

SR 245

SHIP RESEARCH SUMMARY REPORT

二重殻タンカーの船体構造寿命に関する研究

成 果 報 告 書

平成15年3月

社団 法人 日本造船研究協会

波浪を受けるタンカーの疲労亀裂発生事例



①荒天航海中のタンカー



②モニタリングを実施したダブルハル(D/H) VLCC



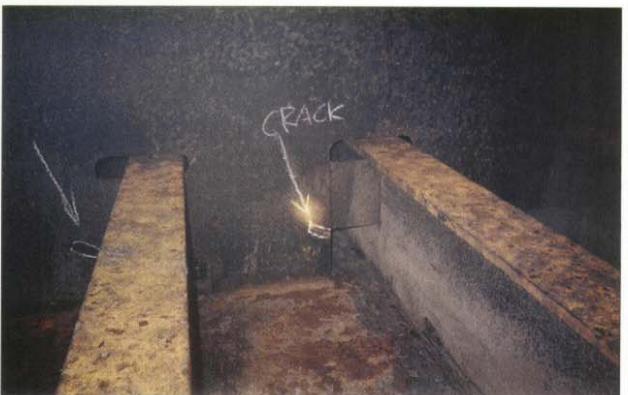
③サイド ロンジ 部疲労亀裂事例 (S/H タンカー)



④サイド ロンジ 部疲労亀裂事例 (S/H タンカー)



⑤ストラット基部疲労亀裂事例 (S/H タンカー)

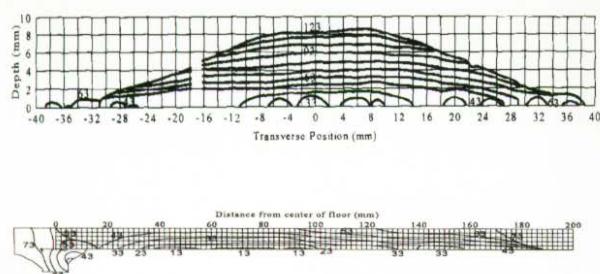


⑥ロンジ スロットコーナー部疲労亀裂事例 (S/H タンカー)

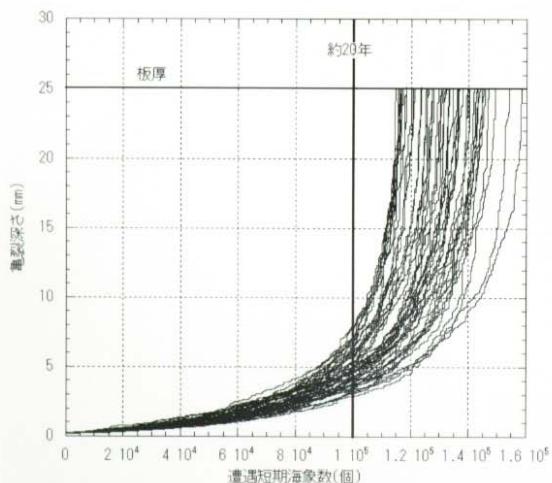
疲労亀裂伝播事例及びSR245の提案する解析・モニタリングスキーム



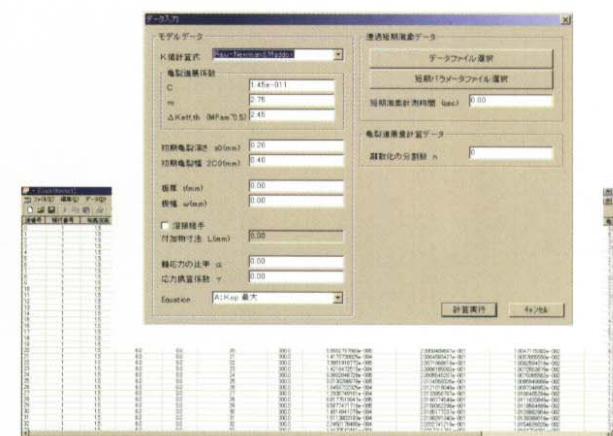
⑦SR245 大型模型疲労破壊実験



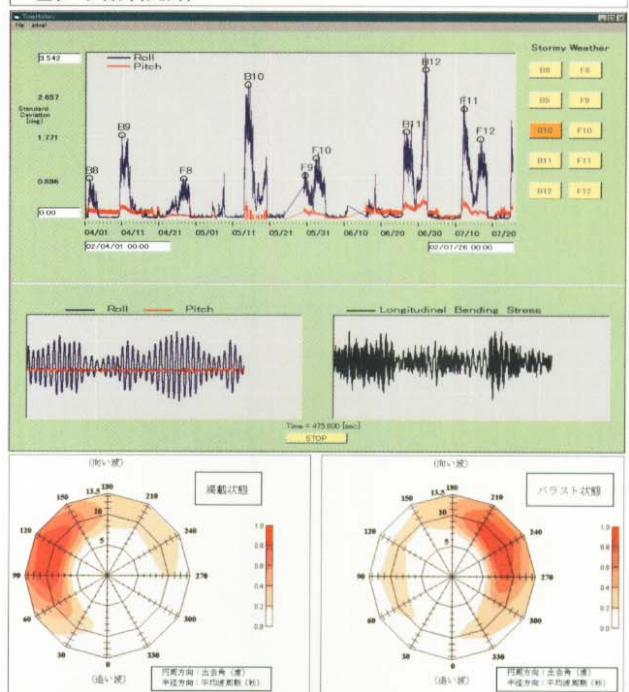
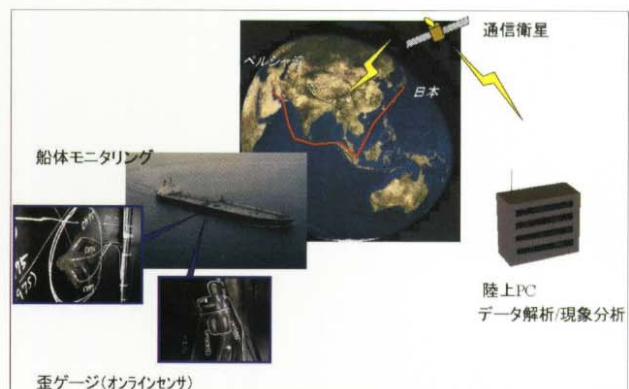
⑧同 SR245 試験体疲労亀裂伝播の痕跡事例



⑨遭遇海象順序による疲労亀裂伝播のゆらぎ



⑩SR245 疲労亀裂伝播予測(保守点検用)システム



⑪SR245 モニタリング／運航支援イメージアップ

SR245 「二重殻タンカーの船体構造寿命に関する研究」

要 約

Ship Research Panel No. 245 A Study on the Fatigue Life of Double Hull Tanker Structure

Summary

Recently, every kind of the demand for the improved safety of the ships is getting hotter. The minimization of the fatigue damage to the hull structure is one of the most serious problems to be challenged. Persistent efforts of shipbuilders, classification societies and owners have been made towards the issue, however, the present technology has reached the satisfactory level neither from the reliable fatigue life prediction nor the small fatigue crack detection points of view. In this context, Ship Research Panel No.245 (SR245) has been organized in the Shipbuilding Research Association of Japan (JSRA) and extensive studies have been carried out for 4 years supported by the Nippon Foundation.

The intended goal of the SR245 is the practical improvement in the methodology for the lifecycle management of structural safety through the development of state-of-the-art technology related to entire fatigue life assessment. The wide range of studies have been carried out focusing on the double hull VLCCs, those have been in service for around 10 years at most today.

Key findings of the SR245 are listed as follows.

- A double hull VLCC was monitored for about 2.5 years and the sea conditions and hull responses specific to the service route were clarified. It was also confirmed that the detailed statistical estimation was in good agreement with the monitored data.
- The generalized concept of short term and long term encountering storm models were developed, those are effective at the stage of both initial design and maintenance programming for all kinds of ships.
- The simplified simulation approach for the estimation of hull responses in rough sea was investigated in addition to the detailed simulation approach.
- A practical estimation method for the fatigue crack propagation was developed.
- Finally, an advanced fatigue life monitoring/management methodology packaged with rational inspection/maintenance/navigation assisting scheme was proposed.

The above is the results of the long-term efforts and support towards basic maritime research field. The contribution by the parties concerned is greatly acknowledged.

1. 研究の背景

近年、「船舶の安全性」への要求気運が高まっているが、船体構造の疲労(亀裂)損傷撲滅は重要課題のひとつである。船級協会や船主/造船所による模索・対応が継続されているが、従来型のアプローチに基づいた疲労損傷の予見は精度面の限界に直面しており且つ、局部的で微細な損傷なので検知にも困難があるのが、現状技術レベルの実態である。一方、航空機・車両や原子力産業などでは、「亀裂の成長(伝播)」を、「危険疲労亀裂寸法(補修要否判定基準)」の観点からオンラインモニタリングと定期検査とによって管理する、先進的な「構造疲労(寿命)制御・安全性管理」アプローチが実用化されている状況にある。

2. 研究の目的

1990年代に建造が開始された、載貨重量20~30万トン級の二重殻超大型タンカー(ダブルハルVLCC)の就航・経年実績が確認されるのはこれからとなる。衝突・座礁事故などの極限時の安全性向上のみならず、経年構造部材の疲労損傷から漏油を引き起こす様な事故の防止も重要である。そこで本研究では、ダブルハルVLCCを具体的な対象として、「疲労寿命」管理に関する各種技術の高度化をはかり、「ライフサイクルに亘る構造安全性の合理的な向上に寄与する」事を目的とした。

3. 研究の内容と主要な成果

①実船モニタリングの実施及び遭遇海象の高精度推定法の確立

- ・ダブルハルVLCCを対象として、約2.5年間就航中モニタリングを継続した。
- ・日本国内～ペルシャ湾間往復航路に於ける船位、動搖や発生応力など約80点のデータを自動計測し、衛星通信経由で陸上に取り込んだ。
- ・計測データと遭遇海象追算結果との比較から、遭遇海象を精度良く推定する手法を確立した。
- ・詳細解析による(短期的な)船体応答の統計的予測結果が、実現象と大凡良好に一致する事も確認した。

②想定すべき遭遇海象の設定法の確立

- ・一般商船の疲労強度に関しては従来、経験的な比率での全世界航路就航を仮定して設計されている(従来からの船体構造強度設計条件は、特定の航路によらないと見なせる)。
- ・個々の船舶が遭遇する荷重と受ける(疲労)ダメージは本来航路次第の面がある。従って、特定航路に特化した構造設計最適化が行える余地がある。
- ・特定の構造の疲労寿命には、遭遇波高のみならず出会い波向と周期の偏りの影響も大きい。
- ・また、疲労亀裂伝播の観点からは遭遇履歴(順序)の影響も大きい。

- そこで設計・保守計画立案時に想定すべき海象として、航路に特徴的な波高、波向、出会い周期(個々の嵐モデル)の設定と併せて遭遇順序をも含む、「ライフサイクルに亘る遭遇嵐モデル」を開発した。

③船体構造応答解析法の検討

- 波浪中の船体構造応答を正確に把握する為には、波浪による圧力、縦曲げモーメントや貨物の慣性力など、すべての荷重の重畠を考慮しつつ、遭遇波の一周期に亘る応力の履歴を計算する必要性がある。
- 船舶は様々な波高、波長を有する波に様々な出会い角で遭遇するので、種々の遭遇波浪条件に対して、船体構造の応力履歴を計算する必要性がある。
- 上述の膨大な計算を逐一実施するのが「詳細解析法」である。本研究では、実船モニタリングの対象としたダブルハル VLCC の構造応答を詳細解析し、モニタリング結果と概ね一致すること(即ち詳細解析法の信頼性)を再確認した。
- 一方 SR245 では、より簡便に船体構造の応力履歴を求める手段として、「相似応答関数法」、「最大・最小法による応力振幅計算法」、「代表位相による応力重畠法」及び「設計波法」などの「簡略解析」の方法論を検討した。

④SR245 で採用した亀裂伝播のアプローチ

- 一律の製造時微細きず(初期亀裂)を設定した上で、満載・バラスト積付の結果交互に生じる中期的な引張／圧縮(平均応力)状態、短期的には漸増／漸減しながら遭遇順序がランダムな嵐荷重パターンなどを一括して扱える、簡便な疲労亀裂伝播解析法を開発した。
- 較正は、大型構造模型試験体を用いた、疲労亀裂伝播実験結果との比較及び、小型実験との照合で織り込んだ。簡便ながら実用レベルの精度を有する。
- 従来型の累積疲労被害度のアプローチに比較して、構造毎の疲労寿命の明確化と余寿命の定量的評価が可能となった。

⑤SR245 が提案する船体寿命モニタリングコンセプト

- 必要最小限の計測ポイントからなる実船モニタリングシステムの仕様設定と、各部の作用応力履歴を実用的な精度で把握する方法論とをセットで開発した。
- 光ファイバーや犠牲試験片等、新形式センサーについても、実用的運用の観点から検討を行った。
- 船上でオンライン解析したデータを衛星通信で陸上のメンテナンス／運航管理拠点に伝送するスキームを試行し、実用性を確認した。

⑥SR245 が提案する(先進的)船体寿命モニタリング運用時のイメージアップ

- 個船毎の設計／建造から廃船に至るまでのライフサイクルに亘る構造疲労寿命管理を行う、先進的で合理的な全体コンセプトを確立した。
- 設計時の強度設計(応力応答性能)情報、建造時の工作精度記録、就航中の遭遇海象(荷重)履歴情報、疲労亀裂伝播予測値、検査時データによる較正等に基づ

- く、一貫した余寿命予測／追跡／監視(モニタリング)の実施に必須な、具体的方法論を確立した。
- ・ 重点的／集中的な構造安全性管理を行う為の、疲労亀裂伝播計算／個船毎の保守・点検マニュアル／運航支援(構造疲労寿命制御)情報データベースなどの各種構成技術のプロトタイプを開発し、先進的な管理実行時のイメージアップを図った。
 - ・ 運用時に得られる個船の個々の構造の正確で定量的な診断情報等、従来とは異なる高度な保守・管理がもたらすメリット／効果につき、具体的に明示した。

4. まとめと成果の活用法

本研究では、ライフサイクルに亘る船舶の合理的な安全性向上に寄与する技術開発課題として、「船体構造の先進的疲労寿命監視・管理」に取り組み、全体コンセプトの確立及びその実現に必要な設計時予測からモニタリング／保守点検／運航支援までに係わる各種技術の具体的開発を試みた。

その成果として、特定の航路に就航する個々の船舶が遭遇する海象の相違を定量的に予測・追跡する事を可能とし、また疲労亀裂の成長(伝播)履歴を逐次シミュレートし、実際の疲労亀裂損傷寸法との直接の比較を可能とする技術基盤を整備した。これらの技術進歩はそれぞれ単独でも船体構造の設計品質／安全性向上に寄与するが、特に就航中モニタリング技術と組合せた場合には、有用性が高まる。

個船毎の特定構造寿命管理の為には、個々の航路別海象特性(嵐モデル)の把握・設定、応力集中部の絶対値／分布形状の高信頼度推定及び容易な亀裂損傷検査・検知法の実用化等、具体化に伴う検討作業が必要であるが、船体構造の安全性管理高度化の為の一貫した方法論・方針を提示できた。これらは、長期間に亘る海象データの収集、疲労強度解析に関する一連の研究実施等、関係者の基礎的で継続的な努力と支援の結実である。

はしがき

本成果報告書は、日本財団の助成事業として、日本造船研究協会 第245研究部会に於いて平成11年度から14年度まで実施した「二重殻タンカーの船体構造寿命に関する研究」の研究成果を取りまとめたものである。

なお、本研究は日本造船工業会から受託して行ったものである。

第245研究部会 委員名簿

(敬称略、順不同)

部会長	藤野 正隆	(東京大学)	
代表幹事	末岡 英利	(三菱重工業)	
委員	富田 康光 角 洋一 深澤 塔一 豊貞 雅宏 田中 義照 武田和彦 糸谷 洋一 福岡 哲二 河地 三郎 山脇 義朗 黒岩 隆夫 松岡 一祥 鈴木 靖 遠藤 雅右 清水 洋一 川野 始	(大阪大学) (横浜国立大学) (金沢工業大学) (九州大学) (海上技術安全研究所) (ロイドレジスター・オブ・シッピング) (日本郵船) (三井造船) (住友重機械工業) (ユニバーサル造船) (日本汽船) (海上技術安全研究所) (日本氣象協會) (ロイドレジスター・オブ・シッピング) (商船三井) (三井造船)	影山 和郎 荒井 誠 藤本由紀夫 河邊 寛 重見 利幸 斎藤 勝也 門岡 光浩 笹島 洋 山本 聰 賀田 和夫 北村 欧 仲井 圭二 市川 雅司 佐藤 秀彦 九嶋 孝憲 (アイエイチアイマリンユナイテッド) (ユニバーサル造船) (川崎造船) (三菱重工業) (日本汽船) (日本汽船) (住友重機械工業)

第245研究部会幹事会名簿

(敬称略、順不同)

代表幹事	末岡 英利	(三菱重工業)
委員	福岡 哲二 河地 三郎 山脇 義朗 黒岩 隆夫	(三井造船) (住友重機械工業) (ユニバーサル造船) (三菱重工業)
	笹島 洋 山本 聰 賀田 和夫 九嶋 孝憲	(アイエイチアイマリンユナイテッド) (ユニバーサル造船) (川崎造船) (住友重機械工業)

第245研究部会WG名簿

(敬称略、順不同)

主査	富田 康光	(大阪大学)		
委員	末岡 英利	(三菱重工業)	影山 和郎	(東京大学)
	角 洋一	(横浜国立大学)	荒井 誠	(横浜国立大学)
	深澤 塔一	(金沢工業大学)	藤本 由紀夫	(広島大学)
	豊貞 雅宏	(九州大学)	小林 佑規	(海上技術安全研究所)
	河邊 寛	(海上技術安全研究所)	秋山 繁	(海上技術安全研究所)
	田中 義照	(海上技術安全研究所)	重見 利幸	(日本海事協会)
	武田 和彦	(ロイドレジスター・オブ・シッピング)	斎藤 勝也	(日本気象協会)
	糸谷 洋一	(日本郵船)	福岡 哲二	(三井造船)
	田中 茂	(三井造船)	中島 喜之	(アイエイチアイマリン・ユナイテッド)
	高梨 正裕	(アイエイチアイマリン・ユナイテッド)	河地 三郎	(住友重機械工業)
	佐々木 紀幸	(住友重機械工業)	根ヶ山 博	(住友重機械工業)
	山本 聰	(ユニバーサル造船)	森川 正夫	(ユニバーサル造船)
	永濱 信一	(ユニバーサル造船)	芦田 吏史	(日立造船)
	賀田 和夫	(川崎造船)	仁瓶 寛太	(川崎重工業)
	黒岩 隆夫	(三菱重工業)	佐藤 宏一	(三菱重工業)
	北村 欧	(三菱重工業)		
	松岡 一祥	(海上技術安全研究所)	仲井 圭二	(日本気象協会)
	鈴木 靖	(日本気象協会)	市川 雅司	(日本気象協会)
	遠藤 雅右	(ロイドレジスター・オブ・シッピング)	佐藤 秀彦	(日本郵船)
	清水 洋一	(商船三井)	小川 幸男	(三井造船)
	富士 彰夫	(石川島播磨重工業)	九嶋 孝憲	(住友重機械工業)
	川野 始	(三菱重工業)	谷口 貴之	(三菱重工業)

討議参加者

(敬称略、順不同)

山本 規雄	(日本海事協会)	湯浅 通史	(日本海事協会)
熊野 厚	(日本海事協会)	松藤 紘里子	(日本気象協会)
宇都宮 好博	(日本気象協会)	尾形 定之	(商船三井)
大田垣 二郎	(商船三井)	中村 哲也	(日本钢管)
黒木 友博	(日立造船)	藤田 卓也	(川崎造船)
梶原 洋昭	(住友重機械工業)	村上 慎祐	(三菱重工業)
摺田 浩司	(三菱重工業)		

事務局

(日本造船研究協会) 宮沢 徹、大森 勝、海部 雅之、山内 康勝

(日本造船工業会) 吉識 恒夫

目 次

1. 研究の背景	1
2. 研究の目的	3
3. 研究の内容と主要な成果	3
3. 1 実船モニタリングの実施及び遭遇海象の高精度推定法の確立	3
3. 2 想定すべき遭遇海象の設定法の確立	4
3. 3 船体構造応答解析法の検討	5
3. 4 疲労寿命解析入門	6
3. 5 SR245 が採った亀裂伝播解析アプローチの紹介	9
3. 6 SR245 が提案する船体寿命モニタリングコンセプトの紹介	11
3. 7 SR245 が提案する(先進的)船体寿命モニタリング運用時の イメージアップ	12
4. まとめと成果の活用法	16
5. 終りに	17

1. 研究の背景

荷主/船主/運航管理会社では近年、特に「船舶の安全性」への要求気運が高まっている。船体構造の疲労(亀裂)損傷撲滅は関連する重要課題のひとつである。この様な社会的ニーズを受けて、船級協会には疲労強度の観点からの各種要求及び「〇〇年疲労設計」といったノーテーション導入の動きがありまた、船主/造船所間では新造船契約時に長寿命設計の仕様織り込みの動きも見られる。これに対し現実には、疲労損傷は就航後のごく初期には発生せず、また突発的な異常海象遭遇の結果というよりは個船毎の長期的な就航履歴/荷重遭遇累積に依存する現象なので、精密な予見には未だ技術的困難を伴う状況にある。且つ、板厚貫通にまで成長(伝播)した場合には漏油等をもたらす(海洋汚染 and/or 不稼働損等を招く)ので社会的/経済的影響は重大であるが、疲労損傷は一般的に局部的で微細なので検知にも困難があるのが実態である。

従来、船舶の構造疲労設計では統計的遭遇荷重予測及び累積疲労被害度を指標にする Miner(マイナー)則に準じた疲労寿命評価アプローチが採られてきた。実績ある類似構造との相対比較には便利であり安全性向上に一定の貢献を果たしてきたが、個々の船舶が特有の航路で遭遇する荷重の相違は考慮されない。また、本来連続的な事象を不連続的に表現する等、物理的な曖昧さがあり、新規構造の疲労寿命絶対値評価などに際しては適用限界が指摘されている。ランダムな荷重履歴を受けた既存構造の疲労損傷解析にあたっても説明がつかず矛盾をきたす場合も多々あり、また、一旦疲労亀裂が発見された段階での余寿命の評価(亀裂伝播推定:補修実施デッドライン特定)には向かないなど、問題点も多い。

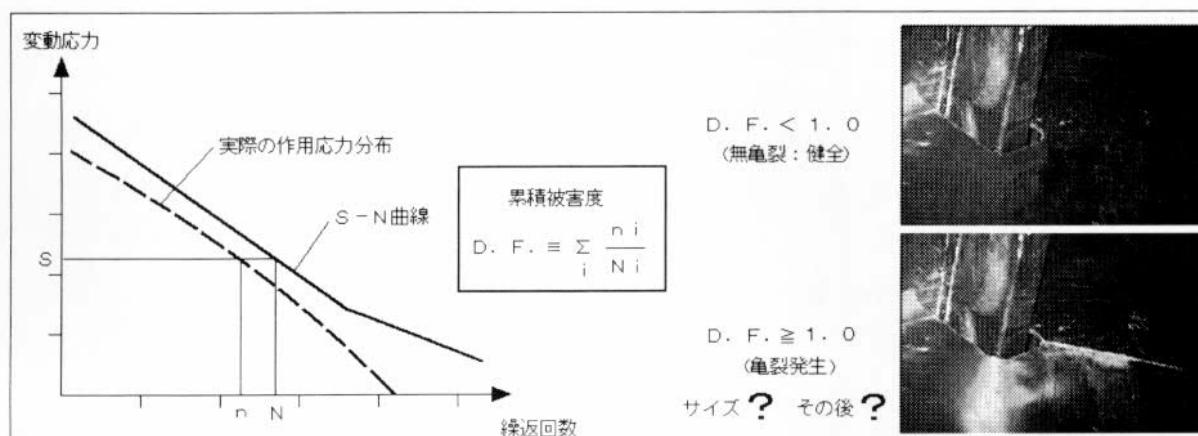


図 1 累積疲労被害度(D.F.: ダメージファクター)による「クロ・シロ」評価イメージ

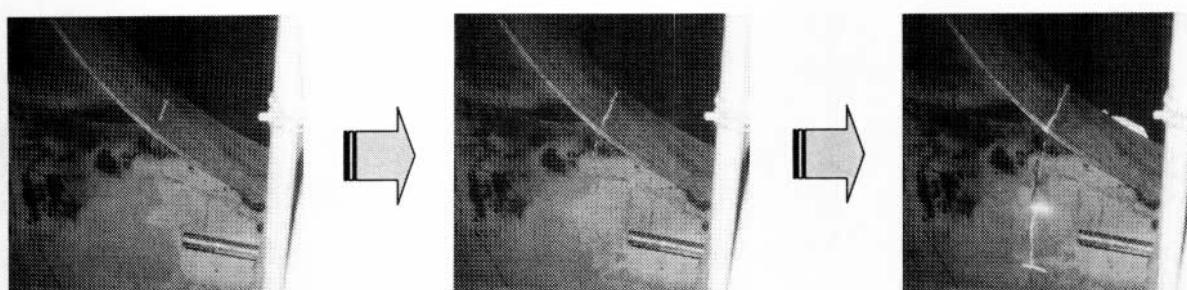


図 2 疲労亀裂の連続的な成長(伝播)イメージ・・・実際の現象

一方、航空機・車両や原子力等の発電プラント産業では、個々の構造に関する不可避な「**製造時微細きず(初期亀裂)**」の存在前提(認知)及び「**亀裂の成長(伝播)**」に対応する「**残存強度**」評価の観点からの、「**危険疲労亀裂寸法(補修要否判定基準)**」の定義並びに、モニタリングと定期検査による実働荷重計測/亀裂検知体制とを組合せた、「**構造疲労(寿命)制御・安全性管理スキーム**」が指向されて久しい。

比較的に荷重履歴が単純で予見が相対的に容易と考えられるこれらの産業でも、事故の撲滅に至ってはおらず技術的に不完全であるのは昨今の事故例からも明らかであるが、実用的レベルには一応達している。そこで本研究では、船舶の疲労設計に先進的な「疲労亀裂伝播に基づく構造安全性管理」のアプローチを導入するにあたって、必須となる基盤技術を整備すると共に、保守点検と組合せた運用法のイメージアップを図り、安全性向上面で如何なる貢献が期待され得るのかについてのビジョンを示すものとした。

原子力発電所設備の検査・維持について

保安院、原発の安全確保へ新規制導入(日本経済新聞 2002/09/25)

経済産業省原子力安全・保安院は24日、原子力発電所のトラブル隠しを防止する新しい制度を固めた。**運転中の原発に小さな傷があつても安全上問題がなければ使い続けられる「維持基準」**を設け、抜き打ち検査の実施など検査制度を改める。関連法を改正し2003年度にも実施に移す。

原子力安全・保安院は同日開いた原子力安全規制法制検討小委員会に、新制度の素案を提示した。これまで新品同様の品質を求めていた原発の部品に維持基準を新たに設けるほか、(1)抜き打ちで立ち入り検査をする(2)電力会社による自主的な点検を国が監査する——などの点検制度の改革を盛り込んだ。原発には高い安全性が必要で、運転中の原発に対しても新品の基準が求められてきた。しかし部品の多くは長期間使用しているとひび割れなどが生じやすい。原発がある米仏などには維持基準があり、ないのは日本だけだった。

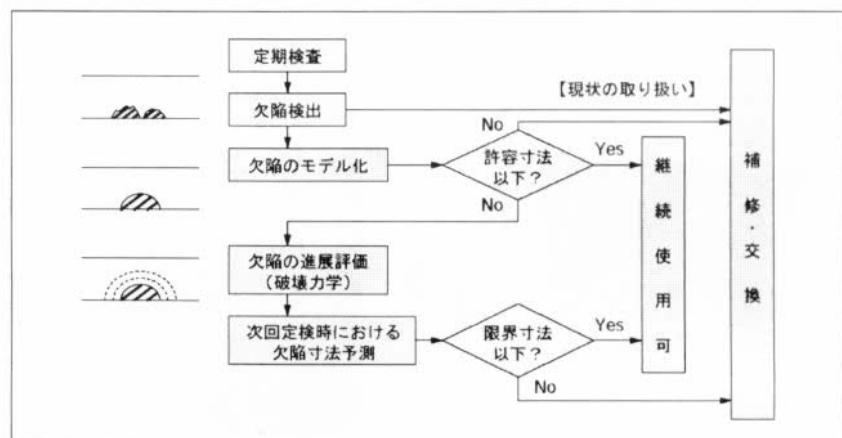
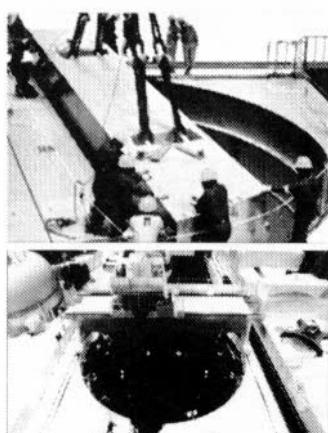


図3 原子力発電所設備の現行・改訂「保守・維持」アプローチ(電中研ニュース 336)

2. 研究の目的

1990年代に海洋汚染防止の見地から、タンカー構造の二重殻化が義務づけられたが、載貨重量20~30万トン級の二重殻超大型タンカー(ダブルハルVLCC)は約10年以前に建造/運行が開始されたばかりであり、就航・経年実績が確認されるのはこれからである。一方、衝突・座礁事故などの極限状態に於ける船舶の安全性向上のみならず、経年構造部材の疲労損傷から漏油を引き起こす様な(敢えて例えれば)平常時にも発生し得る事故の防止も重要である。この考えに則り実施した本研究では、ダブルハルVLCCを具体的な対象として選定した上で、「疲労寿命」管理に関する各種技術の全般的な高度化を図り、「**ライフサイクルに亘る構造安全性の合理的な向上に寄与する事**」を目的とした。

3. 研究の内容と主要な成果

本研究ではまずダブルハルVLCCを対象とした、長期モニタリングによる就航中の遭遇波浪と実構造応答(遭遇荷重・応答履歴)データの収集・整備を行った。また、大型構造模型実験及び各種解析の実施等により、疲労亀裂の成長(伝播)現象を把握・再現する事を通じて、より先進的な疲労寿命解析技術の基盤整備を図った。さらにこれらの基盤技術を基として、実用的な疲労寿命監視法・余寿命評価法のプロトタイプを試作し、船体構造設計/保守/点検の一貫した高度化をイメージアップした。

3.1 実船モニタリングの実施及び遭遇海象の高精度推定法の確立

新造ダブルハルVLCCを対象として、約2.5年間就航中モニタリングを継続した。日本国内~ペルシャ湾間往復航路に於ける船位、針路、風向風速、動搖、タンク圧力及び発生応力など約80点のデータを自動計測し、船上解析結果を衛星通信経由で陸上に取り込んだ。計測データと(財)気象協会が提供する遭遇海象追算結果との比較から、当該航路に於ける遭遇海象を精度良く推定する手法を確立した。また、短期的な船体応答の統計的(詳細)予測結果が、実現象と大凡良好に一致する事を確認した。

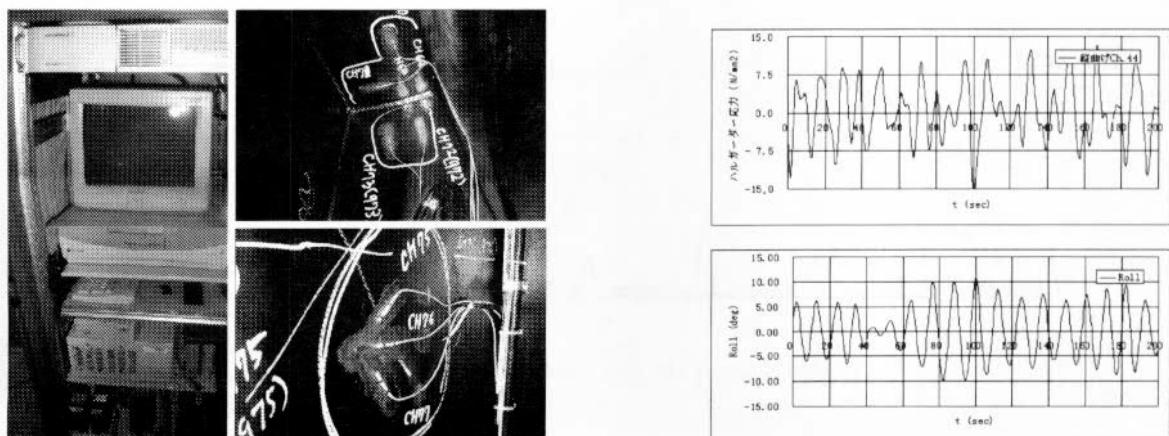


図4 モニタリング装置とバラストタンク内歪ゲージ、並びに船体応答計測データ事例

3.2 想定すべき遭遇海象の設定法の確立

舗装率が低く起伏の多い路面を走る車両が標準以上に強化されている様に、或いは短距離区間に就航する商用航空機が長距離区間機よりも強化されている様に、船舶が遭遇する荷重と受ける(疲労)ダメージも本来航路次第の面がある。一方一般商船は現在概ね、「Worldwide」就航を暗黙裡に想定し、最大荷重に対する最終強度に関しては最も厳しい冬期北大西洋航路専従を、疲労強度に関しては経験的な比率での全世界航路就航を仮定して設計されている(従来からの船体構造強度設計条件は、特定の航路によらないと見なせる)。将来的にも現状踏襲なのか、最も厳しい航路に専従する前提で船体を徹底強化するのか、仕様で航路を特定して輸送経済性の最適化を図るのかは、船主の判断が絡み、船級協会を交え調整すべき課題である。ここでは、特定航路専従船を対象とした場合の、設計・保守計画立案時に想定すべき合理的な「遭遇海象時系列(嵐モデル)」について概念を述べる。

例えば日本国内～ペルシャ湾航路の波浪は、大まかには、北大西洋航路よりも穏やかな傾向にある。但し、実船モニタリング時の目視データからは往路では左舷前方から、復路では右舷後方からの波に出会い易い事などの特徴が定量的に把握された。特定の場所・舷に位置する特定の構造の疲労寿命には、作用する荷重の大きさと繰回事数とが強く影響するので、波高のみならず出会波向と周期の偏りの影響も大きい。また、後述の様に疲労亀裂伝播の観点からは遭遇履歴(順序)の影響も大きい。そこで想定すべき海象として、航路に特徴的な波高、波向、出会周期(個々の嵐モデル)の設定と併せて遭遇順序をも含む、「ライフサイクルに亘る遭遇嵐モデル」を開発した。なお、遭遇時系列(順序)も個船にとって本質的に確率問題となる。相対評価の為の設計基準として航路別に画一的に定義する手法も考えられるが、個船の各構造疲労寿命の絶対値をより高度に予測する観点から、複数の遭遇順序を想定し疲労亀裂伝播量の「ゆらぎ」を把握するアプローチも一案とした。



図5 東インド洋における相対出会い波向(左：バラスト航海時、右：満載航海時)

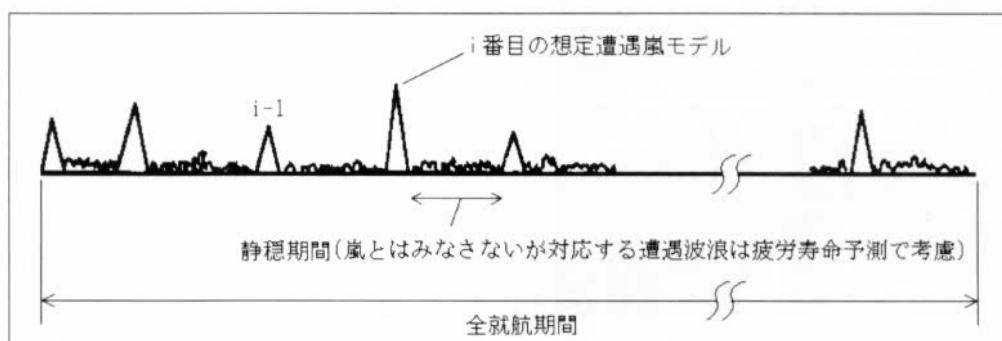


図6 ライフサイクルに亘る想定遭遇海象(嵐モデル)のイメージ

3.3 船体構造応答解析法の検討

波浪中の船体構造には、波浪による圧力、縦曲げ／水平曲げモーメントや、船体運動に伴う貨物の慣性力が、異なったタイミングで作用する。従って、船体構造に作用する応力の最大値や変動量を求めるためには、波浪圧力、縦曲げ／水平曲げモーメント及び慣性力のすべての荷重を考慮しつつ、遭遇波の一周期に亘る応力の履歴を計算する必要性がある。さらに、船舶は様々な波高・波長を有する波に様々な出会い角で遭遇するので、種々の遭遇波浪条件に対して、船体構造の応力履歴を計算する必要性がある。

上述の膨大な計算を逐一実施するのが、「**詳細解析法**」である。具体的には計算量を減らす目的で、まず単位荷重に対する各部の船体構造応答を求めておき、それを組合せる事によって、波の一周期や、各波浪条件に対する応力を計算する方法(離散化解析法)が、既に実用化されている。SR245では、実船モニタリングの対象としたダブルハル VLCC の構造応答を離散化解析法で計算し、モニタリング結果と概ね一致すること(即ち詳細解析法の信頼性)を再確認した。

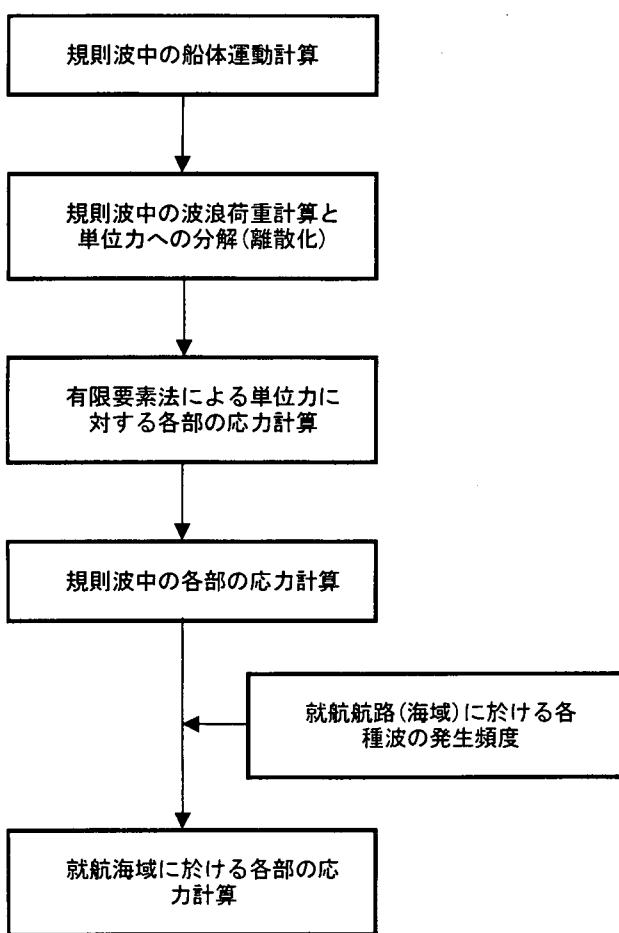


図 7 離散化(詳細)解析法の概念

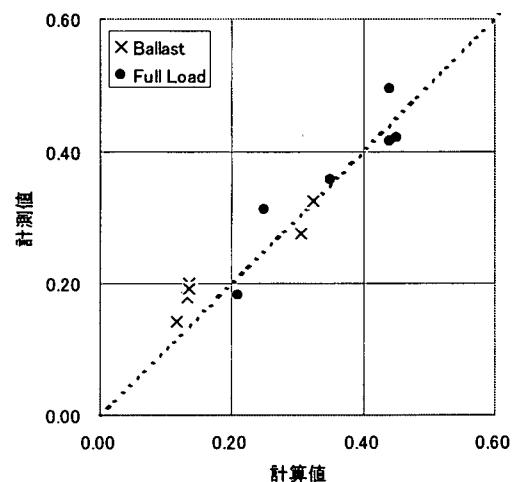
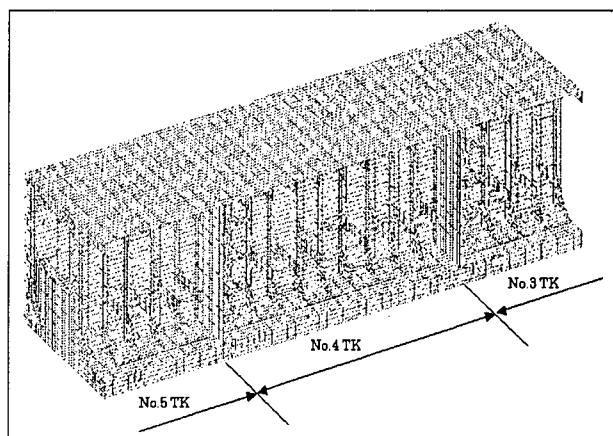


図 8 応力の離散化(詳細)解析事例

一方 SR245 では、より簡便に船体構造の応力履歴を求めるための「**簡略解析**」の方法論も検討した。一つは、波浪変動圧による応力応答関数を簡易的に求める「相似応答関数法」で、様々な波長に対する応力の計算を省略し、代表波長に対してのみ応力計算を実施するに留める。代表波長以外の波長における応力は、応力を算出する部位の近くに作用する波

浪圧力に相似であると仮定する。また、波の一周期に対する計算を省略し、波浪圧力が最大および最小となる時刻を「最大・最小法」により推定して応力振幅を近似算定する。もう1つの簡略化法は、波浪変動(外)圧とタンク内変動圧の重畠による応力の応答関数を、荷重の代表位相を用いて近似算定する方法で、例えば波浪変動圧の代表位相として波上側静止喫水線部の圧力の位相、タンク内変動圧の代表位相として加速度の位相を用いる。

船体構造の応答履歴を一層容易に算定する方法として、「設計波法」も検討した。この方法では主要な荷重毎に、それらの荷重が最大となる複数の波浪条件を設計規則波として設定する。これらの設計規則波によって生じる応力を各構造別に計算し、得られた応力のうちで最大のものを船舶の一生に一回発生する(各構造毎の)最大応力として近似的に定義する。最大応力以外の発生応力の分布形は別途定義する。

以上の簡略法の採用は船体構造応答解析の容易化にあたって有効であるが、実際に適用する為には、誤差の程度を把握すると共に、船体構造の各部位に対応する代表波長や設計規則波の具体的選定方法などを、より詳細に検討する必要性がある。

3.4 疲労寿命解析入門

従来からの船体構造設計における疲労寿命の評価は、「マイナー則に準じて”累積疲労被害度”を求める」アプローチで行われている。おおまかには、一定の応力変動を繰返した疲労試験より得られる変動応力 S と疲労寿命(限界繰回事数) N の関係を表す”S-N線図”に基づいて、変動応力 S が n 回繰返した時の累積疲労被害度(D.F.)を n/N と定義し、異なった振幅の変動応力が作用した場合の累積疲労被害度は各変動応力による累積疲労被害度の和とみなすものである。即ち、 $D.F. = n_1/N_1 + n_2/N_2 + n_3/N_3 + \dots$

変動応力が一定である場合に、 $n_i=N_i$ すなわち $D.F.=1.0$ の時点で疲労損傷が生じるのは当然であるが、異なった変動応力が組合わざった場合でも $D.F.=1.0$ となった時に疲労損傷が生じると仮定する(修正マイナー則; 図1参照)。

通常、単純小型で手軽な”溶接継手試験片”を用いた疲労試験によって得られた種々のS-N線図を援用した累積疲労被害度計算が一般的であるが、本来は評価の対象となる”構造体”と同一条件下にある実寸模型による疲労試験データが必要である。さらに注意すべきは、 $D.F.=1.0$ となった時点で構造物がどの様な”状態”になっているかは、疲労試験に於いてどの様な状態をもつて”疲労損傷発生”と定義したかに依存する点である。言い換えると、疲労損傷の定義によって異なるS-N線図が得られる。不統一な”疲労損傷発生”的定義と不明確な”実構造との対応”は、精度限界と混乱の要因となっている。

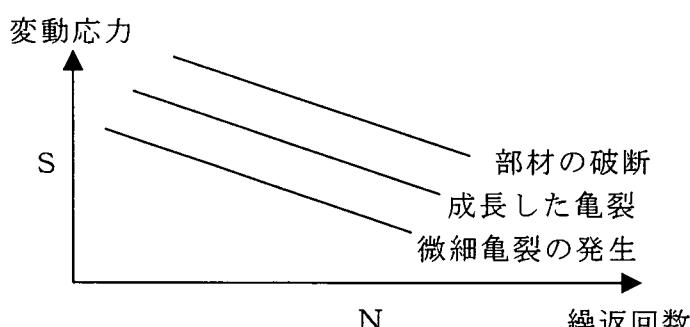


図9 “疲労損傷”の定義によって異なるS-N線図

現実の船体構造の疲労損傷事例においても、溶接部で発見された2~3mm程度の”微細な亀裂”から部材を横断する様に数mにも達する”大きな亀裂”まで、「疲労損傷(亀裂)発生」と一括して称するものの発見時点に応じてサイズと状態は様々である。また、疲労損傷による被害の程度についても、数十mmの亀裂であっても隔壁板厚を貫通して油の漏洩を生じ社会的に重大な問題となる場合もあれば、見開き写真⑤のストラット基部における疲労亀裂事例の様に(悪例ではあるが)数mの亀裂に至っても発見時点まで特に問題を引き起こす事なく、補修されて終わる場合もある。

一方、先進的な「疲労亀裂伝播解析に基づく寿命の評価」アプローチでは、製造時点における潜在的で検知／完全除去が不可能な微細きず(初期亀裂)を想定し、その微細亀裂が応力の繰返しによって成長(伝播)していく状態を刻々シミュレーションする。また、亀裂の最終的な状態(危険疲労亀裂寸法)を明確に定義し、その状態に達した時点を疲労寿命と定義するので、合理的である。最終的な危険疲労亀裂寸法は、その亀裂によって生じる強度上あるいは機能上の事象と明確に関連付ける事により、例えば以下の様に定義される。

- ・ 外板あるいは隔壁を貫通する事によって液体貨物が漏洩/海水が侵入する状態
- ・ 部材が破断する等、所定の強度を喪失する/隣接部材の連鎖的損傷を早期に招く状態

疲労亀裂が成長(伝播)する速度は、変動応力と亀裂長さの平方根の積に比例する応力拡大係数： ΔK ($\propto \Delta \sigma \sqrt{a}$ 、 $\Delta \sigma$ ；変動応力の振幅、 a ；亀裂の長さ) で表せる事が判っている。従って、変動応力が一定のままであっても(ΔK は亀裂長さとともに増加するので)、亀裂の伝播は図10の様に繰回事数(時間)と共に加速する事になる。

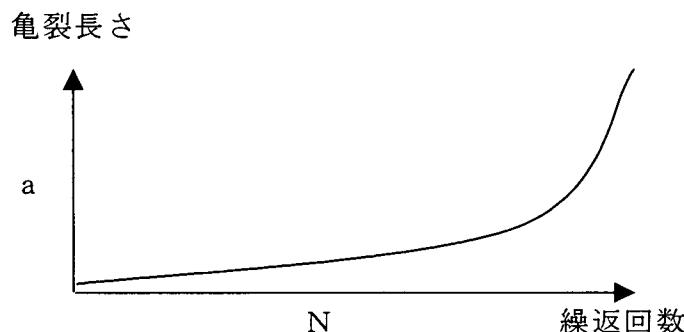


図10 疲労亀裂の成長(伝播)特性・・・一定振幅の変動応力が作用する場合

これに伴い、(船舶の様に)作用する変動応力の振幅が一定でなく変化する(ランダムに近い)場合だと、疲労亀裂伝播の様子は順序の影響を受ける事になる。例えば、極端ながらトータルとしては同じ作用回数/頻度分布となる変動応力の作用順序を図11の様に恣意的に変えた場合、疲労亀裂伝播の様子は図12の様になり、疲労亀裂が板厚を貫通する(亀裂深さが板厚に達する)までの繰回事数(時間)には約2倍の差が生じる事が判る。

同一パターンの変動応力が作用した場合の、従来型の修正マイナー則による累積疲労被害度の計算値を図13に示す。累積疲労被害度は、作用順序が異なっても繰回事数(経過時間)が同じとなる時点で一致する事、即ち作用順序(履歴)の影響を受けない事を示している。従来の疲労寿命の評価アプローチでは、上述した「不明確な疲労損傷状態の定義」と相俟

って、ランダムに遭遇する変動応力順序(荷重履歴)に起因する疲労亀裂寸法の”ゆらぎ”を把握できないという問題点も指摘される。就航直後の1年間と経年後の廃船時期に近い1年間とを、同じリスク期間として捉えるアプローチであり、合理的で無い側面がある。

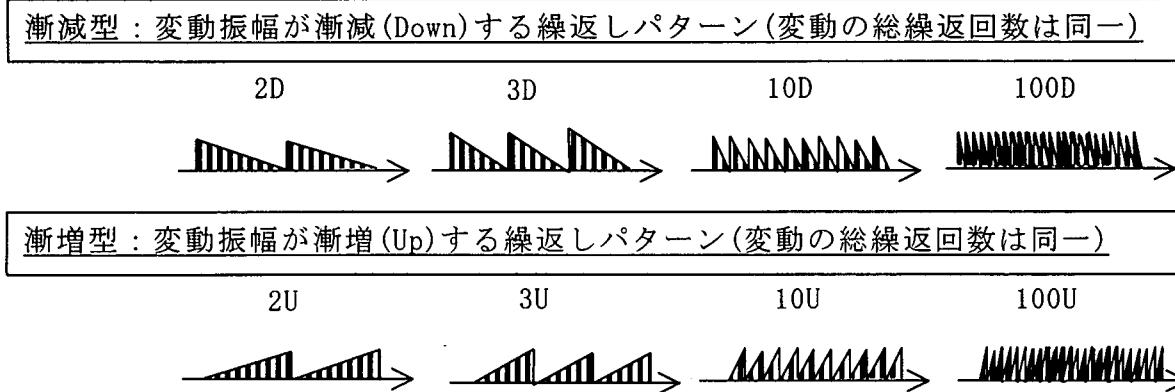


図1-1 トータルとしては同頻度分布ながら変動応力の作用順序が異なるパターンの事例

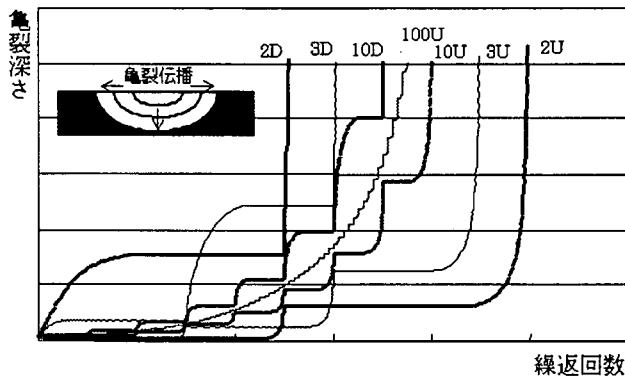


図1-2 変動応力の作用順序に依存する疲労亀裂伝播のゆらぎ(注：2D、2Uは低発生確率)

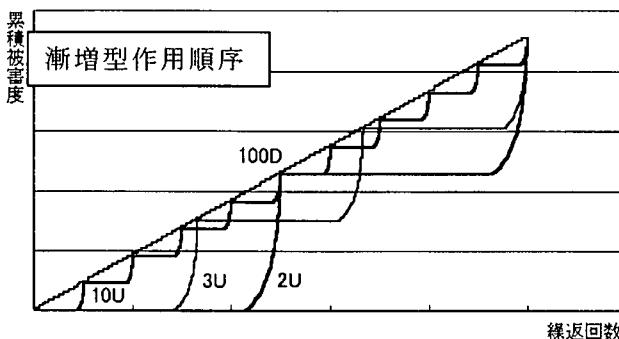
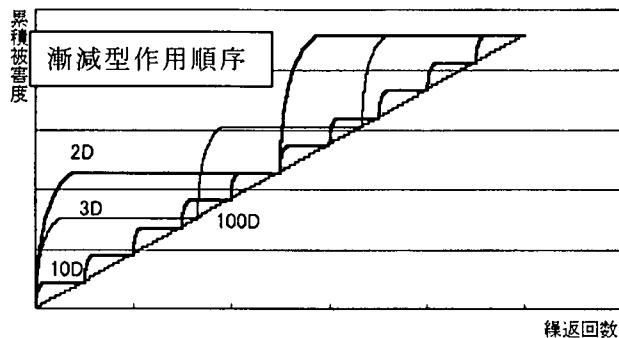


図1-3 変動応力の作用順序を変えた場合の従来型修正マイナー則による累積疲労被害度

以上で示した様に、先進的な「疲労亀裂伝播解析に基づく疲労寿命の評価」アプローチでは、”疲労亀裂寸法”という実現象と直接結びついた量を疲労損傷の尺度としている事から、従来型アプローチに比較して、以下の様なメリットを有する。

- ・ 船体構造の重要部材毎に、疲労損傷に於ける最終的な「危険疲労亀裂寸法」を設定する事により、**疲労寿命の定義を明確化**する事が出来る。
 - ・ 疲労亀裂が検知された場合に、その緊急度と最終的な「危険疲労亀裂寸法」に至るまでの**余寿命を定量的に評価**する事が可能となる。 具体的には、発見された疲労亀裂に対して、直ちに補修すべきか、次回の定期検査時まで放置して大丈夫かの判断が**定量的に可能**となる。

3.5 SR245 が採った亀裂伝播解析アプローチの紹介

既述の様に、船体構造に作用する荷重は同じ大きさの荷重が繰り返し負荷される様な単純なものでは無く、大きさの異なる荷重がランダムに加わる複雑な変動荷重である。従つて、疲労損傷が問題となる船体構造部材の応力集中部にも、変動荷重と同様の複雑な変動応力が作用する事になる。日本国内～ペルシャ湾間を航行するダブルハル VLCC に作用する変動荷重(応力)は、以下の特徴を有する(図 1-4 模式図参照)。

- ・満載航海／バラスト航海の二つの航行状態が交互に繰返される。(平均荷重／応力が航海毎に変化する)
 - ・荒れた海象(嵐)に遭遇した場合にまとまって大きな変動波浪荷重(応力)群を受ける。

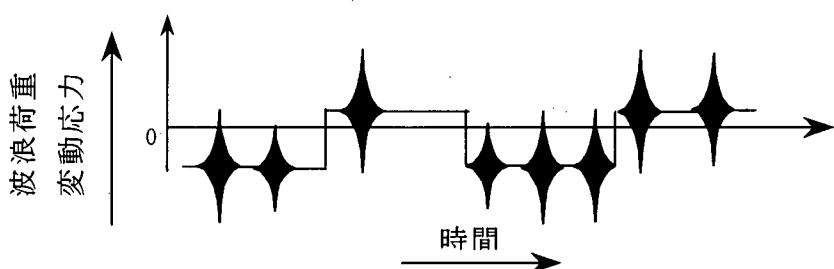


図14 VLCCの船体構造に作用する変動荷重／発生する変動応力の模式図

船体構造に発生した疲労亀裂に対し精度の良い余寿命評価を行うとの目標から、この様な複雑な変動応力下で、①平均応力の影響(特に平均応力が負の場合)及び②遭遇荷重履歴(順序)の影響、等を考慮した疲労亀裂伝播解析手法に関する研究が、国内外大学や SR を含む各研究機関で長年に亘り続けられて来たが、いくつかの課題が依然として残されていた。例えば、3.4 で述べた $\angle K$ 或いは $\angle K_{eff}$ ("有効" 応力拡大係数) の考え方のみでは応力履歴が正確に考慮できないので疲労亀裂先端のミクロな塑性挙動履歴までを考慮した RPG 荷重による手法の導入などが提案されている。しかしながら、大型溶接構造物での計算精度の検証が不足していたり、或いは必要なデータの準備と計算実施が煩雑であり、**実用的な疲労設計手段**の観点からは必ずしも満足できるとは言えない状況にある。そこで SR245 では、理論的には不完全ながらもエンジニアリング的見地からの種々の近似を導入する／大

型・小型の構造模型による疲労亀裂伝播実験を実施して較正を織り込む、との現実的なアプローチを探った。例えば、残留応力の影響は無視する／ ΔK 値の算定は詳細・簡易法の双方に対応する／平均応力と荷重履歴の影響は亀裂先端部の開口応力計測(小型)実験結果からモデル化を図るなどした。一方、溶接部の潜在的初期亀裂(製造時微細きず)幅としては隅肉溶接脚長を考慮した直交部材の換算板厚を一律で設定し、実験結果との比較から係数修正を織り込んだ。見開き写真の⑦は、ダブルハル VLCC のホッパー・ナックル部の 1/3 縮尺大型試験体を用いた疲労実験の様子を示す。本疲労実験では図 15 に示す様に、タンカーの貨物積載状況を模擬する「平均応力の中期的な変動」に、徐々に発達した後減衰する遭遇嵐を模擬する「短期的な応力変動」を重畠させた荷重パターンを採用している。見開き写真⑧と図 16 に疲労亀裂発生状況を示す。図 16 右に示す疲労亀裂伝播再現解析事例の様に、平均的な係数を設定する事により、簡便ながら実用的精度での疲労亀裂伝播予測が可能となった。最近、金属組織の工夫により疲労亀裂の伝播速度を遅延させる鋼材が開発されているが、この様な鋼材を船体構造に適用した場合の効果も定量的に予測可能であり、合理的な採否決定(設計)が可能となる。

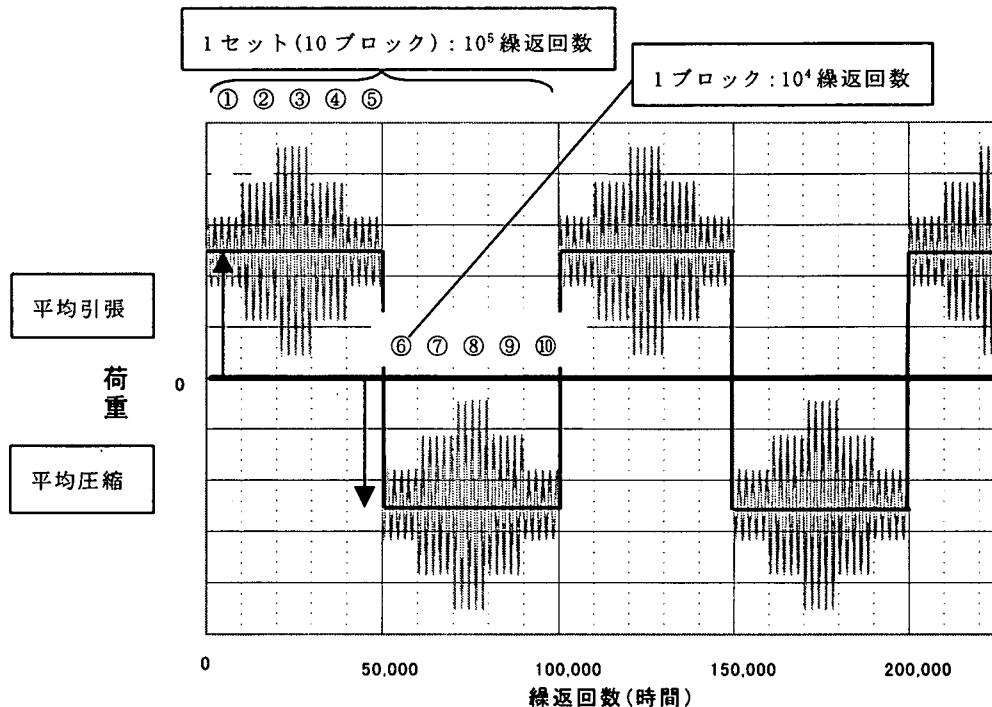


図 15 大型模型疲労実験で負荷した実働荷重模擬パターン(満載・バラスト積付対応)

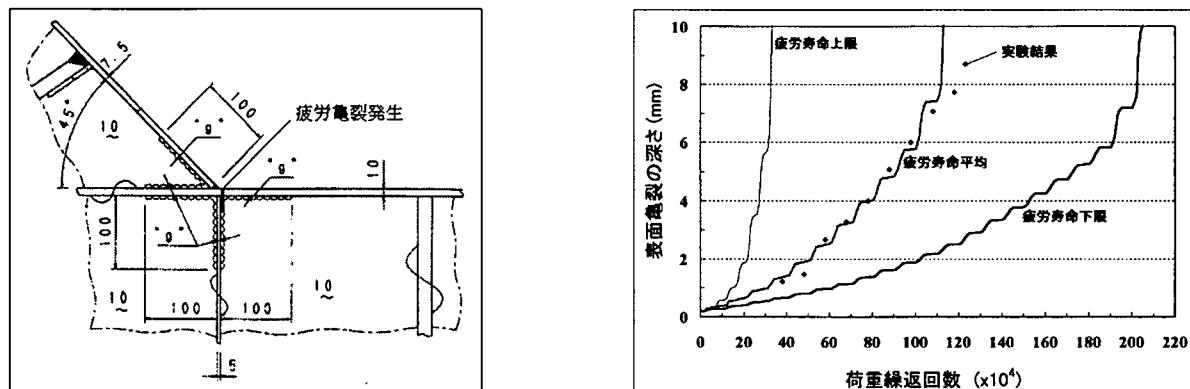


図 16 疲労実験と亀裂発生位置、疲労亀裂伝播再現解析精度(事例)

3.6 SR245 が提案する船体寿命モニタリングコンセプトの紹介

SR245 が提案する船体寿命監視(モニタリング)スキームは、個別の船舶の設計／建造から廃船に至るまでのライフサイクルに亘る余寿命を評価する為に開発された。本スキームは、就航中モニタリングシステムによって個別の船舶が遭遇した海象を特定し、その船舶の遭遇海象の履歴と設計／建造時に得られている疲労強度データとを用いて、船体構造部材の疲労状況追跡・把握と余寿命評価とを行うとの基本コンセプトに拠っている。船主／船級協会／建造造船所が連携した船体寿命監視により、将来的に個別船舶の安全性管理の高度化と合理化とが図れるものと期待される。運用時のイメージを図17に示す。

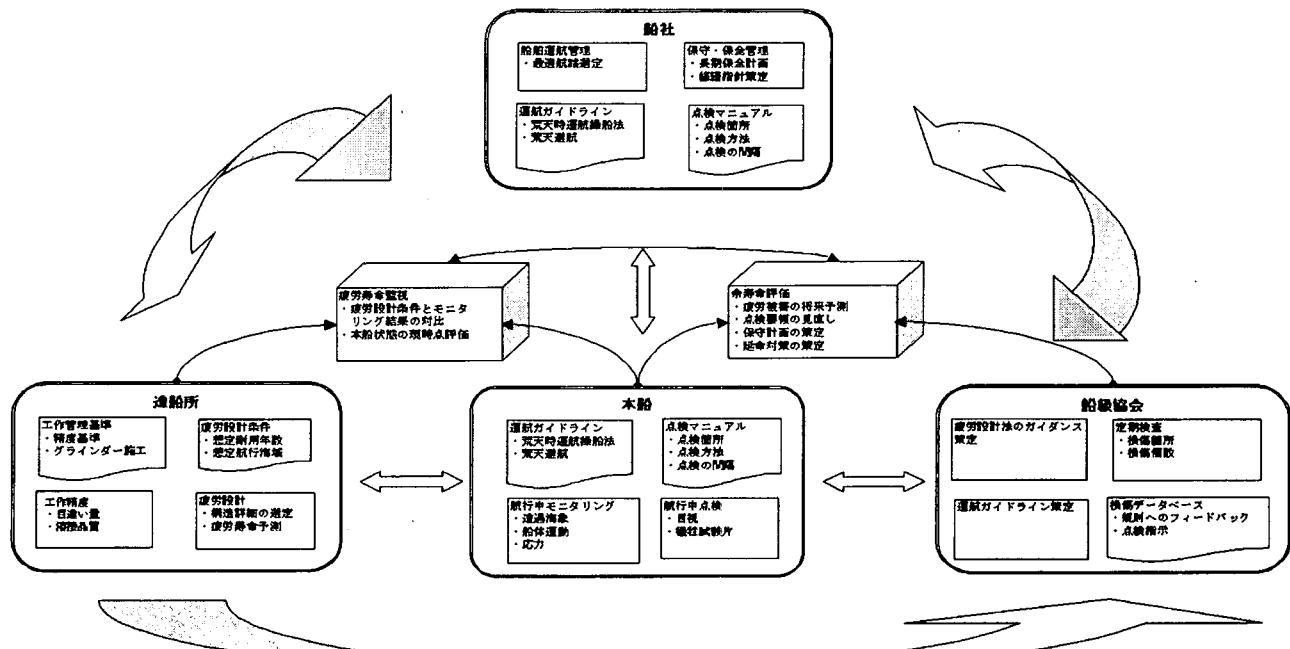


図17 船体寿命監視(モニタリング)システムの将来的な運用イメージ

コンセプトの概要は以下の通りである。まず、本船の設計段階に於ける疲労設計条件(主として想定就航航路)と疲労寿命予測結果及び疲労強度に影響する建造時工作精度情報を基にして、本船のクリティカル構造部位が抽出される。引渡し時までにこれらのクリティカル構造部位を対象とした、本船特有のモニタリング・保守点検・運航支援の各マニュアルが用意される。同時に、本船の構造部材毎の(短期遭遇海象をベースとした)各種疲労伝播予測データが、疲労寿命監視及び余寿命評価システムに対応する個船データベースとして保管される。就航後はオンライン及びオフラインモニタリング(定期検査を含む)により、本船が実際に遭遇した海象即ち、本船に作用した実荷重／応力履歴等を追跡し、構造部材毎の疲労強度の現状把握／疲労亀裂伝播の将来予測等の、余寿命評価を継続的に行う。また、この結果を基にして以降のマニュアル類の改訂即ち、点検要領の見直し、保守計画の策定並びに延命可否判断等を行う事になる。

本監視システムの運用により、設計／建造時には疲労強度予測精度の向上と疲労強度に配慮した合理的な工作精度管理を図る事が可能となる。一方就航後では、航海実績を考慮した個別船舶の構造疲労余寿命評価、個別船舶の疲労状態に基づいた運航支援情報の提供及び、個別船舶に対する適切な保守点検マニュアルの提供などが一貫して可能となる。

3.7 SR245 が提案する(先進的)船体寿命モニタリング運用時のイメージアップ

(1)就航中モニタリング

就航中モニタリングではシステムの簡便性と保守作業の軽減とを考慮し、構造部材に生じる応力を全て直接モニタリングするのではなく、気象／海象情報及び船体運動等の最小限のモニタリングデータ群によって遭遇海象を逆算定する事で、各部の発生応力の推定を可能とし、疲労亀裂の伝播状態を算出するとのスキームを指向した。重点監視箇所に関しては必要に応じて、オンライン直接応力モニタリング或いはオフライン高感度犠牲試験片などを併用して、より詳細な疲労寿命監視を行う。いずれにせよ、就航時の実遭遇応力履歴データを自動的に入手・記録する事がモニタリングの主目的であり、乗組員による継続的なデータ監視は(非常時を除けば)不要である。船上で統計処理されたデータは、衛星通信を経由して定期的に陸上のメンテナンス／運航管理拠点に伝送される。大容量の生データは寄港時に回収される。長期に亘る試行の結果、衛星通信を使ったデータ伝送が実用レベルで可能である事を確認している(見開き写真⑪上段と中段参照)。

(2)疲労寿命監視

疲労寿命監視は図18に示す様に、就航後に蓄積された疲労ダメージと残存疲労寿命とを疲労亀裂の寸法によって評価するスキームに基づいている。判定基準は、3.4に定義を示した危険疲労亀裂寸法である。危険疲労亀裂寸法は、隔壁板厚或いは骨材の面材の様に、一般的に板厚方向の深さで定義される場合が多い。一方で、磁粉探傷等の実用的非破壊検査手法によって検知が比較的に容易なのは疲労亀裂の幅(長さ)であり、深さの検知は困難である。そこで、亀裂伝播解析から得られる危険疲労亀裂深さに対応する危険疲労亀裂幅(長さ)を、点検時の主要判定指標として採用した。但し、危険疲労亀裂の幅(長さ)と深さ比は、構造部位(応力分布)に依存し又、複数の製造時微細きず(初期亀裂)が隣接して存在する場合には伝播の過程で幅(長さ)方向に合体する可能性もある。従って、個船のクリティカル構造部位毎に、事前に妥当な危険疲労亀裂最小幅(長さ)を求めておく必要性がある。

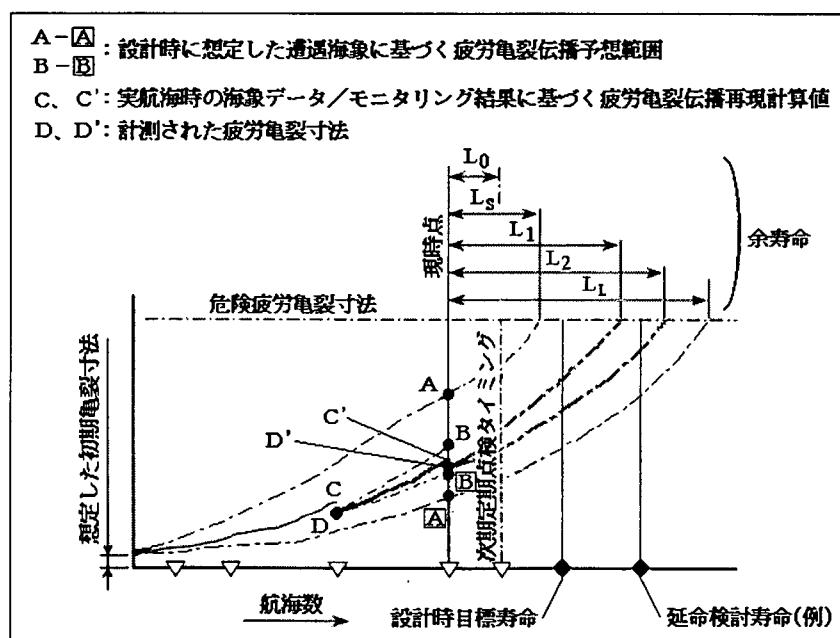


図18 疲労亀裂伝播監視のイメージ

疲労寿命監視の具体的手順は下記となる。

- 点検の容易性や頻度にも配慮した危険疲労亀裂寸法を設定する。構造部材毎の重要性(リスク)に応じた安全余裕度を設け、織り込む。
- 重点監視個所(クリティカル構造部位)について、想定される航路の遭遇嵐モデルを生成して疲労亀裂伝播解析(設計時の疲労亀裂伝播／寿命予測)を実施する。3.2で述べた様に個々の遭遇嵐モデル自体も確率依存なので、複数の遭遇嵐モデル(時系列)の下での疲労亀裂伝播量のゆらぎを把握する。図19は、50パターンの嵐モデル中での最悪嵐遭遇条件及び最良嵐遭遇条件に対応したシングルハルVLCCサイドロンジの疲労亀裂伝播解析事例である。なお、複数とは言え限られた数の嵐モデルでは、**真に最悪の遭遇パターン**(厳しい順番で遭遇する)及び**真に最良の遭遇パターン**(穏やかな順番で遭遇する)をカバーし難い点に留意が必要である。如何なる確率の遭遇パターンまでをカバーする構造設計とすべきかは、船主と造船所とが協議決定する個船毎の仕様に依存する。真に最悪の遭遇パターンに実際に直面するケースは極めて希であり、敢えてカバーすると一般的に建造コスト及び載荷重量での不利が無視できなくなる。
- 建造時の工作精度を、疲労亀裂伝播解析にフィードバックする。或いは、設計時の疲労亀裂伝播解析条件に従って、工作精度を管理する。
- 建造後就航中にモニタリングされた実遭遇海象毎に、遭遇(作用)応力を推定し疲労亀裂伝播解析(追跡)を逐次行う(図18中C又はC'の算出に相当)。
- 設計時に想定した遭遇海象(嵐モデル)による疲労亀裂伝播解析結果と実遭遇海象に基づいた疲労亀裂伝播解析結果とを比較照合し、本船の”疲労状態”を把握する。
- 今後航行する海域の想定海象下に於いてどの程度疲労亀裂が伝播するのか、或いは次回点検までに疲労亀裂がどの程度伝播し得るのか等、就航実績に基づいた疲労寿命の修正予測／ゆらぎ再把握を実施する(図18中、C-B又はC'-B算出に相当)。
- 予測された疲労亀裂伝播寸法により、検査の要否／検査方法及び時期を決定する。
- 検査の結果検知されなかった或いは検知された疲労亀裂の寸法情報(図18中D又はD')をフィードバックして、疲労寿命の再修正(精度向上)予測を繰り返し実施する。

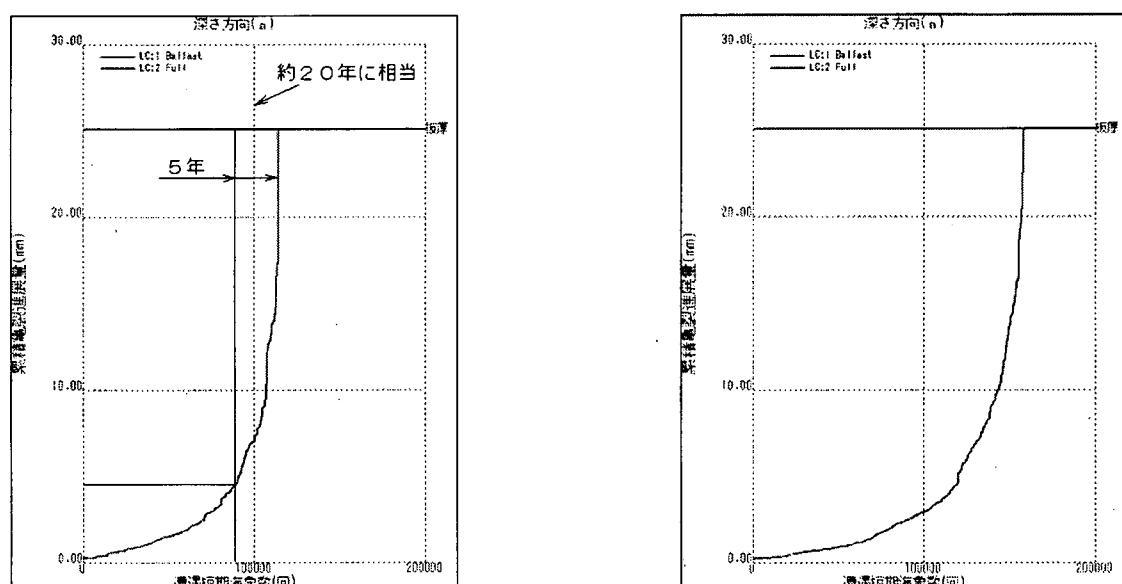


図19 50パターン中の最悪(左)と最良(右)遭遇嵐モデル下での疲労亀裂深さ解析事例

図19では、遭遇短期海象数約2.5万回が就航後5年の定期検査時に、約10万回が就航後20年に相当する。設計時にランダムに想定した50パターン中の最悪遭遇嵐環境下でも、20年目に於けるフェース材の疲労亀裂予測深さは高々7mm程度と板厚の1/3未満であり、問題とはならない。従って、定期検査時の広範な亀裂検知／確認は不要となる。但し、予想外に厳しい嵐遭遇履歴を受けながら、例えば15年目の定期検査時に7mm深さの疲労亀裂が見逃された場合には、3年内で急激に板厚貫通に達し危険な状態に陥る可能性が高まる。従って、例え設計時に安全性が高いと判定された構造であっても、最も疲労強度が厳しい箇所での定期検査時サンプリングチェックまで省くのは望ましく無い事が判る。

図20は図19の疲労亀裂深さに対応する、疲労亀裂半幅(半長さ)の予測値を示す。5年で板厚貫通に達し得る疲労状態は亀裂深さで約5mm弱であり、対応する亀裂全幅(長さ)は約20mm強に過ぎない。20mm程度の亀裂では、目視による無作為検知は一般的には困難と言わざるを得ない。今回SR245が提案する疲労寿命監視スキームに拠れば、相対的に疲労亀裂が伝播(成長)し易い箇所の特定と、検知すべき疲労亀裂寸法(幅／長さ)情報が点検時点で揃っている。その為、適当な数と箇所の磁粉探傷による集中的なサンプリングチェック等によって、容易で信頼性の高い点検実施(構造安全性確保)が可能となる。

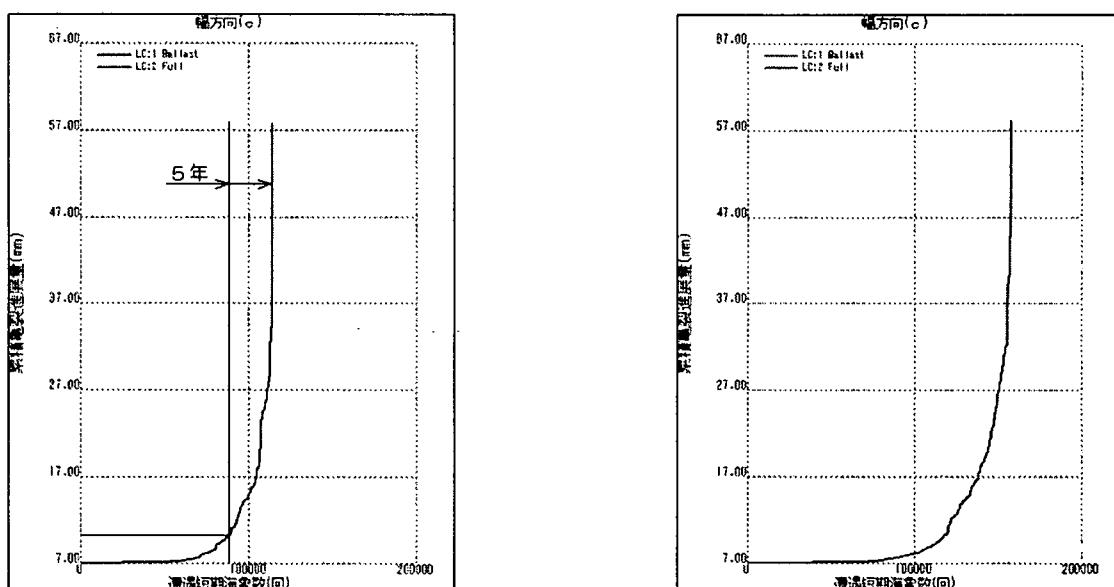


図20 50パターン中の最悪(左)と最良(右)遭遇嵐モデル下での疲労亀裂半幅解析事例

表1 ダブルハル VLCC 重要構造箇所の疲労亀裂伝播試験解析事例

対象部材	対象箇所	板厚 t (mm)	板幅 W (mm)	止端 半径 ρ (mm)	フランク 角 θ (deg)	溶接 脚長 h (mm)	初期欠陥寸法		板厚貫通寿命 $\infty = 20$ 年シミュレーションで 進展量0.01mm以下 (年)
							深さ b0 (mm)	表面半幅 a0 (mm)	
ロンジ・フェース材	船側外板付き	30.0	150	1.0	50	5.0	0.2	8.5	∞
ロンジ・フェース材	船底外板付き	25.0	150	1.0	50	5.0	0.2	8.5	∞
ロンジ・フェース材	縦通隔壁付き	21.0	150	1.0	50	5.0	0.2	8.5	∞
ロンジ・フェース材	内底板付き	24.0	150	1.0	50	5.0	0.2	8.5	∞
内底板	溶接型ピルジ・ナックル部	30.0	1000	1.0	50	5.0	0.2	26.0	454.4
縦通隔壁	ストラットトウ部	15.0	1000	1.0	50	5.0	0.2	8.0	∞
縦通隔壁	デッキ・トランジ端部	16.5	1000	1.0	50	5.0	0.2	7.0	∞
内底板	バーチカル・ウェブ端部	20.5	1000	1.0	50	5.0	0.2	7.8	∞
縦通隔壁	水平桁端部	15.5	1000	1.0	50	5.0	0.2	9.5	∞
内底板	R型ピルジ・ナックル部	30.0	1000	1.0	50	5.0	0.2	30.0	∞

SR245 では、疲労寿命予測の為のプロトタイプ計算システムを開発した。表1は、ダブルハル VLCC の重要構造箇所として設定したサイドロンジ、大骨端部、ビルジ部等について、ランダムに発生した一種類の日本国内～ペルシャ湾航路での遭遇嵐パターン下に於ける疲労亀裂伝播予測結果事例である。本予測結果によれば遭遇嵐パターンによるゆらぎを考慮しても、各構造箇所共、潜在的な製造時微細きず(初期亀裂)寸法から殆ど伝播(成長)が認められず、当然の結果とは言え疲労寿命面での問題は生じないものと判定された。

(3)保守点検マニュアル

保守点検マニュアルは、疲労寿命監視及び余寿命評価技術を活用して、疲労亀裂損傷予防保全の観点から質が高く合理的な船体構造保守管理を行う為の資料集である。

船舶の引渡し時には、まず初期設計時点検マニュアルが準備される。初期設計時点検マニュアルには、設計時に想定した就航海域、就航期間や初期亀裂寸法などの設計条件、工作精度並びに設計条件下で実施した疲労亀裂伝播解析結果に基づき、点検対象とすべき重要構造箇所(クリティカル構造部位)や危険亀裂寸法に達するまでの予想寿命などの情報が記載される。

就航後には、就航後の点検要領を示した保守点検マニュアルが逐次改訂される。就航後は、SR245 で開発した疲労寿命監視スキームに則って当該船舶の実際の就航履歴に応じた時々刻々の疲労亀裂寸法(修正)予想値と設計時に想定した亀裂伝播予測値との比較照合を行うと共に、危険疲労亀裂寸法に対する余裕度を勘案して次回点検時期や詳細点検を実施すべき構造箇所を特定する(例えば図21参照)。特定された構造箇所の点検は非破壊検査によるものを原則とし、点検箇所の位置や想定される疲労亀裂の形状に応じて適切な手法により計測する。疲労寿命監視システムにより推定された疲労亀裂寸法は、点検結果により較正され、次回点検に向けて保守点検データベースの更新にフィードバックされる。言い換えれば、保守点検マニュアルとは、初期設計時に不確定性故にゆらぎ幅の大きかった予想疲労寿命を、実船の就航履歴情報に従って絞り込み、信頼性の高い余寿命評価を可能とする支援資料集である。

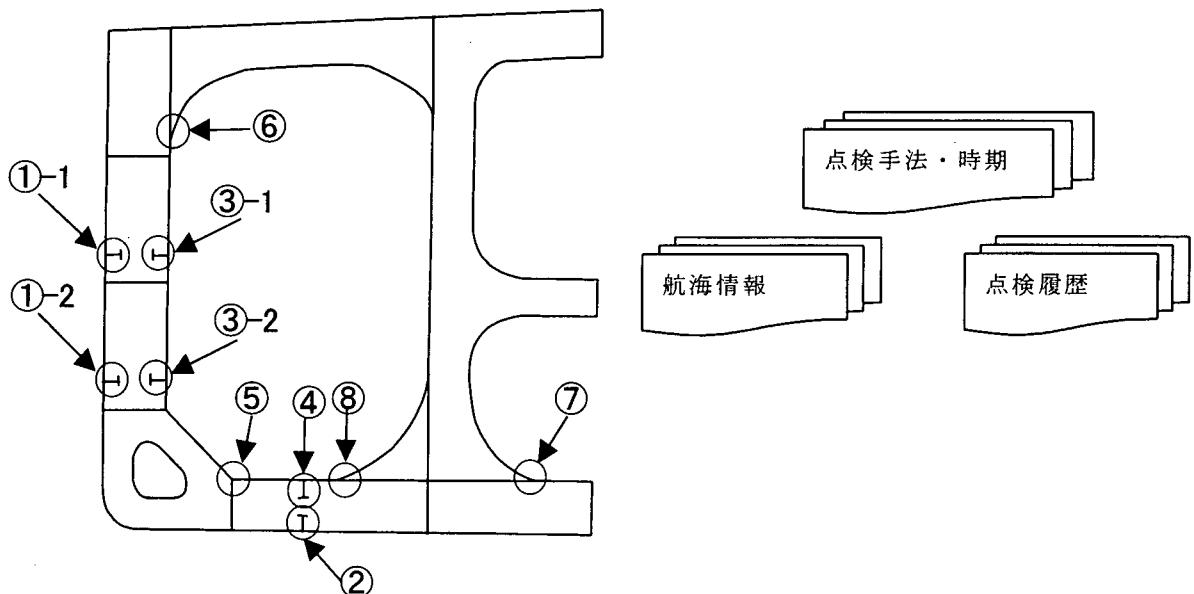


図21 保守点検マニュアルの記載情報例

(4) 運航支援

運航支援情報は、本船及び陸上の船舶管理者に対して、疲労亀裂損傷の観点からの予防保全的な運航、及び万一航行中に疲労亀裂が発見された場合の緊急避難的運航を支援する為の参考資料である。SR245 が提案する疲労寿命監視スキームに基づいて推定される重要な構造箇所の疲労亀裂伝播量を参照しつつ、運航支援情報として示される海象条件が各構造部位の疲労亀裂伝播速度に及ぼす影響度情報を、モニタリングシステム等から推定される遭遇中或いは遭遇予定の海象とを照合しながら、望ましい運航／操船を行う事により、疲労亀裂進展量や余寿命の減少を効果的に制御する事も可能となる。図 2 2 に運航支援情報の一例を示す。

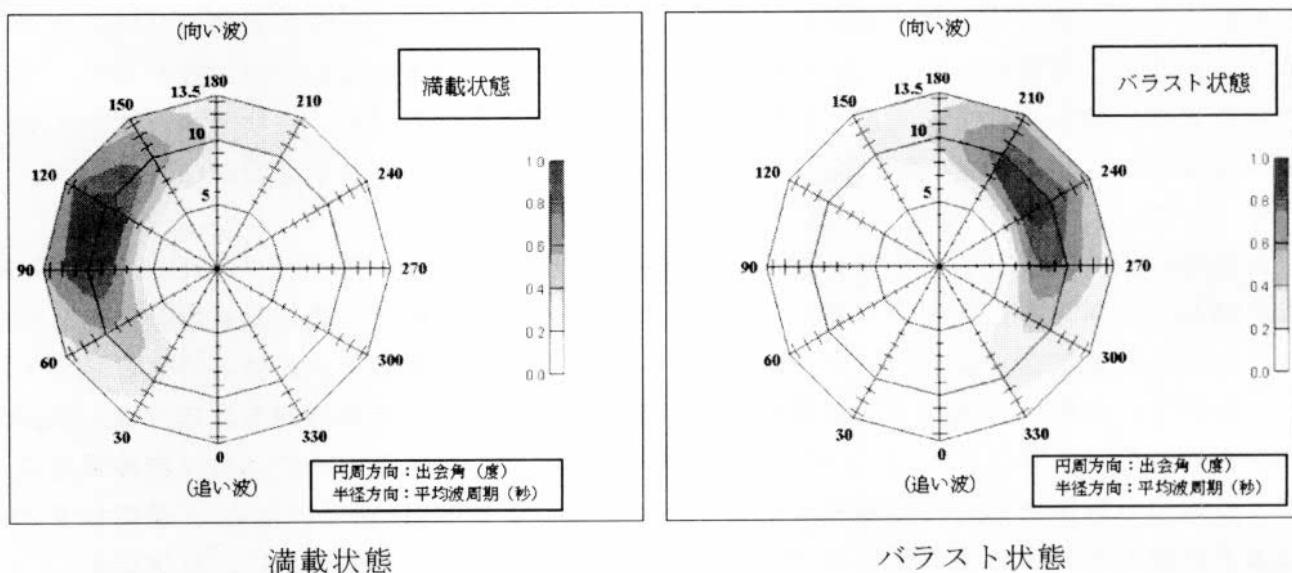


図 2 2 運航支援情報(出会い波向、出会い波周期別の疲労亀裂伝播速度比較)の一例

4.まとめと成果の活用法

本研究では、ライフサイクルに亘る船舶の合理的な安全性向上に寄与する技術開発課題として、「船体構造の先進的疲労寿命監視・管理」に取り組み、全体コンセプトの確立及びその実現に必要な、設計時の遭遇海象予測／疲労亀裂伝播予測から就航後の実船モニタリング(追跡)／保守点検／運航支援までに係わる各種技術の高度化と具体的な開発を試みた。

その成果として、特定の航路に就航する個々の船舶が遭遇する海象(波高・波周期・波向)の相違を定量的に予測・追跡する事を可能とし、また疲労亀裂の成長(伝播)履歴を逐次シミュレートし、実際の疲労亀裂損傷寸法との直接の比較を可能とする実用的な技術基盤を整備した。

これらの技術進歩はそれぞれ単独でも船体構造の設計品質／安全性向上に寄与するが、特に就航中モニタリング技術と組合せた場合には、相乗効果で有用性が高まる。従来、船体モニタリングシステムの実船搭載は希であり普及している技術とは言えない。その主原因は、船体モニタリング実施によって得られるメリットが不明確である点に尽きる。メリ

ットについての具体的なアピールが不足していたり、モニタリングデータの有効活用に必要な基盤技術が未熟でメリットの信憑性に説得力が欠けていた等の事情がある。今回SR245 が開発し提案する船体構造の先進的疲労寿命監視・管理スキームでは、船体モニタリングは個船の疲労面での履歴と初期設計条件との相違状況とを追跡・把握する為に必須な、重要事項と位置づけられる。そこでモニタリングを含む主要技術に関しては PC 版のプロトタイプシステムを開発し、実用性能を把握すると同時に、ユーザーによる入出力作業／運用時の有用性等のイメージアップとアピールとを図った。

個船毎の特定構造寿命管理の為には、個々の航路別海象特性(嵐モデル)の把握・設定、応力集中部の絶対値／詳細な分布形状の高信頼度推定及び容易な亀裂損傷検査・検知法の実用化等、具体化に伴う検討作業が必要である。また、腐食耗耗を組合せて扱う為には別の研究アプローチも必要となる。とは言え、**船体構造寿命の安全性管理高度化の為の一貫した方法論・方針**を提示できた。これら方法論の一部(分野)は従来からも独立的・断片的に開発・試用が図られてきているが、関連する現有技術の実用度に応じて全体統合化の為の全範囲的な研究開発目標を設定し、結果としてトータルバランスのとれたレベルアップに至ったのは特筆すべき成果と言える。

5. 終りに

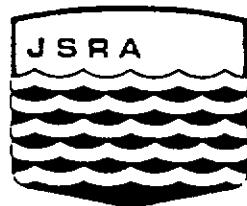
以上紹介した SR245 に於ける研究開発内容は、長期間に亘る海象データの収集、実船モニタリング、疲労強度解析に関する一連の研究実施等、関係者(機関)の基礎的で継続的な努力と理解(支援)の結実である。SR245 では、対象事例としてダブルハル VLCC に焦点をあてて研究開発を実施したが、本研究成果即ち、「船体構造寿命の安全性管理高度化の為の一貫した方法論・方針」はタンカーに限らずあらゆる船種に共通の、汎用性の高い技術でもある点が強調される。

大学・研究機関・船級協会・海運会社・造船会社等、多種多面的な技術と経験とを有する多くの機関が参加し且つ、継続的な協同基礎研究が、安易に追随できない独自性ある技術(コンセプト)を生み出す素地になる事を、再度指摘して終りの言葉(尽力頂いた関係先への謝辞)としたい。

最後になりましたが、本研究の実施にあたりまして、日本財団より多大なご支援を頂いた事に対し深く御礼申し上げます。

発行 平成15年3月
発行所 社団法人 日本造船研究協会
〒105-0001 東京都港区虎ノ門一丁目15番16号
海洋船舶ビル6階
電話 総務部 03-3502-2132
研究部 03-3502-2133
FAX 03-3504-2350

「本書は、日本財團の助成金を受けて作成したものを頒布するものであります。」



The Shipbuilding Research Association of Japan