 E1
- 5 = .408 E1
- 6 = .500 E1
- 7 = .601 E1
- 8 = .703 E1
- 9 = .804 E1
- 10 = .906 E1
- 11 = .110 E2
- 12 = .120 E2
- 13 = .130 E2
- 14 = .140 E2
- 15 = .150 E2
- 16 = .161 E2
- 17 = .171 E2
- 18 = .181 E2
- 19 = .191 E2
- 20 = .201 E2

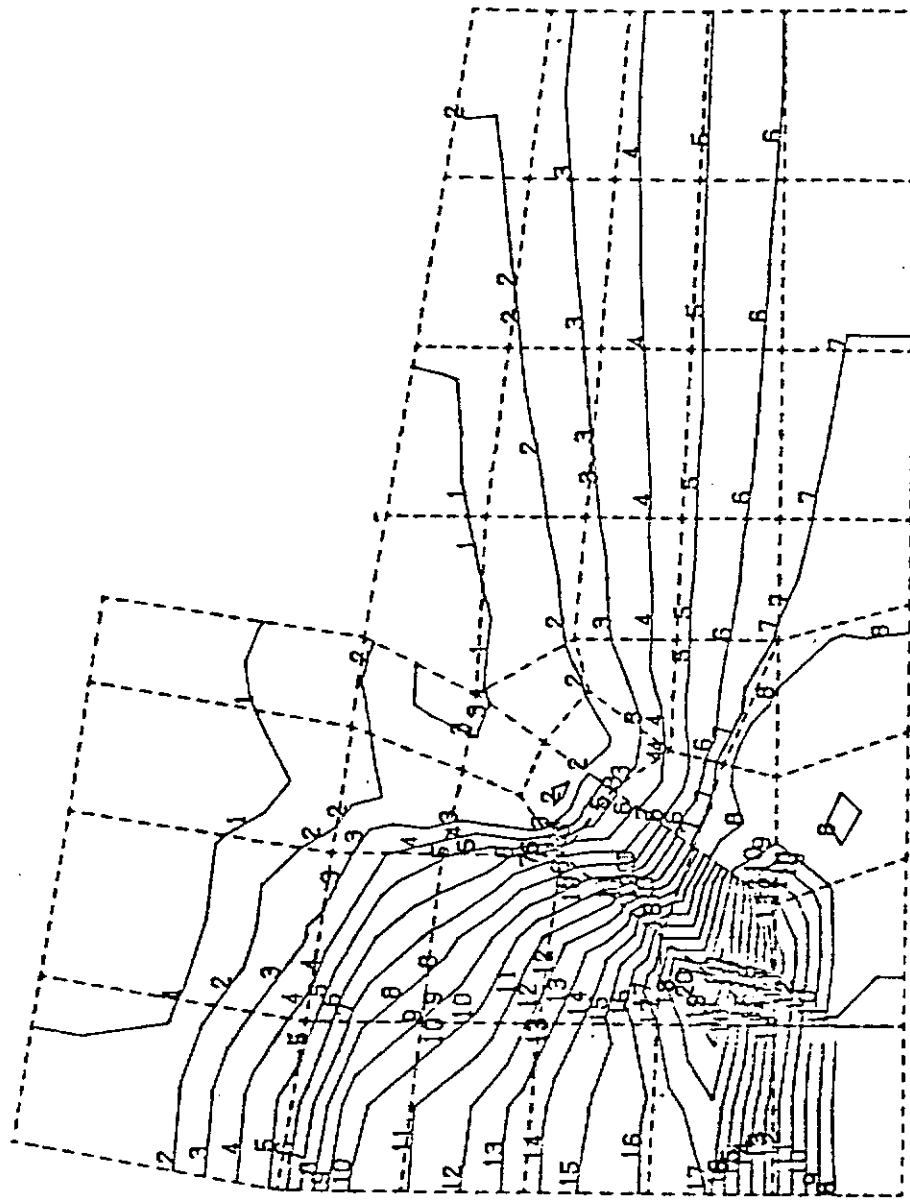
EQUIVALENT MISES STRESS

8.2.2.8

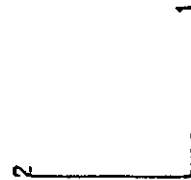


CRACK ANALYSIS (STEP.3) PRINCIPAL STRESS

8.2.9

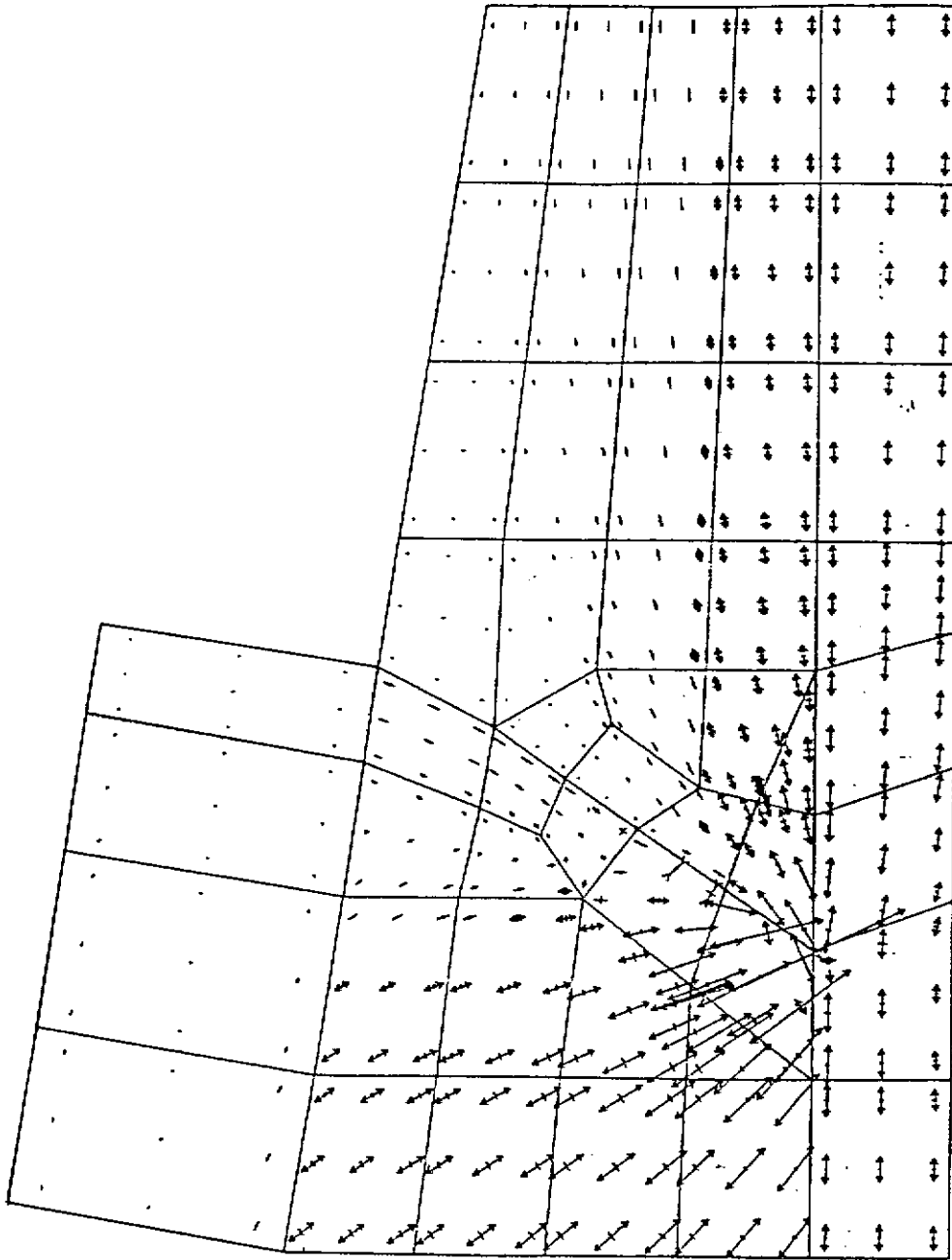


- 1 = .477 E0
- 2 = .125 E1
- 3 = 203 E1
- 4 = 280 E1
- 5 = 357 E1
- 6 = 435 E1
- 7 = 512 E1
- 8 = 590 E1
- 9 = 667 E1
- 10 = 745 E1
- 11 = 822 E1
- 12 = 899 E1
- 13 = 977 E1
- 14 = .105 E2
- 15 = .113 E2
- 16 = .121 E2
- 17 = .129 E2
- 18 = .136 E2
- 19 = .144 E2
- 20 = .152 E2



EQUIVALENT MISES STRESS

8.2.10



CRACK ANALYSIS (STEP.4) PRINCIPAL STRESS

8.2.11



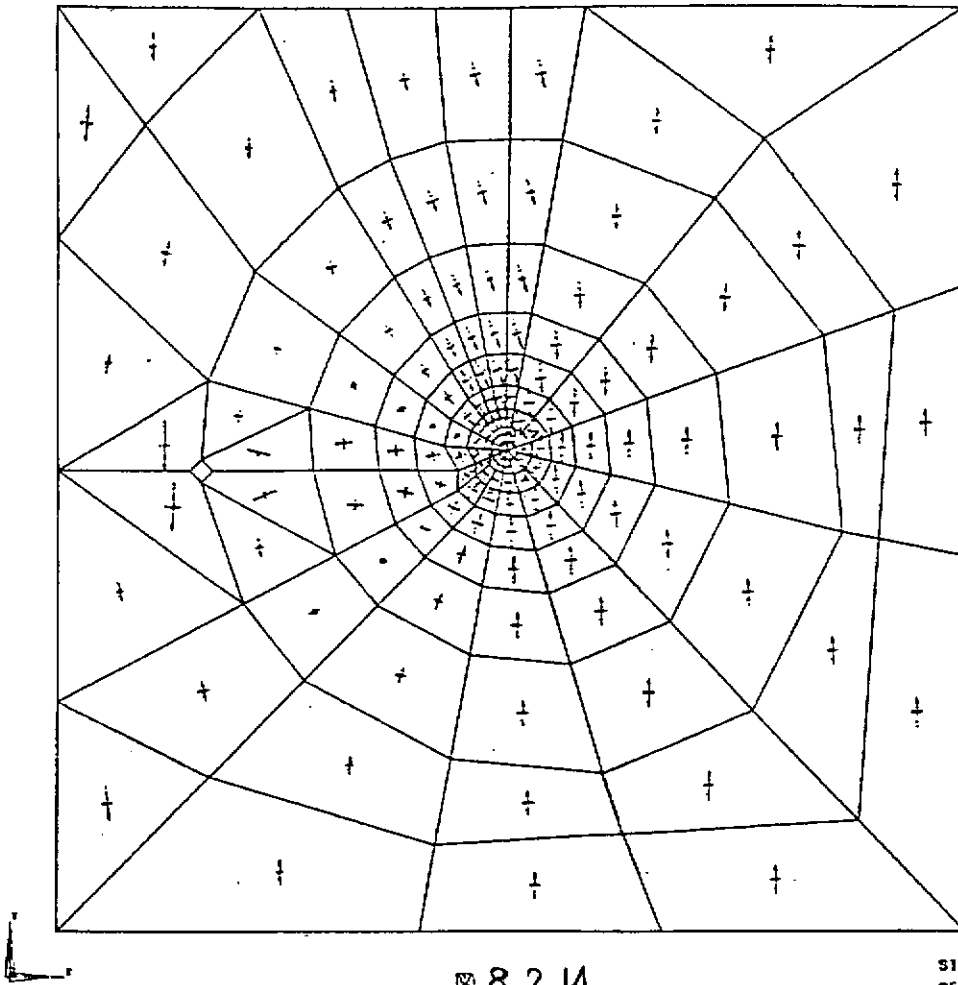


図 8.2.14

S10-MAX 3.3 $\times 10^4$   
 GEO. SCALE 2.0 $\times 10^1$   
 LOAD CASE 1

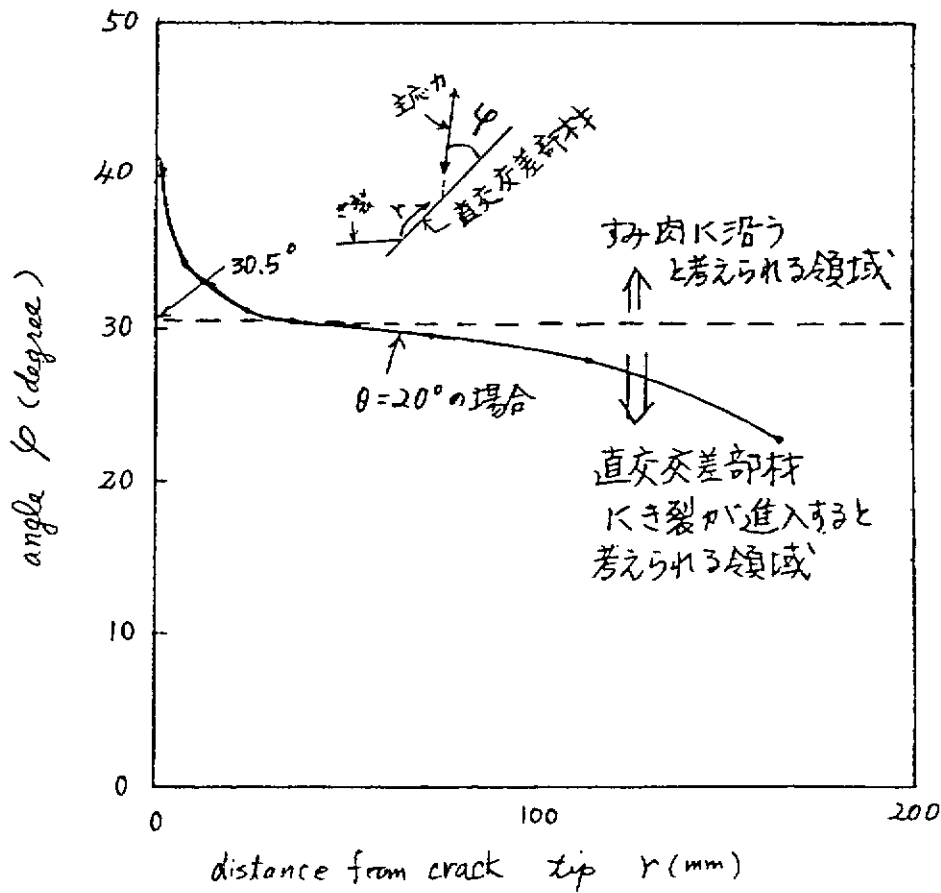


図 8.2.15 直交交差部材に沿う主応力の角度

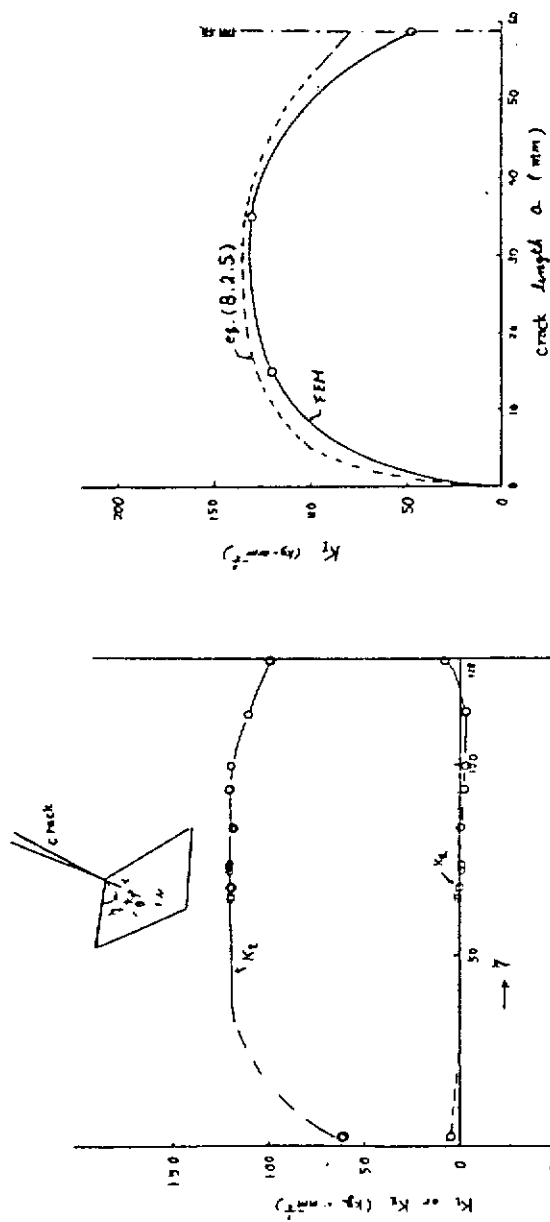


図 8.2.17  $K_I$  値の計算結果

図 8.2.16 Step 2 のクラック先端要素内の応力分布より  
求める  $K_I, K_{II}$  値

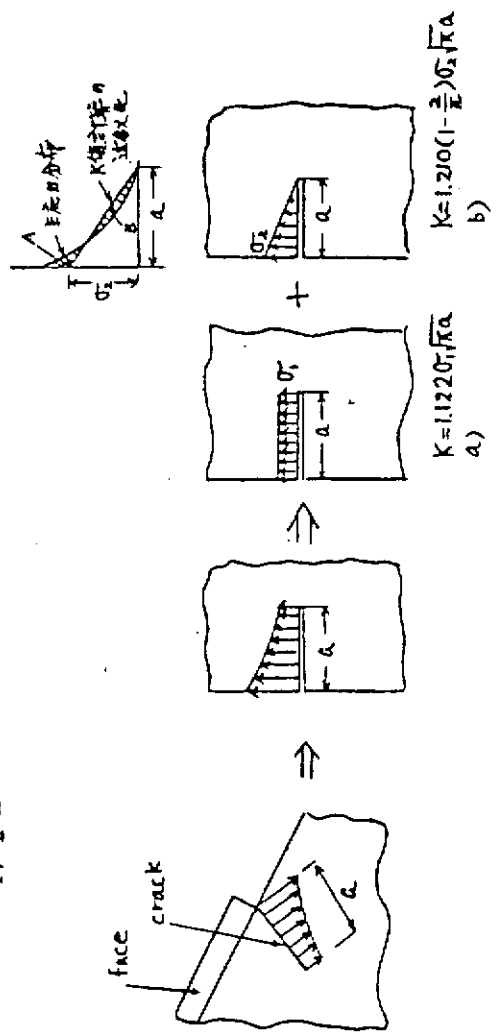


図 8.2.18 面材端部からの電位の  $K$  値解析のモデル化

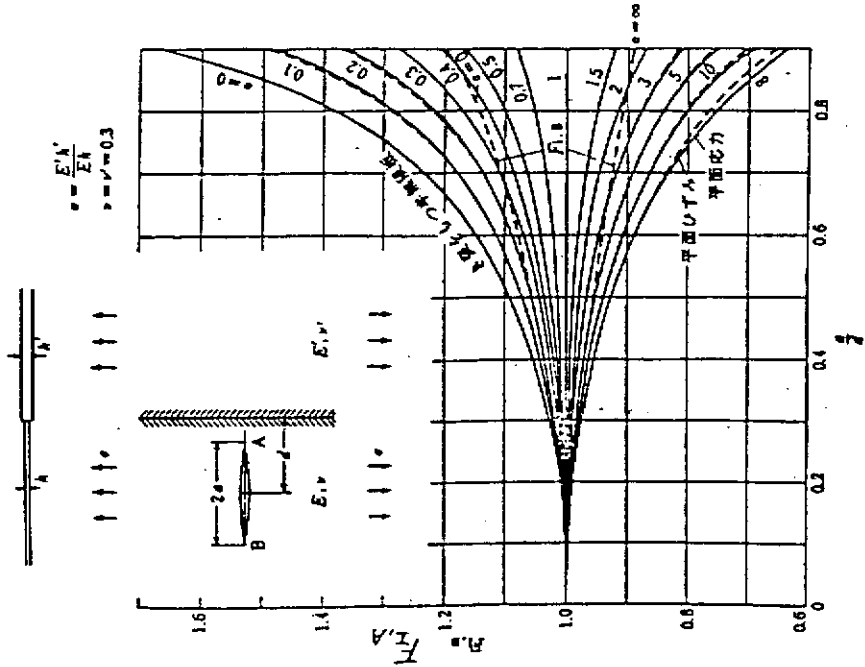


図 8.2.19 板の接合境界に近接する亀裂

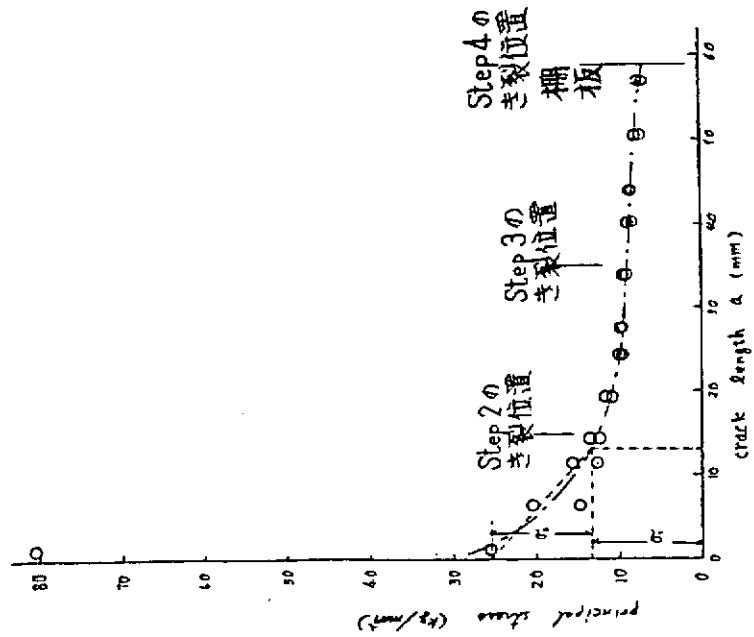


図 8.2.20 亀裂伝播予想経路における主応力分布  
(Step 1より)(クラックに垂直方向)

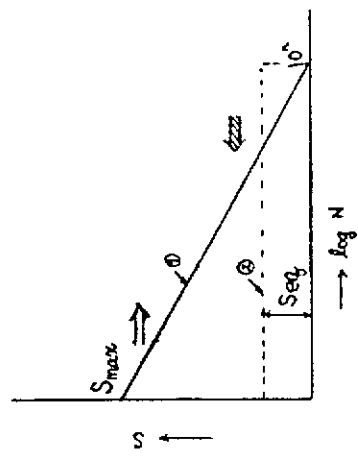


図 8.2.21 累積応力頻度分布

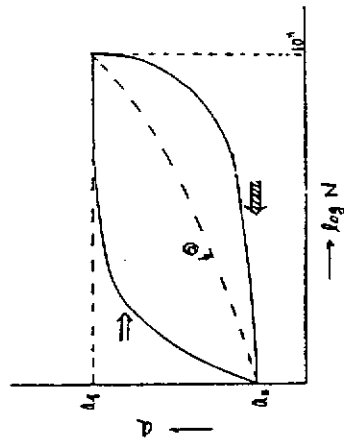


図 8.2.22 亀裂成長過程の模式図

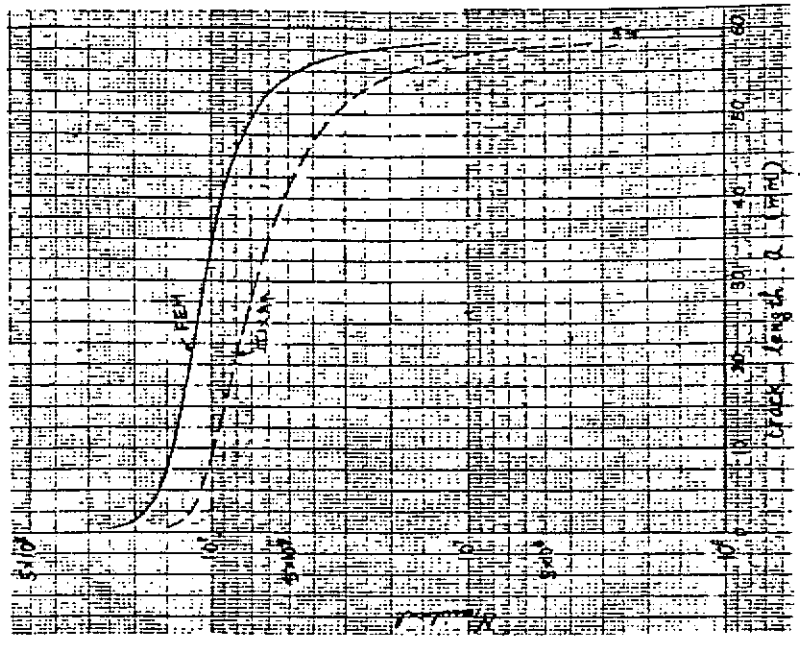


図 8.2.23 鋼板に亀裂が到達するまでの残寿命と亀裂長さの関係

### 8.3i 外板とロンジ材との接合部にあるスカラップ周辺 (その1)

—スカラップから伝播する亀裂—

#### 8.3i.1 目的

昭和51年度SR153部会SF小委員会<sup>1)</sup>で提案された船殻破壊機構解析の具体的な計算を行なう。計算はデッキ構造のうちロンジのスカラップ周辺から生じる亀裂の進展と構造破壊との関係を求めて、亀裂進展の挙動に破壊力学を適用して構造上の問題点を探る。

具体的には、船体の総曲げ応力によるスカラップ周辺の亀裂の成長様相を検討してこの種のクラックの特性を求めて先に提案された余裕寿命と強度を求める。

#### 8.3i.2 計算対象構造と作用荷重

デッキ構造として、先に三菱から提案されたものと同じ寸法である大型油送船のスラブロンジを対象として取り上げ、計算の重複を避ける。スカラップ詳細と部材寸法を図8.3i.1に示す。

デッキ構造に作用する荷重の中、総曲げ応力に対する破壊機構を調査する。図8.3i.2～4に示すようにスカラップの応力は引張曲げ荷重に対しては、特に大きくないが、剪断荷重に対してはかなり大きい。剪断荷重に対する損傷防止策は開孔基準等が既に報告されており、損傷も少なくなっている。

本章では、開孔基準とは別な視点で、上甲板、防撓材の亀裂が強度に及ぼす影響を考察する。

#### 8.3i.3 計算

##### (1) スカラップ附近から生じる亀裂の経路について

スカラップ附近からの亀裂には、上甲板の亀裂(半亀裂長さ $a$ )とロンジの亀裂(亀裂長さ $b$ )を考える。

- ① 型 ロンジに亀裂がなく、上甲板に脆性破壊が生じる場合
- ② 型 上甲板に亀裂がなく、ロンジのみの亀裂が進む場合
- ③ 型 ロンジが破断して、上甲板に亀裂が生じる場合
- ④ 型 ロンジの亀裂が進展し、上甲板にも亀裂が生じてロンジ、上甲板の2亀裂が進展する場合
- ⑤ 型 上甲板の亀裂が進展し、ロンジに亀裂が発生して2亀裂が進展する場合

の5つの破壊モードがある。

図8.3i.5は後述する計算結果を図示し、①～⑤のモードを示した。

##### (2) K値の計算について

図8.3i.6と7に上甲板亀裂とロンジ亀裂のK値 $K_A$ 、 $K_B$ を亀裂長さ $a$ 、 $b$ をパラメータとして示す。なお $K_A$ 、 $K_B$ は上甲板の総曲げ応力の特性を考慮して、図8.3i.8の有限要素法モデルにより計算し、部材端の変位 $\delta$ を一様伸びとして与え、等価応力 $\sigma_0$ が $1 \text{ kgf/mm}^2$ の単位荷重に対して示した。そして図中に中央亀裂と片側亀裂のK値を示した $K_1$ 、 $K_2$ と対比した。有限要素計算からK値を求める際、亀裂先端からの距離 $r$ の変位 $u$ を用いた式でK値を定めた。

$$K = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{2r}} \times E u, \quad E = 21,000 \text{ kgf/mm}^2 \quad \text{----- (8.3i.1)}$$

##### (3) 外荷条件

(脆性破壊発生の靱性値と最大応力)

SR153-SF小委では変動応力と静水中応力が最大 $20 \text{ kgf/mm}^2$ と想定し、解析が行なわれたが、本章では $24 \text{ kgf/mm}^2$ として解析する。図8.3i.6から判るように、上甲板亀裂は $a < 1000 \text{ mm}$ では $K_A$ の最大が $29 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ で $K_C = 600 \text{ kgf/mm}^{3/2} \sqrt{a}$ と考えると最大応力が $20 \text{ kgf/mm}^2$ では破壊が生じないことになる。このために便宜上の処置として、軟鋼の規格値相当の最大応力 $24 \text{ kgf/mm}^2$ が作用するものとし、後記の検討を行なう。

(なお、 $K_C = 500 \text{ kgf/mm}^{3/2} \sqrt{a}$ で最大応力 $20 \text{ kgf/mm}^2$ の場合にもなる)

## (4) 疲労亀裂伝播則と荷重

SR153-SF小委員会から

$$\left. \begin{aligned} \frac{da}{dN} &= C \Delta K_A^m \\ \frac{db}{dN} &= C \Delta K_B^m \end{aligned} \right\} \text{----- (8.31.2)}$$

$$C = 1.44 \times 10^{-8}, \quad m = 2.5 \text{----- (8.31.3)}$$

とし、等価一定繰返し応力  $\sigma_a = 3.00 \text{ kgf/mm}^2$  が作用し遭遇する繰返し応力総数の 0.1 のみが亀裂伝播に寄与するものとした。

## (5) 残余寿命と強度

図 8.31.9～11 に甲板亀裂またはロンジ亀裂が成長して脆性破壊発生に至るまでの残余寿命  $N_r$  と残余強度  $\sigma_c$  を示す。なお、②の亀裂経路ではロンジ亀裂が 450% になるまでの亀裂の残余寿命と強度を示した。

## (6) 単一亀裂からの 2 つの亀裂への分岐の計算

①型、②型の亀裂が④、⑤型の亀裂へ変化する限界値と寿命を図 8.31.12 と 13 に示した。(7)に示すように計算では亀裂進展にともなう応力増加の影響を図 8.31.14 のように考慮し MINER 則の USAGE FACTOR = 1 となると亀裂が発生するものとし、図 8.31.15 の S-Ni 曲線を用いた。なお、図 8.31.9 と 10 では単一欠陥 a、b を持つ構造から、2 つの亀裂を持つ構造までの寿命 ( $N_r$ ) を単一亀裂の進展量を考慮せず求めた。

## (7) 単一亀裂から 2 つの亀裂への分岐の計算手法

亀裂想定個所の応力  $\bar{\sigma}$  が  $dN$  回繰返すと、USAGE FACTOR  $df$  は MINER 則によって次式で表わされる。

$$df = \frac{dN}{N_i} \text{----- (8.31.4)}$$

ここで  $N_i = 10^{(0.2\sigma + 3.4)}$  として図 8.31.15 より近似する。

$\sigma$  は FEM 計算により図 8.31.14 から次式で表示される。

$$\sigma = k_g (1 + k_a \cdot a) \cdot \sigma_0 \text{----- (8.31.5)}$$

ただし： $a$  : 亀裂の長さ

$\sigma_0$  : 切欠部を離れた個所の応力

$k_g$  : 亀裂  $a$  のない場合の応力集中係数 (スカラー下で 1.2、デッキで 1.1)

$k_a$  : 応力再配分による応力増加係数 ( " 0.004 " 0.001 )

一方  $dN$  回応力変動がある間に  $da$  の亀裂が進展すると PARIS 則で次式となる。

$$dN = \frac{da}{CK^m \sigma_0^m} \text{----- (8.31.6)}$$

$K$  = 図 8.31.6, 7 の単位応力による  $K$  値

以上 (8.31.4) ~ (8.31.6) によって初期欠陥  $a_0$  が  $a$  の長さになる寿命  $N$ 、と USAGE FACTOR  $f$  がそれぞれ求められる。

図 8.31.12 ~ 13 は初期欠陥  $a_0$  の時  $f = 0$  のロンジ、デッキの継手部が  $f = 1$  になる時の亀裂長さ  $a$  と寿命を例示した。

#### 8.31.4 検討および考察

以上の計算結果をまとめると次のようになる。

- (1) K値の計算結果は図 8.31.6 ~ 7に見るとおり、上甲板のK値はスカラップの亀裂にあまり影響されないが、スカラップの亀裂のK値は、上甲板の亀裂に大きく影響される。この傾向は、図 8.31.14 の注目点の応力増加からも類推され、上甲板は主部材でロンジが2次部材であるものと考えることができる。
- (2) 上甲板の亀裂のK値は、ロンジの亀裂の有無に拘わらず、 $a$ がロンジ間隔以下では、上限値がある。
- (3) 図 8.31.12 に見るように、 $a$ 、 $b$ とも約200%以下の初期亀裂では、④、⑤のモードのように、2つの亀裂が進展する可能性があり、200%以上の初期亀裂では、単一亀裂として、構造強度を考えると良いと思われる。

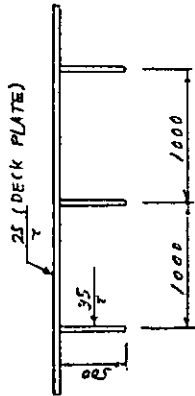
#### 8.31.5 まとめ

上甲板付ロンジのスカラップ附近の亀裂の成長様相を検討してスカラップから伝播する亀裂の径路と亀裂の寿命と残余強度を求め、構造上の問題点を考察した。その結果、従来から設計で採用されている考え方通り、上甲板は1次部材、ロンジは2次部材であると考えることができる。そして、上甲板ロンジ亀裂が小さいとき(約200%以下)は2つの亀裂が進展して構造破壊する場合があるが、200%以上の大亀裂では、単一亀裂のまま構造破壊する場合もあり、亀裂を評価する基準となる亀裂寸法が考察された。

#### 参考文献

- 1) 日本造船研究協会153部会、“厚鋼板大入熱溶接継手の脆性破壊強度および疲労強度に関する研究”日本造船研究資料 第267-2、昭和52年3月

SECTION DECK LONGIT'S



SEC. AREA OF STIFFER 173 cm<sup>2</sup>  
" DECK R 250 "  
SECTION MODULUS 2655 cm<sup>3</sup>

DETAIL OF SCALLOP AND WELD JOINT

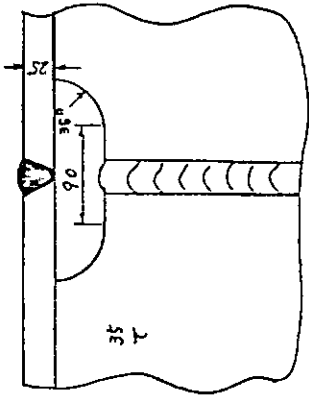


FIG 8.31.1 DIMENSION OF DECK STRUCTURE

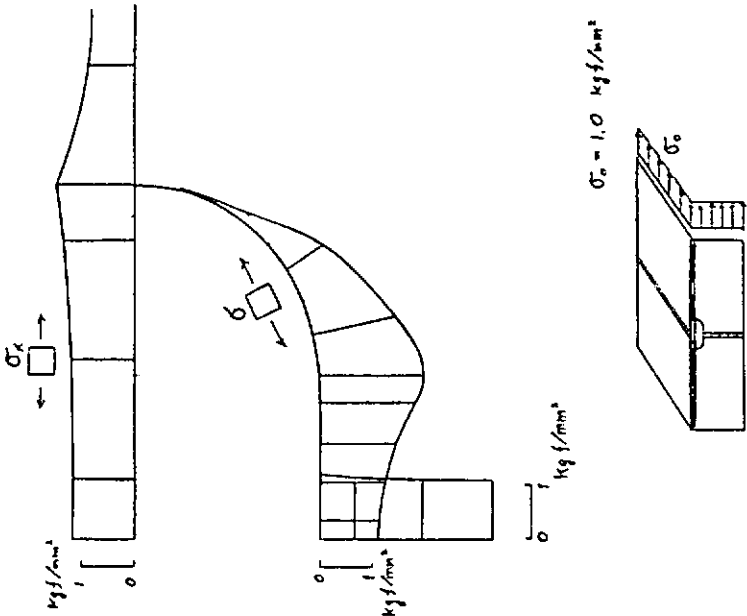


FIG 8.31.2 STRESS DISTRIBUTION AROUND SCALLOP UNDER TENSILE LOAD

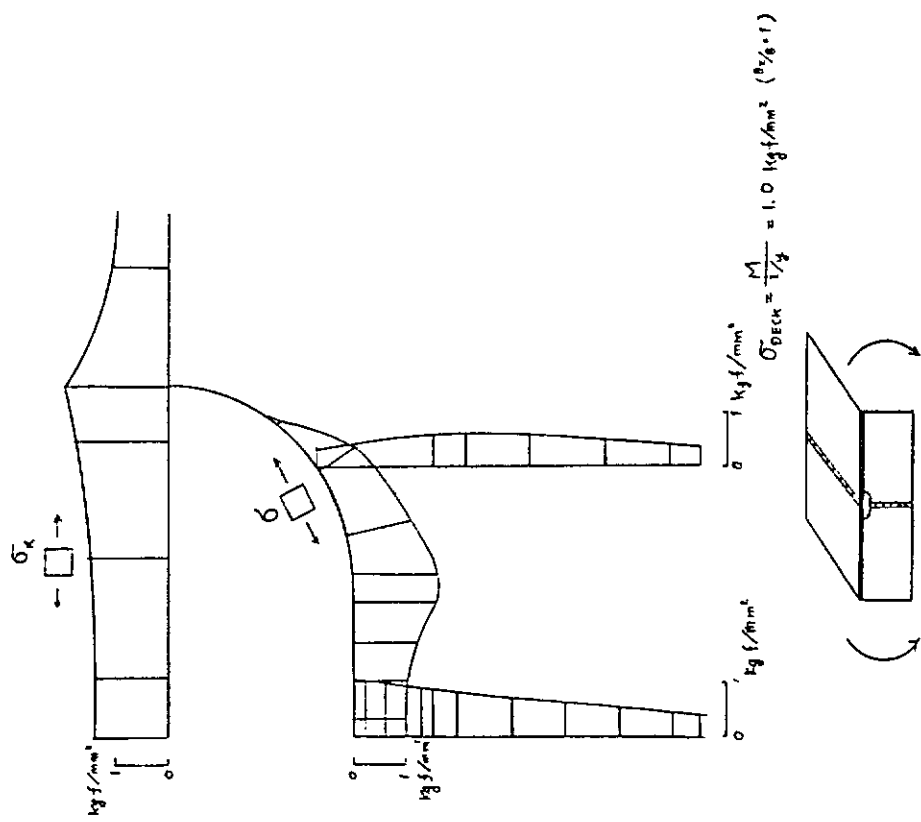


图 8.3r.3 应力分布 around 扇贝 在弯曲荷载下

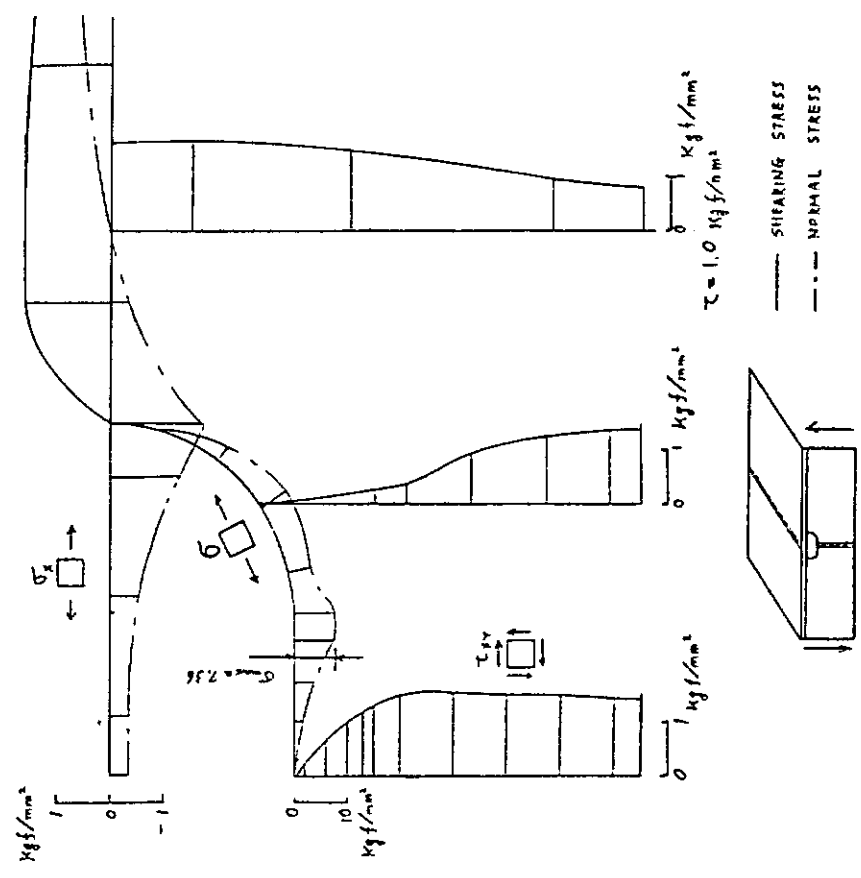


图 8.3r.4 应力分布 around 扇贝 在剪切荷载下

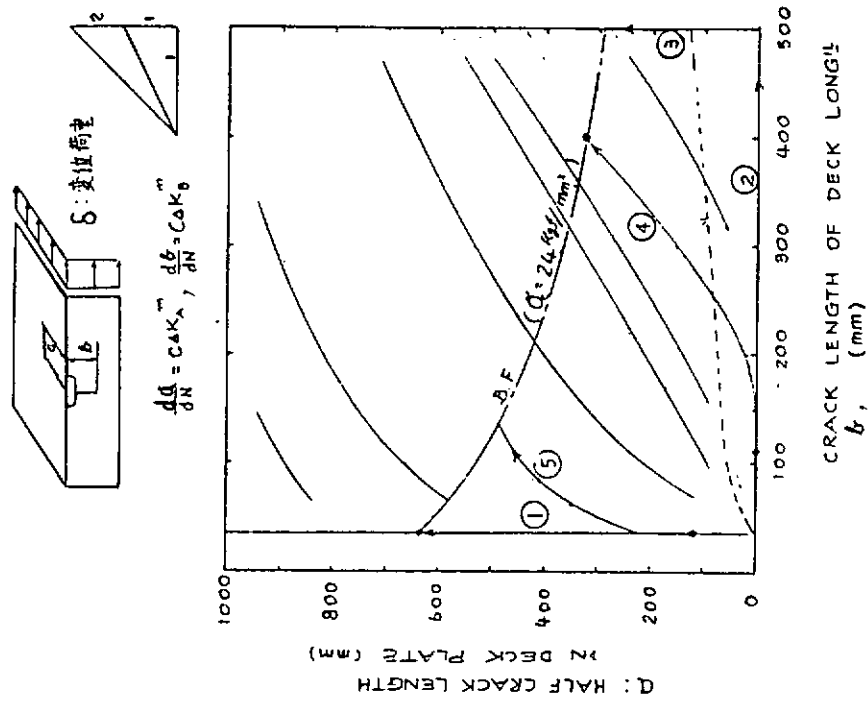


图 8.31.5 CRACK PATH

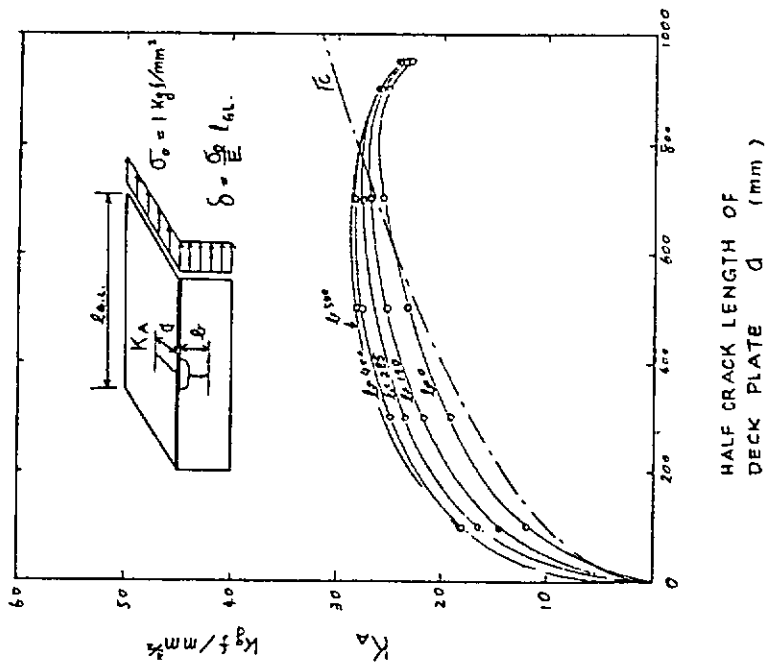


图 8.31.6 K - VALUE IN DECK PLATE

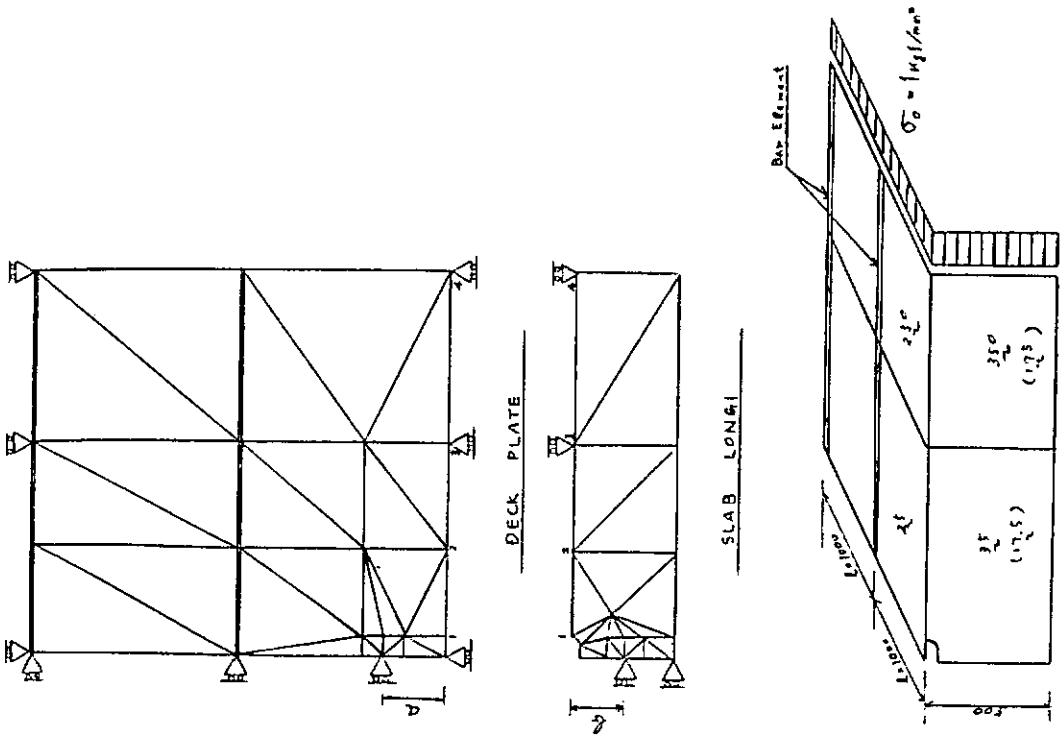


FIG 8.31.8 IDEALIZATION AND MESH DIAGRAM

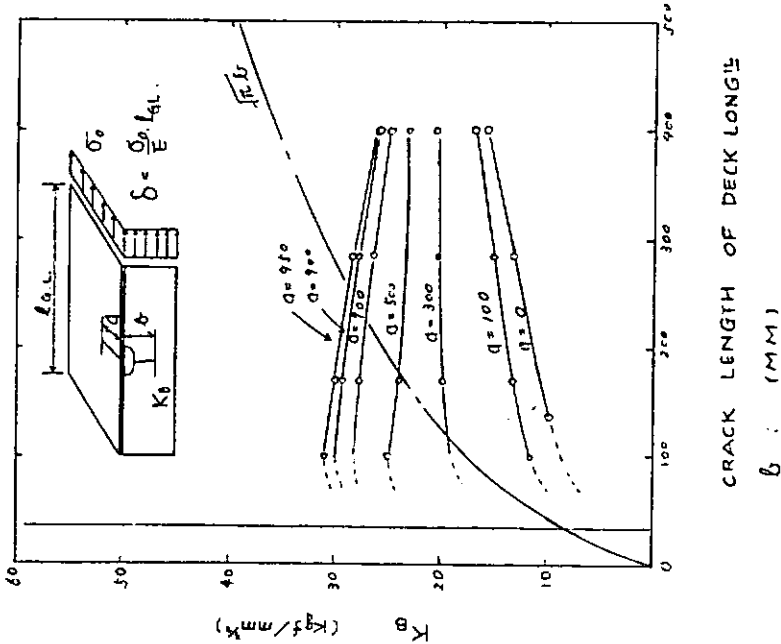


FIG 8.31.7 K-VALUE IN DECK LONG

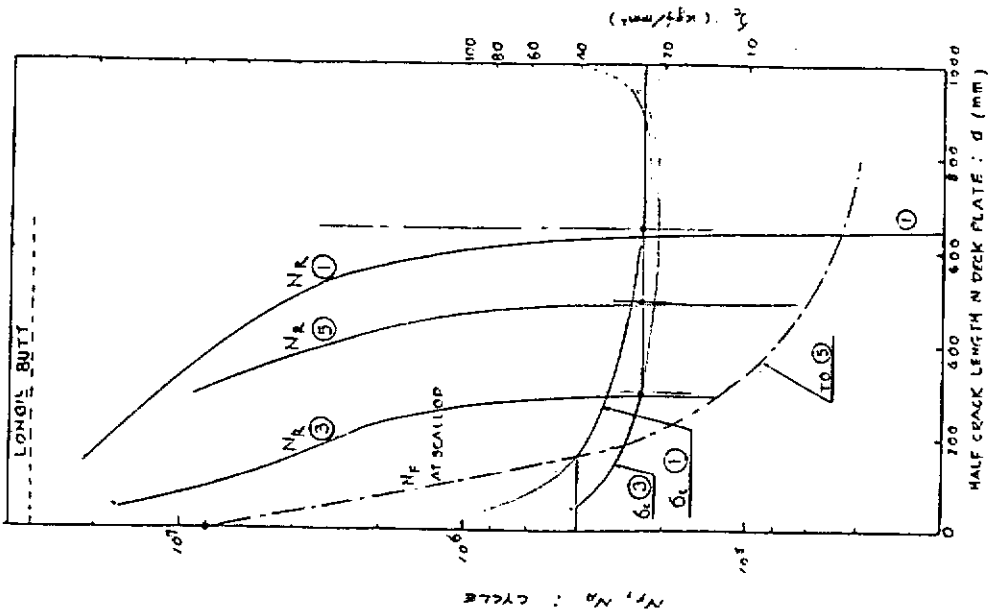


FIG 8.31.9  $N_F, N_R$  AND  $\delta_c \sim a$  CURVE

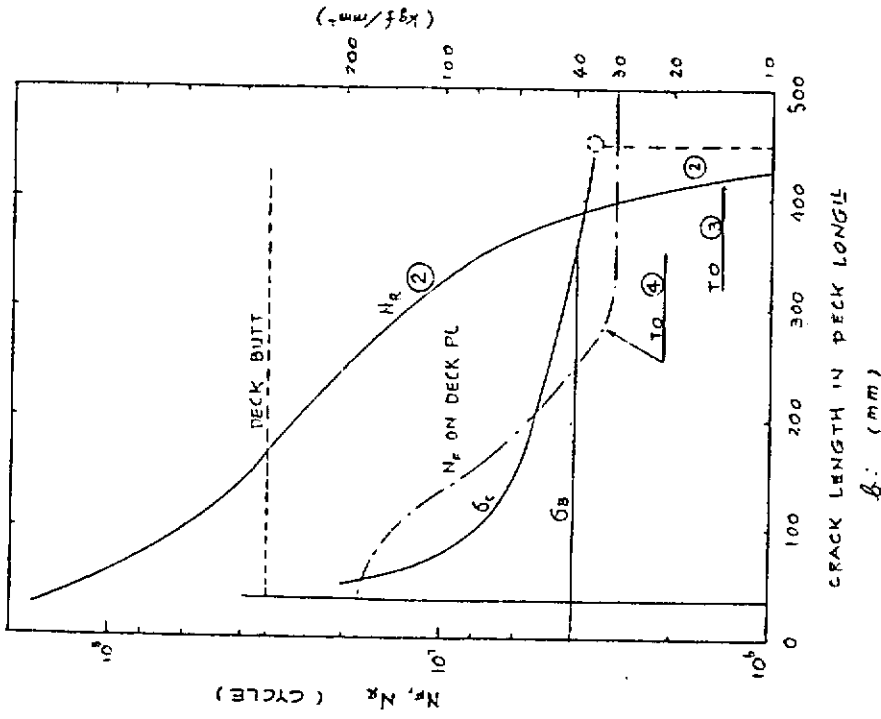
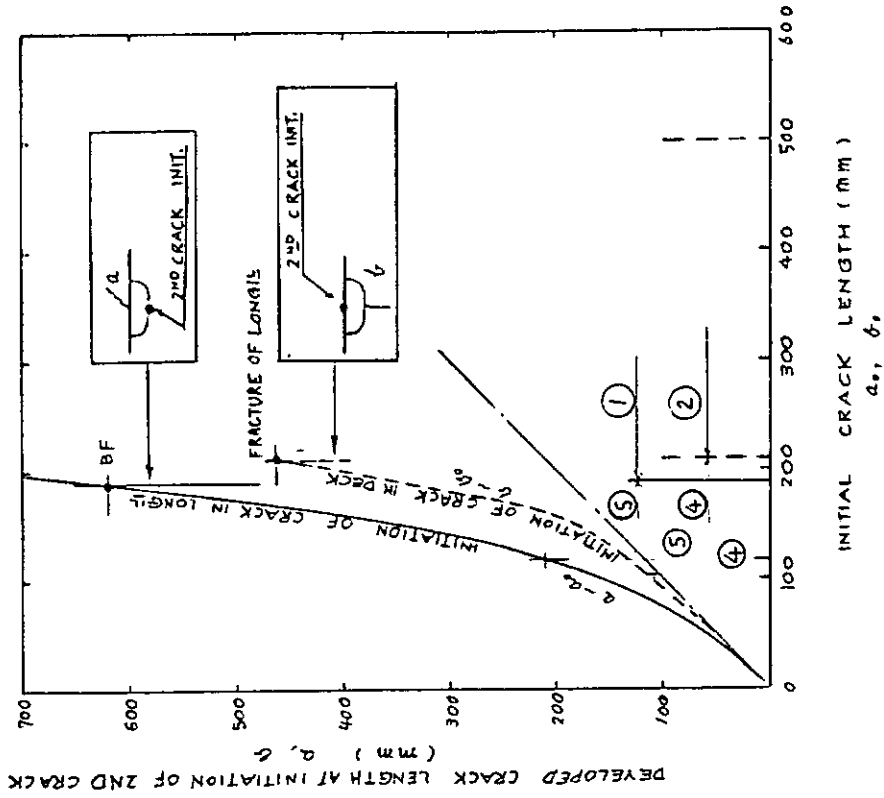
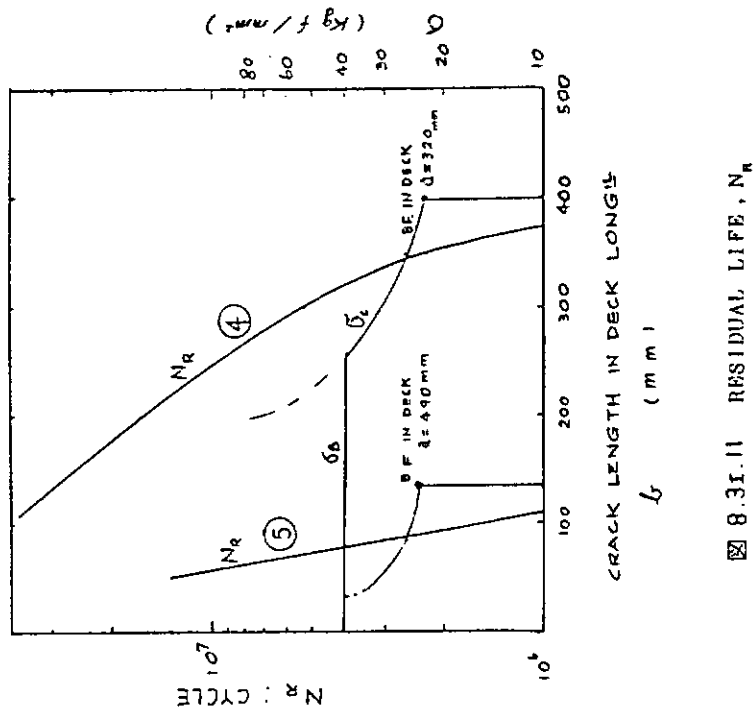


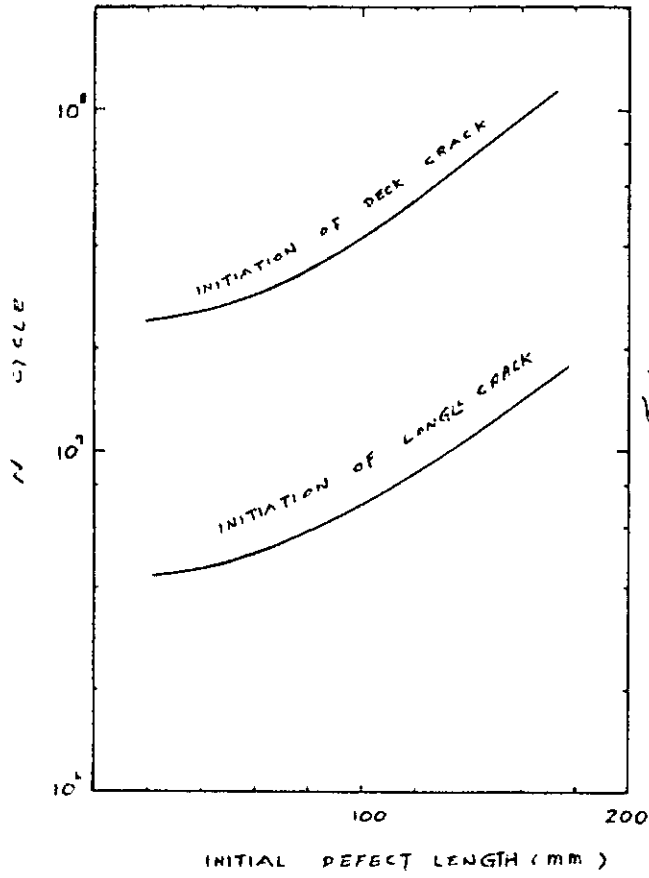
FIG 8.31.10 RESIDUAL LIFE IN PATH ②



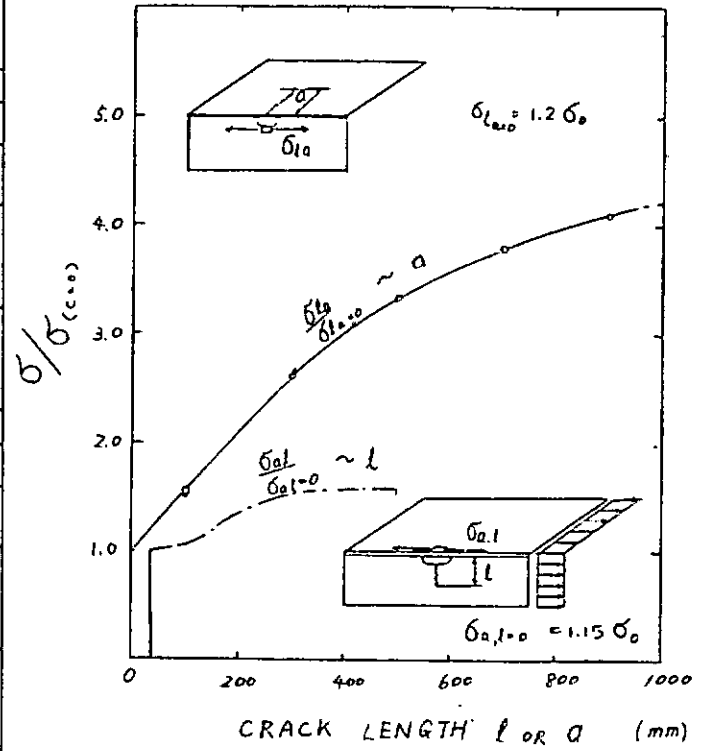
8.31.12 TRANSITION FROM SINGLE CRACK TO DOUBLE CRACK



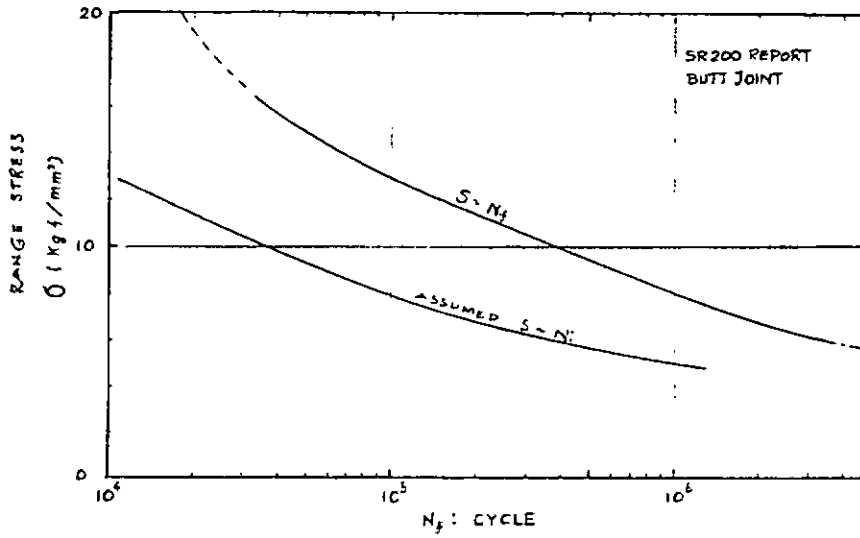
8.31.11 RESIDUAL LIFE,  $N_R$



8.3i.13 LIFE TO DOUBLE CRACK



8.3i.14 STRESS INCREMENT DUE TO CRACK EXTENSION



8.3i.15 ASSUMED  $S \sim N_f$  CURVE

## 8.3Ⅱ 外板とロンジ材との接合部にあるスクラップ周辺 (その2)

— 縦通部材のモデル化とK値 —

### 8.3Ⅱ.1 目 的

船殻構造のK値解析する場合に対象となる亀裂寸法にも関連して、計算領域の設定方法、境界条件、構造物の有限要素化等を適切に設定する必要がある。本節ではその1で実施したデッキロンジのK値解析例の一部につきシリーズ計算を行い上記の検討を行った。

### 8.3Ⅱ.2 計 算 例

- (1) 実船殻の有限要素法解析の効率化を目標とする場合には要素の寸法比をできるだけ大きく、要素寸法を大きく、計算領域を小さくしたい。これに反して精度は低下するのが一般である。一方前章で詳細に記述したように直接法により亀裂先端部の開口変位<sup>1)</sup>からK値を算定する場合には2つの方法があり、亀裂先端から一番目の節点で求める方法①評価法、亀裂先端からやや離れた点において、 $K_I$ 値が一定になる性質を利用する方法②評価法について数値実験する。また要素の寸法比を大きく取ると精度は悪くなるが、計算の効率化が期待されるので要素寸法比を非常に大きく取った場合の問題点を把握することを試みた。

#### (2) 計算対象構造と荷重

その1で実施した、大型タンカーの上甲板のK値解析構造と同一とした。想定亀裂は、スクラップから伝播した亀裂が成長してデッキロンジが破断し、デッキの亀裂長さ  $2C=1000\text{mm}$  の大亀裂の場合とし、重ね合せ法においても解析されている構造を選んだ。荷重状態としては上甲板構造では半無限板構造に近い構造が単位荷重 ( $\sigma_0=1\text{kg}/\text{cm}^2$ ) を受ける場合を解析する。計算としては計算領域  $L$  を  $1^{M}000$ 、 $3^{M}000$ 、 $5^{M}200$  の3種とし、等分布荷重と変位型荷重の2種類とした。なお変位型荷重としては、亀裂のない構造が単位荷重を受ける場合に生じる伸び量を端部変位とした。図8.3Ⅱ.1には構造のモデル化と寸法を示す。

参考として、ロンジの上下接みを拘束し、ロンジの接みがK値に及ぼす影響を試算した。

### 8.3Ⅱ.3 計算結果及び考察

計算結果の一覧表を表8.3Ⅱ.1に示し、モデル化の違いすなわち、計算領域( $L$ )の大きさ、亀裂先端部の要素寸法( $s$ )と亀裂半長さ( $c$ )との比、亀裂先端付近の要素の寸法比等と、K値の評価方法の相違(①評価、②評価)が及ぼす影響を調査した。

#### (1) $K_I$ 値の評価方法について

後述する精度に関して示されているように、直接法でK値を求める場合には、亀裂先端の特異性を直接的に含まない定歪型有限要素を使った本節の解析では、亀裂先端からの距離  $r$  の位置での亀裂の開口量  $\delta$  からK値を推定する手法が取られる。

$$K_I = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2r}} \frac{\delta}{2} \quad \text{----- (8.3Ⅱ.1)}$$

この場合、 $r$  が先端に近いと離散化誤差が入り、先端から離れると特異性の特長が生かせなくなる傾向がある。<sup>1)</sup> 従って適当に離れた位置でK値を求める必要が有る。図8.3Ⅱ.2では先端の位置と  $r/c=0.1$  位置での  $K_I$  評価を比較した。前章の十字艇手の解析例から判断すると、 $r/c=0.01$ 、 $0.002$  等の先端の位置で評価すると誤差が大きいので、②の評価法で  $r/c=0.1$  程度が高精度であると推定される。

#### (2) 計算領域について

図8.3Ⅱ.2に示した通り、大型タンカーの上甲板の亀裂解析においては  $L/c=10$  程度の領域を取って理論解析すると周辺の影響を余り受けないことが判る。一方変位型と荷重型の相違は  $L/c=10$  においても約5%有り、実際構造物の作用荷重の状態は両者の中間に有るものと推定される。

### (3) 要素の寸法比(先端部の要素とノッチ周辺部の要素)

(1)項とも関連するが、表 8.3II.1 の荷重型の K 値において、計算番号 1, 2, 3 と 5, 6, 7 の比をカッコ内ですしたように、要素寸法( $s$ )と亀裂半長( $c$ )の比( $s/c$ )が小さくなると K<sub>I</sub> 値はほぼ一定の比率で大きくなる。即ちノッチ先端のサブストラクチャに作用する力の評価が外周部の要素に影響されることが推察される。外周部の要素の形状比(プロポーション)は通常の応力解析においては  $1/100$  にすると誤差が大きくなるので普通は避けるのが好ましく、K 値の理論解析においても避けるべきであることが判る。

### (4) SR153-SF 小委の計算との比較<sup>2)</sup>

SR153-SF 小委においては、MODEL 3 とほぼ同一の計算領域で K 値の重ね合せ法による解析例があり、その結果を表 8.3II.1 で比較した。その結果 SR153-SF 小委との相違は荷重低下率基準、計算領域と直接法における K 値の評価法等が重畳したためであることが判明した。なおこれに関して MODEL 4 では、ロンジの上下換みを拘束した 2 次元的モデルについても計算した。以上の事柄から上甲板の大きな亀裂の解析に対しては 2 次元的取扱いでかなり高精度な結果が得られるものと考えられる。

### 8.3II.4 ま と め

上甲板に大きな亀裂を持つ船殻構造について K 値を有限要素解析する場合の各種の計算の設定条件につきシリーズ計算を行った。

その結果、亀裂先端で K 値を求めると低めの値を与えること、上甲板の計算領域( $L/c$ )は 10 程度必要であり、10 以下であると低めの近似となること、要素の寸法比はできるだけ 1 に近付ける工夫が必要であること、等の具体的指針が得られた。

### 参考文献

- 1) Chan, S. K., Tuba, J. S. and Wilson, W. K., "On the Finite Element Method in Linear Fracture Mechanics," Eng. Fracture Mech., Vol. 2, (1970) pp. 1-17.
- 2) 日本造船研究協会第 153 研究部会, "厚鋼板大入熱溶接継手の脆性破壊強度および疲労強度に関する研究 報告書 II", 日本造船研究協会研究資料 NO. 267-2, 昭和 52 年 3 月

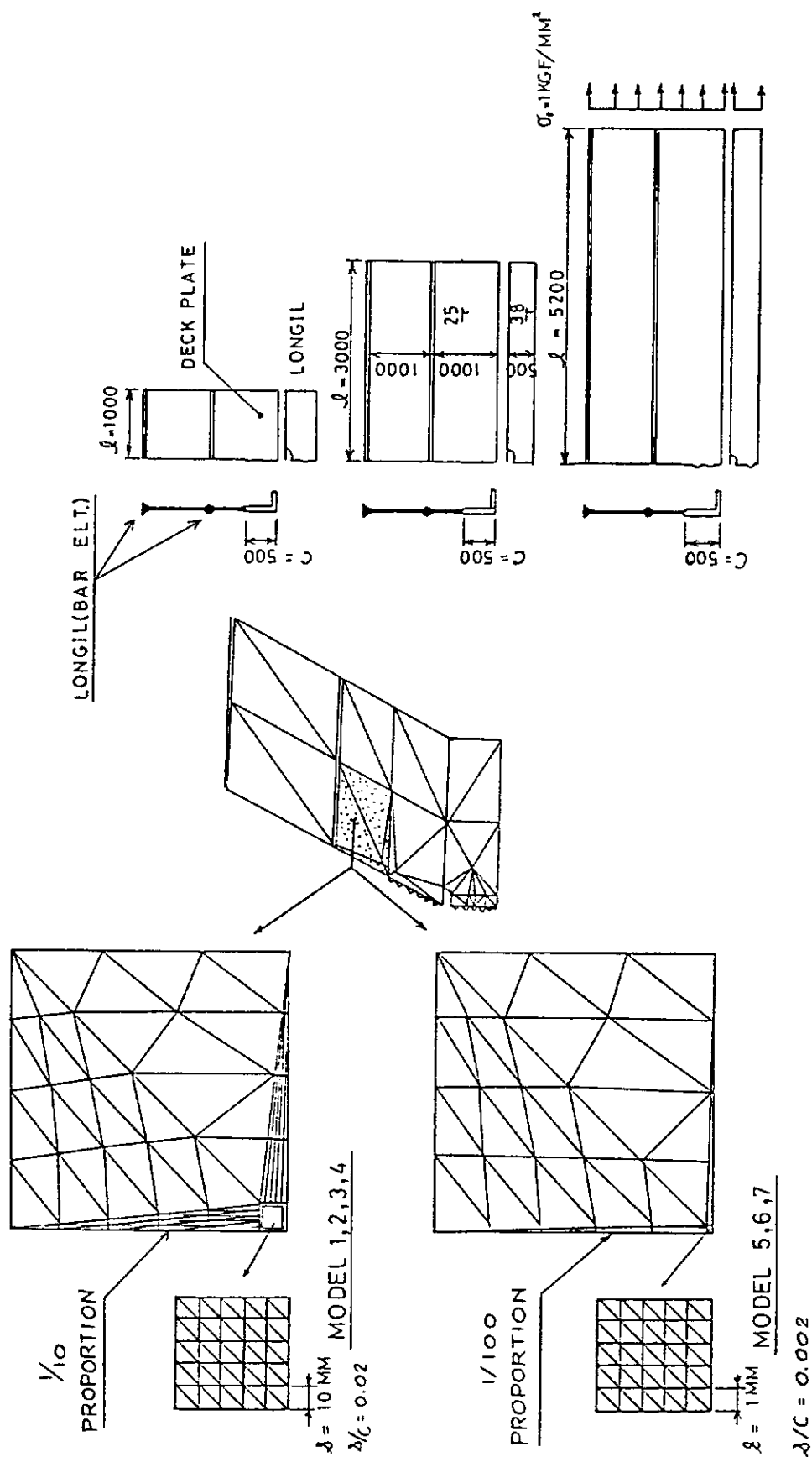


図 8.3π.1 構造のモデル化と寸法

表 8.3Ⅱ.1 計算結果一覧表

| モデル化             |                    |             |                      | 直接法のK値の比較 |                 |                 |       |       |           |      | 備考    |                                                           |                  |
|------------------|--------------------|-------------|----------------------|-----------|-----------------|-----------------|-------|-------|-----------|------|-------|-----------------------------------------------------------|------------------|
| PROPORTION RATIO | 境界条件               | 最小要素寸法比     | 計算領域                 | 番 号       | 荷 重 型           |                 | 変 位 型 |       | SR153との比較 |      |       |                                                           |                  |
|                  |                    |             |                      |           | ①               | ②               | ①/②   | ①     | ②         | ①/②  |       | SR153<br>552                                              | SR153SF<br>値合せ方法 |
| 1/10             | ロンドの<br>上下撓み<br>自由 | △c<br>0.02  | ℓ=1 <sup>M</sup> 000 | 1         | 34.03           | 38.51           | .884  | 28.10 | 31.81     | .884 | 28.10 | ①△c=0.02<br>②△c=0.1<br>でそれぞれK値<br>と評価                     |                  |
|                  |                    |             | ℓ=3 <sup>M</sup> 000 | 2         | 40.26           | 45.46           | .885  | 36.28 | 41.02     | .885 |       |                                                           |                  |
|                  |                    |             | ℓ=5 <sup>M</sup> 200 | 3         | 38.89           | 44.52           | .875  | 36.84 | 42.12     | .875 | *     | 45.56                                                     | 45.0             |
|                  | ロンドの<br>上下撓み<br>拘束 |             | ℓ=5 <sup>M</sup> 200 | 4         | 39.21           | 44.46           | .882  |       |           |      |       |                                                           |                  |
| 1/100            | ロンドの<br>上下撓み<br>自由 | △c<br>0.002 | ℓ=1 <sup>M</sup> 000 | 5         | 61.62<br>(1.81) | 63.24<br>(1.64) | 0.974 | 49.06 | 50.36     | .974 |       | ①△c=0.002<br>②△c=0.006<br>でそれぞれ平均値<br>( )内は△c・0.02<br>との比 |                  |
|                  |                    |             | ℓ=3 <sup>M</sup> 000 | 6         | 69.02<br>(1.71) | 71.00<br>(1.56) | .972  | 62.39 | 64.19     | .972 |       |                                                           |                  |
|                  |                    |             | ℓ=5 <sup>M</sup> 200 | 7         | 67.11<br>(1.72) | 69.32<br>(1.55) | .968  | 63.68 | 65.79     | .968 |       |                                                           |                  |

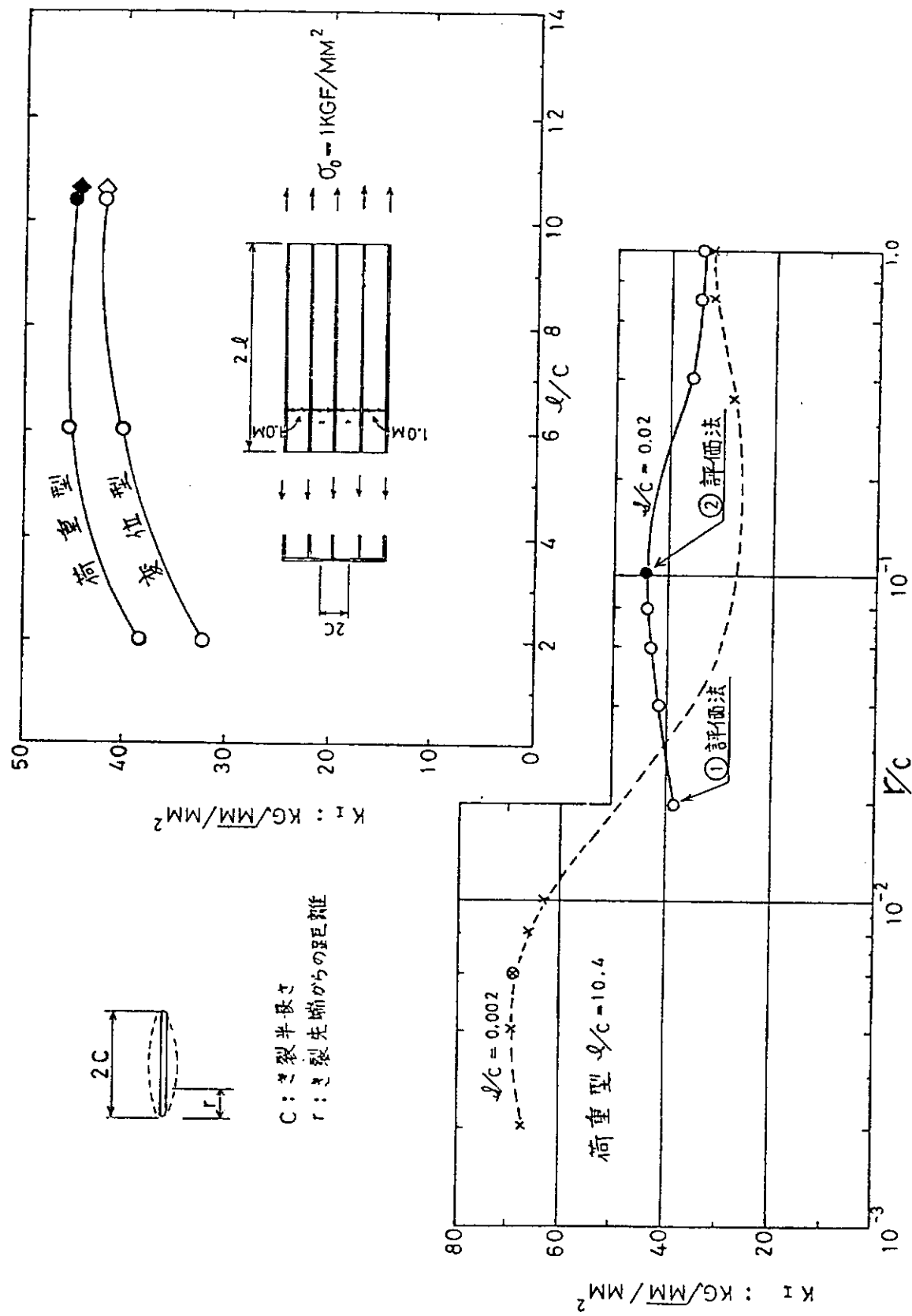


図 8.3π.2  $K_I$  値の分布

## 8.4i 外板とロンジ材との接合部周辺 (その1)

### — 交差部隅肉溶接近傍の亀裂 —

#### 8.4i.1 目的

デッキプレートとロンジ材の接合部構造は、形状的にも応力条件的にも比較的単純な部分である。損傷の実績という面からは、ほとんど問題視されない箇所であるが、船殻構造の中樞を成す部分であり、その船の強度を代表するものの一つであるという見方から、SR153部会破壊力学検討小委員会(略称SF小委)ではケース・スタディの対象の一つに取り挙げられた<sup>1)</sup>。

SF小委のケース・スタディ<sup>1)</sup>では、特定寸法が与えられたデッキプレート付きのロンジ部を単純なT型断面梁に理想化し(さらに、計算の際のモデル化ではデッキプレートを同じ断面積をもつ梁に置換した平板問題と見なし)て、この部分の疲労亀裂伝播寿命や残余強度(不安定破壊を起こすのに必要な仮想的な荷重の大きさ。亀裂の進展具合によって変化する。)を検討している。また、この検討の際に遭遇した種々の問題点や不足情報についてもまとめられている。

しかし、SF小委での検討対象範囲は、結果的には、ロンジ一本が亀裂破断する程度、ないしはデッキプレート部に若干亀裂が入り込む程度までを扱ったものである。加えて、亀裂がロンジとデッキプレートの交差部にある連続隅肉溶接部を横切る際の様相については詳細を省略して(寿命の計算を省いて)扱っていた。

ロンジとデッキプレートの交差部のように、一般に、平板が交差する部分あるいは板厚の厚い部分へ亀裂が進入する際にはK値が減少し、構造的なアレスト効果が発揮される。したがって、疲労の伝播寿命という点からは、この部分で相当の寿命が費されるべきものと推測される。このような観点から、本試計算では亀裂が平板交差部を横切る際の挙動追跡を試みた。対象構造の寸法・形状は、したがってSF小委でのものと同一とした(図8.4i.1)。

またもう一つの項目として、SF小委が対象とした亀裂の規模を若干広げて、数ロンジ間隔伝播した亀裂の先端が次のロンジに近づいてゆく際のK値減少

の様相についても若干の試計算を試みた。ただし、この種の極端に長大化した亀裂が存在することは実際的には全くないことであり、またケース・スタディの主旨からも特に興味ある問題とは考え難い。しかし、SF小委での検討の不足分を充足させる、つまり防撓板の潜在的にもっている構造上のアレスト効果を静的計算を前提に確かめる、という意味から実施した。蛇足ながら長大化した亀裂は、実際的には不安定亀裂の場合しか考え難く、したがって動的な解析手法を採らない限り本質的なアレスト性能とは言い難いとも考えられよう。

#### 8.4I.2 亀裂が骨から皮に進入する際の挙動の検討

作用荷重としては、船体縦曲げモーメントのみを考える。すなわち、SF小委での応力値と同じく超過確率  $10^{-8}$  レベルの縦曲げ応力として  $16 \text{ kg/mm}^2$ 、また静水中応力として  $4 \text{ kg/mm}^2$  をとる。これを基準に、不安定亀裂の検討に対しては一様引張り応力  $20 \text{ kg/mm}^2$  を用い、また疲労亀裂の伝播計算に用いる応力としては、等価応力  $3 \text{ kg/mm}^2$  ( $\Delta K_{th}$  の存在を考慮したものである。詳細は SF 小委報告<sup>1)</sup> に譲る)をとる。

対象構造(図 8.4I.1)であるデッキロンジ部は、構造としての規則性があるので、これを利用して、1 ロンジと 1 ロンジスペース分のデッキプレートを取り出して亀裂挙動の検討に当てることができ。SF 小委では、デッキプレート部分を同じ面積を有する梁と見なし、かつ荷重条件としては、亀裂から離れた位置の変位に亀裂長さによらない一定の条件を課して K 値計算している。その結果を図 8.4I.2 として再掲した。しかし、SF 小委におけるモデル化、特にデッキプレートと同じ断面積の梁で置換した措置は、亀裂が深くなるに従って端部作用力を実際より大きく要求することになり、したがって K 値を過大評価するかも知れないという問題を含んでいた。

そこで、デッキプレート部分を後述するような引張り剛性をもつトラスで置換して、深い切欠きの問題(切欠き深さはロンジ深さの 7 割(DC7 と称す)と 9 割(DC9 と

称す)の場合)を、再度計算してみた。計算モデルが図8.4I.3に示されている。有限要素の各節点間に配されたトラスに与えるべき剛性すなわち断面積は、節点間距離に依存させた。その決め方については、Appendixに記すこととして、結果のみを図8.4I.4に記す。亀裂の進展によりデッキプレートの面外曲げが大きくなるが、これを拘束した場合も含めてK値の計算結果が表8.4I.1に示されている。また、図8.4I.5にはSR153 SF小委の結果と対比して今回の計算結果を図示した。デッキプレートの面外撓みおよび一様強制変位条件を課した端部での節点反力を図8.4I.6に表わした。図8.4I.5でSF小委での結果と比較すると、予想されたように今回の計算値の方が小さい値を与えている。後述するロンジが完全に切れ、デッキプレートに表面亀裂として入った場合のK値を、ロンジ亀裂長さ(C)500mmの場合のK値と見なして今回の計算結果との間を滑らかに結んだ線が図8.4I.5に記されている。この曲線をもとにして、ロンジ内を伝播中の亀裂が完全にロンジを破断するまでに必要な繰返し数を残余寿命と定義して、図8.4I.7に示す結果を得た。隅内容接部付近で疲労寿命を稼ぐようすが数値的に示されている。

また、デッキプレートの面外曲げが拘束される場合には、例えば多田のハンドブック<sup>2)</sup>に記載のある例題と比較的似た問題と見なせる。表8.4I.1の(デッキプレートの面外曲げを拘束した場合の)計算結果を用いて、平板が交差する問題を板厚不連続の問題に置き換えてみた。本検討対象構造について、計算結果から増厚部( $h'$ )としてどの程度が逆算されるか調べて図8.4I.8に示した。

次のステップとして、亀裂が正しくデッキプレートに入り込んだ後の状況について以下のような概略的取り扱いを行なった。すなわち、亀裂先端の輪郭変化は、模式的に図8.4I.9のごとく考えられる。ただし、図8.4I.9は隅内容接部の未溶着部が無い場合を考えたものであり、交差部でのアレスト性能に深く関与していると思われる未溶着部が存在する場合には、本図より多少複雑な変化となる。このような交差部の表面亀裂の問題を厳密にオーソドックスに扱うことは、極めて莫大な作業を要するものと思われる。しかし、切断されたロンジが

デッキプレートに授ける応力があらかじめ評価できれば、これをデッキプレート単独の問題に対する境界条件として与えることにより、近似解ではあるが比較的容易に評価することができるとはならないかと考えた。授受される応力としては、剪断応力と直応力がある。しかし、デッキプレートの面外曲げを拘束した場合には主として剪断応力が働くと考えられるので、計算上の単純さをも配慮して、ここでは仮に剪断応力のみに着目した。(昭和53年度の本部会研究では交叉部の面外曲げが検討対象の一つに予定されており、直応力についての取り扱いが行なわれよう。)

そこで、ロンジとデッキプレートとの交差部で授受される剪断応力について調べた。図8.4I.10(a)および(b)には、SF小梁での検討モデルおよび図8.4I.3の深い切欠きモデルの応力解析結果による剪断応力分布が表示されている。これらの図からわかるように、剪断応力は亀裂のある位置では対象性より零であるが、分布はほとんど亀裂位置近傍に限られている。W. Hovgaard<sup>3)</sup>や渡辺恵弘<sup>4)</sup>は、変位係数(Displacement Coefficient)という考え方を導入して、例えば、付加物が平板の荷重軸方向に付いている場合の力の授受を評価する簡便な方法を示している。図8.4I.11(a)には、この方法を適用した時の付加物の端部に生ずる剪断応力( $\tau$ )が表わされている。同図からわかるように、剪断応力は断面積の変化に対応して付加物の端部付近に集中して生ずる。ロンジが切断された問題は、ちょうど図8.4I.11(b)のように二つの付加物が近接して存在する場合に極く近い。この例からもわかるように、知りたい剪断応力分布は亀裂近傍での分布であって、遠く離れた位置(図8.4I.11(b)における $x \approx \pm L$ 位置)での剪断応力分布は必ずしも必要でない。この意味で、以下の説明では特に断らない限り、亀裂近傍で生ずる剪断応力のみを念頭に置く。図8.4I.10で示された剪断応力分布の特性量、すなわち亀裂近傍での剪断応力の積分値、および最大剪断応力が生ずる位置が図8.4I.12に記されている。W. Hovgaard<sup>3)</sup>らの結果を考慮し、剪断応力分布型として、

仮に次の分布を仮定することとする。

$$\tau(x) = \alpha x e^{-\beta x}, \quad (\alpha, \beta: \text{未定定数}) \text{-----} (8.4I.1)$$

この式は、最大剪断応力( $\tau_{max}$ )および最大剪断応力が生ずる位置( $x_0$ )を用いて次の形にも表現できる。

$$\tau(x) = \tau_{max} \left( \frac{x}{x_0} \right) \exp \left( 1 - \frac{x}{x_0} \right), \quad (\tau_{max}, x_0: \text{未定定数}) \text{-----} (8.4I.2)$$

また剪断応力の積分値( $Q$ )としては次の表現を得る。

$$Q \approx 2.718 \tau_{max} t x_0, \quad (t: \text{デッキプレートの板厚}) \text{-----} (8.4I.3)$$

(8.4I.2)式, (8.4I.3)式と図8.4I.12とを用いることにより, 本対象構造の交差部周辺の亀裂解析がかなり容易になる。

ロンジからデッキプレートに与えられる剪断力が概略評価できたので, 次にデッキプレートに入った表面亀裂のK値計算を試みる。より精密な評価法が種々ありうることは明白であるが, ここでは図8.4I.13で略記するように, 現在までに解かれている問題を組合わせて近似的に評価する。表面亀裂を有する平板に集中力が働く問題を次の三つの問題の組合わせと見なす。

- (1) 貫通亀裂を有する平板に集中力が働く問題 ( $K^{(1)}$ )
- (2) 表面亀裂を有する平板に遠方一様応力が働く問題 ( $K_A^{(2)}, K_B^{(2)}$ )
- (3) 貫通亀裂を有する平板に遠方一様応力が働く問題 ( $K^{(3)}$ )

すなわち, 本問題のK値を  $K^{(1)} \times K^{(2)} / K^{(3)}$  で近似した。ただし, この近似では表面亀裂の最奥点(図8.4I.13の点A)と縁点(図8.4I.13の点B)とのK値の比率は, 集中力の働く位置によらず一定となり若干不都合な面もある。

初期表面亀裂形状として, 表面長さとして  $2a = 57 \text{ mm}$  (=板厚+脚長の2倍), 深さ( $b$ )  $1 \text{ mm}$  の場合を考え, 亀裂成長を追跡してみた。結果は図8.4I.14に示されている。亀裂先端の輪郭は, 表面長さがほとんど変化せず, 深さ方向にばかり一方的に成長してゆくという特徴がある。寿命と残余強度が図8.4I.15に示されているが, 当然のことながら表面亀裂の段階での残余強度は相当高い点を確認できる。おおよそ, 表面長さ( $2a$ )  $65 \text{ mm}$  で板厚貫通亀裂に移行する(図8.4I.14参照)。

デッキプレートの貫通亀裂となった以後の取り扱い方も、基本的には先の例と同じくロンジから与えられる剪断力を見積り、デッキプレートへの境界力として与えることで解決できる。図8.4I.16には、このような剪断応力の例が示されている。これをもとにして、剪断応力の分布型を規定する量として、剪断応力の積分値と最大剪断応力値を考慮して、これらの切欠き寸法に対する変化を調べた。結果が図8.4I.17である。これらの境界力をもとに、デッキプレートに入り込んだ貫通亀裂のK値計算を行なった結果が図8.4I.18である。デッキプレートの亀裂長さ(2C)が300mm程度で残余強度レベルが $20 \text{ kg/mm}^2$ となることがわかる。

### 8.4I.3 デッキプレート中の長い亀裂に対する防撓板の効果

本項の最初に触れたように、数ロンジスペースにも達する亀裂が(動的にではなくて)静止した状態で存在することは、極めて考え難いことではある。亀裂先端がロンジに接近した際のアレスト傾向に絞って試計算を行なった。計算ケースの一覧が表8.4I.2に示されている。計算モデルを図8.4I.19に示す。ただし、K値計算の対象としてはデッキプレート中の亀裂先端のみを考慮しており、ロンジ中の亀裂先端についてはK値評価のために必要な程度の要素分割の細分化は施していない。ロンジの破断割合としては、完全に切れたものと部分的に破断したものを想定しているが、これらの配置は計算のための条件としてアプリオリに与えたものであって、必ずしも十分な考察に基づいてはいない。

K値評価は、二つの作業に分けて行なわれた。すなわち、全体構造の板骨解析により、各々のロンジの荷重分担が考慮された亀裂先端周辺の変位場が求められる。この例が図8.4I.20に示されている。次にこの変位アウトプットをもとに、二次元問題として解析解重畳法<sup>5)</sup>によりK値が求められた。この際の亀裂先端部のズミング要領が図8.4I.21に示されている。計算結果は図8.4I.22に図示されている。

完全には破断していないロンジの直前または直後に亀裂先端が位置する場合

には、相当に $K$ 値が低下するようすが伺える。ロンジが完全に破断しないことが重要であるとするれば、それはデッキプレート中の亀裂とロンジの亀裂の相互干渉を算入しながら両者を進展させる必要があることが改めて認識された。

疲労亀裂の伝播のように準静的現象に対しては、本計算結果に示されているごとく、ロンジ部に接近する場合の伝播速度の減少は著しいものと予測される。しかし、不安定的な亀裂の伝播現象に対しては、 $K$ 値の静的評価以外の要素も大きく関与しているものと想像され、必ずしもアレスト性能を十分保証するだけの試計算とは言い難いと考えられよう。

#### 8.41.4 まとめ

デッキプレートのロンジまわり構造をとり挙げ、特に亀裂が骨から皮に進入する場合の挙動、および長くなったデッキプレート中の亀裂が隣のロンジに近づく際の $K$ 値評価を試計算として実施した。

その結果、平板交差部が形状的に有している亀裂アレスト能力については、ある程度の数量的評価を与えることができた。

しかし、平板交差部には形状的なアレスト能力の他にも、鋼板の組織方向が亀裂進行方向に対し90度変化する効果や、あるいは試計算では織り込めなかった隅肉溶接未溶着部の存在など、幾つかの要素が重畳している。交差部を通過する際の亀裂の形態（不安定亀裂か疲労亀裂か）によっても、どの因子の寄与が効くかは種々変化する可能性もある。疲労亀裂に対しては、本試計算のような形状的效果を応力解析により追跡することは、ある程度本質に迫るものと思われる。しかし、不安定亀裂に対しては、静応力解析と同時に、モデル化された構造での動的な試計算が不可欠と思われ、その基本データ（例えば亀裂速度変化など）を得るための実験の起案および計画にも力点が置かれるべきことが改めて痛感される。

## 参考文献

- 1) 日本造船研究協会第153研究部会, "厚鋼板大入熱溶接継手の脆性破壊強度および疲労強度に関する研究", 日本造船研究協会研究資料 No.267-2, 昭和52年3月
- 2) H. Toda, P. C. Paris, G. R. Irwin, "The Stress Analysis of Cracks Handbook", DEL Research Corporation, Hellertown, Pennsylvania, 1973
- 3) W. Hovgaard, "A New Theory on the Distribution of Shearing Stresses in Riveted and Welded Connections and its Application to Discontinuities in the Structure of a Ship", T.I.N.A. 1931
- 4) 渡辺 恵弘, "不連続縦桁の縦通有効率と応力集中の問題", 造船協会誌 第73号, 昭和18年
- 5) 安藤 清, "船体構造部材のき裂強度解析 — 面内弾性問題 —", 三菱重工技報, Vol.10, No.3, 昭和48年5月

## Appendix: 図8.4I.4の算出過程

Timoshenko and Goodier, "Theory of Elasticity"より, 無限板中の1点に集中力  $P$  が働く問題(図8.4I.23)の応力場は次のごとく求まっている。

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_r &= -\frac{(3+\nu)}{4\pi} \cdot \frac{P \cos \theta}{r} = -\frac{(3+\nu)P}{4\pi} \cdot \frac{x}{x^2+y^2} \quad \text{--- (8.4I.4(a))} \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_\theta &= \frac{(1-\nu)}{4\pi} \cdot \frac{P \cos \theta}{r} = \frac{(1-\nu)P}{4\pi} \cdot \frac{x}{x^2+y^2} \quad \text{--- (8.4I.4(b))} \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \tau_{r\theta} &= \frac{(1-\nu)}{4\pi} \cdot \frac{P \sin \theta}{r} = \frac{(1-\nu)P}{4\pi} \cdot \frac{y}{x^2+y^2} \quad \text{--- (8.4I.4(c))} \end{aligned} \right.$$

(8.4I.4)式の基本解より図8.4I.24の応力場が次式として表わせる。

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_r &= -\frac{(3+\nu)q}{4\pi} \cdot \int_{-y_1}^{+y_1} \left[ \frac{(x-h)}{(x-h)^2+(y-y_0)^2} - \frac{(x+h)}{(x+h)^2+(y-y_0)^2} \right] dy_0 \\ \sigma_\theta &= \frac{(1-\nu)q}{4\pi} \cdot \int_{-y_1}^{+y_1} \left[ \frac{(x-h)}{(x-h)^2+(y-y_0)^2} - \frac{(x+h)}{(x+h)^2+(y-y_0)^2} \right] dy_0 \quad \text{--- (8.4I.5)} \\ \tau_{r\theta} &= \frac{(1-\nu)q}{4\pi} \cdot \int_{-y_1}^{+y_1} \left[ \frac{(y-y_0)}{(x-h)^2+(y-y_0)^2} - \frac{(y-y_0)}{(x+h)^2+(y-y_0)^2} \right] dy_0 \end{aligned} \right.$$

点  $B(\eta, 0)$  での  $\sigma_r^{(B)}$ ,  $\sigma_\theta^{(B)}$ ,  $\tau_{r\theta}^{(B)}$  は,

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_r^{(B)} &= -\frac{(3+\nu)q}{4\pi} \cdot \int_{-y_1}^{+y_1} \left[ \frac{(\eta-h)}{(\eta-h)^2+(y_0)^2} - \frac{(\eta+h)}{(\eta+h)^2+(y_0)^2} \right] dy_0 \\ \sigma_\theta^{(B)} &= \frac{(1-\nu)q}{4\pi} \cdot \int_{-y_1}^{+y_1} \left[ \frac{(\eta-h)}{(\eta-h)^2+(y_0)^2} - \frac{(\eta+h)}{(\eta+h)^2+(y_0)^2} \right] dy_0 \quad \text{--- (8.4I.6)} \\ \tau_{r\theta}^{(B)} &= \frac{(1-\nu)q}{4\pi} \cdot \int_{-y_1}^{+y_1} \left[ \frac{(-y_0)}{(\eta-h)^2+(y_0)^2} - \frac{(-y_0)}{(\eta+h)^2+(y_0)^2} \right] dy_0 \end{aligned} \right.$$

である。ところで,  $\sigma_r^{(B)} = \sigma_x^{(B)} = E^\nabla \frac{\partial u^{(B)}}{\partial \eta}$  より  $u^{(B)}$  は次のごとく求まる。

$$\frac{\partial u^{(B)}}{\partial \eta} = -\frac{(3+\nu)q}{4\pi E^\nabla} \cdot \int_{-y_1}^{+y_1} \left[ \frac{(\eta-h)}{(\eta-h)^2+(y_0)^2} - \frac{(\eta+h)}{(\eta+h)^2+(y_0)^2} \right] dy_0 \quad \text{--- (8.4I.7)}$$

$$= -\frac{(3+\nu)q}{4\pi E^\nabla} \cdot 2 \int_0^{+y_1} \left[ \frac{(\eta-h)}{(\eta-h)^2+(y_0)^2} - \frac{(\eta+h)}{(\eta+h)^2+(y_0)^2} \right] dy_0 \quad \text{--- (8.4I.7')}^{\vee}$$

$$\int_0^{+y_1} \frac{(\eta-h)}{(\eta-h)^2+(y_0)^2} dy_0 = \tan^{-1} \frac{y_1}{\eta-h} \quad \text{--- (8.4I.8)}$$

$$\therefore \frac{\partial u^{(B)}}{\partial \eta} = -\frac{(3+\nu)q}{2\pi E^\nabla} \cdot \left\{ \tan^{-1} \frac{y_1}{\eta-h} - \tan^{-1} \frac{y_1}{\eta+h} \right\} \quad \text{--- (8.4I.9)}$$

$$\therefore u^{(B)}(\eta) = -\frac{(3+\nu)q}{2\pi E^\nabla} \cdot \int_0^\eta \left\{ \tan^{-1} \frac{y_1}{\eta-h} - \tan^{-1} \frac{y_1}{\eta+h} \right\} d\eta \quad \text{--- (8.4I.10)}$$

積分を実行して  $\arctan$  の値として  $[0 \sim \frac{\pi}{2}]$  の値をとるように表現を改める。

$$U^{(B)}(\eta) = \begin{cases} \frac{(3+\nu)q}{2\pi E^*} \left[ \eta \left( \pi - \tan^{-1} \frac{h-\eta}{y_1} - \tan^{-1} \frac{h+\eta}{y_1} \right) + h \left( \tan^{-1} \frac{h-\eta}{y_1} - \tan^{-1} \frac{h+\eta}{y_1} \right) + \frac{y_1}{2} \log \frac{(\eta+h)^2 + y_1^2}{(\eta-h)^2 + y_1^2} \right], & (0 \leq \eta \leq h \text{ の時}) \\ \frac{(3+\nu)q}{2\pi E^*} \left[ \eta \left( \tan^{-1} \frac{\eta-h}{y_1} - \tan^{-1} \frac{\eta+h}{y_1} \right) + h \left( \pi - \tan^{-1} \frac{\eta-h}{y_1} - \tan^{-1} \frac{\eta+h}{y_1} \right) + \frac{y_1}{2} \log \frac{(\eta+h)^2 + y_1^2}{(\eta-h)^2 + y_1^2} \right], & (h \leq \eta \text{ の時}) \end{cases} \quad (8.4I.11)$$

バネ係数 ( $k \equiv$  力/着力点変位) については

$$\text{力: } P = q(2y_1)$$

$$\text{着力点間の変位: } 2 \cdot U(\eta = h)$$

であるから, 等置されるバネのバネ係数  $k$  は,

$$\begin{aligned} k/t_p &\equiv \frac{2qy_1}{2 \cdot U(\eta = h)} \\ &= \frac{2\pi E^* y_1}{(3+\nu)} \cdot \left\{ 2h \tan^{-1} \frac{y_1}{2h} + \frac{y_1}{2} \log \left( 1 + \left( \frac{2h}{y_1} \right)^2 \right) \right\}^{-1} \quad \text{-----} (8.4I.12) \end{aligned}$$

となる。

$$\begin{cases} \nu = 0.3, E^* = \frac{E}{1-\nu^2} = \frac{21000}{1-(0.3)^2} \\ y_1 = 35 \text{ mm} \end{cases} \quad \text{-----} (8.4I.13)$$

のときの  $k (= k(2h))$  をもとにして, 標点間距離  $2h$  の等価なトラス要素の断面積 ( $S_e$ ) を求めたものが 図 8.4I.4 である。

$$\begin{aligned} S_e &= \frac{k(2h)}{E} \\ &= \frac{2\pi}{(3+\nu)(1-\nu^2)} \cdot \frac{t_p \cdot y_1 - (2h)}{\left\{ 2h \tan^{-1} \frac{y_1}{2h} + \frac{y_1}{2} \cdot \log \left( 1 + \frac{4h^2}{y_1^2} \right) \right\}} \quad \text{-----} (8.4I.14) \end{aligned}$$

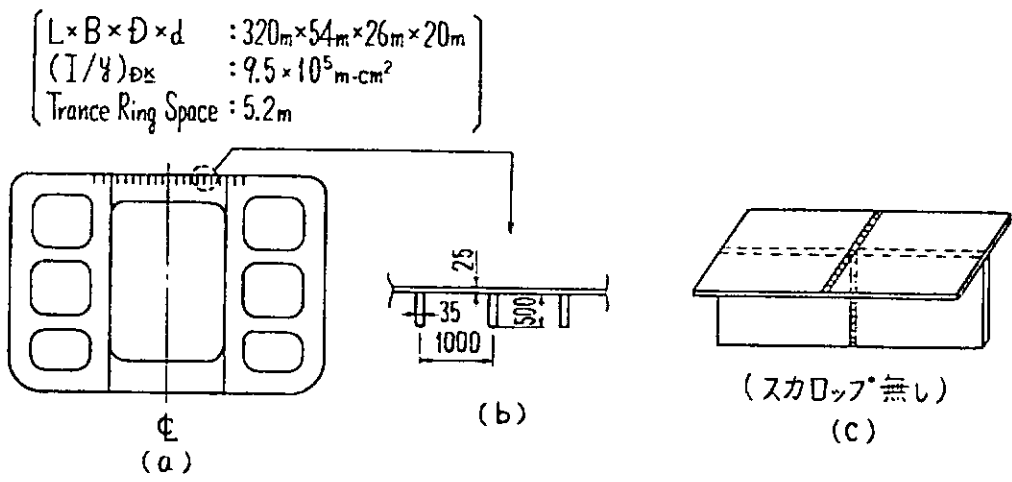


図 8.4.1 対象構造

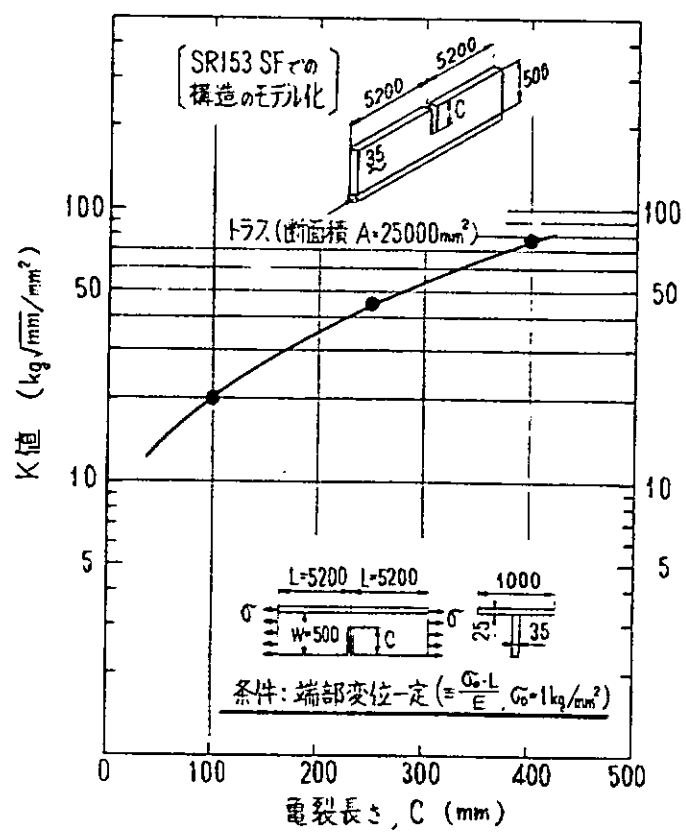
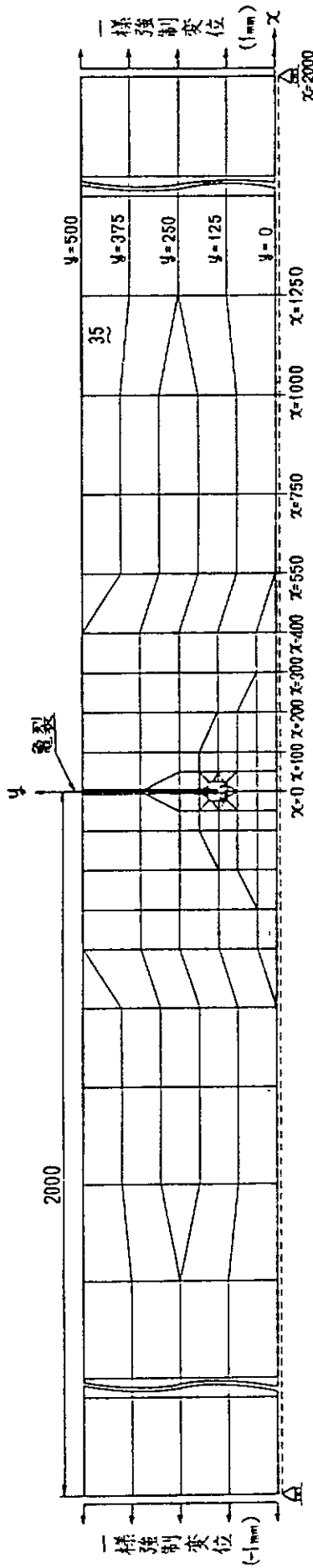
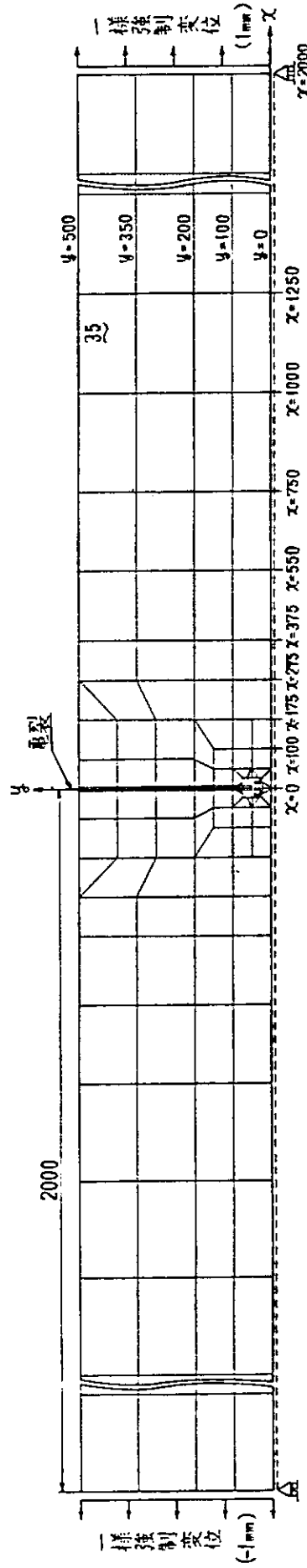


図 8.4.2 ロンジを切断する亀裂のK 値変化 (SR153 SF 小委<sup>1)</sup>の結果)



(a) 切欠き深さが  $Long^b$  の 7 割 (計算ケース DC7)



(b) 切欠き深さが  $Long^b$  の 9 割 (計算ケース DC9)

----- : トラス要素  
C.S.S. : Crack Sub-Structure  
(この領域内で重畳法を適用する)

図 8.4.1.3 深い切欠きの計算モデル

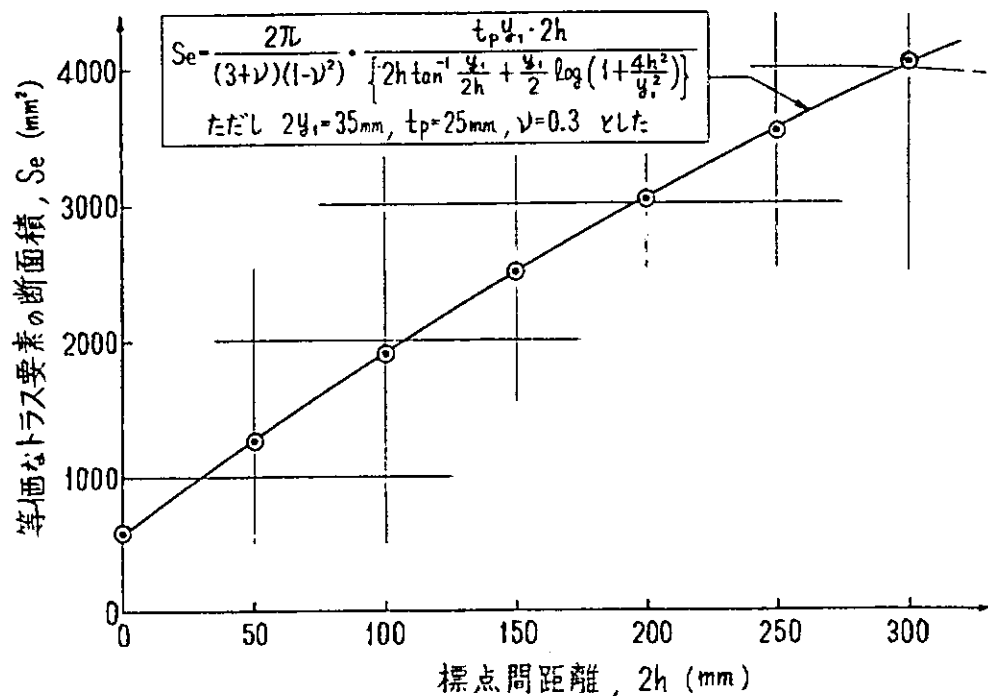


図 8.41.4 トラス要素に与えるべき等価断面積  $S_e$

表 8.41.1 深い切欠きの K 値計算結果

|      | 切欠き深さ<br>C<br>(mm) | デッキプレートの<br>面外曲げ<br>拘束の有無 | K 値 ( $\text{kg}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$ ) |                                                                                           |
|------|--------------------|---------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
|      |                    |                           | 端部 ( $x=\pm 2000$ ) に<br>$\pm 1\text{mm}$ の強制変位 | 端部に $\frac{\sigma_0 L}{E}$ mm の強制変位<br>( $\sigma_0=1\text{kg/mm}^2$ , $L=2000\text{mm}$ ) |
| DC7  | ロソジの 7 割<br>350    | 面外曲げを<br>拘束しない            | 518.4                                           | 49.4                                                                                      |
| DC9  | ロソジの 9 割<br>450    |                           | 496.8                                           | 47.3                                                                                      |
| DC7C | ロソジの 7 割<br>350    | 面外曲げを<br>拘束する             | 395.5                                           | 37.7                                                                                      |
| DC9C | ロソジの 9 割<br>450    |                           | 423.9                                           | 40.4                                                                                      |

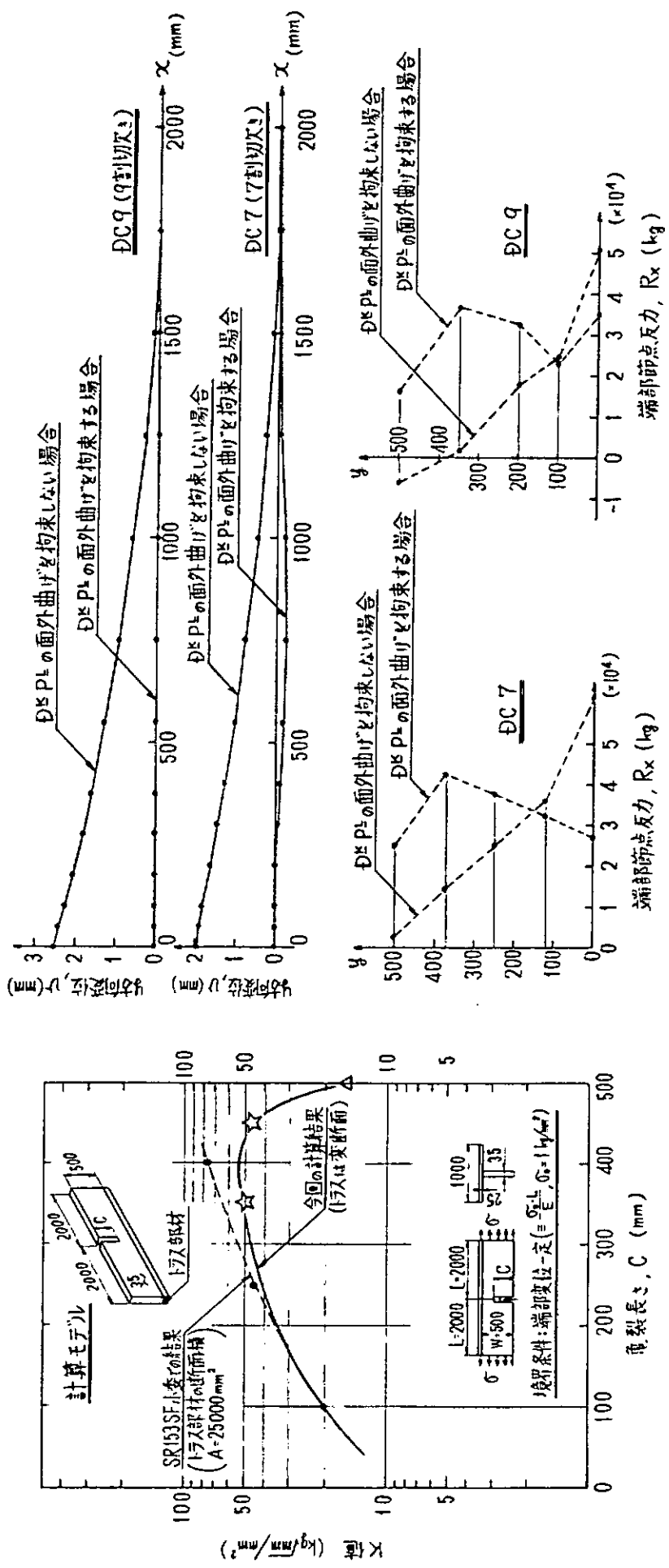


図8.4.1.5 深い切欠きの計算結果

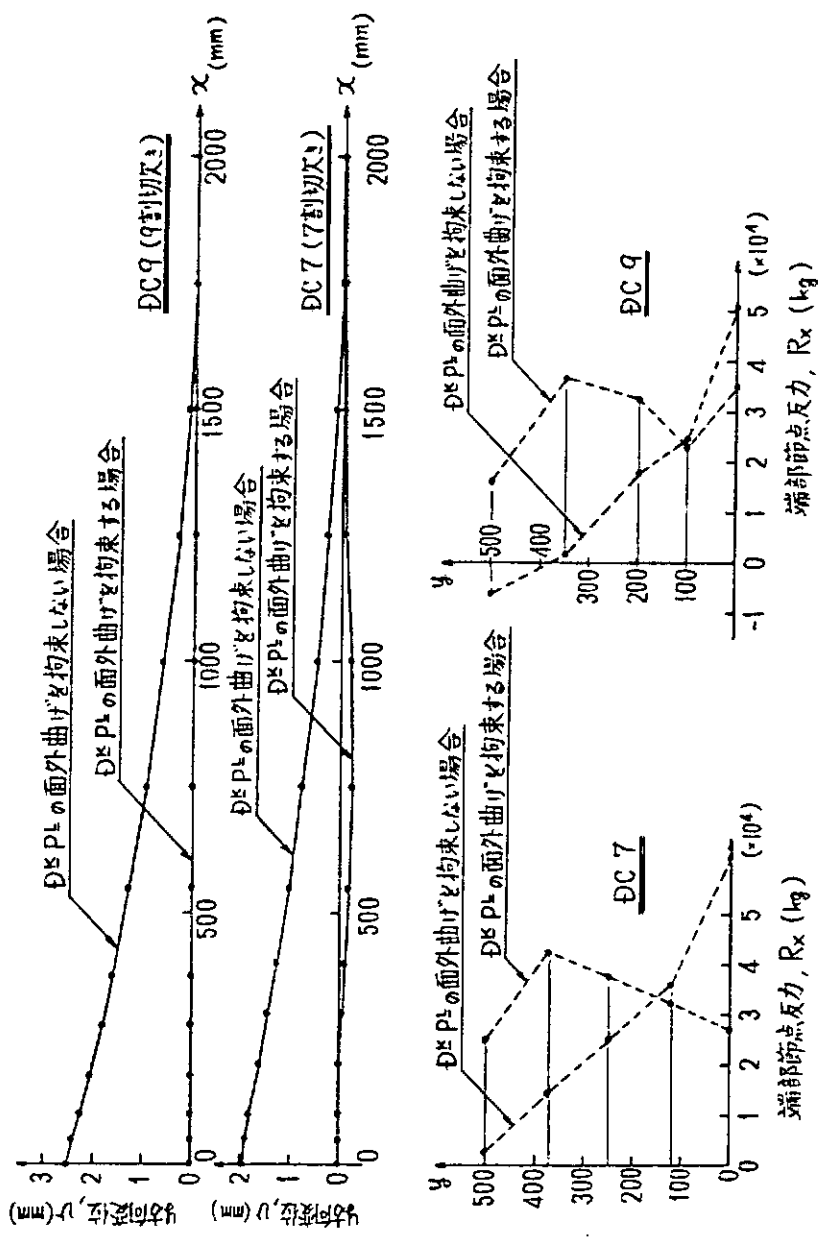


図8.4.1.6 深い切欠きをもつT型梁の変形・端部節点反力

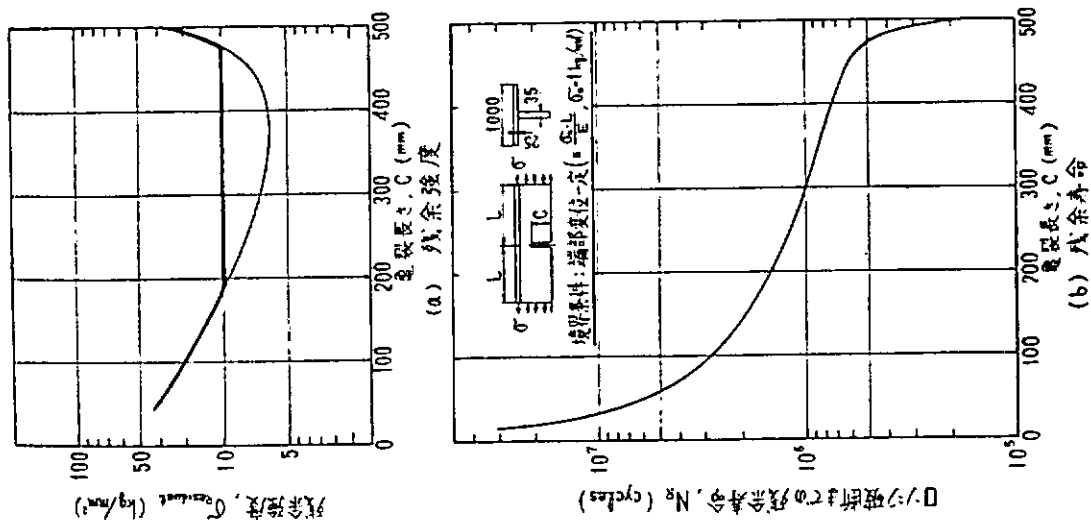


図8.4.1.7 ロンジ破断までの残余寿命と残余強度と残余寿命

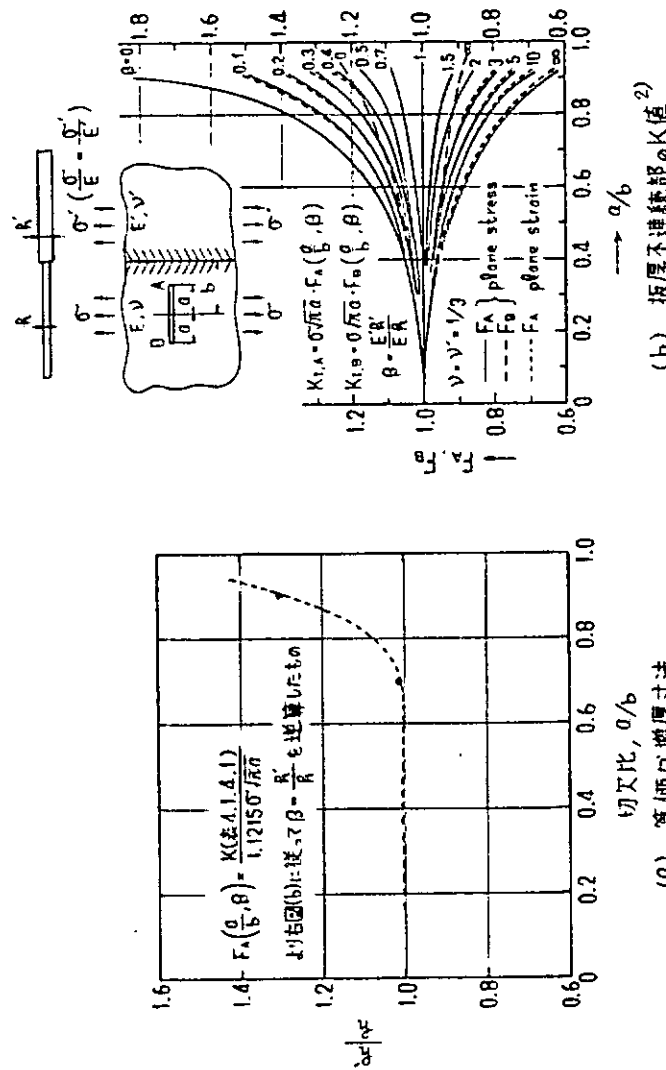


図8.4.1.8 不連続板厚の問題との関連

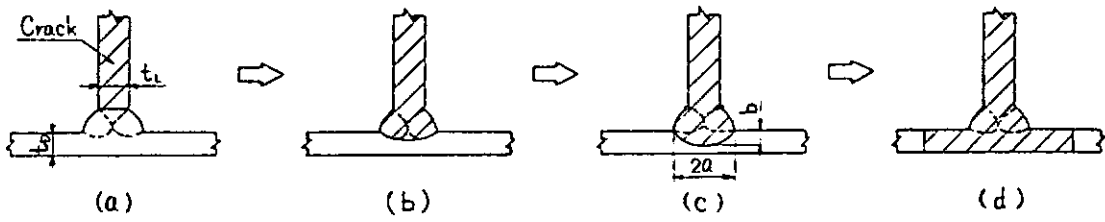


図8.4.9 亀裂先端が作る輪郭の変化(模式図)  
(未溶着部のない場合)

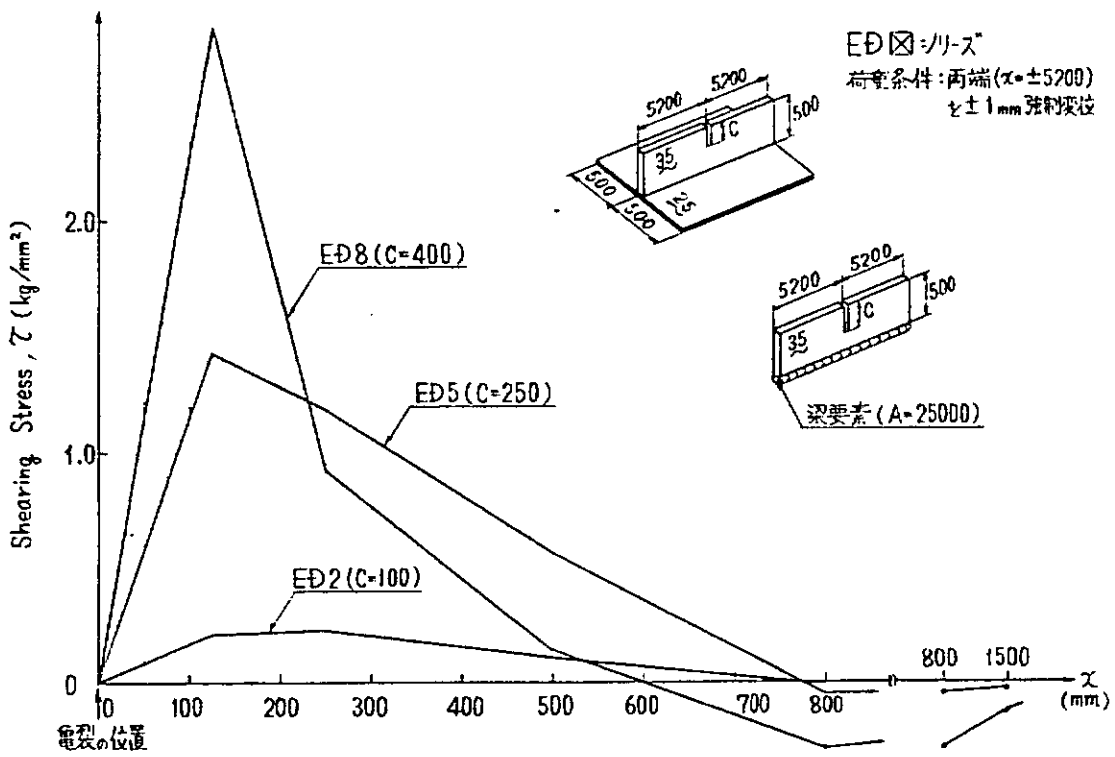


図8.4.10(a) 剪断応力の分布 (SR153SF小委<sup>1)</sup>の結果)

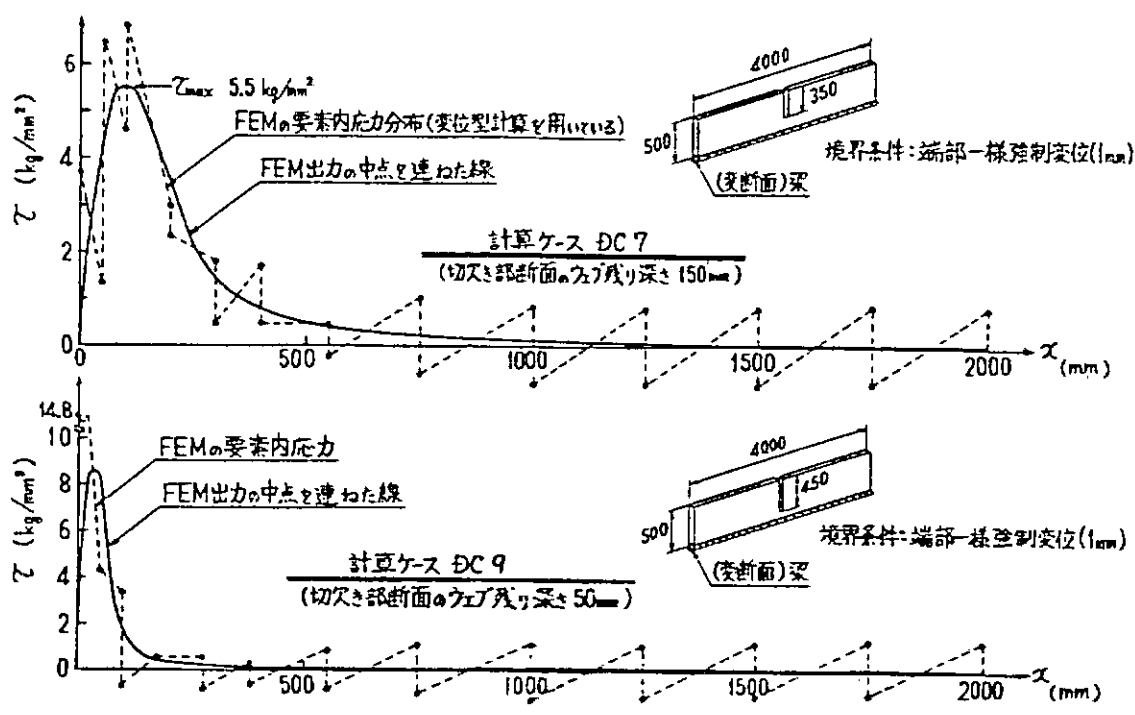
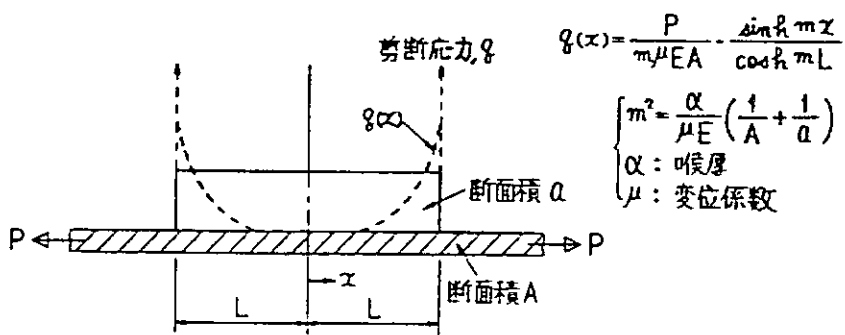
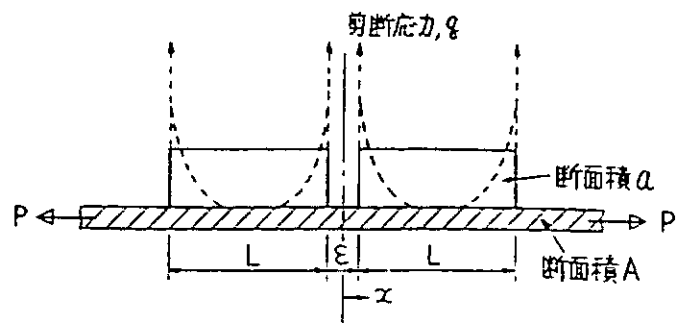


図 8.4I.10 (b) 深い切欠きの計算モデルでの交差部剪断応力の例



(a) 付加物の端部に生ずる剪断応力分布<sup>4)</sup>



(b) 亀裂部に生ずる剪断応力分布(ε:微小)

図 8.4I.11 剪断応力の分布

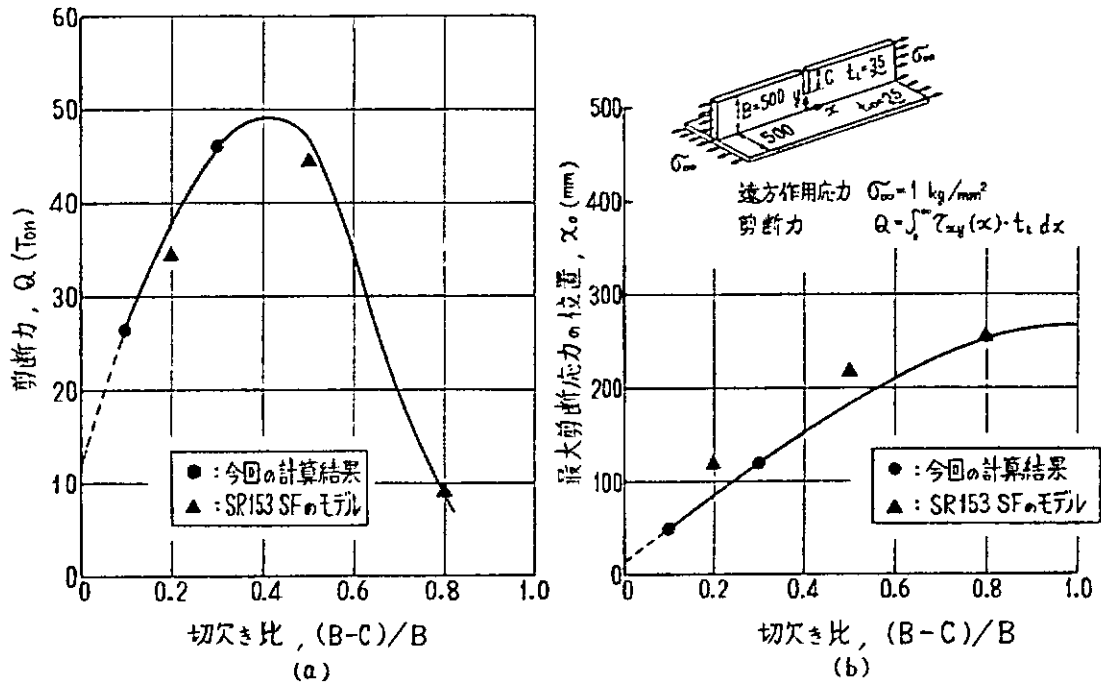


図 8.4.12 ロンジとデッキプレート間で授受される剪断力 (その1)

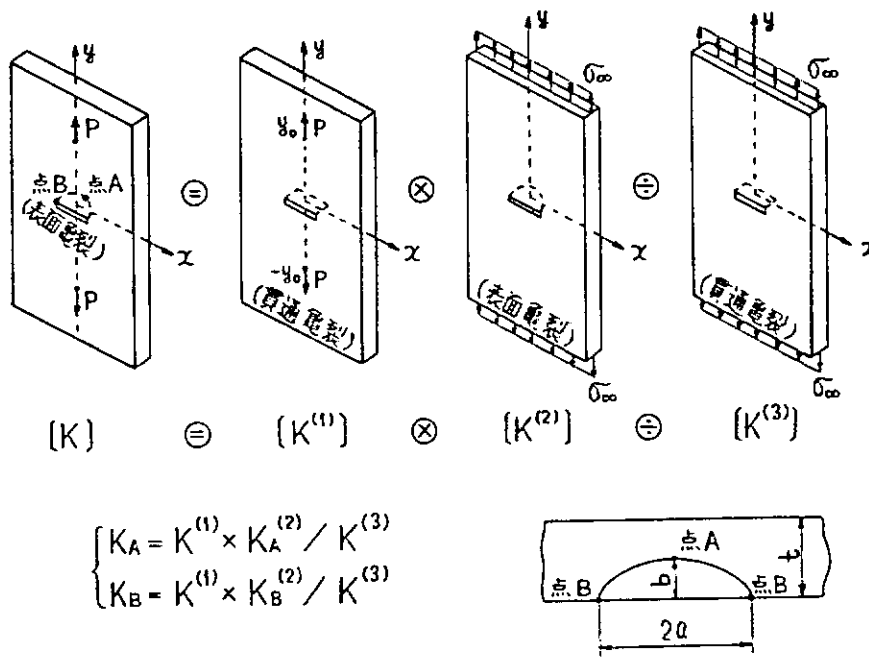


図 8.4.13 表面亀裂のK値の簡易評価

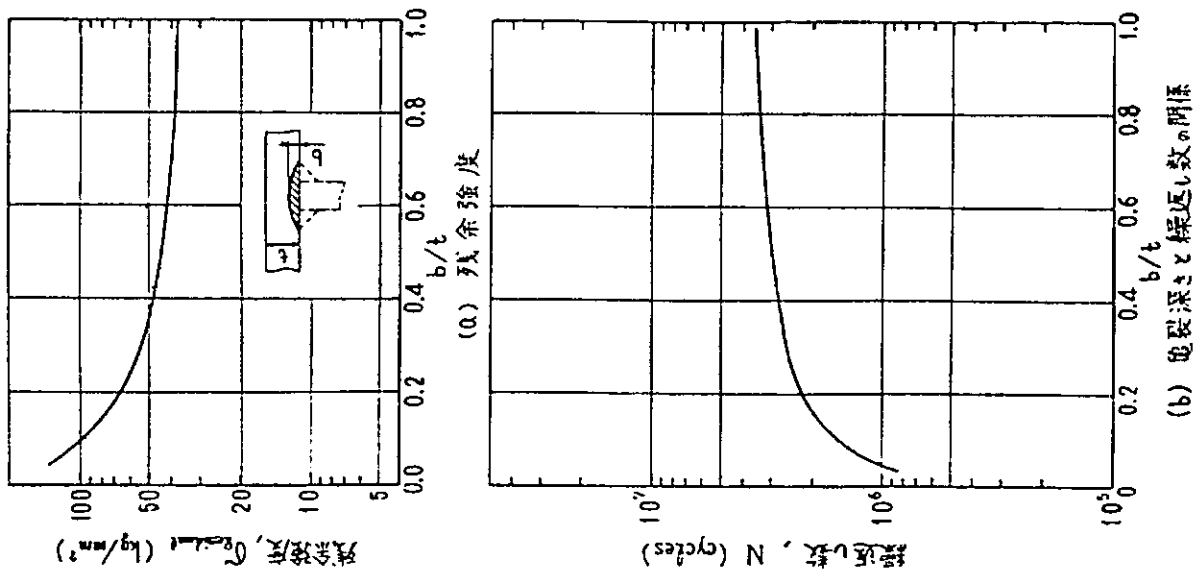


図8.4.15 交差部表面亀裂の成長状況と残余強度

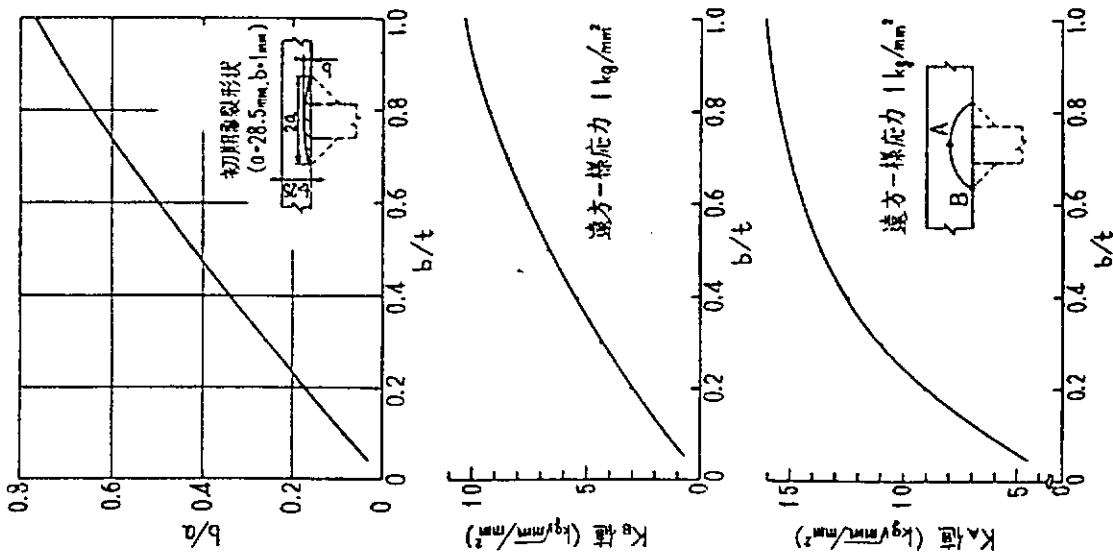


図8.4.14 交差部の表面亀裂の成長状況

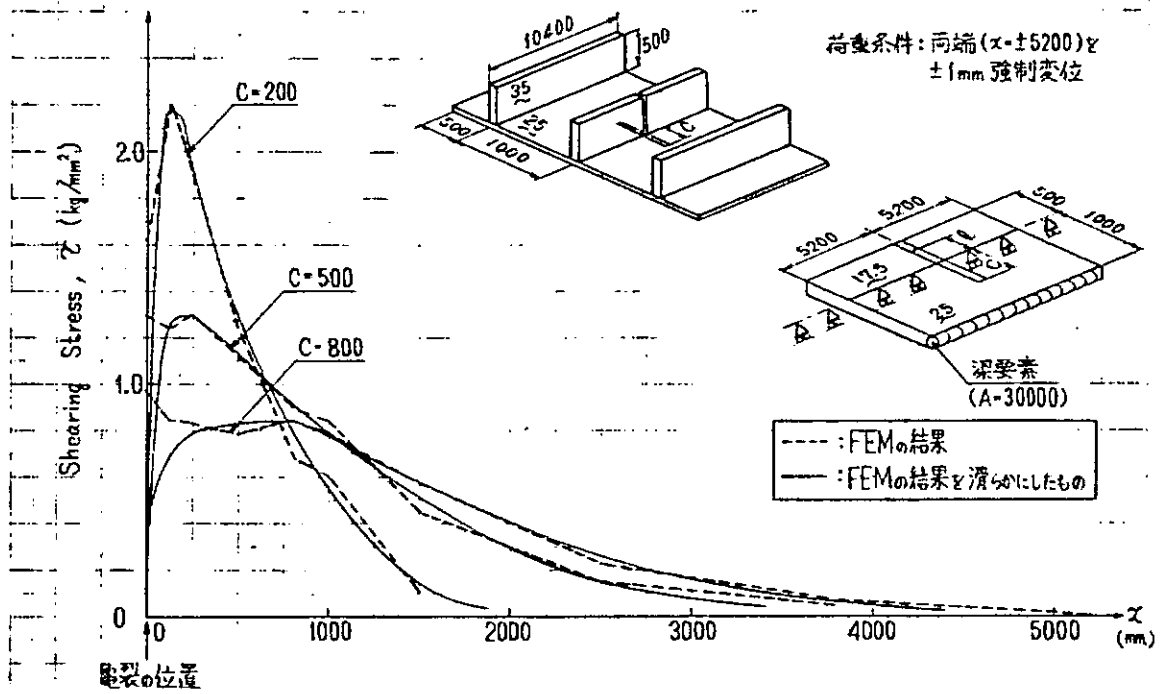


図8.4I.16 剪断応力の分布

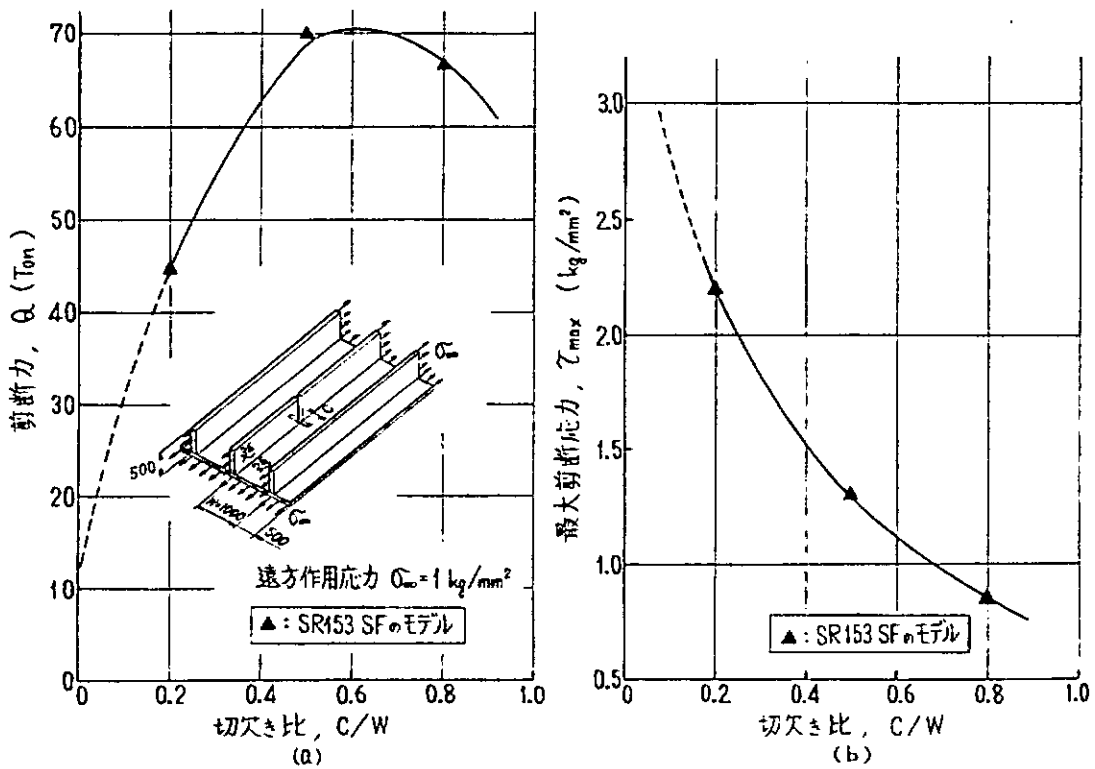


図8.4I.17 ロンジとデッキプレート間で授受される剪断力(その2)

表 8.4I.2 計算ケースとK値計算結果

| 計算<br>ケース                                                                                              | 亀裂先端の位置                                                                                                    | Long <sup>±</sup> の破断状況 | K値計算結果<br>( $\text{kg}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$ ) |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------------|
| Case 1                                                                                                 |                                                                                                            | 亀裂                      | 1086                                                  |
| Case 2                                                                                                 | 2Long <sup>±</sup> の中央部                                                                                    | 亀裂                      | 461                                                   |
| Case 4                                                                                                 | Long <sup>±</sup> の直前<br>$\left[\frac{1}{10}\text{Long}^{\pm}\text{Sp.だけ}\right]$<br>Long <sup>±</sup> の手前 | 亀裂                      | 466                                                   |
| Case 5                                                                                                 |                                                                                                            | 亀裂                      | 155                                                   |
| Case 7                                                                                                 | Long <sup>±</sup> の直後<br>$\left[\frac{1}{10}\text{Long}^{\pm}\text{Sp.だけ}\right]$<br>Long <sup>±</sup> の直後 | 亀裂                      | 1130                                                  |
| Case 8                                                                                                 |                                                                                                            | 亀裂                      | 216                                                   |
| 注)                                                                                                     |                                                                                                            |                         |                                                       |
| 計算モデル 図 8.4I.19                                                                                        |                                                                                                            |                         |                                                       |
| 境界条件 (1) 上下端 ( $y_0 = \pm 10000$ ) 上、下方向変位と $\sigma_{y0}$ に拘束 ( $\sigma_0 = 20\text{kg}/\text{mm}^2$ ) |                                                                                                            |                         |                                                       |
| (2) 左右端 ( $x_0 = \pm 2500$ ) 上、下方向変位を零に拘束                                                              |                                                                                                            |                         |                                                       |

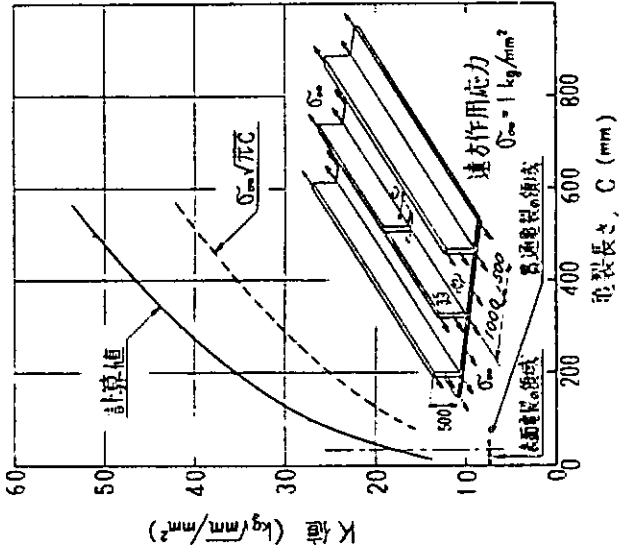
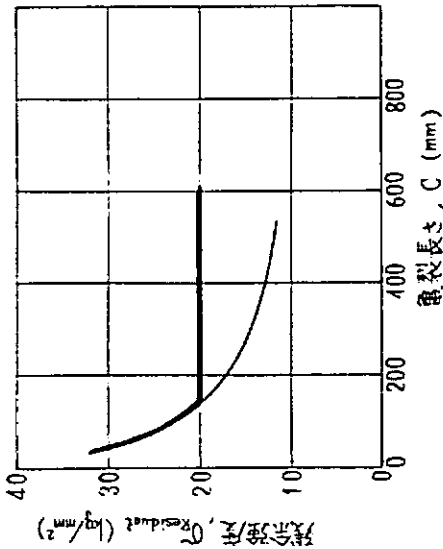


図 8.4I.18 デッキプレートに入り込んだ亀裂

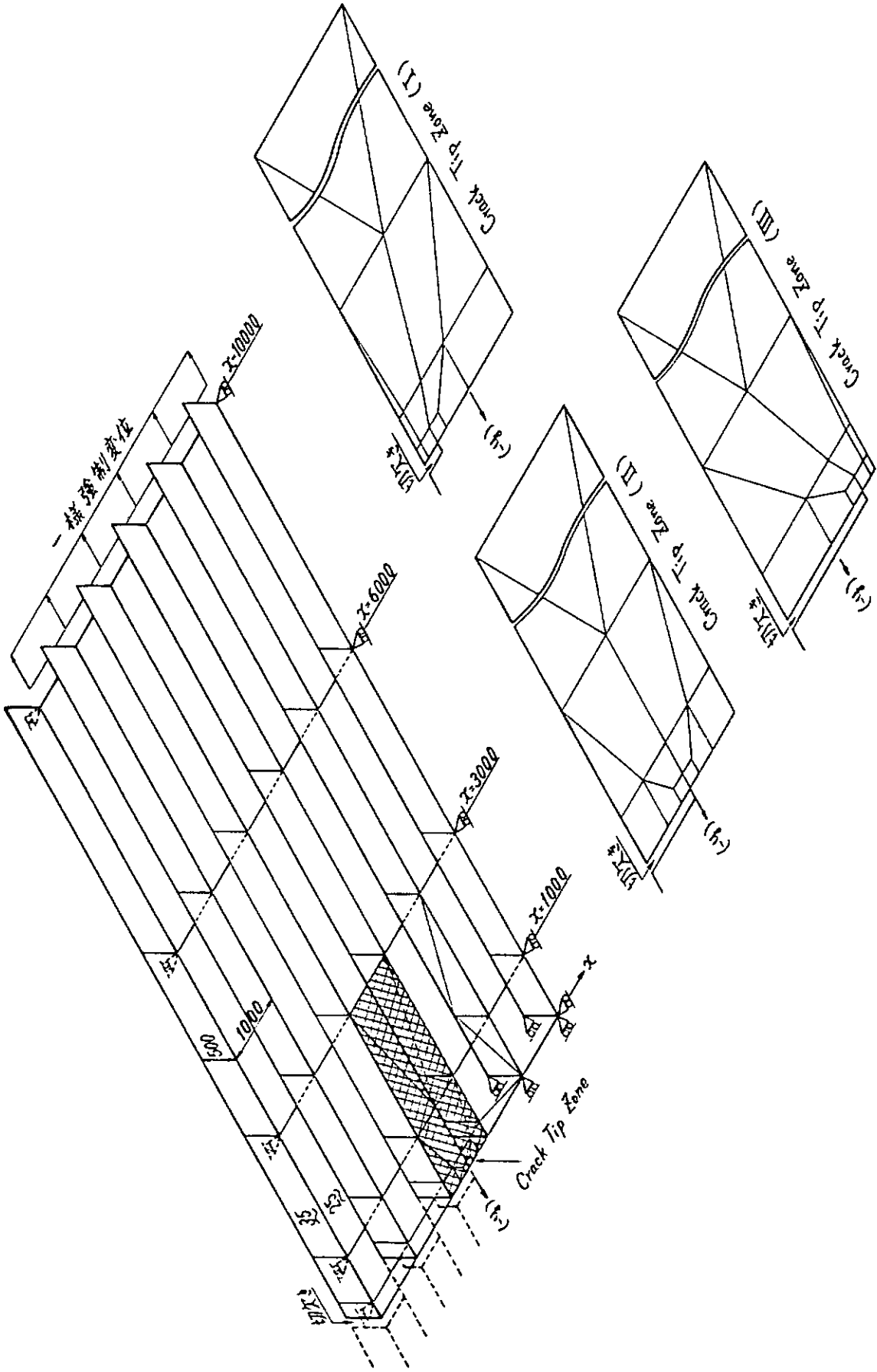


図8.41.19 長大した亀裂のK値評価に用いたモデル

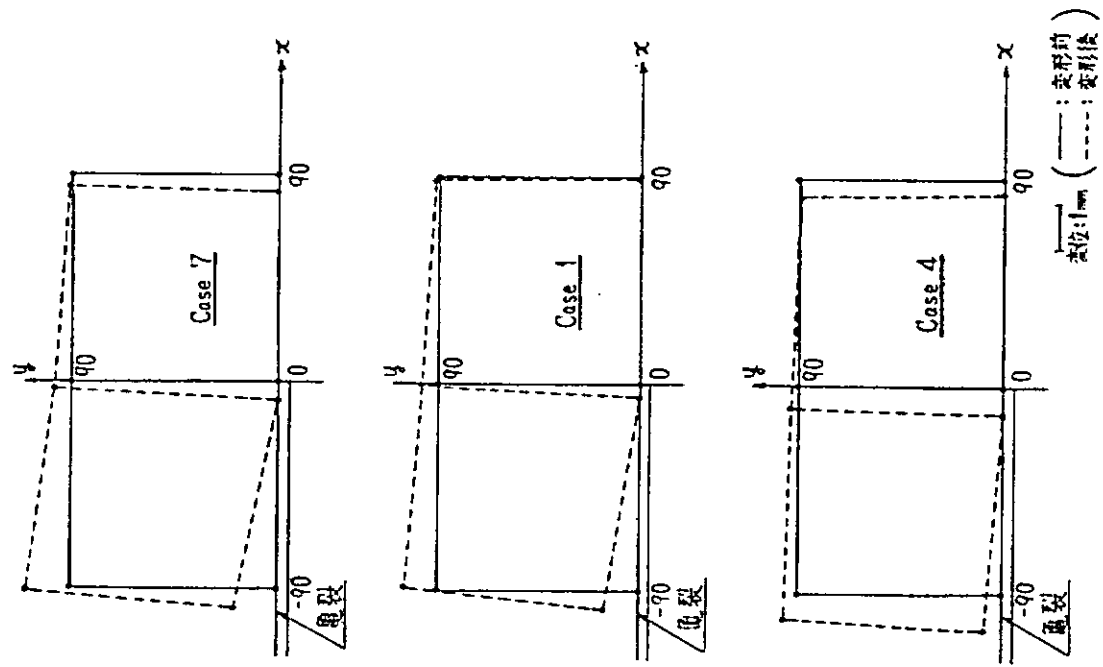


図 8.4r.20 亀裂先端周辺要素の変形の様子

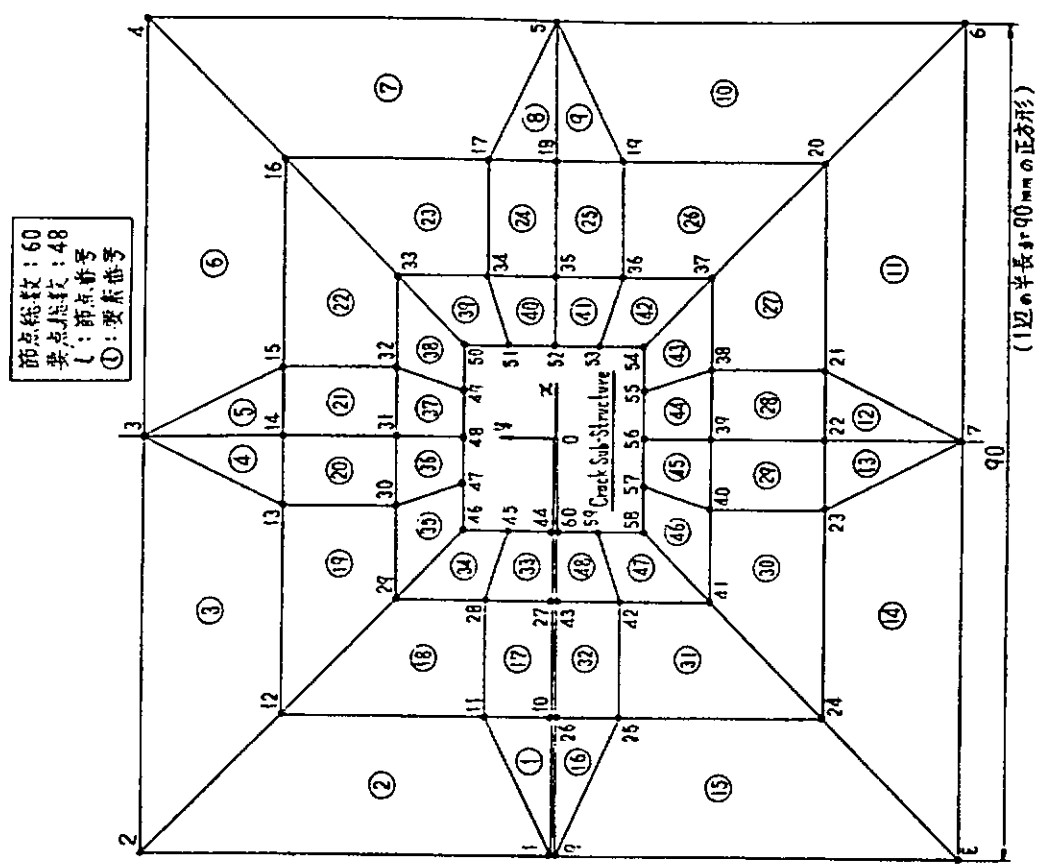


図 8.4r.21 K値評価のための亀裂先端部のメーミング要領

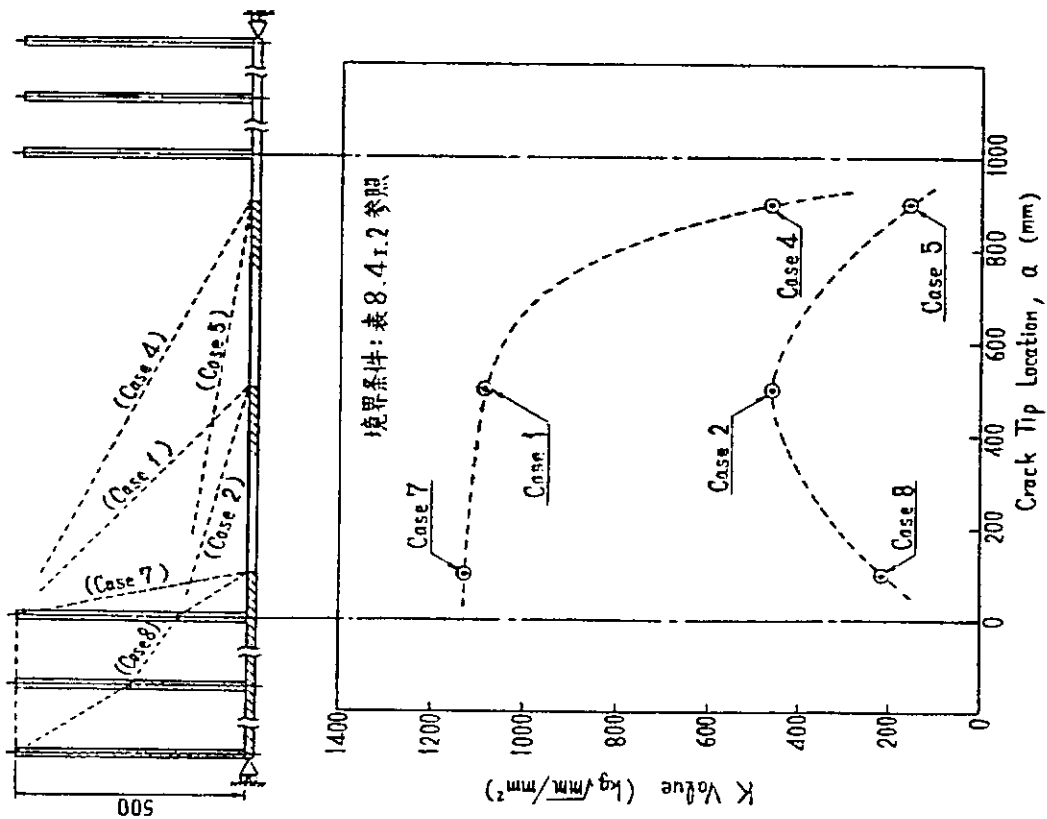


図 8.4I.22 ロンジの存在による K 値の減少効果

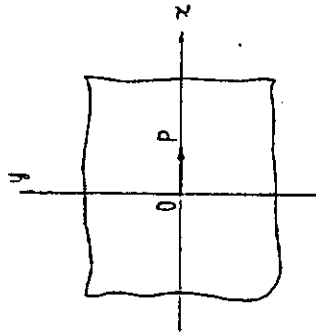


図 8.4I.23

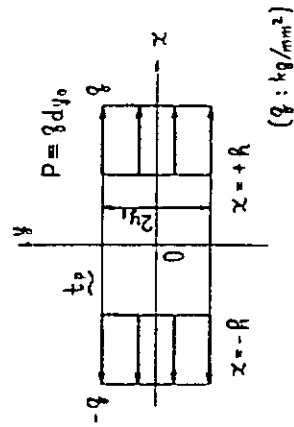


図 8.4I.24

## 8.4Ⅱ 外板とロンジ材との接合部周辺(その2)

— 面外一様圧を受ける場合 —

### 8.4Ⅱ.1 目的

船殻の構造上の特徴の一つとして、“骨に皮を張った構造”，すなわち桁材・縦通材などの深さあるいは間隔に比して外皮(外板)厚が極めて薄い点が挙げられる。すなわち薄板の立体的な組上げによる構造である。

このような構造における亀裂の力学解析(内力・変形・K値などの計算)の大部分は，隣接構造との相持ち効果はあるものの，基本的には亀裂を含む一つの平板ないしは梁の問題に還元できるものと思われる。

本節では，船殻における縦通部材を対象にとりあげて，亀裂の力学解析を試みた。作用荷重としては一様な面外圧を想定した。

### 8.4Ⅱ.2 試計算の内容と考察

計算対象としては，図8.4Ⅱ.1に示すように，亀裂を含む縦通材を中心に4ロンジスペースを1トランス リング間だけ取り出した。計算は面外圧が一様に1 m head 作用しているものとした。

対象構造から1ロンジスペース分だけ取り出した(梁)モデルを，より単純化したモデルとして試計算の一つに加えた。

亀裂解析としては，先ず第1ステップとして全体構造のFEM計算を実施して内力・変形などを求め，第2ステップとして亀裂先端周辺(K値など)の計算を行なう方法をとった。計算ケースとしては，表8.4Ⅱ.1に示すように，亀裂なし状態を含めてパネルモデル(PNシリーズ：図8.4Ⅱ.1)では5つの亀裂長さを，梁モデル(BMシリーズ：図8.4Ⅱ.2)では3つの亀裂長さを扱った。

第1ステップである全体計算のFEMモデルを，図8.4Ⅱ.3(PNシリーズ)および図8.4Ⅱ.4(BMシリーズ)に示す。対象構造領域の最も外側の周辺上では，撓み条件を固定とし，加えて水平方向変位をも拘束した。これは計算

対象の外にある縦・横の大骨の効果を考慮するためであるが、実際よりも強い変形阻止条件である。ロンジ材部分には面内剛性のみ有する要素を配したが、外板部分の要素には面外曲げ剛性も持たせた。

第2ステップの *zooming* 計算には、亀裂先端を含む 100 mm 四方の小領域を取り出した。境界条件は、全体計算での変位を当てた。K値計算には重畳法をベースとした汎用プログラム<sup>1)</sup>を用いた。*zooming* 計算において用いた要素分割図を図 8.4Ⅱ.5 に示す。

計算結果のうち、縦通材下端部(外板との接合線)の撓みを図 8.4Ⅱ.6 に示す。また中央断面内( $\alpha=0$  面内)での外板の撓み形状を図 8.4Ⅱ.7 に示す。図 8.4Ⅱ.6 の表示を改めた図 8.4Ⅱ.8 からは、亀裂長さが深くなるにともない、亀裂位置での局所的な折れ曲り傾向が起こることが認められる。また亀裂無し状態での撓み形状は、梁理論により十分精度よく推定できている。図 8.4Ⅱ.7 において破線で表示した BM シリーズの撓みは、縁辺を自由とした条件で計算したために PN シリーズの傾向と違っている。しかし、縦通材下端部での撓みは比較的近い値を示しており、亀裂深さに大きく支配されている。すなわち、極端に深い亀裂(縦通材深さのおよそ 8 割以上)の場合に PN シリーズとしてのモデル化が有効となるが、それまでは隣接縦通材の相持ち効果は極めて小さく BM シリーズモデルで十分であると判断される。このことは、亀裂を含むロンジとその隣りのロンジの相対撓みから荷重分担割合を逆算して(詳細については Appendix I 参照)推定した図 8.4Ⅱ.9 にも表われている。すなわち、ロンジが完全に切断した場合でも、作用水圧は隣接ロンジが余分に受け持つのではなくて、ほとんどが切断したロンジ自体の端部(トランスリング位置)の曲げモーメント増加として吸収されると解釈できる。図 8.4Ⅱ.10 には端部での水平方向応力(分布)を示すが、同図の傾向はこれに符合している。

K値計算結果を、図 8.4Ⅱ.11 中の丸印およびこれを連ねた実線で示す。

同図中の破線は、亀裂無し状態での（仮想亀裂上の）応力分布と半無限板の縁亀裂モデルから近似推定したものである。また、以下に述べる簡易計算法による $K$ 値を、同図中に一点鎖線で示した。簡易評価法でもかなりの精度で $K$ 値評価できるものと考えられる。

次に、亀裂先端からの距離( $r$ )と開口変位との関係について図8.4Ⅱ.12に示す。開口変位と距離( $r$ )との次式の関係に対応させて、同図中に右上りの直線を引いた。

$$u \cong \frac{2(1-\nu^2)}{E} \sqrt{\frac{2}{\pi}} K_I \sqrt{r} \quad \text{-----} \quad (8.4Ⅱ.1)$$

また、(8.4Ⅱ.1)式から $K_I$ 値を逆推定（いわゆる“変位からの直接法”による $K$ 値推定）した結果を、図8.4Ⅱ.12中に記した。直接法による値は重畳法による値よりも十数パーセント大きい結果となっている。

### 8.4Ⅱ.3 簡易的な方法の検討

以上の結果から判るように、船殻の縦通部材の寸法条件では、一つのロンジが切断した場合でも隣接ロンジの相持ち効果は大きくはならない場合が多い。これは、ロンジスペース( $b$ )に比して外板厚( $t$ )がかなり小さく、かつロンジ深さ( $d$ )が割合大きいことによると思われる。

本項では、隣接ロンジの相持ち効果なしの仮定のもとに、亀裂を有するロンジの撓みおよび $K$ 値について近似計算を試みた。外板厚が相対的に厚いなどの条件により、相持ち効果が無視し得ない場合については、扱いは全く同じであるが煩雑化するので Appendix Ⅱとして末尾に掲げた。

（以下、図8.4Ⅱ.13(a)を参照。記号は同図中に倣う。）

一様圧( $q(=p_0 \cdot b)$ )を受ける梁の撓み( $w$ )の基礎方程式は次式である。

$$\frac{d^2}{dx^2} \left( EI \frac{d^2 w}{dx^2} \right) = q, \quad (-l \leq x < 0) \quad \text{-----} \quad (8.4Ⅱ.2)$$

$-l \leq x < 0$  の範囲内では、断面一様であることに留意して、一般解は次のように求まる。

$$EI w = \frac{q}{24} \cdot x^4 + C_1 x^3 + C_2 x^2 + C_3 x + C_4 \text{ ----- (8.4II.3)}$$

ただし,  $C_1, C_2, C_3, C_4$ : 未定定数

境界条件として, 次の4条件を課することとする。

$$\textcircled{1}: x = -l \text{ において } w = 0 \text{ ----- (8.4II.4)}$$

$$\textcircled{2}: x = -l \text{ において } \frac{dw}{dx} = 0 \text{ ----- (8.4II.5)}$$

$$\textcircled{3}: x = -l \text{ において } V \left( = \frac{dM}{dx} = -EI \frac{d^3 w}{dx^3} \right) = \int_{-l}^0 q dx \text{ ----- (8.4II.6)}$$

$$\textcircled{4}: x \rightarrow 0 \text{ において } M \left( = -EI \frac{d^2 w}{dx^2} \right) = k_{\text{bend}} \cdot \frac{dw}{dx} \text{ ----- (8.4II.7)}$$

これら条件のうち, ①および②は端部の固定条件であり, ③は反力の釣合い条件である。また④は, 亀裂を含む断面が等価なバネで置換できると仮定して, この断面位置で成り立つべきモーメントと傾斜角との関係を示すものである。ただし, 亀裂位置が対称中心にない場合には, (8.4II.7)式に代って次式が用いられるべきである。

$$\frac{dw}{dx} = \frac{M}{k_{\text{bend}}} + \left( \frac{dw}{dx} \right)_0 \text{ ----- (8.4II.7)*}$$

ただし, 右辺第2項は亀裂が無い場合の傾斜を表わす。

この等価なバネ定数の決定に際しては, J.R. Riceの考え方<sup>2)</sup>を応用して Appendix III に示す要領で決めた。ただし, Riceの与えたバネ定数値は, いわばウェブ単独の場合に適用されるべきものであり, 本例のようにフランジ部分(外板)があれば修正を要す。便宜的な方法として, フランジ部分はウェブ内の nominal 応力の決定に影響すると考えると同時に, T型梁全体の(折れ)曲り角度はウェブとフランジそれぞれの局部曲り角度から加重平均的に与えられると仮定した。すなわち, Appendix IIIでの(8.4II.42)式から導かれる(8.4II.44)式を用いた。

境界条件(8.4II.4)式～(8.4II.7)式の導入により, 未定定数が定まり最終的に撓み( $w(x)$ )が決まる。すなわち,

$$EI w(x) = \frac{g}{24} \cdot (x^2 - l^2)^2 + \frac{g}{12} \cdot l^2 \cdot (x + l)^2 \cdot \frac{1}{(1 + \eta)} \quad (8.4\text{II}.8)$$

$$\text{ただし, } \eta = \frac{k_{\text{bend}} l}{EI}$$

$$g = p_0 \cdot b$$

である。したがって、亀裂位置断面( $x \rightarrow 0$ )の曲げモーメントは次式で与えられる。

$$[M]_{x \rightarrow 0} = \frac{gl^2}{6} \cdot \frac{\eta}{1 + \eta} \quad (8.4\text{II}.9)$$

$[M]_{x \rightarrow 0}$  が求まれば、ウェブ内の応力分布が定まり、(8.4II.45)式から亀裂先端K値を求めることができる。すなわち、軸引張り荷重が零で、T型梁としての曲げのみが支配的と考えられる場合のK値は次式で与えられる。

$$K = \frac{gl^2 \sqrt{d}}{6I} \left\{ \left( \frac{d}{2} - e \right) \cdot g_t + \left( \frac{d}{2} \right) \cdot g_b \right\} \frac{\eta}{1 + \eta} \quad (8.4\text{II}.10)$$

補足的な意味で、端部の水平方向( $x$ 方向)変位を拘束した場合に生ずる軸力の評価、およびこれに伴う亀裂先端K値は、Appendix IIIに記す方法で近似的に計算できる。今回の試算結果に対しては、(8.4II.48)式右边を全体計算から得られた最大撓み値 $\times$ 端部強制変位量の値(零)を用いて評価し、軸力(N)のつくるK値を算定した。この値と(8.4II.10)式で与えられるK値とを足し合わせて図8.4II.11中の一点鎖線で示した。以上の簡易評価法で求めたK値と、重畳法により求めたK値とを比較して、その概略値と傾向をとらえるには簡易評価法でほぼ満足できることが明らかである。

#### 8.4II.4 まとめ

船殻に特有な構造である縦通部材をとりあげて、亀裂の力学解析を行なった。その結果次のような点が明らかとなった。

- (1) 一様水圧下にある縦通材では、亀裂の拡大により隣接する縦通材の負荷が増大するというよりも、縦通材基部(Trans. R. との結合部)に過大な負荷がしわ寄せされる傾向が強いという特徴がある。

(2) 亀裂拡大に伴う縦通材の撓み増加や亀裂先端K値の試計算を行ない、これとある程度対応する値を与える簡易計算法を提示することができた。これにより、一般的な寸法条件下の縦通部材の亀裂力学解析を、比較的簡単に実施することができる。

しかし、亀裂解析の対象範囲という点からは次のような問題が今後に残されている。

(3) 本節で対象とした亀裂は、その先端が縦通材中に有る場合であり、縦通材を切断して外板中の表面亀裂と化した場合については扱っていない。このような状態に対しては、前章に述べられているような、別の見方からのモデルに基づく簡易化計算が用意される必要があろう。

#### Appendix I: 亀裂を含むロンジの分担荷重推定

亀裂を含むロンジ材の分担している荷重(すなわち水圧の範囲)を、隣接ロンジとの相対撓み量から逆算してみる。すなわち、図8.4Ⅱ.14に示すように、 $x$ 座標が  $x \sim x + \Delta x$  の部分を切り出して考える。撓み量として相対撓み ( $w^* (= w - w^{(2)})$ ) を扱う。

亀裂を有するロンジ材が無ければ、外板部分には一様水圧( $p_0$ )だけが働くので、撓みの $y$ 方向分布は次式で与えられる。

$$w^*(y) = \frac{p_0 (2b)^4}{384 EI'} \cdot \left(1 - \frac{y^2}{b^2}\right)^2 \quad \text{--- (8.4Ⅱ.11)}$$

これに、亀裂を有するロンジが集中力( $-F$ )を及ぼすと次式となる。

$$w^*(y) = \frac{p_0 (2b)^4}{384 EI'} \cdot \left(1 - \frac{y^2}{b^2}\right)^2 - \frac{F (2b)^3}{192 EI'} \cdot \left(1 + \frac{y}{b}\right)^2 \left(1 - 2 \frac{y}{b}\right) \quad \text{--- (8.4Ⅱ.12)}$$

$y=0$  のロンジ位置での撓み量 ( $= w^{(1)} - w^{(2)}$ ) については、次のようになる。

$$w^*(0) = \frac{b p_0 - F}{2E} \cdot \left(\frac{b}{t}\right)^3 \quad \text{--- (8.4Ⅱ.13)}$$

したがって、FEMによる全体計算結果として得られる  $w^*(0)$  の値から、上式を用いて集中力( $F$ )が逆算できる。

ただし、本節で実施した試計算では、端部の水平方向変位をも拘束しているの、この場合には(8.4Ⅱ.12)式を次のように若干修正する必要がある。

$$w^*(y) \cong \frac{p_0(2b)^4}{384EI'} \cdot \left(1 - \frac{y^2}{b^2}\right)^2 \cdot g(N) - \frac{F(2b)^3}{192EI'} \cdot \left(1 + \frac{y}{b}\right)^2 \left(1 - \frac{2y}{b}\right) \cdot g(N) \quad \text{----- (8.4Ⅱ.14)}$$

$$g(N) = \frac{12}{\alpha^3} \left\{ \frac{2}{\sinh \alpha} - \frac{2}{\tanh \alpha} + \alpha \right\}, \quad (0 < g \leq 1) \quad \text{----- (8.4Ⅱ.15)}$$

$$\alpha = b \cdot \sqrt{\frac{N}{EI}} \quad \text{----- (8.4Ⅱ.16)}$$

N : 軸力

ただし、 $g(N)$ は水平方向変位拘束の結果として生ずる軸力(N)の影響を示す項であり、軸力を無視した場合( $g=1$ )に対する撓み比率を示す。<sup>3)</sup>

この軸力(N)は、梁の中立軸の伸び量を表わす次式を満足することから決められるべきである。

$$\begin{aligned} \frac{N \cdot 2b}{EA} &= \int_{-b}^{+b} \epsilon_x dy \\ &= \int_{-b}^{+b} \left\{ \frac{du}{dx} + \frac{1}{2} \left( \frac{dw^*}{dx} \right)^2 \right\} dy \\ &= \left\{ [u]_{y=+b} - [u]_{y=-b} \right\} + \frac{1}{2} \int_{-b}^{+b} \left( \frac{dw^*}{dx} \right)^2 dy \\ &= \frac{1}{2} \int_{-b}^{+b} \left( \frac{dw^*}{dx} \right)^2 dy, \quad (\because [u]_{y=+b} = [u]_{y=-b} = 0) \quad \text{--- (8.4Ⅱ.17)} \end{aligned}$$

上式はNに関する超越方程式であり解くことが難しい。ただし、本例のような両端固定ではなく単純支持とする場合には、近似的にNの陽表現が与えられている。<sup>3)</sup>

したがって、図8.4Ⅱ.9では、この近似式を代用して $g(N)$ を求め、次式から亀裂を有するロンジの受持つ荷重( $F \equiv \beta \cdot b p_0$ ,  $\beta$ :分担割合を示す係数))を逆算した。すなわち、次式を用いた。

$$w^*(0) = 0.890 \times \frac{b p_0 - F}{2E} \left( \frac{b}{t} \right)^3 \quad \text{----- (8.4Ⅱ.18)}$$

## Appendix II: 亀裂を含む梁の撓み計算 (ロソジ相持ち効果を考慮)

隣接ロソジの相持ち効果を考慮するために、外板部分を介して主対象ロソジに及ぼす撓み阻止効果をバネ近似する (バネ定数:  $k_{pnl}$ )。さらに、このバネ定数値をもつ弾性基礎上に置かれた梁にモデル化し、(8.4Ⅱ.4)式～(8.4Ⅱ.7)式と同じ境界条件を課すことによりロソジ材の撓みなどが計算できる。

$$\begin{aligned} k_{pnl} &= \frac{(\text{荷重})}{(\text{撓み量})} \\ &= F / \left( \frac{F(2b)^3}{192EI'} \right) \quad (\text{図 8.4Ⅱ.14 (b) を参照}) \\ &= 2 \left( \frac{t}{b} \right)^3 E \quad \text{----- (8.4Ⅱ.19)} \end{aligned}$$

弾性基礎上の梁には、外荷重としての一様水圧 ( $q (= p_0 \cdot b)$ ) のほかに、撓みに比例した分布圧 ( $k_{pnl} \cdot w$ ) が誘起される (以下の記号は図 8.4Ⅱ.13 (a) に倣う)。

$$\frac{dV}{dx} \left( = \frac{d^2M}{dx^2} \right) = k_{pnl} \cdot w - q \quad \text{----- (8.4Ⅱ.20)}$$

ここで、

$$EI \frac{d^2w}{dx^2} = -M \quad \text{----- (8.4Ⅱ.21)}$$

であるから、結局 (8.4Ⅱ.2) 式に代る基礎方程式として次式を得る。

$$EI \frac{d^4w}{dx^4} + k_{pnl} \cdot w = q \quad (-l \leq x < 0) \quad \text{----- (8.4Ⅱ.22)}$$

一般解は、次式である。

$$w(x) = \frac{q}{k_{pnl}} + e^{\beta x} (C_1 \cos \beta x + C_2 \sin \beta x) + e^{-\beta x} (C_3 \cos \beta x + C_4 \sin \beta x) \quad \text{----- (8.4Ⅱ.23)}$$

$$\text{ただし, } \beta \equiv \left( \frac{k_{pnl}}{4EI} \right)^{\frac{1}{4}} \quad \text{----- (4.1.4.24)}$$

$C_1, C_2, C_3, C_4$  : 未定定数

$C_1, C_2, C_3, C_4$  を決めるための境界条件としては、(8.4Ⅱ.4)式～(8.4Ⅱ.7)式

に示した条件①～④と同じものを用いる。ただし、条件③の釣合い条件は次のように修正される。

$$\textcircled{3}': \nabla \left( = \frac{dM}{dx} = -EI \frac{d^3 w}{dx^3} \right) = \int_{-l}^0 (q - k_{pnl} \cdot w) dx \quad \text{-----} (8.4\text{II}.25)$$

したがって  $C_1, C_2, C_3, C_4$  を決める方程式は次のようになる。

$$\begin{bmatrix} e^{-\beta l} \cos \beta l & -e^{-\beta l} \sin \beta l & e^{+\beta l} \cos \beta l & -e^{+\beta l} \sin \beta l \\ e^{-\beta l} (\cos \beta l + \sin \beta l) & e^{-\beta l} (\cos \beta l - \sin \beta l) & e^{+\beta l} (-\cos \beta l + \sin \beta l) & e^{+\beta l} (\cos \beta l + \sin \beta l) \\ +1 & -1 & -1 & -1 \\ \gamma & 1+\gamma & -\gamma & -1+\gamma \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\frac{q}{k_{pnl}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \text{-----} (8.4\text{II}.26)$$

$$\text{ただし, } \gamma = \frac{k_{bend}}{2\beta EI} \quad \text{-----} (8.4\text{II}.27)$$

上記(8.4II.26)式を解いて求まる定数( $C_j$  ( $j=1\sim 4$ ))を(8.4II.23)式に代入することにより、撓み( $w(x)$ )が確定する。

本試計算において ロンジが完全に破断した場合、すなわち  $k_{bend} = 0$  の場合について最大撓みを計算してみると、 $w_{max} = 0.26 \text{ mm}$  となる(図8.4II.8中の破線および小表を参照)。一方、先に 8.4II.3項にて述べた相持ち効果無視の計算では、 $w_{max} = 0.29 \text{ mm}$  となり、実際の試計算結果では  $0.22 \text{ mm}$  となった。簡易計算の方が試計算結果より約21%大きな撓みを示しているのは、主に、試計算値には小さいとはいいながら図8.4II.9に示される作用水圧の相持ち効果が算入されていることに原因があると考えられる。この場合、試計算条件として設定した端部水平方向変位拘束による軸力の影響((8.4II.15)式参照)は、撓みが相対的に極微であり、ほとんど関係していないと思われる。

### Appendix III: T断面梁の亀裂を含む断面での等価バネ係数とK値算定

参考文献2)によれば, 片側切欠きを有する帯板が遠方作用応力( $\sigma^{(w)}$ )および $m^{(w)}$ を受ける場合の切欠き断面における(亀裂の存在により増える付加)伸びおよび回転角は次式で与えられる。

$$u^{(w)}d = A_{tt} \cdot \sigma^{(w)} + A_{tb} \cdot m^{(w)} \quad \text{----- (8.4II.28)}$$

$$\theta^{(w)} \frac{d^2}{6} = A_{bt} \cdot \sigma^{(w)} + A_{bb} \cdot m^{(w)} \quad \text{----- (8.4II.29)}$$

ただし,  $u^{(w)}, \theta^{(w)}$ : 切欠き断面での(付加)伸びおよび回転角

$\sigma^{(w)}, m^{(w)}$ : 作用応力

$d$ : 板幅

$A_{tt}, A_{tb}, A_{bt}, A_{bb}$ : 切欠き深さ比( $c/d$ )などから決まる定数

( $A_{bt} = A_{tb}$ )

ここで, 定数( $A_{\lambda\mu}$  ( $\lambda, \mu = t, b$ ))は, Irwin<sup>4)</sup>が示した  $G$ 値とK値の関係式と  $G$ 値の定義式を等置することにより導かれる。

$$\frac{(1-\nu^2)}{E} K^2 = \frac{1}{2} \left\{ \sigma^{(w)} \frac{\partial}{\partial c} (ud) + m^{(w)} \frac{\partial}{\partial c} \left( \theta \frac{d^2}{6} \right) \right\} [=G] \quad \text{---- (8.4II.30)}$$

$$K = \sqrt{d} \{ \sigma^{(w)} g_t + m^{(w)} g_b \} \quad \text{----- (8.4II.31)}$$

$g_t, g_b$ :  $\frac{c}{d}$  の関数であって表 8.4II.2 の値をとる

すなわち, 最終的に (8.4II.28)式, (8.4II.29)式は次のように表示される。

$$u^{(w)} = \frac{2(1-\nu^2)d}{E} (\alpha_{tt} \cdot \sigma^{(w)} + \alpha_{tb} \cdot m^{(w)}) \quad \text{----- (8.4II.32)}$$

$$\theta^{(w)} = \frac{12(1-\nu^2)}{E} (\alpha_{bt} \cdot \sigma^{(w)} + \alpha_{bb} \cdot m^{(w)}) \quad \text{----- (8.4II.33)}$$

この両式により, ウェブ部分単独の場合のバネ係数が算出できる。ただし, 上式中の  $\alpha_{tt}, \alpha_{tb}, \alpha_{bt}, \alpha_{bb}$  は次式で与えられる。

$$\alpha_{\lambda\mu} = \frac{1}{d} \int_0^c g_\lambda \cdot g_\mu dc, (\lambda, \mu = b, t): \text{表 8.4II.2 参照} \quad \text{--- (8.4II.34)}$$

以上が, J.R.Rice の与えたバネ係数決定の基本的考え方である。T断面梁の場合にも正攻法的には, (8.4II.31)式に相当するK値表示式が必要と

なる。しかし、これらは陽関数表現としては求められていないので、次のような便宜的方法をとることとする。

基本的な考え方としては、梁断面の一部を構成するウェブ部分には依然(8.4Ⅱ.32)式、(8.4Ⅱ.33)式が成立しているものとし、ウェブ部分の応力 $(\sigma^{(w)}, m^{(w)})$ と変形 $(u^{(w)}, \theta^{(w)})$ とT断面全体としての応力と変形とを関連付けることにする。

まず(梁)断面全体としての曲げモーメント $(M)$ および軸力 $(N)$ と、ウェブ部分だけを単独に取り出して考える場合の曲げ応力および軸応力 $(m^{(w)}, \sigma^{(w)})$ との関係を求める。梁理論による断面内応力分布 $(\tilde{\sigma})$ は、深さ方向座標軸 $(z)$ を用いて次式で表わせる(以下図8.4Ⅱ.13(b)の記号に倣う)。

$$\tilde{\sigma} = \sigma + m(z - e) / (d - e) = N/A + M(z - e) / I \quad \text{---- (8.4Ⅱ.35)}$$

したがって、 $m^{(w)}$ および $\sigma^{(w)}$ についてはウェブ重心が $z = \frac{1}{2}d$ にあるから次の値をとる。

$$\sigma^{(w)} = N/A + M\left(\frac{d}{2} - e\right) / I \quad \text{----- (8.4Ⅱ.36)}$$

$$m^{(w)} = M\left(\frac{d}{2}\right) / I \quad \text{----- (8.4Ⅱ.37)}$$

次に(梁)断面全体としての(付加)回転角および伸び $(\theta, u)$ と、ウェブ部分だけを単独に考えた場合のそれら $(\theta^{(w)}, u^{(w)})$ との関係を設定する。最初に断面全体の(付加)回転角について、純曲げ荷重 $(N=0)$ を想定して考える。ウェブ内の変位分布 $(\delta^{(w)})$ については、(8.4Ⅱ.32)式、(8.4Ⅱ.33)式を用いた(本来は直線勾配でない亀裂断面位置での変位に代る仮想的なものとして)次式の直線状変化が考えられる。

$$\delta^{(w)} = u^{(w)} + \theta^{(w)}\left(z - \frac{d}{2}\right) \quad \text{----- (8.4Ⅱ.38)}$$

ゆえに、梁断面全体を考えた場合のフランジ部の変位 $(\delta^{(f)})$ として次の値が推定される。

$$\delta^{(f)} = u^{(w)} - \theta^{(w)} \cdot \frac{d}{2} \quad \text{----- (8.4Ⅱ.39)}$$

したがって、上述の  $\delta^{(w)}$ ,  $\delta^{(f)}$  の表示を併せて全体断面の変位とすれば、 $\theta = \theta^{(w)}$  となるが、これでは亀裂が有ることによって生ずる回転中心 ( $\bar{z} = e^*$  にあるとする) の移動がフランジ部剛性と無関係になり不都合である。そこで、回転中心 ( $e^*$ ) は (亀裂部分を除いた) 正味断面の重心位置であると仮定して断面全体の変形 ( $\delta$ ) を次式で表わし、(8.4Ⅱ.39) 式と連立させる方法をとった。

$$\delta = \theta \cdot (\bar{z} - e^*) \text{-----} (8.4Ⅱ.40)$$

$$e^* = \{(d-C)^2 t_L + (b-t_L) t^2\} / 2 \{(d-C) t_L + b t\} \text{-----} (8.4Ⅱ.41)$$

すなわち、次式を仮定したことになる。

$$\theta = -\delta^{(f)} / e^* = (\theta^{(w)} \cdot d/2 - u^{(w)}) / e^* \text{-----} (8.4Ⅱ.42)$$

また、断面全体の (付加) 伸び ( $u$ ) については、次式を想定することとした。

$$u = u^{(w)} \cdot A_{web} / A \text{-----} (8.4Ⅱ.43)$$

以上の前提より、曲げに対する等価バネ係数 ( $k_{bend}$ ) は、純曲げ荷重 ( $M$ ) のもとで次のように求まる。

$$\begin{aligned} k_{bend} &= M / (\theta / 2) \\ &= \frac{EI e^* / (1-\nu^2)}{d \{ (3\alpha_{bt} - \alpha_{tt}) (\frac{d}{2} - e) + (3\alpha_{bb} - \alpha_{tb}) (\frac{d}{2}) \}} \text{-----} (8.4Ⅱ.44) \end{aligned}$$

この場合の  $K$  値表示として、(8.4Ⅱ.9) 式の亀裂断面でのモーメント ( $M^{(0)}$ ) を用いた次式を得る。

$$K = \sqrt{d} \left\{ (\frac{d}{2} - e) \cdot g_t + (\frac{d}{2}) \cdot g_b \right\} \frac{M^{(0)}}{I} \text{-----} (8.4Ⅱ.45)$$

また、引張りに対する等価バネ係数 ( $k_{tensile}$ ) は、引張り荷重 ( $N$ ) のもとで次のように与えられる。

$$\begin{aligned} K_{tensile} &= N / (u / 2) \\ &= \frac{EA^2 / (1-\nu^2)}{t_L d b} \text{-----} (8.4Ⅱ.46) \end{aligned}$$

$$K = \sqrt{d} \cdot g_t \cdot N/A \text{ ----- (8.4II.47)}$$

次に、曲げ荷重条件ではあるが本試計算において設定されたように、端部水平方向変位を拘束(強制変位拘束)した場合について若干記す。この場合に生ずる軸力(N)は、中立軸の伸び( $\Delta l$ )を表わす2通りの表示を等置することにより与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{N \cdot l}{EA} + \frac{N}{k_{\text{tensile}}} &= \int_{-l}^0 \epsilon_x dx \\ &= \int_{-l}^0 \left\{ \frac{du}{dx} + \frac{1}{2} \left( \frac{dw}{dx} \right)^2 \right\} dx \\ &= -[u]_{x=-l} + \frac{1}{2} \left( \frac{dw}{dx} \right)^2 dx \text{ ----- (8.4II.48)} \end{aligned}$$

したがって、上式に撓み分布形( $w$ )、および強制変位量( $-[u]_{x=-l}$ )を与えれば、軸力(N)が求まり、(8.4II.47)式から軸力の作るK値が計算できる。

#### 参考文献

- 1) 安藤, "船体構造部材のき裂強度解析(面内弾性問題)," 三菱重I技報 Vol. 10, No. 3, 昭和48年5月
- 2) J.R. Rice and N. Levy, "The Part-Through Surface Crack in an Elastic Plate," J. of Appl. Mech., March 1972
- 3) たとえば  
"造船設計便覧," 関西造船協会編  
寺沢一雄 監修, "船体構造力学," 海文堂, p. 43
- 4) G.R. Irwin, "Fracture Mechanics," Structural Mechanics, eds., J.N. Goodier and N.J. Hoff, Pergamon Press, 1960, p. 557

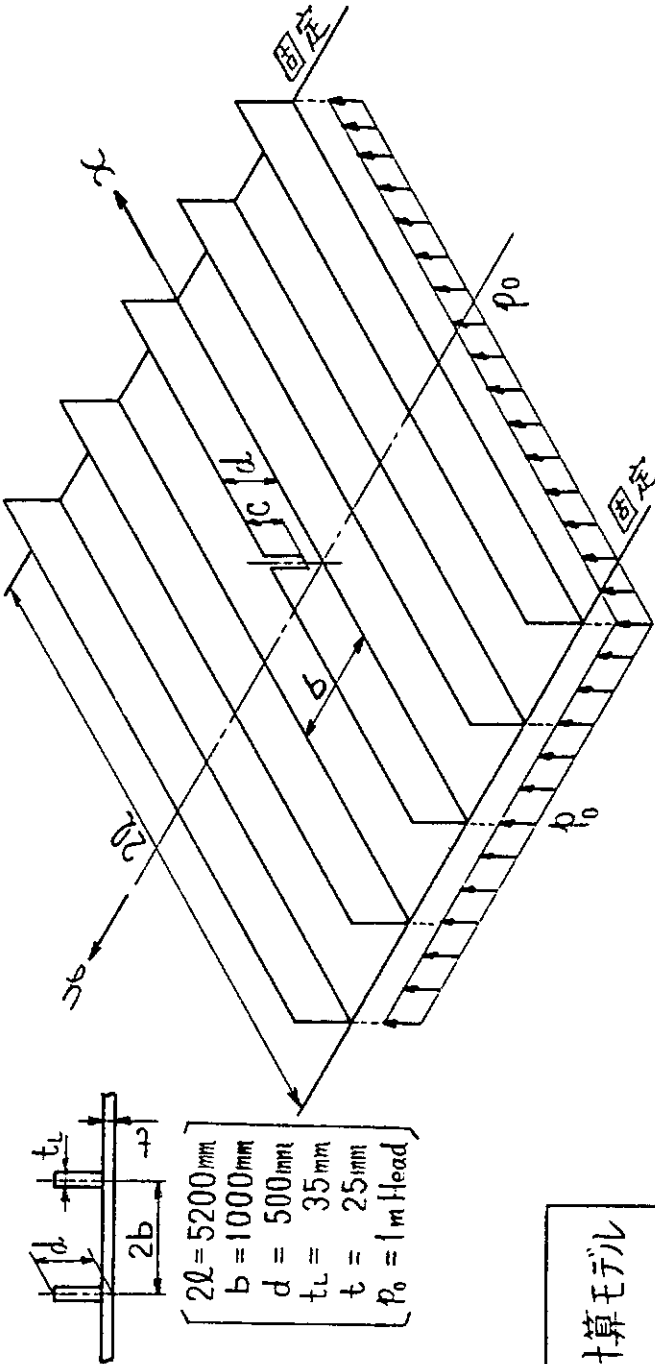


表 8.4Ⅱ.1 計算ケース

| 計算ケース | 亀裂深さ      | 計算ケース   |         | 計算モデル    |
|-------|-----------|---------|---------|----------|
|       |           | Primary | Zooming |          |
| PN-0  | $c/d=0$   | ○       | —       | 図 8.4Ⅱ.1 |
| PN-4  | $c/d=0.4$ | ○       | ○       |          |
| PN-8  | $c/d=0.8$ | ○       | ○       |          |
| PN-9  | $c/d=0.9$ | ○       | ○       |          |
| PN-10 | $c/d=1.0$ | ○       | —       |          |
| BM-0  | $c/d=0$   | ○       | —       | 図 8.4Ⅱ.2 |
| BM-4  | $c/d=0.4$ | ○       | ○       |          |
| BM-8  | $c/d=0.8$ | ○       | ○       |          |

図 8.4Ⅱ.1 対象構造寸法 (PNシリーズ)

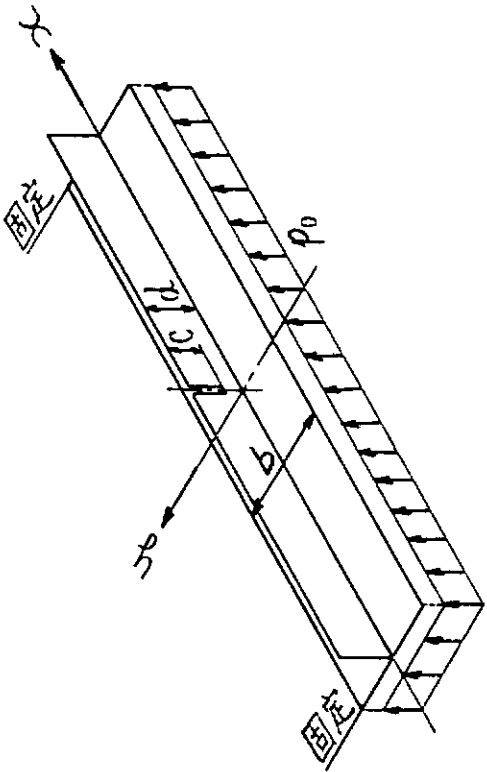


図 8.4Ⅱ.2 T型断面モデル (BMシリーズ)

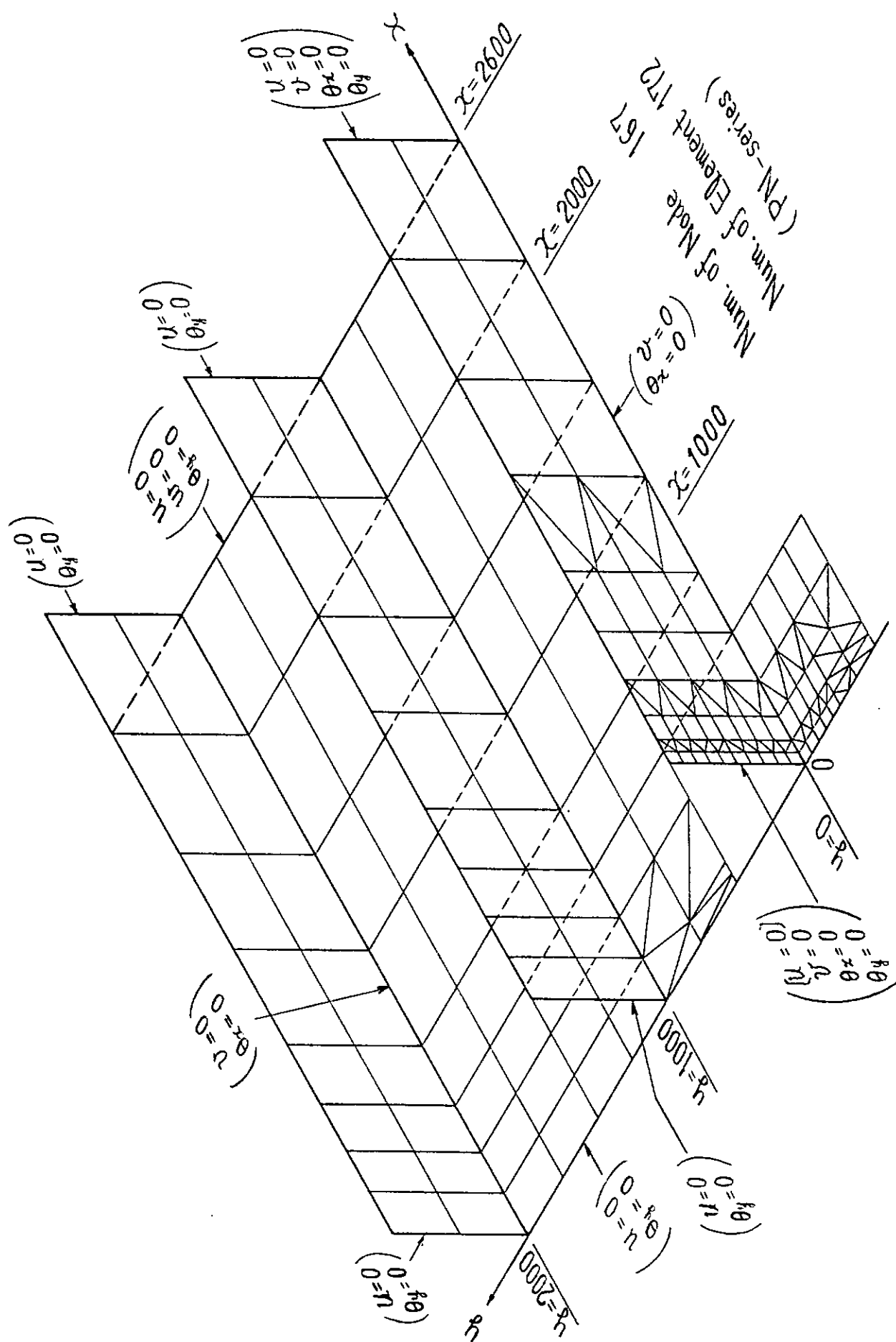
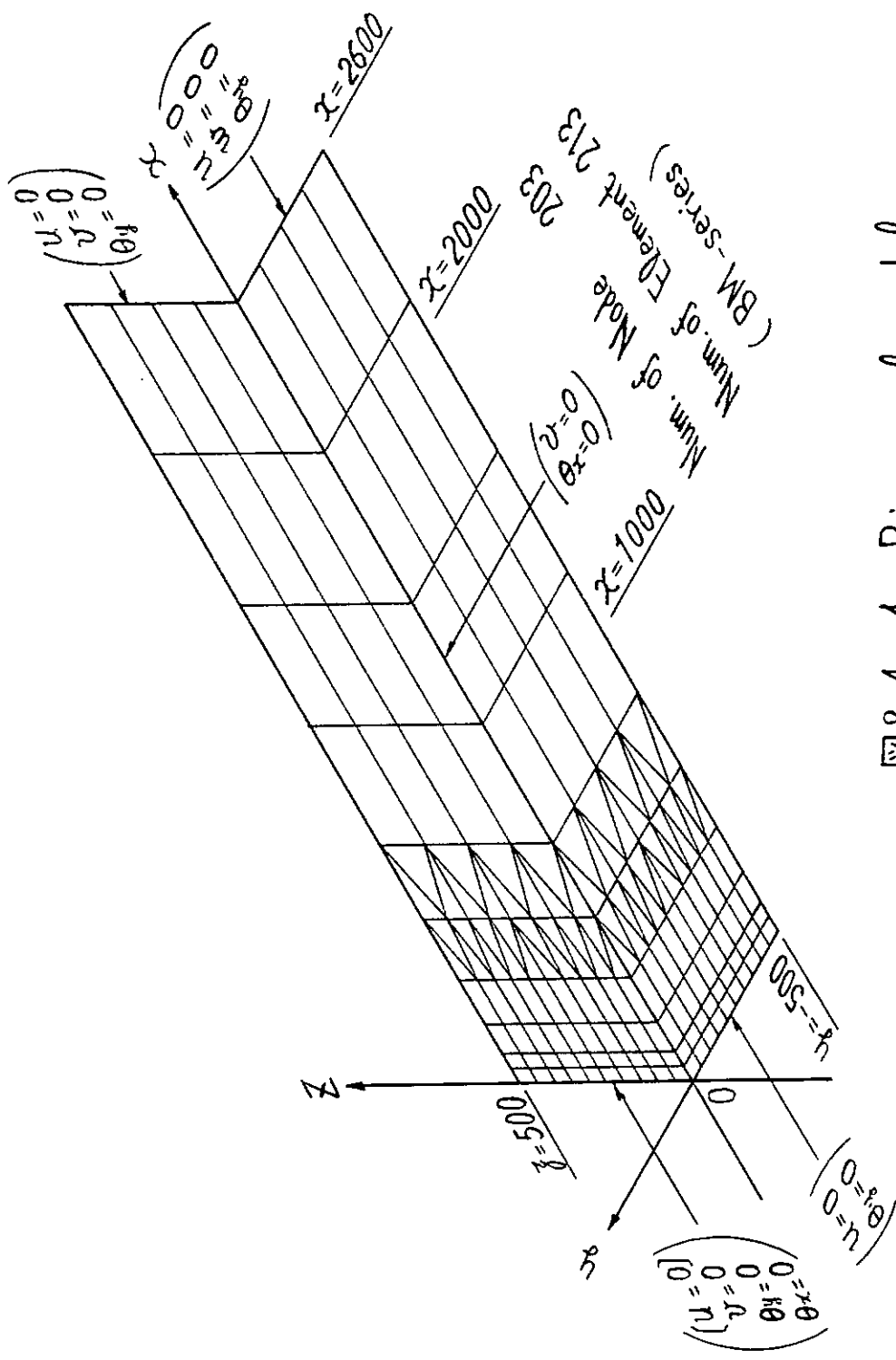
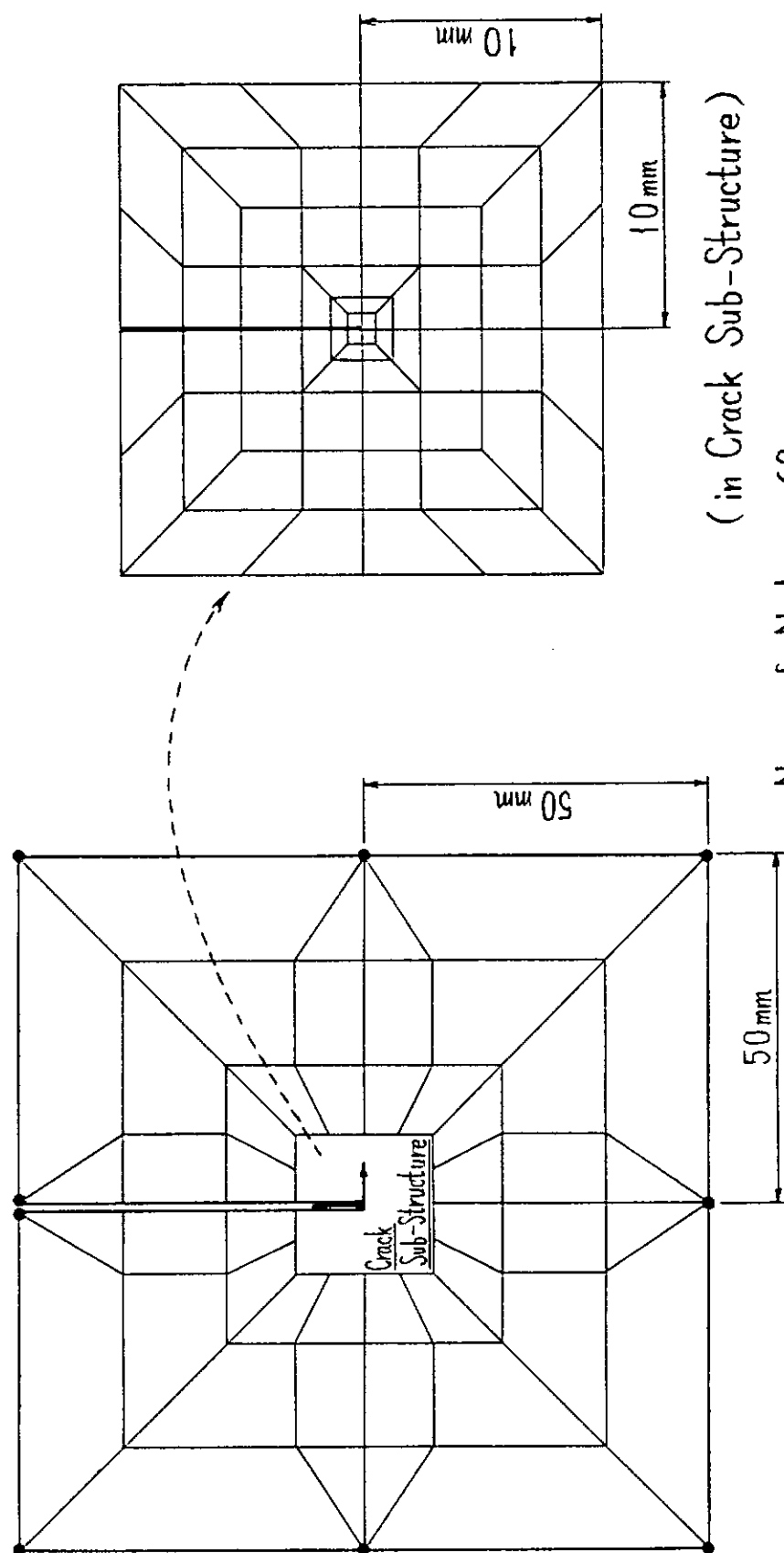


Fig. 8.4π.3 Primary cal. model



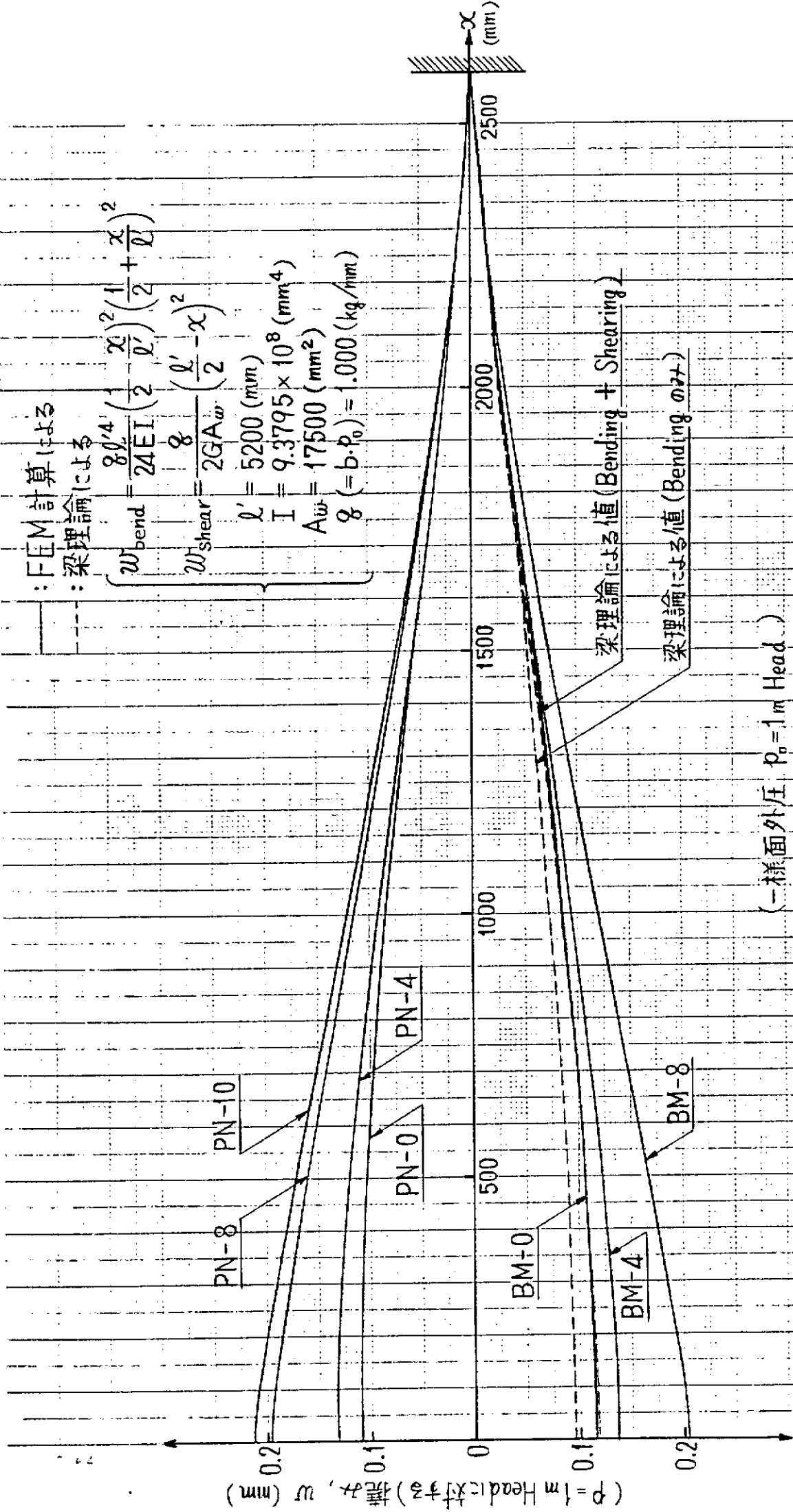
8.4.4 Primary cal. model



Num. of Node 60

Num. of Element 48 (Except in Crack Sub-Structure)

图 8.4π.5 Zooming col. model



(一様面外圧  $p_0 = 1\text{m Head}$ )

図8.4II.6 骨の撓み (on  $y=0$ ) 形状

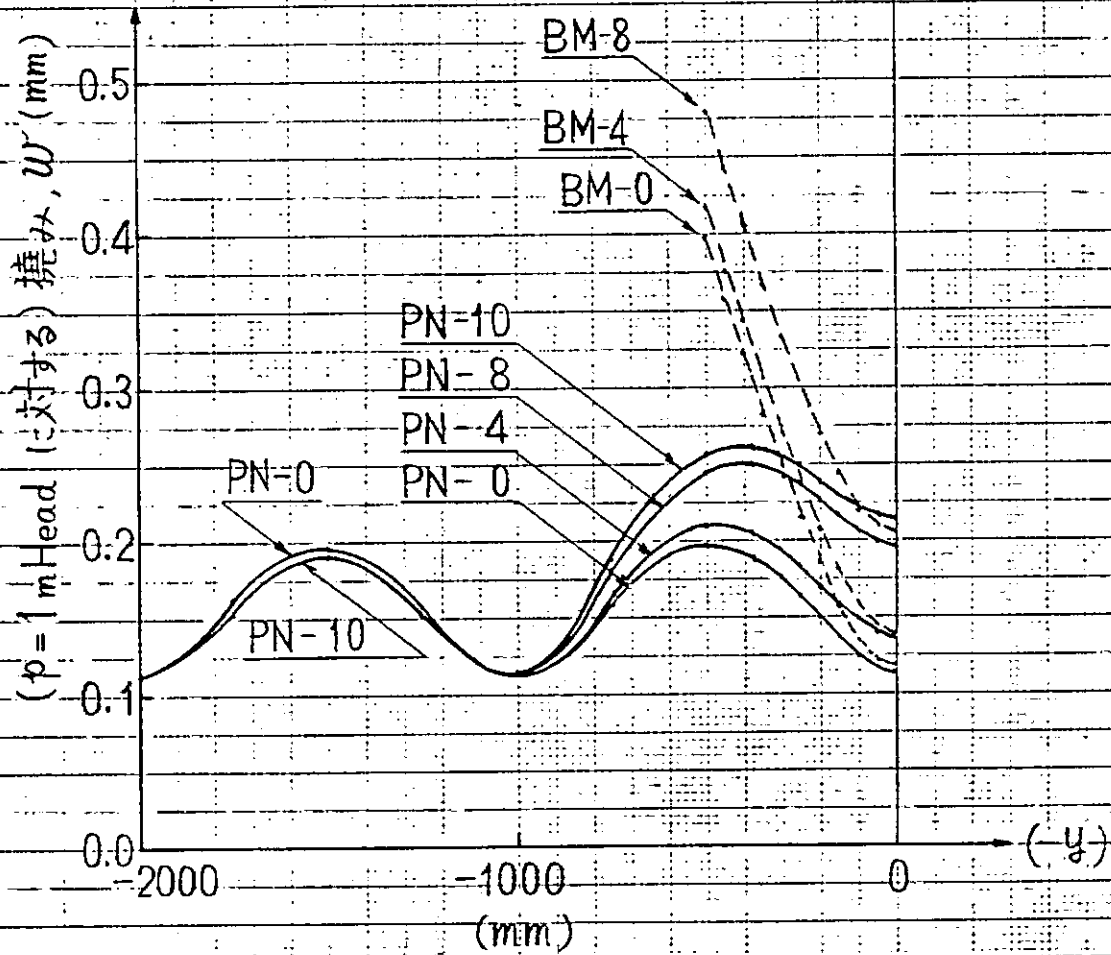
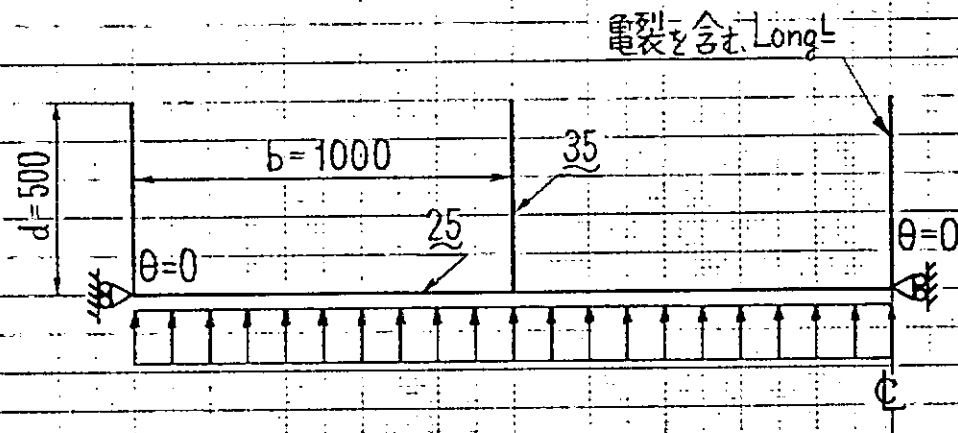


図8.4Ⅱ.7 パネルの撓み (on  $\alpha=0$ ) 形状

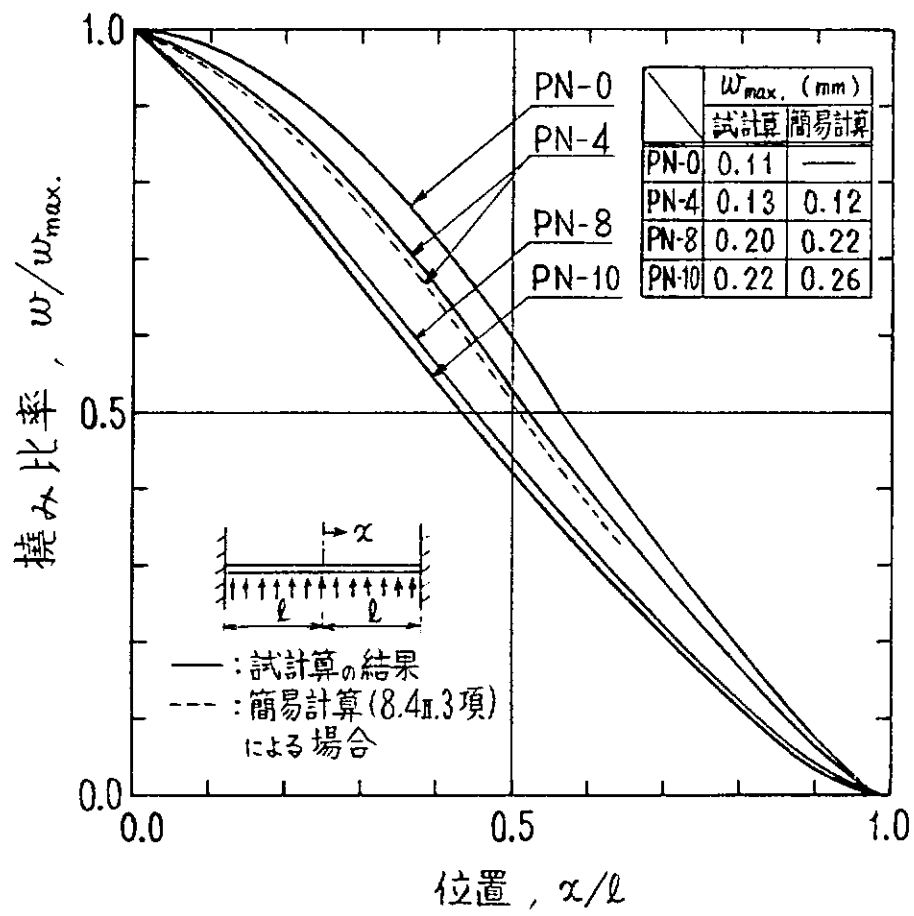


図8.4Ⅱ.8 梁の局部折れ曲り傾向

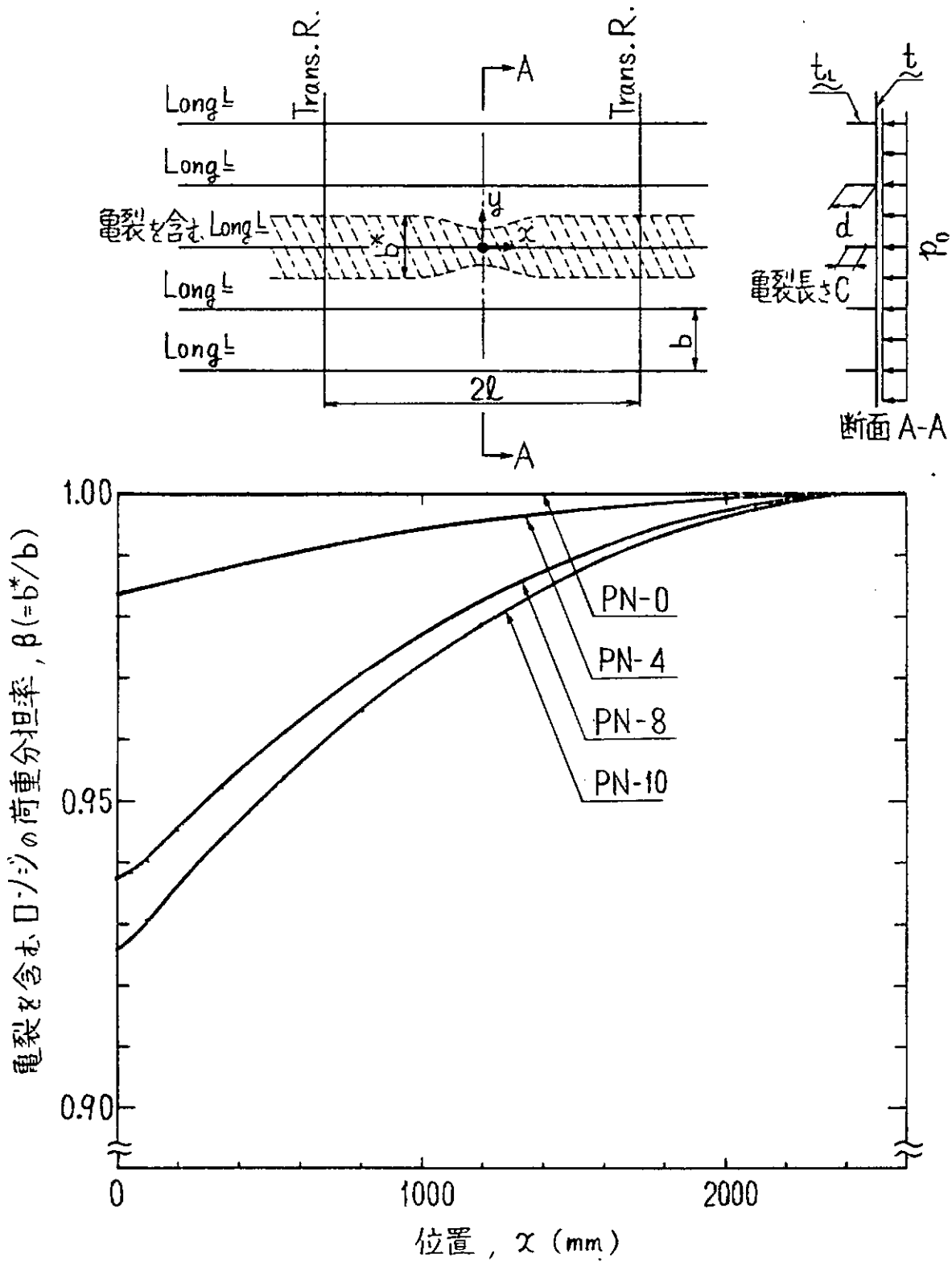


図 8.4II.9 電裂を含むロソジの荷重分担率

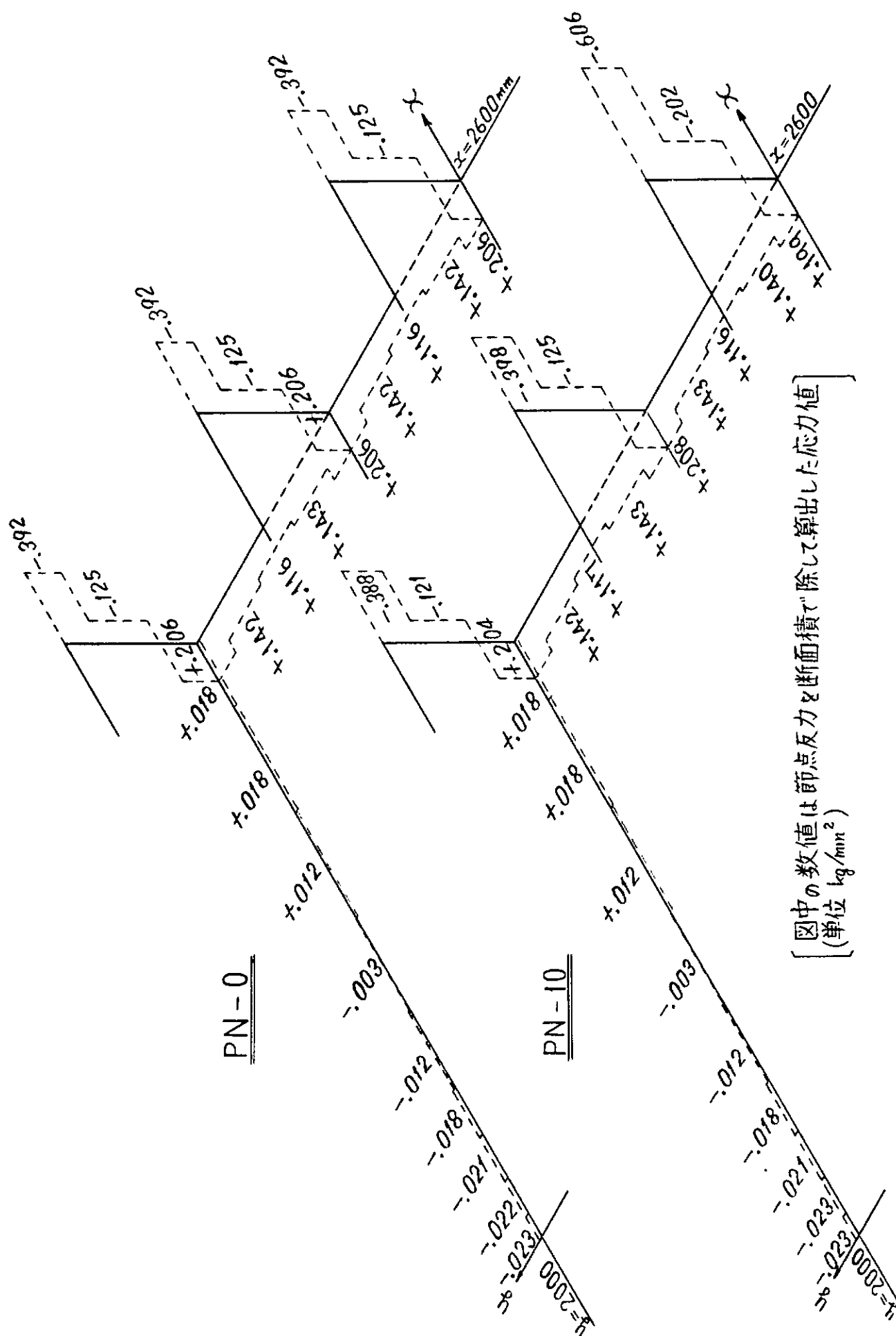
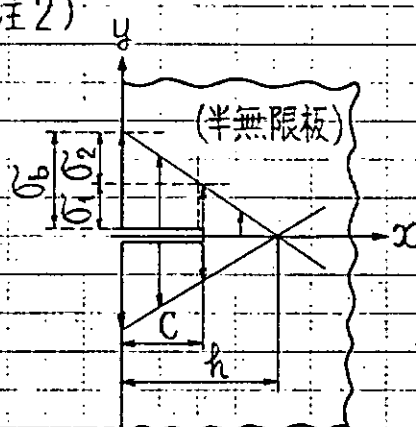


図8.4Ⅱ.10 端部での水平方向応力分布

(注1) —○— PNシリーズの計算結果(解析解重畳法による値)

● BMシリーズの計算結果(解析解重畳法による値)

(注2)



$$\text{作用応力 } \sigma_{yy}^{(\infty)} = \sigma_b \left(1 - \frac{x}{h}\right)$$

$$K^* = K_{\sigma_1} + K_{\sigma_2}$$

$$K_{\sigma_1} = 1.1215 \sigma_1 \sqrt{\pi C}$$

$$K_{\sigma_2} = 0.439 \sigma_2 \sqrt{\pi C}$$

$$\sigma_1 = \sigma_b \left(1 - \frac{C}{h}\right)$$

$$\sigma_2 = \sigma_b \left(\frac{C}{h}\right)$$

$$\text{ただし, } \sigma_b = M\alpha / (I/\eta) = 0.466 \text{ kg/mm}^2$$

$$h (= \eta) = 388 \text{ mm}$$

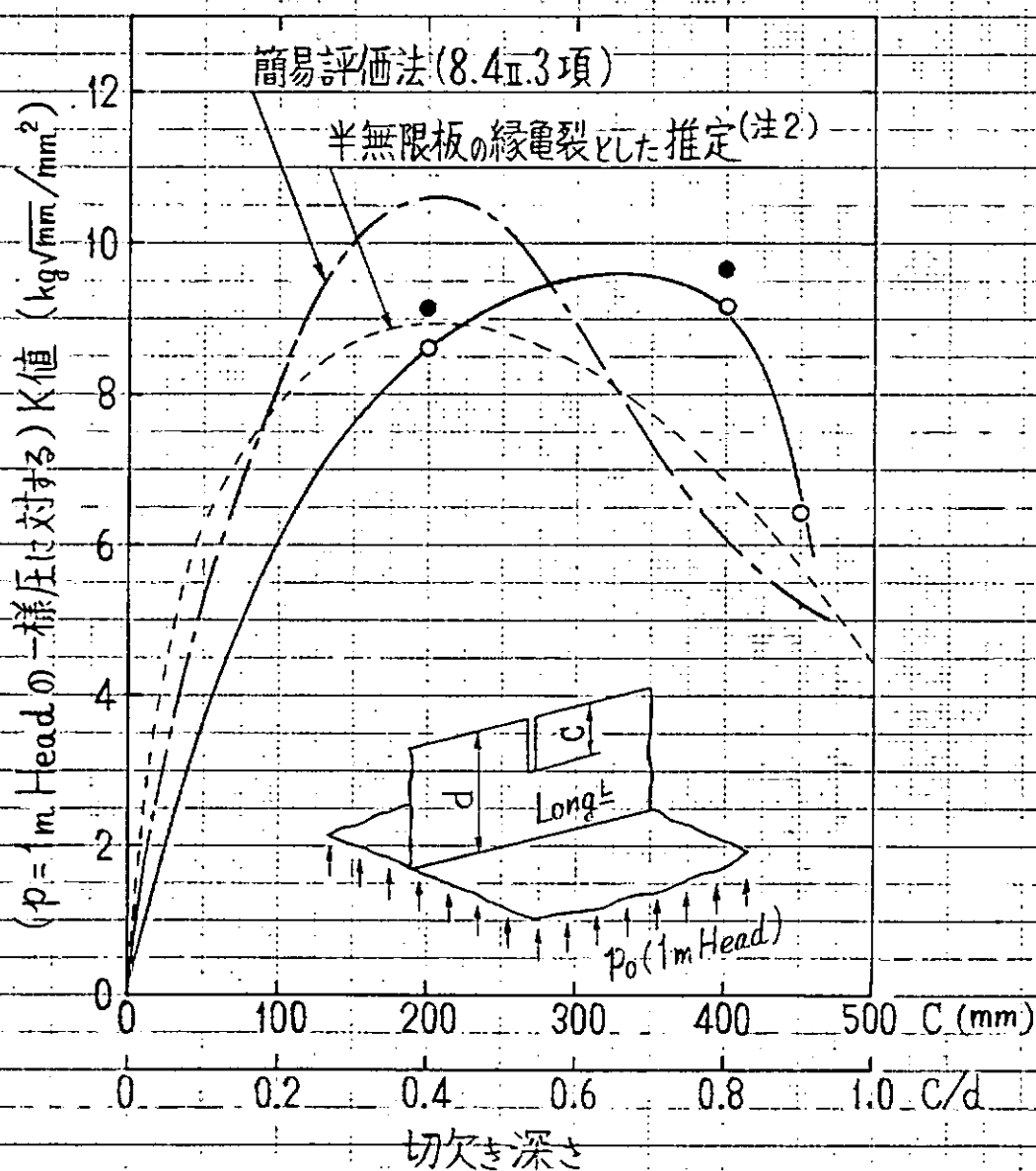


図8.4Ⅱ.11  $K$  値計算結果

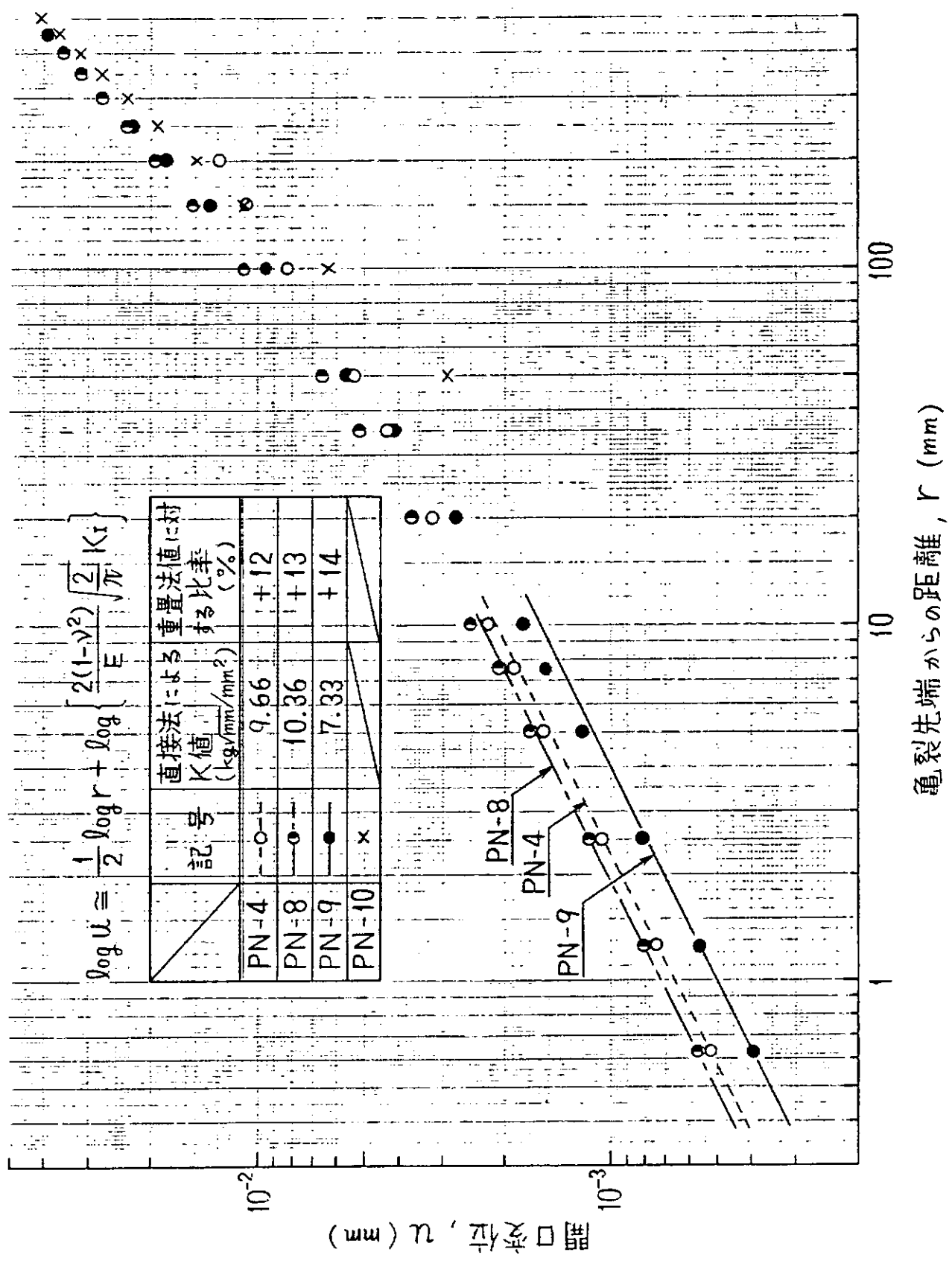
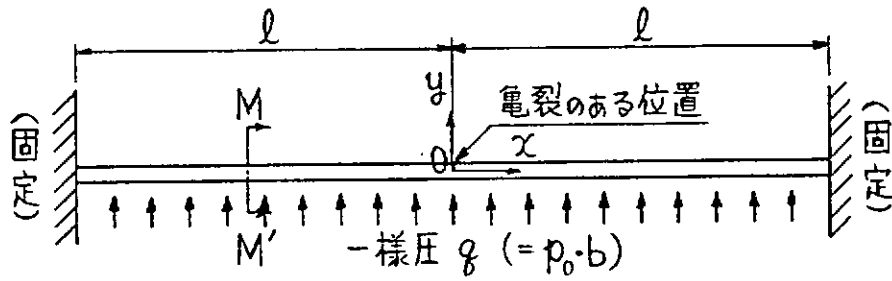
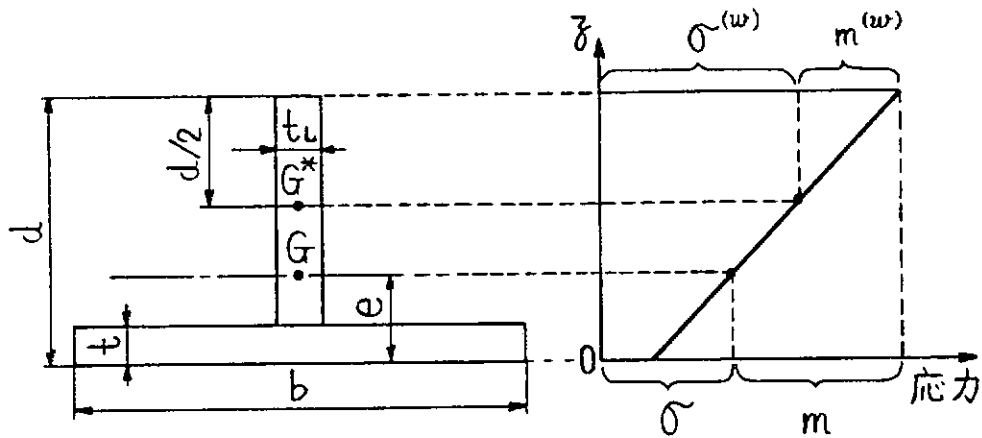


図8.4Ⅱ.12 亀裂開口変位を用いた直接法によるK値推定



(a) 一様圧の条件下の梁



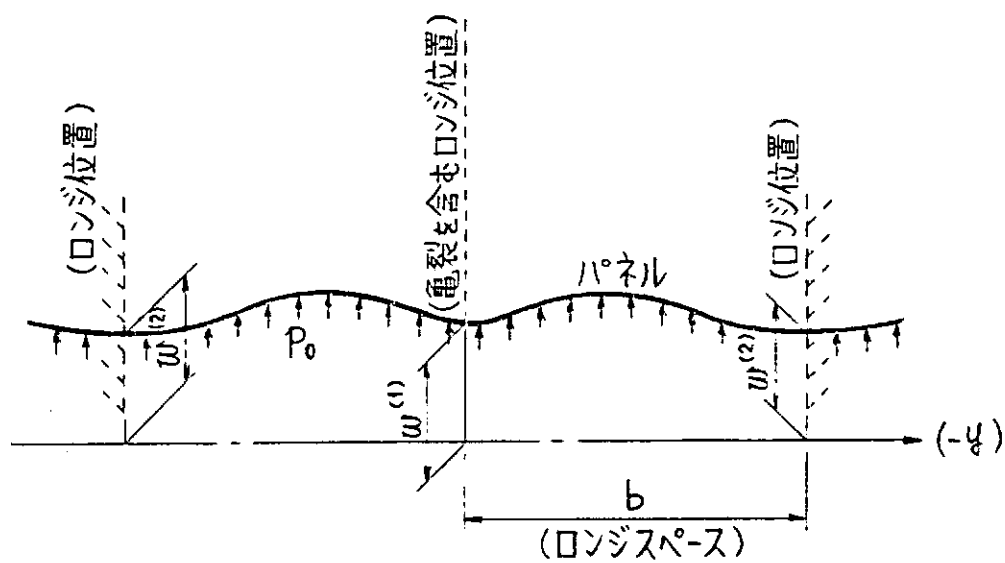
$$I = \frac{d^3 t_L + (b - t_L) t^3}{3} - A \cdot e^2$$

$$A = A_{web} + A_{flange} = d t_L + b t$$

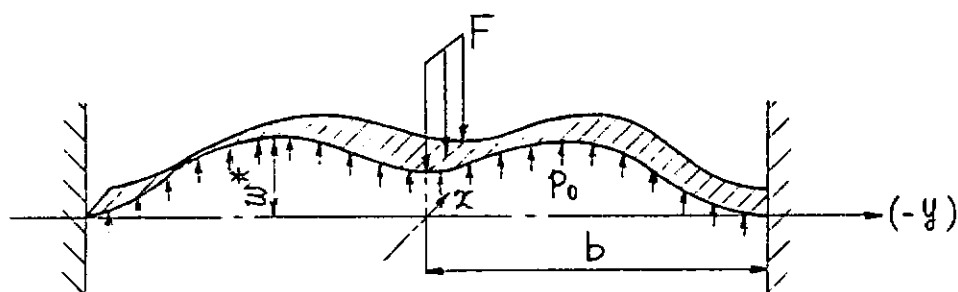
$$e = \frac{1}{2A} \{ d^2 t_L + (b - t_L) t^2 \}$$

(b) 断面 M-M'

図 8.4Ⅱ.13 簡易計算のためのモデル



(a)



$x$  方向は単位長さ

$$I' = \frac{1}{12} (t)^3$$

$$A' = 1 \times t$$

(b)

図 8.4Ⅱ.14 相持ち効果を考えるモデル

表 8.4Ⅱ.2  $\alpha_{\lambda\mu}$  および  $g_\lambda$  の値

| $\xi = c/d$ で表わす<br>$\alpha_{tt} = \int_0^\xi \{g_t(\xi)\}^2 d\xi, \alpha_{tb} (= \alpha_{bt}) = \int_0^\xi g_t(\xi) g_b(\xi) d\xi, \alpha_{bb} = \int_0^\xi \{g_b(\xi)\}^2 d\xi$<br>$g_t(\xi) = \sqrt{2 \tan \frac{\pi \xi}{2}} \cdot \left\{ 0.752 + 2.02 \xi + 0.37 \left( 1 - \sin \frac{\pi \xi}{2} \right)^3 \right\} / \cos \frac{\pi \xi}{2}$<br>$g_b(\xi) = \sqrt{2 \tan \frac{\pi \xi}{2}} \cdot \left\{ 0.923 + 0.199 \left( 1 - \sin \frac{\pi \xi}{2} \right)^4 \right\} / \cos \frac{\pi \xi}{2}$ |                       |                               |                       |                       |                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| $\xi$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | $\alpha_{tt}$         | $\alpha_{tb} (= \alpha_{bt})$ | $\alpha_{bb}$         | $g_t$                 | $g_b$                 |
| 0.00                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0.00                  | 0.00                          | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  |
| 0.05                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | $5.08 \times 10^{-3}$ | $4.85 \times 10^{-3}$         | $4.63 \times 10^{-3}$ | $4.55 \times 10^{-1}$ | $4.24 \times 10^{-1}$ |
| 0.10                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | $2.13 \times 10^{-2}$ | $1.94 \times 10^{-2}$         | $1.77 \times 10^{-2}$ | $6.70 \times 10^{-1}$ | $5.83 \times 10^{-1}$ |
| 0.15                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | $5.11 \times 10^{-2}$ | $4.44 \times 10^{-2}$         | $3.86 \times 10^{-2}$ | $8.71 \times 10^{-1}$ | $7.07 \times 10^{-1}$ |
| 0.20                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | $9.88 \times 10^{-2}$ | $8.17 \times 10^{-2}$         | $6.79 \times 10^{-2}$ | 1.08                  | $8.21 \times 10^{-1}$ |
| 0.25                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | $1.71 \times 10^{-1}$ | $1.35 \times 10^{-1}$         | $1.07 \times 10^{-1}$ | 1.32                  | $9.38 \times 10^{-1}$ |
| 0.30                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | $2.78 \times 10^{-1}$ | $2.08 \times 10^{-1}$         | $1.57 \times 10^{-1}$ | 1.61                  | 1.07                  |
| 0.35                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | $4.36 \times 10^{-1}$ | $3.09 \times 10^{-1}$         | $2.21 \times 10^{-1}$ | 1.95                  | 1.21                  |
| 0.40                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | $6.67 \times 10^{-1}$ | $4.48 \times 10^{-1}$         | $3.05 \times 10^{-1}$ | 2.36                  | 1.38                  |
| 0.45                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 1.01                  | $6.42 \times 10^{-1}$         | $4.16 \times 10^{-1}$ | 2.88                  | 1.59                  |
| 0.50                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 1.52                  | $9.18 \times 10^{-1}$         | $5.63 \times 10^{-1}$ | 3.54                  | 1.85                  |
| 0.55                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 2.31                  | 1.32                          | $7.65 \times 10^{-1}$ | 4.40                  | 2.18                  |
| 0.60                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 3.54                  | 1.91                          | 1.05                  | 5.55                  | 2.61                  |
| 0.65                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 5.53                  | 2.82                          | 1.47                  | 7.14                  | 3.19                  |
| 0.70                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 8.94                  | 4.30                          | 2.11                  | 9.45                  | 4.03                  |
| 0.75                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | $1.51 \times 10^1$    | 6.88                          | 3.18                  | $1.30 \times 10^1$    | 5.30                  |
| 0.80                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | $2.77 \times 10^1$    | $1.19 \times 10^1$            | 5.16                  | $1.90 \times 10^1$    | 7.41                  |
| 0.85                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | $5.72 \times 10^1$    | $2.31 \times 10^1$            | 9.43                  | $3.05 \times 10^1$    | $1.14 \times 10^1$    |
| 0.90                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | $1.49 \times 10^2$    | $5.65 \times 10^1$            | $2.16 \times 10^1$    | $5.84 \times 10^1$    | $2.10 \times 10^1$    |
| 0.95                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | $6.87 \times 10^2$    | $2.45 \times 10^2$            | $8.76 \times 10^1$    | $1.72 \times 10^2$    | $5.93 \times 10^1$    |

## 8.5 クロスタイとサイドロンジ接合部周辺

### 8.5.1 目 的

一般に突船の損傷は複雑な要因が絡みあっていて、その原因を解明することはかなり困難である。

しかし、損傷亀裂を定量的に評価でき破壊までのプロセスを追跡できる破壊力学によるアプローチは、今後最も期待できる損傷解析法であると思われる。

本節では突船損傷例のあるタンカーのクロスタイとサイドロンジ接合部についての船殻破壊強度試算を行ない、その有効性を検討する。

本計算では、特に荷重条件の違いによる亀裂伝播経路の違いと応力拡大係数の大きさ、および亀裂進展に伴う構造系の変化に注目して、解析を進める。

### 8.5.2. 計算対象構造と荷重条件

供試験は200,000 DWTタービン・タンカーで、就航後約1年目に、No.4バラストタンクのトランスリング下部クロスタイとサイドロンジの結合部に約300mmの亀裂が発見され、その損傷は補修された。

さらに、就航後約7年目にほぼ同じ個所に数箇の亀裂損傷が発見され、最も長い亀裂はサイドロンジのフランジが全断し、ウェブ部の亀裂は外板との隅肉溶接部に達していた。

損傷発生箇所・時期より判断して、クロスタイの水平方向振動が主因であり、波浪変動圧による繰返し荷重がその損傷を促進したと思われる。

振動荷重が主因であるとする裏付けの一つは、クロスタイの接水固有振動数<sup>1)</sup>が翼板動数(450 CPM)と共振していることがあげられる。

図8.5.1に示すトランスリングのクロスタイ水平スチフナーとサイドロンジ部を、クロスタイはタンク中央まで、サイドロンジはトランススペース分を取り出し、境界は対称条件とし、図8.5.2に示すようにサイドロンジはフランジ、ウェブ、外板よりなる立体板構造、クロスタイ水平スチフナーは平板モデルにモデル化した。

亀裂なしモデルの要素分割図を図8.5.3に示す。

また、損傷発生状況から判断して、荷重条件は次の二ケースを考え、荷重の大きさは基準値として次のように設定した。(図8.5.2参照)

- 1) 振動荷重 ----- クロスタイに  $1 \text{ kg/mm}$  の一様分布
- 2) 波浪荷重 ----- サイドロンジに  $10 \text{ kg/mm}$  の一様分布

### 8.5.3 亀裂進展挙動の解析

#### (1) 重ね合わせ法によるK値解析法

二次元平板の重ね合わせ法によるK値解析プログラムは実用化されており<sup>2)</sup>、その計算精度の確認もされている。

しかし、図8.5.3の立体板構造はこのプログラムでは直接解析することはできないので、一般の汎用有限要素法プログラムに上記K値解析プログラムを組み込むことにより、実用的なK値解析プログラムを作成した。

その際、亀裂を含む領域を一つのサブストラクチャーと考え、要素分割をパターン化して、亀裂進展に伴ない自動的に要素分割を行なうようにした。

また、重ね合わせ法を適用する領域は図8.5.4に示すようにした。

また、亀裂進展方向は次式の接線方向応力最大説<sup>3)</sup>により決定した。

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{3K_{II}}{K_I} \right) = \sin^{-1} \left( \frac{K_{II}}{\sqrt{K_I^2 + (3K_{II})^2}} \right) \quad (8.5.1)$$

ここに、  $K_I$  ----- 開口モードの応力拡大係数

$K_{II}$  ----- 剪断モードの応力拡大係数

$\theta$  ----- 亀裂進展方向 (図 8.5.4 参照)

## (2) 亀裂なしモデルの応力解析結果

亀裂発生点 (最大応力点) 予測と亀裂進展経路予測およびモデル全体の変形状態を見るために、図 8.5.3 の亀裂なしモデルで応力解析を行なった。図 8.5.5 に振動荷重と波浪荷重下での全体変位図を示す。

図 8.5.6 と図 8.5.7 に図 8.5.2 に示す範囲についての主応力分布図を示す。

これらの図から、最大応力点は振動荷重、波浪荷重共にクロスタイのブラケットのフランジ端 (D 点: 図 8.5.8 参照) であることが分かる。

従って、この点を亀裂発生点と仮定し、亀裂は主応力と直角方向に進展すると考えて、進展経路を予測すると図 8.5.6 と図 8.5.7 の点線のようなになる。

## (3) 亀裂進展経路

亀裂は D 点より発生し、先ずクロスタイブラケット部を進展し、サイドロンジのフランジとウェブの接合点 (E 点: 図 8.5.8 参照) に到達後は、ブラケットの隅肉にそって進展する可能性もあるが、損傷例に合わせて、亀裂はフランジ部とウェブ部に枝分かれして進展するとした。

(1) で述べたプログラムにより、亀裂進展経路を求めた結果を図 8.5.8 と図 8.5.9 に示す。

E 点以降は亀裂先端が二箇所あるので、フランジ部亀裂 A とウェブ亀裂 B (図 8.5.8 参照) の組み合わせについて計算した。

フランジ部亀裂は簡単のため直進するとした。

振動荷重、波浪荷重共にフランジ部亀裂長さによって、ウェブ亀裂進展経路はあまり左右されないことが分かる。

図 8.5.8 と図 8.5.9 には亀裂なしモデル応力解析結果による予測経路と損傷例も記入されており、振動荷重の場合は損傷例とはほぼ一致しているが、亀裂なしモデルからは経路予測はできないことが分かる。逆に、波浪荷重の場合は、損傷例とははずれているが、亀裂なしモデルによる予測経路とはほぼ一致している。

この解析結果より、亀裂進展経路の観点からは、亀裂損傷の主な原因はクロスタイの水平振動であると言える。

## (4) K 値計算結果

図 8.5.10 と図 8.5.11 に K 値計算結果を示す。これらの図中の四角印、丸印、三角印は計算値であり、実線と点線は計算点より最小自乗法により求めた次を示す多項式近似による値である。

ブラケット部 (D-E) :

$$\left. \begin{aligned} K_{VC}/P_V &= 4.979C - 0.0706C^2 \\ K_{WC}/P_W &= 2.303C - 0.0250C^2 \end{aligned} \right\} \quad (8.5.2)$$

ここに、  $K_{VC}$  ----- 振動荷重によるブラケット部 K 値 ( $\text{kg}/\text{mm}^{3/2}$ )

$K_{WC}$  ----- 波浪荷重による " ( $\text{kg}/\text{mm}^{3/2}$ )

$P_V$  ----- クロスタイに作用する振動分布荷重 ( $\text{kg}/\text{mm}$ )

$P_W$  ----- サイドロンジに作用する波浪分布荷重 ( $\text{kg}/\text{mm}$ )

$C$  ----- D 点からの亀裂長さ ( $0 < C \leq 58 \text{ mm}$ )

ウェブ部 (E-B) :

$$\left. \begin{aligned} K_{VB}/P_V &= 51.9 + 36.7\beta + 71.0\alpha + 43.9\alpha\beta - 108.6\beta^2 + 0.5\alpha^2 \\ K_{WB}/P_W &= 49.5 + 59.5\beta + 6.8\alpha + 67.6\alpha\beta + 57.9\beta^2 + 0.3\alpha^2 \end{aligned} \right\} \text{----- (8.5.3)}$$

ここに、 $K_{VB}$ ----- 振動荷重によるウェブ部K値 ( $\text{kg}/\text{mm}^{3/2}$ )

$K_{WB}$ ----- 波浪荷重による " ( " )

$\alpha (=a/H1)$ ----- フランジ部亀裂長さ/フランジ幅 (150mm)

$\beta (=b/H2)$ ----- ウェブ部亀裂長さ/ウェブ深さ (550mm)

フランジ部 (E-A) :

$$\left. \begin{aligned} K_{VA}/P_V &= 27.9 + 56.4\beta - 18.5\alpha + 112.6\alpha\beta - 46.5\beta^2 \\ K_{WA}/P_W &= 23.2 - 91.3\beta - 23.1\alpha + 285.3\alpha\beta + 34.0\beta^2 \end{aligned} \right\} \text{----- (8.5.4)}$$

ここに、 $K_{VA}$ ----- 振動荷重によるフランジ部K値 ( $\text{kg}/\text{mm}^{3/2}$ )

$K_{WA}$ ----- 波浪荷重による " ( " )

#### (5) 亀裂進展に伴う構造系の変化

本章で取り上げた、かなり大きな構造モデルによる亀裂進展解析の有利な点はK値解析のみならず、亀裂進展に伴う構造系の変位・応力の変化が追跡できることである。

本船のサイドロンジはスラッジ対策からフランジが非対称に取り付けられており、フランジとウェブの接合部にフランジの横倒れによる応力集中が生じている。振動荷重の場合について、亀裂進展に伴うフランジ横倒れ量の変化を図8.5.12に示す。

この図より、応力集中部が切断したために、亀裂進展に伴って、横倒れ量が相当に変化し、特に、フランジが全断した場合は、フランジの変位は不連続になっていることが分かる。

亀裂進展に伴う変位・応力の変化は、亀裂部より離れた位置でもかなり大きい。

図8.5.13には亀裂部とは反対側のクロスタイブラケットトウ部でのウェブでの応力の亀裂進展に伴う変化を示す。

この図より、振動荷重の場合は亀裂部側のサイドロンジの応力の減少に伴って、この部分の応力が大きくなることが分かり(損傷例あり)、波浪荷重の場合は、亀裂部のサイドロンジ固着度の低下により、曲げモーメントはサイドロンジのスパン中央で大きくなり、端部では減少することが分かる。このことは、サイドロンジスパン中央断面での応力分布の変化(図8.5.14と図8.5.15)に対応している。

#### 8.5.4 疲労亀裂伝播寿命

(8.5.2)→(8.5.4)式のK値を使って、次式のParis則による疲労亀裂長さを計算した。

$$\left. \begin{aligned} \frac{da}{dN} &= C (\Delta K_A)^m \\ \frac{db}{dN} &= C (\Delta K_B)^m \end{aligned} \right\} \text{----- (8.5.5)}$$

ここに、 $C = 1.44 \times 10^{-9}$ 、 $m = 2.5$  とした。<sup>4)</sup>

(8.5.5)式の $\Delta K_A$ 、 $\Delta K_B$ はE点以降はフランジ部亀裂長さ $a$ 、ウェブ部亀裂長さ $b$ の関数であるため、亀裂長さを求めるためには逐次積分する必要がある。

損傷例と比較するため、荷重の大きさ、繰返し数は実船相当の値を使用した。すなわち、振動荷重の場合は、バラスト状態でクロスタイは450CPMで共振しているとし、クロスタイスパン中央での変位より加速度(GAL)に変換し、他船の計測値<sup>5)</sup>より、200～300GALの振動は起こりうると考え、100～500GALに相当する荷重を設定し、繰返し数は、ローディングマニュアルより、山口(日本)→クエートのバラスト航海日数は16日であるので、一航海で $1.0368 \times 10^7$ 回とし、一年で9航海するとした。

また、波浪荷重はNK規則により、水線附近の波浪変動圧を計算し、 $Q=10^{-6}$ に相当する極値を求め、繰返し数は一航海  $1.73 \times 10^5$  回とし、頻度分布は片対数直線と仮定して、漸減型で計算した。

損傷例と振動荷重の場合の計算結果を図8.5.16に示す。

この図から、100~200 GALの振動によって、損傷亀裂長さに達することが分かる。

また、波浪荷重に対する計算結果は、腐食雰囲気にあることから、Cの値を3倍にして計算しても、亀裂は殆んど進展しなかった。

しかし、波浪荷重によるK値は、亀裂が長くなると大きくなるので、ある程度亀裂が長くなった場合には波浪荷重による寄与分は大きくなると思われる。

次に、疲労によって長くなった亀裂より破壊が起こり得る可能性があるかどうかを検討してみる。

振動荷重の場合はウェブの亀裂のK値は低下し、クロスタイの固有振動数も若干減少する。

しかし、振動荷重で亀裂が進展し（波浪荷重ではK値は亀裂進展に伴って増加する）、波浪荷重によって更に進展が促進され、最大荷重時に脆性破壊発生の可能性があると思われる。この場合は、最大荷重は図8.5.1に示すように、バラストがタンクトップまであり、波浪圧力が0の場合で、18.59 m水深相当である。S R 153<sup>4)</sup>の研究より、 $K_c = 600 \text{ kg}/\text{cm}^{3/2}$ とすると、亀裂限界長さは855 mmとなる。

### 8.5.5 ま と め

突船の局部構造の船殻破壊強度試計算を行ない次のことが分かった。

- 1) クロスタイとサイドロジ結合部の亀裂損傷は、亀裂進展経路と亀裂伝播寿命計算より、クロスタイの水平振動が主な原因であることが説明できた。
- 2) 解析解との重ね合わせ法によるプログラムでK値解析を行ない、接線方向応力最大説により、亀裂進展過程を追跡し、振動荷重と波浪荷重下でのK値近似式を作成した。
- 3) 亀裂進展に伴う構造系の変化は荷重条件によってかなり差があり、その様子を明らかにした。

### 参考文献

- 1) 越智義夫外, "タンク内大骨の振動計測と防振設計 — 第2報 防振設計 —", 石川島播磨技報, Vol. No 3, 1975.5
- 2) 松田直明, "2次元クラックのK値解析プログラム", 石川島播磨技報, Vol. 17 No 6, 1977.11
- 3) F. Erdogan & G. C. Sih, "On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear", Trans. ASME, J. Basic Eng., 85D, 1963
- 4) 日本造船研究協会第153部会, "厚鋼板大入熱溶接継手の脆性破壊強度および疲労強度に関する研究", 日本造船研究協会研究資料 No 267-2, 昭和52年3月
- 5) IHI船体振動検討会, "船体振動マニュアル", 社内資料, 1977.4

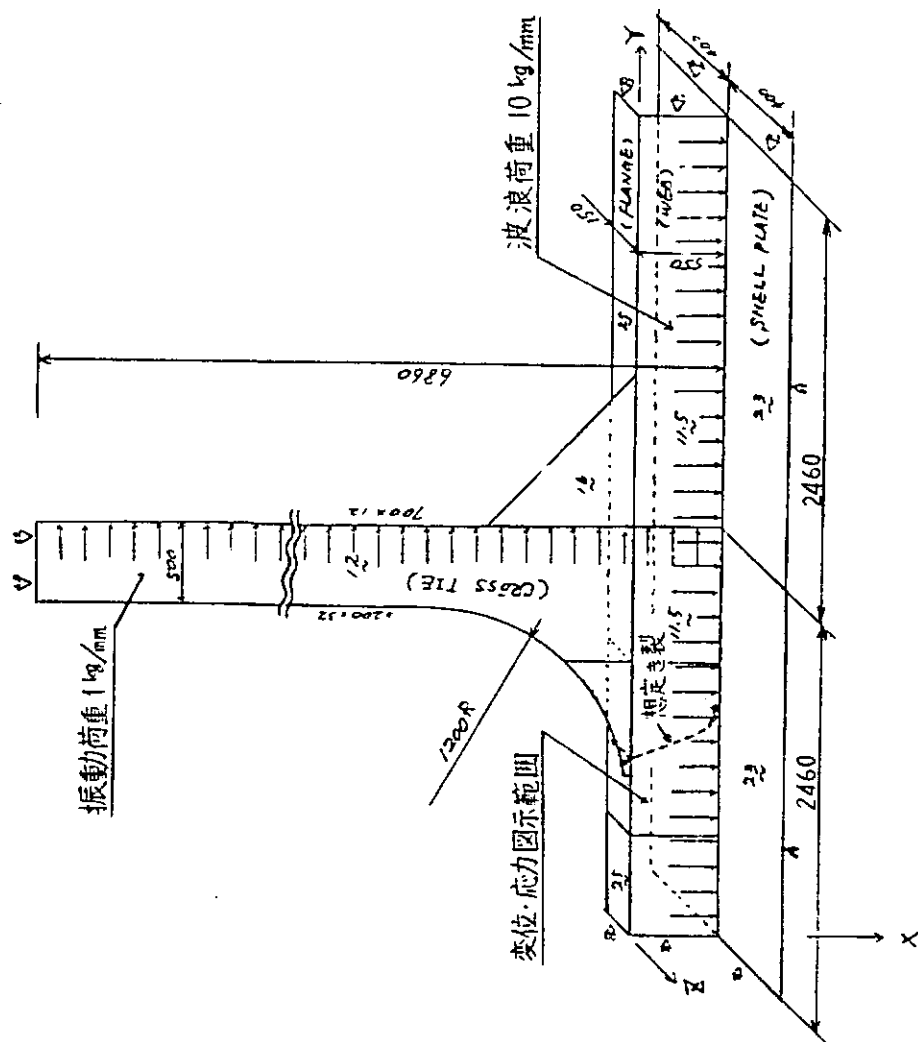


図8.5.2 クロスサイードロンジ結合部計算モデル

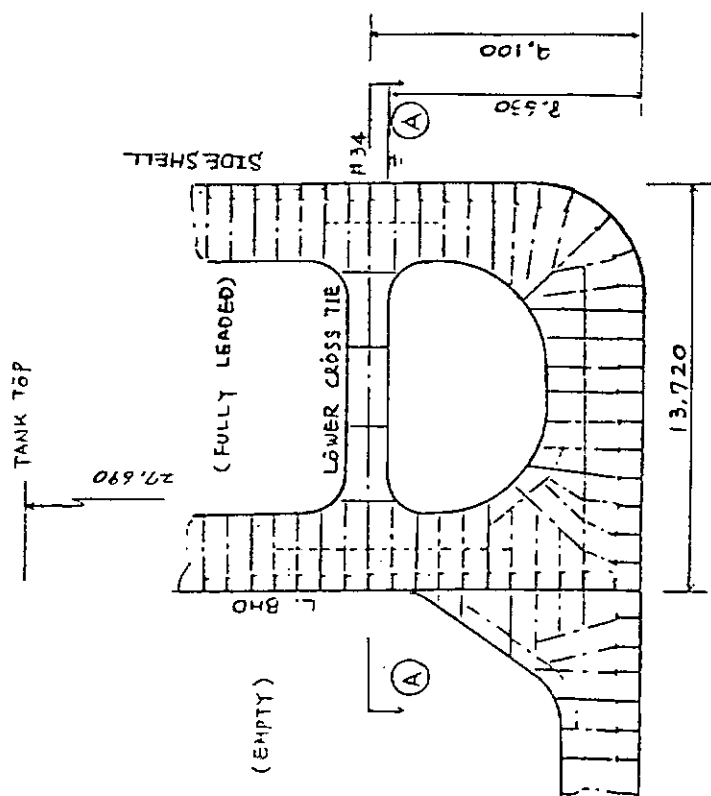


図8.5.1 計算対象箇所 (A-A断面)

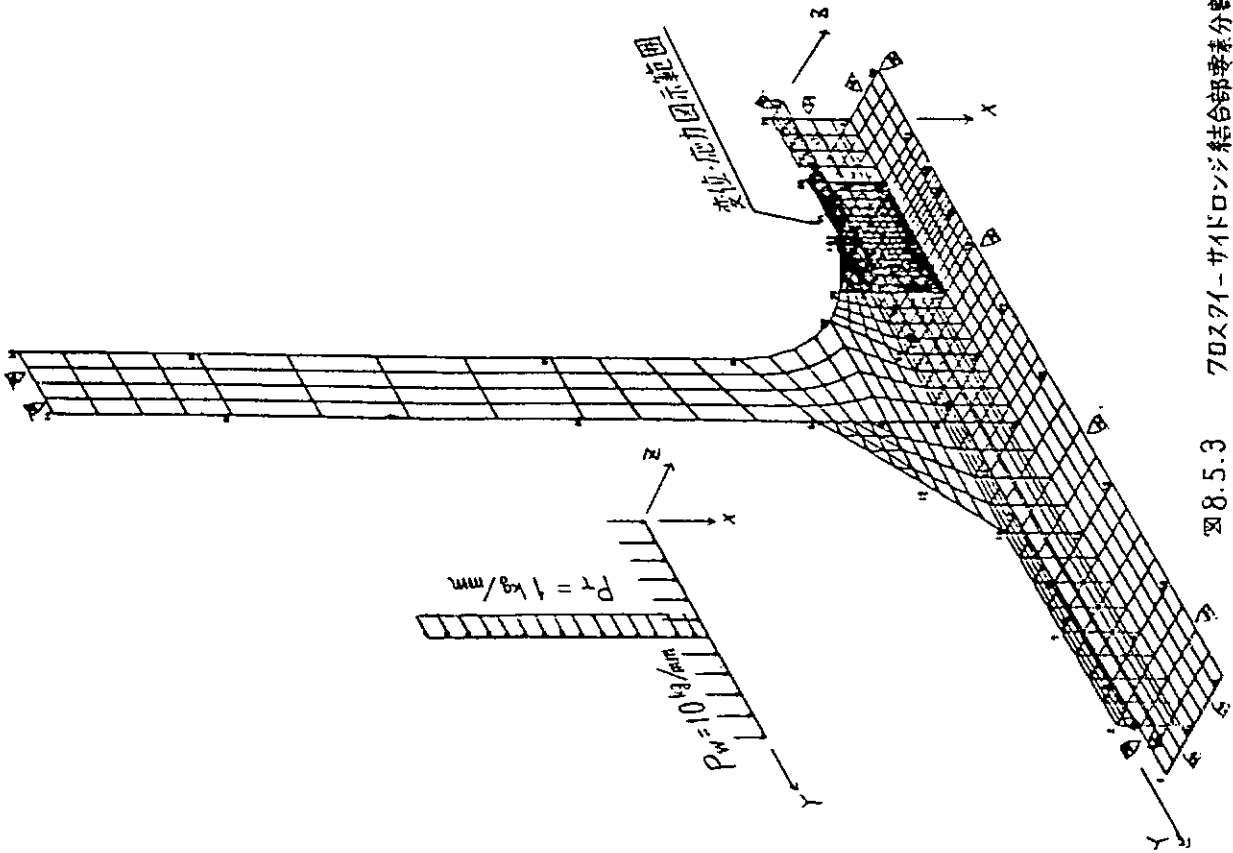


図8.5.3 フロスライ-サイドロンジ結合部要素分割  
(亀裂なし)

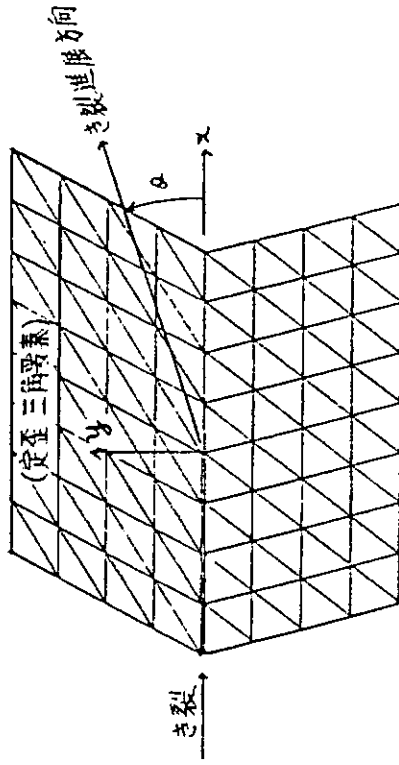


図8.5.4 重ね合わせ法を適用する小領域要素分割パターン

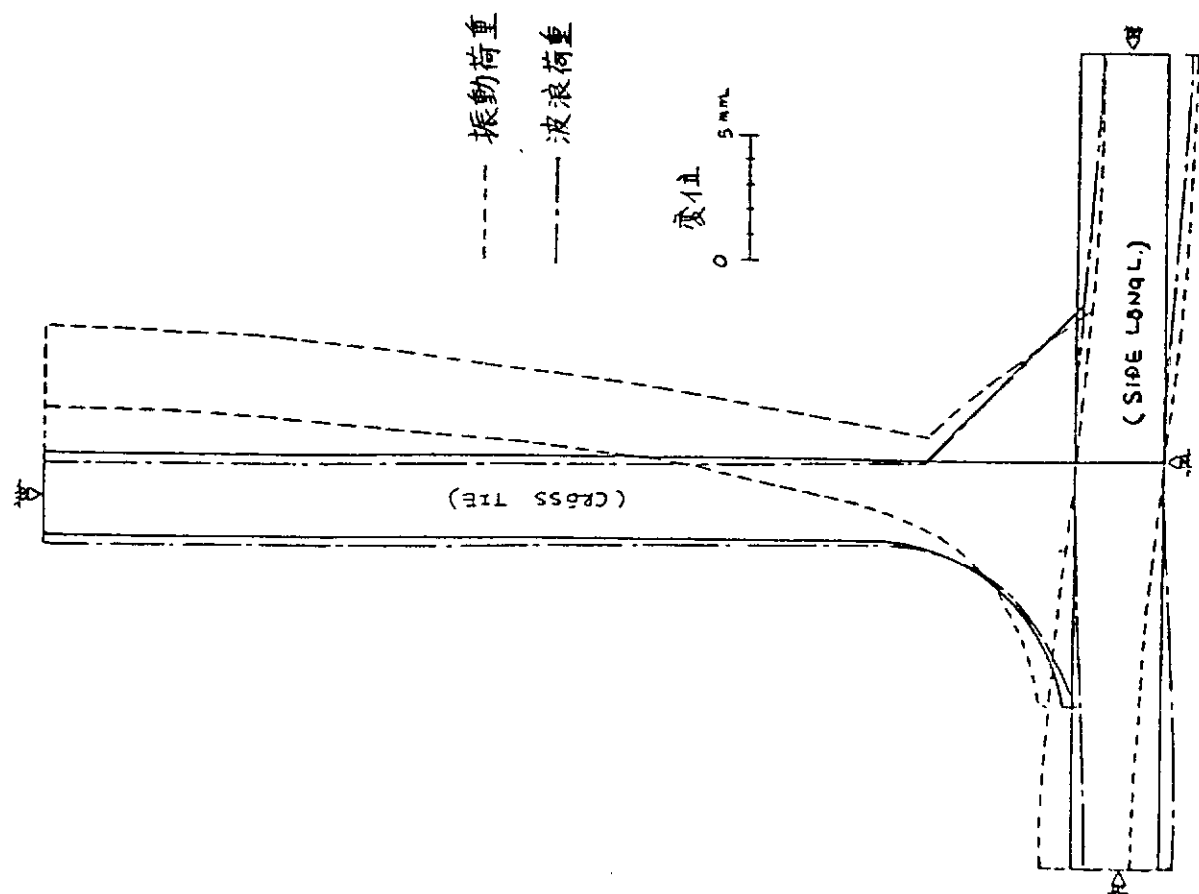


図 8.5.5 電裂なしモデルの全体変位図

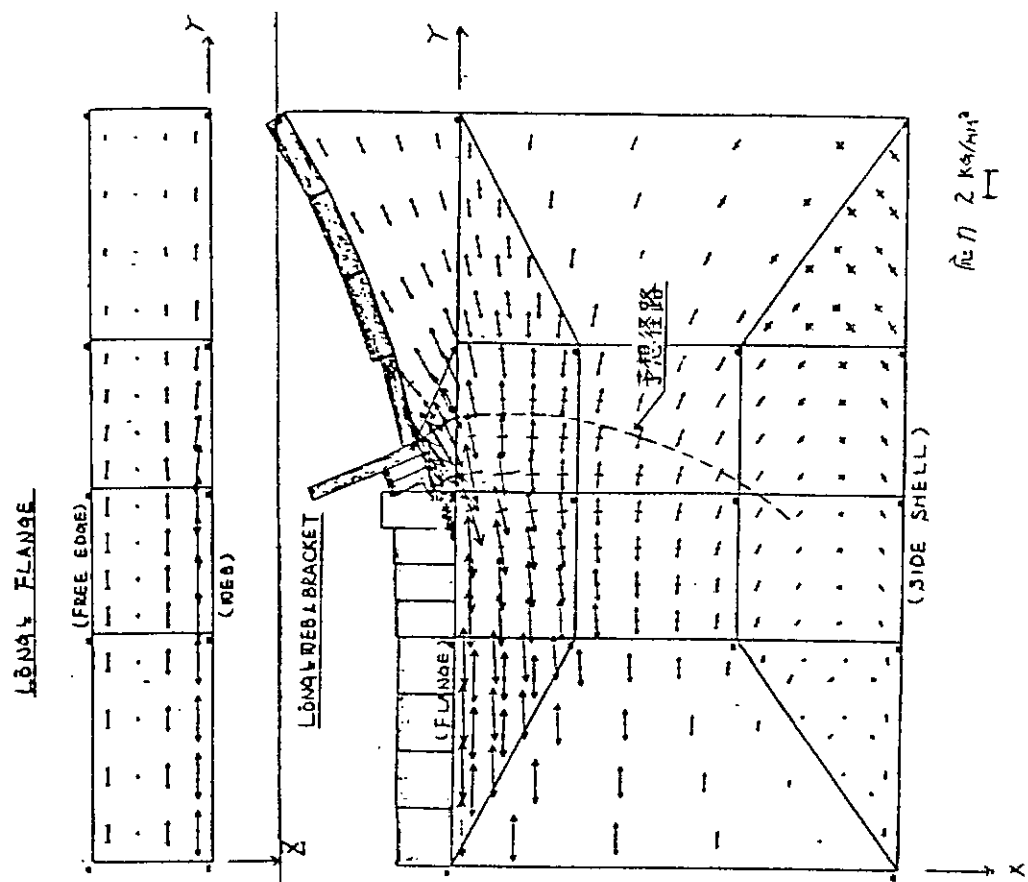


図 8.5.6 電裂なしモデルの主応力図 (振動荷重)



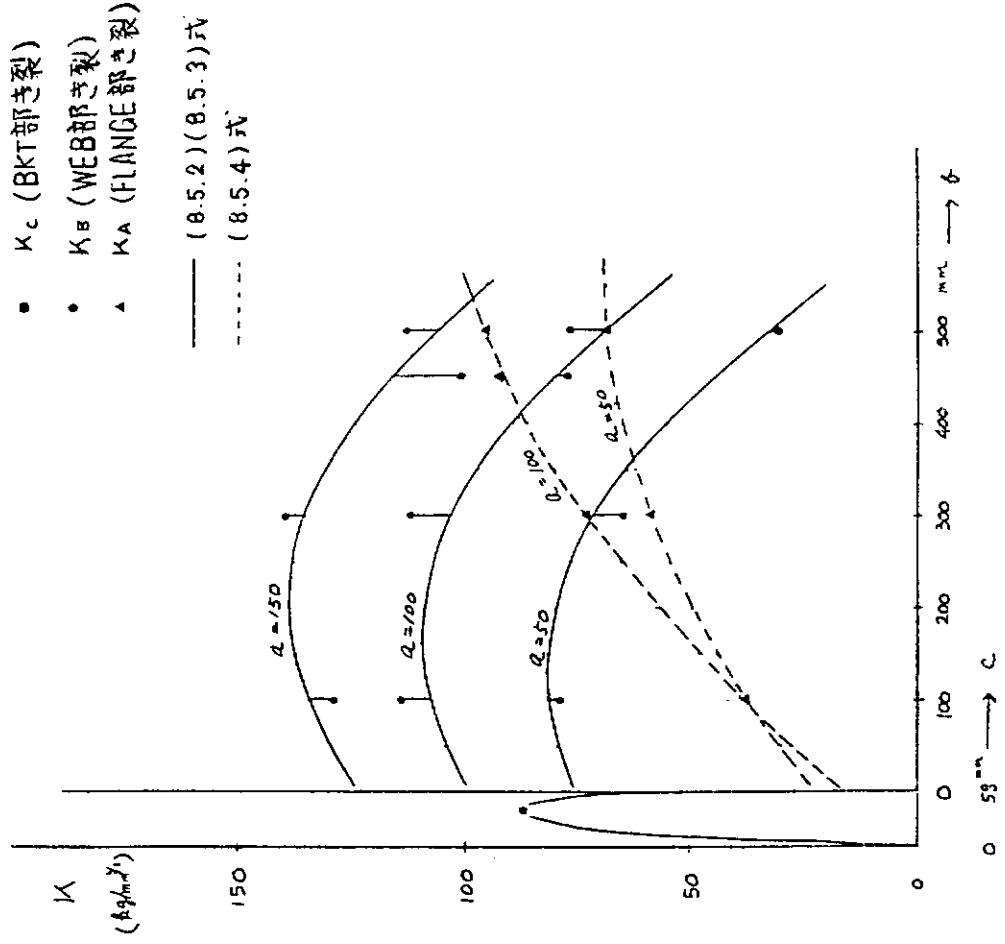


図 8.5.10 K値計算結果 (振動荷重)

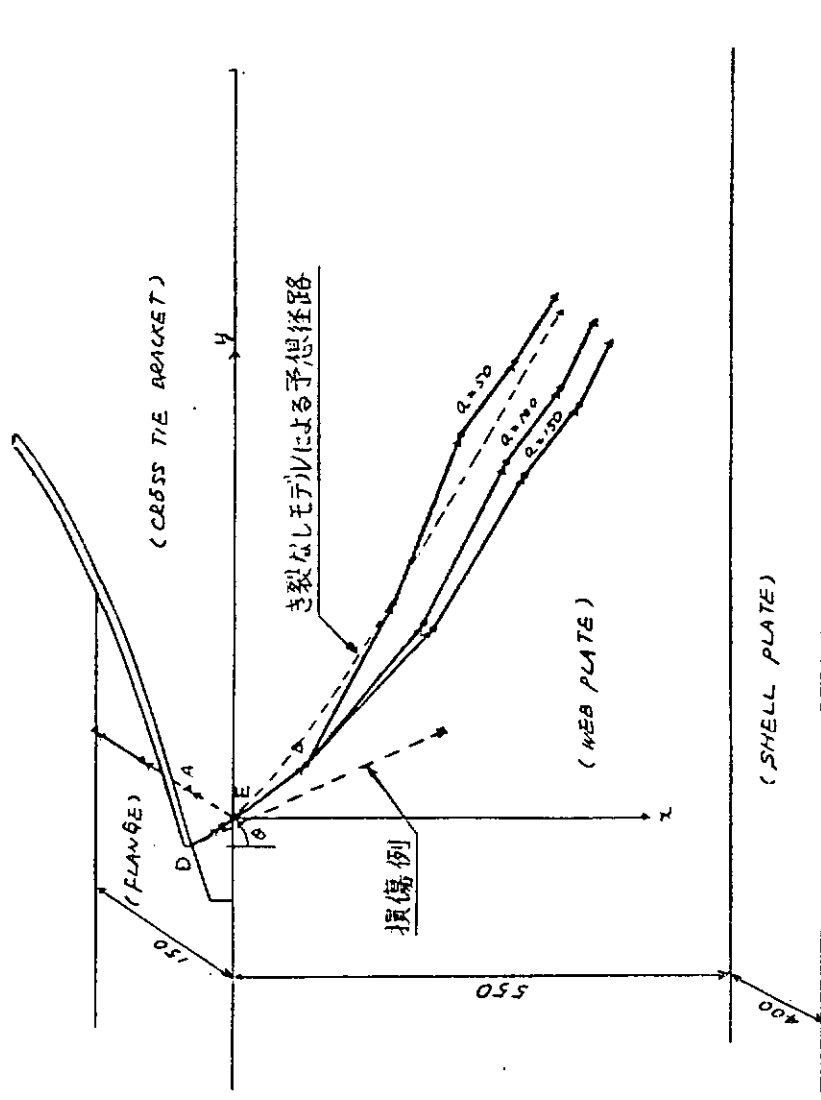


図 8.5.9 亀裂進展経路 (波長荷重)

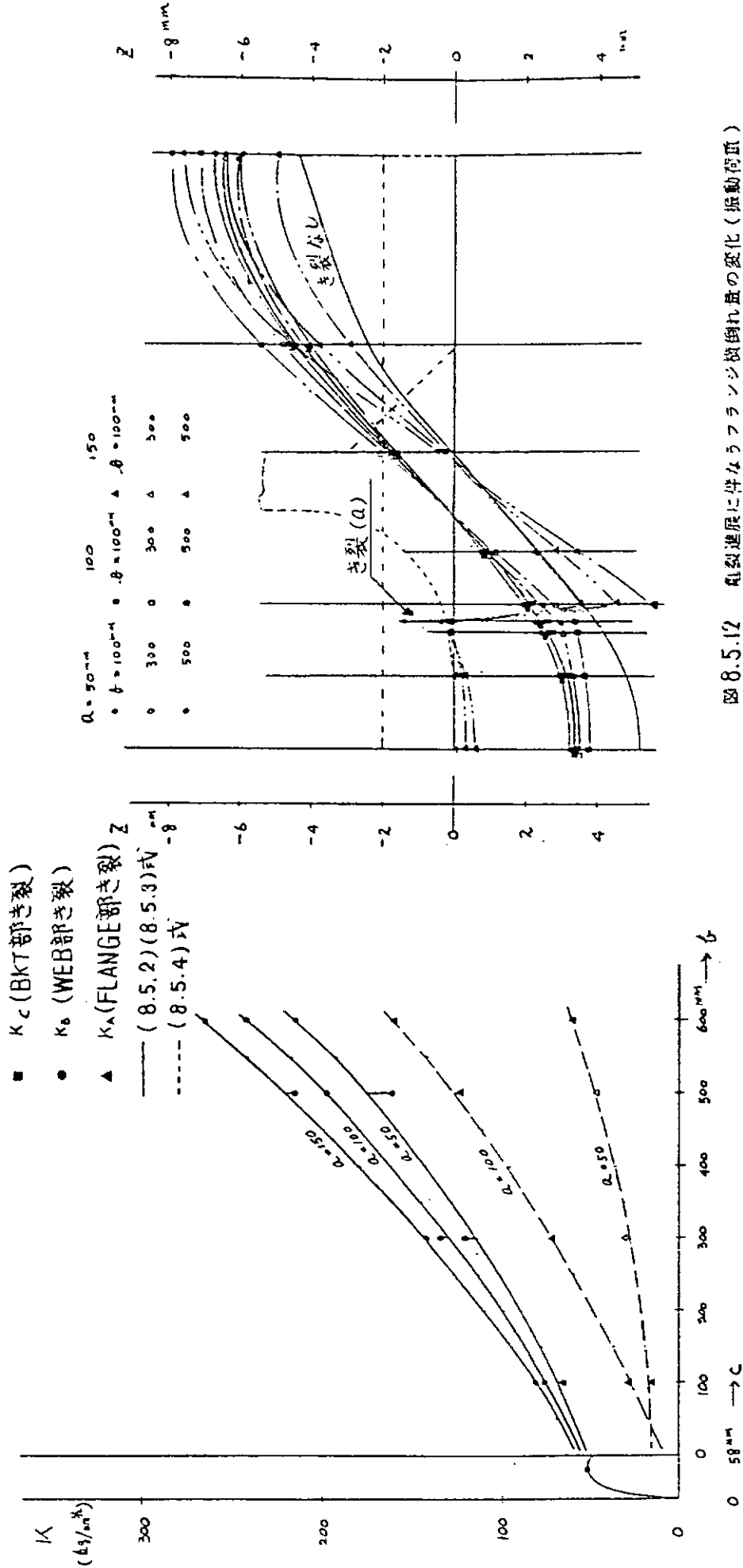


図 8.5.11 K 値計算結果 (波高荷重)

図 8.5.12 亀裂進展に伴なうフランジ倒れ量の変化 (振動荷重)

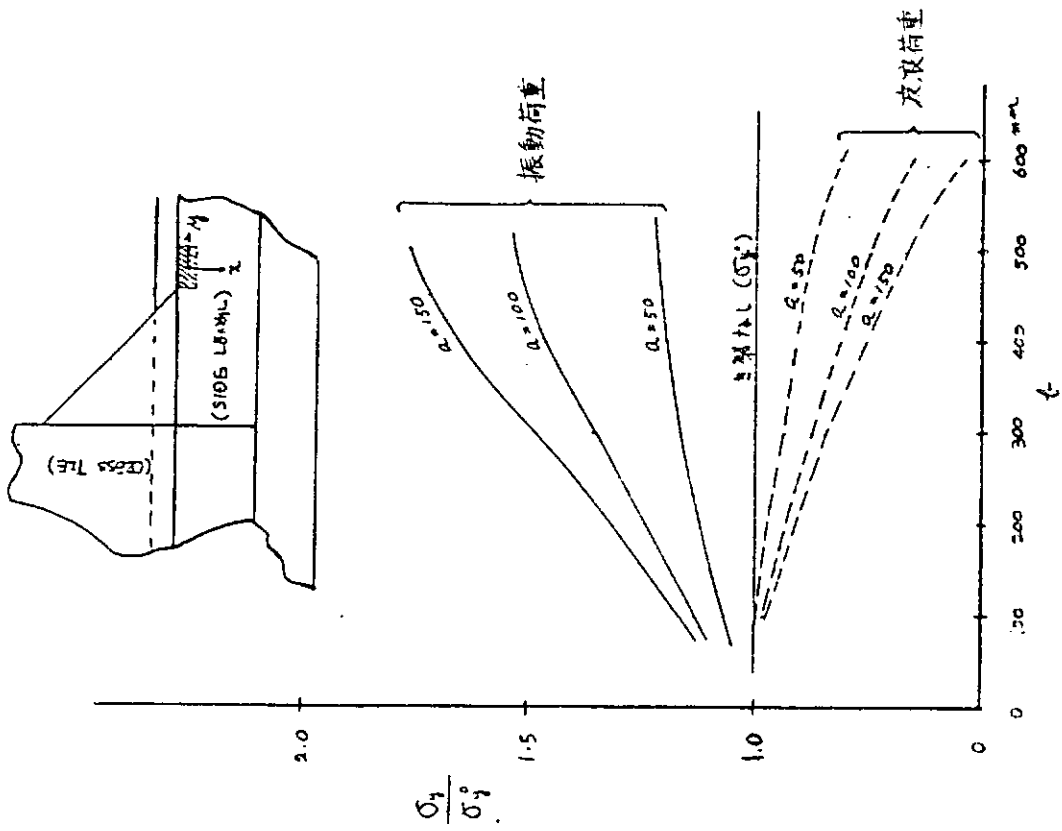


図 8.5.13 亀裂進展に伴う応力変化

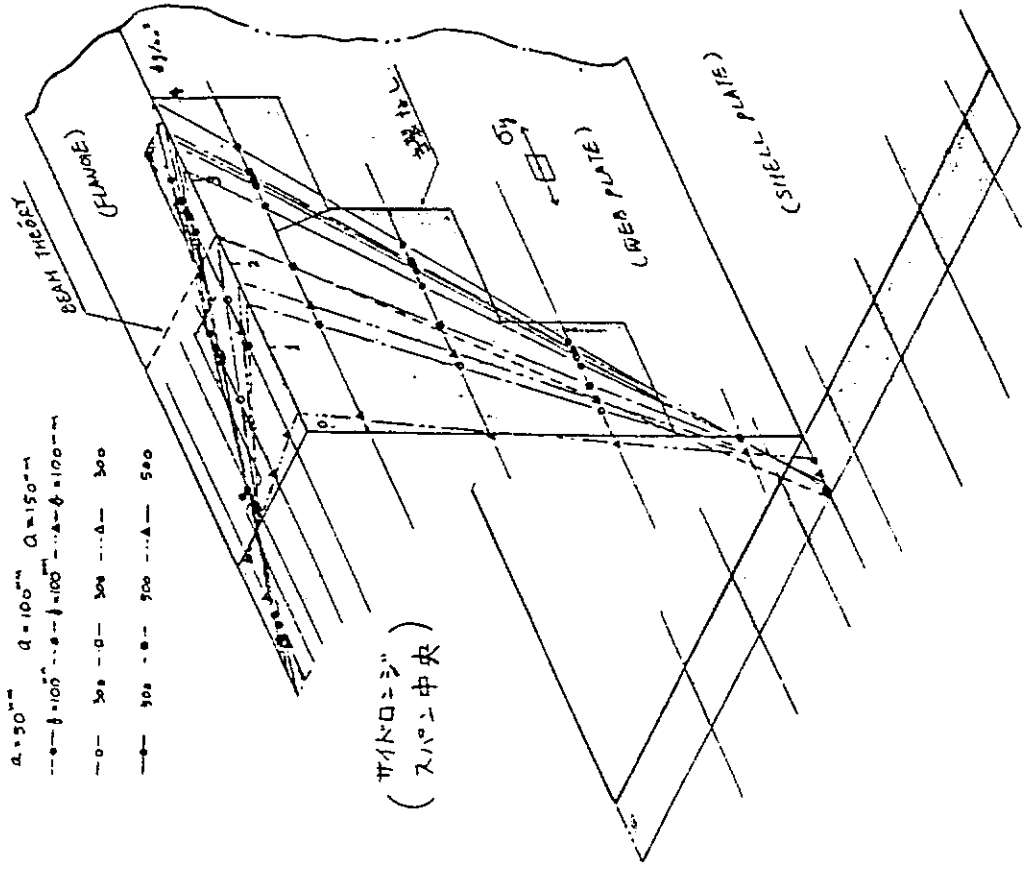


図 8.5.14 亀裂進展に伴うサイトロニジの応力分布の変化 (振動荷重)

