

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
—船殻破壊強度設計に関する調査—

昭和52年3月

社団法人
日本造船研究協会

は し が き

本報告書は、日本船舶振興会の昭和51年度補助事業「巨大タンカーの研究」の一部として、日本造船研究協会が
153 研究部会船殻破壊強度検討小委員会においてとりまとめたものである。

第 153 研究部会船殻破壊強度検討小委員会委員名簿（敬称略 順不同）

部 会 長	金 沢 武 (東 京 大 学)	
主 査	片 坐 泰 治 (日 立 造 船)	
委 員	池 田 一 夫 (神 戸 製 鋼)	恵 美 洋 彦 (日本海事協会)
	川 原 正 言 (日 本 鋼 管)	酒 戸 恒 男 (住友重機械工業)
	堺 由 輝 (川 崎 重 工 業)	佐 藤 邦 彦 (大 阪 大 学)
	豊 貞 雅 宏 (日 立 造 船)	秦 数 実 (日 本 鋼 管)
	原 田 耕 次 (日 立 造 船)	町 田 進 (東 京 大 学)
	松 本 宏 之 (石 川 島 播 磨 重 工 業)	三 村 宏 (新 日 本 製 鉄)
	矢 島 浩 (三 菱 重 工 業)	吉 譲 恒 夫 (三 井 造 船)
	渡 辺 昌 建 (三 菱 重 工 業)	
討議参加者	青 木 満 (神 戸 製 鋼)	伊 藤 隆 規 (日 立 造 船)
	井 上 克 明 (日 本 鋼 管)	今 井 純 一 郎 (三 菱 重 工)
	岩 崎 紀 夫 (日 本 鋼 管)	海 野 誠 (川 崎 重 工)
	片 岡 繁 夫 (長 崎 大 学)	金 井 良 助 (三 菱 重 工)
	金 綱 正 夫 (三 井 造 船)	鴨 井 紀 之 (川 崎 重 工)
	川 野 始 (三 菱 重 工 業)	佐 藤 博 一 (日 本 鋼 管)
	白 倉 貴 雄 (神 戸 製 鋼)	多々 良 敏 行 (住友重機械)
	萩 原 行 人 (新 日 本 製 鉄)	日 野 隆 雄 (三 菱 重 工)
	東 村 正 義 (日 立 造 船)	二 見 吉 雄 (住友重機械)
	宮 成 泰 麗 (石 川 島 播 磨 重 工 業)	村 田 征 一 (日 立 造 船)

目 次

1. 本委員会の経緯と目的	1
2. 船殻破壊強度設計のフローチャート	4
3. 船体構造要素の分類	7
4. Case Study	37
4.1 Case Study の目的	37
4.2 デッキロンジ部の Case Study	37
4.3 ブラケット先端部の Case Study	53
4.4 Case Study を通じての問題点	65
5. 今後の課題	68

1. 委員会の経緯と目的

最近における船体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実船の船殻構造の設計に際して各種の Strength Criteria に対応した安全性が論議されようとしている。

この Strength Criteria を考えるにあたり、まず実船の損傷例に着目すると船体構造部材におけるクラックの発生例は損傷事故件数の約半数を占め、その対策は設計時に考慮しておかねばならない重要な検討項目である。また、クラックの中には大損傷に結びつくと想像されるもの、クラックが発生して年月を経て進行しているにかかわらずそれほど進行していないものなど種々のものが存在し、これらクラッチ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、従来の船体構造の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。これに対し、近時急速に発展しつつある破壊力学 (Fracture Mechanics) の理論は本来内在する諸欠陥からのクラックが発生し、伝播していく過程を追跡して、ある大きさに成長したクラックがカタストロフィックな破壊としての脆性破壊に結びつかず否かまで究明していく、いわば疲労と脆性の両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や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。

このような思想に立脚した破壊力学の概念は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設計に適用していくことが開かれていることは世界的な通念となりつつあり、IMO が1975年、人の生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 Liquified Gasses in Bulk"

においても疲労および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。

しかし、船体構造は立体的な防撃構造よりも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に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 を確立していくにはまだ未解決の問題が多い。したがって上記 Code でも実際の安全性判定の手法は記載しておらず、LNG タンクの設計分野では応力系の単純な球形タンクで貫通亀裂が相当進展した後の安全性を論ずる Leak Before Failure Concept 程度に過ぎず、破壊力学の実船への適用は今後の研究課題となっている。

一方 SR 153 研究部会は昭和 49 年度より 3ヶ年計画で実施され、DW 100 万トンといった巨大タンカーの船体外殻材に使用が予想される厚板の一般船体用軟鋼 (40mm 程度) および船体用 50 キロ級高張力鋼 (35mm 程度) に大入熱溶接を行なったとき、その溶接継手の破壊非性および疲労特性を把握して巨大船建造時の基礎資料を得るという方針で研究が進められていた。その後昭和 50 年度から SR 153 の下部組織として " 大型構造モデル検討小委員会 (主査 池田一夫) " が設けられ、破壊力学を実際の構造物に適用するための研究が企画され、問題点や今後の研究の方向に対する種々の討議が行なわれた。途中造船不況による SR 153 自体の存続も論議され、一時研究中止の時期もあったが、その時点においては今後の研究方針として次のようなことが確認されていた。

- I) 脆性破壊あるいは破壊力学を実船の設計に適用して行く場合の問題点の整理と設計者のニードに応じた研究の促進
- II) 構造模型による実船設計適用へのアプローチ

これらの方針のもと各委員、特に設計関係者の意見・要望が聴取された。その主なものを例挙すると

- I) 既研究成果の整理と設計担当者の有効利用のためのまとめ
- II) 総合的な設計手順のフローチャートの作成と設計適用時に必要な諸問題の整理
- III) 実船の設計に即応する問題点の把握とニードに応じた研究の推進

などである。

次いで SR 153 第 6 回幹事会（昭 50.10）では昭和 51 年度の研究方針として、当初の巨大タンカー対象の研究から破壊力学の設計への適用に最重点をおいた研究に移行することが確認され、これに応じて

大型構造モデル検討小委員会…………発展的に解散させる

船殻破壊強度検討小委員会…………新しく発足させる

といった運びとなり、船殻設計担当者と破壊力学研究者の両者でもって構成することになった。

この新しい小委員会は SR 153 SF 小委員会（Ship Design Based on Fracture Mechanics）と略称し、初期においては今後の検討方針に関連して

- I) Leak Before Failure Concept のようにある想定するクラックが一定期間内に伝播した後の安全性を論ずるといった実用面を重視した検討を行なう。
 - II) 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、停止などを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、問題点を収集してみる。
- などが論議されたが、一応 II) 案による方法で実施してみることが決定された。さらに基本方針として
- I) SF 小委員会のような会合に SR 153（昭和 51 年度で終了予定）以降も何等かの形で必要な時点まで存続するといった長期的観点に立って研究の企画、立案を行なう。
 - II) 初期に計画した研究項目は研究の進捗と必要性に応じ適宜変更できるといったフレキシブルな考え方で臨む。
 - III) SF 小委員会の発足初期においては多少勉強会的な性格をもたせ、船殻設計担当者と破壊力学研究者の相互啓蒙を行なう。

などをベースに当面の討議項目を次のようにしておくことが確認された。

(1) 破壊力学の設計手法・理念の確立に関する調査

(a) 設計手法に関するフローチャートの試作

船殻構造に対する統計的外力・応力の把握から破壊力学による安全性の検討、安全率の決定に至る一連の解析や設計フローを考える。このとき対象とする船殻構造は構造要素と応力系に分類し、それぞれに対して考察する。

○構造要素と応力系の分類

○設計手法のフローチャート

(b) 破壊力学の船殻構造設計への適用に関する諸調査

設計から建造までを総括する総合的な調査系統図の作成と関連する規格、基準の調査などを行なう。

○設計、建造各分野にわたる関連図表の作成

○各種設計、建造規格などのまとめ

○材質規格・使用区分などのまとめ

(2) 破壊力学設計の実用化に至る諸問題・今後の研究方針のまとめ

(a) 既研究成果の整理

設計担当者の利用の仕易さに重点をおいたまとめ

○疲労 — 発生、伝播、停止

○脆性 — 発生、伝播、停止

(b) 実用化に関連する諸問題・今後の研究方針のまとめ

一般的な問題提起と同時に下記(3)項の Case Study を通じ、問題点解明の緩急度のランク付けを行なう。

(○問題点の把握と整理)

(3) Case Study

(1)で求めた構造要素の代表例について、破壊力学理論による安全性確認を行ない、定量的な解析を通じて実船適用時の諸問題の抽出を行なう。またでき得れば従来方式による設計ないしは他の Criteria との比較も行ない、Fracture Mechanics Criteria が必要な部材の指摘あるいはその理念の確証を意図する。

○ Case Study

○他 Criteria との比較

以上のような問題点の抽出とその解明を行ない、破壊力学を実船に適用して行くとき、実際には

応力の評価 …… 設計基準

欠陥の評価 …… 材料および施工基準、検査および補修基準

といった設計から現場施工、保守点検に至る耐破壊安全管理といったトータルシステムとして活用される。しかし、当 SF 小委員会ではこのうちの設計分野からの検討をするものとし、破壊力学を船殻構造の Strength Criteria とするときの諸問題の抽出、すなわち上記の Case Study を最重点項目とし、できうれば今後の研究の方向なども見出すことを目標とした。その結果 1 年という限られた期間ではあったが、上記のうちの数項目についての検討を行なったので次下に報告する次第である。

なお、種々の因子の不確実性に起因して、いわゆる信頼性工学的手法を取り入れた確率論的破壊力学も考えられるが、これらは将来の検討事項として、当面は現在すでに得られている知識を最大限に活用し、大胆な単純化による破壊力学の導入を試みるものとする。

2. 船殻破壊強度設計のフローチャート

破壊強度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望まれる。

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。

これら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は事実である。しかしながら、船殻の破壊強度設計を総合的に機能させるためのフローチャートの一試案として、図2.1が考えられる。このフローチャートは、将来の設計内容の流れに対するビジョン的なものであるが、亀裂の存在を想定し、その進展に重点をおいたものである。

例えば、今年度 Case Study として実施した内容は、図2.1中の破線枠内的一部分に相当するに過ぎない。すなわち、外力（境界力）と材料特性値（疲労強度特性、脆性破壊強度特性）が与えられたとして、それ以後の破壊力学的検討を試みたわけである。

さらに、図2.1中の破線枠内を内容的に具体化したものが図2.2である。

図2.2では、先づ一般的に考えられる手順を“1.基準となる手順”として示した。また、個別的な設計理念に従う場合の一例として、特にLNGタンクに於ける Leak Before Failure の考え方を“2.板厚非貫通、表面亀裂の板厚貫通までの過程”として示した。

図2.2のフローチャートに示されているように、破壊力学的検討に際しては、疲労破壊と脆性破壊は同一のフローの中に組み込まれるべきものである。例えば、脆性破壊発生強度は、疲労亀裂の限界長さを設定するための重要な判断資料として提供されるわけである。

しかしながら、脆性破壊の伝播および伝播・停止に関する工学的判断基準は、十分に実績を蓄えているとは言い難く、しかも影響因子もかなり複雑である。したがって、Leak Before Failure の如く、個別的・選択的設計理念の具体化に際して、有効に組み込むことは今後の問題であろう。

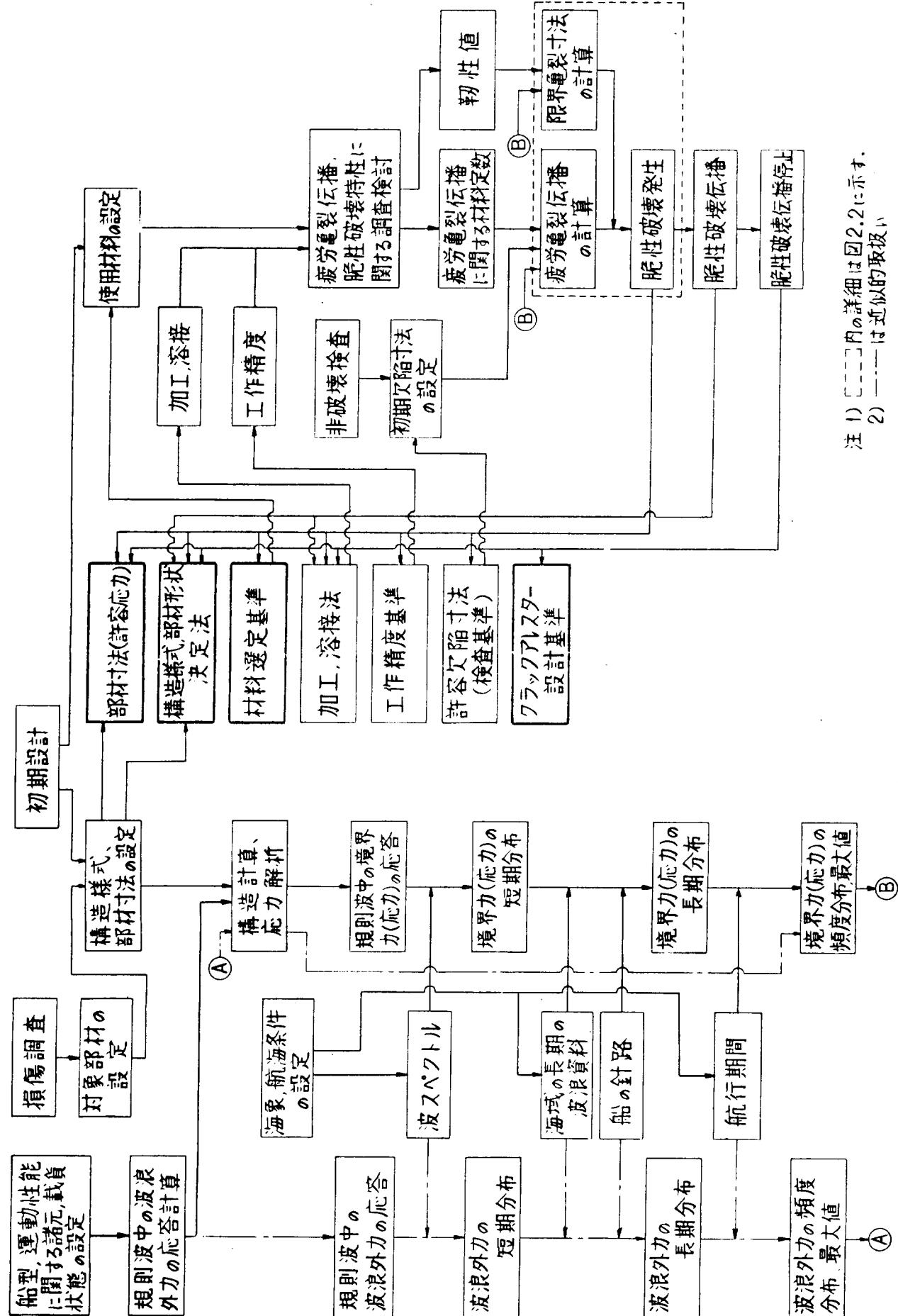
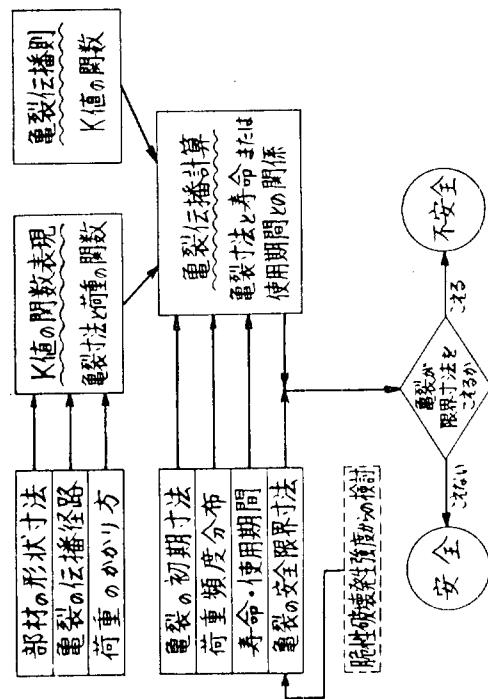


図2.1 耐候性試験機の構造

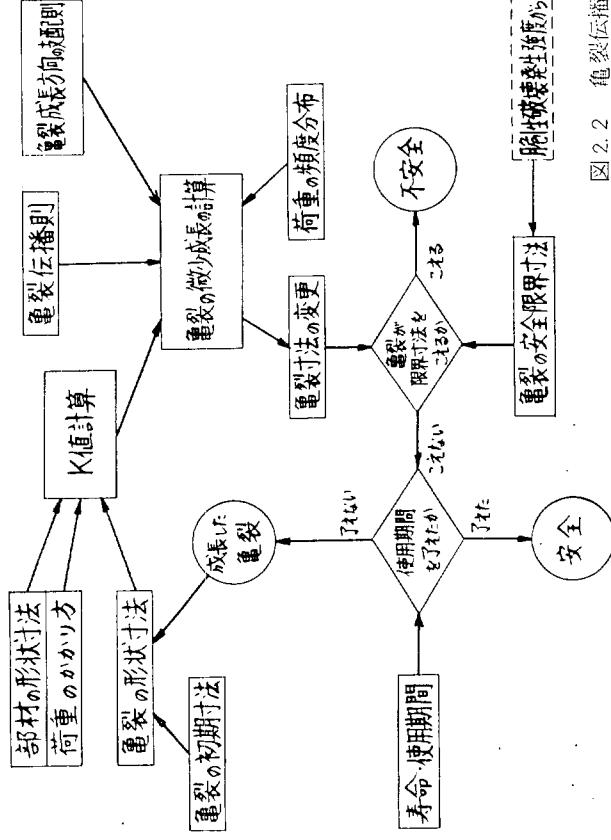
注 1) 「ニニコ内」の詳細は図2.2に示す。
2) ——は近似的取扱い

1. 基準となる手順

(1) 亜裂の伝播経路が既知の場合

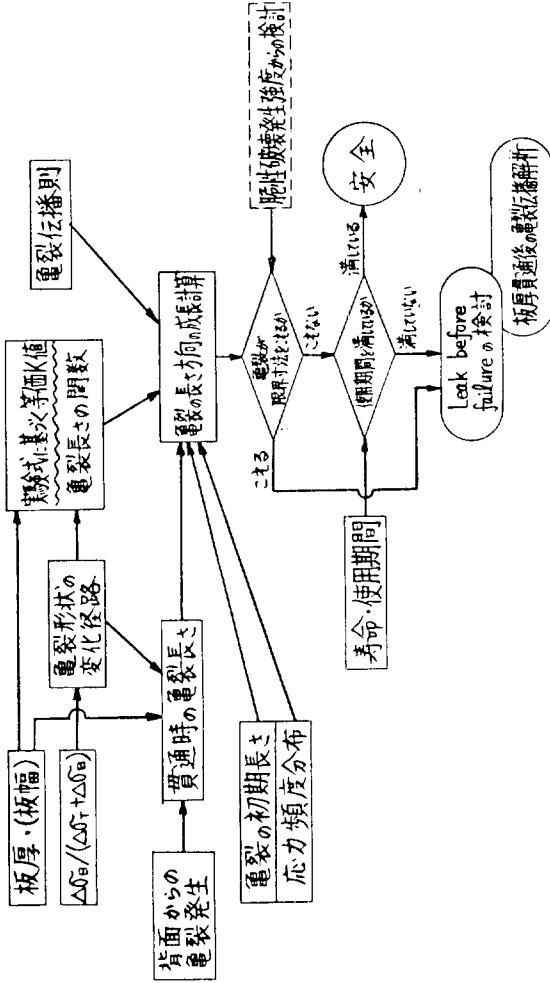


(2) 亜裂の伝播経路、成長過程が未知の場合



2. 板厚非貫通、表面亜裂の板厚貫通までの過程

(1) 均衡成長の場合 [実験式に基づく簡易解析法]



(2) 精度のないK値計算結果が得られている場合

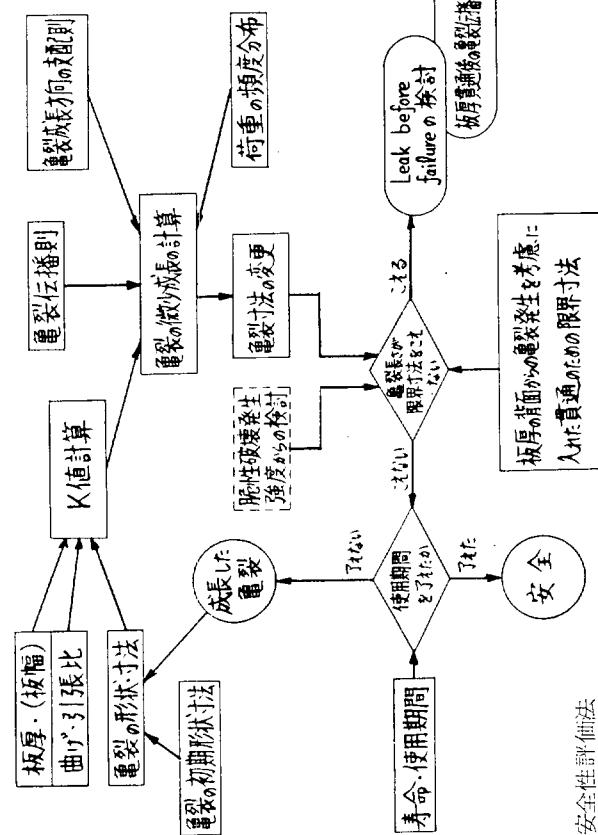


図 2.2 亜裂伝播寿命に基づく安全性評価手法

3. 船体構造要素の分類

船体構造に破壊力学の理論を適用して行くためには、構造系の整理をしておくことが望ましい。ここではこの構造要素分類について考えてみる。

船体は溶接によって組立てられる複雑な防撓板構造であり、しかもランダムに作用する外力系を特徴としているので破壊力学をすぐさま設計に利用して行くには非常な困難を伴ない、一見不可能に近いように見える。しかし、このような船体構造も詳細に検討してみれば類似要素が多く集積した構造体とみることができ、これを分類整理しておけば破壊力学設計の際に数種のパターンに対応する取扱いのみで充分目的が達成できると考えられる。そこでここでは二、三の船種についての船体構造要素を

- i) 破壊力学解析を船体の構造設計に適用して行くことを前提とした構造要素
 - ii) 実船の損傷例にみられる破壊様式と構造の関連
- といった2つの面に着目して分類を試みることにする。

3.1 破壊力学設計を前提とした分類

破壊力学の船体構造設計への適用（破壊力学設計と呼ぶことにする）の観点よりある特定のパターンに分類する場合、疲労と脆性の2つの分類でそれぞれ発生、伝播、停止の3特性に対応させるとすれば会計6種類の構造要素分類を考えねばならない。しかし、現在の破壊力学設計の具体的方法も確立されておらず、今それぞれの特性に対応して分類したとしてもいたずらに問題を複雑にするのみで、そのメリットもあまり期待し難い。したがって今後必要な場合にはその必要性に応じた分類を考えることとし、現時点では次のような簡略的な方法で整理してみるととする。すなわち対象とする構造パターンを

- A：疲労亀裂発生対象
- B：疲労亀裂伝播対象 ≒ 脆性亀裂発生対象
- C：疲労亀裂停止対象 ≒ 脆性亀裂伝播対象
- D：脆性亀裂停止対象

の4段階で区分するものとし、それぞれAはBの一部、BはCの一部といったような一連のトリー構造であるものとし、それぞれのパターンを

- A：基本要素
- B：部材要素
- C：構造要素
- D：部分構造

として大胆に構造分類を行なう。

このとき、諸特性の意義や検討範囲については次のように考える。まず「疲労亀裂の発生」は構造部材における検出可能な亀裂発生を意味するが、実際の構造物ではその検出法にも問題があり、種々論議されるところである。そこでここでは特に指定がない限り、10mm程度の長さをもつ亀裂形成をもって疲労の発生と考えることとする。また「脆性破壊の発生」は亀裂が急速に不安定成長を開始する時点である。「疲労ならびに脆性破壊における伝播」を取り扱う場合には亀裂の伝播速度、伝播径路、複数個の亀裂の相互干渉など、亀裂の伝播成長過程における諸現象、諸特性の検討を対象とするが、これらの構造単位は問題とする伝播の進行中において境界条件に影響が現れない範囲の充分な大きさのものを考えておく必要がある。また「疲労ならびに脆性破壊における停止」では亀裂の成長が停止する条件、亀裂の成長を阻止するための構造上または材質上の諸方策などの検討が含まれるものと考える。

以上のような方針のもとでオイルタンカー、バルクキャリアーおよびコンテナ船の3船種についての分類を行なったが、これを表3.1～表3.3に示す。部分構造についてはまず船体を大きな構造単位、すなわち船倉構造（あるいは荷油槽構造）、機関室構造、船首部構造および船尾部構造に区分し、さらにそれらを二重底構造、船側構造、

甲板室構造などに区分けしてその一部をパターン D に相当する部分構造と考えた。構造要素は亀裂の伝播、停止を検討する場合の必要最小構造単位として部分構造を細分し、表には境界力と内部応力を定性的な表現で図示した。また部材要素は構造物としての破壊を考える際の最小構造単位として求め、表には単位部材の応力状態が判るようにしてある。なおオイルタンカー、バルクキャリアーおよびコンテナ船の中央横断面、バルクヘッド構造等の簡単な図を参考のために図 3.1～図 3.3 に示しておく。

疲労亀裂の発生については全く局所的なものであり、船体構造は、溶接構造物であるので溶接接合部からの発生が最も一般的であり、素材の中での発生は開孔周辺がその主なものである。従って疲労の発生に対応する基本的な構造要素として表 3.1～表 3.3 の部材要素に共通なものとして、12種類の基本要素を抽出し、これを表 3.4 に示した。この要素に作用する外力には軸力 N、剪断力 F、モーメント M などがあるが、これらは単独あるいは重複した形で、基本要素に作用する。ここではこれを抽象的な表現で表 3.4 に記入した。

以上、船体構造を破壊力学設計の観点から大胆に分類してみたのであるが、この分類を逆に上記の 6 特性に照してその適否を判定してみると 4 種の構造パターンと 6 特性の関連は表 3.5 のようになると想われる。このうち◎印は最も関連の深いもの、○印は多少の関連性の存在するものであり、上記のような簡略的分類法では初期に意図した構造パターンと亀裂特性の一対一の対応はできていない。しかし、表 3.5 の関連さえ承知しておれば疲労および脆性の発生、伝播、停止の各特性を取扱う場合の構造パターンは大略表 3.1～表 3.4 のように整理して考えることが出来るであろう。

表 3.5 構造パターンと破壊様式の関連

	部分構造	構造要素	部材要素	基本要素
疲 労	発生			◎
疲 労	伝播	○	◎	○
疲 労	停止	◎	◎	
脆性破壊	発生		◎	◎
脆性破壊	伝播	○	◎	○
脆性破壊	停止	◎	◎	

◎：主たる検討対象となる破壊様式
○：問題となる可能性のある破壊様式

3.2 損傷ベースの分類

実船における損傷の発生状況、亀裂の進行状況、亀裂の多発する構造など、損傷に関する調査やその分類も今後の破壊力学設計の有効な資料の一つである。ここでは、まず実船の損傷例のうち疲労亀裂、もしくはそれに類似のものの諸例を集めて表 3.6 に示した。この表にみられるようにほとんどの亀裂は溶接部と開孔周辺の応力集中部に発生しているので、突合せ溶接部、隅肉溶接部、Attached Member の溶接部、開孔部とその他の 4 区分で日本海事協会の損傷データをベースとした損傷頻度、荷重の種類、基本要素との関連、検査法などを記載した。

これらの損傷例と前項の破壊力学設計を前提とした分類との関係については、例えば表 3.6(2)のスチフナー、ガーダー等のエンドアタッチメントでブレケット先端の損傷例を表 3.2(3)の船側構造上端部サイドフレームエンドブレケットの構造要素と対比させることができ、これによって損傷周辺の外力系も理解できる。またこの実船損傷にみられる亀裂は比較的短かく部材要素内の亀裂がその大部分を占めている。これは検査が短かい期間で綿密に行なわれるため比較的早い時期に発見、修理がなされるためであろうと推測されるが、中には表 3.6(1)の船底外板亀裂

のように、構造要素内亀裂にまで進展しているものもある。

次に、これらの亀裂の評価であるが、一般に亀裂評価は多面的な考え方がなされ、必ずしも一義的には決まらない。ここでは一つの考え方として安全性の面とメンテナンス費の二面から考えてその評価分類を行なってみた。これが表3.7と表3.8である。表3.7はオイルタンカーとバルクキャリアーの各部材を対象として亀裂が発生した場合の安全性を機能別に評価し、最後に大雑把な総合評価を行なった。また表3.8は同じく部材に発生した亀裂を修理する場合の難易度とそのコスト面からみた評価である。これらはフェイルセイフデザインといった設計思想や部材の重要度に応じた安全率の考え方などに反映され具体的な設計法を確立する際の一助となる。

以上船体構造の構造要素分類を設計と損傷の二面から考えてきたが、これらは今すぐ破壊力学による構造設計に利用されて行くものではなく、まずは近い将来破壊力学解析法を確立して行く際の道標として参照して行くべき性格のものであろう。

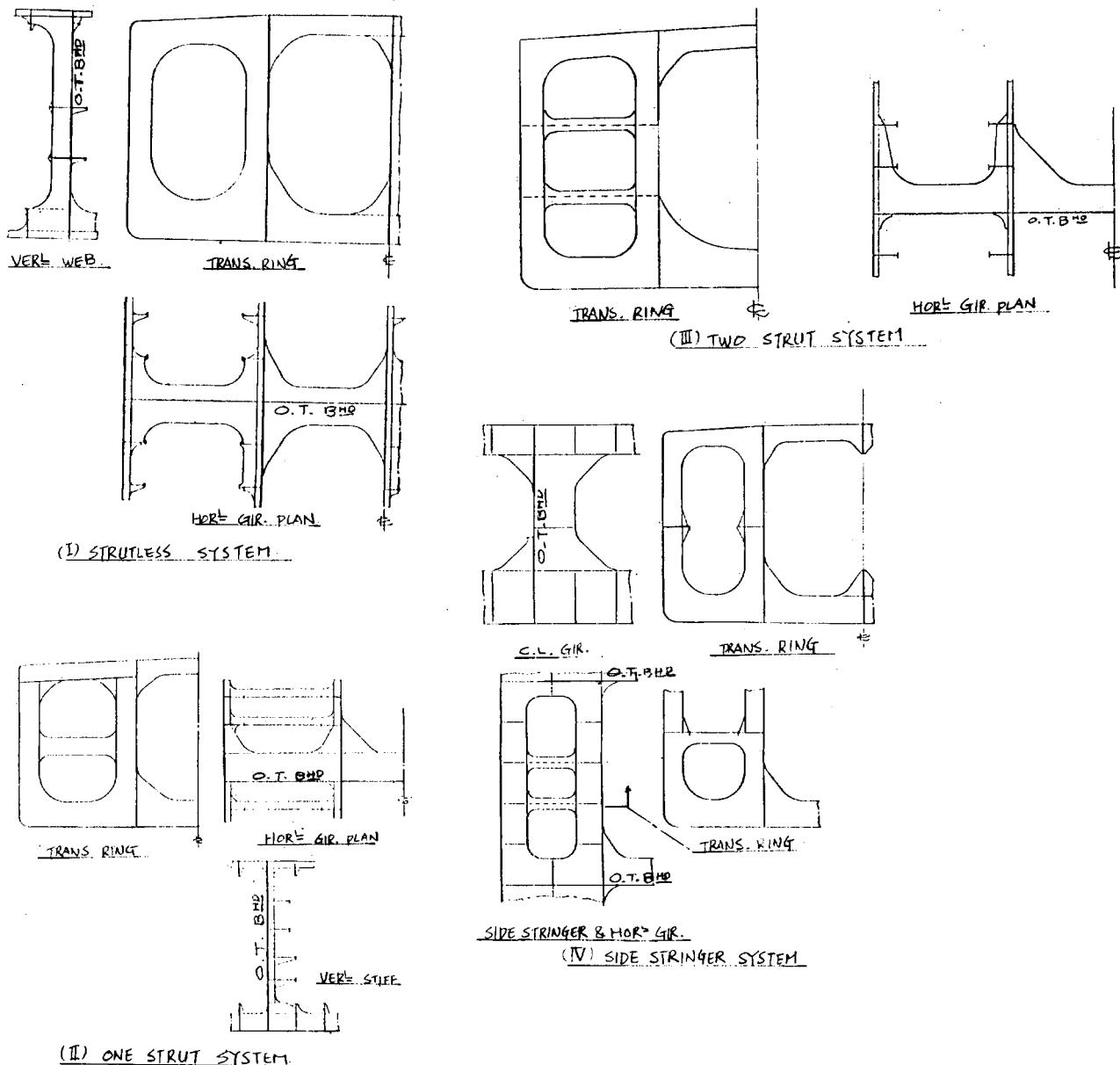


図3.1 オイルタンカーの中央横断面と油密隔壁

表3.1 オイルタンカーの構造要素分類と応力分布(1)

対象構造	部分構造	構造要素 (境界力と内部応力一般の表示)	部材要素 (局部応力表示一応力集中一)	備考
荷重構造 1), II), IV)	甲板横構造 III), V)	甲板横構造端部 O.T.部	⑥ ⑪ ⑩ ⑪—{ F_x, N_x, F_y, N_y } ⑥—{ N_x }	(1) 疲労強度を規定する所 (2) ④, ⑤ … 對象部材要素表示可。 (3) ⑪ … 基本要素表示可(目録参照)

表3.1 オイルタンカーの構造要素分類と応力分布(2)

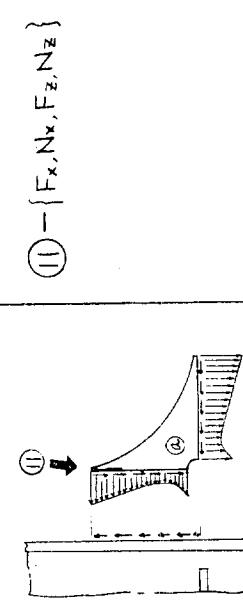
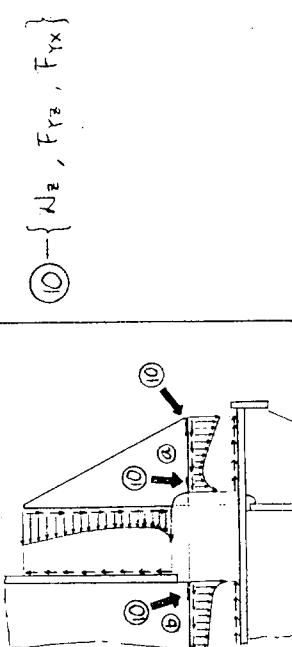
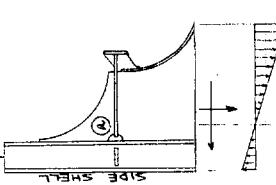
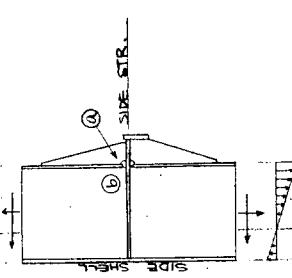
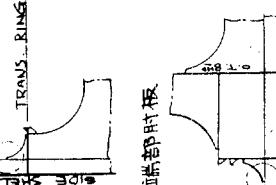
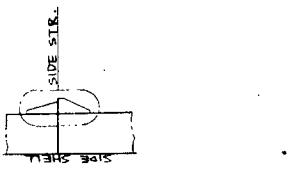
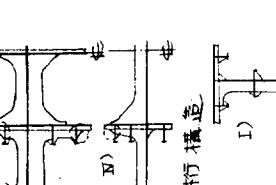
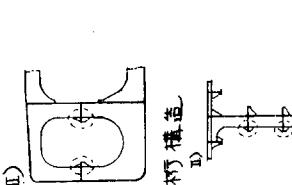
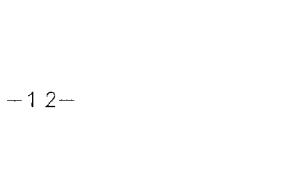
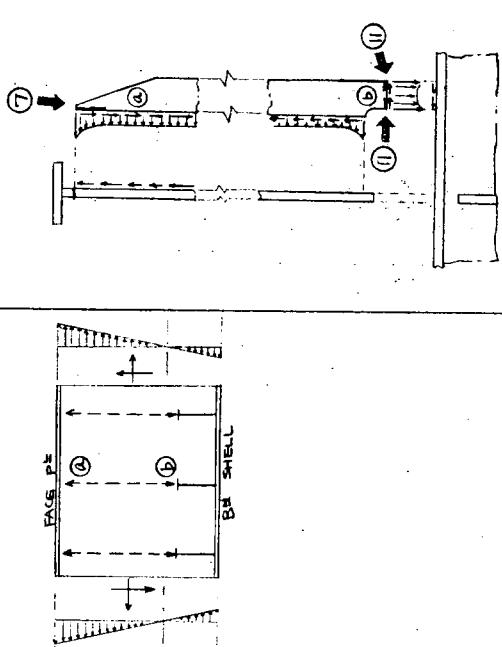
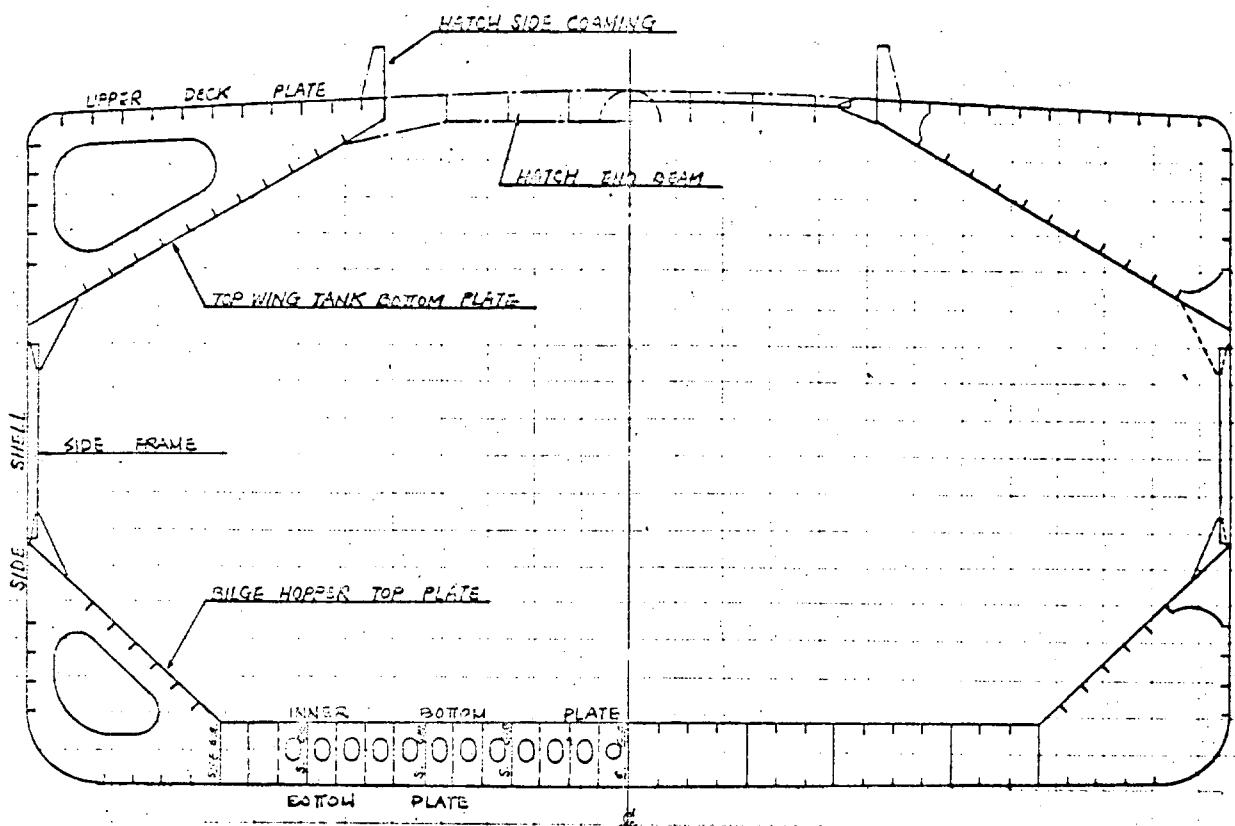
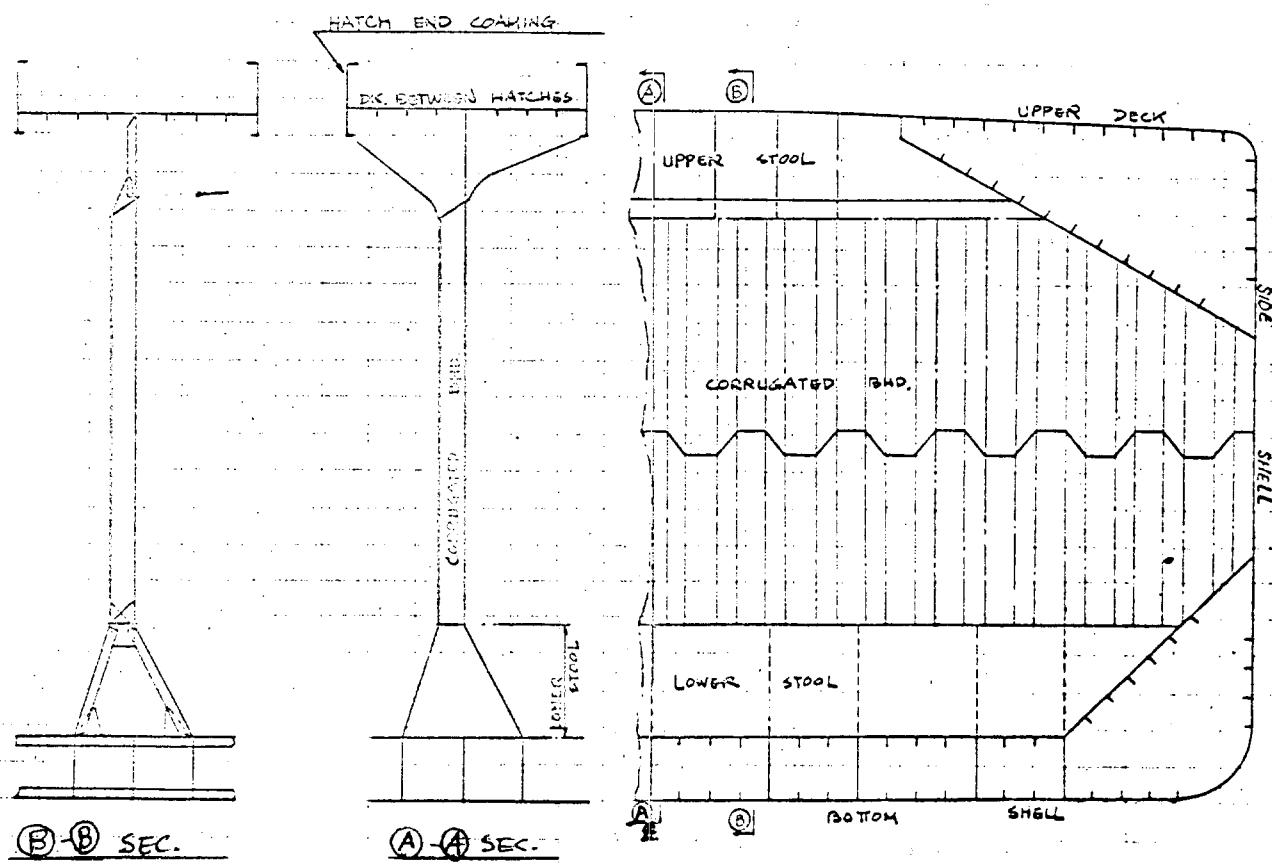
対象構造	部分構造	構造要素 (境界と内部応力一般表示)	部材要素 (局部応力表示一応力集中)	備考
水平横構造	水平横断端部時板 -ex. 水平端部時板			$\textcircled{11} - \{F_x, N_x, F_z, N_z\}$
垂直横構造	垂直横断端部時板 -ex. 垂直端部時板			$\textcircled{10} - \{M_z, F_{rz}, F_{rx}\}$
船底構造	船底横構造と水平平行との交差部 -ex. 船底横構造と水平平行との交差部			$\textcircled{10} - \{M_z, F_{rz}, F_{rx}\}$
垂直構造	垂直構造 -ex. 垂直構造			$\textcircled{5} - \{F_y\}$
甲板構造	甲板横構造 船底横構造 船側横構造 垂直構造 -ex. 甲板横構造のロジ贯通スロット等のロジ贯通スロット			$\textcircled{7} - \{F_z, N_z, M_{rx}\}$ $\textcircled{10} - \{F_{rz}, F_{rx}\}$

表3.1 オイルタンカーの構造要素分類と応力分布(3)

対象構造	部分構造	構造要素 (荷揚力と内部応力-応力表示) or. 船底構析の防接着端部	部材要素 (局部応力集中-応力集中)	備考
甲板構析 船底構析 船側構析 壁構	甲板構析 船底構析 船側構析 壁構	等の防接着端部	 <p>⑦ - $\{F_x, F_z, M_{yx}\}$ ⑪ - $\{F_x, N_x, F_z, N_z, M_{yz}\}$</p>	<p>⑦ - $\{F_x, F_z, M_{yx}\}$</p> <p>⑪ - $\{F_x, N_x, F_z, N_z, M_{yz}\}$</p>



中央横断面



横置隔壁構造

図3.2 バルクキャリアの中央横断面と横置隔壁構造

表3.2 バルクキャリヤーの構造要素分類と応力分布(1)

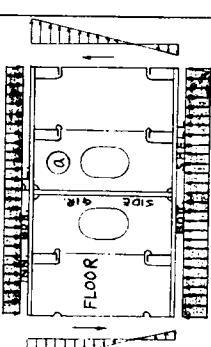
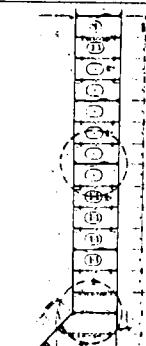
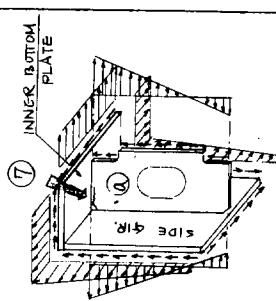
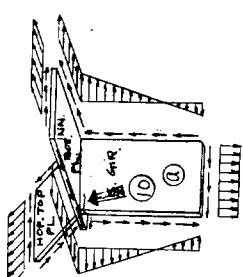
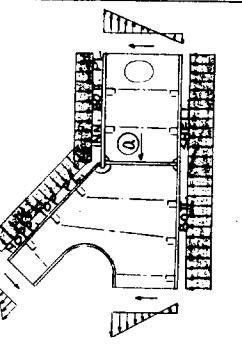
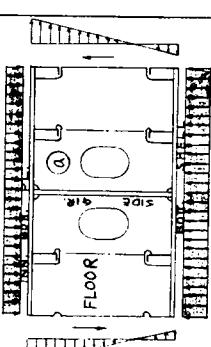
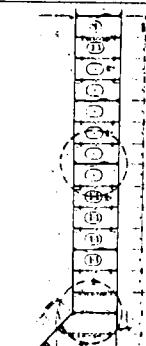
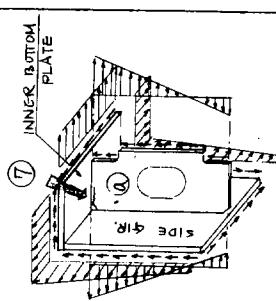
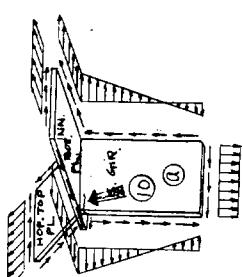
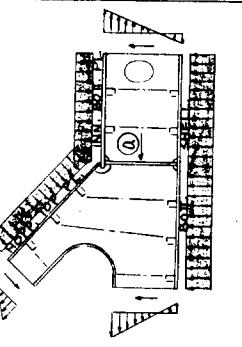
対象構造	部 分 構 造	構 造 要 素 (境界力と内部応力の一般的表示)	部 構 要 素 (局部応力表示一応力集中一)	基 本 要 素、荷 重
I. 総合部構造 1. 二重底構造	1) 一般二重底部	(1) 平行部  (2) ホッパーとの交又部 	(1) ①  (7)  (10) 	①; 基本要素を構成する各個部分 {M}; 基本要素の下用ひ荷重 ① —— {N_x + N_y + F_x + F_y + M_max}
	2) 斜傾斜部	(1) 斜傾斜部  (2) ホッパーとの交又部 	(1)  (7)  (10) 	①; 基本要素を構成する各個部分 {M}; 基本要素の下用ひ荷重 ① —— {N_x + N_y + F_x + F_y + M_max}

表3.2 ハルクキャリヤーの構造要素分類と応力分布(2)

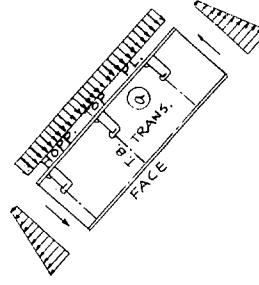
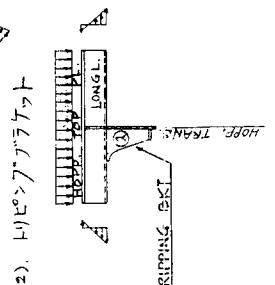
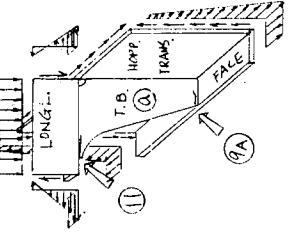
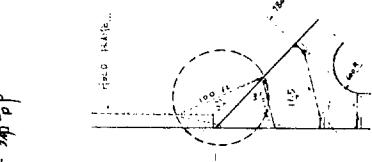
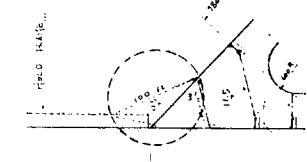
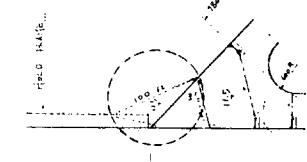
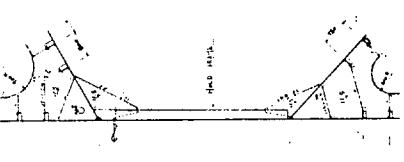
対象構造	部分構造	構造要素 (境界力と内部分力一般の表示)	部材要素 (局部応力表示一応力集中)	基本要素・荷重
2) ハッパ一部	<p>(1). ホッパー・トランク(平行部)</p>  <p>(2). ハッパー・アラケット</p>  <p>(1). 平行部と同じ</p>  <p>(11) ————— { $N_z + N_x + M_{YX} + F_z$ } (1A) ————— { $N_z + N_x$ }</p> <p>(5) ————— { $N_x + F_Y + M_z$ }</p>	<p>2). 下端部</p>  <p>(1). サイドフレームのエンドアラケット</p>  <p>(1). 下端部</p>  <p>2. 船側構造</p> 		

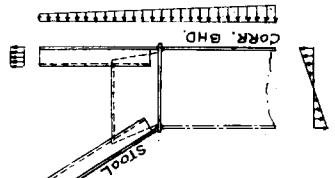
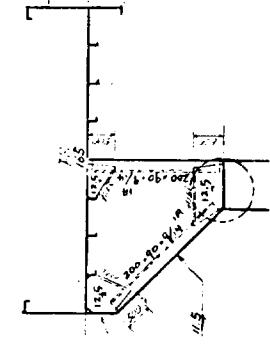
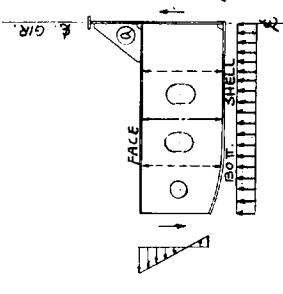
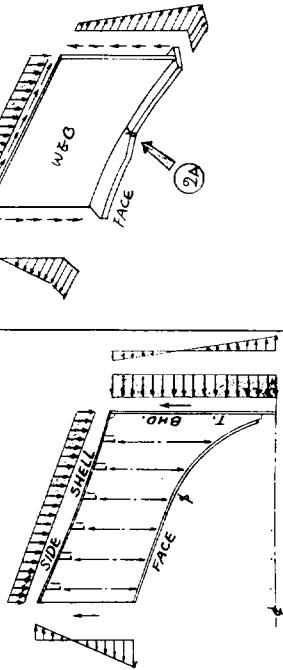
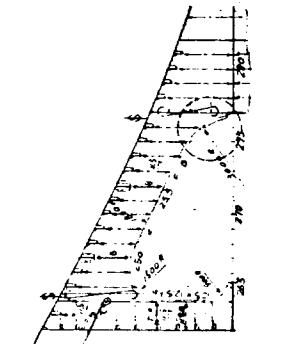
表3.2 バルクキャリアーの構造要素分類と応力分布(3)

構造要素 構造	部分構造	構造要素 (境界力と内部応力一般的表示)	部材要素 (局部応力集中一応力集中)	基本要素・荷重
2). 上端部	(1). サイドフレームのエンドブリッジ	$(II) \rightarrow \{ N_x + M_{Yz} + F_x + N_x \\ + F_y + F_z + M_{Yx} \}$		
3). 甲板構造	1). ハッチ間甲板部 2). ハッチコーナー	<p>(1). ハッチ間ドームエンジン:</p> <p>(2). ハッチコーナー:</p>	<p>(1). ハッチ間ドームエンジン:</p> <p>(2). ハッチコーナー:</p>	
		<p>(6) $\rightarrow \{ N_x + M_Y + F_z + N_x \}$</p> <p>(7) $\rightarrow \{ N_x + F_Y + F_z + M_{Yx} \}$</p>		$(II) \rightarrow \{ N_x + F_Y + M_{Yz} \}$

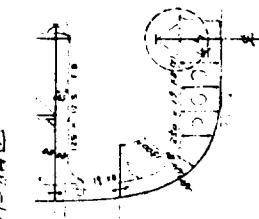
表 3.2 ハルクキャリヤーの構造要素分類と応力分布(4)

対象構造	部分構造	構造要素 (境界力と内側応力一般的表示)	部材要素 (局部応力表示一応力集中)	基本要素・荷重
3). トーションアーム	1). ハーフドーム	UPP. DK PL. FACE SIDE SHELL	⑨B —— $\{N_Y + M_{YX} + F_{YX} + F_Z\}$	
4). 隔壁構造	1). 波形隔壁部	TRANSVERSE TEAR WALL SHEET	⑩ —— $\{N_X + N_Y + N_X + F_{YX} + F_X\}$ + $F_Z + M_{YZ}\}$	
	2). ストッパー(下部)	IRON WING TANK SHEET CORR. PL.	⑪ —— $\{N_Z + N_Y + N_X + F_{ZY}\}$ + $F_{YX} + M_{YZ}\}$	
4. 隔壁構造	2). 波形隔壁とストッパー(头部)	IRON WING TANK SHEET CORR. PL.	⑫ —— $\{N_Z + N_X + N_Y\}$	
	3). トーションアーム	UPPER PL. LOWER PL. STOOL PL. CORR. PL. SHEET PL.		

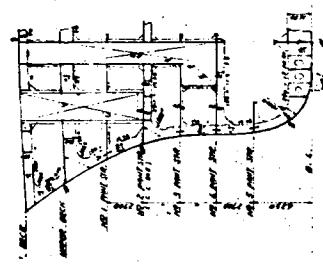
表3.2 バルクキャリアーの構造要素分類と応力分布(5)

対象構造	部分構造	構造要素 (境界力と内部応力一般的表示)	部材要素 (局部応力集中一)	基本要素・荷重
	3). ストゥール(上部)	 	 	

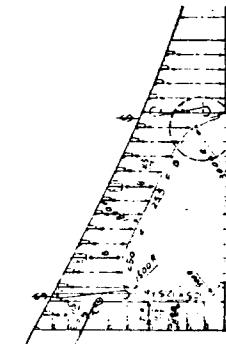
II. 船首部構造



1) 船底構造



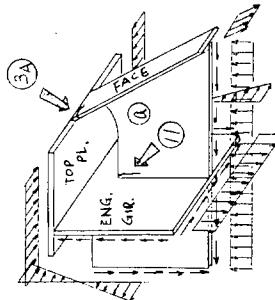
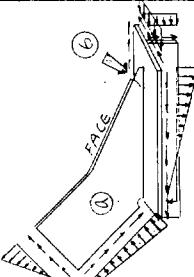
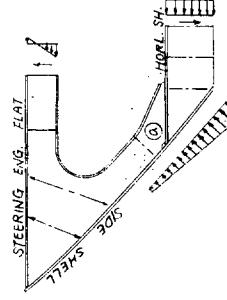
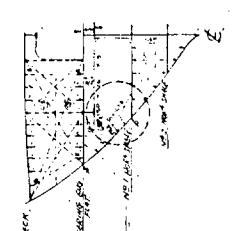
2) 船側構造

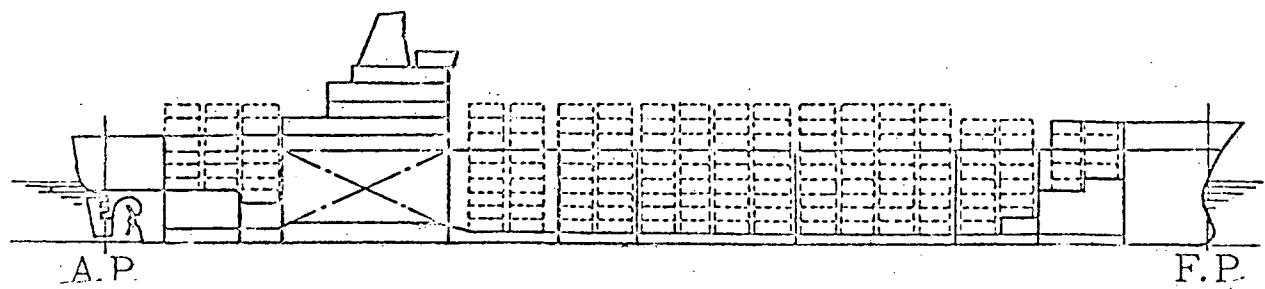


1. 2). (2) ハンガーラブ, ハーネス

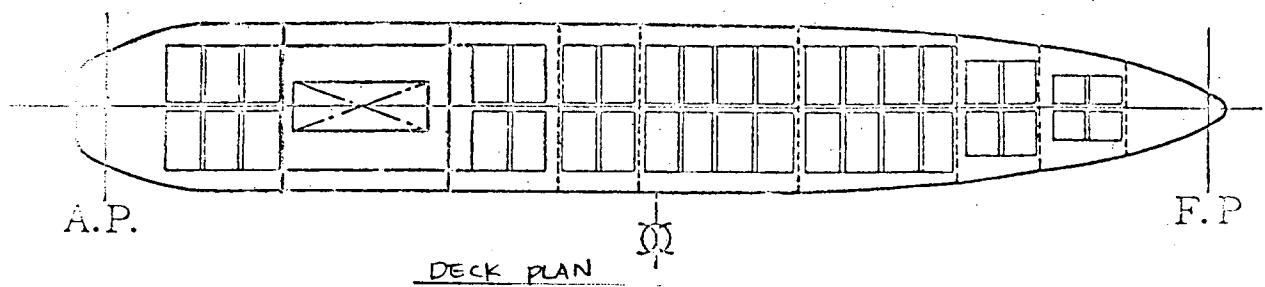
(2A) — { N_x }

表3.2 バルクキャリアヤードの構造要素分類と応力分布(6)

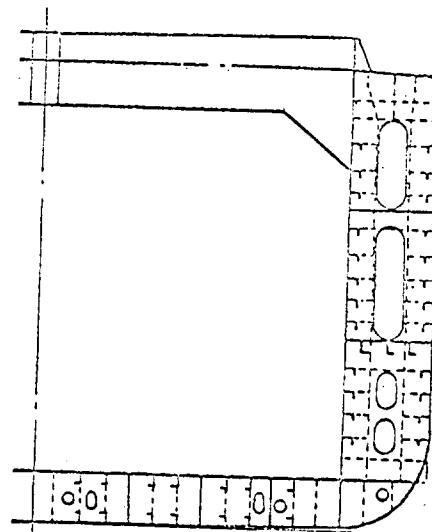
対象構造	部 分 構 造	構 造 要 素 (境界力と内部応力一観的表示)	部 栄 構 造 要 素 (局部応力表示一応が案中一)	基 本 要 素・荷 重
III. 機関室構造	1). 二重底構造	(1) 主機下部構造	(3A) $\{ N_x + M_Y + F_Y \}$ (1) $\{ N_x + F_Y + F_x + F_z \}$	
	2). 斜側構造	(2) 	(4) 	
V. 船尾部構造	3). 甲板構造	(5) 	(6) 	



PROFILE



DECK PLAN



中央横断面

図 3.3 コンテナ船の一般配置と中央横断面

表3.3 ミンチナー船の構造要素分類と応力分布(1)

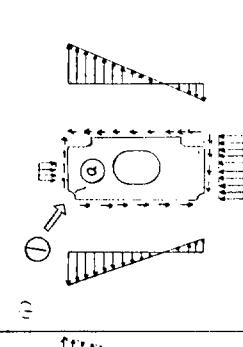
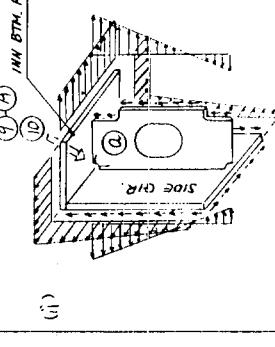
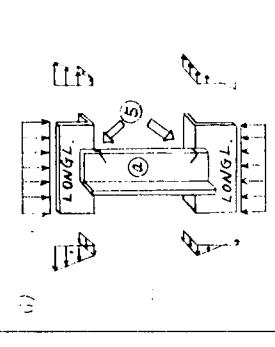
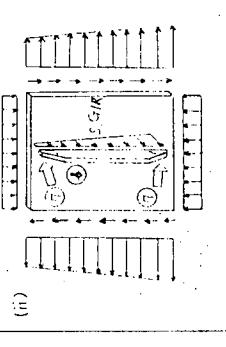
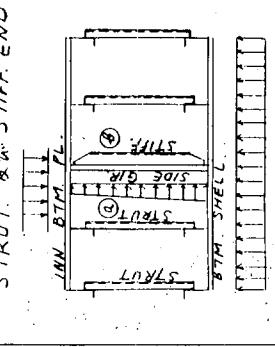
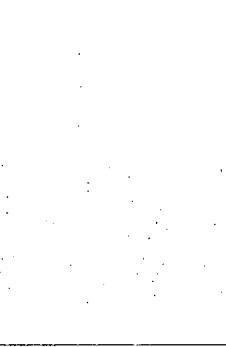
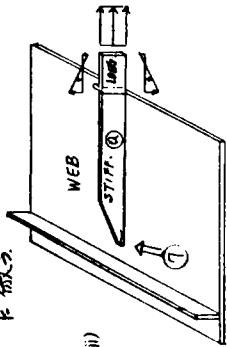
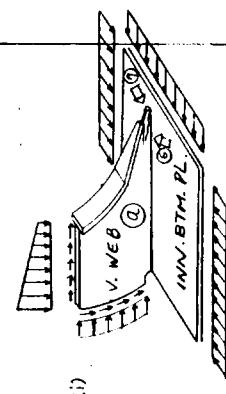
対象構造部	構造部分類	構造部要素 (荷重力・内部応力・幾何要素)	構造部要素 (局部応力表示 - 心刃集中-)	構造部要素 (局部応力表示 - 心刃集中-)	構造部要素 (局部応力表示 - 心刃集中-)
1. 船艤部構造 1. 二重底構造	1) 一般二重底部	平行部	(1) — $(N_x + F_y + F_x)$  (2) — $(N_x + F_{x1} + N_2 + F_{x2})$ 	(3) — $(N_x + F_{x1} + N_2 + F_{x2})$  (4) — (N_x) 	(5) — (N_x)  (6) — $(N_x + F_{y1})$ 

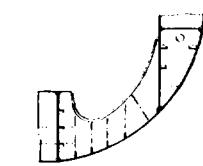
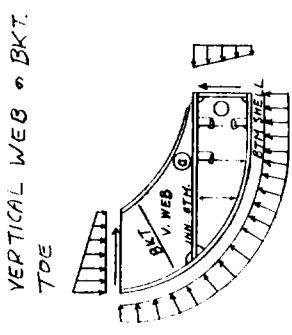
表 3.3 コンテナー船の構造要素分類と応力分布(2)

対象構造	部分構造	構造要素 (境界力と内部応力の一般的要素)	部材要素 (局部応力表示一充力集中)	備考
ビルジ部と結合部	(i) フロアと結合部 ビルジ部と内板応力の一般的要素	(ii) フロアは平行部と傾斜部 ⑩- ($N_x + F_{x\alpha} + N_y + F_x + N_z + F_{z\alpha}$)	(iii) ①- ($N_x + F_y + F_x$) ⑦- ($N_x + F_{y\alpha} + N_{yx} + N_z + F_x$)	

表3.3 コンテナー船の構造要素分類と応力分布(3)

対象構造	部分構造	構造要素 (境界力・内部応力の一般要素)	部材要素 (両部元力表示、一応力集中)	構造要素 算式
2) ベルジ部分	STIFF. & SIDE END.	(i) SIDE GR.付 STIFF.は平行部 に倣う。 	(i) - 	(i) - (ii) - (iii) -

TIER TOP PL. と LONG PL.
BHD. と結合部下反り
BK.T.



2 船側構造
二重底構造倣う

表3.3 コンテナー船の構造要素分類と応力分布(4)

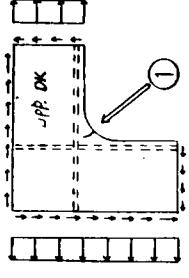
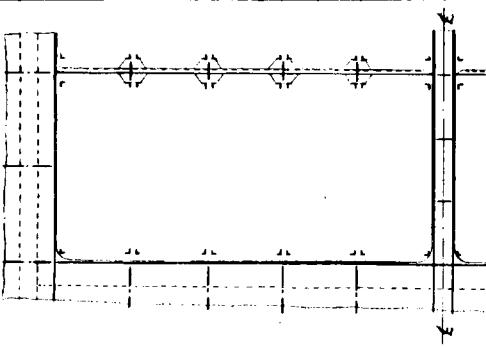
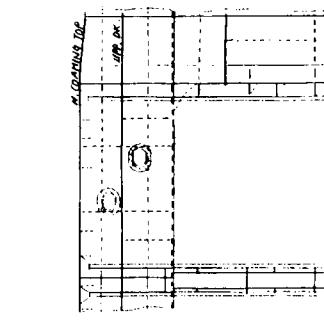
対象構造	部 分 構 造	構 造 要 素	部 构 造 要 素	考
3. 甲板構造	1) HATCH OPENING  2) CR. DK. GIRDER 下部 BKT.  3) CR. DK. GIRDER 	(構造力と局部応力の一部の要素) (荷物を示す要素) (荷物を示す要素)	(荷物を示す要素) (荷物を示す要素)	①—($N_x + F_y + F_z$) ③—(B) ($N_x + F_y + M_z$) //—($N_z + F_x + M_{yz}$)

表 3.3 コンテナー船の構造要素分類と応力分布 (5)

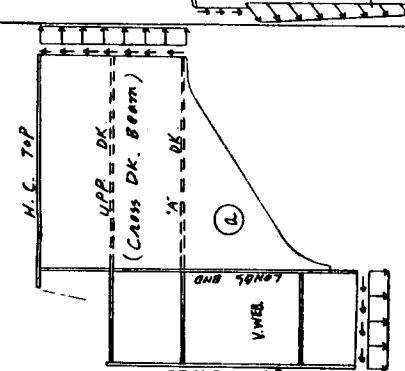
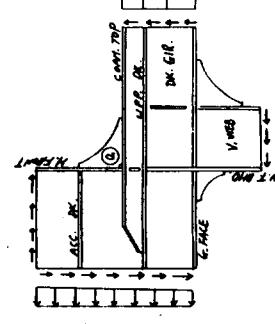
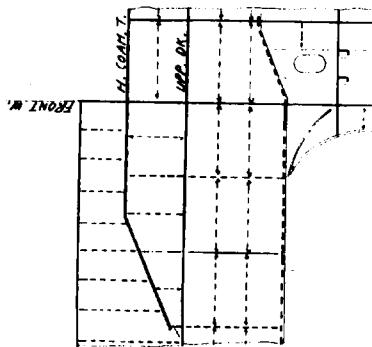
対象構造	部分構造	構造重量 (意匠力と内部充刃の取扱いの要素)	部材載荷力表示 (意匠力集中)	要素系数	備考
3) CROSS DK. BEAM と舷側との 取合部	 <p>④</p> <p>⑩</p> <p>① — $(N_x + F_{x1} + M_{zx} + F_x + N_z + F_{z1} + M_{xz})$</p>  <p>②</p> <p>⑩</p> <p>① — $(N_x + F_{x1} + M_{zx})$</p> <p>⑩ — $(N_x + F_x + N_z + F_{z1})$</p>  <p>③</p> <p>⑩</p> <p>① — $(N_x + F_{x1} + M_{zx})$</p>				

表 3.3 コンテナー船の構造要素分類と応力分布(6)

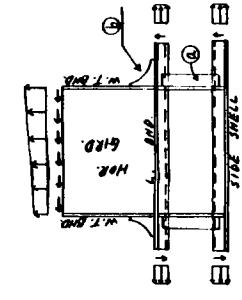
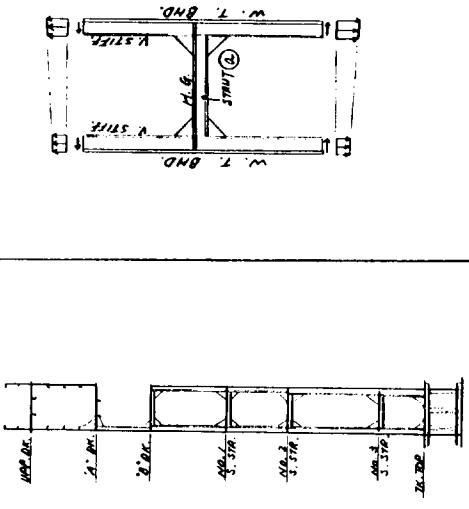
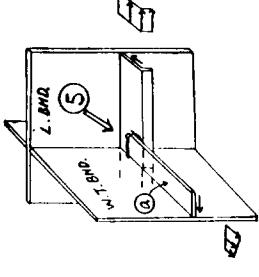
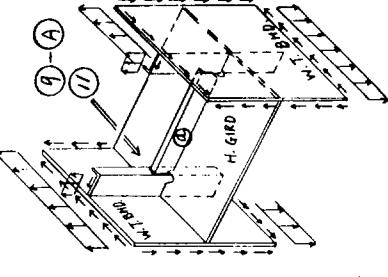
対象構造	部 分 構 造	構 造 要 素 (境界力と内部応力の関係)	部 分 構 造 要 素 (内部応力表示 一応力集中)	備 考
4. 隔壁構造	1) HORIZONTAL GIRDERS  2) ORDINARY STIFFENER 	⑤ — $(N_x + F_y + M_z)$  ① 13 3. 甲板構造 4) H. Front & Hold side Craning & Deck Long Gr. 2 o 取扱い注意。	 ⑨-A — $(N_x + F_y + M_z + F_{12} + M_{12})$ ⑪ — $(N_x + F_y + F_g + M_{1x} + M_{2x} + F_x + F_h)$	

表 3.4 基本要素

座標の定義
 M_{YZ}
 → 該断面に作用する慣性モーメント
 → 該断面に作用する慣性モーメント

境界力の定義

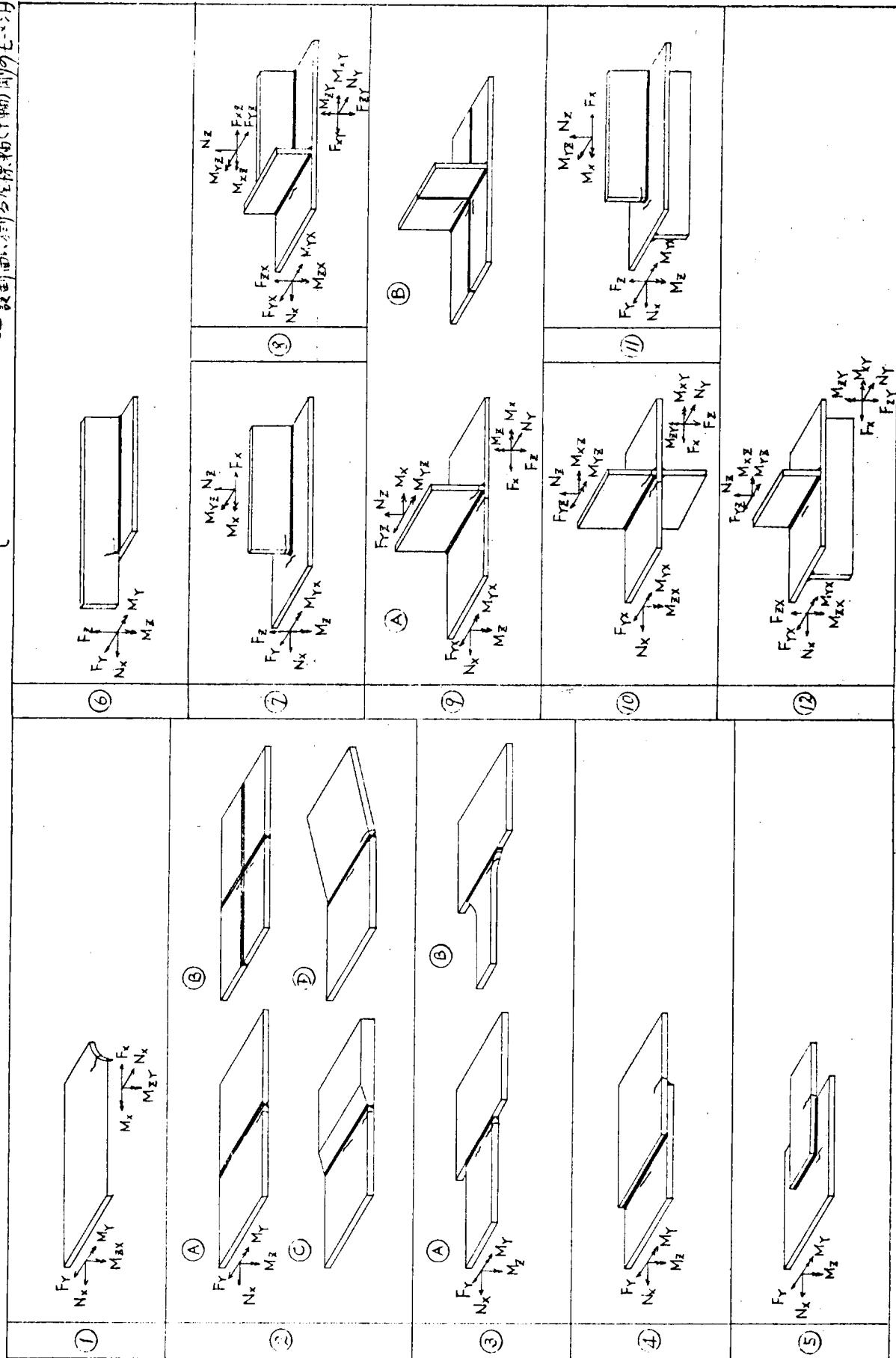


表 3.6 損傷ペース分類(1)

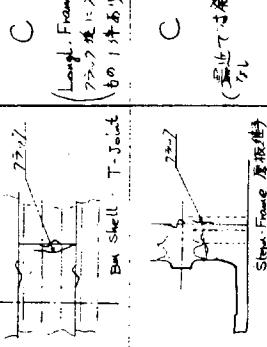
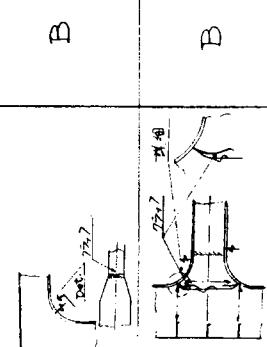
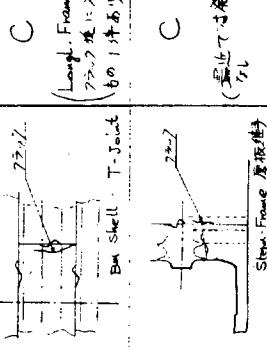
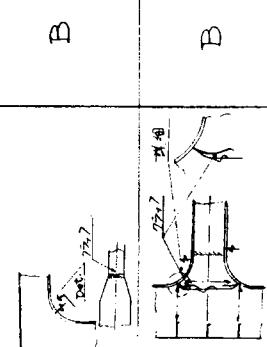
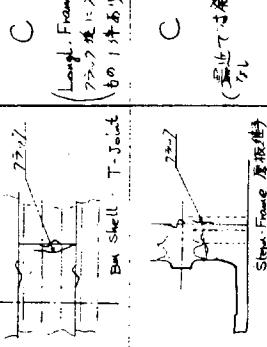
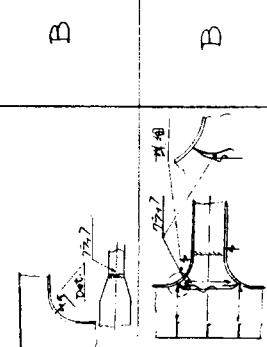
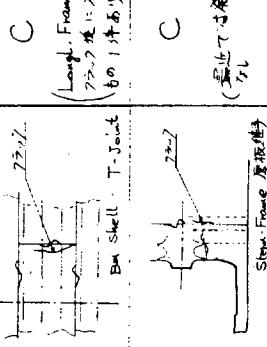
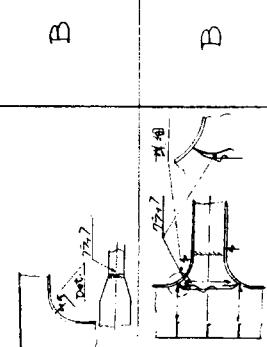
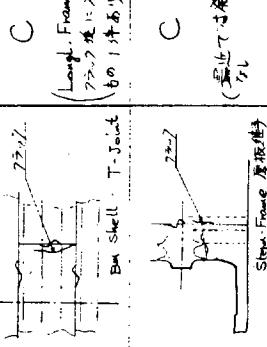
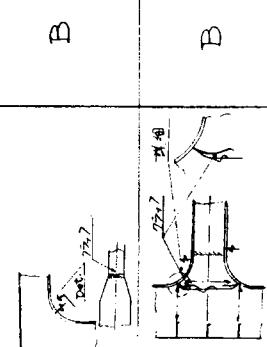
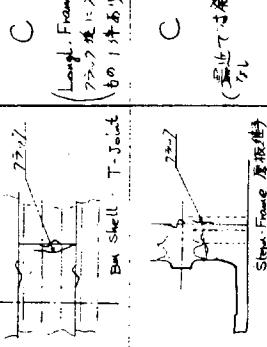
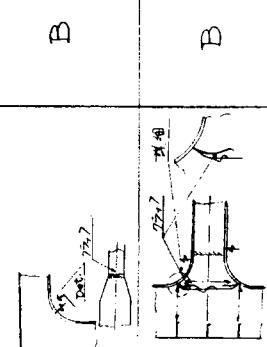
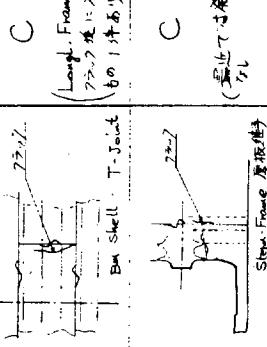
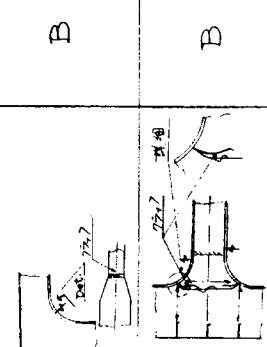
構造要素	構造及び損傷例	荷重種度 A:軽い荷重 B:普通の荷重 C:重い荷重	荷重種類	基本要素 (表3.4参照)	検査 (i) 検査方法	備考
Deck & Bottom Plate		C	軸力(健脚ゲージ) 衝撃(スマッシュ:青筋)	② - B	(i) 一般的に4年 (外張のアングル等) (普通7年) (急速7年) (急速見小み)	1) Butt Weld の疲労强度。見T HT/MS の疲労强度。 2) 7.7.2.7-4 初期の研磨 3) 大きな底板等、IN LINE BUTT 等の検討 4) 間隔7年以上不可 → 加工次第(工作次第、材料欠陥)の評価 5) 車輪切り連続法可否の検討
		C	軸力、剪断力(爆発等) 浪湧衝撃	② - C _{ce}	(ii) 木压検査 外観検査	1) 貨物7ラード不可 → 初期欠陥の評価 2) Shear Flame, Shear stain 等、荷重差が大きくなる時の問題点
Side Shell		C	軸力(丸骨の曲げ) (最近7年発生例)	② - A	(i) 4年	1) Trace 0.7ラード以上 → 7.7.9の反応(今迄可能は7.7.9) 2) 7.7.9の許容長さは0.0?
		B	軸力(丸骨の曲げ) 剪断力	② - C	(i) 4年	1) Face C の板厚と平行面の7.7.9との整合性 2) Face C の板厚と平行面の7.7.9との整合性
大骨材の Face Plate		B	軸力(丸骨の曲げ)	② - A	(i) 4年	1) 腹筋部上の最大重量部位 2) 7.7.9許容長さの検討(左スパンは7.7.9不可) 3) 端部の形状、Sheathing 方式との関連 4) 組合図の複数の接合部、「腹肉」のどうしの接合による影響
		B	軸力(丸骨の曲げ) 剪断力	② - B	(i) 4年	1) 貨物7ラードの長さの検討 (O.T.BEAM 不可) 2) Butt方式と補方式の差の検討 (Table 4-6)
Cross Tie 基部		B	軸力	② - D	(i) 4年 (ii) 木压検査 外観検査	1) 貨物7ラードの長さの検討 (O.T.BEAM 不可) 2) Butt方式と補方式の差の検討 (Table 4-6)
		A	軸力	② - D	(i) 4年 (ii) 木压検査 外観検査	1) 貨物7ラードの長さの検討 (O.T.BEAM 不可) 2) Butt方式と補方式の差の検討 (Table 4-6)
BHD. Plate		C	軸力(爆発等) (i) C (川字型下) (ii) C (列型)	④ - B	(i) Scallow の設置基準 2) 外板等への接続の可能性の検討(BUTT等)(参考)	1) Scallow の設置基準 2) 外板等への接続の可能性の検討(BUTT等)(参考)
		C	軸力(爆発等) (i) C (上部強度) (ii) C (上部強度)	③ - A ③ - B	(i) 4年 (ii) 木压検査	3) 腹筋部上の許容7.7.9長さ 4) O.T.の接合例と接合部、「腹肉」のどうしの接合による影響
Long. Frame Stiffener. (BHD 等)		B	軸力	③ - A ③ - B		
		B	軸力	③ - A ③ - B		
Face の 交差部						
						

表3.6 摂傷ベースの分類(2)

構造要素	損傷種類	構造及び損傷例	荷重の種類	基本要素	検査	備考
						(a) 検査サイクル 表3.4 参照)
Conn. Blvd. & Steel Joint	A: 引張 B: 剪断 C: 振動		軸力(Boltの曲げ: A)	C	(1) (2) (2) (3)	1) 構造のZ方向強度との対比 2) 裁断(アーチ)不可(O.T.BBD, Deep T.BBD) → 初期Z軸の許容 (エ)アーチのうち、引張荷重に対する耐力を評価する。 3) Ore Carrier 7# Black Joint (53:12:12:12) 工法の評価が小さい。
Tun. Bottom Plate & Hopper Plate			軸力 剪断力	C	(1) (2) (2) (3)	1) Double Hull & Tun. Bottom の差異をも同様 2) Scalloped Balancing Bolt の有無等の検査は初期評価の評価 3) Ore Carrier 7# Black Joint (53:12:12:12) 工法の評価が小さい。
Stiffener, Grider 等 ⇒ End Attachment			軸力(Cutterの曲げ) 剪断力(端部支持力) 振動	(A) C (B) B (A.P.T.等) (C) A	(1) (1) (2) (1) (3) (1)	1) 荷重の再配分の検討 → 返橋の荷重に応じたアーチの許容 2) 端部形状(Stiffener等)の量と許容載荷量との検討
大骨材のコーナー部 Bracket, Face 等			軸力(大骨材の曲げ: A) 剪断力	A (B)	(1) (2) (2) (3)	1) Face Plate の荷重分布(特にコア-エンド部)の検討 2) Face & Web の螺栓溶接に作用する应力(コア-エンド部等) 3) コーナー部スチナ配筋の影響 4) フースの端部構造
二重底内のFloor Girders 割れ溶接			Plateの曲げ(半径) 剪断力 振動	C	(9) (10) (11)	1) 荷重の再配分比(半径)の検討 2) 斜傾きフランジの評価
Slab 部 Scallop 刷り			軸力 曲げ 剪断力	(A) A (B) (B)	(1) (2) (2) (3)	1) 離岸後T7#の値に対する適合性(Table 1-Cの40<切欠の半径) 2) 外板等遮蔽材への返橋の可能性の検討 → 斜傾きフランジ
直線式構造の Cross-Tie 基部			軸力	A	(1)	1) 部分構造設計との対比 2) 斜傾きフランジの評価
ヒルマン・キール			曲げ 軸力	B	(1) (2) (2) (3)	1) Pad の荷重の検討 2) 外板への返橋の可能性の検討 3) 斜傾きフランジの評価(腹板下脚も斜傾き)

表 3.6 損傷へ—スの分類(3)

構造要素	構造及び損傷例	損傷箇所	荷重の種類	基本要素 (表3.4参照)	検査	備考
Stiffener on Ship End		A (特:船尾アーチ)	剪断力 (圧縮, 拡張)	⑦ _(c)		1) Webボルスタの場合は → 長さ/7倍の範囲で 2) BHD-ボルスター → O.T.BHD, Deep T.BHD等では初期 欠陥の許容基準が必要 (SB-I番資料)
Bracket on Toe #		(1) (2) 	(1) A (強度基準) 弯曲力 (Long. Order) 剪断力 (Long. Order)	(1) ① _(c) (2) ① _(c)		1) Toe部の形状と損傷の関連の解説 2) Trip Bkt. の場合に Long. の剛性と Bkt.の剛性との関係で Bkt. 形状を決める必要がある
Shell, Deck Plate & Attached Piece		B (1) (2) 	軸力 剪断力 波浪	⑧ (1) ② (2) ① _(c)		1) Sea Chest, Hawse Pipe周辺の調査 2) 補強の程度: 7倍の範囲 (補強基準) 3) Deck, shellの質量アーチ不可 → 初期欠陥の許容 (特: 浮遊欠陥) 4) Padの初期の検討
Slat, Scalloped Edge		C (1) (2) 	剪断力 Bottom Edge	(1) ⑤ _(s) (2) ⑦ _(s)		1) 外観検査 2) Table Boundary 3) 水圧検査 4) 行
構造の不連続部		(1) (2) 	曲げモーメント 軸力 剪断力 波浪荷重	(1) ③ (2) ① (3) ⑥ (4) ① (5) ⑥		1) 窓口や Hatch Side Corner 等の周囲 2) 7倍の計算長さの許容 3) 波浪: 波高: 1:1.75, 7倍の設計の見直し必要
ラブ・ブリッジ		(1) (2) 	大骨材の変位 軸力 (ラブ・ブリッジ) 剪断力 波浪	(1) ⑤ _(s) (2) ⑤ _(s)		1) ラブ/ブリッジの検討 (荷重の再配分)
Stiffener & Blvd. Plate		A (1) (2) 	Plateの曲げ (軸) 軸力 (ラブ・ブリッジ) 剪断力 荷重 (ラブ・ブリッジ) 動压	⑨ _(c)		1) 貫通アーチの許容基準不可 [O.T.Bhd, D.T.Bhd] — 貫通不可 2) 部足部傾角の影響の解説 (船尾ラブ等)

表3.6 損傷ベースの分類(4)

構造要素	構造及び損傷例	荷重種別	荷重の種類	基本要素 (表3.4参照)	検査 サイクル 検査方法	備考
Scallop 周辺		(1) A (2) A (3) C	軸力等による応力集中	①	(i) 設置基準の確立 2) フラット部長さの評価 3) 施設材への影響の検討	
Slot 周辺		A (1) A (2) B	剪断力	①	(i) 荷重の再配分の検討 2) フラット部長さの評価	
Hatch Corner		C (1) C (2) B	軸力	①	(i) 外観検査 2) コナーフレームの検討 3) 余口の大きさの影響	
Manhole 端日孔等の 窓口部		B (1) B (2) A	剪断力	①	(i) 窓口基準の見直し (窓口壁全高料) 2) フラット部長さの検討	
Swash, BHD 窓口部		B (1) B (2) A	剪断力 衝撃力	①	(i) SWASH BHD の窓口等の形状の検討 2) 密封の影響の検討	

主：一 定号は許容ラッテの度合を示す。
 (A)一 増加不可(歴小ラッテは許可するが、増加不可)
 (B)一 小ラッテ(許可)可。(小量なら可)
 (C)一 おもだらシラッテ(おも程度の量可、大量不可)

表3.7(a) オイルタンカーの機能面からみた亀裂の評価

構造		水密性	綫強度	横強度	局部強度	防振ラテの度合	総合評価	備考
板	DECK PLATE	A ($\frac{1}{4}$ 以上率り)	B	B	B (機械部材)	A	A	①裏面アスベスト板道(慣性力等)→初期支給の検討 ②アスベストの耐久性の検討
	SIDE SHELL	A ($\frac{1}{4}$ 以上率り)	B	B	B (")	A	A	
	BOTTOM SHELL	A ($\frac{1}{4}$)	A (輪脚持)	B	B (")	A	A	
	L. BHD PLATE	A ($\frac{1}{4}$ 剪断耐性)	B	B	B (")	A	A	①ラッテの許容度(强度) ②初期支給の検討
	O.T. BHD PLATE	A ($\frac{1}{4}$ 剪断耐性)	B (剪断耐性)	A (剪断耐性)	B	★	A	
	D.Tk. BHD PLATE	A (")	A (")	B	★	A	A	
大骨 (一次部材)	SWASH BHD PLATE	★ C	B	C	★	★	C	①初期支給とラッテの許容度(强度) ②初期支給の検討
	TRANS RING WEB	★	★	A (拉張り耐性) (以下同)	B (剪断耐性)	★	A	①初期支給の評価
	CROSS TIE	★	★	A (")	B (")	★	A	①初期支給の評価
	HOR. GIR FACE ON. BHD WEB	★ ($\frac{1}{4}$ 以上)	A (") ($\frac{1}{4}$ 以上)	B (")	B (")	★	A	①ラジスミキニラッテの許容度(强度) ②初期支給の評価
	DECK LONG.	★	A ($\frac{1}{4}$) B ($\frac{1}{4}$ 以上)	B (荷重耐性)	B	B (新規材)	A	①初期支給の検討 ②外板の重量の可能性の評価
	SIDE LONG.	★	B ($\frac{1}{4}$ 以上)	B (")	B (")	B (")	B	
小骨 (二次部材)	BOTTOM LONG.	★	A ($\frac{1}{4}$) B ($\frac{1}{4}$ 以上)	B (")	B	B (")	A	
	L. BHD LONG.	★	B ($\frac{1}{4}$ 以上)	B (")	B	B (")	B	
	BHD STIFF.	★	B (")	B	B (")	B (")	B	
	WEB STIFF.	★	C	B	B (")	B (")	B	
	TRIP. BKT.	★	B (新規材)	B	B (")	B (")	B	
	DOUBLE BM (E _{BM}) COFFERDAM PUMP ROOM	A	C (新規材)	A	★	B (")	A	①新規材の許容度(强度) ②初期支給の可能性
舷	BILGE KEEL	★	★	★	★	★	C	①水槽の可能度
	DECK HOUSE	B (E _{DECK}) A	C (新規材)	★	★	C (E _{DECK}) B	B	

注: 一 記号は詳説欄の参考を示す
 (A) 一層構造不可(幾つかアーチ構造も可)
 (B) 一層構造可(底構造も可)
 (C) 一層構造可(底構造も可)

表 3.7 (b) バルクキャリアヤードの機能面からみた船型の評価

構造		水密性		綫強度		横強度		角部強度		防振: その他		総合評価		備考	
板	DECK PLATE	A	A (弱上量り重)	B	B	B	B (船体剛性低下)	B	B (船体剛性低下)	A	A	1) 基本アーチの耐震性は重層(4層)→初層だけの特徴 2) A75, 7.7MSTAの効果			
	SIDE SHELL	A	A (弱、局部剛性)	B	B	B (“)	B (“)	B (“)	B (“)	A	A				
	BOTTOM SHELL	A	B (弱、局部剛性)	A (=重層強度)	B	B (“)	B (“)	B (“)	B (“)	A	A	1) 基本アーチの耐震性は重層(4層) 2) A75, 7.7MSTAの効果			
	INN. BM. PLATE	A (弱、局部剛性)	B (“)	A (“)	A (7.7MSTA)	A (7.7MSTA)	A (7.7MSTA)	B (“)	C (“)	A	A	1) 基本アーチの耐震性は重層(4層) 2) A75, 7.7MSTAの効果			
	TOPSIDE TK. 斜板	A	B (弱、局部剛性)	A (接り剛性)	B	B (“)	B (“)	C (“)	C (“)	A	A	1) バストラス用アルミは本の耐震性に特徴 2) 斜板7.7MSTA上の支点に特徴			
	D. TK. BHD PLATE	A (B (弱、局部剛性)	A (重層の節)	B	B (“)	B (“)	B (“)	B (“)	A	A	1) 基本アーチの耐震性は重層(4層) 2) 斜板7.7MSTA上の支点に特徴			
	W. T. BHD PLATE	C (重層性付)	B (“)	A (“)	C	C (“)	C (“)	C (“)	C (“)	B	B	1) 斜板7.7MSTAの効果			
	DBM 内 GTR. FLOOR	*	B (弱、局部剛性)	B (重層強度)	B	B (重層強度)	B	B (重層強度)	B	B	B	1) 斜板7.7MSTAの効果			
	BHD STOOL	*	*	B (弱の特)	B	B (弱の特)	B	B (弱の特)	B	B	B	1) Carr. Blvd の支持構造の直線性			
	TRANS IN TOPSIDE TK.	*	*	A (重層下部)	B	A (重層下部)	B	A (重層下部)	B	A	A	1) 斜板7.7MSTAの効果			
	BILGE HOPP. TK.	WEB	*	B	B	B	B	B	B	B	B	1) 斜板7.7MSTAの効果			
大骨 (=次筋材)	DECK LONG L	*	A (弱)	B (弱の延長)	B	B (弱の延長)	B	B (弱の延長)	B	B	B	1) 斜板7.7MSTAの効果 2) 外板への遮断性の特徴			
	SIDE LONG L	*	B (弱、局部剛性)	B (“)	B	B (“)	B	B (“)	B	B	B				
	BOTTOM LONG L	*	B (弱、局部剛性)	B (“)	B	B (“)	B	B (“)	B	B	B				
	INN. BM. LONG L	*	B (“)	B (“)	B	B (“)	B	B (“)	B	B	B				
	HOLD FRAME	*	*	B (“)	B	B (“)	B	B (“)	B	B	B				
小骨 (=次筋材)	TOPSIDE TK. STIFF. BILGE HOPP. TK. STIFF	*	B (弱、局部剛性)	B (“)	B	B (“)	B	B (“)	B	B	B				
	WEB STIFF	*	*	*	B	B (重層強度)	B	B (重層強度)	B	B	B				
	TRIP. BKT	*	*	B (重層強度)	B	B (重層強度)	B	B (重層強度)	B	B	B				
	HATCH. COAMING	B	(一般は重層しない)	*	*	*	(重層しない)	*	*	*	*	1) Deck 7.7MSTAの効果 2) 横筋の効果			
その他	COFFER DAM	A	*	B	*	*	*	*	*	A	A				
	BILGE KEEL	*	*	*	*	*	*	*	C (性能上付)	C	C	1) 外板への伝播の評価			
	DECK HOUSE	C (底往生上付)	C (影響小)	*	*	*	C (底往生上付)	*	C (底往生上付)	B	B				

表3.8(a) オイルタンカーの修理費用の面からみた毎年の評価

注: 一記号は各部に付する因縁度(修理がうき)を示す
 (A)一子骨因に対する因縁度が大きく修理費用が大きい
 (B)二因縁度(修理がうき)が小さい修理費用が小さい
 (C)三因縁度(修理がうき)が最も小さい修理費用が最も小さい

構 造	損傷がたらし	足場必要	Access用盤 (通工事)	Docking用キヤ (ガスブリッジ等)	材料入手困難	総合評価	
						備 考	
DECK PLATE	A			A	A (H.T. steel) (D.E. plate)	A	
SIDE SHELL	B (上部のみ)		B (下部)	A	B (S. steel) (D. E. plate)	A	
BOTTOM SHELL			A	A	A (H.T. steel) (D.E. plate)	A	
L. BHD. PLATE	B (上部のみ)			A	C (H.T.)	B	
DECK LONGL.	A			A	B (H.T.)	A	
SIDE LONGL.	B (上部のみ)			A	C (H.T.)	B	
BOTTOM LONGL.			C (修理可能)	A	B (H.T.)	B	
L. BHD. LONGL.	B (上部のみ)			A	C (-修理)	B	
TRANS. WEB	A (左右)	B (")			A		A
TRANS. FACE	C	B (")			A		B
RING STIFFENER	A (左右)	B (")			A		A
BKT	B	"			A		A
CROSS TIE	B	A			A		A
TRANS. PLATE		B (上部のみ)			A		B
BHD. STIFFENER		B (")			A		B
COLD RIGHTY HER. GIR		B (")			A		B
SWASH PLATE	B (対面)	B (")			A		B
SWASH STIFFENER	BHD	B (")			A		B
HER. GIR		B (")			A		B
DOUBLE BOTTOM	C	A	C (修理可能)	B (F.O. TR. #)			B
COFFER DAM		A			A		A
PUMP ROOM							
PEAK TANK	A (AFT. P.T.)	B					A
BILGE KEE	L		A				B

表3.8 (b) ハルクキャリアヤードの修理費用の面からみた亀裂の評価

注: 重音は各年毎に当する回数(経験のからく度合)を示す
 (A) - その年因に対する修理費用が大きい
 (B) - ある程度(或はそれ以下)その傾向が見出される
 (C) - 場合によって年毎に該当しないものもある

構造	損傷からくる足場が必要	Access用 (安全工事)	Docking (アスブリーフラッジ)	材料入手困難	総合評価
DECK PLATE	C (鋼板)	A		A (HT) (D.E.等級)	A
SIDE SHELL	B (上部)		B (下部)	B (S. strength) (D.E.B.H.)	B
BOTTOM SHELL		A		B (B.M. (D.E.等級))	A
DECK LONG.	A			B (H.T.)	A
SIDE LONG.	C (Top side)			C (-HT)	C
BOTTOM LONG.		A	C (外壁修理)		A
HOLD WEB	B	A			A
FRAME	C	A			A
PLATE	C (横材)	A	B	C (-HT) C ()	A
TOPSIDE LONG.	C (")	C	B	C ()	B
TANK TRANS WEB	C (")	C	B	C ()	B
HOPPER FACE	C	C	B	C ()	B
STIFFENER	C (")	C	B	C ()	C
BKT	C	B			C
PLATE	C	A		C (F.O.等級)	A
BILGE LONG.	C	A		C ()	A
BILGE TRANS WEB	C	A		C ()	A
HOPPER FACE	C	A		C ()	A
TANK STIFFENER	C	A		C ()	A
BKT	B (鋼板)	C	A	C ()	A
DOUBLE PLATE		A		C ()	B
LONG.		A		C ()	B
BOTTOM AIR FLOOR	B (W.T.等級)	A		C ()	A
STIFFENER	B (")	A		C ()	A
PLATE	B (上部)		B (上部)	C ()	B
DEEPTANK STIFFENER		B (")			B
BHD. COFF. BHD.	B (")				B
STEEL	B (")	A			A
PLATE	B (")				B
WATER TIGHT LONG.	B (")				B
BHD. COFF. BHD.	B (")	A			B
STOOL	B (下部)				A
PEAK TANK	A (AFT.P.T.)	B			A
BILGE KEEL			A		B
COFFERDAM		A			A
HATCH COAMING	B	C (Deck F.)			B

4. Case Study

4.1 Case Study の目的

破壊力学による船殻構造設計を行なう場合の問題点の抽出を目的として本章では Case Study を試みる。破壊力学を設計に適用する場合、先に述べたように一連の計算システムの確立が必要となる。外力の統計的把握とその外力に対する応力の精密計算は近時の電子計算機の発達によりかなり可能となりつつある。しかしながら破壊力学理論の発展は未だその緒についたばかりであり、比較的単純な平面モデルについての研究が発達したにすぎず、船殻構造のような複雑な構造に対してはまだ研究は始まったばかりであるといった状態である。

ここでは応力解析の結果あるいは過去の実績の分析などから、亀裂の発生が懸念される箇所あるいは欠陥の存在が重大事故につながると考えられる重要構造箇所などにある種の欠陥を想定し、その亀裂の成長過程の追跡を行なってみる。このためには設計理念ならびに設計フローチャートを確立し、さらには構造要素の分析などを破壊力学適用の観点から行ない、それらの近似的取扱い手法なども検討していかねばならない。

そこで本章では具体的に亀裂発生箇所を想定し、その亀裂の成長を追跡して問題点の把握を行なうこととした。

ここでは、まず 4-2 節において、最も荷重形式が単純であり、その絶対値に対する計算あるいは計測の実績が豊富なタンカーのデッキ、ロンジ部周辺をとり上げた。損傷実績という観点からは、この部分は極めて頻度の少ない部類に属するであろうが、船殻の中核部材でもあり、重大事故に直結するという意味からも Case Study としては意義があると考える。

次に 4-3 節では荷重系が少し複雑となるが、損傷実績や構造に対する疲労実験や解析の行なわれているプラケット先端部付近に着目した Case Study を行なう。

4.2 デッキロンジ部の Case Study

本 Case Study では、タンカーのデッキロンジ部周辺を対象にとりあげ、この部分の具体的な寸法を与えたうえで、疲労亀裂の伝播寿命や脆性亀裂発生時の亀裂寸法などの検討を行なう。また初期の微小亀裂がどのような伝播経路をたどって拡大進展してゆくかについても考察を加える。

本 Case Study を行なうにあたって採用したフローチャートを図 4.2.1 に示す。

4.2.1 前提条件として用いた各種数値

(i) 対象構造寸法

25万 DWT の大型タンカーを想定して、デッキロンジ周辺部の寸法を図 4.2.2 の如く決めた。デッキプレートとロンジのそれぞれの突合せ溶接線は、同一平面内にあると仮定し、溶接線交差部にスカラップをとる場合とならない場合を想定した。また、ロンジバルクヘッドやトランスバルクヘッドなどの隔壁が、デッキロンジの亀裂拡大におよぼす効果は、特に考慮しないこととした。

(ii) 材料特性値

対象構造の温度環境として 0°C を考えることとした。また個々の材料特性値については、大入熱溶接継手を想定して次の値を用いた。

(a) 脆性破壊発生に対する韌性値 $K_{JC} = 600 \text{ kg}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$

(b) 脆性破壊停止に対する韌性値 K_{ARREST} (仮に $600 \text{ kg}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$ とした)

(c) 疲労亀裂伝播定数 ($\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m$) $m = 2.5$, $C = 1.44 \times 10^{-3}$ (SR 153 昭和 50 年度報告)

また、これら材料特性値を用いて破壊の条件を求める場合、溶接などによって生ずる拘束応力は無視することとした。ただし、上記の特性値は溶接継手部実験結果の平均値であり、継手試験片に含まれている溶接残留応

力の影響は入っているものと考える。

(iii) 外荷重条件

波浪変動および静水中の船体縦曲げモーメントを外荷重として想定する。

(a) 脆性破壊の発生(伝播、停止)に対しては、図4.2.3に示すように

$$\sigma_a \text{ (変動応力)} + \sigma_m \text{ (静水中応力)} = 20 \text{ kg/mm}^2$$

を考えた。

つまり、外応力としては常に 20 kg/mm^2 をとることとし、この応力で脆性亀裂の発生(または伝播、停止)が起こるべきの亀裂寸法・形状を計算することとした。ただし、亀裂が極端に長大化し、縦曲げモーメント(M)を断面係数($Z = I/y$ 、亀裂が無いとした図4.2.2に記載の値)で割った公称応力の表現(図4.2.3)が許されないか、あるいは意味が無くなるような場合には、当然のことながら、上記の値を用いることはできない。この限界については、4.2.2項で近似的取り扱いによる検討を行なう。

(b) 疲労亀裂の伝播に対しては、図4.2.3から等価な一定繰返し応力 $\bar{\sigma}_a$ を定めてこれを用いた。

これは、現在までの波浪縦曲げモーメントに関する知見が、主として図4.2.3で与えられているような(超過)発現確率表現に留まっており、実船殻疲労亀裂の寿命をかなり支配していると考えられる荷重レベル間の遭遇順序に関する知識が不足していることに対する便宜的措置である。また、初期亀裂長さ(a_0)を特定することなく、いずれの長さのものに対する伝播寿命も求め得るようにとの観点から採用した計算上の仮定である。

$\bar{\sigma}_a$ については、 $N \sim 10^8$ 回の応力繰返しに対する伝播亀裂長さを等しくするという条件から定めた。すなわち、20年間に於いて遭遇する応力変動のうちで最大のものを $\sigma_{a, MAX}$ 、また $\Delta K_{threshold}$ を考えた伝播に有効な応力下限を $\sigma_{a, MIN}$ と表わす(図4.2.4参照)とき、等価な一定繰返し応力 $\bar{\sigma}_a$ を次式で評価した。

$$(\bar{\sigma}_a)^m \int_1^{10^{8-\lambda}} dN = \int_1^{10^{8-\lambda}} (\sigma_a)^m dN, [m \text{ は伝播定数}]$$

$$= \frac{\sigma_{a, MAX}}{\sigma_{a, MIN}} (\sigma_a)^m \cdot 10^{8(1 - \frac{\sigma_a}{\sigma_{a, MAX}})} \cdot \frac{8 \log 10}{\sigma_{a, MAX}} d\sigma_a \quad \dots \dots \dots \quad (4.2.1)$$

$$\because N = 10^8 \left(1 - \frac{\sigma_a}{\sigma_{a, MAX}}\right)$$

すなわち

$$(\sigma_a)^m = \frac{10^8 \cdot (8 \log 10 / \sigma_{a, MAX})}{10^{8-\lambda} - 1} \cdot \left\{ \frac{\sigma_{a, MAX}}{\sigma_{a, MIN}} (\sigma_a)^m \cdot 10^{-\frac{8}{\sigma_{a, MAX}}} \cdot \frac{d\sigma_a}{\sigma_a} \right\}$$

$$\approx \frac{18.421}{\sigma_{a, MAX}} \cdot 10^\lambda \cdot \left[\int \right]$$

$$= \frac{18.421 \times 10^8 (\sigma_{a, MIN})}{\sigma_{a, MAX}} \cdot \left\{ \frac{\sigma_{a, MAX}}{\sigma_{a, MIN}} (\sigma)^m 10^{-\frac{8}{\sigma_{a, MAX}}} \cdot \frac{d\sigma}{\sigma} \right\} \quad \dots \dots \dots \quad (4.2.2)$$

である。

数値計算して $\bar{\sigma}_a$ を求めた結果を図4.2.5に示す。

$$\sigma_{a, MAX} = 16 \text{ kg/mm}^2$$

$$\sigma_{a, MIN} = 2 \text{ kg/mm}^2, (\lambda = 1)$$

$$m = 2.5$$

と仮定して、 $\bar{\sigma}_a$ として次の値を用いることとした。

$$\overline{\sigma_a} = 3.05 \text{ kg/mm}^2$$

$$\approx 3 \text{ kg/mm}^2$$

この場合、下限応力 $\sigma_{a,\text{MIN}}$ の超過確率は $Q (= 10^{-\lambda}) = 10^{-1}$ となるので、遭遇する繰返し応力総数のうちの 10^{-1} だけが亀裂伝播に寄与することになる。

4.2.2 亀裂の進展経路および進展に伴う応力再配分

前提条件として掲げたもののうち数値的なものは前項で触れた。本項では亀裂の進展経路と進展に伴う応力再配分の算入について仮定した事柄を記す。

(疲労) 亀裂の進展経路に関しては、Maximum Stress Criterion¹⁾や、Strain Energy Density Criterion²⁾が破壊力学の分野で知られている。しかしながら、これらの亀裂伝播を忠実に追跡するためには、亀裂進展に伴う刻々の応力またはK値計算が必要である。本 Case Study では、刻々の応力計算を行なう程他の条件が精度よく揃っている訳では無いこと、また実船殻における各種損傷部材の実績から或る程度の類推が可能であることなどを考慮して、亀裂伝播経路について幾つかの選択肢を含むフローを仮定した。

溶接欠陥など何らかの原因で初期亀裂が存在したと仮定して、可能性のあるその後の亀裂成長経路を、図4.2.6 および図4.2.7に示す。

図4.2.6 および図4.2.7中のフローの分岐点では、何らかの判断（破壊力学に則した工学的判断）などに従い、本 Case Study で想定した構造ではどちらの流れを採るか選択の必要がある。後述する数値計算結果が、幾つかの選択肢についてのこの判断結果を示している。

破壊力学によれば、疲労亀裂の成長速度や不安定破壊への遷移時期は、K値を計算することにより評価できる。しかし、構造物中のK値評価に際しては、構造不静定からくる亀裂進展に伴う応力再配分を考慮することが不可欠である。

亀裂長さが比較的短い場合には、応力再配分の量は相対的に小さい。したがって、図4.2.2 (a)のような全体構造から試験片形状をした小部分をとり出し（十分なアスペクト比を確保して自由表面影響をそのまま保存すれば）公称応力値を端部応力として計算しても比較的正確であろう。しかし、亀裂長がさらに長くなった場合には、端部に与えるべき応力は公称値よりも小さくなるはずであり、小部分をとり出して計算することは事実上許されなくなる。しかしながら、本 Case Study に於いては、亀裂が無い場合の変形量を端部条件として与えた計算を行なうことにより、近似的に応力再配分効果を算入することとした。しかしさらに亀裂が長大化（例えば数十m程度）した場合には、梁理論だけでは実体にそぐわなくなるし、変動水圧算出のベースになっている船体運動自身も修正を要するであろうから、このような近似化は許されなくなると考えられる。以下にその限界を近似的に評価した。

船殻の断面構造を図4.2.8のよう簡略化する。

ただし、

$$A_{FO} = (500 \times 35 + 1.000 \times 25) \times \frac{54 \times 10^3}{1.000} = 2.295 \times 10^6 \text{ (mm}^2\text{)} \quad \dots \quad (4.2.3)$$

$$A_{WO} = 8.153 \times 10^6 \text{ (mm}^2\text{)} \quad \dots \quad (4.2.4)$$

$$\therefore (I/y) = \left\{ A_F \times \left(\frac{26 \times 10^3}{2} \right)^2 \times 2 + \frac{1}{12} \left(\frac{A_{WO}}{26 \times 10^3} \right) (26 \times 10^3)^3 \right\} \Bigg/ \left(\frac{26 \times 10^3}{2} \right)$$

$$= 9.5 \times 10^{10} \text{ (mm}^3\text{)}$$

である。

亀裂がnロング間隔だけ広がった場合、上部フランジ面積 (A_F) は次のようになる。

$$A_F = 2.295 \times 10^6 - (500 \times 35 + 1000 \times 25) \cdot n \quad (\text{mm}^2) \quad (4.2.5)$$

このとき中立軸の高さ(e)、および断面2次モーメントは次式で求まる。

$$e = (13 \times 10^3) \times \frac{2A_F + A_{wo}}{A_F + A_{Fo} + A_{wo}} \quad (\text{mm}) \quad (4.2.6)$$

$$I = e^2 (A_F + A_{Fo} + A_{wo}) - (26 \times 10^3) e (2A_F + A_{wo}) \\ + (26 \times 10^3)^2 \cdot \left(A_F + \frac{A_{wo}}{3} \right) \quad (\text{mm}^4) \quad (4.2.7)$$

したがって公称応力の変動は、 $I/(26 \times 10^3 - e)$ に反比例するので、図 4.2.9 の如く評価できる。図 4.2.9 から $n = 5$ ロンジ間隔だけ亀裂が伸びた場合でも公称応力の変動は 5 % 増であり、この程度までならば船殻全体の剛性変化はほとんど無視できると判断した。したがって、この範囲内ならば端部変位一定（その値は亀裂が無いときの値に一致）の近似が評されるものと考えて計算した。

4.2.3 疲労亀裂伝播寿命などの計算結果

以上述べてきた前提条件のもとで各種構造、すなわち、実験室内の試験片の如く亀裂を取り巻く境界条件が比較的簡単なものから実船殻部材に割合に近い梁構造の幾つかに対し、残余強度（Residual Strength）と残余寿命（Residual Life）の計算を行なった。これらは、そのベースとなるK値の結果とともに図 4.2.10～図 4.2.19 に示す。

残余強度（図中の太い実線）とは、或る亀裂長さを含む構造が脆性破壊の発生に達する時（図中の細い実線）または亀裂部分を除く正味断面積が抗張力 σ_B ($= 60 \text{ kg/mm}^2$ とした) に達する時（図中の破綻）の作用応力を意味する。また残余寿命とは、或る亀裂長さ(C)の状態からこの不安定破壊の状態に達するまでの疲労亀裂伝播寿命として定義している。この場合、4.2.1 項の外荷重条件で述べたように、残余寿命（NR）のうち、1割だけが伝播に寄与し残りは $\Delta K_{threshold}$ 以下のため寄与しないが繰返し数（寿命）の中には勘定している。

計算例のうち図 4.2.10～図 4.2.13 はK値表示が既に得られているものであり、次のような算式を用いている。³⁾ ただし、試験片長さ(L)は試験片幅に比べて十分長いので、以下の δ_{crack} については無限長さについての値をあてた。式中の寸法記号は各図中に記入した寸法を表わしている。

(i) 中央亀裂を含む帯板（図 4.2.10）

$$(端部変位) = \delta_{nocrack} + \delta_{crack} [= \text{constant}] \quad (4.2.8)$$

$$\delta_{nocrack} = \frac{\sigma \cdot L}{E}$$

$$\delta_{crack} = \left(\frac{1}{2} \right) \times \frac{4\sigma \cdot C}{E(1-\nu^2)} \left\{ -1.071 + 0.250 \left(\frac{C}{W} \right)^2 + 0.121 \left(\frac{C}{W} \right)^3 \right. \\ \left. - 0.047 \left(\frac{C}{W} \right)^4 + 0.008 \left(\frac{C}{W} \right)^5 - 1.071 \frac{1}{(C/W)} \ln \left(1 - \frac{C}{W} \right) \right\}$$

$$K = \sigma \sqrt{\pi C} \cdot \left\{ 1.0 - 0.025 \left(\frac{C}{W} \right)^2 + 0.06 \left(\frac{C}{W} \right)^4 \right\} \sqrt{\sec \left(\frac{\pi C}{2W} \right)} \quad (4.2.9)$$

(ii) 片側端部亀裂を含む帯板（図 4.2.12）

$$(端部変位) = \delta_{nocrack} + \delta_{crack} [= \text{constant}] \quad (4.2.10)$$

$$\delta_{nocrack} = \frac{\sigma \cdot L}{E}$$

$$\delta_{crack} = \left(\frac{1}{2} \right) \times \frac{4\sigma \cdot C}{E(1-\nu^2)} \left\{ \frac{(C/W)}{\left(1 - \frac{C}{W} \right)^2} \cdot \left(0.99 - \left(\frac{C}{W} \right) \left(1 - \frac{C}{W} \right) \left(1.3 - 1.2 \frac{C}{W} + 0.7 \frac{C^2}{W^2} \right) \right) \right\}$$

$$K = \sigma \sqrt{\pi C} \cdot \left\{ \sqrt{\frac{2W}{\pi C} \tan \frac{\pi C}{2W}} \cdot \frac{0.752 + 2.02(C/W) + 0.37(1 - \sin \frac{\pi C}{2W})^3}{\cos \frac{\pi C}{2W}} \right\} \quad (4.2.11)$$

最も平易な部材（試験片）形式として、平板を考えた場合の数値計算結果を図4.2.10～図4.2.13に示した。

亀裂のモードとしては中央亀裂の場合と片側端部亀裂の場合を扱っている。

中央亀裂の場合（図4.2.11）については、亀裂長さ（ $2C$ ）が約100mm未満では正味断面が抗張力（ σ_B ）に達することによって残余強度が定まり、約350mm迄は、脆性不安定亀裂の発生によって残余強度が規定されていることがわかる。さらに、約350mm以上では、再び正味断面が抗張力（ σ_B ）に達することによって残余強度が規定されているが、これは単一平板部材を想定したことによる現象である。すなわち、後述するようにT型梁あるいはもっと多くの平板の立体的組合せを部材として考えるならば、抗張力（ σ_B ）で残余強度が規定される領域（図4.2.11(a)中の破線）は、亀裂長さが極く短かい領域に局限される性質のものである。図4.2.11(a)では、亀裂長さ（ $2C$ ）が約320mmで残余強度が20kg/mm²に達している。すなわち20年間の船命中に遭遇することが有り得る（図4.2.4を想定すると、その確率は $p = [1 - (1 - 10^{-8})^n]_{n=10^8} \approx 1 - \frac{1}{e} = 63.2\%$ である）ことを示している。

また図4.2.14～図4.2.19はFEMを用いた重畠法K値計算によるものである。現有の電算プログラム（※1）の性能上、面内問題しか取扱えないもので図4.2.20に略記するような近似モデル化を施している。亀裂先端 Crack-sub Structureを除いて、節点数約150、要素数約150である。

図4.2.14～図4.2.17は、デッキロンジとデッキプレートの一部を考えたT型梁についての計算結果である。先の単一平板部材に比べて構造不静定性がより実構造に似た形で算入されており、応力再配分量（試験片の作用応力減少量）も相対的に少ない。ロンジ部の中央亀裂（図4.2.15(a))に於いて、残余強度が20kg/mm²に達する時点は $2C \approx 350\text{mm}$ であり、先の単一平板の場合より若干大きな値を示している。その理由は、それだけ構造不静定性を実構造物に似せて考慮した結果によるものと思われる。また、 $2C \approx 70\text{mm}$ 以上の残余強度は、常に脆性不安定亀裂の発生によって規定されていることがわかる。

図4.2.10～図4.2.19の計算結果から、スカラップが無い場合でデッキロンジ下端部に溶接欠陥等による先在亀裂がある場合の亀裂進展を追跡してみる。

先在亀裂として長さ $C_0 = 20\text{mm}$ の場合を考える（以下図4.2.17、図4.2.19参照）。 $C_0 = 20\text{mm}$ の時点で、脆性破壊発生まで（正確には、脆性破壊発生に対し安全率が1.0となるまで）の寿命（ N_R ）が 8.0×10^6 Cycles (≈ 40 航海) ある。 8.0×10^6 Cycles の応力繰返しに遭遇すると $C \approx 180\text{mm}$ に成長し、この時点で 10^{-8} レベルの外力に対し脆性破壊発生の安全率が1.0またはそれ以下になる。この脆性亀裂はデッキロンジのほとんど全幅（500mm）を伝播する（図4.2.17の結果だけからは、亀裂がデッキプレートの極く近くまで来たときに停止するか否かの判断はできない）。脆性亀裂によるにしろ、疲労亀裂によるにしろ、ロンジが切断された後の状態は図4.2.19(a)から判断すると、脆性破壊発生に対しどんどん 10^{-8} レベルの外力に対し安全率1.0を確保できない状態と推定される。

以上が今回デッキロンジ部の Case Study として実施してきた結果の全てである。時間的にもあるいは利用できる手法的にも制限された条件下であったために、亀裂長さが十分長くなつて構造物の破損の最終段階（Fatal Failure）まで追跡することは出来ない。

(※1) 「面内弾性問題のK値計算」（安藤）三菱重工技報 vol 10, No.3, 1973.5 プログラムの能力

最大節点番号 500

最大要素番号 500

一要素内の番号差 ≤44

Crack Sub-Structure数 ≤10

計算時間約90秒／200節点

構造物中での長大化した亀裂の問題については新たな難問が待ち構えていることは当然予想されるところであるが、本 Case Study を通じて出くわした問題点（4.4 節で詳述する）の一つ一つを詰めて解決を計りながら、今後ともこの種の研究を続けてゆく所存である。

参考文献

- 1) G.C.Sih, H Liebowitz, "Mathematical Theories of Brittle Fracture," FRACTURE, Vol2, 1968
- 2) G.C.Sih, "A Special Theory of Crack Propagation, Methods of Analysis and Solution of Crack Problems", Mechanics of Fracture 1, Noordhoff Int. Publ., Leiden, 1973
- 3) H.Tada, "The Stress Analysis of Crack Handbook", DEL Research Corporation

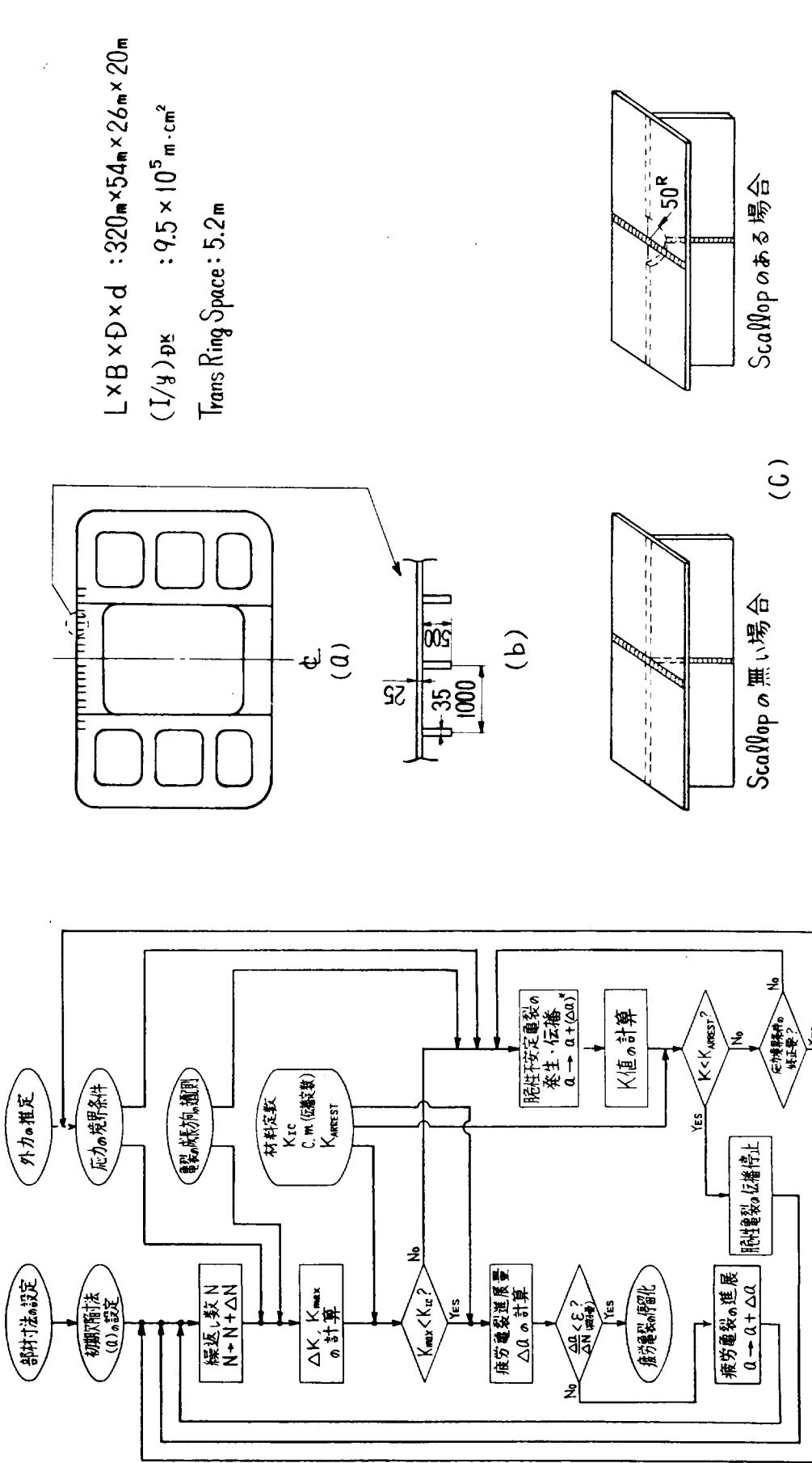
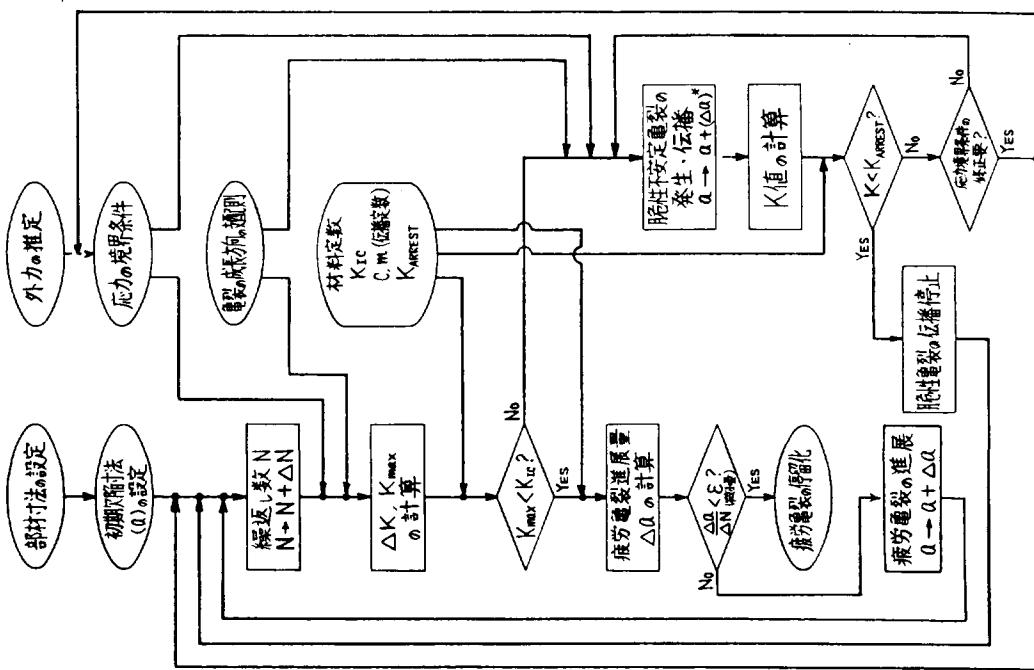


図 4.2.1 Case Study ④ における計算 Flow Chart



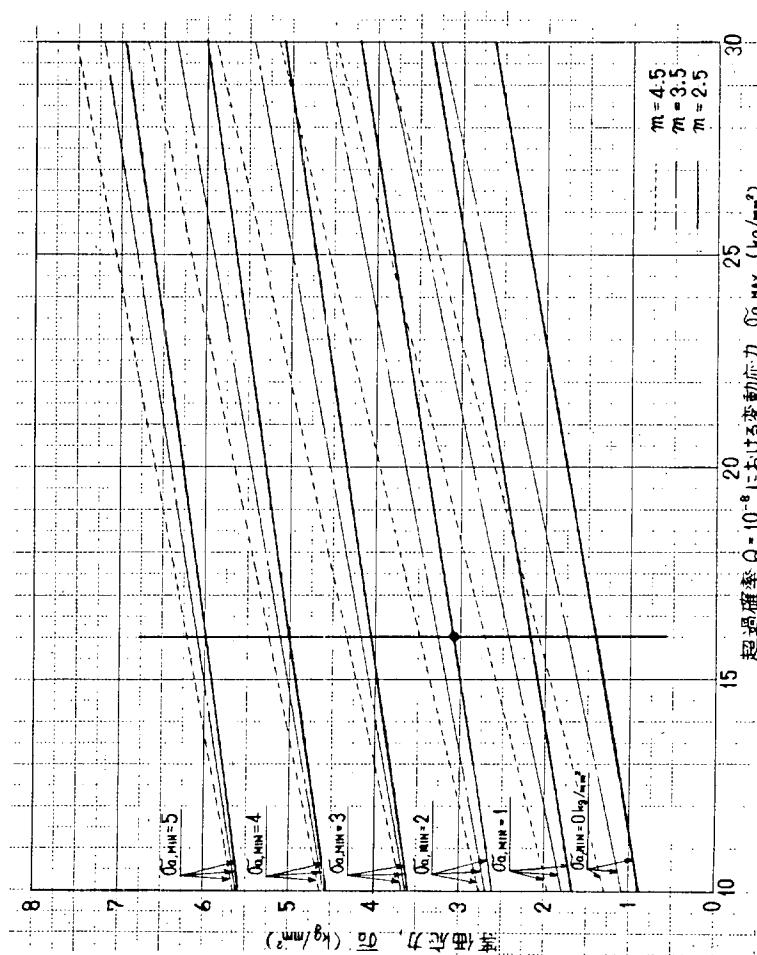


図 4.2.5 等価な一定繰返し応力 ($\bar{\sigma}_a$)

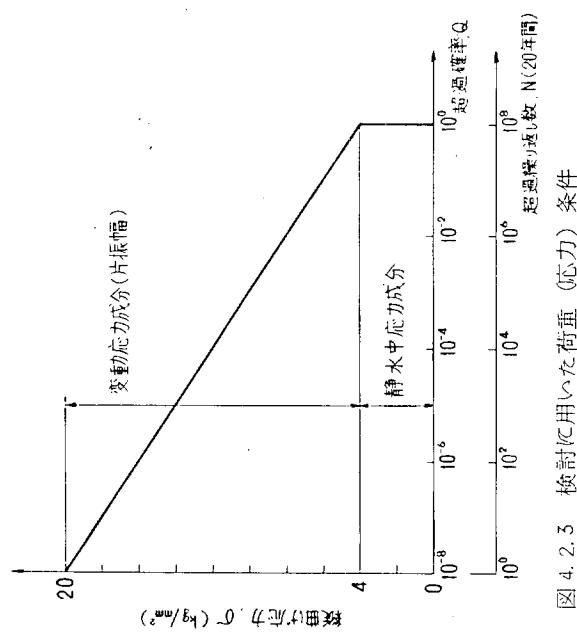


図 4.2.3 検討に用いた荷重 (応力) 条件

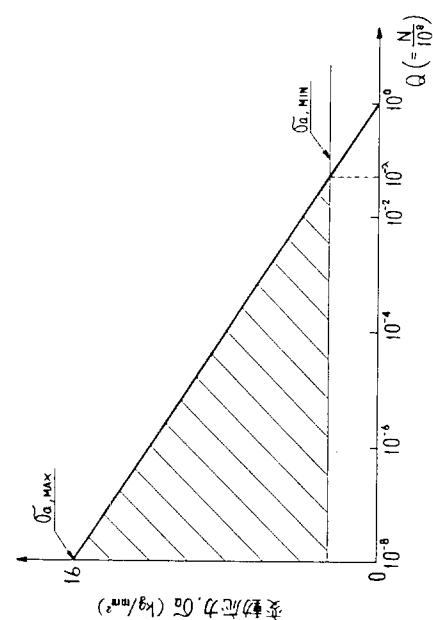


図 4.2.4 $\sigma_{a, MAX}$ および $\sigma_{a, MIN}$ の説明

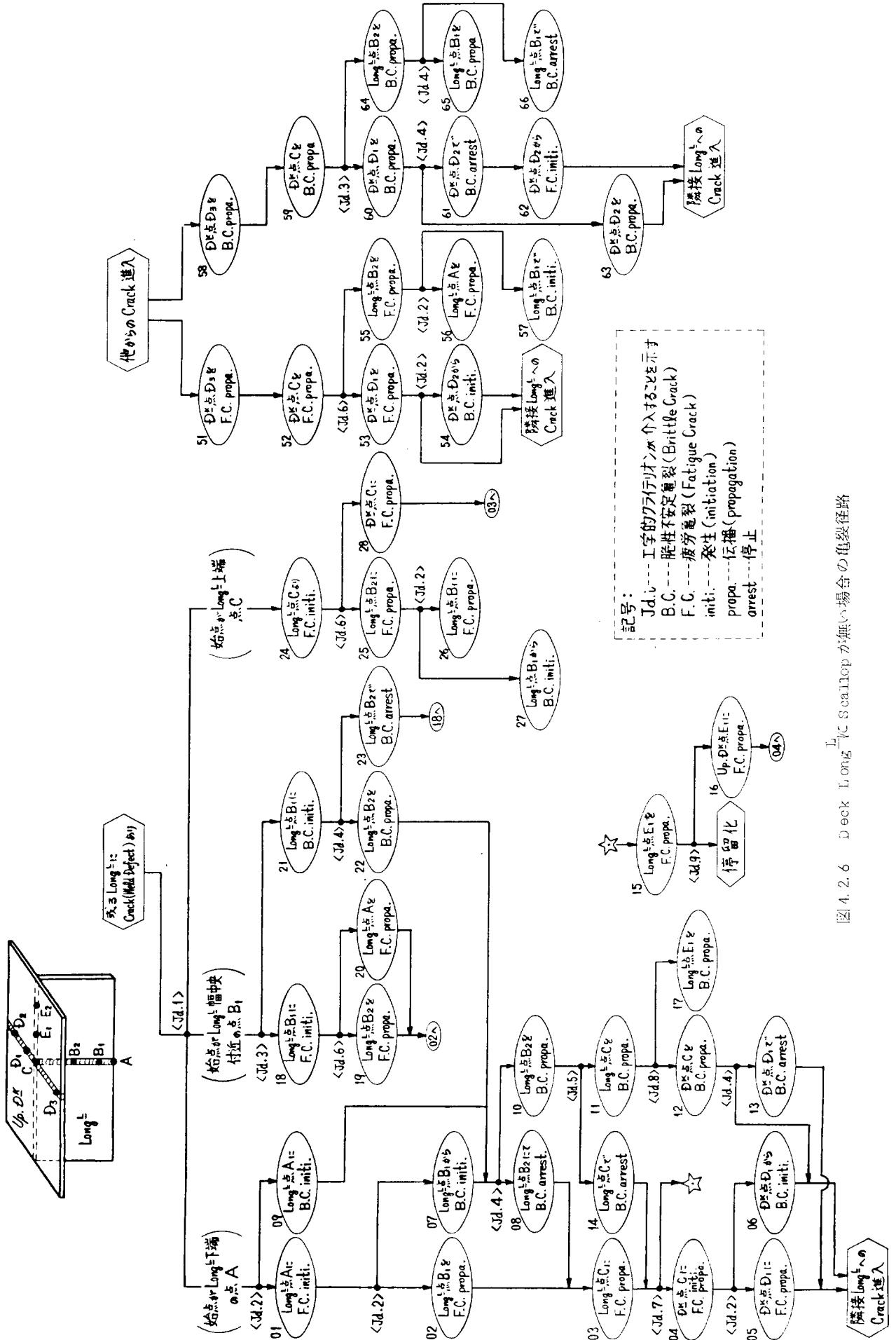


図 4.2.6 Neck Long^L/C Scallopsがない場合の伝播経路

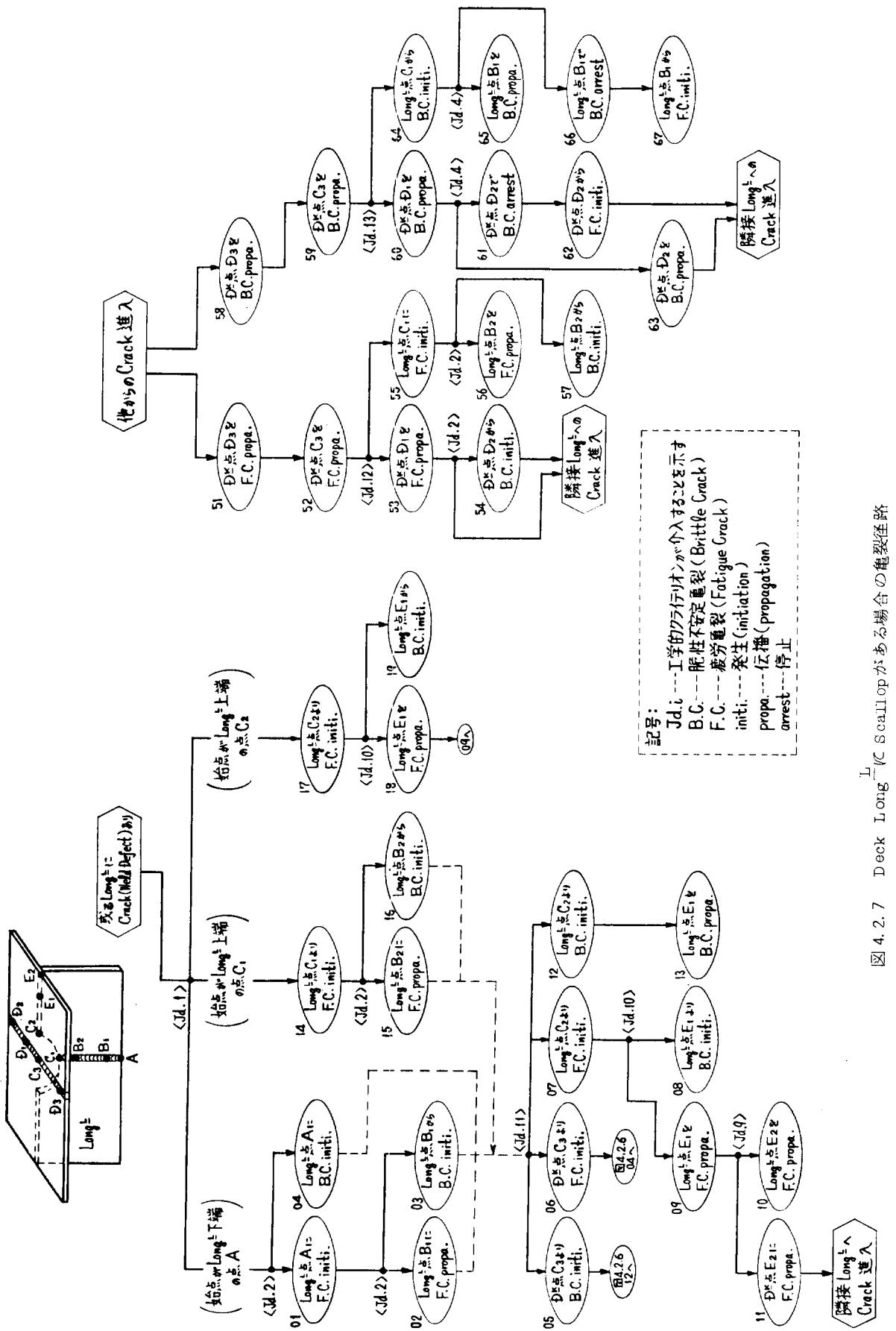


図 4.2.7 Deck Long_L VC Scale opがある場合の亀裂経路

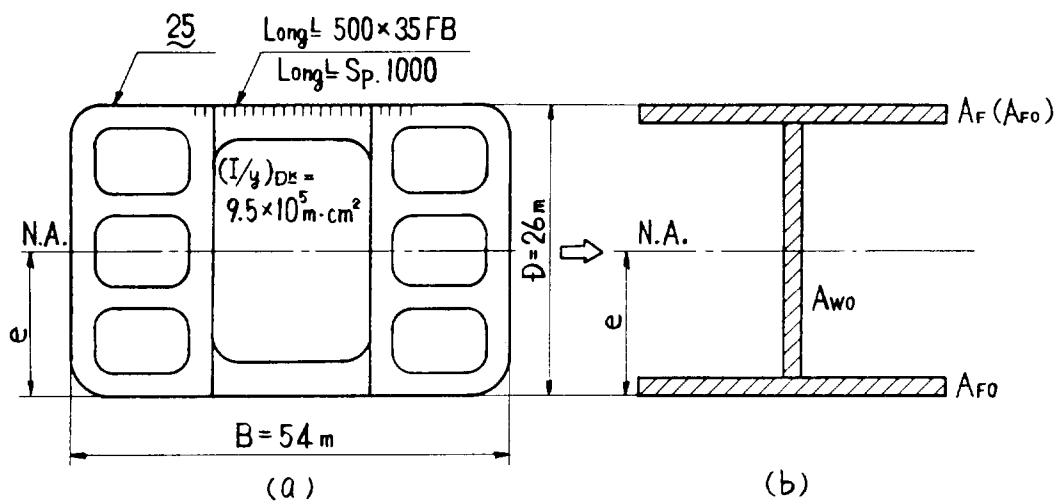


図 4.2.8 船殻断面構造の簡略化

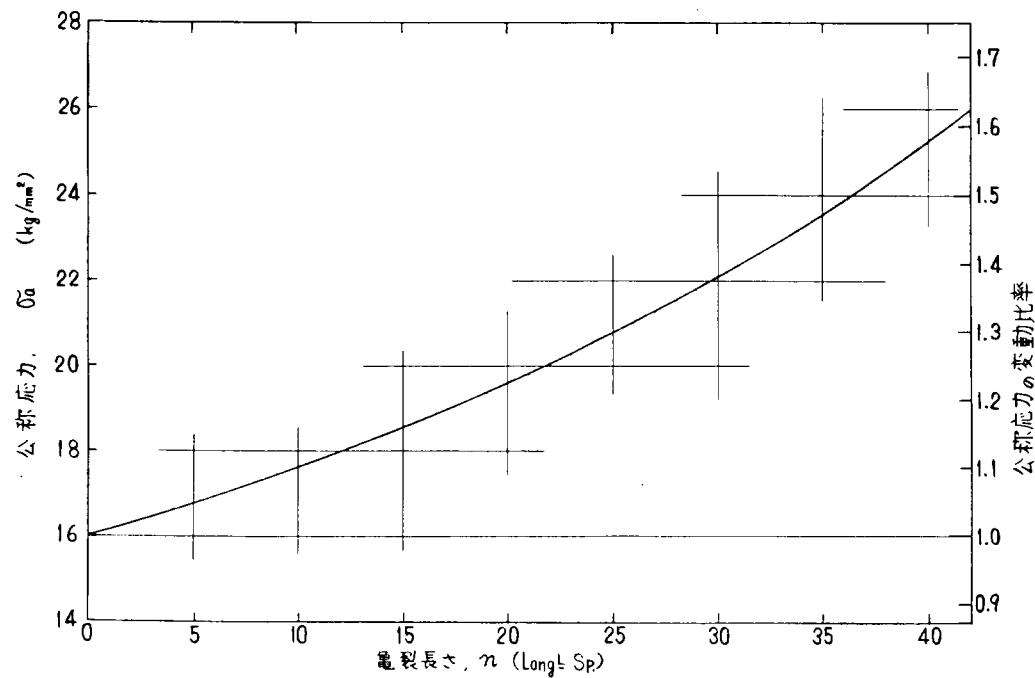


図 4.2.9 亀裂の長大化に伴なう公称応力変動

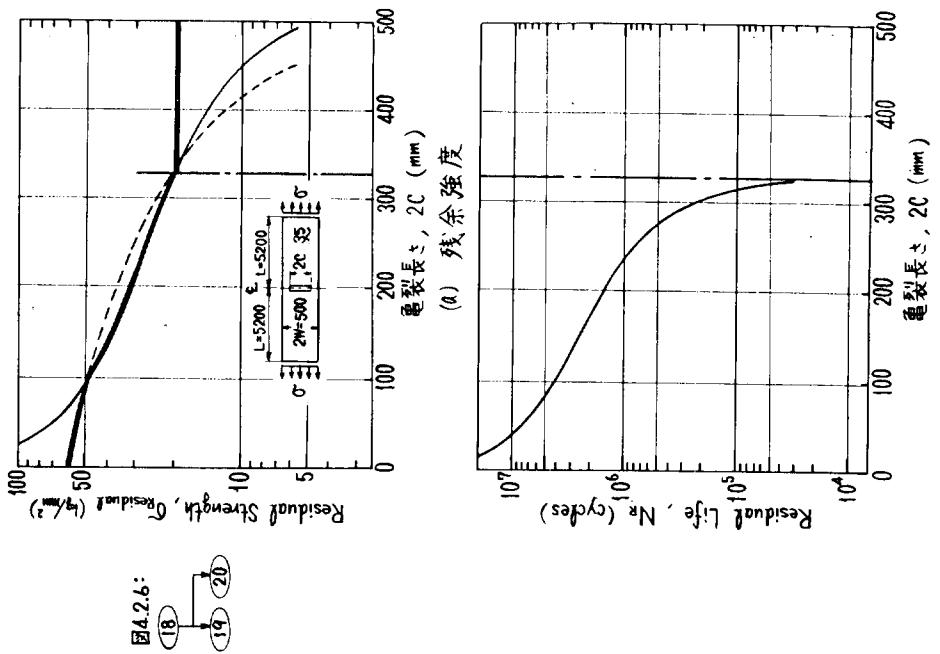
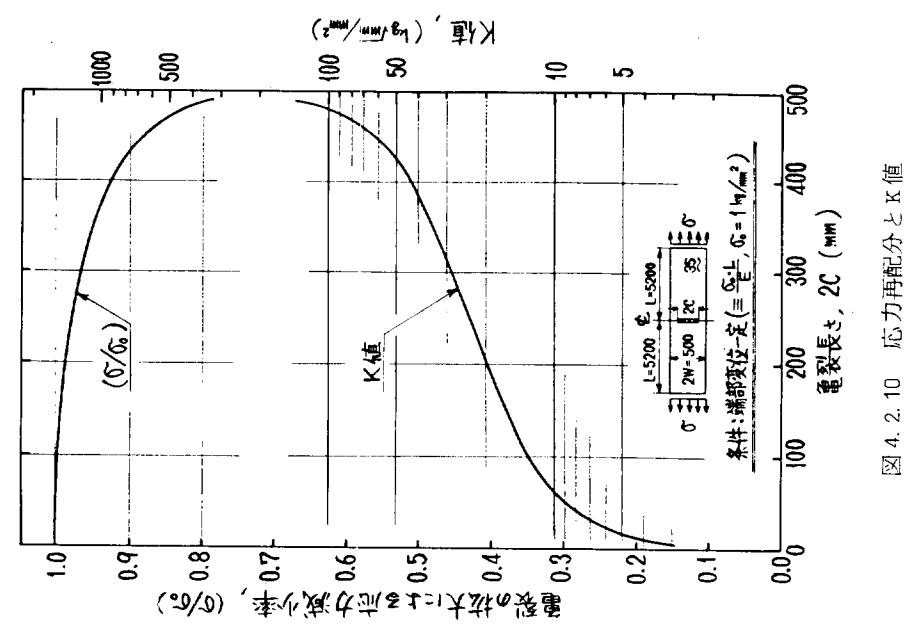


図4.2.6:



(b) 残余寿命

図4.2.11 残余強度と残余寿命

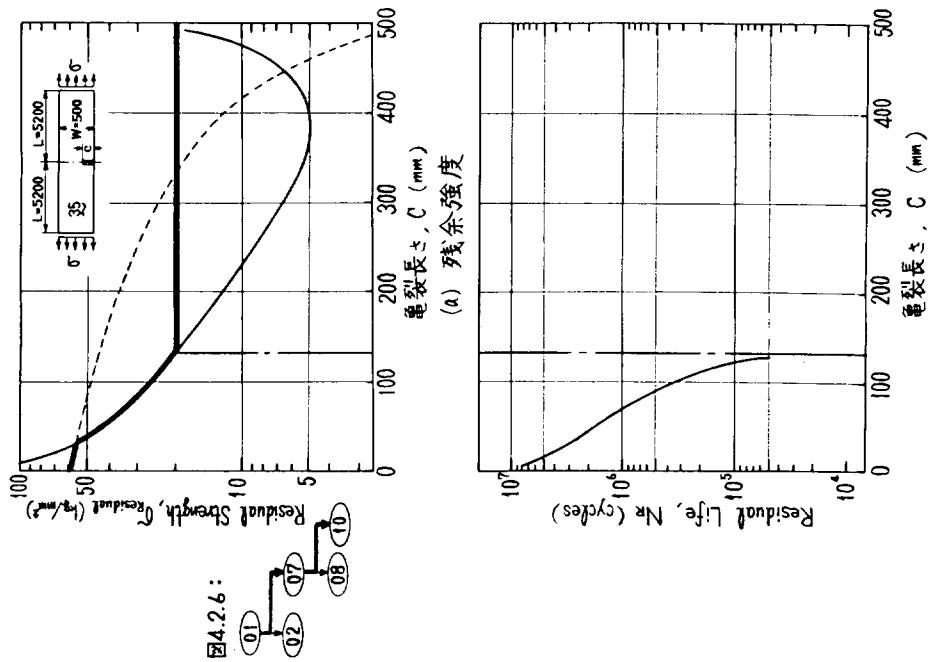
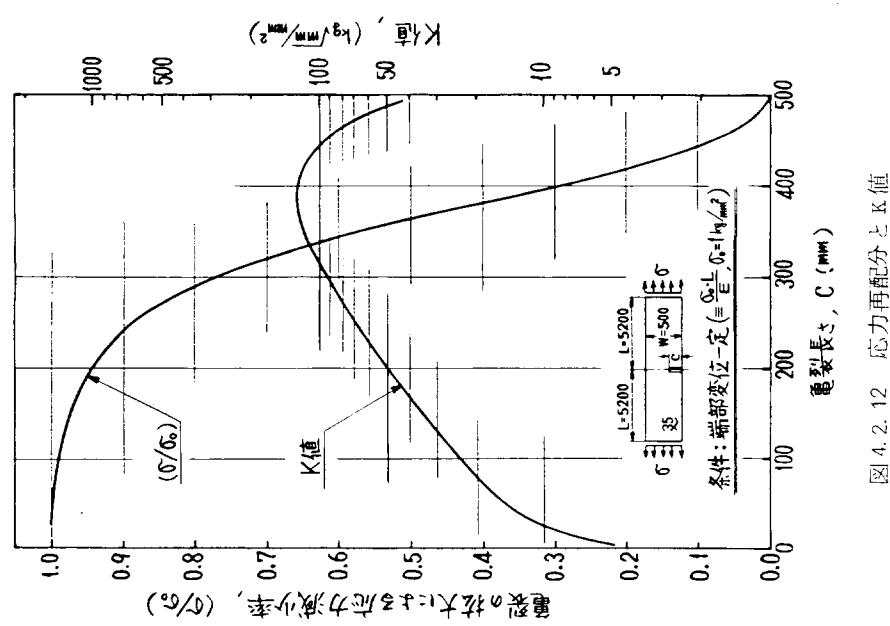


図4.2.13 残余強度と残余寿命



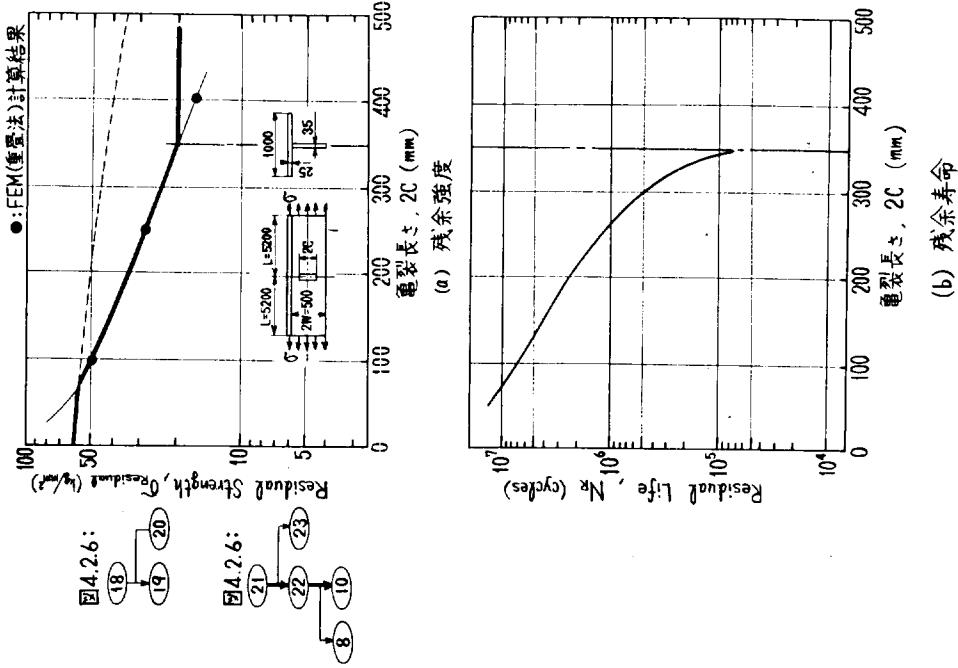


図 4.2.15 残余強度と残余寿命

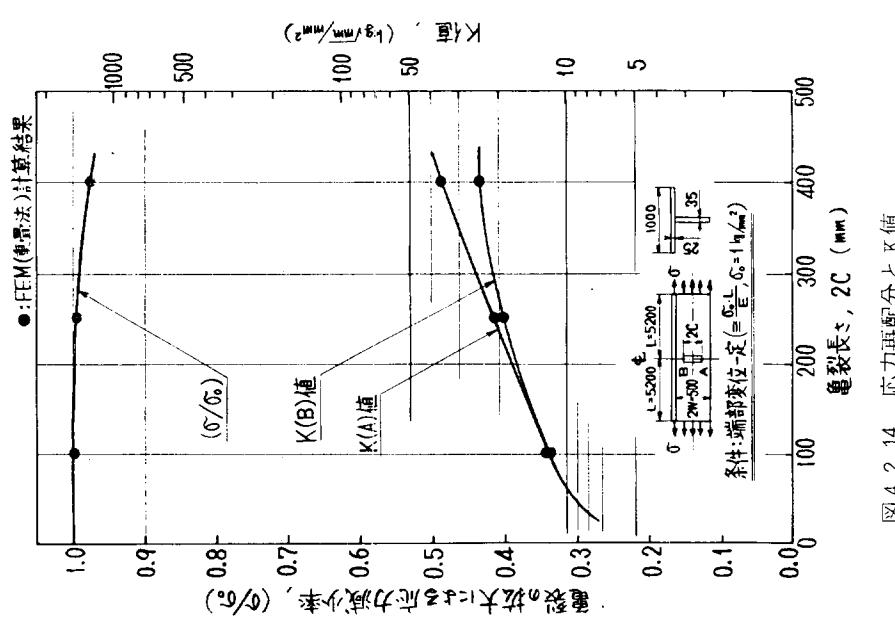


図 4.2.14 応力再配分とK値

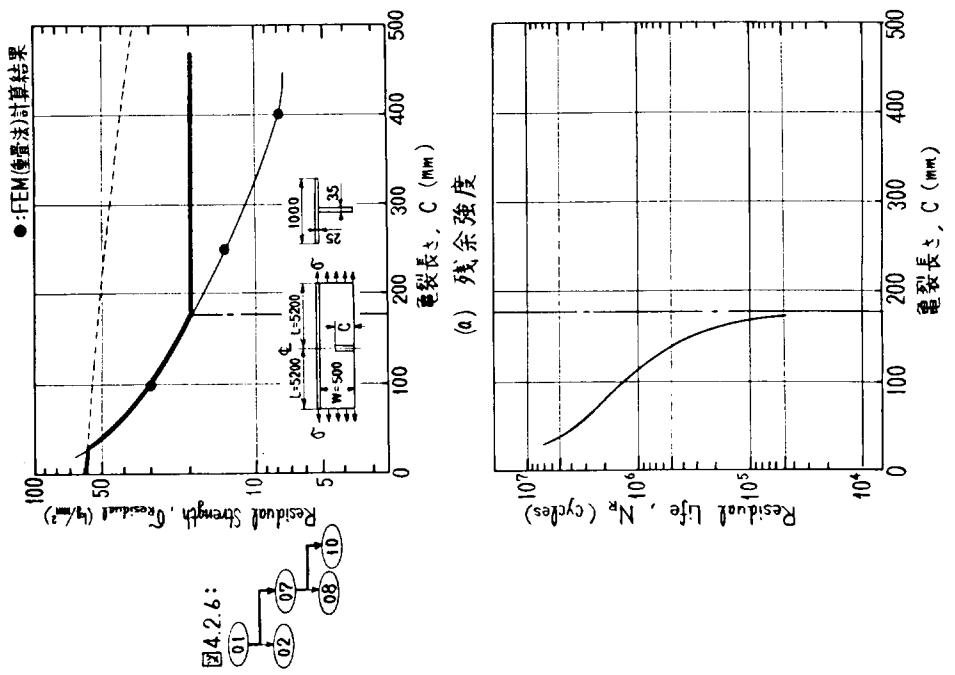


図 4.2.17 残余強度と残余寿命
(b) 残余寿命

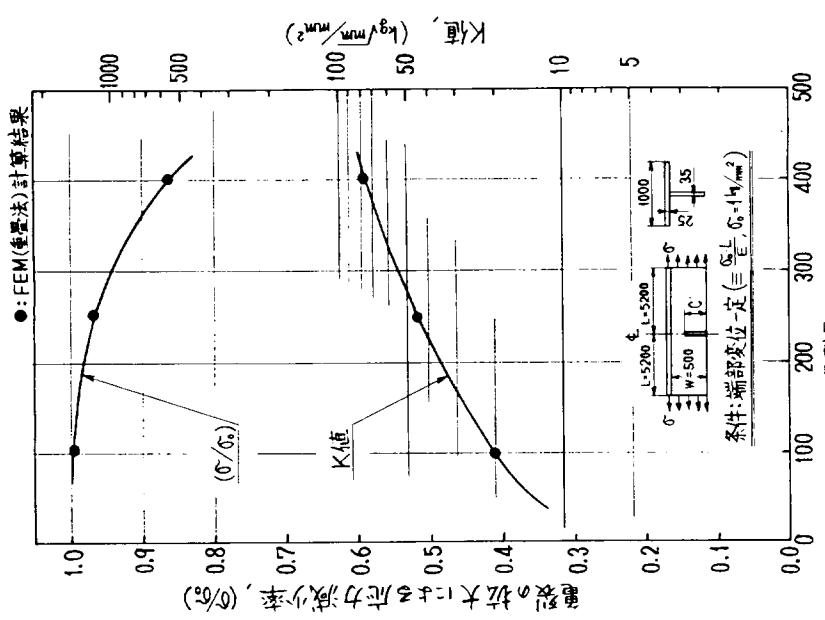


図 4.2.16 残余応力再配分と K 値

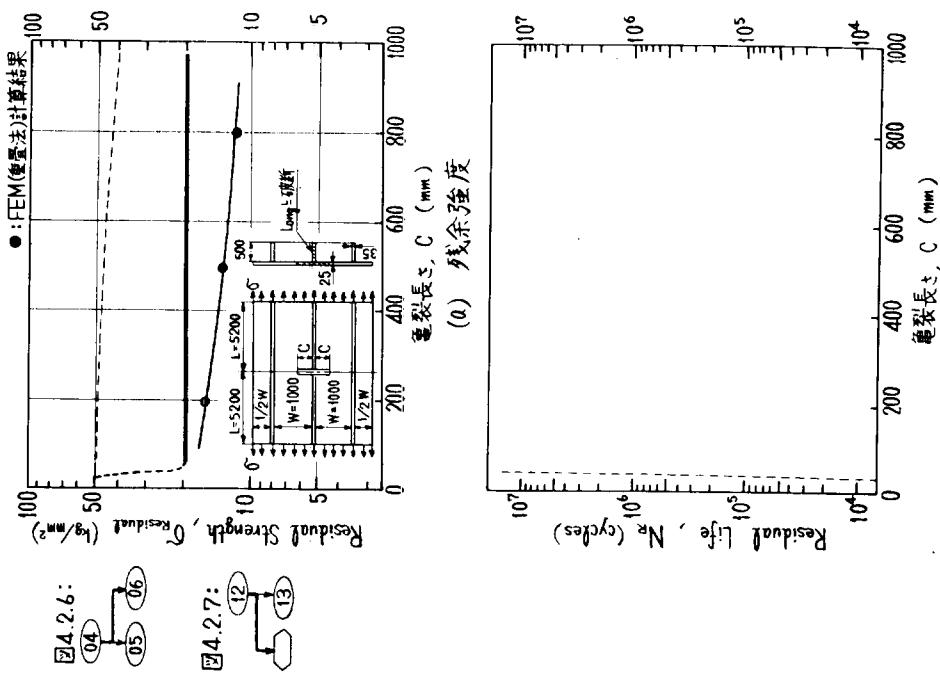


図 4.2.19 残余強度と残余寿命

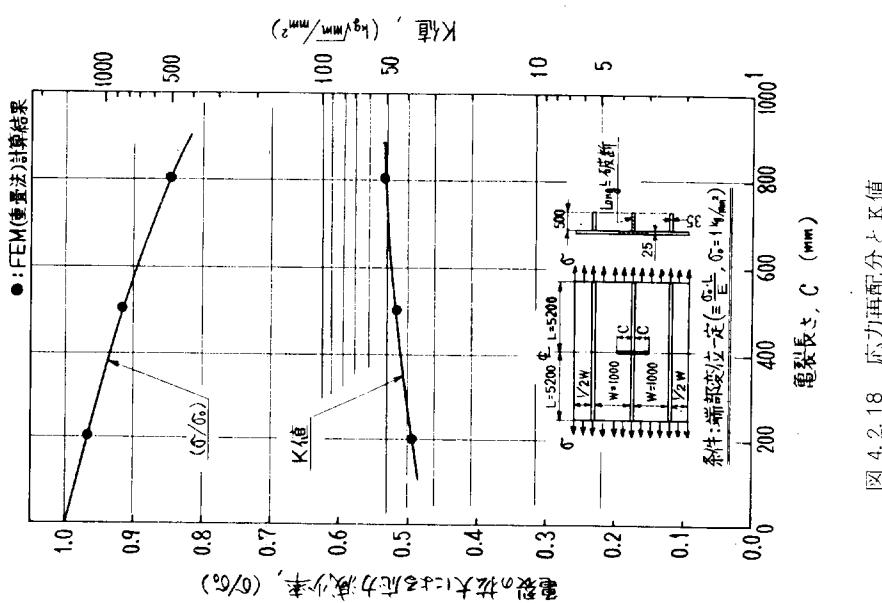


図 4.2.19 残余強度と残余寿命

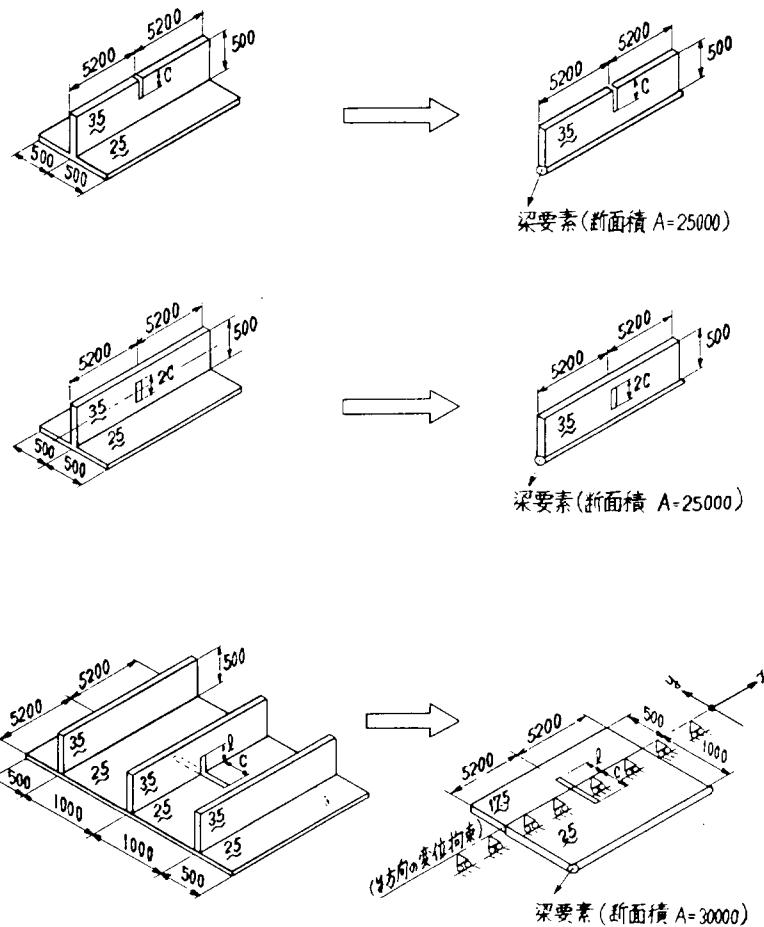


図 4.2.20 FEMにおける近似モデル

4.3 プラケット先端部のCase Study

本節においては Catastrophic な破壊という観点からはデッキ部ほど重要でないが、前節より多少荷重系の複雑な鉱石運搬船の棚板上部（図 4.3.1 の左下部）についての Case Study を行なう。

4.3.1 構造モデルと外力系

図 4.3.1 のモデルを図 4.3.2 のように取り出し、この構造に作用する外力の境界条件を図 4.3.3 および図 4.3.4 のように考える。この場合外力は統計量であり、全体解析より構造モデルの境界力を求めなければならない。ここでは超過確率 $Q = 10^{-3}$ レベルの外力に対応するものとして吃水が±6m の範囲の変化に対応する変動荷重（図 4.3.4）を想定することにする。しかしこれらの境界力間の位相関係等は不明であるので簡単に重畠するものとした。

4.3.2 Case Study のフローチャート

図 4.3.2 の構造において、想定しなければならないと考えられる亀裂は、これまでの実績より考慮して、④面材端部よりプラケットに入る亀裂、⑤棚板のすみ内溶接近傍で面材から流れ込む応力が集中する個所に生じる亀裂、⑥プラケットエンドのソフト・トウ部より棚板へ入る亀裂、⑦プラケットエンドのトウ部より棚板とプラケットすみ内溶接部を沿う亀裂、の 4 つであろう。

そこで Case Study に先立ち亀裂の進展に伴ない、どのような流れで亀裂問題を取扱わなければならないのか

を考え、それを表にした。その検討結果を表4.3.1に示す。表に示したように具体的にCase Studyを行なうことを考えると仮定、仮定の連続で問題を解かなければならないのが現状である。特に亀裂が棚板の近傍に進展した場合の取扱いに関しては今後解明すべき重要問題の1つである。

以下のCase Studyにおいては④の面材端部よりプラケットに入る亀裂を取扱う。

4.3.3 面材端部よりの亀裂に対するCase Study

亀裂の入る方向を定めるため、まず亀裂のない状態でFEMにより構造解析を行なった（step 1）。境界力は図4.3.3、図4.3.4に示した荷重を個々に与えた。次に亀裂が入ったモデル（step 2以後）では境界力の変りにstep 1で求まった境界変位量を強制変位として与えていくようにした。

問題となる個所は応力集中部（面材端部あるいは亀裂先端）であるため一般にFEMでは要素の大きさを非常に細かくしなければならない。しかしながら本Case Studyで取上げるような大きな構造では、応力集中部を細かく要素分割すると計算時間が膨大となる。このような観点からできるだけ要素分割を大きくして、しかもある程度の精度を得るためにアイソパラメトリック要素を使用することにした。

このアイソパラメトリック要素の形状関数を8節点平面要素について示すと次のようである（図4.3.5参照）。

$$\begin{aligned} x &= \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta) x_i \\ y &= \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta) y_i \end{aligned} \quad \dots \quad (4.3.1)$$

$$\begin{aligned} N_i &= [(1+\xi\xi_i)(1+\eta\eta_i) - (1-\xi^2)(1+\eta\eta_i) - (1-\eta^2)(1+\xi\xi_i)] \xi_i^2 \eta_i^2 / 4 \\ &\quad + (1-\xi^2)(1+\eta\eta_i) (1-\xi_i^2) \eta_i^2 / 2 \\ &\quad + (1-\eta^2)(1+\xi\xi_i) (1-\eta_i^2) \xi_i^2 / 2 \end{aligned} \quad \dots \quad (4.3.2)$$

ただし、 $-1 \leq \xi \leq 1, -1 \leq \eta \leq 1$

コーナーの節点（1.2.3.4）は $(\xi_i, \eta_i = \pm 1)$ 、中間節点は $(\xi_i, \eta_i = 0)$ である。そして中間節点5と8を辺1-2および辺1-4の $\frac{1}{4}$ の位置にとれば、節点1に対しては $1/\sqrt{r}$ （r：節点1からの距離）の特異性を要素内で示し、亀裂問題に有効とされている。¹⁾

(1) Step 1

構造解析に使用した要素分割を図4.3.6に示す。面材および棚板は板厚が板幅の大きさであるとした平面要素を使用し、外板は有効幅を考慮して $\frac{1}{2}$ トランスペースに対応する棒要素とした。stepは亀裂を含まない要素であるので要素1.4および5（図4.3.6参照）の中間節点は、他の要素と同じく、辺 $\frac{1}{2}$ のところにもうけた。

FEM解析による面材端部付近の主応力分布を図4.3.7、図4.3.8に示す。図4.3.7は静的荷重に対応する値であり、図4.3.8は成分別の動的荷重に対応するものである。図中数字に○印を付して示してあるのは要素番号（図4.3.6参照）に対応する。これより各成分に対応する主応力方向は、境界が対象とする要素からかなり離れているためかほとんど変化していない。すなわち境界力として水圧（a.s）、引張荷重（a.p）、曲げ荷重（a.M）、剪断荷重（a.F）を別個にくわえても主応力方向はほぼ一定であり、亀裂の進行方向も荷重の組合せ方によりさほど変化しないと考えられる。

つぎに面材端部とプラケットの交点を原点として、X軸から反時計回りに角度 θ をとって、 $r - \theta$ （r：原点からの距離）座標で $\sigma_{\theta}, \sigma_r$ を求めた。図4.3.9には $r = 1\text{mm}$ における σ_{θ} 分布を示すが、要素分割した境界では σ_{θ} が不連続になっている。この結果から σ_{θ} の最大値は要素4と要素1の境界（すなわち $\theta = 270^\circ$ ）付近か、あるいは要素4内の $\theta = 220^\circ$ 付近のいずれかとなる。要素の境界で応力の不連続が生じることはFEMの宿

命であるが、このように境界での応力をどのように評価するかが問題となる。

そこで図 4.3.10 には同図中に示す要素分割において、1 と 4 の要素の境界を点線から実線に変えて、再度計算を行なった結果を示した。ただし境界力としては static-(dF+dP+dM+dS) を与えた。この場合図 4.3.9 と同様要素境界で不連続な応力分布となっているが、4 の要素内の σ_y の方が大きい。いずれの要素分割によつても σ_y の最大となる位置はあまり変動しないことからこの場合の σ_y 最大方向は $\theta = 220^\circ$ 付近にあり、たとえある要素分割による σ_y の最大値が計算上、境界線上になつたとしても検討を要することがわかる。

ところで亀裂の進行方向に関しては大きく別けて次の3つの仮説がある。

- ① σ_y 最大説 2), 3), 4) …… σ_y が最大となる方向へ亀裂が進展する。 σ_y は簡単には Stress Intensity Factor K を用いて表わされる。しかし亀裂先端からある微小距離 r_0 離れた位置の σ_y を用いるという説もある。
- ② ひずみエネルギー密度最小説 (S 最小説)^{4), 5), 6)} …… 亀裂先端近傍の微小要素のひずみエネルギー密度の係数 S が最小となる方向に亀裂が進展する。S は亀裂先端近傍における微小要素のひずみエネルギーを dW 要素の断面積を dA とすれば、

$$S = \pi r \frac{dW}{dA} \quad \dots \dots \dots \quad (4.3.3)$$

で定義される量であり、S についても亀裂先端からある微小距離 r_0 離れた位置の値を用いる方がよいという提案もなされている。

- ③ ポテンシャルエネルギー解放率最大説 (G or J 最大説)^{7), 8), 9), 10)} …… ポテンシャルエネルギー解放率が最大となる方向へ亀裂が進展する。

上記の3 仮説は単純な平板試験片の場合ほとんど同じ推定結果を与えることが知られている。

ところで Step 1 においては亀裂問題を取扱っていないので③による検討はできない。そこでここでは σ_y 最大説に立脚して考えてみる。図 4.3.10 には $r = 1\text{mm}$ における剪断応力 $\tau_{y\theta} = 0$ となる位置と σ_y が最大となる位置が一致しており、この傾向は図 4.3.9 においても同様である。 $\tau_{y\theta} = 0$ ということは主応力方向に直角な方向であり、直感的には亀裂の進行方向になると想像されるが、本質的には σ_y 最大説と $\tau_{y\theta}$ が 0 の方向に亀裂が進行するということとは同一でない。しかし開口部などで亀裂が最初に進行していく方向に限定すれば、同一の結果となっているのかも知れない。このことについてはさらに今後の研究にまたねばならない。また σ_y の最大位置は図 4.3.10 に示したように r のとり方により変化する。亀裂が拡大していく場合 r_0 は約 0.05mm なる値を便宜上用いて実験値とよい一致をみている³⁾ という報告もある。しかし開口部などの場合、亀裂の拡大の場合とは異なるので σ_y の最大位置ははたして $r_0 = 0.05\text{mm}$ として考えてよいかどうかも問題となろう。

図 4.3.11 には $\theta = 220^\circ$ 一定として r を変化させた場合の σ_y 分布を示す。要素分割を図 4.3.10 のように少し変化させると σ_y が r の小さいところで特に大きくなっている。もともと FEM は応力集中のある個所の解析には問題があり、亀裂問題で応力、ひずみの特異性を考慮した種々のサブストラクチャーが開発されているようだ。本例題のようなものについても大きな要素分割である程度の精度が得られるような手法を開発する必要があろう。

(2) Step 2

Step 1 の結果より $\theta = 221^\circ$ の方向に面材端部より 10mm の亀裂を入れた。その要素分割を図 4.3.12 に示す。図は図 4.3.6 の要素 3, 4, 7, 8 の領域に対応している。亀裂先端を含む要素では先に述べたように $1/\sqrt{r}$ の特異性をもたすために中間節点を辺の $1/4$ の所にもうけた。境界条件としては Step 1 で得た境界上の変位量を強制変位として与えた。図 4.3.13 には Static の荷重を与えた場合に対応する主応力分布を示す。一方図 4.3.14 には $r = 1\text{mm}$ における σ_y 分布を示す。Step 1 と同様要素境界上で応力分布に不連続が生じている。図中に \downarrow 印を示したのは σ_y が極大値を示した位置である。Step 1 の図 4.3.9 と図 4.3.10 の傾向から考えてこの位置は

実際の σ_θ 最大の位置と考えられる。

つぎに亀裂先端近傍の特異性が得られているかをチェックした。図4.3.15にはその一例を示す。亀裂先端近傍では $1/\sqrt{r}$ の特異性を有していることがわかる。

ところで σ_θ 最大説における $r_0 \rightarrow 0$ とした Erdogan²⁾ の解では

$$K_I \sin \varphi + K_{II} (3 \cos \varphi - 1) = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (4.3.4)$$

ただし、 φ ：き裂線上を0とした反時計回りの角度

K_I ：引張型（モードI）に対する stress intensity factor

K_{II} ：剪断型（モードII）に対する stress intensity factor

が成立する方向が σ_θ の最大となる方向である。 K_I, K_{II} 値を求めるためには亀裂線上の σ_θ 分布、 $\tau_{\theta\theta}$ 分布が必要となるが、この stepにおいては亀裂線上が丁度要素境界のため、ここで不連続な値を示している。そこで亀裂先端要素の左右の要素における $\theta = 221^\circ$ での $\sigma_\theta, \tau_{\theta\theta}$ の平均より K_I, K_{II} を求めた。その結果は static- (dF+dP+dM+dS) の境界条件に対して $K_I = 214 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-\frac{3}{2}}$, $K_{II} = -61 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-\frac{3}{2}}$ である。(4.3.4) 式に代入して $\varphi = 31^\circ$ となるから $\theta = 252^\circ$ の方向が σ_θ 最大となる方向となる。ところが図4.3.14と比較すると極大値を示す方向とも一致していない。これは亀裂線上に要素境界をもうけたため、 K_I, K_{II} 値にかなり大きな誤差が生じたためと考えられる。

参考文献

- 1) Roskdy S. Barsoum ; On the use of isoparametric finite element in linear fracture mechanics , To be published Int. Journ. Numerical Method Eng. (1975)
- 2) F. Erdogan and G.C.Sih : On the Crack Extension in Plates under Plane Loading and Transverse shear, Trans. ASME, J. Basic Eng. 85 D (1963)
- 3) J.G.Williams and P.D.Ewing : Fracture under Complex Stress -- The Angled Crack Problem, Int.J.Fract. Mech., vol 8, #64 (1972)
- 4) G.C.Sih and M.E.Kipp : Discussion on "Fracture under Complex Stress -- The Angled Problem, Int.J.Fract. Mech., vol 10, #62 (1974)
- 5) G.C.Sih ; Some Basic Problem in Fracture Mechanics and New Concepts, J. Eng. Fract-Mech. vol 5, #62 (1973)
- 6) G.C.Sih (Editor) ; Methods of Analysis and Solutions of Crack Problems, Noordhoff International Publishing (1973)
- 7) G.R.Irwin ; Encyclopedia of Physics, VI (Fracture), Springer-Verlog, Berlin (1958)
- 8) G.P.Anderson, V.L.Ruggles and G.Stibor ; Use of Finite Element Computos Programs in Fracture Mechanics, Int. J Eng.Mech., Vol 7, (1971)
- 9) J.Coughlem and B.I.G.Barr ; Fracture Path Prediction, Int. J.Fract., vol 10 (1974)
- 10) T.K.Hellen and W.S.Blackburn ; The Calculation of Stress Intensity Factors for Combined Tensile and Shear Loading, Int.J.of Fract., vol 11, #64 (1975)

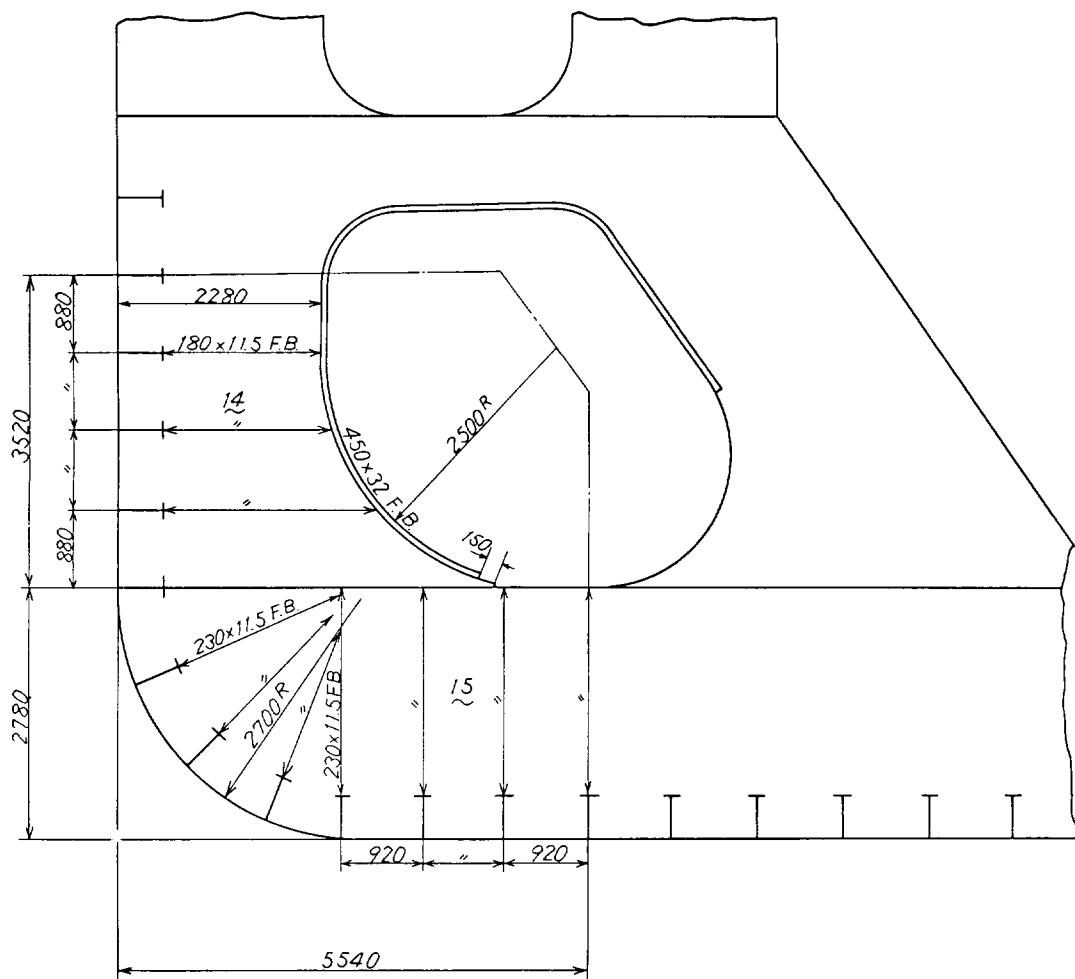


図 4.3.1 トランスバルクヘッドのコーナ部

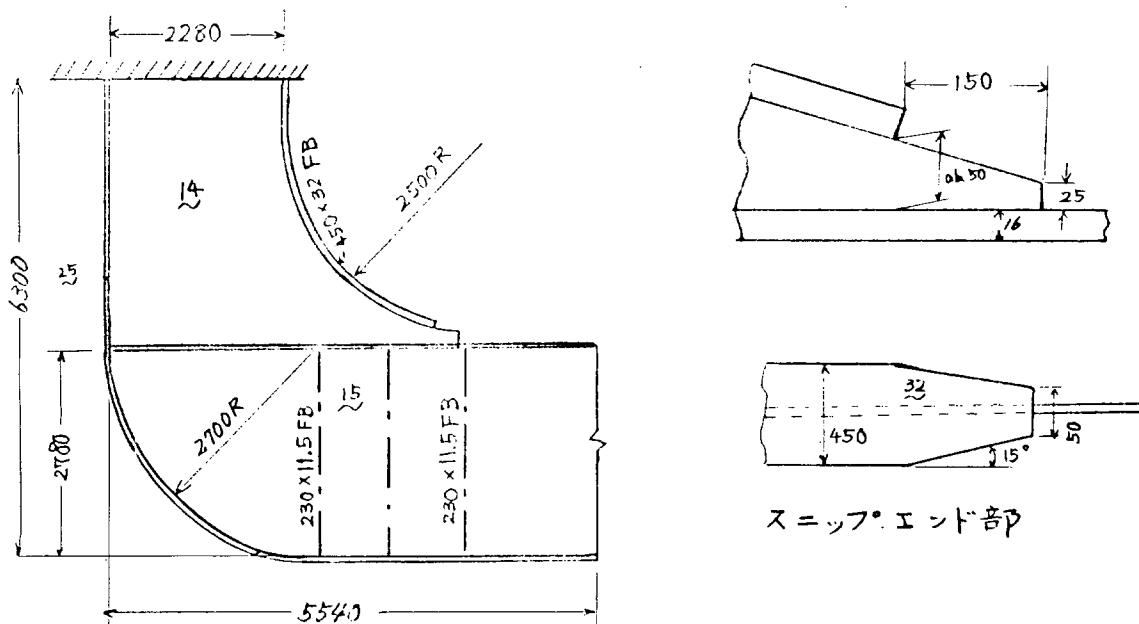


図 4.3.2 Case Study で取り上げた対象構造主要寸法

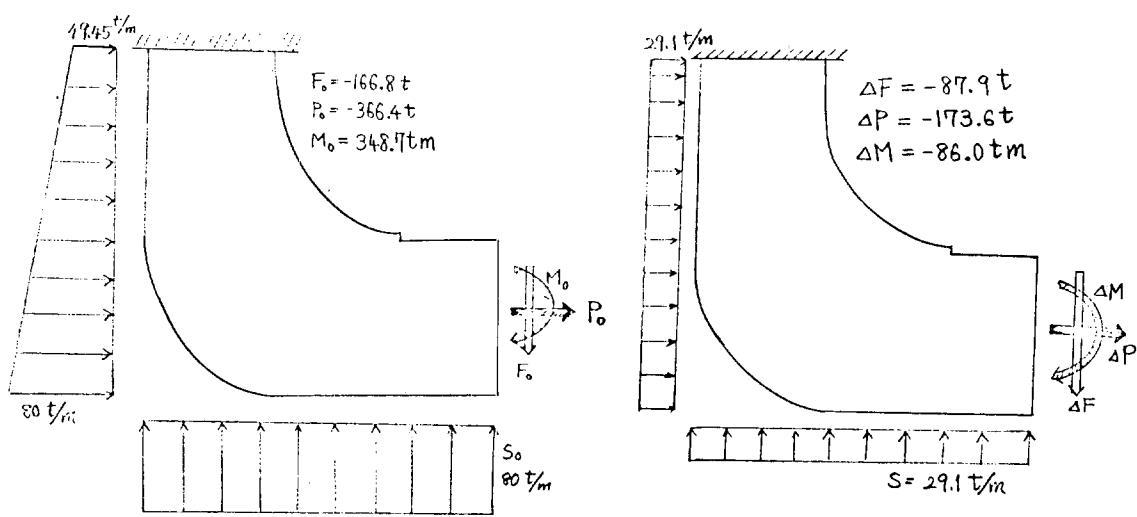


図 4.3.3 静水中の横強度計算から
求まる境界条件

図 4.3.4 吃水が±6 m変化する場
合に応する境界条件

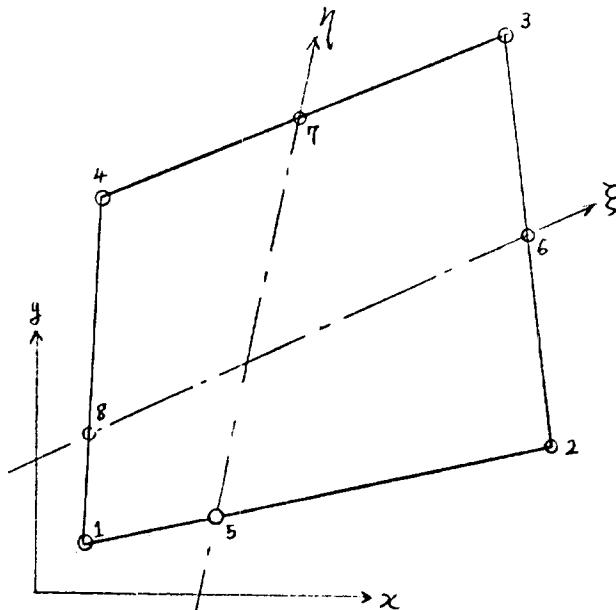
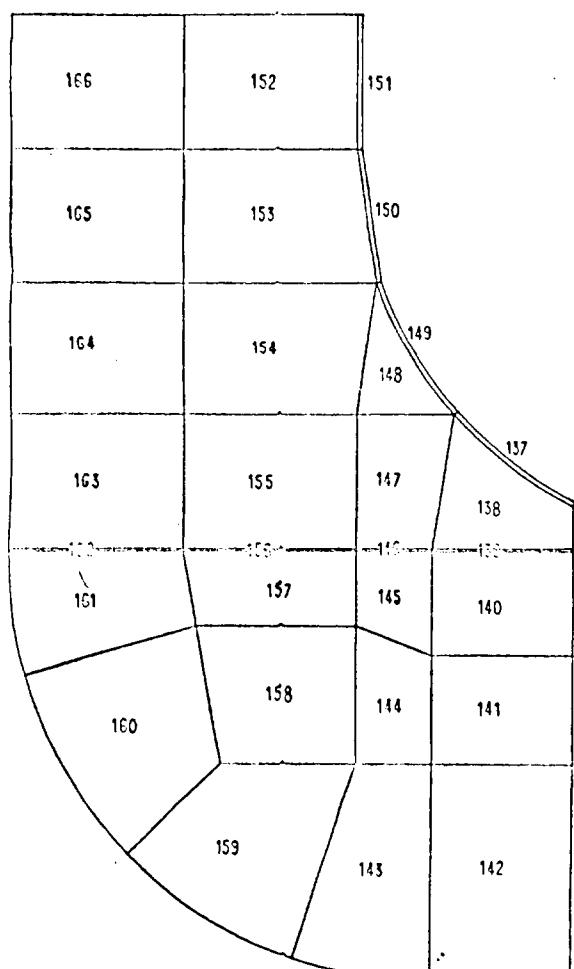


図 4.3.5 8節点アイソパラメトリック要素の座標系

28	27	6	5
29	26	7	4
30	25	3	2
31	24	9	11
32	23	22	21
33	34	35	36
		37	38
		39	40
		41	42
		43	44
		45	46
		47	48
		49	50
		51	52

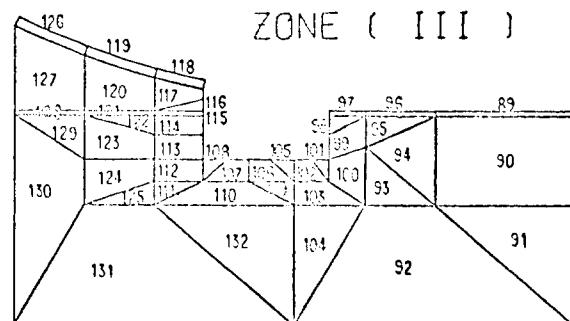
SNIP END PART.



ZONE (I).

88							
87							
85							
84							
83							
82							
81							
80							
79							
66							
65							
67							
68							
69							
60							
51							
52							
53							
54							
55							

ZONE (III)



ZONE (II).

136	133
135	134

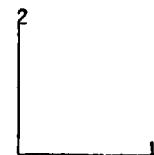


図 4.3.6 要 素 分 割

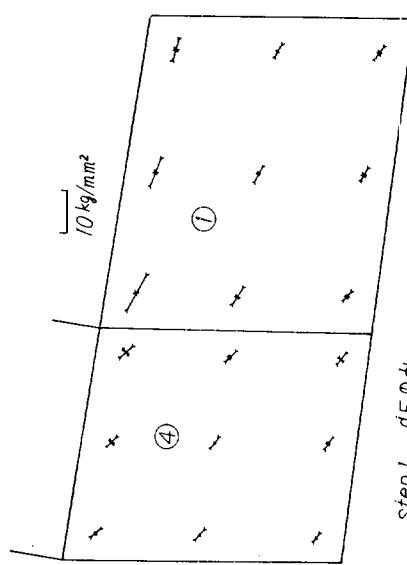


図 4.3.8 主応力分布 dynamic 成分 (step 1) つづき

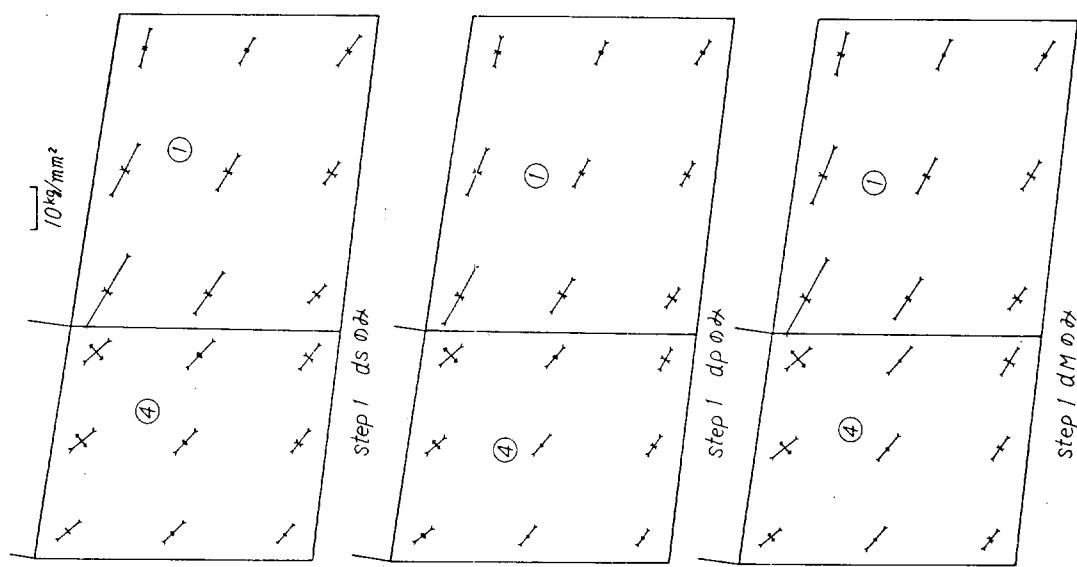


図 4.3.8 主応力分布 dynamic 成分 (step 1)

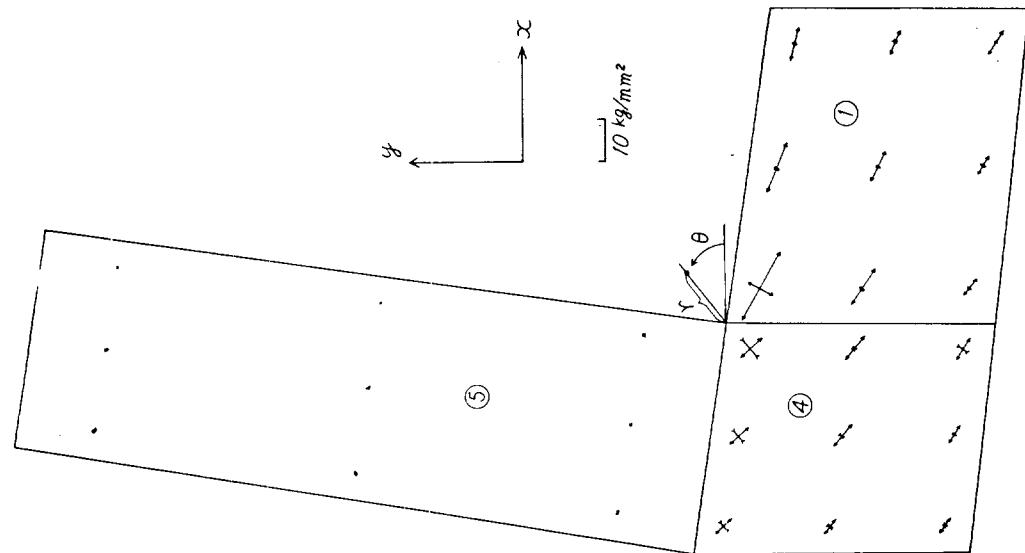


図 4.3.7 主応力分布 static 成分 (step 1)

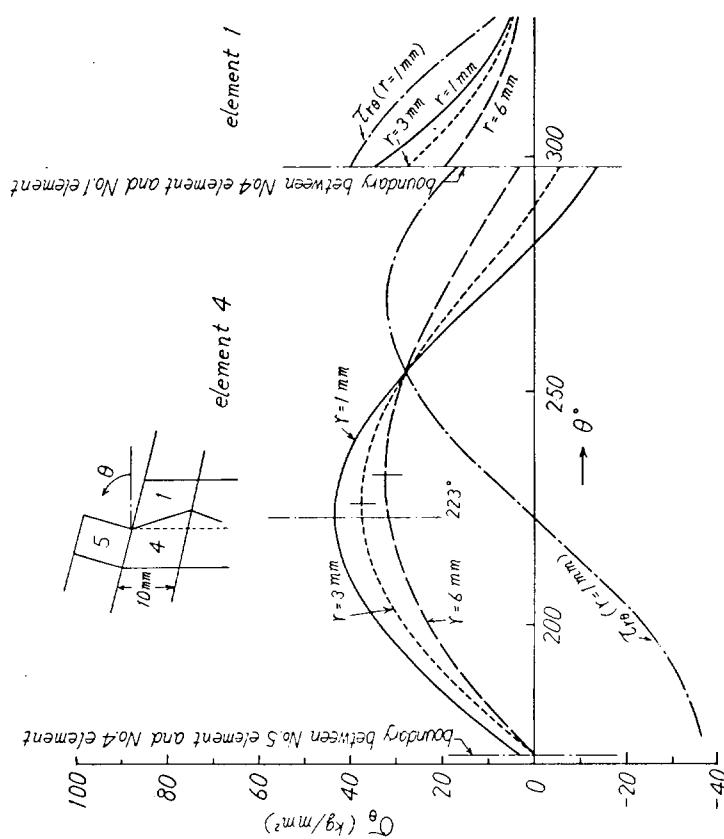


图 4.3.10 σ_θ 分布 指界条件 (static—d F—d M—d S)
Modified Mesh Devision

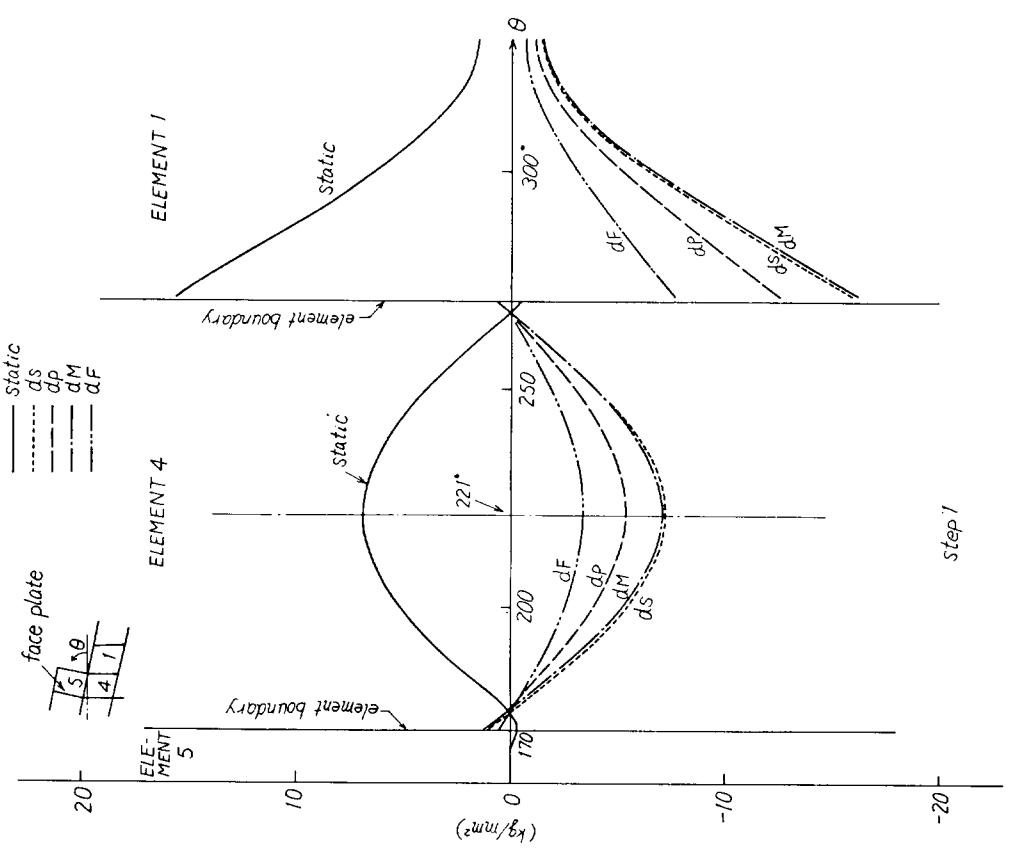


图 4.3.9 σ_θ 分布 $r = 1 \text{ mm}$

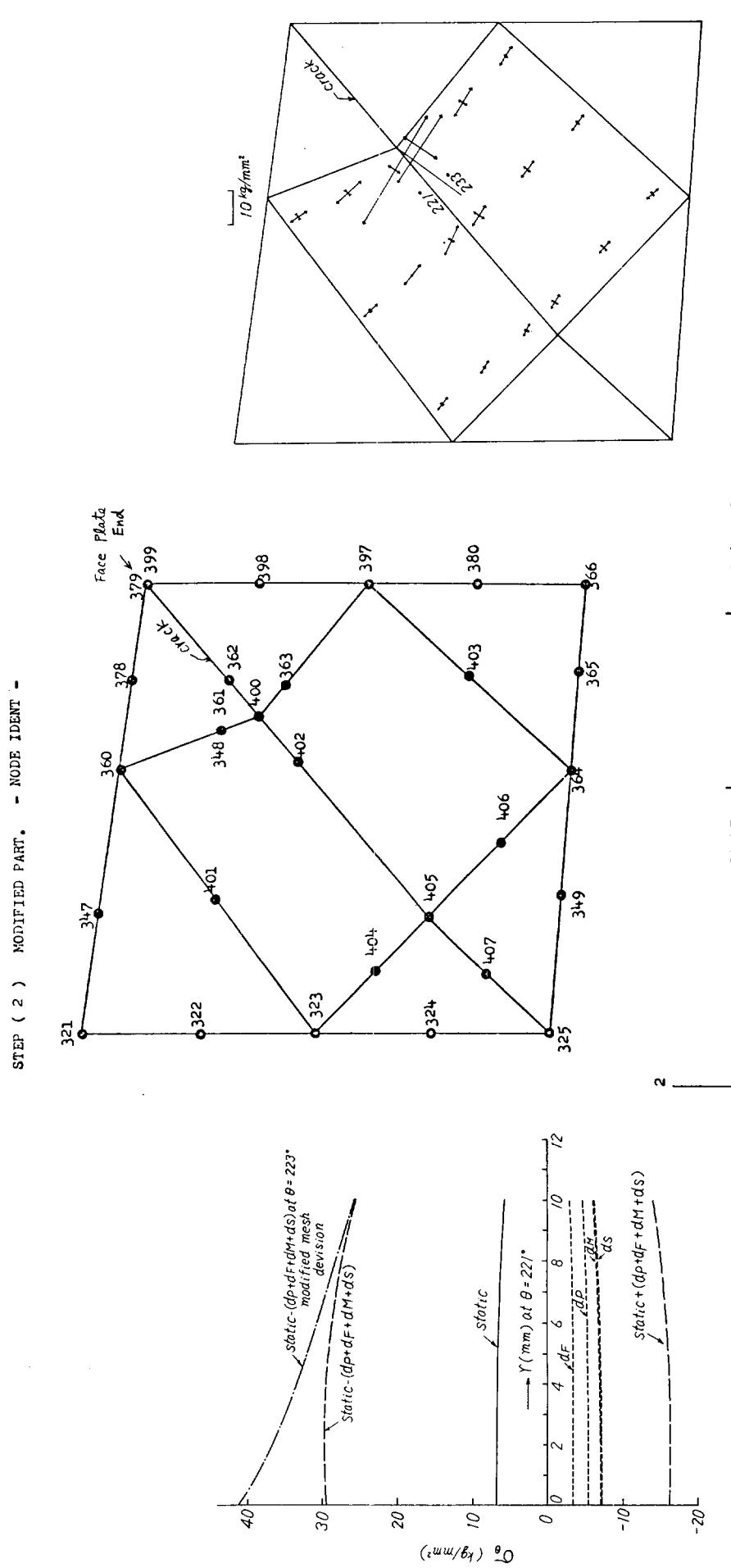


図 4.3.11 σ_θ 分布の γ 依存性 ($\theta = 221^\circ$)

図 4.3.12 クラック近傍の要素分割

図 4.3.13 step 2 static 主応力分布

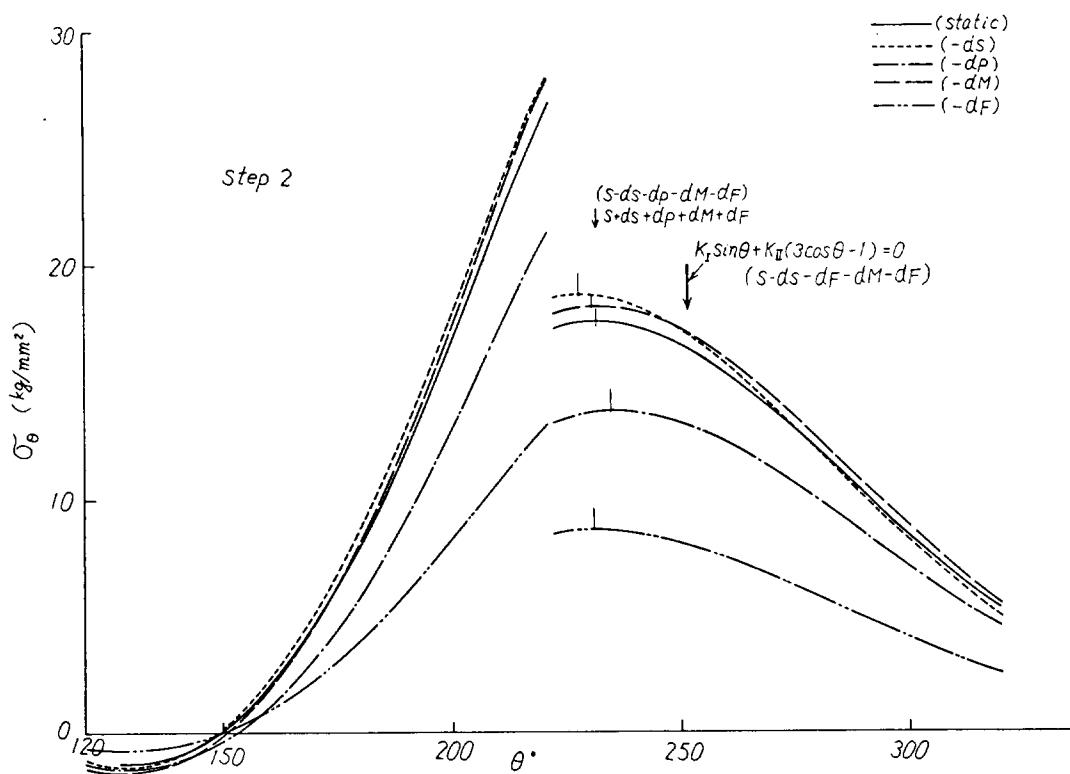


図 4.3.14 $\gamma = 1 \text{ mm}$ での σ_θ 分布 (step 2)

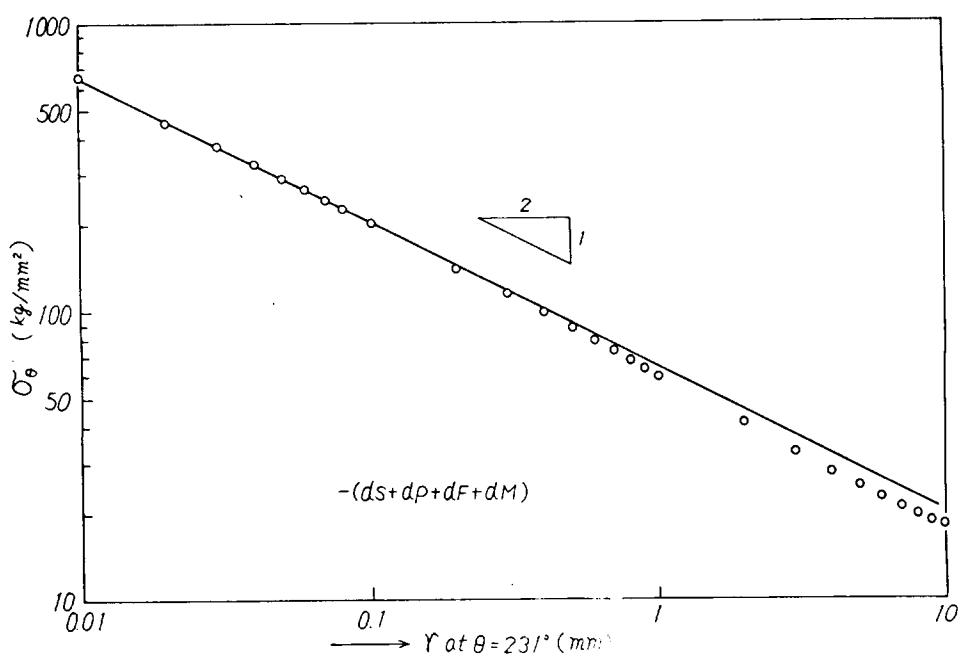
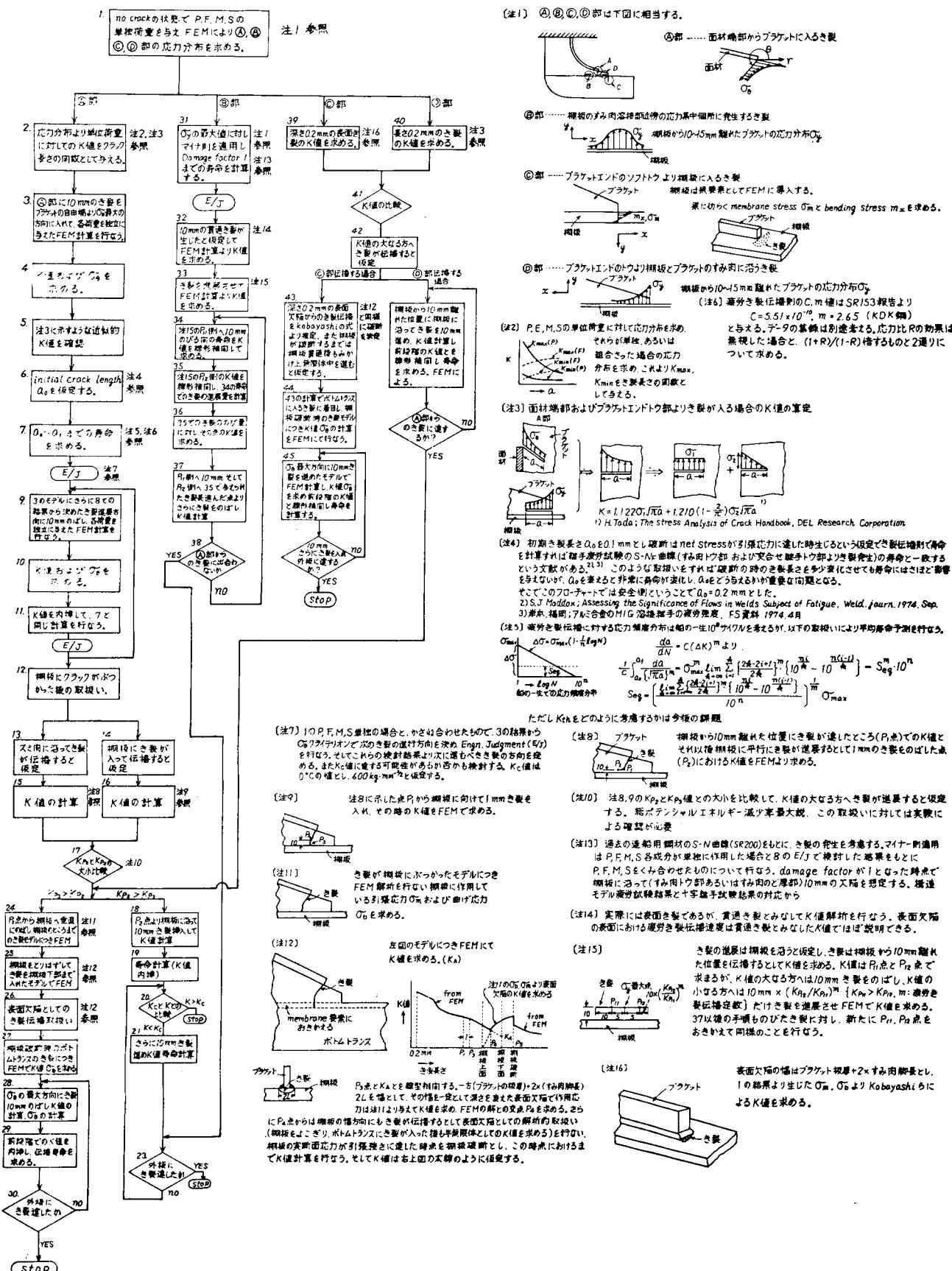


図 4.3.15 応力の特異性 (step 2) 荷重- $(dS+dP+dF+dM)$

表 4.3.1 Case Study のフロー チャート



4.4 Case Studyを通じての問題点

前節までに、タンカーのデッキロンジ部および鉱石運搬船の棚板上部等についての、破壊強度に関する case study の結果を述べてきた。先にも述べたごとく、現時点までの検討は、亀裂の成長の追跡という点で十分最後まで行なえなかつたし、設計という観点からの検討もまだまだ不十分であった。しかしながら、船殻に対する破壊管理制御を実現させる一助とするべく、case study を実施した際に問題となつた点、あるいは単に仮定したことであるか実は詳細な検討が必要であると考えられる点、などについて以下に列挙してみる。

(1) 荷重または作用応力についての問題点として、

遭遇荷重の時間的順序に関する情報不足のため、疲労亀裂伝播寿命計算および不安定破壊発生時期の繰り返し数表現が不可能であること。

したがって、応力の統計量が与えられた場合の負荷順序の確率を考慮した亀裂伝播量に対する平均的予測手法の確立と実績損傷例との対比。あるいは、その寿命予測の簡易推定法の確立が必要であること。

また、たとえば上甲板の力学的境界条件としては、端部一様応力条件よりも端部一様歪条件に近いと思われるが（前述の case study では、端部一様変位としたが）、より忠実なモデル化のための検討を重ねる必要があること。

などがあげられる。

(2) K 値計算に対する問題点として、

亀裂のない状態での応力解析結果から K 値を推定する方法の検討。

亀裂近傍あるいは応力集中箇所での要素分割法の検討、すなわち、大きな要素分割である程度の精度が得られるような手法の開発が必要であること。

などがあげられる。

また、この問題から派生してくる作業として、構造物中に存在する亀裂の K 値を精度良く効率的に求め得るプログラムの本格的な開発があげられよう。K 値評価の手法としては、従来の船殻応力解析プログラムとの接続という点から考えて、本 case study でも用いた重量法による評価¹⁾は一つの方法であろう。

(3) 応力境界条件が複雑になった場合、あるいは外力条件は単純であっても部材形状が複雑なために亀裂の進展と共に実質上応力条件が複雑化するような場合には、若干問題があるようと考えられる。すなわち、主として平易な応力条件から得られた破壊力学上のクライテリアを case study に適用する場合、クライテリアの採否あるいは幾つかのものからの選択を論議する前に、亀裂先端の応力等（K 値を含む）の推定精度が必ずしも十分でないことを認めざるを得ない。

本 case study からあげられるこの例は、デッキロンジを伝播してきた脆性亀裂がデッキプレートに入り込むとき、停止かまたは伝播継続かの工学的判定のむずかしさである。すなわち、用いた伝播停止クライテリアの議論あるいはこのクライテリアに従った場合の破損状況の推定を十分な信頼度をもって行なうためには、デッキロンジ切断亀裂がまさにデッキプレートに達しようとする状態での正確な K 値解析が必要である。しかし、このような状態での K 値評価は通常の問題に対するよりも一段とむずかしい。この種のいわば机上計算の弱点に対しては、実験的な試行錯誤がもっと試みられてよいように思われる。

もう一つの例を、前述の鉱石運搬船の棚板上部に対する検討の中からもあげることができる。すなわち、亀裂の入る方向および亀裂経路を決定するクライテリアや、亀裂が開口部より入るときの方向について必要な応力成分等を精度良く評価することの困難さ、つまり FEM の要素分割による差や骨部材近傍での計算のむずかしさの克服など、破壊様相推定計算上の多くの問題がある。特に、隅肉溶接部あるいはその近傍を伝播する亀裂の取り扱いに対して、破壊力学的手法を確立することが必要である。亀裂のない状態での応力分布から、亀裂進展経路を推定する手法の開発なども望まれるところである。

(4) 材料特性値、特に脆性不安定破壊の評価に用いた破壊韌性値 K_{IC} のバラツキが大きいことについては、従来から破壊力学研究者の間で共通に認識されていることであるが、本 case study のような破壊の critical assessment においては、韌性値のバラツキには特に留意する必要がある。

脆性破壊現象そのものが組織敏感性である以上、本質的なバラツキを或る程度は認めざるを得ないであろう。しかしながら、このバラツキがどの程度のものであるかという定量的な評価について、研究者間で共通認識する必要がある。この意味から SRI 153 研究部会昭和 51 年度研究で実施している、"小形 3 点曲げ試験による限界 COD (δ_c) 値に関してのバラツキの評価に関する研究" は、その一助となるであろう。

また、複雑な遭遇応力の履歴を経た部材の脆性不安定破壊発生特性は、処女材での特性とは異なるはずであり、何らかの考慮が払われるべきであろう。

(5) 線形破壊力学適用可能範囲について理解を深めることが望まれる。この中には大きくわけて二つの問題がある。

一つは、塑性域が亀裂寸法に比較して無視し得なくなる程大きくなる条件下での不安定破壊を、K 値で整理することの不十分さである。

他一つは、実験室的確認がほとんど不可能な、長大化した亀裂に対する取り扱いである。すなわち、理論が不十分なまま、実験室的結論をそのまま敷延外挿することの問題である。

第一の問題に対しては、新たな破壊クライテリア (δ_c など) を用いることにより、実験室的にはある程度解決できている。しかし、実構造物に対し、この種の非線形破壊クライテリアを用いて critical assessment を行なった例は極めて少なく、今後の研究努力に待つ部分が多いと言わざるを得ない。

第二の問題に対しては、定性的推定^{2), 3)} に留まっているといつても過言ではない。複雑な構造試験体に対しての理論的検討や実験的確認、あるいは長大亀裂に対する K 値の頭打ち効果の理論的解明や実験的確認が強く望まれるところである。また、長大亀裂に対する挙動判断の基準となるべき材料特性値 (K_{AREST} や K_{IC} など) のより多くの蓄積努力も望まれるところである。さらに、亀裂伝播に及ぼす K_{II} 値の影響なども明らかにする必要がある。

(6) 疲労寿命を内容的に発生寿命と伝播寿命に分けた場合、発生寿命の占める比率は無視できない。

本 case study では計算していないが、発生寿命についても種々の検討を加える必要がある。

その意味から、構造物中の局部歪振幅が亀裂発生を支配すると考えた整理法は、工学的に非常に重要なものと思われる。この方面的データの蓄積⁴⁾ および構造物への適用例^{5), 6)} の拡大を今後とも推進してゆかねばならない。

(7) 破壊力学を縦横に駆使するため必要なだけの精度を保ちながら、応力 (K 値) 解析を行なうことの困難さは、先に述べたとおりである。これと内容的に似ている事柄の一つとして、破壊現象に及ぼす動的効果の問題がある。すなわち、不安定亀裂の伝播・停止条件に、荷重 (歪) 速度や亀裂伝播速度が影響することは破壊力学の示唆するところであるが、実構造に於いて発生するから知れない不安定亀裂について、その速度などを評価し動的効果を考慮できるだけの素地は極めて乏しいと言わざるを得ない。

参考文献

- 1) 山本善之、徳田直明、"板構造物中のクラックの応力拡大係数の有限要素法による解析法"、日本造船学会論文集第 130 号、昭和 46 年 11 月
- 2) 木原 博、金沢 武、池田一夫、前中 浩、木下 勝、永元隆一、矢島 浩、"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、昭和 43 年 11 月
- 3) 町田 進、青木 滉、"クラックアレスターに関する基礎的研究(第 7 輯) —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、昭和 47 年 5 月
- 4) Iida K., Fukuda Y., "Strain Cycling Fatigue of Ship Structure Steels", Annual Assembly of IIW,

1969

- 5) S.Teramoto, etal., "Fatigue Strength of Welded Tubular Joints in Offshore Structure",
Mitsubishi Technical Bulletin №100, April 1975
- 6) 飯田國廣、飯野暢、"角変形をもつ接継手の疲労強度"、日本造船学会論文集第140号、昭和51年12月

5. 今後の課題

以上本委員会においては船体構造設計に対する design criteria に破壊力学の概念を導入すべく種々の作業を行なってきた。すなわち、まず破壊力学を設計手法に取り入れて行く際の全体のフローを討議して計算、検討の流れを想定し、同時に船体構造を代表的な構造パターンや構造の各要素に分類して検討対象のモデルを設定し、今後の研究の方向とその対象を誘導、整理した。

次いで破壊力学設計を船体構造に適用して行くための問題点を抽出すべく甲板コンジの密接部とブレケット端部に対する case study を実施し、クラックの進行過程と各時点における脆性破壊確認の追跡計算を試みた。実際に case study を実行してみると初期の設定条件の見直しや今まで想定していなかった諸問題に直面し、破壊力学の立体構造物への適用の複雑性が表面化してきた。このため実際には諸問題を仮定し、近似して検討を進めたのであるが、なおかつ時間と予算の両面における制約からゴールまで行きつくことができなかつた。したがつて当委員会の最初に意図した case study を通じての諸問題の抽出、整理と今後の研究方向に対する提言といった総括はできなかつたが、このクラックの追跡を通じて解決を必要とする諸問題はある程度浮彫りにされたのでこれらは 4.4 項に詳述しておいた。

ここではさらに全体を通じての今後の課題をまとめると次のようである。

- (1) 破壊力学を船殻構造設計の design criteria とするためには各種の基本的な立体構造モデルに対する理論的解明と実験的確証を行ない、それにもとづいた近似計算手法の確立が必要である。
- (2) 最近発達してきた放射線検査、超音波探傷、磁粉探傷などの非破壊検査は有害、無害の如何をとわず、従来知ることのできなかつた種々の欠陥の検出を可能ならしめており、検査技術の面からも欠陥評価が重要な問題となつてゐる。したがつて破壊力学の観点よりのこれら欠陥に対する適正評価は実船の損傷事故と相俟つて不可欠のものであり、材料、工作、検査および補修などの各基準へと進展せしめなければならない。
- (3) 船体構造に対する破壊力学の応用は設計段階から建造時の施工、就航後の保守点検など船の一生にわたるものであり、耐破壊安全管理のトータルシステムとして実施されるべきものである。
- (4) これら耐破壊管理システムは構造特性、製作過程、環境条件など船体に固有な特殊性と密接に関連し、具体的な手法を実用的な形に変換して構造設計に結びつける必要がある。このため船殻構造設計技術者と破壊力学研究者の有機的連携による協力体制が不可欠である。

なお、上記のような case study と必要な諸研究は次年度以降に発足予定の SR 169 において継続審議される予定であり、さらに一步進んだ研究が期待されている。