

本研究は、モーターボート競走公益資金による
日本財団の補助金を受けて実施したものである。

研究資料No.408号

き裂伝播解析手法の実用化に関する研究 成果報告書

(第219研究部会)

平成8年3月

社団法人

日本造船研究協会

はしがき

本研究は、日本財団の補助事業として、日本造船研究協会第219研究部会において、平成5年度から平成7年度の3カ年で実施した「き裂伝播解析手法の実用化に関する研究」の成果を取りまとめたものである。

第219研究部会委員名簿

(敬称略、順不同)

部会長	町田 進 (東京大学) (H.5~7)	
部会長代理	富田 康光 (大阪大学) (H.5~7)	
代表幹事	伏見 彬 (東京大学) (H.7)*	末岡 英利 (三菱重工業) (H.7)
委員	吉成 仁志 (東京大学) (H.5~7)	川原 正言 (東京都立大学) (H.5~7)
	三木 千寿 (東京工業大学) (H.5~7)	角 洋一 (横浜国立大学) (H.5~7)
	川村 恭己 (横浜国立大学) (H.7)	宮田 隆司 (名古屋大学) (H.5~7)
	永元 隆一 (東海大学) (H.5~7)	岩田 光正 (広島大学) (H.5~7)
	矢島 浩 (広島大学) (H.5~7)	豊貞 雅宏 (九州大学) (H.5~7)
	宮城 靖夫 (船舶技術研究所) (H.6~7)	藤井 英輔 (船舶技術研究所) (H.5)
	松岡 一祥 (船舶技術研究所) (H.6~7)	山本 規雄 (日本海事協会) (H.5~7)
	山脇 眞 (日本船主協会) (H.5~7)	川野 始 (三菱重工業) (H.5~7)
	熊倉 靖 (石川島播磨重工業) (H.5~7)	近藤 公雄 (日立造船) (H.5)
	亀井 前人 (日立造船) (H.6~7)	渡邊 孝和 (三井造船) (H.5~7)
	海野 誠 (川崎重工業) (H.5~6)	木曾 孝 (川崎重工業) (H.7)
	豊福 正継 (日本鋼管) (H.5~7)	阿部 孝三 (住友重機械工業) (H.5~7)
	渡邊 祐一 (住友金属工業) (H.5~6)	二戸 信明 (住友金属工業) (H.7)
	小宮 守 (サノヤス・ヒシノ明昌) (H.5~7)	

* (H.5~6) 三菱重工業

幹事会委員名簿

(敬称略、順不同)

主査	伏見 彬 (東京大学) (H.7) *	末岡 英利 (三菱重工業) (H.7)
委員	山本 規雄 (日本海事協会) (H.5~7)	川野 始 (三菱重工業) (H.5~7)
	熊倉 靖 (石川島播磨重工業) (H.5~7)	後川 理 (石川島播磨重工業) (H.5~7)
	永濱 信一 (日本造船) (H.5~7)	渡邊 孝和 (三井造船) (H.5~7)
	海野 誠 (川崎重工業) (H.5~6)	木曾 孝 (川崎重工業) (H.7)
	豊福 正継 (日本鋼管) (H.5~7)	阿部 孝三 (住友重機械工業) (H.5~7)

* (H.5~6) 三菱重工業

ワーキンググループ委員名簿

(敬称略、順不同)

主査	町田 進 (東京大学) (H.5~7)	
幹事	川野 始 (三菱重工業) (H.5~7)	
委員	富田 康光 (大阪大学) (H.5~7)	吉成 仁志 (東京大学) (H.5~7)
	川原 正言 (東京都立大学) (H.5~7)	角 洋一 (横浜国立大学) (H.5~7)
	川村 恭己 (横浜国立大学) (H.7)	藤本由紀夫 (広島大学) (H.5~7)
	豊貞 雅宏 (九州大学) (H.5~7)	丹羽 敏男 (九州大学) (H.7)
	松岡 一祥 (船舶技術研究所) (H.5~7)	山本 規雄 (日本海事協会) (H.5~7)
	白木原 浩 (三菱重工業) (H.5)	平木 常正 (三菱重工業) (H.6~7)
	伏見 彬 (東京大学) (H.7) *	末岡 英利 (三菱重工業) (H.7)
	梶本 勝也 (三菱重工業) (H.5~7)	後川 理 (石川島播磨重工業) (H.5~7)
	上村 武 (石川島播磨重工業) (H.5~7)	永濱 信一 (日立造船) (H.5~7)
	芦田 吏史 (日立造船) (H.5~7)	犬木 純 (三井造船) (H.5~7)
	坪川 毅彦 (三井造船) (H.5~7)	濱本 篤 (川崎重工業) (H.5~7)
	尾野 英夫 (川崎重工業) (H.5~7)	豊福 正継 (日本鋼管) (H.5~7)
	石川 邦照 (日本鋼管) (H.5~7)	中村 哲也 (日本鋼管) (H.6~7)
	根ヶ山 博 (住友重機械工業) (H.5~7)	川地 俊一 (住友重機械工業) (H.5~7)
	菅田 登 (住友金属工業) (H.5~7)	

* (H.5~6) 三菱重工業

目 次

結 言	1
第 1 部 疲労き裂についての実用的知見	3
1. 船舶の疲労設計と本SR	5
2. 本SRの研究実施内容	8
3. 船体構造における疲労き裂伝播の特徴	19
4. 保守・点検時の疲労き裂の技術的取り扱い	28
第 2 部 新しい伝播解析手法	35
5. 疲労き裂の伝播形態と数値シミュレーション	37
6. パリス則／有効応力拡大係数によるき裂伝播寿命評価	45
7. RPG 荷重による寿命評価	52
結 言	57

緒 言

船体構造のき裂（クラック）に関して、「強くて丈夫でクラックのでない船を造ってくださいよ」とか「クラックが見つかったのだけど次のドックまでこのままで大丈夫だろうか」といった会話をよく耳にする事がある。

「クラックのでない船」を合理的に設計できるようになる事は造船屋の夢である。また、かつて船体構造の延命化が話題になった時には船の経年変化を考慮した合理的な延命工事の技術的内容が最大関心事となった。ここでのポイントは疲労強度に対する余寿命をどの程度評価しうるかであった。こうした余寿命評価も含め就航船に対してドック時にクラック防止の観点から合理的な保守ができるようになる事は保船面からの願いでもある。

き裂（クラック）の殆どは荷重が繰り返し作用する事により発生する疲労き裂である。しかしながら疲労き裂の発生には作用する荷重の大きさや頻度はもとより、溶接部の応力集中や残留応力等多くの因子が影響する。また、疲労寿命といってもき裂の長さをどの位で考えるかによりその寿命評価が変わってくる。理屈上は1mmの長さでもき裂はき裂であるが、実際の船体構造で点検時に見つかるき裂長さは30mmもしくはそれ以上である。種々の影響因子によりこうした長さになるまでに長い時間を要するき裂も有れば、短いものもある。

「クラックのでない船」を考える為にはクラックとは何か（き裂特性）を知っておかねばならない。

き裂の発生場所や進展の速度によってはタンク構造からの液体貨物漏れや船体区画への浸水といった重大な事故をひきおこしかねない。こうしたき裂長さになる前に点検・検査時にき裂が発見される事が重要となる。

その為にはき裂がその条件下でどの程度の速度で進展するのか評価できる技術が必要となる。

本研究はこのような課題を明らかにしていく為に「疲労き裂の伝播」の特性把握と「伝播寿命の解析手法」の提案を目的に、設計・保守やこうした現象の研究に携わっている多くの方々の参加の基に実施された。

本報告書は、研究の成果をより多くの人に理解して頂く為に第一部で「疲労き裂についての実用的知見」を述べ、多少専門的になるが本研究の新規的成果として第二部で「新しい伝播解析手法」について概説した。

第1部 疲労き裂についての実用的知見

1. 船舶の疲労設計と本SR

1.1 船体構造の破壊防止の現状

船体構造設計に求められる最も基本的要求は船体構造が破壊しないことであり、種々の破壊形態について破壊防止が図られてきている。主な破壊形態として脆性破壊、崩壊・座屈、疲労破壊があげられる。

最近の破壊の傾向の特徴的なことは脆性破壊および崩壊・座屈が、20年前と比較して激減していることである。それに比べ、疲労破壊は現在でも残念ながら散見される。疲労破壊防止対策については種々の議論がなされ、例えば、VLCCの船側縦通肋骨のき裂については、水線面直下の設計荷重不足として、対策はとられるようになってきている。さらにその一般化の研究が進められているのが現状である。

そのなかで、SR219の研究は、「疲労き裂の伝播」の特性把握が今後の疲労破壊防止対策のキーテクノロジーとなるべきとの考えにより、「き裂伝播解析手法」の実用化をめざし開始した。以下にSR219研究の背景・意義と概要を示す。

1.2 疲労き裂の判定

疲労破壊はある時突然生じるのではなく、徐々に大きくなって行く性質をもっており、また負荷される荷重の大きさの履歴によって進展の速度が変わる。き裂が実際に水漏れなど運航の障害や、脆性破壊の引金になるまで、長い時間がかかるものである。き裂損傷が発見される割にそのような状態にならないのは、運が良かったのではなく、疲労現象の特徴—時間依存性—に対し現行の点検・検査の間隔が大筋安全側にあるためであると考えることが出来る。

また、微小なき裂が発生していても、普通、船の機能に影響はない。定期検査でき裂を発見するのは、将来放置しておけば重傷になる傷をあらかじめ小さいうちに見つけ、必要な手を打つためである。大多数はそのような考えで良いことは従来の実績が示している。

しかし、将来重傷になる小さい傷の判定基準はなく、専門家の間でもそれは個人の知見に大きく依存している現状である。その判定基準の構築によって、個人に依存しない合理的な保船をめざすべきである。き裂の判定は設計と合理的な保船の重要な橋渡し役となる。これがSR219の原点の一つである。

1.3 き裂発生寿命と破断寿命

疲労寿命は工学的に有意義な概念であるが、普遍的な定義はないのが実状である。

機械部品では、小型の丸棒試験片で疲労試験を行い寿命を定義している。しかし、試験でのき裂発生を検知は困難であり、一般には試験片の破断時を寿命 N_f とし、き裂の発生寿命 N_c と区別されないことが多い。

一方、船体構造においては疲労の発生個所は溶接部が大部分であるので、中型の溶接継手試験片の疲労試験が実施されている。その疲労データでは発生寿命 N_c と破断寿命 N_f は明らかに異なり、実物の船体構造においては、以上の発生寿命 N_c と破断寿命 N_f の差はさらに広がることが予想され実用的には大いに問題である。

これらの問題の解決には、構造の大きさ、き裂の長さと時間の関係が的確に表現される手法が求められる。その手法は伝播解析手法であり、き裂の伝播（進展、成長）のプロセスを時間軸でシミュレーションする手法である。そしてSR219はこの伝播解析手法を疲労破壊防止対策に導入するための研究である。

1.4 冗長性のある大型構造物

冗長性のある大型構造物では、一部の構造が破壊しても、船としての機能は失われないことが多い。また、き裂が発生し、ある程度まで進展すると停留するケースも考えられる。このような特徴はき裂判定に生かされてもよいはずである。しかし船体構造の冗長性とは具体的にどのようなものか、研究と設計の境界にあって、その定量的知見はきわめて乏しい現状である。

この問題の解決には有限要素法による大規模な解析とともに伝播解析手法が必要になってくる。SR219では伝播解析手法を実船構造に適用して、冗長性のある船体構造の以上のような特徴を明らかにしようとしている。

また、例えば、外板の近傍で外板に向かうき裂と、外板から離れた問題が少ない場所のき裂とは、同じ長さであっても危険度は大幅に異なることは明かである。そのような知見を疲労き裂判定に反映していくことを指向していくべきと考える。

この考え方は安全性を切り詰めることではない。重傷のき裂とそうではないき裂を峻別して取り扱うことにより、全体的に安全性を向上させる新しい枠組みを指向すべきであり、SR219はそのための実用的解析手法を提供するものである。

1.5 き裂の発見長さ

き裂は溶接部から発生することがほとんどである。現在行われている目視検査によれば、実験室においても、実船においても、隅肉溶接継手の角巻き止端部のき裂はその先端が溶接部から離れる頃から発見されている。大型船の板厚・脚長を前提におくとその長さは30mm程度である。この長さは該部における実用的な最小発見長さといえる。

もう一つの重要な発生個所は隅肉溶接継手および突き合わせ継手自身である。その継手に沿ったき裂の長さについて、一般的に目視検査で発見される長さを議論することは難しい。その理由は前記角巻き止端部に比べ発生個所の応力の種類・大きさおよび集中度が様々であることによる。

き裂の長さを明確にしないと「疲労寿命」の推定値と損傷実績の対比も困難であり、その改善が必要である。SR219はその取り組みの出発点と位置付けられる。

1.6 SR219研究の概要

伝播解析手法を有効活用することこそ、今後の疲労破壊防止対策の改善を考える上で大切なことである。そのためのSR219の研究の概要は以下の通りである。

伝播解析手法の実用化をめざす上での主な問題点は、次のようなものであった。

- ① よく使われる伝播則（パリズ則）は高張力鋼を用いた船体構造での実証データがないこと。
- ② 伝播速度に影響する種々のパラメータ、例えば荷重パターンの影響や平均応力の影響の程度が不明であること。
- ③ 伝播解析に必要な応力拡大係数の算定は、通常の応力解析より難しいこと。
- ④ 従って、報告された実船構造の伝播解析例がきわめて少ないこと。

この問題を解決するため、次の方針で臨み実施してきた。

- (1) 船体構造における伝播解析手法の実験データ整備のために
 - ・高張力鋼を用いた実物大の構造において伝播試験を実施し伝播則を検証すること。
 - ・溶接止端部を持った実板厚の中型試験片で各種影響因子の影響を把握すること。

(2) 新しい伝播解析手法の整備のために

- ・応力拡大係数の詳細解析モデリングのノウハウ整備
- ・重要き裂タイプに対する簡略手法の整備
- ・伝播現象を良く説明する解析手法の理論的実験的研究

(3) 得られた知見の実用利用のために

- ・損傷データ・点検データの収集・分析
- ・従来からのS-N線図のき裂サイズをパラメータとした総合的見直し
- ・各種試験モデルおよび実船構造の試解析を通じたき裂伝播特性の把握
- ・疲労モニタリングの可能性の実験的研究

SR219を契機として、今後の疲労評価では、万一き裂が発生しても、それから限界状態が起きることのないよう船体構造の重要箇所を認識し、その箇所におけるき裂伝播挙動の特性を知り設計に反映されることが望まれる。同時にSR219の成果は就航後の点検・検査時の合理的判断、さらには余寿命評価に生かされ合理的な整備計画に活用されることを期待する。

2. 本SRの研究実施内容

2.1 船体構造における伝播解析手法の実験データ整備のために

2.1.1 パリス則とその適用限界

疲労き裂伝播解析の基本式はパリス則と称される。ParisとErdogan¹⁾によって提案され(2-1)式で表される。

$$da/dN = C (\Delta K)^m, \quad (2-1)$$

da/dN ：応力繰返し一サイクル当たりのき裂進展長さ

ΔK ：応力拡大係数範囲(作用応力、き裂寸法 a 、周辺の形状条件から定まる力学パラメータ)

C, m ：伝播定数(材料特性値)

疲労き裂伝播寿命は、(2-1)式を変形することによって計算できる。左辺の $N(a_0 \rightarrow a_f)$ は、き裂サイズが a_0 から a_f

$$N(a_0 \rightarrow a_f) = \int dN = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{C (\Delta K)^m}, \quad (2-2)$$

に達するまでの伝播寿命を意味する。

パリス則の適用上の限界は、常にき裂先端は口が開いているとの前提をおいている点にある。このために与えられた荷重条件・形状条件の下で、例えば口閉じが起こる場合には、速めのき裂伝播速度すなわち短かめの寿命推定を与えることとなる(き裂先端開閉口効果の詳細は、7章を参照)。

また、(2-2)式右辺の積分下限 a_0 は、就航中に発見されたき裂寸法・製造時検査での検出限界に相当するき裂サイズ・疲労強度SN線図から逆算される仮想初期き裂サイズ、などとして与えられる。

船体構造における疲労き裂伝播を解析する上で留意すべき点として、構造的なものとしては、構造の冗長性・溶接に伴う残留応力の影響や溶接余盛り形状による局所的応力集中の存在、などが指摘できる。

また、船体部材に作用する荷重の特色としては、変動荷重であること・平均応力(荷重)としてFull loadとballast状態が交互に繰返されること・時々荒れた海象に遭遇すること、などが指摘できる。これら船体構造の特徴に関しては、次の3章で詳しく述べる。

2.1.2 小型試験片によるき裂伝播試験

特徴的な荷重履歴を単純化して試験片に与え、得られた疲労き裂成長を基軸データとして採取した。最近の高張力鋼の使用実績を考慮して、本部会の共通供試材として船体用降伏点32キロ級高張力鋼(KA32)を用いている。

共通供試材を用いて小型試験片(中央切欠き引張り試験片など)による疲労き裂伝播試験を行ない、入力荷重に伴って生ずるき裂進展の加速/減速を詳細に測定した。

共通供試材の基礎データとして、得られた伝播特性値を図2-1に示した。

き裂伝播試験として、過大荷重のシリーズ伝播試験(図2-2参照)・平均応力をステップ変化させたシリーズ伝播試験・嵐モデルのシリーズ伝播試験・(模擬)残留応力場シリーズ伝播試験などを実施した。これらシリーズき裂伝播試験により、パリス則の適用限界を明らかにしたり、き裂先端開閉口

を考慮に入れた伝播解析理論（RPG理論など）の検証が行われた。（詳細は7章参照）

2.1.3 大型構造モデルによる疲労き裂伝播試験

大型構造モデルでは、基礎試験片に比べて溶接残留応力の影響やき裂進展に伴う応力再配分効果が、より実船部材に近い形で内在している。従って、大型構造モデル疲労試験によって得られたき裂成長データは、本SRで開発した疲労き裂伝播解析手法（各種影響因子の考慮法を含む）による計算推定値と比較照合することにより、手法精度の検証に利用することができる。

大型構造モデルA（3ロンジモデル）とモデルB（1ロンジモデル）を製作準備し、一定繰返し荷重下でのき裂伝播試験を行った。解析法の精度検証の外に、構造モデルBでは圧縮荷重下でのき裂進展の再現、構造モデルAではロンジ材の機能喪失に至る過程の再現を図った。例として、構造モデルAの形状寸法を図2-3に示し、得られたき裂成長データの例を計算推定値と併せて図2-4に示している。

2.2 新しい伝播解析手法の整備のために

2.2.1 伝播解析における初期き裂の設定

前述のように、(2-2)式右辺積分の下限値 a_0 の設定には、検査結果と関連付ける等々幾つの場合がある。

発生寿命を含めて全疲労寿命を伝播寿命だけで置き換える簡便かつ実用的な手法（6章参照）では、疲労強度SN線図と矛盾なく説明できる条件から逆算式に初期き裂サイズ a_0 が決められる。

そこで、簡便法の設定を有効なものとする観点から、微小き裂段階でのき裂寸法やアスペクト比の変化、或いは複数き裂の合体成長の形態などを調べた。切欠きを有する小型疲労試験片（図2-5 a参照）を用いて、破面にき裂先端形状の痕跡を残すための工夫を加えて実験した（ビーチマーク法、破面酸化法、インク浸透法）。

その結果、図2-5 bに掲げる初期段階のき裂形態変化データが得られた。

2.2.2 き裂先端開閉口の取扱い

パリス則では、2.1.1で述べたように、き裂先端の開閉状態を前提としている。

この前提ではElber²⁾によるき裂先端開閉口の効果を無視しており、同じ応力や形状条件の下で大き目の伝播速度を与える。き裂先端開閉口の効果とは、疲労き裂伝播に有効な応力成分は全作用応力幅の中でき裂先端が開いている部分だけである、というものである。つまり、(2-3)式で定義される開口比 U をもとに、有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} として(2-4)式を定め、(2-1)式中の ΔK に代えて ΔK_{eff} を適用することになる。

$$U = (\text{一サイクル中の開口状態の作用応力範囲}) / (\text{一サイクル中の全作用応力範囲}), \quad (2-3)$$

$$\Delta K_{eff} = U \cdot \Delta K \quad (2-4)$$

この考え方は、図2-6に示されるように、作用応力 σ と疲労き裂先端付近でのき裂を跨ぐ伸び δ を縦横軸値として繰返しサイクル中の変化を描かせた結果から導かれた。き裂先端開閉口を考慮に入れることで、複雑多岐にわたる疲労影響因子が及ぼす効果について統一的に解釈することができると考えられている。

豊貞によるRPG理論³⁾は、有力なき裂先端開閉口の取扱い法であり、Dugdaleモデルによるき裂進展シミュレーションソフトが開発された（詳細は7章参照）。2.1.2節の小型試験片によるき裂伝播試験

の結果にこのシミュレーションソフトを適用して、疲労強度への各種影響因子の分析評価がなされた。

船の full / ballast 状態を模擬した実働荷重下のき裂伝播推定結果によれば（次章の図3-3参照）、RPG理論による推定が従来モデル化によるものに比べて、実験データの基本傾向を最も適切に表現できていることが分かる。

2.2.3 船体構造における応力拡大係数の算定

船体構造における疲労き裂は、構造詳細部の溶接部周りから生じることが多い。従って、応力拡大係数 K の算定は、角巻き隅肉部や連続溶接部の余盛トウにある半楕円表面き裂とモデル化する場合が多い。更にき裂が大きくなってからは、板厚貫通の二次元き裂として取扱われる（詳細は5章参照）。

これら船体構造に特有なき裂問題では、 K 値公式集や簡易算定法の整備が十分でない。本SRではこれら特有なき裂問題のモデル化要領や数値計算手順を示した。特に、角巻き隅肉溶接トウに生じた表面き裂、ロンジ材を切断してきた疲労き裂が外板に進入する過程に関して、三次元solid FEMによるき裂解析計算を行った（類似ケース実験例としてT継手破断時に対するsolid FEMモデルを図2-7に示した）。

角巻き溶接止端のき裂問題を効率的に解析すべく、共通的な構造要素（図2-8参照）に関する応力拡大係数の簡易表現式を導いた（6章参照）。また三次元FEM計算結果を視覚的に分かり易く表現する技術（マルチメディアほか）についても検討した。

2.2.4 船体構造でのき裂伝播解析の実施

前節で触れた共通的な船体構造要素（図2-8）の K 値簡易表現式を利用して、継手疲労寿命の簡単な推定手法を提案した。平均応力の影響・溶接残留応力の影響・構造的応力集中率 K_s の影響などの考慮法が、統一的にまとめられた推定手法である（6章参照）。

船体構造に共通的なもう一つのき裂問題として、ロンジウェブを破断したき裂が外板に到達する前後の挙動がある。タンク浸水や荷油漏洩など機能喪失という面から、き裂成長の精査が必要となる問題である。この問題に対しても、FEMモデル化要領や進展計算ステップ設定などノウハウ蓄積の観点からFEM solid計算を実施した（図2-9参照）。

また、複雑な構造物中におけるき裂成長を追跡するため、ソフトウェア環境の開発整備として、自動き裂進展プログラムなど計算入力データ自動生成や計算出力視覚化など支援ソフトの研究が行われた。

冗長性が大きい船体構造において大きなき裂成長を追跡する場合には、き裂拡大に伴う内力再配分に関する注意が必要である（3.2節参照）。例として、大型構造モデルA（3ロンジモデル）でのき裂進展に伴うロンジ間負荷分担の変化を図2-10に示した。

2.3 得られた知見の実用利用のために

2.3.1 損傷データ・点検データの収集分析

本SRでは、大きなき裂損傷の事例収集の観点から「き裂損傷に関する調査アンケート」を行った。また、目視による検査点検の実体について調べるため「検査点検に関する実体調査アンケート」も実施した。

これら結果からき裂損傷の事例集をまとめると共に、アンケート結果の分析調査を通じて、き裂発見可能性に係わる確率特性の導出（検出き裂長さのPODカーブ）・検査性に応じたき裂発見確率の提

案・船体構造における発見き裂長さ代表値（4.3節参照）など明らかにした。

2.3.2 実船構造での試解析

本SRの疲労き裂伝播解析手法を用いて、新造設計時における疲労強度解析・就航中に何らかのき裂損傷が発生した時の損傷対策・保守管理時のき裂寿命予測など、安全性評価に関する有益な情報を得るために実船部材での試解析を行った。（解析例の抜粋が3章に示されている）

実船での疲労き裂損傷がみられる以下の構造部材を解析対象とした。

- ・ B/C Trans.Bhd.Stool と Double Bottom の取合部
- ・ B/C Bilge Hopper の knuckle 部
- ・ B/C Bilge Hopper 内 Side Longi. と Bilge Trans. の交差部
- ・ VLCC Side Longi. と Trans. Bhd. の交差部
- ・ O/C Wing Tank 内 Deck Trans. と Vertical Web の交差部

2.3.3 寿命予測法への総合的適用のための検討

本SRで整備した伝播解析手法の要約版を作成して、設計者の便宜に備えた。同時に、船体構造部材の疲労設計に適用したり船体保守管理のための手法として応用する際の留意点をまとめてガイダンスとした。

本ガイダンスには次のようなアイテムが含まれている。（詳細は4章参照）

- ・ 疲労き裂伝播解析による疲労寿命予測法の総括（き裂伝播解析手法の種類と特徴、応力拡大係数算定法、き裂進展経路の予測法、伝播寿命算定法、荷重条件の設定法、各種影響因子の評価法）
- ・ 限界状態防止疲労設計法（船舶版耐損傷設計法）の概念、限界状態の定義や部材重要度／損傷危険度の考え方
- ・ 上記設計法に基づく検査間隔・検査密度と構造健全性に関する考察

2.4 ま と め

本SRでは、実証的データに裏付けされた疲労き裂伝播解析手法を、船の設計・保守の分野へ有効活用すべく、多くの研究項目を実施した。

本SRにて得られた成果が、疲労き裂という難物に対する、設計・保守における効果的な処方として活用されることを期待したい。

【本章の参考文献】

- 1) P.Paris and F.Erdogan : A critical analysis of crack propagation laws, Trans.ASME, Ser.D, J.Basic Eng., Vol.85, No.4, 1964
- 2) W.Elber : The significance of fatigue crack closure, "Damage tolerance in aircraft structures", ASTM STP486, pp.230 ~ 243, 1971
- 3) 豊貞雅宏：構造物寿命評価論、日本造船学会船体構造研究委員会西部地区部会、# 141 資料、H5.1 月

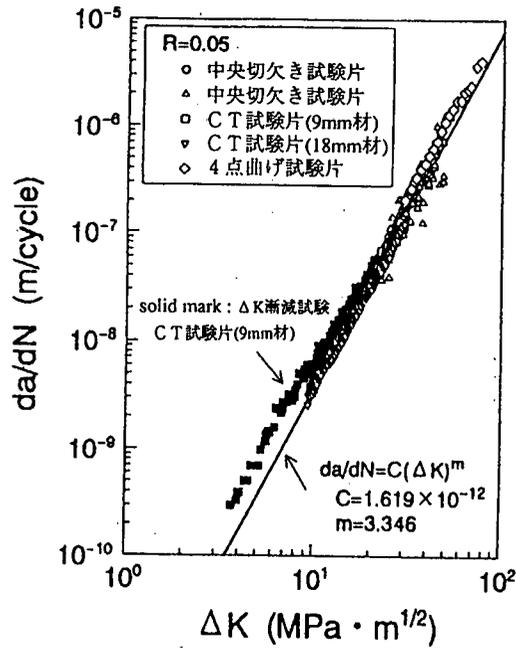
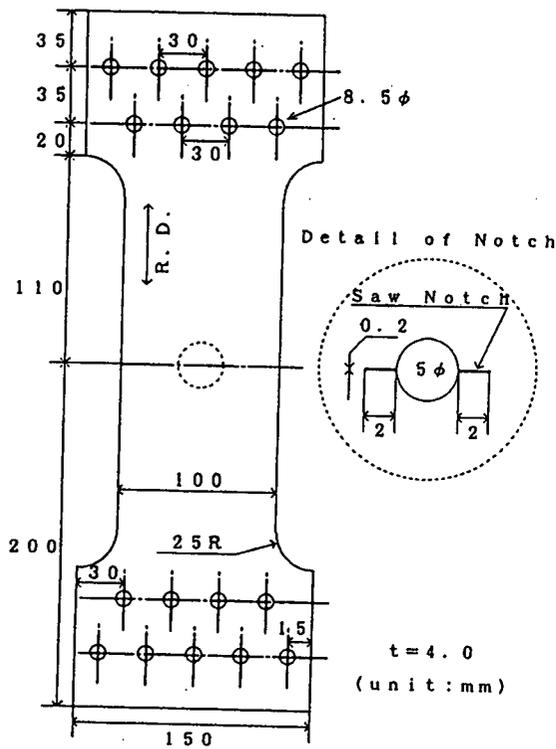
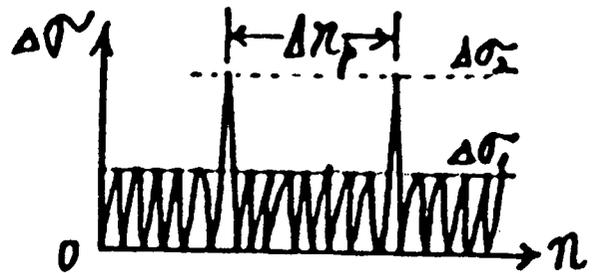


図2-1 共通供試材による疲労き裂伝播試験結果



(a) 小型試験片の形状寸法 (例)



(b) 負荷パターン (模式図)

図2-2 過大荷重影響に関するシリーズき裂伝播試験

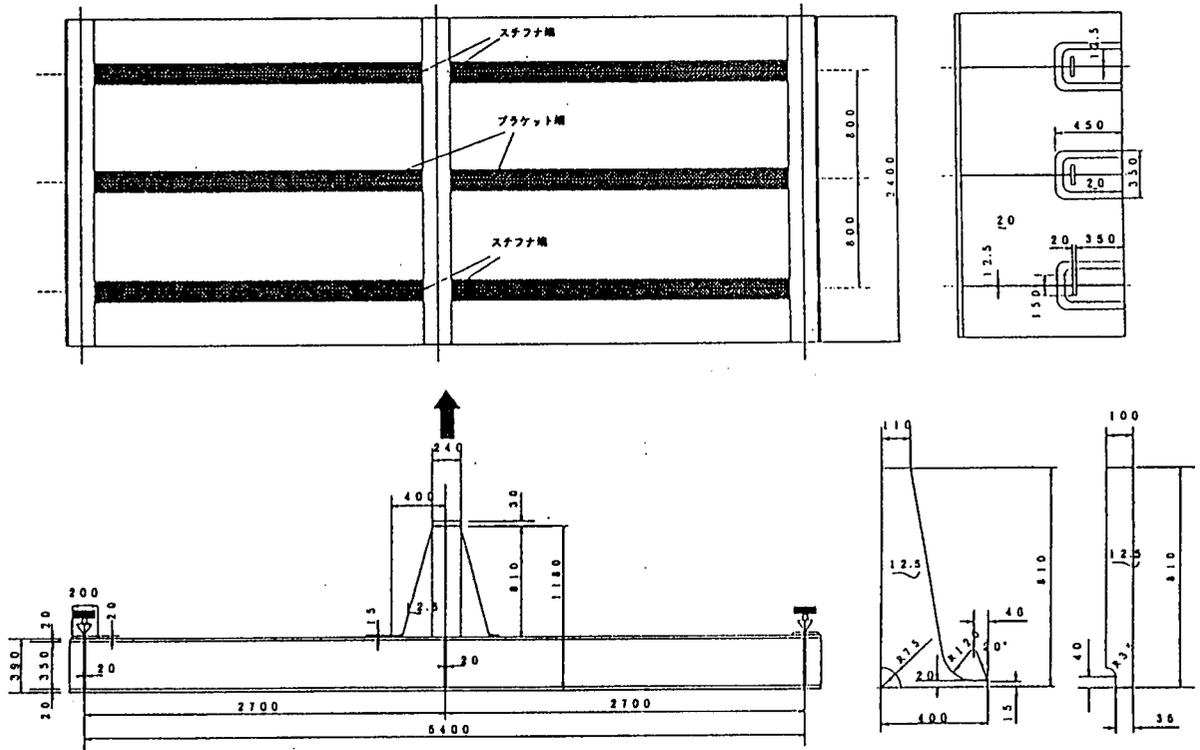
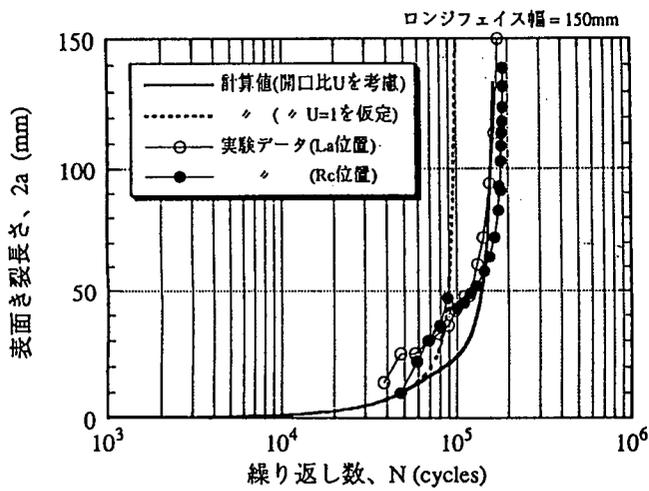
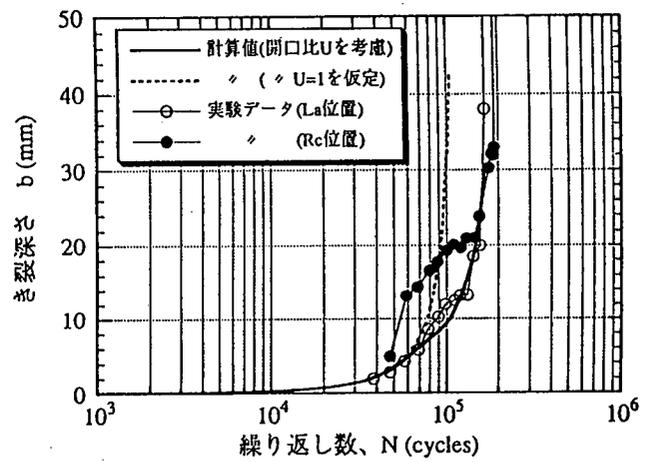


図2-3 大型構造モデルAの形状寸法 [単位：mm]

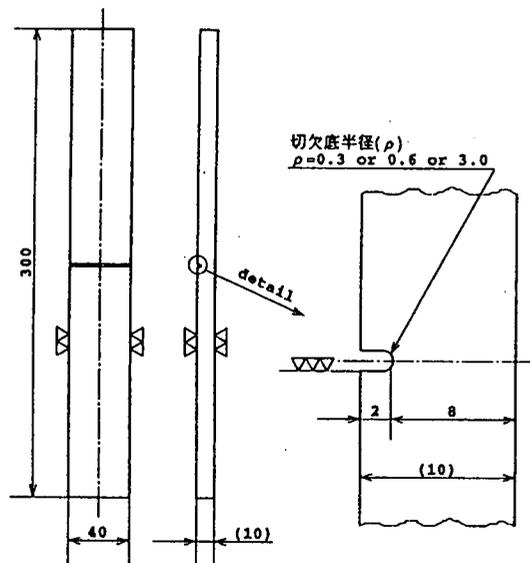


(a) 表面き裂長さ $2a$ と繰返し数関係 (供試体A-1)

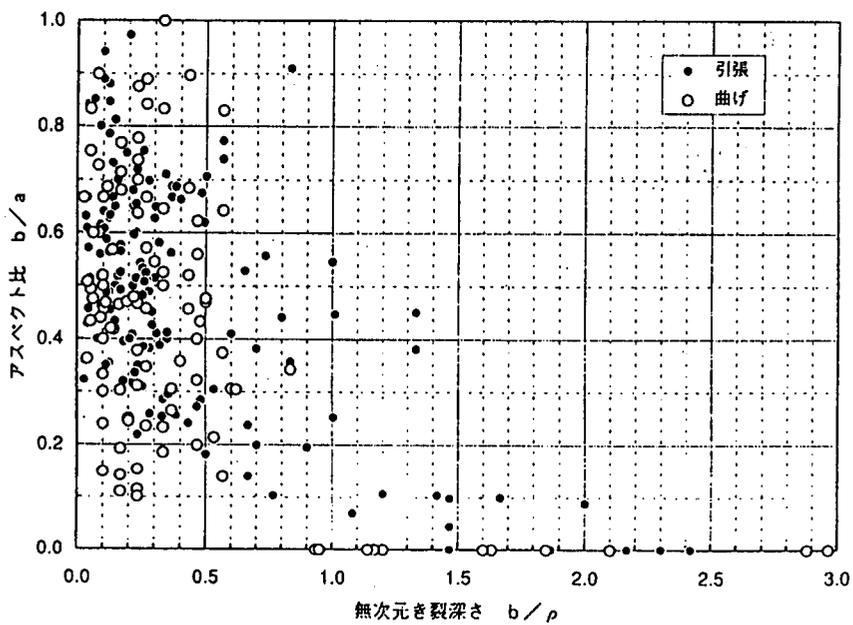


(b) き裂深さと繰返し数関係 (供試体A-1)

図2-4 大型構造モデルAで得られたき裂長さ $2a$ と繰返し数の関係



(a) 引張りタイプ小型試験片の形状寸法



(b) 微小き裂進展形状データ例

図2-5 切欠き底からの微小き裂発生形態の観察

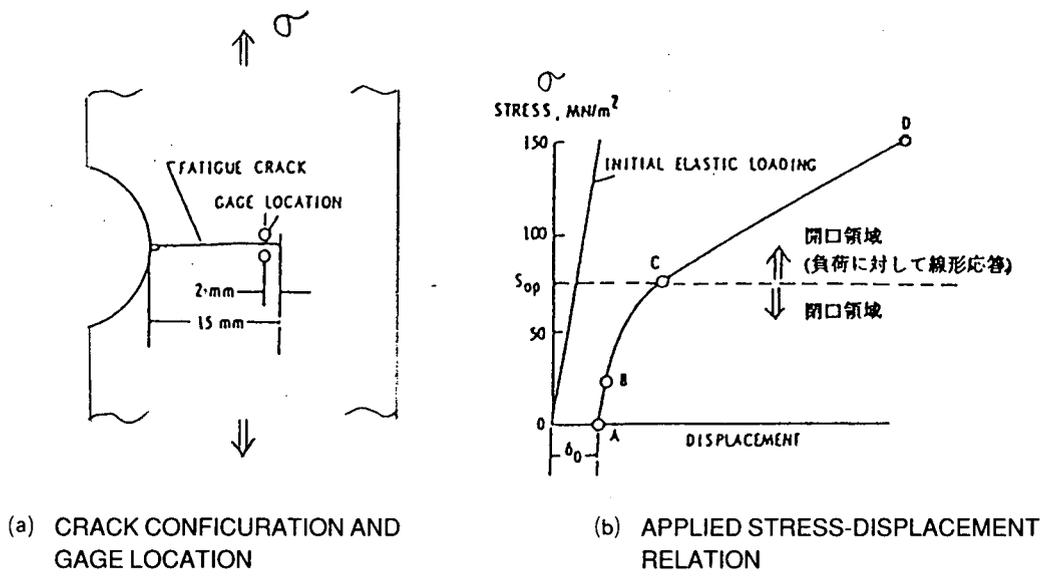


図2-6 き裂先端開閉口の実験測定の要領

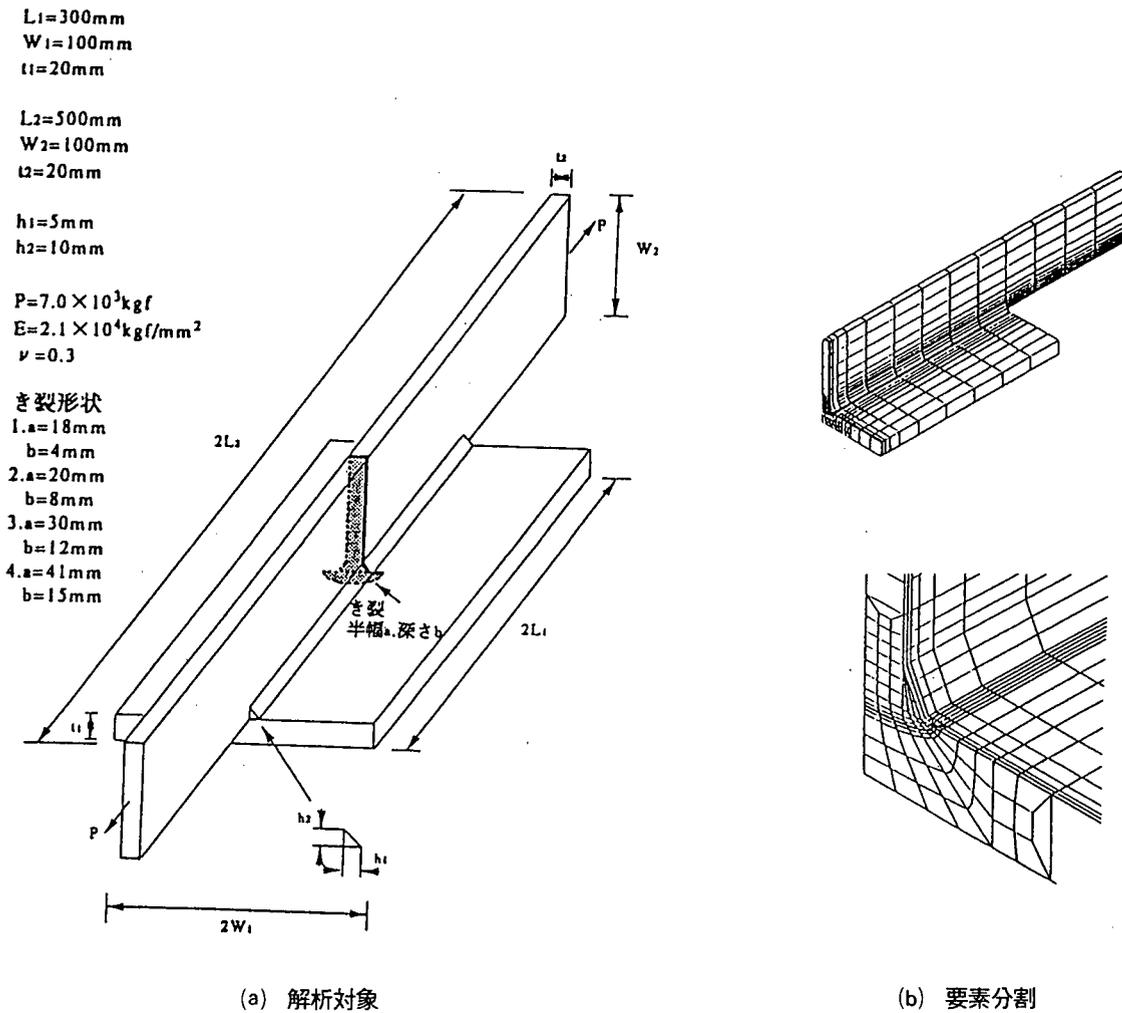
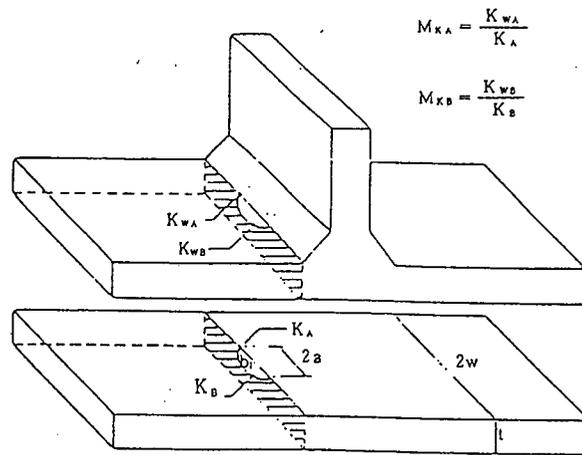
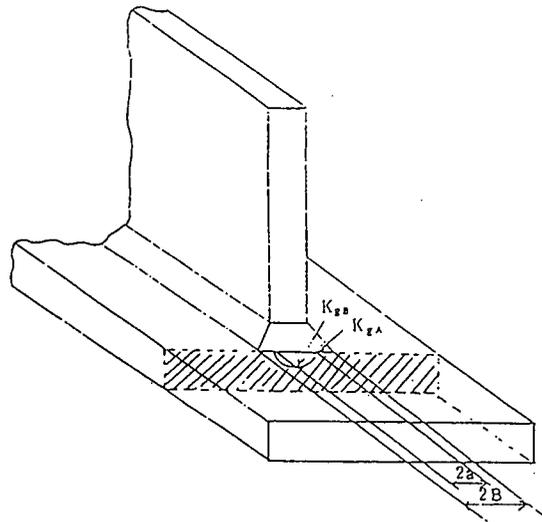


図2-7 T継手のSolid FEM計算モデル

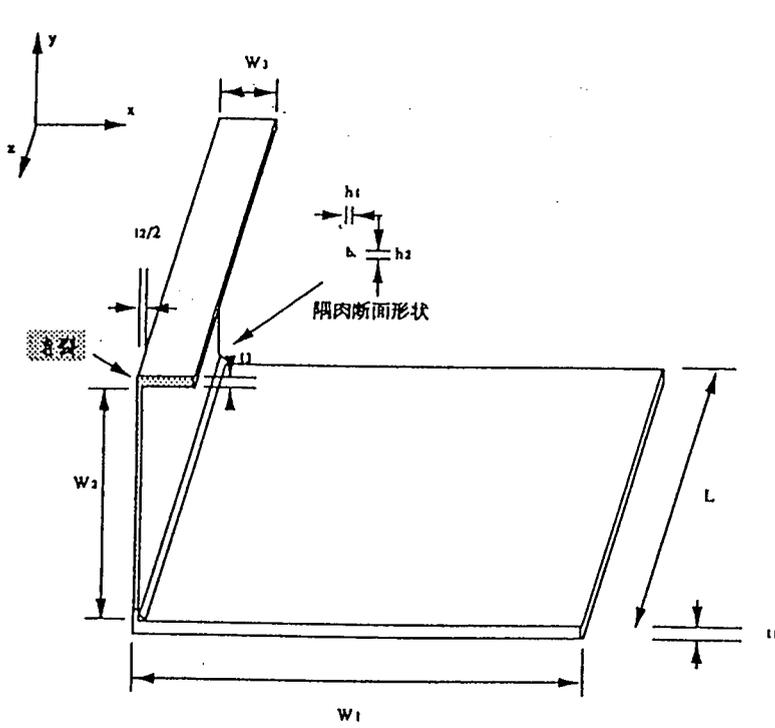


(a) 隅肉溶接継手トウの表面き裂

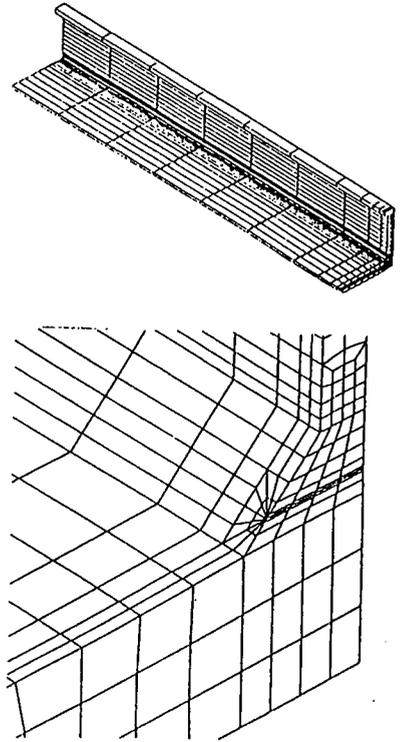


(b) 縦リブ溶接継手トウの表面き裂

図2-8 応力拡大係数 (K値) 簡易式化の対象溶接継手



(a) 計算対象モデル (1/4 対称体)



(b) ステップ4での要素分割

主板上

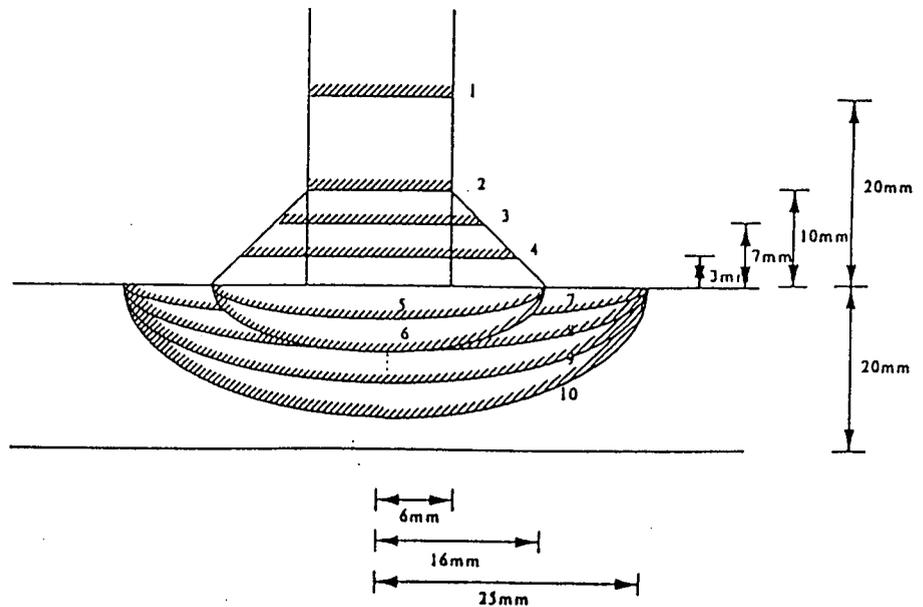
- 1. 20mm
- 2. 10mm
- 3. 6mm
- 4. 3mm

隅肉脚元(半幅 $a=16\text{mm}$)

- 5. $b=4\text{mm}$
- 6. $b=8\text{mm}$

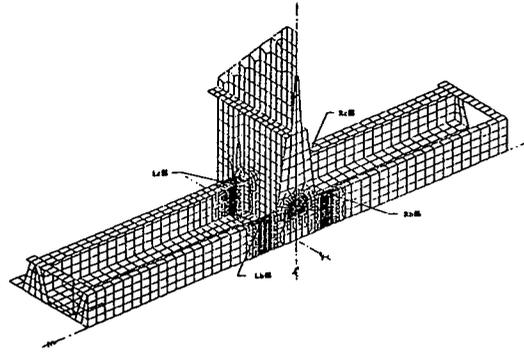
交差部外(半幅 $a=25\text{mm}$)

- 7. $b=4\text{mm}$
- 8. $b=8\text{mm}$
- 9. $b=12\text{mm}$
- 10. $b=16\text{mm}$

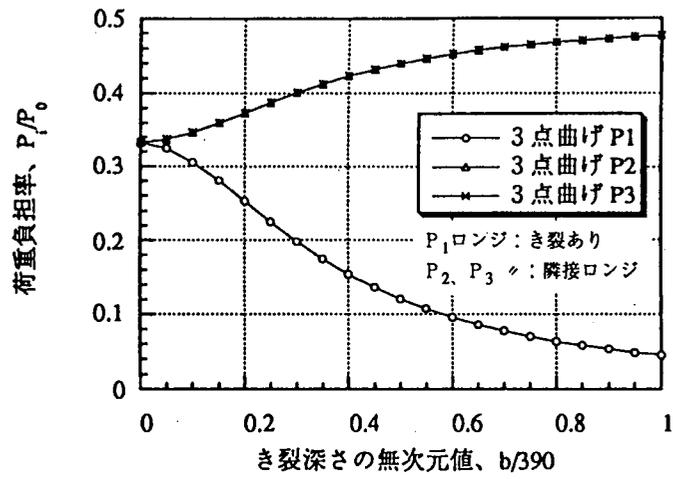


(c) き裂先端形状の設定

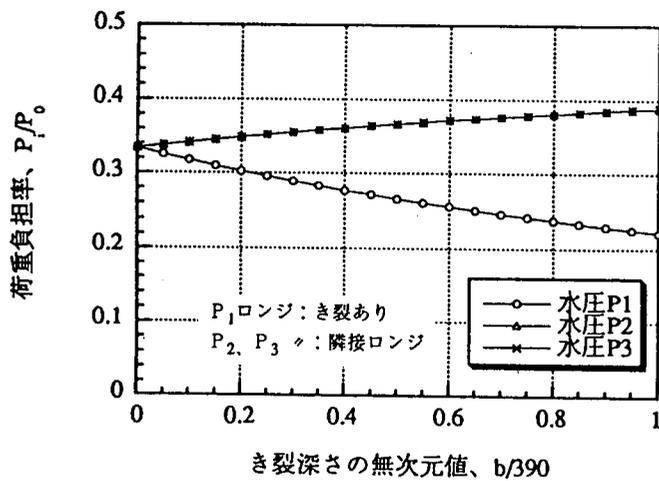
図2-9 ロンジウエブき裂の外板貫通時のsolid FEMモデル



(a) FEM計算モデル (1/2対称体)



(b) 3点曲げモード [実験負荷モード]



(c) 一様面外圧モード

図2-10 大型構造モデルAでの荷重再配分の例 (計算値)

3. 船体構造における疲労き裂の特徴

船体構造部材に発生、伝播するき裂の挙動は実験室で行われる基礎試験片の疲労試験で得られるき裂の挙動に比べ様々な特徴がある。これらの特徴と共に、これまでの知見による船体構造のき裂伝播挙動の説明の限界を明らかにし、本研究部会で得られた成果でいかに改善されたかを概観する。

3.1 船体構造部材に作用する荷重

言うまでもなく航行中の船体に作用する荷重は大きさの同じ荷重が繰り返し負荷されるのではなく、大きさの異なる荷重が加わる変動荷重である。船の生涯にわたり作用している変動荷重の統計的特性はワイブル分布で表すことができ、その形状係数 h は1（指数分布）とされている。しかし、船種、航路、運航状態により個々の部材ごとに、この値は異なるであろうが現時点では未だ明らかでない。

航行中に作用している変動荷重の特徴は、1) 満載航海/バラスト航海の二つの航行状態が交互に繰り返されること、2) 大きな波浪に散発的に遭遇する（図3.1(a)参照）のではなく、荒れた海象に遭遇したときにまとめて大きな波浪荷重（嵐モデル、図3.1(b), (c)参照）を受けることである。き裂伝播の面からは1) は平均応力の影響、2) は荷重履歴の影響で、共に繰り返し荷重の遭遇順序に係わるものであり、き裂伝播寿命に密接に関係している。

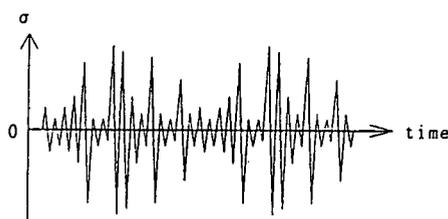


図3.1 (a) ランダム波浪荷重の模式図

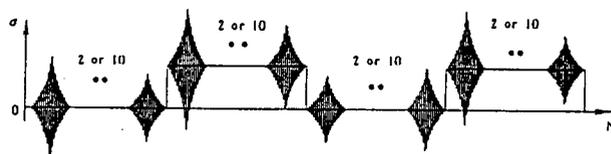


図3.1 (b) 嵐モデルによる波浪荷重

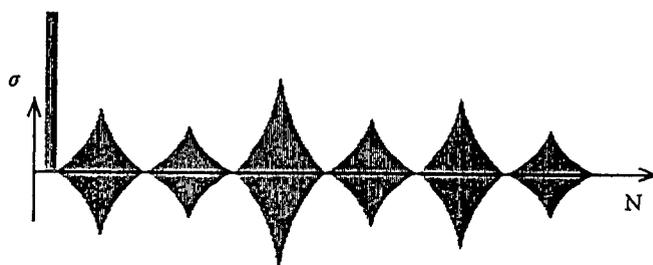


図3.1 (c) 嵐モデルによる波浪荷重

本研究部会では中央切り欠き付き基礎試験片に対し、嵐モデル変動荷重下の疲労試験が行われた。平均応力が一定で荷重を繰り返す従来の試験では、それぞれの平均応力の下で、き裂は当然伝播する。しかし、平均応力が変動する場合には図3.2(a)、(b)のように、平均応力が一定の場合の伝播挙動とは異なる。初めの平均応力0MPaの下ではき裂は伝播しているが、平均応力80MPaを負荷した後、平均応力0MPaの下ではき裂成長は認められない。ところが、平均応力が0MPa～80MPaの場合には、-80MPaの下ではき裂成長は観察されないが0MPaの下ではき裂成長が認められる。すなわち、高い平均応力が負荷された後、低い平均応力の下でのき裂伝播は著しく遅くなる。平均応力が一定でなく変化する場合、低い平均応力の下でのき裂成長がその平均応力が一定の場合に比べ著しく遅くなることは確かであり、定量的評価には荷重パターン、平均応力の組合せ、荷重値、平均応力の変化間隔に依存するが、これらのことは従来の知見では得られていない。図3.3には従来のき裂伝播解析法—Paris則、Paris-Elber則、Wheelerモデル—とRPG荷重基準（7章参照）による推定結果と先の実験結果との比較を示す。定振幅繰り返し荷重の解析が主目的で荷重履歴の影響を考慮できないParis則、Paris-Elber則、過大荷重の影響のみを考慮しているWheelerモデルでは船体特有の荷重条件下のき裂伝播挙動を推定できないことが明らかである。RPG荷重基準では過大、過小荷重、平均応力変化によるき裂伝播の乱れを考慮できるぶん推定結果が向上している。大きな荷重がまとまって作用する場合と、これらが散発的に作用する場合のき裂伝播挙動は、後者では過大荷重の効果（遅延現象）が大いに働き、前者（船体に働く荷重タイプ、図3.1(b))に比べ、き裂伝播は遅くなる。したがって、従来の図3.1(a)の荷重履歴の試験結果では危険側の寿命評価をする恐れがある。以上に加え、過大荷重の効果、残留応力場でのき裂伝播など、本研究部会で得られた成果を用いれば航行中の船体に作用する荷重下でのき裂伝播推定を精度良く行える。

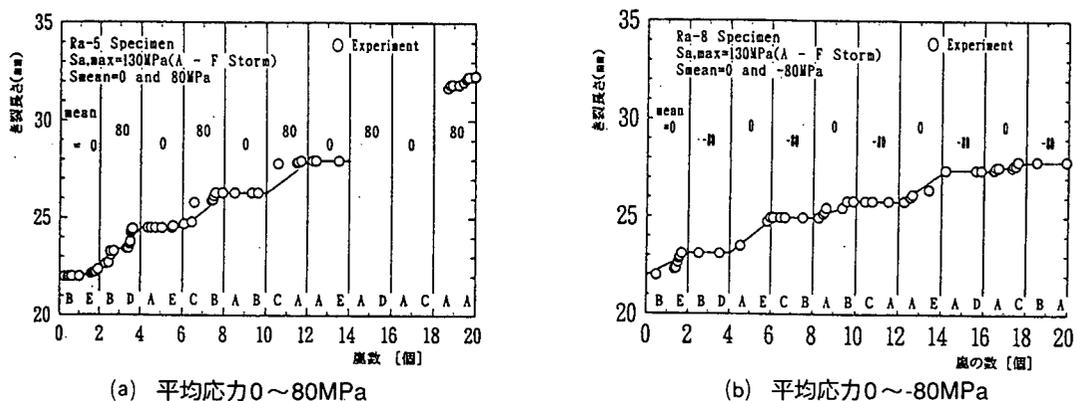


図3.2 嵐モデル変動荷重によるき裂伝播挙動

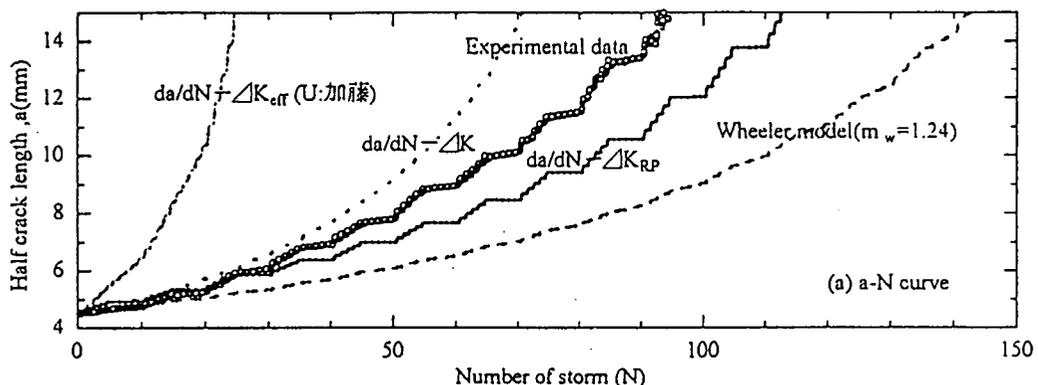


図3.3 嵐モデル変動荷重試験結果と解析結果との比較

3.2 船体構造の冗長性

船体は多数の部材が複雑に配置された構造で、冗長性のある不静定の溶接構造物である。疲労き裂はふつう溶接継手部の溶接止端から表面き裂として発生、伝播し、板厚を貫通後貫通き裂として伝播する。この冗長性のため基礎試験片でのき裂伝播挙動とは異なった特徴を見せる。本研究部会では船体構造部材中のき裂であるが故の特徴を実船構造部材を対象とした試解析、大型構造モデルの疲労試験を通じて明らかにした。

3.2.1 船体構造部材のき裂に対する応力拡大係数の解析

破壊力学の主張は“応力拡大係数が同じであれば、き裂伝播挙動も同じである”ことである。それ故、船体構造部材のき裂も応力拡大係数が計算できれば伝播解析ができる。応力拡大係数は構造部材中の溶接止端部の表面き裂の解析及び貫通き裂の解析が必要である。基礎試験片のき裂に関する応力拡大係数解析法は既に明らかであるが、不静定構造物の部材内のき裂に対する解析法は未だ十分でない。船体構造における疲労き裂発生箇所は溶接による板継ぎ及び骨と板の接合部である（図3.4参照）。その後、図3.5のように伝播し、更に、図3.6及び3.7のようにフランジ材からウェブ材へ、外板へと伝播する。本研究部会では上記部材中の表面き裂、貫通き裂の応力拡大係数の解析法を提案し、実船の構造部材での発生を想定したき裂の伝播解析あるいは実損傷事例の解析が可能となった。

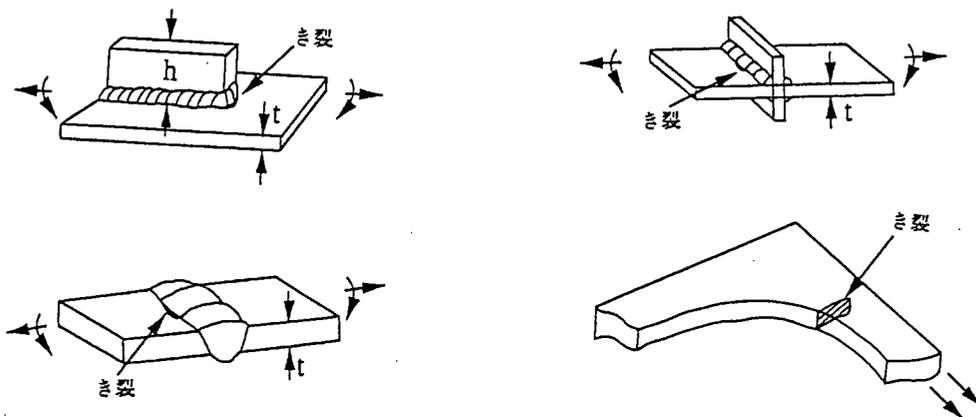


図3.4 疲労き裂発生箇所

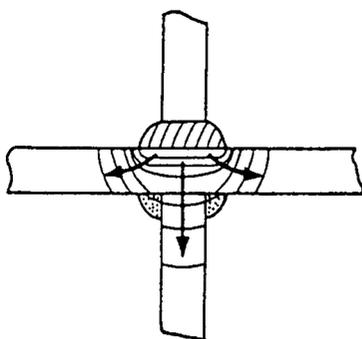


図3.5 き裂伝播経路

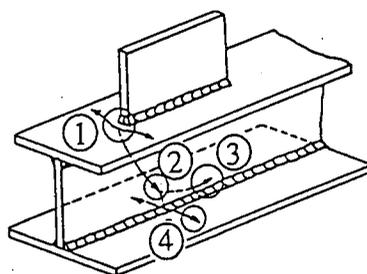


図3.6 き裂伝播経路

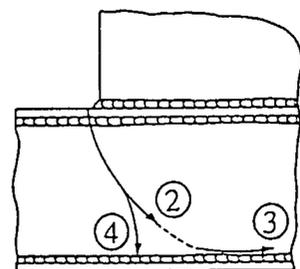


図3.7 き裂伝播経路

3.2.2 船体構造部材のき裂伝播挙動の特徴

不静定構造物である船体は疲労き裂が発生、伝播すると、き裂が存在する部材では荷重の分担が変化する。この荷重分担の変化、荷重再配分はその部材に作用している荷重条件——外力が荷重で与えられるか（強制荷重型）、変位で与えられるか（強制変位型）、軸荷重かモーメント荷重か等——に依存する。例えば、強制変位型の部材ならき裂が長くなると停留する可能性もあるし、同じ長さのき裂が同種の部材にあっても作用荷重条件が異なると、き裂伝播速度が異なり、き裂長さだけで危険度を判断できないこと、ある部材から他の部材に伝播すると伝播速度が変化することなどである。

(1) 強制変位型（変位拘束型）の応力場におけるき裂の停留の可能性

鉱石運搬船のサイドバラストタンク内縦通隔壁付き大骨のブラケットトウ（図3.8参照）から発生し、面材を破断した後、大骨材に進展するき裂を想定して、き裂伝播挙動を調べた。積付け条件は鉱石満載状態とした。波浪変動圧はNKルール、鉱石圧の変動成分はDnVルールを用いた。その結果、

- (i) き裂を想定した大骨に大きな応力を生じさせる要因は船側外板と縦通隔壁の相対変位である。
- (ii) この相対変位は船側外板と縦通隔壁の剪断剛性によるため、大骨ウェブにき裂が進展しても全体の剪断剛性に影響がなく相対変位はほとんどかわらない（強制変位型）。
- (iii) そのため、き裂が入って柔らかくなった分だけ応力が低くなり、き裂が進展するにつれて応力拡大係数範囲は低下しき裂は停留する可能性がある（図3.9参照）。

すなわち、部材に応力を生じさせる原因が強制変位型か強制荷重型かによりき裂伝播挙動は大いに異なる。

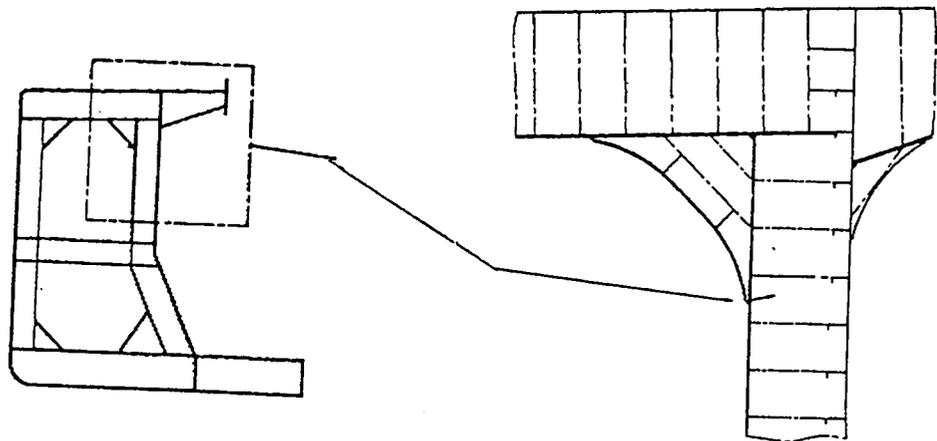


図3.8 鉱石運搬船のき裂伝播解析対象部材

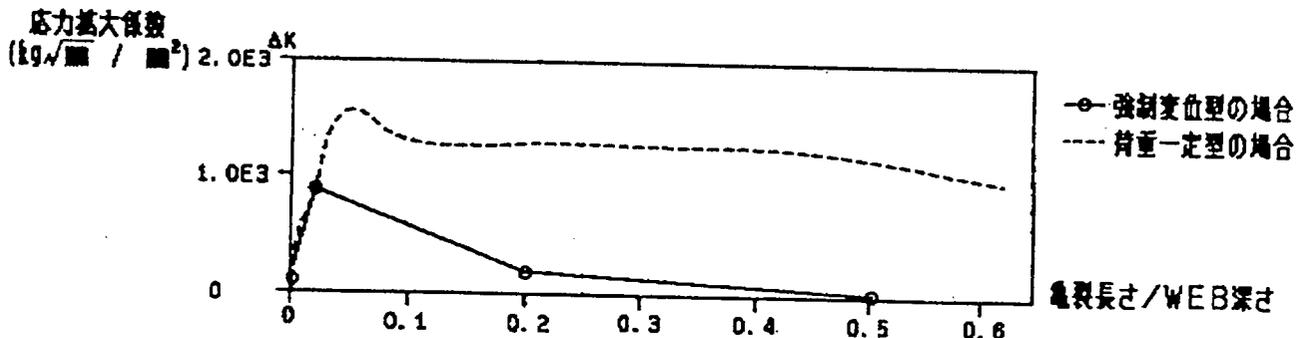


図3.9 V.WEB内のき裂長さとお応力拡大係数の関係

(2) 荷重再配分によるき裂伝播挙動

80型バルクキャリアー、バラストホールドの横隔壁下部スツール斜板と内底板ガーダー、フロア交差部のき裂を対象（図3.10参照）にき裂が部材を順次伝播することで隣接部材の荷重分担が変化する様子（荷重再配分）を調べた。その結果、

- (i) 縦荷重を受ける場合、ガーダー部のき裂が進展するとガーダー部の応力拡大係数は低くなるが、内底板の応力拡大係数は高くなる。
- (ii) 横荷重を受ける場合、ガーダー部のき裂が進展するとガーダー部及び内底板の応力拡大係数は共に低くなる。
- (iii) ガーダー、内底板にき裂が生じた場合、両部材の応力は減少するが、隣接するガーダーの応力は増加する。
- (iv) ガーダー部の疲労寿命は荷重再配分を考慮すると、考慮しない場合に比べ寿命が長くなる（図3.11参照）。
- (v) 横荷重を受ける場合、ガーダー部のき裂は停留する可能性がある。

すなわち、荷重再配分により隣接部材の荷重増加や、荷重形態によってはき裂が停留することがある。

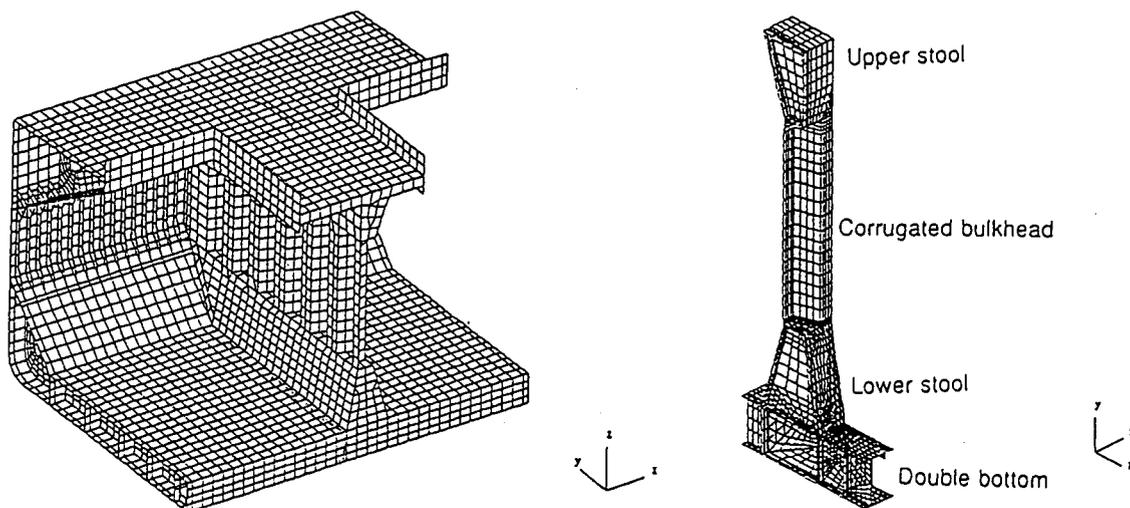


図3.10 80型バルクキャリアーの解析対象部材

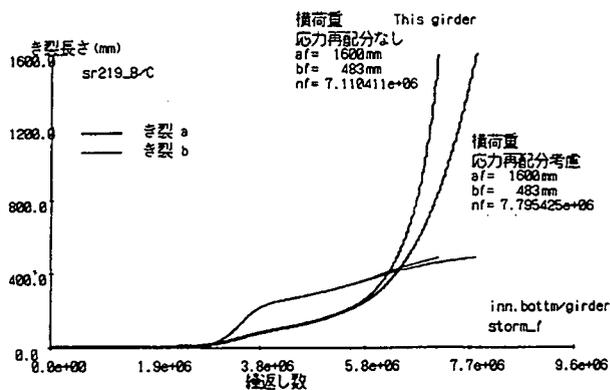


図3.11 き裂伝播寿命解析結果

(3) 同種部材（ロンジ材）の位置の違い（船側あるいは船底）によるき裂伝播挙動

大型バルクキャリアー、バラストホールドの船側ロンジと船底ロンジ（図3.12参照）を対象にして、ロンジ部材の位置（船側か船底か）の違いによるき裂伝播挙動の差を調べた。積付け条件はHeavy BallastとFull Load（Coal Homo）の両状態で、変動外力として船体縦曲げ、水平曲げモーメント、波浪変動圧及びバラストによる内圧変動を考慮した。

- (i) Full Loadでは船側、船底ロンジ共に平均応力は圧縮で、引張り応力範囲は小さい。
- (ii) Ballast Loadでは平均応力は引張りであり、変動応力範囲は船側ロンジの方が大きく、ロンジウェブ深さ方向に進展するき裂の応力拡大係数範囲は船側ロンジの方が約30%大きい（図3.13参照）。
- (iii) したがって、ウェブを進展するき裂の速度は船底ロンジの方が遅く、ウェブが破断するときの寿命では10倍程度の差が生じる（図3.14参照）。

すなわち、同種の部材（ロンジ材）でもその位置する場所（船側または船底）で荷重条件に差があると伝播挙動は異なるので保守、点検に際しては注意する必要がある。

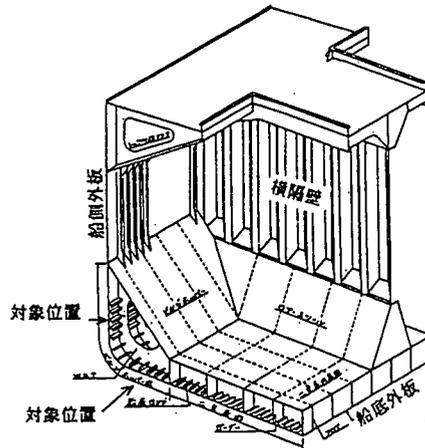


図3.12 大型バルクキャリアーのき裂伝播解析対象部材

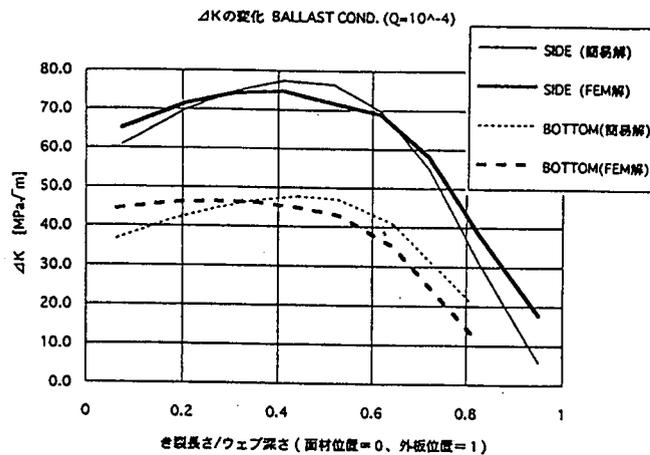


図3.13 ロンジウェブの応力拡大係数

き裂進展曲線 (a-N 線図)

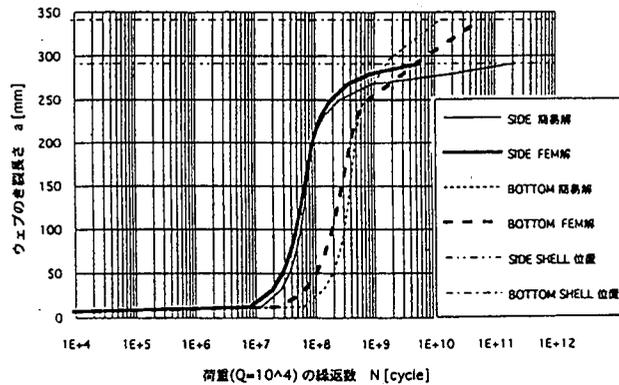


図3.14 ロンジウェブのき裂伝播寿命解析結果

3.2.3 損傷事例の解析例

従来、疲労寿命の評価あるいは疲労損傷の解析には線形被害則であるマイナー則が用いられてきた。簡便ではあるが、その推定精度に関しては満足できないことも明らかである。特に、船体で普通発見される大きさのき裂の損傷解析にマイナー則を用いることは本来正しくなく、き裂伝播解析を行うべきであることは自明であっても、これまではできなかった。しかし、本研究部会の成果で上記のように船体構造部材中のき裂伝播挙動を解析できるようになった。

- (1) バルクキャリアー、二重底ホッパー部 (図3.15参照) の溶接部に発生したき裂に対し、内底板、ビルジホッパー斜板板厚貫通までは表面き裂伝播解析、その後貫通き裂の伝播解析を行い実損傷例と比較する。

荷重条件はHeavy Ballast及びFull Loadの両状態で実際の積付け条件にしたがってバラスタタンクの内圧、Crest Wave、Through Waveによる外圧をそれぞれ考え、各々の場合の差を変動荷重とし、また変動縦曲げモーメントによる付加変動応力も考慮した。応力解析の結果を基に、内底板及びビルジホッパー斜板に初めにき裂が発生するとした。その結果、

- (i) 表面き裂伝播解析により、内底板を貫通する表面き裂は約2.8年で85mmになった。損傷は1年でき裂長さが100mmであり、解析結果は実損傷例と比べ遅くなっている。
- (ii) 内底板及びビルジホッパー斜板をき裂が貫通した後の貫通き裂は進展するにつれて速度が遅くなる。
- (iii) 特に、内底板上のき裂はサイドガーダーに達する前に停留する傾向があり、実際に発見されたき裂と似た挙動を示す。

- (2) シングルハルVLCCの船側カーゴオイルタンク内のサイドロンジと横隔壁壁付き水平スチフナー (図3.16参照) の交差部角まわし溶接し端部から発生したき裂に対し、水平スチフナーフェイスプレート貫通時までは表面き裂伝播解析、その後ウェブ材では貫通き裂の伝播解析を行い実損傷例と比較する。

荷重条件はFull Loadが支配的なためBallast Loadは無視した。縦曲げ、水平曲げ及び外圧は船体運動により求められた波浪変動成分で、内圧は静圧とした。その結果、

- (i) 表面き裂伝播解析によると、フェイスプレートなき裂が貫通するのに約4.8年掛り、実損傷に近い値が得られた (図3.17参照)。
- (ii) ウェブの貫通き裂に関し、ウェブが80%切断されると隣接するロンジのフェイス応力は10%程度上昇するが、その影響は隣接するロンジに限定される。
- (iii) 隣接ロンジの応力はき裂が発生したロンジの初期の無き裂状態と同程度となる。
- (iv) 横隔壁近傍のロンジはトランス間の相対変位による応力が支配的なため10%程度の増加となる。

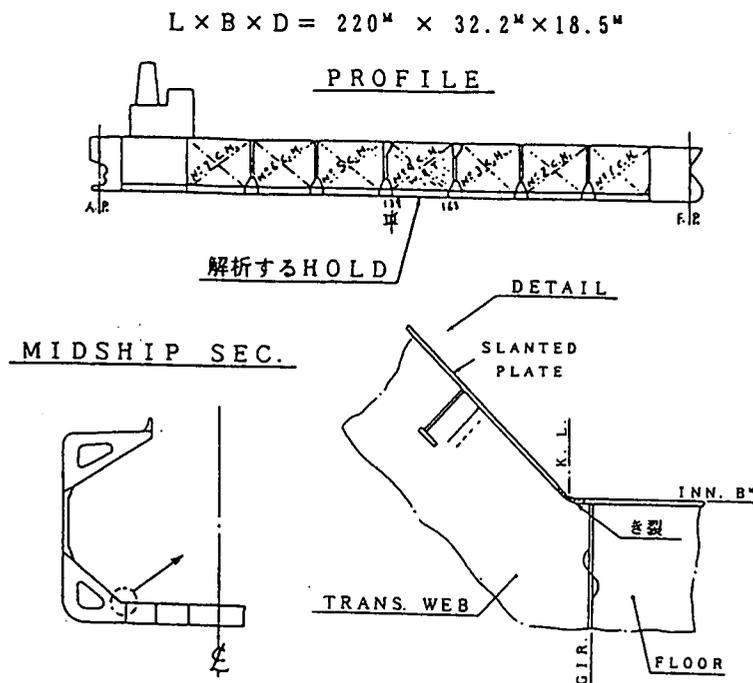


図3.15 バルクキャリアのき裂伝播解析対象部材

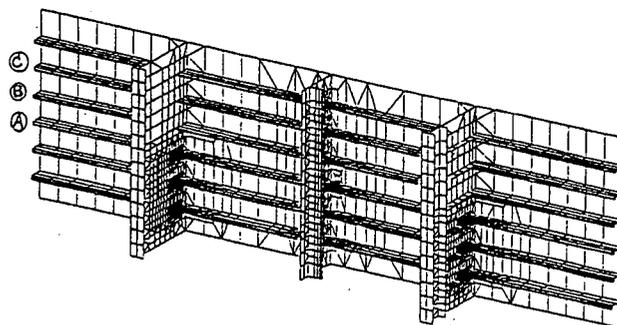


図3.16 VLCCのき裂伝播解析対象部材

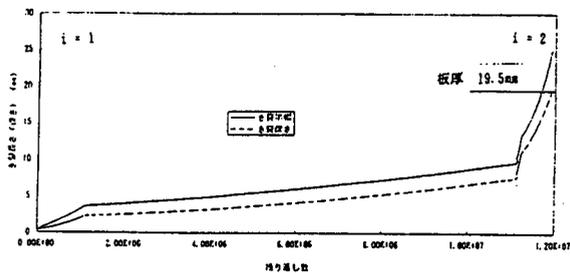


図3.17 フェイス表面のき裂伝播解析結果

以上のように、実構造における疲労き裂の伝播特性は静定である基礎試験片での挙動と大いに異なることを解析で示すことができた。本研究部会では、不静定構造体の中のき裂伝播挙動を実証するため構造模型の疲労試験も行われ、荷重再配分などによるき裂進展の様子が観察され、従来法に比べ、本研究部会の提案法を用いることで推定精度が向上し、寿命にして数割程度の誤差で構造模型のき裂成長を推定できることが示された。

4. 保守・点検時の疲労き裂の技術的取り扱い

4.1 き裂伝播解析手法に基づく新しい保守・点検のあり方

船体構造の設計段階では、疲労損傷を防止するために詳細な構造解析を実施し、主要構造の応力集中部について、マイナー則をベースとした疲労強度評価を行うことが一般的になりつつある。このような設計の高度化により、疲労き裂の発生は減少の傾向にあるが、一方で、工作精度の影響や波浪荷重等のばらつきにより、設計時には予測できない疲労き裂を経験することがある。しかしながら、船体構造は冗長性を有し、また、き裂が伝播して問題となるまでには時間がかかるため、これら全てのき裂がすぐさま問題となるわけではない。

現在行われている疲労設計法は、荷重推定精度の向上や応力解析技術の進歩等とともに強度評価手法として確立されつつあるが、疲労き裂の発生を安全性判定の基点としているため、き裂が発生した後の挙動や点検・保守といった整備条件については明確に関連づけられておらず、本来、安全性維持の両輪となるべき設計と運用のむすびつきが弱い設計法であるとも言える。その結果、設計のアウトプットとしての疲労強度評価結果は、点検・保守の現場において発見されたき裂が、船体の大規模破壊や機能喪失といった設計者が本来避けるべきと考えている状態（これを限界状態という）に対し、どのような影響度をもつのかという点について、有用な知見を与えることができず、そこで採られるべき処置は、保守管理者の個人的な経験や資質に基づいた判断に委ねられている。個人に依存する保守管理体制は、時として危険な判断であったり、また、逆に過剰な行為であったりする。

このような整備の現場における保守管理のばらつきを是正し、き裂損傷に対する判断技術を上方修正するためには、安全性判断の基点をき裂の発生防止から後述する小事故の発生防止へと変換するとともに、船体構造の特長である冗長性を念頭におき、損傷発生後の余寿命をベースに悪性の傷・良性の傷を区別した、合理的で安全性の高い整備を推し進めるべきであり、その達成のためには、本SRで扱われたき裂伝播解析技術が重要な役割を果たすことになる。すなわち、点検時に発見されたき裂について、それを放置すれば重大な事故に至る危険なものか、また、そのような状態に至るまでにどの程度の期間を要するものと予測されるのか、さらに、どのような経路で進展していくのか、等について答えてくれるのがき裂伝播解析技術である。

き裂伝播解析技術に基づいてき裂の評価をすることにより、合理的判断に基づくき裂への対処が可能となる。また、点検の方法や間隔をき裂進展の推定寿命や小事故の重要度に応じて設定することにより、より信頼性の高い点検スケジュールの策定が指向できる。疲労き裂発生防止を意図した疲労設計を、船体構造の安全確保のための一次防壁とすれば、き裂伝播寿命予測に基づき行われる限界状態防止のための保守・点検の新しいシナリオは、安全確保のための二次防壁と言える。

4.2 き裂伝播解析技術に基づく保守・点検のシナリオ

き裂伝播解析技術に基づく保守・点検のシナリオは、以下に示すような作業・検討を経て実現される。
(図4.2.1参照)

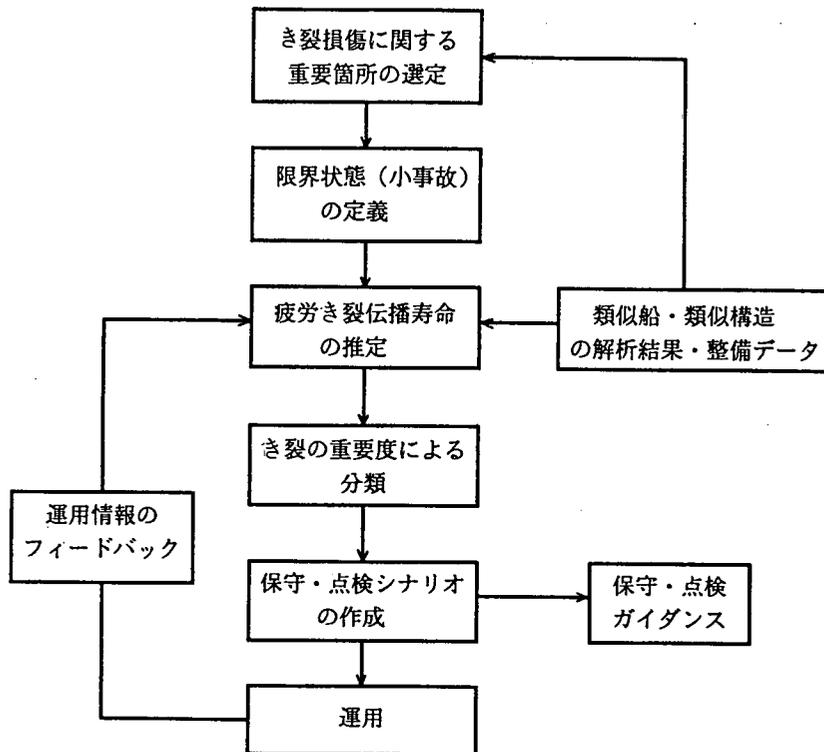


図4.2.1 新しい保守・点検のシナリオ

(1) き裂損傷に関する重要箇所の選定

き裂損傷に関する重要箇所は、き裂損傷の多発箇所、繰り返し荷重を受ける構造的応力集中部を含み、船体構造の局部のき裂が伝播した際、限界状態に陥り易い船体構造の場所をいう。

(2) 限界状態(小事故)の定義

限界状態とは、疲労き裂伝播解析により寿命予測を行う場合の、寿命が尽きるときの状態をさす。限界状態の定義を本SRでは、(1) 区画への浸水 (2) 主要構造部材の急速破壊(トータルロスへの引き金)の2種類とし、具体的には下記の事象到達をもって、限界き裂長さの設定を行うことを提唱した。

(a) 区画への浸水

- (i) スキン材(外板/隔壁板)に生じたき裂がスキンを貫通した時点
- (ii) スキン材(外板/隔壁板)への伝播が高確率と判断されるスキン材付ステイフナ等のき裂が所定の長さに達した時点

(b) 主要構造部材の急速破壊

- (i) 大骨部材のウェブ材に進展したき裂が所定の長さに達した時点
- (ii) 同機能複数損傷のき裂が所定の長さに達した時点
- (iii) 主に縦曲げに寄与する部材に発生/伝播したき裂が不安定破壊を引き起こす長さに至った時点

これらの限界状態は、船体の折損/大破口による転覆・沈没といった船全体に関わる大事故とは区別し、大事故へのトリガーとなりうる事故/貨物が損害を受ける事故/海洋環境を汚染する事故として、小事故と呼ぶことにする。また、この小事故の状態はき裂がある長さにまで伝播した状態であり、

き裂の発生段階である損傷（傷）とは明らかに区別される概念である。

(3) 疲労き裂伝播寿命の検討

上記(1)において選定された重要箇所に対し、(2)の定義による限界状態を寿命と考え、初期欠陥を想定し疲労き裂伝播寿命解析を行い、き裂長ささと伝播寿命の関係を明らかにする。また、本き裂長ささと伝播寿命の関係は、当該船だけではなく、類似船・類似構造の解析結果や整備情報のフィードバック情報を含むものとする。

(4) 重要度による分類

点検時に発見されたき裂が、悪性か良性かを判断する尺度として、ここでは、損傷の重要度という概念を提言する。

発見されたき裂が危険なものかどうかは、発見時のき裂長ささと位置により決定されるその構造部位の限界状態に至るまでの余寿命をベースに、下記の影響因子による重要度を加味して決定されるものとする。

- ・限界状態（小事故）の重大性
- ・近接複数損傷の有無

損傷の重要度の概念を具体的に示すため、損傷の重要度設定のフローを、図4.2.2に示すとともに、表4.2.1に設定例を示した。

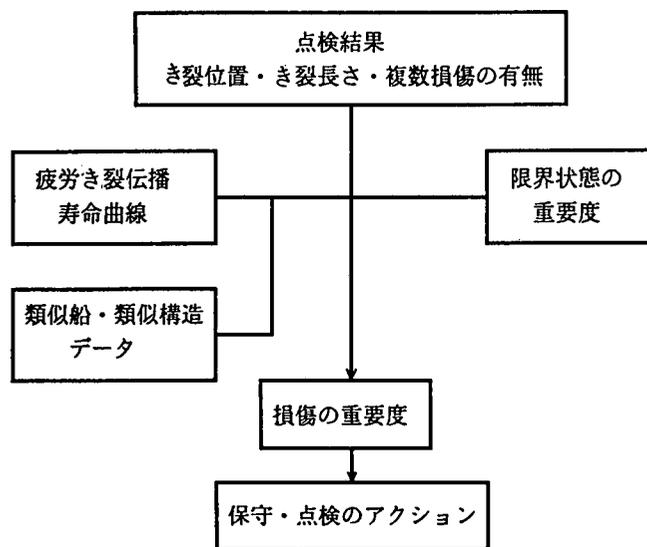


図4.2.2 損傷の重要度設定フロー

同図における各ステップの検討項目を下記に示す。

(a) 構造点検時

点検により発見されたき裂について、そのき裂発生位置とき裂長さ、複数損傷の有無を明記する。

(b) 余寿命の推定

各々のき裂について、当該船あるいは類似船・類似構造の疲労き裂伝播寿命曲線を参考に、限界

状態に至るまでの余寿命を推定し、き裂のランキングを行う。

(c) 限界状態の重要度分類

き裂成長時における当該構造部位の限界状態の重要度を、限界状態に至った場合の波及効果を考慮してランキングする。

(d) 損傷の重要度の決定

上記の余寿命の推定値によるき裂のランキング、限界状態の重要度のランキングおよび複数損傷の有無を加味して、総合ランキングとしての損傷の重要度を導出する。

表4.2.1 損傷の重要度と保守・点検のアクション

構造部位	き裂発見時の状況	推定余寿命	限界状態の重要度	数損傷の有無	損傷の重要度	保守・点検のアクション
部位①	き裂長 20mm	D	D	有	D	即補修、要補強
部位②	き裂長 15mm	B	C	無	B	き裂監視、数航の内補修
部位③	き裂長 15mm	C	A	無	B	き裂監視、数航の内補修
部位④	き裂長 30mm	A	A	無	A	き裂監視、次ドック時補修

(1) 推定余寿命による亀裂のランキング

推定余寿命	き裂のランキング
2年以下 D
2年～10年 C
10年～20年 B
20年以上 A

(2) 限界状態の重要度によるき裂のランキング

限界状態(例)	き裂のランキング
船体折損・沈没のトリガーとなる小事故 D
外板のリーク C
主要部材の機能喪失 B
隔壁板のリーク A

(3) 損傷の重要度と保守・点検アクション

損傷の重要度	保守・点検のアクション
D	即補修・要補強
C	き裂監視・次航補修
B	き裂監視・数航の内に補修
A	き裂監視・次ドック時に補修

注記；上記の諸数値およびランキングは、損傷の重要度の概念を示すためのものであり、定量化にあたっては、さらなる実績の蓄積とともに海事関係者コンセンサスが必要である。

(5) 保守・点検シナリオの策定

発見き裂が限界状態へ至るまでの余寿命と限界状態自身の重要度や検査性を加味した損傷の重要度により、き裂損傷を分類し、重要度に応じて検査点検時期を設定したり、き裂の進展段階に応じた保守・点検対策を策定する。

表4.2.1を参考に、保守・点検のシナリオを考慮すると、例えば下記のようになる。

- (a) 部材①の損傷は、伝播が急速で、早期に限界状態に達する恐れがあり、また、限界状態自身の重要度も高いため、補強も含めた補修が即時必要とされるき裂である。
- (b) 部材②の損傷は、限界状態の重要度は高いものの、き裂が限界状態に達するまでには時間的余裕があるため、補修方法・時期については、本船の運行スケジュールも加味して数航後とすることができる。ただし、毎航毎のき裂の監視は必要である。
- (c) 部材③の損傷は、限界状態へ至るまでの余寿命が短いものの、限界状態の重要度が低いため、取りあえず、応急処置や仮補修を施工することとし、本格的な補修は、本船の運行スケジュールも加味して数航後とすることができる。
- (d) 部材④の損傷は、限界状態の重要度が低く、限界状態となる前に停留してしまうと判断されるき裂である。このようなき裂については、監視を続けるにしても、補修は次回のドックまで待つことが可能なき裂と判断される。

なお、このような損傷の重要度に基づくき裂の分類は、損傷の発生・伝播の実績やその処理例とあわせ、あらかじめガイダンスとしてまとめておくことにより、点検時に発見されたき裂に対して適切な処置をとったり、続く保守計画を迅速に立案することができ、船舶の安全確保に資することができる。

(6) 運用情報の設計へのフィードバックと構造モニタリング

本シナリオの骨格をなす伝播解析手法の精度向上のためには、運行・整備を含む運用情報の設計へのフィードバックが重要である。また、将来的には、定期／不定期の目視検査に変えて、構造モニタリングによる高精度で常時計測される連続情報が、設計・保守の両面に亘り、有用な情報源となることが期待される。

以上が、き裂伝播解析手法に基づく新しい保守・点検の考え方である。本保守・点検のシナリオ策定に向けて、本SRでは、下記の作業を行った。

(1)の重要箇所を選定および(2)の限界状態の定義について、本SRでは、損傷事例の調査を実施し、代表的な大きき裂損傷とき裂発生箇所の事例を収集した。今後さらにデータを蓄積し、各船種毎の重要箇所を網羅するとともに、機能喪失等の限界状態との関連を明らかにする必要がある。

(3)の疲労き裂伝播寿命の解析について、本SRでは、その基礎となるき裂伝播解析手法を実船に生じる様々な影響因子を加味して実用的な形にしてまとめた。また、その手法の有効性を大型試験体を用いた実験により検証した。さらに、いくつかの船体構造部位について、伝播解析手法を適用し、き裂長さ、進展方向と伝播寿命の関係を明らかにした。これにより、き裂伝播解析手法に基づく保守・点検体制を展開するための基礎技術を手にすることができた。

(4)の重要度の分類および(5)の保守・点検のシナリオについて、本SRでは、保守・点検を考える上で重要な要素となる実船における各構造の検査性、すなわち、き裂損傷発見の可能性について、アンケート調査を実施し、発見可能長さについて有益な知見を得ることができた。一方、保守・点検のシナリオがガイダンスとしてまとめられるためには、上記の解析事例の蓄積と損傷の重要度によるき裂

損傷の分類の充実を待たなければならないと思われる。

(6)については、モニタリング技術の現状調査とき裂センサーに関する基礎的な開発研究を実施した。モニタリングに関する本格的な検討は、新たなSRとして実施される予定である。

4.3 検査性と発見可能き裂長さ

き裂伝播解析手法に基づく保守・点検のシナリオにおいては、き裂の重要度に応じて、十分な検査性が確保され、点検時に確実にき裂がチェックされることが必要となる。

本SRでは、き裂損傷事例の調査とともに、過去に発見されたき裂損傷の発見時の状況、目視による点検の現状に関する実態調査を目的として、「検査・点検に関する実態調査アンケート」を実施し、目視検査によるき裂発見の可能性について検討した。

バルクキャリアーの代表的な構造各部について、それらの箇所の検査性を「容易」「普通」「困難」と分類した場合の回答結果を、図4.3.1に示した。さらに、アンケートで集まった経験を集約、ファジー解析することにより、各検査性に応じて、目視検査によりどの程度の長さまでのき裂が発見可能かという評価を与えるPOD (Probability of Detection) 曲線を提案した。図4.3.2は、各検査性毎のPOD曲線を示している。

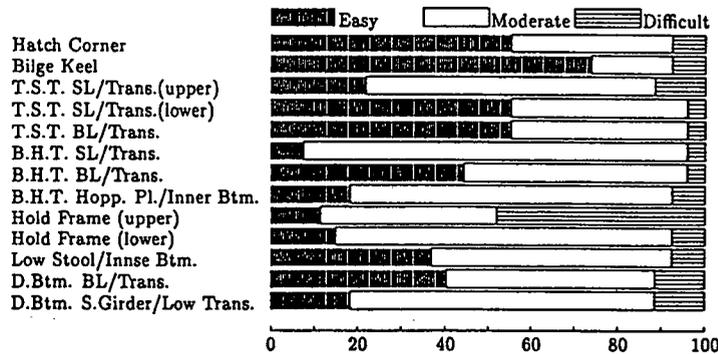


図4.3.1 バルクキャリアー各部の検査性

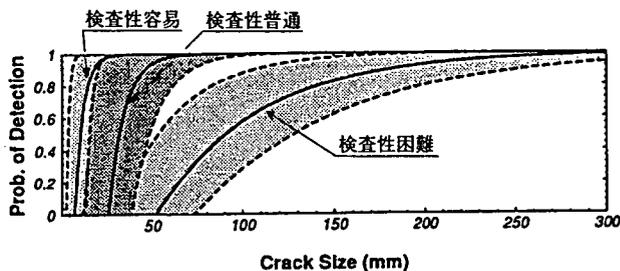


図4.3.2 発見可能き裂長さの推定曲線 (POD 曲線)

このPOD 曲線から、

- (1) 検査性「容易」の場合、ほぼ確実に発見できるき裂長さは、29mm
- (2) 検査性「普通」の場合、平均的に発見できるき裂長さは、32mm
- (3) 検査性「困難」の場合、かろうじて発見できるき裂長さは、34mm であることがわかった。

これらの結果から船体構造においては、30mm程度の長さがき裂損傷として認識されるき裂寸法の代表値であると考えられる。

点検プログラムの策定に際しては、検査性に応じた発見可能代表長さを考慮して、検査期間の設定を行う必要がある。また、重要度の高い部材については、検査性を改善してき裂が小さい間に発見できるような配慮も必要となり、本例のような知見は重要である。

4.4 保守・点検技術の高度化に向けて

保守・点検技術の高度化に関して、本SRの研究により得られた成果は、以下のとおりである。

- (1) き裂伝播解析手法の実用化により、限界状態に至るまでの寿命予測をベースとした保守・点検体制の基盤が整った。
- (2) 限界状態、損傷の重要度等の概念に基づく新しい保守・点検シナリオの方向を示すことができた。
- (3) 検査性に関するアンケート調査から、船体構造における発見可能なき裂長さの代表値の試案を提言できた。
- (4) 船体の代表的な構造についてき裂伝播解析を行い、実構造における応力の再配分や荷重様式の違いの影響等を含めたき裂伝播の特徴を把握することができた。

また、今後さらに詰めていくべき課題として、以下の点が挙げられる。

- (1) き裂損傷データの系統的な蓄積／フィードバック体制を確立するとともに、船種毎の重要箇所を、その構造部位の限界状態との関連において明確化する。
- (2) 各構造部位に対するき裂伝播解析事例を充実するとともに、解析結果と損傷データとの対比により、き裂伝播解析手法のさらなる高精度化を図る。
- (3) 実船における検査性の難易度、限界状態の重要度に基づいた損傷の重要度の定量化を模索する。
- (4) 損傷の重要度に基づいた保守・点検ガイダンスの策定を海事関係者のコンセンサスのもとに推進する。

第2部 新しい伝播解析手法

5. 疲労き裂の伝播形態と数値シミュレーション

5.1 船体構造における疲労き裂伝播形態

船体構造は薄肉補強板構造であり、疲労き裂発生が問題になり得る箇所は、溶接による板継ぎおよび骨と板の接合部である。主な箇所として連続隅肉溶接止端部、角巻き溶接止端部、板の突き合わせ溶接部、隅角部フリーエッジ等を挙げることができる。角巻き溶接止端部などに発生する疲労き裂は半楕円表面き裂とモデル化できる場合が多いので、き裂サイズと楕円のアスペクト比をパラメトリックに変化させた応力拡大係数のデータが整備されていれば板厚貫通までの伝播寿命の評価ができる。

板厚貫通後の疲労き裂はフランジ材からウェブへと伝播するが、スチフナ間隔などに比べき裂が短い間は2次元貫通き裂としてモデル化できる。き裂が長くなると隣接部材との相互作用などが生じ複雑な解析を必要とする。船体構造ではウェブの直上の内底板あるいはフランジ材の応力が大きいため、このような箇所にき裂が入ることが多い。この場合、き裂はフランジとウェブを同時に伝播し、複雑な状況を呈する。フランジが切断後はウェブを伝播するき裂問題になるが、この場合は交差部材や外板との相互作用とともに、溶接残留応力の疲労き裂伝播に及ぼす影響も検討する必要がある。また、部材交差部における応力の2軸性によりき裂が折れ曲がって伝播し、き裂伝播経路の予測が重要になる場合もある。隣接する骨材が同様な損傷を受けている場合とそうでない場合で、き裂伝播挙動がどの程度変化するかの評価も重要な問題である。次節では、これらの問題に対する解決策として新しいシミュレーション手法を提案する。

ウェブを伝播するき裂が外板に進入する際は、基本的にはウェブと外板の隅肉溶接部から表面き裂として外板へ進展する。このような解析はロンジ材などに長い疲労き裂が発見された際、その後船体浸水や荷油漏洩などの機能限界状態に至らぬような運航管理をするために重要な知見を与える。

5.2 スーパーエレメントを用いた船殻構造部材疲労き裂伝播形態の数値シミュレーション手法

(1) き裂伝播シミュレーションの概要

本研究では、部材交叉部を伝播する疲労き裂の最終破損モードの予測と曲進する溶接構造体内のき裂伝播寿命の予測を目的とし、作用応力、き裂伝播経路、溶接残留応力およびき裂伝播部と周辺構造との相互作用を考慮した数値シミュレーション手法を開発し、疲労き裂伝播試験との比較を行なった。特に周辺構造の剛性、作用荷重の影響を正確に表現するために汎用構造解析コードのスーパーエレメントを自動き裂進展シミュレーションプログラムに統合する手法を新たに提案する。

実船の疲労き裂は複雑な3次元構造に取り囲まれた領域に発生するので従来から用いてきた2次元平面領域内を任意の経路で伝播する疲労き裂の伝播シミュレーションプログラムでは対応が困難であった¹⁾。スーパーエレメント法とは、全構造のある領域を1つの副構造とし、この副構造を1個の有限要素(スーパーエレメント)と考え、その剛性マトリックスを計算し解析に利用するものである。そこで、本研究では、き裂伝播領域の周囲の複雑な構造を汎用構造解析コードでスーパーエレメント化し既存のき裂伝播解析プログラムに結合する手法を開発した。

(2) 疲労き裂伝播実験とシミュレーションの比較

シミュレーションとの比較に用いた溶接構造体疲労試験の試験体形状、ノッチ位置、荷重条件を図

5.1および図5.2に示す。試験体の下側はI型はりであり、疲労き裂伝播挙動を観察する上側部分は隅肉溶接によってI型はりの上フランジに取り付けられている。負荷は3点曲げであり、 $\Delta\sigma_1$ は試験片の上縁に沿った長手方向の公称曲げ応力範囲、 $\Delta\sigma_2$ は試験片中央部での上下方向の公称応力範囲である。2軸応力範囲比は $r = \Delta\sigma_2 / \Delta\sigma_1$ と定義される。各試験片の溶接残留応力分布の測定結果によると、試験部長手方向の残留応力分布は、I型はりの上フランジ隅肉溶接付近では引張り、溶接線から離れた位置では圧縮となっており、最大の圧縮残留応力値は、試験部上縁から30mm程度の位置でその値は $-200\text{MPa} \sim -300\text{MPa}$ である。

シミュレーションの一例として、 $r = 1.02$ の場合について考察する。変位ズーム解析および今回開発したスーパーエレメントを利用した解析の結果を、溶接残留応力を考慮した場合としない場合について実験と比較する。変位ズーム解析では、き裂のない場合の変位を境界上に与える。スーパーエレメント解析時のメッシュ分割図を図5.3に示す。

図5.4にき裂伝播経路を示す。残留応力の有無に関わらず実験結果とほぼ同様の経路をとることがわかる。図5.5にき裂伝播曲線を示すが、残留応力の影響が大きいことが分かる。変位ズーム解析の場合、き裂伝播速度の著しい低下が見られ、最終的にはき裂が止まる。これは、変位境界に与えられる強制変位の値がき裂進展前に対して計算された値であり、き裂進展に伴う周辺構造との弾性相互作用を考慮していないためである。スーパーエレメント解析の場合、この例ではき裂進展寿命が実験とほぼ一致した。

(3) 大型構造モデルAに対する数値シミュレーション

本研究部会で行われた大型構造モデルAのき裂伝播経路と応力拡大係数解析を行った。実際の試験体は3本のロンジを持つが、数値解析用のモデルは、図5.6のメッシュ分割図のようにロンジ1本としてモデル化した。ロンジと隔壁の交叉部にブラケットがある場合とスチフナがある場合のそれぞれのき裂伝播経路に大きな差はなくどちらもほぼ直進している。図5.7に、応力拡大係数を示す。ロンジ3本を有する場合について、その一箇所のスチフナ端から垂直真下にき裂が伸びる場合のK値計算結果を比較のため示す。明らかに、後者の方が応力拡大係数が小さいが、これはき裂進展に伴う構造的な内力の再配分が起こるためであると考えられる。

(4) まとめ

- (a) 疲労き裂伝播形態（伝播経路）の予測に関しては、作用応力のみを考慮し、周辺構造の剛性も近似的な取扱いで十分な結果が得られる。
- (b) 疲労き裂の伝播には、溶接残留応力特に圧縮残留応力が影響し、伝播寿命を長寿命化させる傾向がある。
- (c) き裂伝播経路と残留応力分布の相互作用により疲労き裂伝播寿命はき裂伝播経路の選択と境界条件に極めて敏感に変化する場合がある。2軸応力下のき裂曲進が生じる場合には、詳細な解析を要する。
- (d) 上記の場合であっても、汎用解析コードのスーパーエレメントを利用しき裂部周辺の3次元構造の剛性を正確に考慮したシミュレーションを行なうと、き裂伝播経路およびき裂伝播寿命の予測精度が大幅に改善される。
- (e) 補強板構造の場合き裂伝播に伴う隣接構造への荷重再配分の影響が大きいので、き裂伝播解析モデルの境界条件の設定には注意を払う必要がある。

5.3 マルチメディアによる船体構造損傷解説システムの構築

前述の実船の疲労損傷は複雑な3次元の部材交叉部に発生するので、幾何学的認識に困難を伴う事が多い。そこで、3次元CGやマルチメディア技術を利用し、船体構造内の疲労強度危険な箇所の代表的損傷をわかりやすく解説し、検査者により発見されたき裂損傷の形態を比較的容易かつ的確に認識することのできるシステムが構築可能であることをばら積船を例にとって示した。き裂損傷のデータは本研究会の調査資料を用い、また腐食状況の写真は日本海事協会の資料を利用した。

具体的には、パソコン上でDirectorとよばれるマルチメディアオーサリングソフトウェアを用い、文字、静止画、動画、音声などの各種デジタル素材情報を統合した²⁾。本損傷解説システムを実行すると、ユーザーは「き裂」または「腐食」に関する情報をマウスにより選択することができる。「き裂」を選択すると、どの船種についての情報を知りたいかを選択する画面が表示される。例えば、「バルクキャリア」を選択し、さらに探索する区域の選択を行う。図5.8には、横隔壁区域の下部スツールと内底板の交叉部のき裂、図5.9には上甲板区域のハッチコーナーのき裂の例が示されている。同様に、腐食損傷の箇所の探索も図5.10のように3次元CG画面をもとに行うことができる。図5.11はトップサイドタンク内の腐食状況の写真である。このようなシステムによって各種船舶の損傷に関する一般情報を蓄積していけば、設計者、運用者、検査員にとって有用なデータベースとすることができるであろう。

5.4 結 言

本節では、実船の疲労き裂伝播形態を数値シミュレーションする手法について述べた。本手法によれば、溶接残留応力のある船体構造部材において、応力の2軸性からき裂伝播経路が急変する場合にも、十分な精度で伝播経路と応力拡大係数を算定できる。また、実船のき裂等の損傷情報をビジュアルに表示するシステムの開発も行い、ばら積船を例にその有効性を示した。このようなシステムによって各種船舶の損傷に関する情報を蓄積していけば、設計者、運用者、検査員にとって共通の有用なデータベースとすることができる。

【参考文献】

- 1) 角他、造船学会論文集、176、(1994)、pp.447-454.
- 2) 川村他、造船学会誌、794、(1995)、pp.575-580.

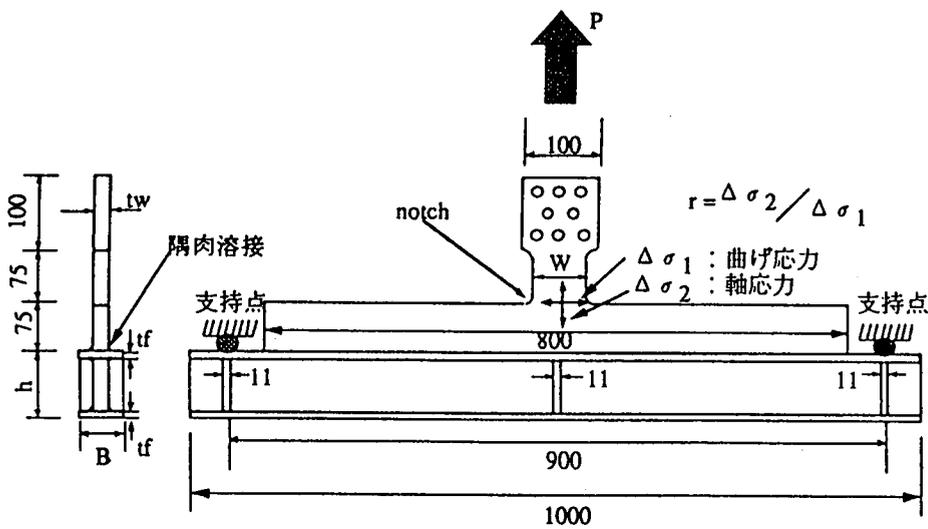


図5.1 試験体

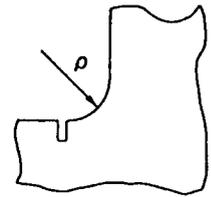
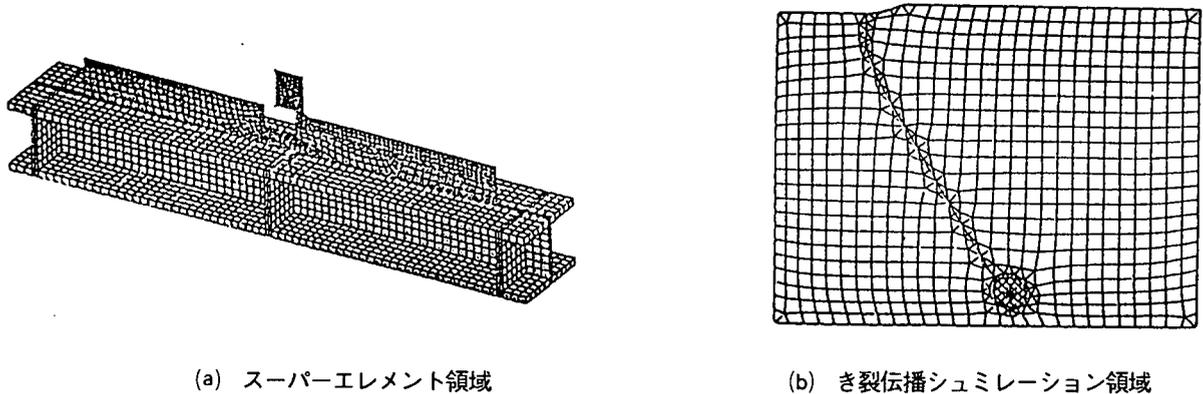


図5.2 ノッチ位置



(a) スーパーエレメント領域

(b) き裂伝播シミュレーション領域

図5.3 スーパーエレメントと結合する場合の要素分割の一例

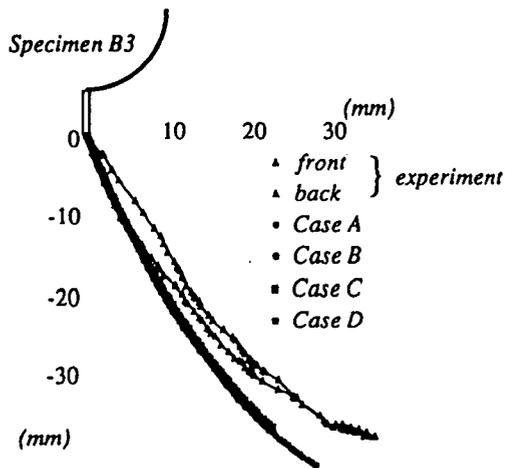


図5.4 き裂伝播経路

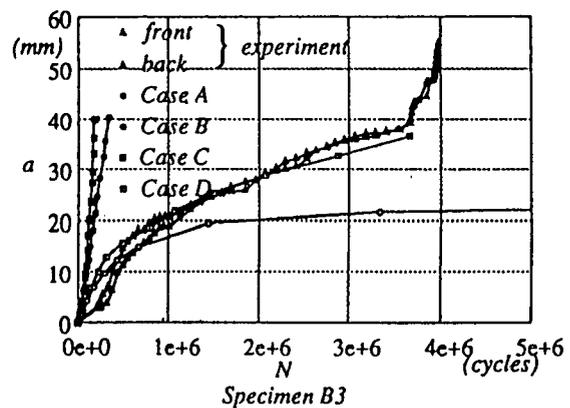
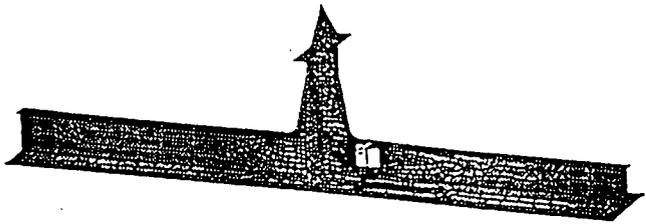


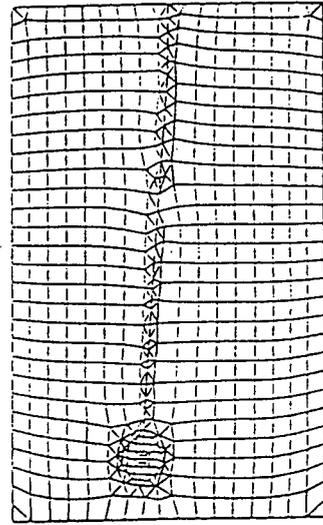
図5.5 き裂伝播寿命

(Case A : 残留応力を考慮しない変位Zooming手法、
Case B : 残留応力を考慮した変位Zooming手法、
Case C : 残留応力を考慮しないスーパーエレメント手法、
Case D : 残留応力を考慮したスーパーエレメント手法)

(Case A : 残留応力を考慮しない変位Zooming手法、
Case B : 残留応力を考慮した変位Zooming手法、
Case C : 残留応力を考慮しないスーパーエレメント手法、
Case D : 残留応力を考慮したスーパーエレメント手法)



(a) スーパーエレメント領域



(b) き裂伝播シミュレーション領域

図5.6 部材交差部のき裂伝播シミュレーションの要素分割

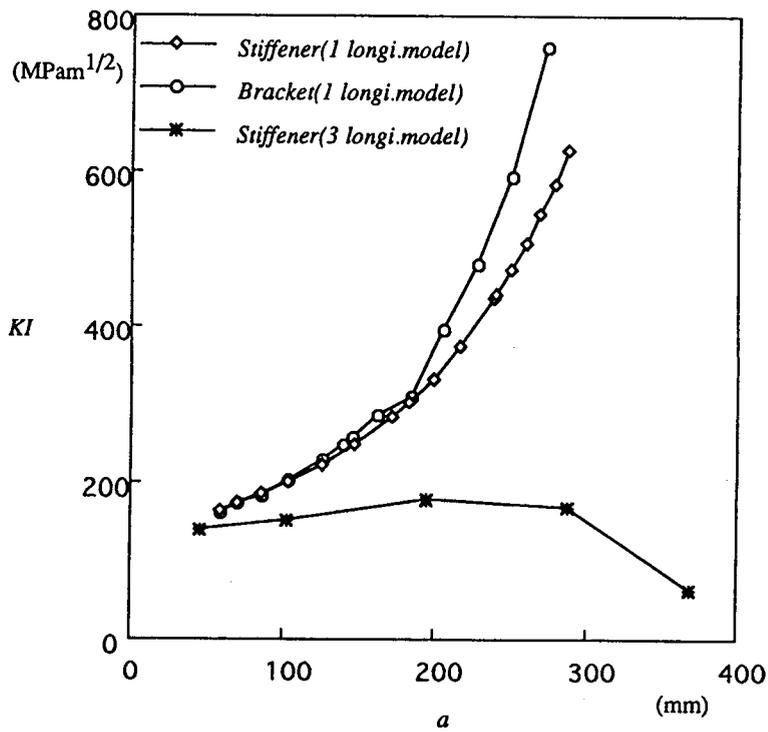


図5.7 1ロンジモデルと3ロンジモデルの応力拡大係数の比較

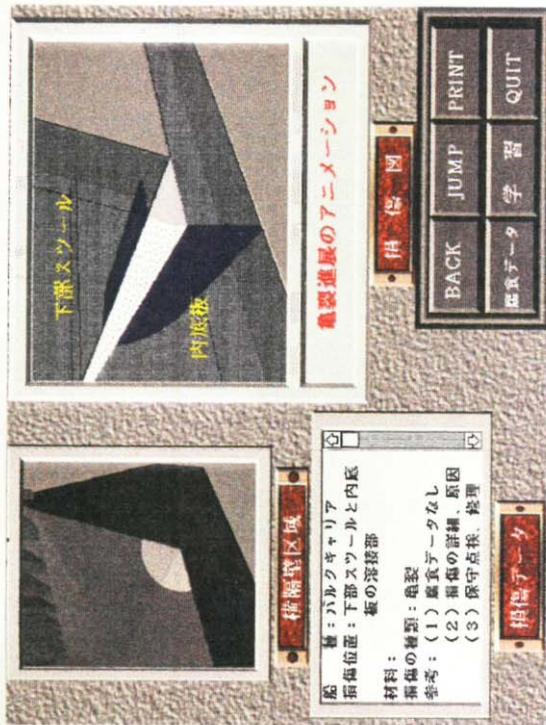


図 5.8 亀裂状況の解説例 (下部スツールと内底板交差部)



図 5.10 腐食状況の解説例 (トップサイドタンク)

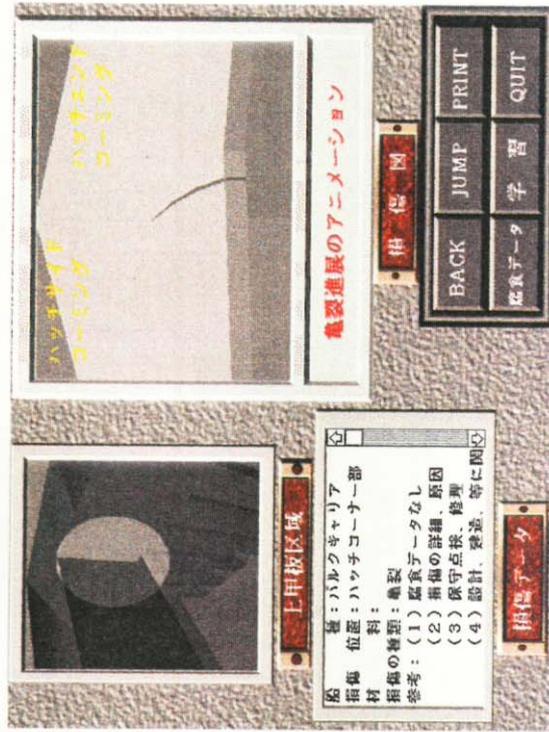


図 5.9 亀裂状況の解説例 (ハッチコーナー)



図 5.11 腐食状況の解説例 (縦通材のTrans Ring貫通部)

6. パリス則／有効応力拡大係数によるき裂伝播寿命評価

6.1 まえがき

線形破壊力学の体系が1950年代後半にIrwinによって確立されてからは、応力拡大係数がき裂先端の応力場を表し、エネルギー解放率とも密接な関係があることから、応力拡大係数範囲 (ΔK) を、き裂の伝播速度を律則するパラメータとして採用する試みがなされ、ParisやErdoganにより次式が提案された¹⁾。

$$da/dN = C \Delta K^m \quad (6.1)$$

式 (6.1) は、一般にパリス則とよばれている。式 (6.1) を積分することにより、き裂が初期長さ a_0 から、最終長さ a_f まで伝播するのに要する繰返し回数 N を、式 (6.2) により求めることが出来る。

$$N = \int_{a_0}^{a_f} \frac{1}{C \Delta K^m} da \quad (6.2)$$

パリス則に基づくき裂伝播寿命の計算は、現在広く行われているが、式 (6.1) の定数 C 、 m (特に C) は平均応力 (または応力比)、残留応力、荷重変動など種々の因子の影響を受けることから、2章でも述べたように、力学的により有意なパラメータとして、き裂開閉口挙動に基づく有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} ²⁾ あるいは、次章で述べるRPG荷重に基づく ΔK_{RP} が提案されている。

溶接継手の疲労き裂伝播寿命の推定にあたっては、溶接残留応力の影響を考慮するのに適した、 ΔK_{eff} や ΔK_{RP} による解析が有効である。

また、船体構造など溶接構造の疲労き裂の伝播寿命には、溶接止端部の局所的な応力集中や、構造的な不連続により生じる構造的応力集中が影響を及ぼす。

本章では、溶接継手に特有な溶接残留応力や局所のおよび構造的な応力集中を考慮にいれ、 ΔK_{eff} を用いたき裂伝播寿命解析を、複雑なき裂開閉口シミュレーションや K 値解析を経ずに、簡便に実施する手法について検討した結果について述べる。

6.2 有効応力拡大係数による簡便なき裂伝播寿命評価法の提案

有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} を用いたき裂伝播速度は、式 (6.3) で表すことが出来る。

$$da/dN = C (\Delta K_{eff}^m - \Delta K_{eff, th}^m) \quad (6.3)$$

ここで、 $\Delta K_{eff, th}$ は、き裂進展下限界 ΔK_{eff} である。

疲労き裂伝播寿命は、式 (6.3) を積分することにより求めることが出来る。

式 (6.3) を解析的に積分することは出来ず、数値的に解くことになる。

ここでは、基本的な溶接継手である、隅肉溶接継手および角回し溶接継手について、き裂が板厚を貫通するまでの寿命を数値的に解く方法について提案をする。

図6.1に、提案する手法のフローを示す。本フローにしたがった計算の手順を以下に示す。

(1) 計算に必要な入力データ

以下のデータを用意する。

継手形状：継手分類、主板板厚、副板板厚、副板長さ、溶接脚長

溶接条件：溶接方法、溶接順序、パス数、入熱
外力条件：膜応力、曲げ応力、平均応力、応力範囲
初期き裂寸法：き裂長さ、き裂深さ

(2) 計算の手順

① 残留応力の推定

溶接継手の疲労き裂進展寿命を評価する場合に、残留応力の影響を無視することは出来ない。残留応力の影響は、平均応力の影響と等価と考えて良いが、応力そのものではなく、き裂の進展に伴って残留応力が解放されることにより、き裂の先端に生じるK値を外力により発生するK値に加えて評価することが必要となる。そのためには、残留応力の分布を推定しなければならない。

ここでは、継手形状および溶接条件に基づき、固有応力法³⁾により、残留応力分布を算出する方法を採用した。

残留応力分布の推定が困難な場合には、き裂の進展速度に残留応力の影響を最大限見込むことにより（詳細は後述する）安全側の評価（寿命を短くめに推定する）をする事が出来る。その場合に、継手の種類により、応力比（＝最小応力／最大応力）Rが以下に示す条件の下で、残留応力を勘案して計算した結果とほぼ同等の寿命を推定することが出来る。

隅肉溶接継手： $R \geq 0$

角回し継手： $R \geq -1$

② 止端部表面き裂のK値計算

溶接継手の疲労き裂伝播寿命を計算するためには、溶接の止端部から発生した表面き裂のK値を求めることが必要である。溶接止端部に発生したき裂のK値は、継手の主板、副板の板厚、溶接脚長、構造的な応力集中等の影響を受けるため、これらを考慮しなければならない。

本研究では、（構造的な応力集中がない場合に）溶接止端部に存在する表面き裂の、外力によるK値は、Pang⁴⁾およびMaddox⁵⁾によるK値補正式を用いて計算した。

また、残留応力の解放により生じるK値（ K_{res} ）は、白鳥らによる影響関数法⁶⁾を用いて計算した。

③ 構造的応力集中率KSの計算

構造的応力集中率KSは、ホットスポット応力と公称応力の比率であり、式(6.4)で定義される。

$$KS = \sigma_{hss} / \sigma_n \quad (6.4)$$

σ_{hss} ：ホットスポット応力、 σ_n ：公称応力

ホットスポット応力の算出法として、SR202-B法⁷⁾、0.3t法⁸⁾などがある。

④ KSによるK値補正係数の計算

次に、KSがK値に与える影響を補正する係数を算出する。本研究では、中央に集中荷重を受ける中央貫通き裂のK値の計算式⁹⁾をベースに、簡易的な補正係数を提案した。

⑤ 応力比Rとき裂開口比Uの関係

ΔK_{eff} と ΔK の間には、き裂開口比Uを用いて、 $\Delta K_{eff} = U\Delta K$ の関係がある。Uは応力比Rの関

数であるが、本研究では加藤の式¹⁰⁾を採用した。

⑥ き裂進展速度 ($da/dN - \Delta K_{eff}$ 関係)

$da/dN - \Delta K_{eff}$ 関係は、3章の式 (3.1.3) を用いる。あるいは、 $da/dN - \Delta K_{eff}$ 関係は、き裂が完全に開口した状態 ($U=1$) での $da/dN - \Delta K$ 関係と等しいという事実に基づき、常にき裂が完全に開口している状態で求められた、太田による溶接継手のき裂進展速度式¹¹⁾ を、 $da/dN - \Delta K_{eff}$ 関係と考えることが出来る。

太田は、平均的なき裂進展速度と、き裂進展速度の上限を求めており、前者を用いることにより溶接継手の平均的なき裂進展寿命を、後者を用いることにより下限のき裂進展寿命を推定することが出来る。

また、 R に関係なく常に $U=1$ であるとして、計算すれば、溶接残留応力の影響を最大限に見込んだ、安全側の寿命評価をすることが出来る。

6.3 提案した手法の適用例

提案した手法を適用して、継手の寿命を計算した例を示す。

(1) 隅肉溶接継手への適用例

溶接残留応力は、板厚が厚いほど大きくなる。したがって、厚板になるほど残留応力の影響を大きく受けるものと考えられる。

提案した手法の適用性を検討するため、ここでは板厚が10mmから80mmまでの継手について系統的に試験が行われたSR202での実験⁷⁾について解析を行った。

き裂進展速度として平均的なき裂進展速度を用いた場合の計算結果と、試験結果の比較の例 (リブ十字継手、 $R \cong 0.1$) を図6.2に示す (AC210シリーズは板厚10mm、AC280シリーズは板厚80mm)。ここで、初期き裂の寸法は長さ0.4mm、深さ0.2mmの半円としている。図中の細線は常に $U=1$ であるとし、溶接残留応力 (σ_{res}) の影響を最大限に見込んだ場合、太線は U を算出しながら寿命を計算した場合の計算結果である。前者の方法で計算した場合、計算と実験に多少の差が見られ、計算での $t=10\text{mm}$ と $t=80\text{mm}$ の差はわずかであるのに対し、残留応力分布を考慮することにより、実験と計算がよく一致し、計算において $t=10\text{mm}$ と $t=80\text{mm}$ の差が明確となり、板厚による残留応力の影響がよく再現されている。

(2) 縦リブ角回し溶接継手への適用例

縦リブ角回し溶接継手への適用例として、川野らの試験結果¹²⁾に適用した例を、図6.3に示す。

縦リブ角回し溶接の場合には、板厚がそれほど大きくなるとも、拘束度が大きく残留応力が大きくなるため、残留応力の影響を最大限に見込んだ場合と、残留応力の解放による K 値の影響を考慮した場合との差が少なくなることが分かる。

(3) 計算寿命と実寿命の比較

本研究で調査を行った数十件の文献の中から、計算に必要なデータが揃っている9つの文献^{7) 8) 12) 13) 14) 15) 16) 17) 18) 19)}について、計算寿命 N_{es} と実破断寿命 N_f との関係をプロットした結果を図6.4に示す。計算寿命は、一部を除き実寿命の3倍から1/3倍の範囲に入っている。なお、図6.4のプロットは、残

留応力の影響を最大限に見込んだ場合の計算結果であり、残留応力の影響を考慮に入れた計算を行えば、さらにばらつきの幅は小さくなるものと考えられる。

6.4 提案した手法の適用限界と精度向上法

ここで提案した手法には、溶接継手の疲労き裂進展寿命を簡便に推定するための種々の仮定が行われている。また、き裂進展解析を行う上で、必要性はかなり高いが、考慮されていない因子も含まれる。

考慮されていない因子の中で、重要度が高いものは以下の2つである。

- ① 複数き裂の進展とき裂の合体
- ② 荷重変動履歴の影響

①に関し、ここで提案した手法では、単一の表面き裂の進展をシミュレーションしているが、実際の継手のき裂進展においては、溶接止端部に多数のき裂が発生し、それらが合体しながら伝播していく。ここで提案した手法は、き裂の深さ方向の進展速度やき裂の貫通寿命の推定に向いているものの、このように目視で検出することが出来る表面長さに対応させることには無理がある。

また、②について、ここでは一定荷重振幅下での試験データに適用した例を示しているが、実船の受ける応力は変動するため、荷重履歴の影響を考慮した計算手法を適用し、精度を向上させることが必要となる。

これらの因子を考慮し、6.3節で述べたフローの各ステップでの評価式の改善を行うことにより、提案した手法の精度をさらに向上することが可能である。

【6章の参考文献】

- 1) P. C. Paris and F. Erdogan, Trans. ASME, D, 85-4, 1970
- 2) W. Elber: The Significance of Fatigue Crack Closure, ASTM STP 486, 1971
- 3) 松岡, 溶接製殻構造物の残留応力に関する一解法, 造論第153号, 1983
- 4) H. J. Pang, A Review of Stress Intensity Factors for Semi-elliptical Surface Crack in a plate and Fillet Weld Joint, Weld. Inst. Rpt. 426, 1990
- 5) S. J. Maddox and R. M. Andrews, Stress Intensity Factors for Welded Toe Cracks, Paper Presented at Damage 90, 1990
- 6) 白鳥他, 任意分布力を受ける表面き裂の応力拡大係数の解析 (第2報), 機論A, 52巻, 474号, 1986
- 7) 八木他, ホットスポット応力規準による平板構造の疲労強度評価 (第一報), 造論第169号, 1991
- 8) 仁瓶他, 板すみ肉溶接構造の統一的な疲労強度評価法に関する研究 (第1報), 造論, 第172号, 1992
- 9) 岡村弘之, 線形破壊力学入門, 培風館, 1976
- 10) 加藤他, 広範囲の応力条件下での疲労き裂伝播則組織の検討—き裂開閉口挙動に基づいた考察—, 造論第153号, 1983
- 11) 日本溶接協会, 鉄鋼部会, WR-3委員会, WG-A資料
- 12) 川野始他, 疲労設計概念の実現法に関する研究, 平成3年度科研成果報告書, 1992
- 13) 田垣徳幸他, 溶接継手の疲労寿命に与える隅肉溶接止端の影響, 土木学会論文報告集, 324号, 151/159, 1982
- 14) R. Yee et al., Thickness Effect and Fatigue Crack Development in Welded Joints, Proc. 7th Int. Conf. Offshore Mech. Arct. Eng., 3, 447/457, 1988
- 15) 三木千寿他, 隅肉溶接止端からの疲労き裂の発生と初期進展挙動, 構造工学論文集A, 35, 321/328, 1989
- 16) J. A. Ferreira et al., Fatigue Analysis and Prediction in Fillet Welded Joints in the Low Thickness Range, Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., Vol. 13, No. 3, 201/212, 1990
- 17) T. Lassen, The Effect of the Welding Process on the Fatigue Crack Growth, Weld. J., Vol. 69, No. 2, 75S/81S, 1990
- 18) 飯野他, 50キロ級高張力鋼溶接継手疲労強度評価法の一考察, 造論, 第171号, 1992

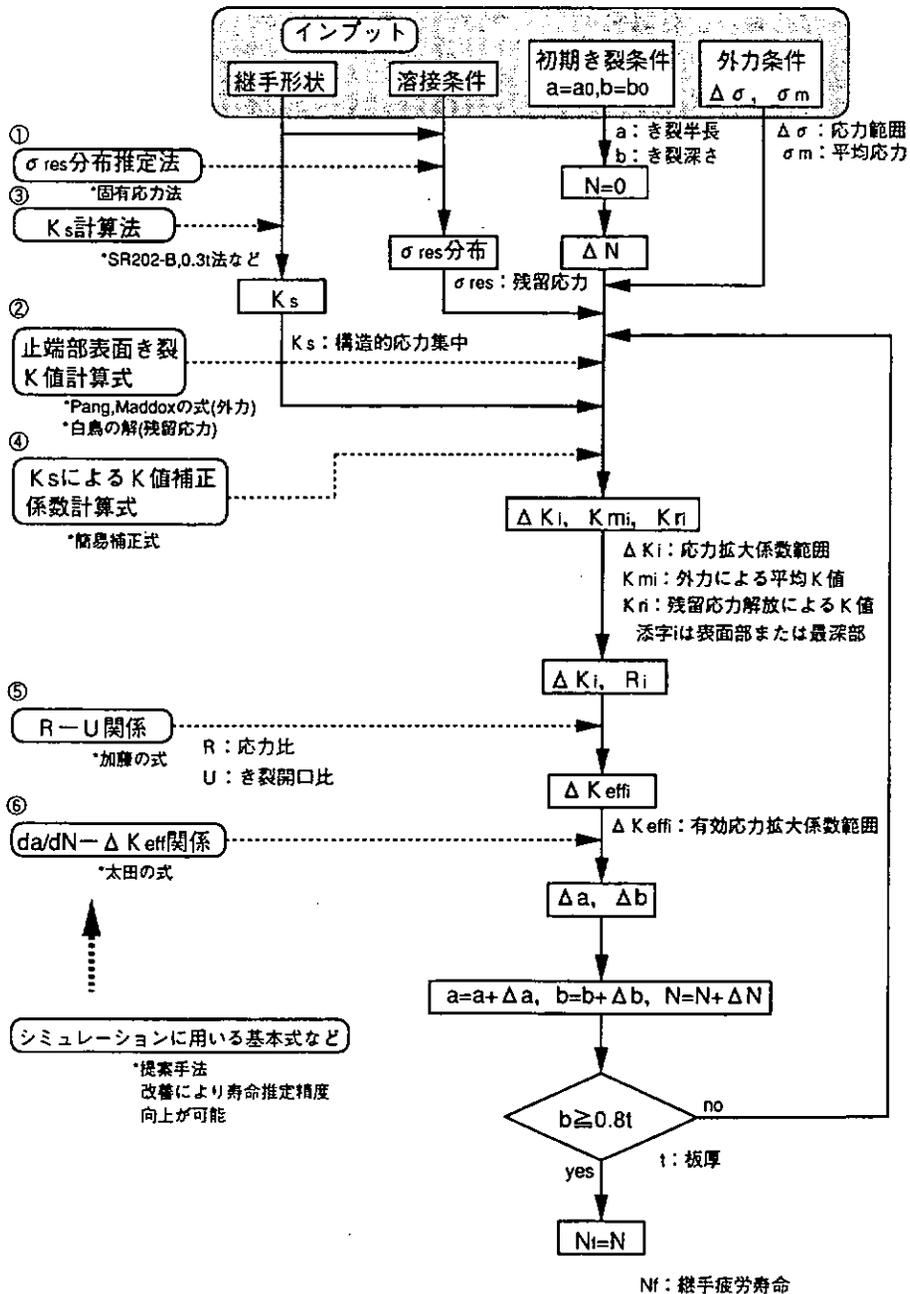


図6.1 有効応力拡大係数を用いたき裂伝播解析手法による溶接継手の疲労寿命簡易推定法フロー

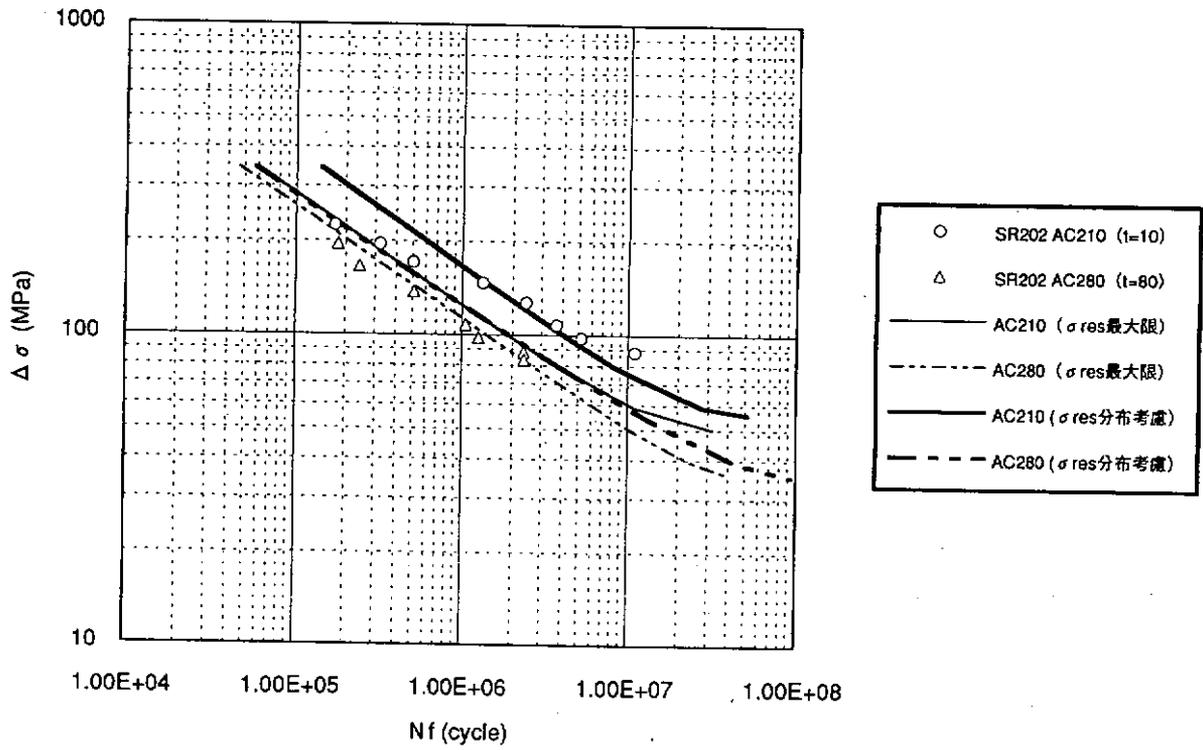


図6.2 十字隅肉溶接継手のき裂伝播寿命計算例

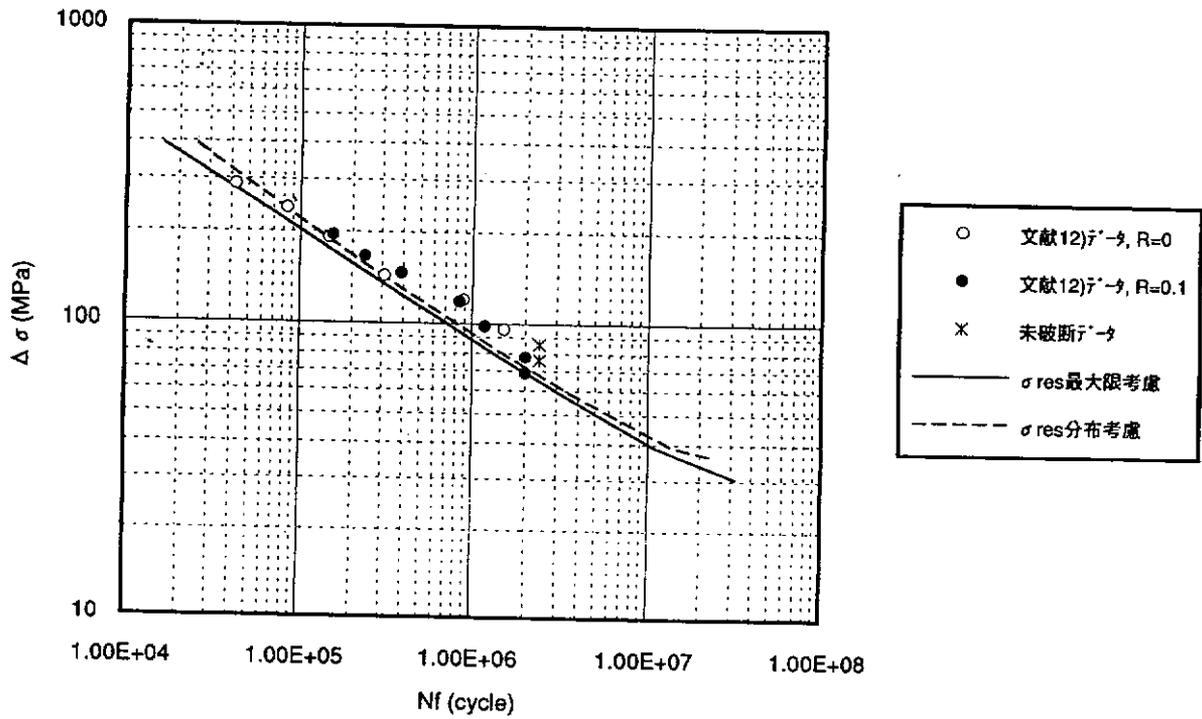


図6.3 縦リブ角回し溶接継手のき裂進展寿命計算例

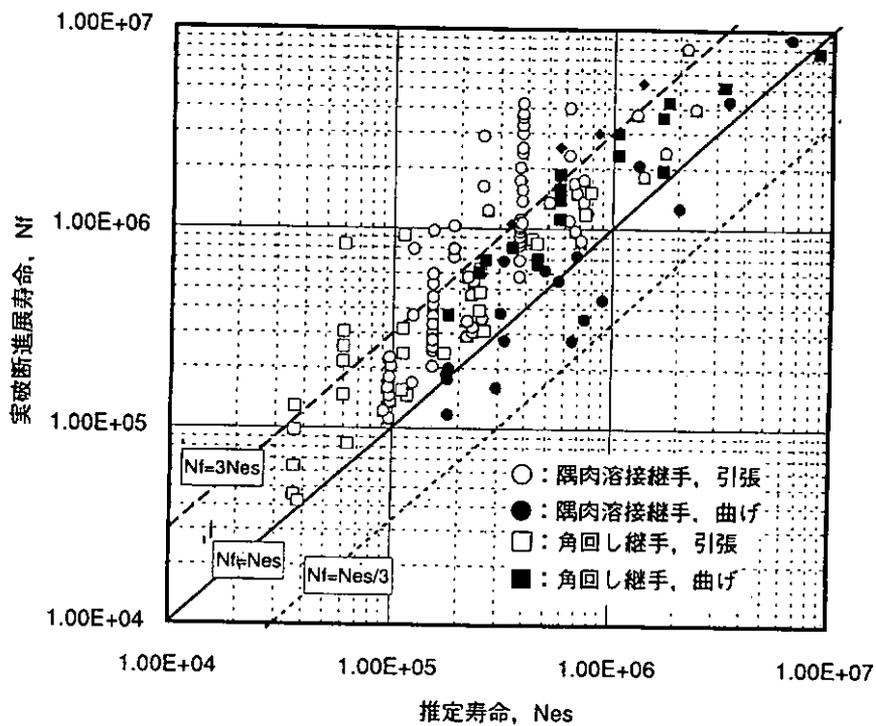


図6.4 各種文献データについての $N_{es} - N_f$ 関係 (残留応力を最大限に考慮)

7. RPG 荷重による寿命評価

7.1 塑性挙動を考慮した疲労き裂伝播則

疲労き裂は、き裂自身の応力／ひずみ集中により伸ばされたき裂前方の材の中を進展するために、繰返し荷重下では複雑な挙動を呈する。すなわち

〈負荷過程〉では、

- ① 最小荷重で生じたき裂閉口域が負荷に伴い、徐々に小さくなり、完全に開口するまでの荷重区間
- ② き裂が開口してから、き裂先端に再引張塑性域が生じ出すまでの荷重区間
- ③ き裂先端に再引張塑性域が生じてから、き裂の鈍化とともに引張塑性域が成長して、最大荷重にいたる荷重区間

〈除荷過程〉では、

- ④ 最大荷重から、除荷弾性域がき裂先端近傍に生じ、き裂先端に再圧縮塑性域が生じ出すまでの荷重区間
- ⑤ き裂先端に圧縮塑性域が生じてから、圧縮塑性域が成長しき裂の鋭化が起こり、き裂が閉口しだすまでの荷重区間
- ⑥ 圧縮塑性域の成長とともに、き裂閉口域が成長して最小荷重にいたる荷重区間

が、通常生じる。疲労き裂の進展は、き裂先端近傍で生じる塑性仕事の蓄積により引き起こされると考えられる。塑性仕事が行なわれる荷重区間は、上記のうち、③、⑤および⑥である。除荷過程では、圧縮の塑性域の成長は⑤と⑥の過程で生じ、荷重の増分は塑性域の成長だけに寄与しているわけではなく、き裂閉口域の成長にも寄与している。しかし負荷過程では、③の区間のみが引張塑性域の成長だけに寄与している。したがって、塑性域の成長のみに寄与する荷重範囲は③の区間に対応する。上記の観点から負荷過程で生じる再引張荷重発生荷重RPG荷重から、最大荷重にいたる荷重範囲③に対応する応力拡大係数範囲 ΔK_{RP} が、疲労き裂伝播速度 da/dN を律するパラメータであると提案されている¹⁾。そして、図7.1に示すように、種々の荷重パターン付与した試験結果より、 $\Delta K_{RP} \sim da/dN$ 関係は両対数グラフ上で、極低伝播速度領域までを含めて直線関係にあることが明らかにされた²⁾。またき裂停留条件は $\Delta K_{RP} \leq 0$ で与えられることが、実験より明らかにされた³⁾。

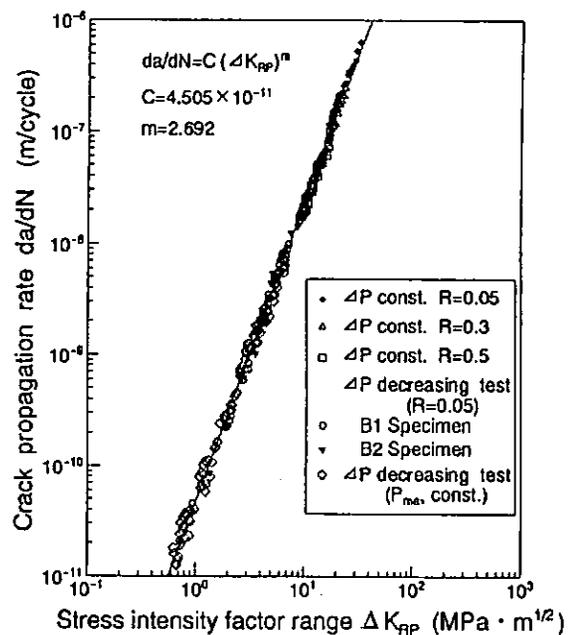


図7.1 da/dN と ΔK_{RP} の関係

7.2 RPG 荷重のシミュレーション

【Dugdale モデルの一般化】

弾塑性状態のき裂開口変位を定量的に表すモデルとして、Dugdale モデルがある。図7.2はDugdaleモデルの原理を示したものであり、き裂が存在しない状態で、最大荷重 P_{max} が働いた場合に、切欠線上(x軸)に働く応力分布が、図7.2(b)、そして残留応力分布が図7.2(e)である場合に、切欠底からcの位置まで実き裂が生じた場合の応力分布は、材料を完全弾塑性体と考え、図7.2(a)になる。ただし、Dugdaleモデルではx軸上には、y方向応力および剪断応力は働かないと仮定している。

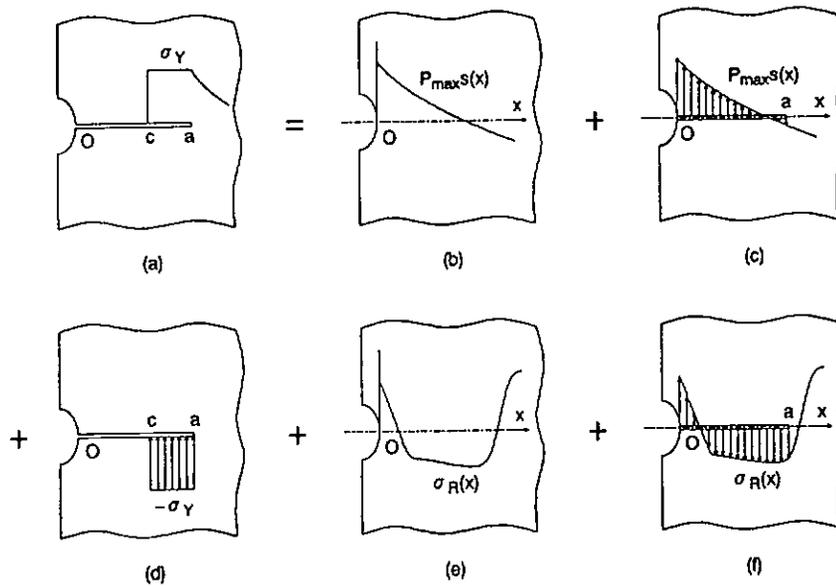


図7.2 Dugdaleモデルによる重ね合わせの原理

この場合、図7.2 (a) は図7.2(b)~(f)を重ね合わせたものになる。すなわちaを仮想的なき裂の先端と考える。図7.2(c)のように、図7.2(b)の応力分布に等しい内圧を $[0, a]$ 間のき裂面に作用させると、 $[0, a]$ 間の固体の表面部には、 $-P_{max} \cdot s(x)$ なる応力が作用し、これと図7.2(b)を加えると、 $[0, a]$ 間のx軸上のy方向応力は0となる。同様に図7.2(e)と図7.2(f)を重ねさせても、 $[0, a]$ 間のx軸上のy方向応力は0となる。したがって図7.2の(b)+(c)+(e)+(f)により、 $[0, a]$ 間のx軸上のy方向応力は0となり、き裂表面と同じ応力分布となる。そこで図7.2(d)のように $[0, a]$ 間のき裂面に降状点と等しい負の内圧を作用させると、 $[c, a]$ 間のき裂面には、降状点と等しい応力が作用することになる。したがって図7.2(a)は図7.2(b)~(f)を重ね合わせることで表現できる。

ここで仮想き裂先端では、作用応力は無限大とならないから、図7.2(b)~(f)を重ね合わせた場合のK値(ただし図7.2(b)と(e)はき裂が存在しないのでK値は0)が0という条件より、aの位置が決定される。

き裂のある位置 X_i に集中荷重を作用させた場合のK値が既知であると、任意位置xの弾性き裂開口変位はParisの相反定理で求められる。したがって、その弾性CODを図7.2によって重ね合わせれば、Dugdaleモデルによるき裂開口変位が求められる。

【仮想き裂部における間隙の処理】

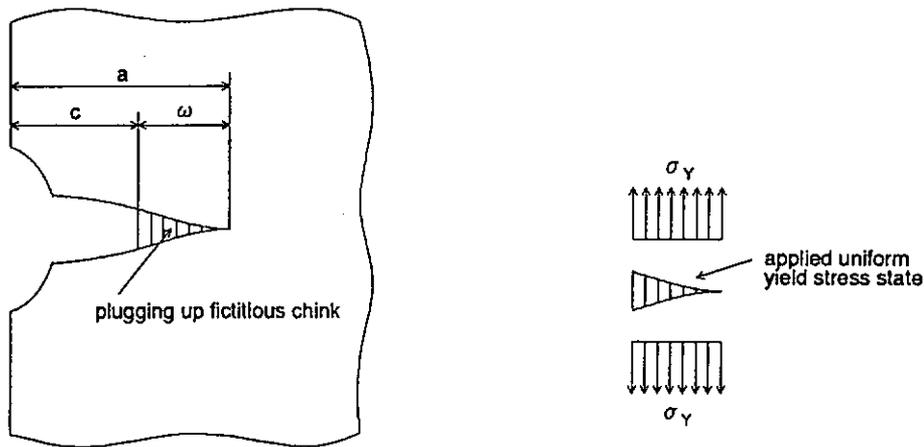
Dugdaleモデルでは、仮想き裂域 $[c, a]$ 間は、仮想的な開口が生じている。この開口すなわち間隙は実際には生じていない。そこで図7.3(b)に示すように、一様な外応力（降状点に等しい弾性応力）が、小片に作用した場合の形状が、Dugdaleモデルにおける仮想き裂部のき裂開口変位と等しい小片を考える。図7.3に示すようにDugdaleモデルでの仮想き裂部に上記小片を埋め込むと、間隙がなくなり、より実際に近いモデルとなる。この小片はDugdaleモデルとの整合性により完全弾塑性体となる。

【除荷過程及び負荷過程におけるき裂開口変位と応力分布】

上記小片を図7.3に示した様に、き裂垂直方向に切断し、棒要素とする。これらの棒要素は弾性状態にある限り、除荷過程では直前の最大荷重、負荷過程では直前の最小荷重時のゲージ長を保持する。

き裂の進展は、この棒要素が上下に分離することで表現し、分離した個所（実き裂内）では、圧縮応力しか作用しない。この条件から、過去の仮想き裂先端より、仮想き裂が成長しない場合の応力分布、ならびにき裂開口域、き裂開口量が計算できる。過去の仮想き裂先端より、仮想き裂が進展した場合はDugdaleモデルで、き裂開口量が計算できる。

このモデルではき裂開口量から棒要素のゲージ長（引張残留変形層に対応）を引いたものが、繰り返し荷重下における実際のき裂開口変位と考えている。



(a) Crack-surface displacement for fictitious crack

(b) Segment plugged up region with fictitious COD at plastic zone

図7.3 仮想き裂部における間隙の処理

【き裂進展時の棒要素の縮み】

疲労き裂は、除荷過程で進展すると仮定する。除荷過程では、き裂先端の棒要素には、圧縮降状応力が作用している。すなわち仮想き裂面に対しては、正の内圧（降状点に等しい）が作用していることになる。新しい疲労破面が出来ると、瞬間的にこの内圧が解放される。

この内圧は、き裂を開口にさせる方向に働いていたものであるから、解放されることにより、き裂開口変位は小さくなる。疲労き裂は除荷過程で徐々に進展するので、最小荷重時に一度に進展するとした場合の内圧解放によるき裂開口変位の変化量よりも、疲労過程でのき裂開口変位の変化量は小さい。

そして、その割合は、き裂が入る直前までに受ける塑性ひずみ増分（全ひずみ増分）に比例すると仮

定できる。全塑性ひずみ増分は直前の1サイクル中の塑性ひずみ増分に比例し、塑性域寸法に逆比例すると考えることが出来るので、直前の1サイクル中の塑性ひずみ増分と塑性域寸法比（過去の塑性域先端（=仮想き裂先端）まで、最大荷重時の塑性域が到達した場合を1とする）の積にある定数 α （材料定数）を乗じることにより、新しくき裂が入る個所の棒要素のゲージ長を与えている。

[RPG 荷重について]

負荷過程において、き裂先端が降伏しだす荷重がRPG荷重である。上記の具体的な定式化については参考文献⁴⁾を参照されたい。

7.3 実構造物における疲労き裂伝播寿命の推定

上記のシミュレーションを実構造物に直接適用するには、種々のき裂長さを有する構造物のき裂面の種々の位置に集中荷重を作用させた場合のK値を求め、それを基にRPG荷重を求める必要がある。この計算は膨大となるので、設計時には適用が困難である。上記プログラムは任意応力分布下のRPG荷重を推定できる。一定荷重振幅下では、き裂長さ a と ΔK の関係が同じで応力比も同じならば、境界条件が異なってもほぼ同じき裂成長曲線が得られる。

そこで、ある荷重下における構造物におけるき裂長さ a とK値の関係を、無限板の板厚貫通き裂に対して再現できる応力分布を求め、そのもとで嵐モデル等の実際に生じると考えられる荷重パターンを与えて、無限板中でRPG荷重をシミュレーションすれば、実構造物に実際与えた荷重履歴下のRPG荷重が求められ、それよりき裂成長曲線が推定できる。残留応力によるき裂長さ a とK値の関係より求められる等価分布応力を入力すれば、残留応力の影響も考慮した疲労き裂成長曲線が得られる。

上記は全てプログラムされており、実構造物におけるき裂長さ a とK値の関係、材料定数（降伏点、塑性収縮係数 α 、 C 、 m 値）、荷重出現順序を入力すれば、き裂成長曲線が得られるようになっている。

図7.4は、中央貫通き裂に対して無限板における等価分布応力を求め、無限板中のき裂に対して嵐モデル荷重の平均荷重が変動してかかる場合の等価分布応力を与え、き裂成長曲線をシミュレーションした結果の1例であり、平均荷重が小さい区間はき裂は進展しないが、平均荷重が大きくなった初期では、加速するという挙動（実験的にも確認されている）が現れている。この結果は有限板に対するシミュレーション結果と一致しており、構造物に対しても同様の手法が適用できることは明らかである。

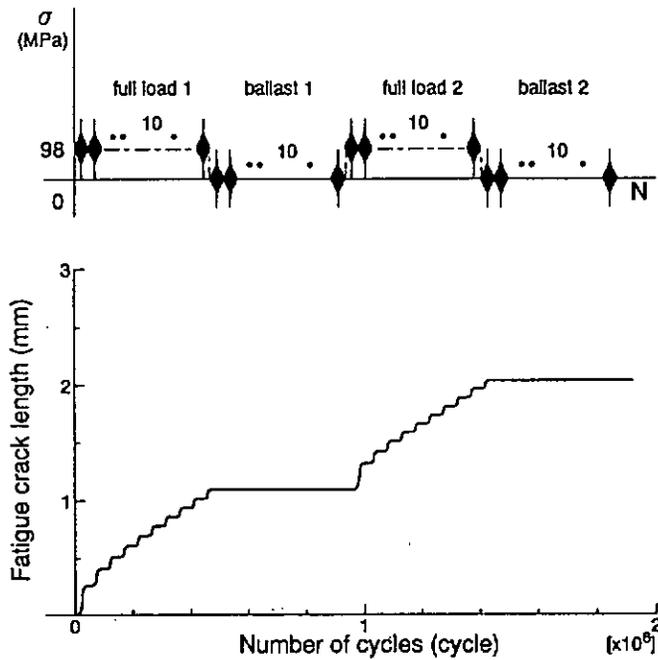


図7.4 full loadとballast loadの嵐が交互に作用した場合
き裂成長曲線の解析例

【参考文献】

- 1) 豊貞、山口、丹羽、武中、梶本、矢島：新疲労き裂伝播パラメータの提案と高精度コンプライアンス計測法の開発、日本造船学会論文集、第169号、(1991)、p.245
- 2) 豊貞、丹羽、山口、武中、荒巻、真崎：極低き裂伝播速度領域における疲労き裂伝播則について、日本造船学会論文集、第172号、(1992)、p.589
- 3) 豊貞、丹羽、山口：長いき裂に対する疲労き裂遅延減速現象とき裂停留条件について、日本造船学会論文集、第176号、(1994)、p.439
- 4) 豊貞、丹羽：RPG荷重のシミュレーション、日本造船学会論文集、第176号、(1994)、p.427

結 言

本研究は平成5年度より3年間に亘り、設計や保守点検及びき裂伝播の研究に携わる多くの方々の参加により実施されたものである。

本研究の始まる凡そ10年前の1980年初頭頃より、有限要素法による構造解析技術の設計への導入や省エネ要求に呼応した船体軽量化ニーズ等を背景に高張力鋼を広範囲に使用したタンカーやバルクキャリアが建造され就航した。こうした船体構造に対して当時から疲労強度の問題が指摘され当時の技術で検討もされたが残念ながら疲労強度に起因するき裂損傷が発生したのも事実である。

疲労破壊防止対策が多く場で議論された。しかし一方では疲労強度にあたえる因子が極めて多く複雑である事、発生したき裂の伝播の速さもまちまちである事等疲労強度評価が難しいという事もわかってきた。本研究はこうした中で船体構造の設計・検査・保守に携わる関係者の疲労き裂に対する共通認識に基づいた疲労設計法や寿命予測手法を実用化すべくその基礎研究として着手された。

本研究により第1部で述べたような「疲労き裂についての実用的知見」が明らかになるとともに第2部で解説しているような「新しい伝播解析手法」が提案できるようになった。即ち、

- 溶接部からの疲労き裂が問題となる船体構造では微小き裂の発生からき裂が検査で発見できる長さ、あるいは周囲の船体構造の強度や水密性に致命的な影響を与える長さになるまで（き裂の伝播）には時間がかかる。
- その時間は荷重パターンや平均応力の影響を受ける。こうした影響も踏まえ、き裂の伝播寿命の推定ができるようになった。
- 疲労き裂を出さないという曖昧な定義から検査で発見できるき裂長さまでの寿命あるいは致命的なき裂長さに至るまでの寿命といったより明確な定義で疲労破壊防止対策が考えられる基盤ができた。

といった点が本研究の成果である。

本研究の成果が船体構造の重要箇所を認識した疲労設計や就航後の点検・検査時の合理的な判断あるいは船体構造の合理的な保守計画に寄与する事を期待する。

航空機の世界では設計・整備において耐損傷設計（Damage Tolerance Design）が実用化されている。勿論、航空機の性能要求における構造のありかたや航空機の機体に与える環境影響は船舶のそれとは異なっている。しかし検査で発見できるき裂長さまでの寿命やき裂の挙動及びその性格（致命的であるかないかといった）がこうした研究で明らかになれば、船舶の種類によっては検査期間等の設定とも併せ船舶版耐損傷設計の可能性もでてくる。

実用面での基盤整備あるいは将来への可能性という点から、今後実船の環境下での疲労き裂の伝播の実態がさらに調査され実船での諸因子が定量的に解明され評価ができるようになる事を併せて期待したい。