

III 船体の寿命評価手法について ～特に船体の疲労及び腐食に関する評価～

材料加工部 高エネルギー利用研究室長 松岡 一祥

1. はじめに

平成8年度から12年度の5カ年間、「船体の寿命評価技術に関する研究」を実施した。本研究の終了にあたり、その背景と目的、研究実施中に生じた事件、研究内容および今後の研究の方向について述べる。

2. 背景と目的

研究開始当時、老朽バルカーの全損事故が多発していた。そこで、寄港国による検査(PSC)強化の動きが活発であった。また、SHVLCC サイドロンジでの疲労損傷の多発が問題視されていた。そこで、疲労寿命設計法と、腐食衰耗の評価法及びPSCに対応できる検査手法に焦点を当てて研究することとした。

当時、疲労寿命設計法の荷重設定法については、船倉内荷重、専用貨物船の荷付けの影響等に検討の余地が残っているものの、海域毎の波浪頻度表により予測された海象における応答関数を求め、頻度を考慮してそれらを重ね合わせて長期予測する手法がほぼ確立していた。しかし、より簡便な手法が求められていた。

これに対し、疲労設計に用いるS-N関係については検討すべき課題が多かった。ハイテン船ほど疲労損傷が生じやすいではないかとか、過大荷重を受けた後の疲労挙動はどうなるのかとかが問題になっていた。すなわち、材料強度、荷重履歴及び複合荷重効果を考慮できるS-N関係、損傷則が確立していなかった。また、腐食環境下での疲労挙動については、参照できる試験結果すら不足していた。

検査についてはエンハンスドサーベイが実施されはじめ、板厚計測の簡易化が求められていた。

以上を背景に、以下の4つの項目に分けて研究を実施した。

- (1) 船体寿命設計の高度化に関する研究
- (2) 部材強度評価法の高度化に関する研究
- (3) 材料の耐久性に関する研究
- (4) 船舶検査技術に関する研究

(1)では、疲労寿命評価手法をより精度の高いものにすることを目的として、船体に作用する荷重の合理的な設定法の提案、船体構造解析システムの構築、精度の高い疲労寿命推定手法の開発を行い、新造船の疲労設計および経年船の余寿命評価に対する技術指針をとりまとめることを目標とした。(2)では、溶接条件・溶接部形状・変形・残留応力等の因子が疲労等の強度に及ぼすの影響の評価法、並びに、荷重履歴及び複合荷重効果の評価法を確立することを目標とした。(3)では、船体用材料および溶接継手の腐食疲労強度、腐食衰耗、塗膜劣化機構を解明し、船体寿命評価確立のための基礎資料を得ることを目標とした。

(4)では、PSC に対応できる船舶検査を可能とするために必要な、船舶検査技術の開発改良を行うことを目標とした。

(1)、(2)及び(3)を統合すると、設計段階から疲労及び腐食を考慮して寿命を評価できる。また、就航している船舶の運航履歴、遭遇海象等がわかれば今後の疲労損傷の可能性を評価できる。さらに、(4)と併せると、より緻密な寿命評価ができるはずである。

以上が研究を開始したときの目論見であった。

3. ナホトカ号事故

研究を開始して2年足らずの平成10年1月には、ナホトカ号の折損沈没事故が起こった(図1参照)。



図1 漂着したナホトカ号の船首部

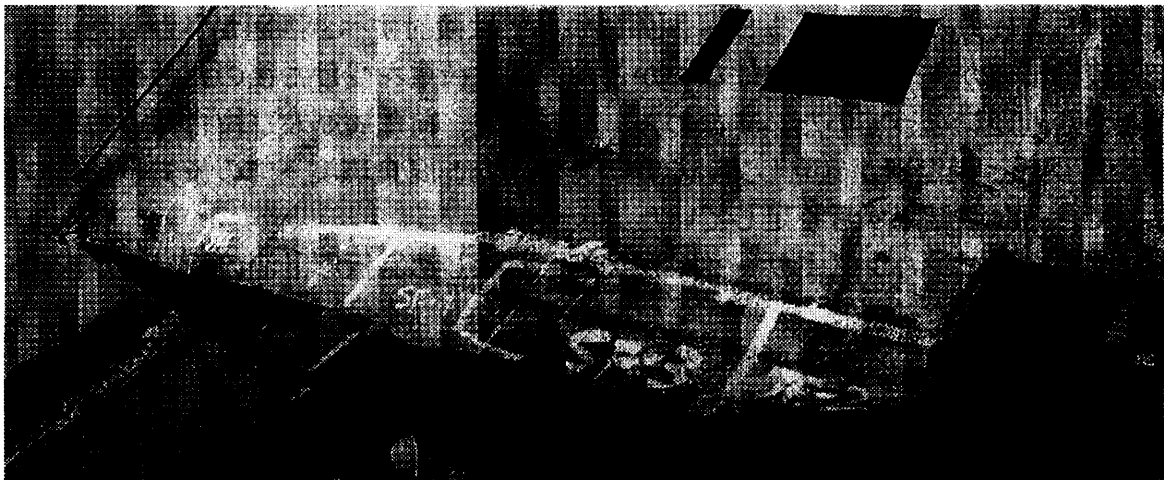


図2 試料採取の様子

事故の原因は過大な腐食衰耗に対して十分な修繕を行わなかったことに尽きるが、事故調査の過程で、腐食衰耗に関して貴重な知見を得た。

漂着した船首部から試料を採取し(図2参照)、材料試験片を採取した端材の端面で、5 mm 間隔の板厚計測を実施した。結果を図3に示す。図には板厚の頻度分布と設計板厚が示されている。図を見ると、腐食衰耗した板の板厚分布は正規分布であり、これは衰耗量も正規分布することを示す。衰耗量が正規分布すると仮定して衰耗量の統計量を求めると、表

1 となる¹⁾。

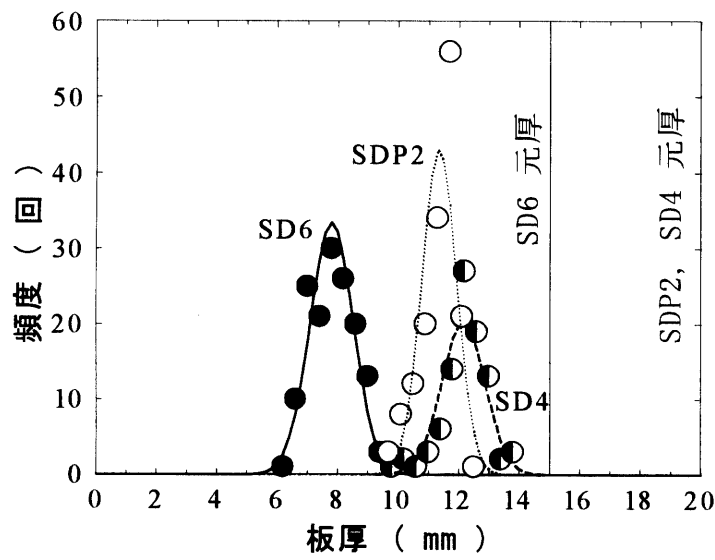


図3 甲板の板厚計測結果

表1 デッキプレート、デッキロンジウェブ板厚等の統計量

試料番号	デッキプレート			デッキロンジウェブ			ダブリング	
	SDP2	SD4	SD6	SDP2	SD4	SD6	SD4	SD6
元厚 (mm)	20	20	15	14	12	12	—	—
最大板厚 (mm)	12.4	13.7	9.5	9.8	6.2	8.8	4.1	4.6
最小板厚 (mm)	9.6	9.7	6.3	8.8	2.7	6.7	3.2	4
平均板厚 (mm)	11.35	12.16	7.81	9.29	4.94	7.95	3.66	4.36
平均衰耗量(mm)	8.65	7.84	7.19	4.71	7.06	4.05	—	—
標準偏差 (mm)	0.573	0.715	0.712	0.166	0.636	0.365	0.187	0.131
変動係数	0.066	0.091	0.099	0.035	0.090	0.090	—	—
推定元厚 (mm)	17.4	—	—	11.1	—	—	5.7	5.8

SDP2 を除く SD4 及び SD6 ではデッキロンジウェブにダブリングプレートが付けられていた。ダブリングされていた個所では、デッキプレート及びデッキロンジウェブの衰耗量の変動係数(=標準偏差/平均)は 0.090 から 0.099 であるのに対し、ダブリングのなかった SDP2 では、変動係数が 0.066、0.035 と著しく小さい。ちなみに、隔壁の衰耗量の変動係数はデッキ部の半分程度であった。

以上から以下が推察された。

- (1) SDP2 は切り替えられたものと考えられる。
- (2) 同一腐食環境では、衰耗量の変動係数に差がない。
- (3) SDP2 の衰耗量の統計的性質がダブリングされた個所と同じなら、切り替え材の板厚は設計板厚より 2 mm 以上小さい。

これらは、ナホトカ号では著しく手を抜いた修繕が行われていたことを示唆するとともに、

現行の切り替え基準(表 2 参照)は、デッキ板厚 20 mm 以上のタンカーでは安全といえないことを示している(図 4 参照)。

表 2 上甲板切り替え基準

船級協会	A	B	C
板	20 % + 1 mm	20 %	20 %
骨	20 % + 1 mm (平鋼) 30 % (小骨)	25 %	25 %
縦強度	船体横断面係数規則 要求値の 87 %以上	10 % (板) 15 % (骨)	Top Area の 15 %
腐食予備厚	3.0 mm	2.0 mm	1.0 mm

- 注 1 : B, C 船級協会とも板については座屈強度の照査を要求
 注 2 : B 船級協会は縦強度について規則要求値の 90 %を超えることを優先
 注 3 : C 船級協会は水バラストタンクの予備厚 2.0 mm を要求

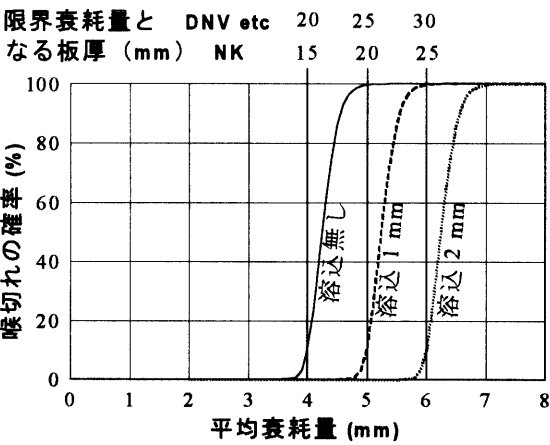


図 4 平均衰耗量と喉切れ確率

研究実施期間中に、これら腐食、衰耗の問題には一定程度の国際的的了解が得られるようになったと考えられる。そして、老朽バルカー及びタンカーへのエンハンスドサーベイ及び PSC の要求はどんどん厳しくなっていった。

4. 研究内容と結果の概要

上に述べたように、研究当初想定していた腐食と疲労による船体寿命の評価という目的の中で、老朽船の腐食についてはルール化が先行してしまった。そこで、ここでは、それらを除いた設計時の寿命評価と疲労寿命評価法を中心に、実施した研究の概要を述べる。

4.1 寿命評価のための腐食・疲労データベース

寿命評価のためには、塗装の劣化から腐食衰耗に到る部材劣化、及び、疲労亀裂の発生、伝播の腐食挙動の予測精度が重要である。そこで、まずこれらのデータを収集し、データベース化を行った。

4.1.1 塗装の劣化

塗装の劣化については目視あるいは tanδ法などの電氣的な評価が行われてきた。しかし、現象論的な解釈にとどまり、劣化の機構が明らかになっていないわけではない。そこで、まず、塗装試験片の長期間の人工海水浸漬試験を実施し、従来法による評価を行うとともに、今まで試みられなかった各種評価法により、塗装材料の劣化そのものを評価することを試みた。

例えば、図 5 はタールエポキシ塗料の赤外分光スペクトル分析結果を示している。未浸漬のものと 3 年間浸漬されたものを比較すると、浸漬による OH 基の増加によるスペクトル変化が見られる。

研究期間の 5 年では塗膜の劣化は顕著でなく、現状では著しい結果は得られていないが、

今後も試験を続行する。

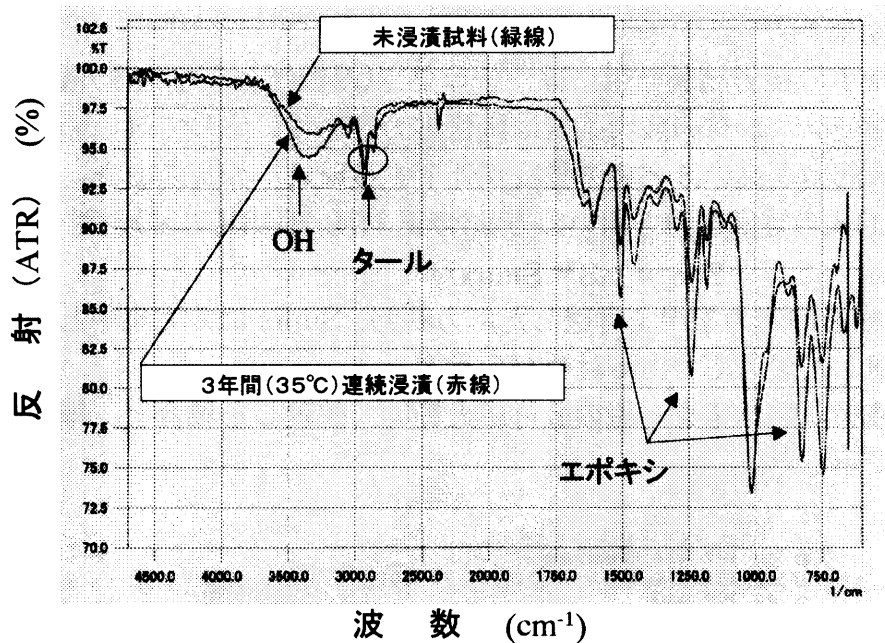


図5 塗膜表面の FT-IR スペクトル

4.1.2 腐食速度

後に示す腐食疲労及び各種環境中での疲労亀裂進展の基準データとして、造船用鋼板の腐食速度を、各種環境における浸漬試験から求めた(図 6 参照)²⁾。試験の結果を整理し、海水(バラストタンク)から希硫酸環境(石炭バラ積み船倉)まで腐食速度は pH で整理できることが判明した(図 7 参照)。

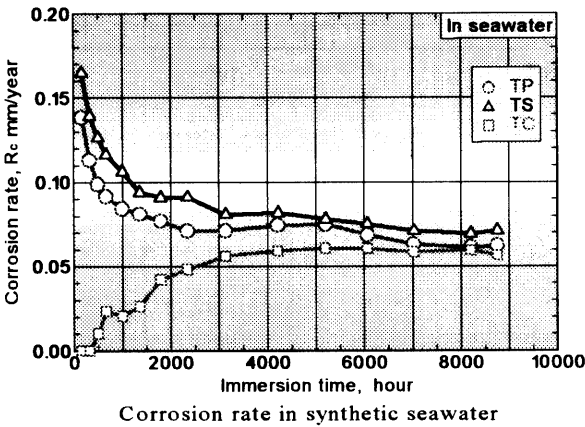


図6 人工海水中での腐食測度

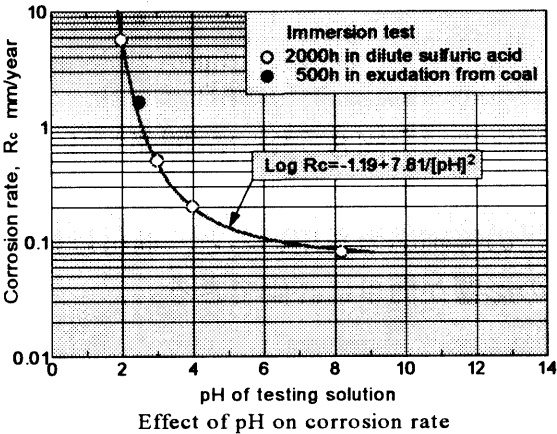


図7 腐食速度と pH の関係

4.1.3 疲労亀裂発生寿命

疲労亀裂発生寿命について、溶接残留応力、荷付けによる平均応力変化等を考慮できる方法(修正 MIL-HDBK-5 法)を開発した³⁾。また、母材切り欠き試験片により、各種環境で

の腐食疲労亀裂発生寿命データを取得した。

(1) 平均応力効果^{3、4)}

過去の溶接継手の疲労試験結果には、板厚効果(厚板ほど疲労強度が低い)が見られた。また、高張力鋼では、母材の疲労強度は降伏応力の高さに応じて高いのに対し、溶接継手では母材の降伏応力が高いほど疲労強度が低下する現象⁵⁾が見られた。これらを説明する方法として、(1)式の等価応力を用いる方法(修正 MIL-HDBK-5 法)を開発した。

$$Seq = \Delta S^m Smax^{1-m} \tag{1}$$

ここに、 ΔS は構造的応力集中を考慮した応力範囲、 $Smax$ は応力集中と溶接残留応力及び降伏条件を考慮した最大応力、 m は材料定数である。

図 8，9 に疲労試験結果を一般の公称応力範囲で整理した場合と、等価応力で整理した場合を比較して示した。

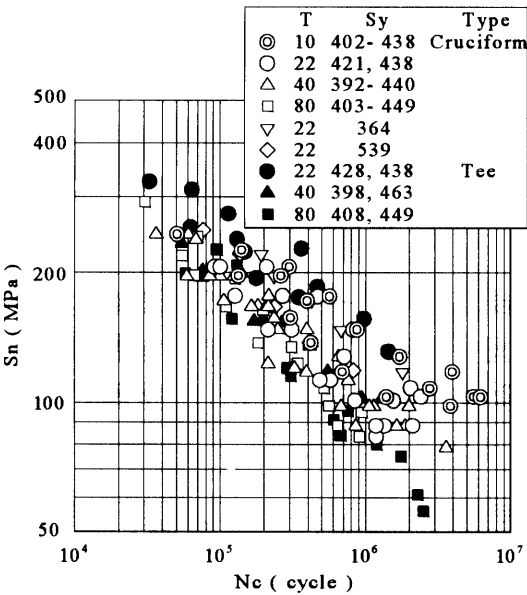


図 8 Sn-Nc 関係

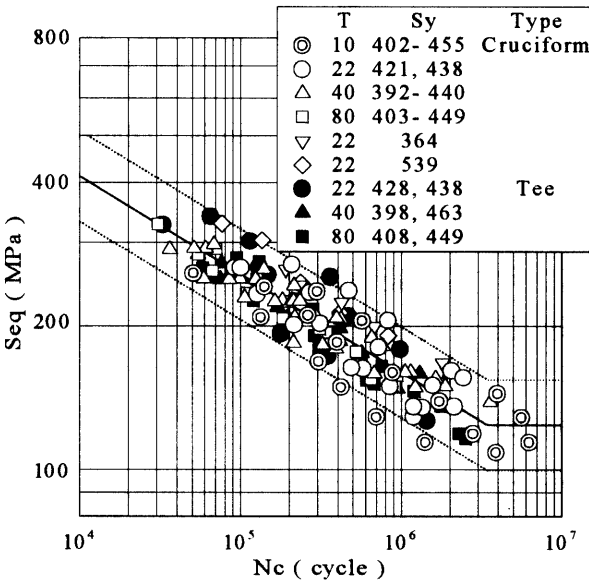


図 9 Seq-Nc 関係

この等価応力を用いると、荷付けによる平均応力の変化、過大荷重による残留応力変化等の影響が簡単に評価できる。

(2) 環境影響

母材切り欠き試験片により、大気中、人工海水中、pH 4 及び 2 の環境における疲労試験を実施した。図 10 及び 11 に大気中及び人工海水中での疲労試験結果を示す。

図を見ると、大気中及び人工海水中での S-N 関係の傾斜は Kt により異なること、及び、腐食環境では疲労限が見られないこと、などがわかる。これらの試験結果に pH 4 及び 2 の環境における疲労試験結果を併せて、修正 MIL-HDBK-5 法の等価応力で整理すると、図 12 が得られる。

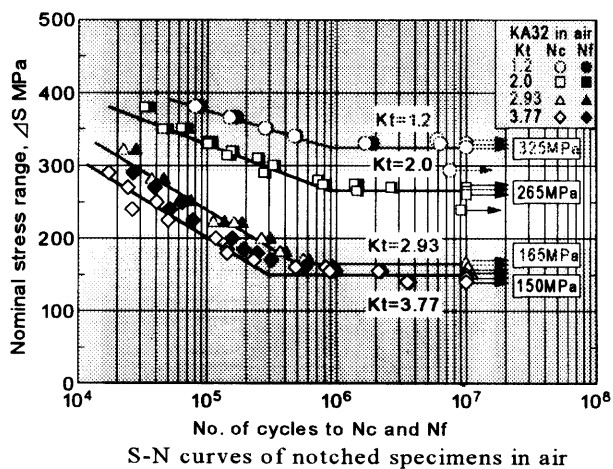


図 10 大気中疲労試験結果

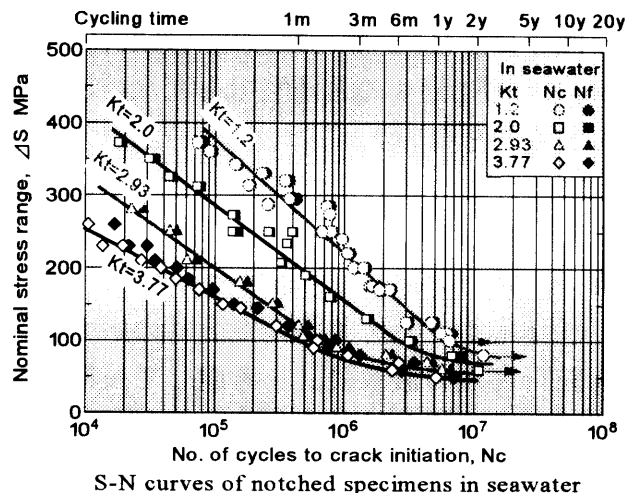


図 11 人工海水中疲労試験結果

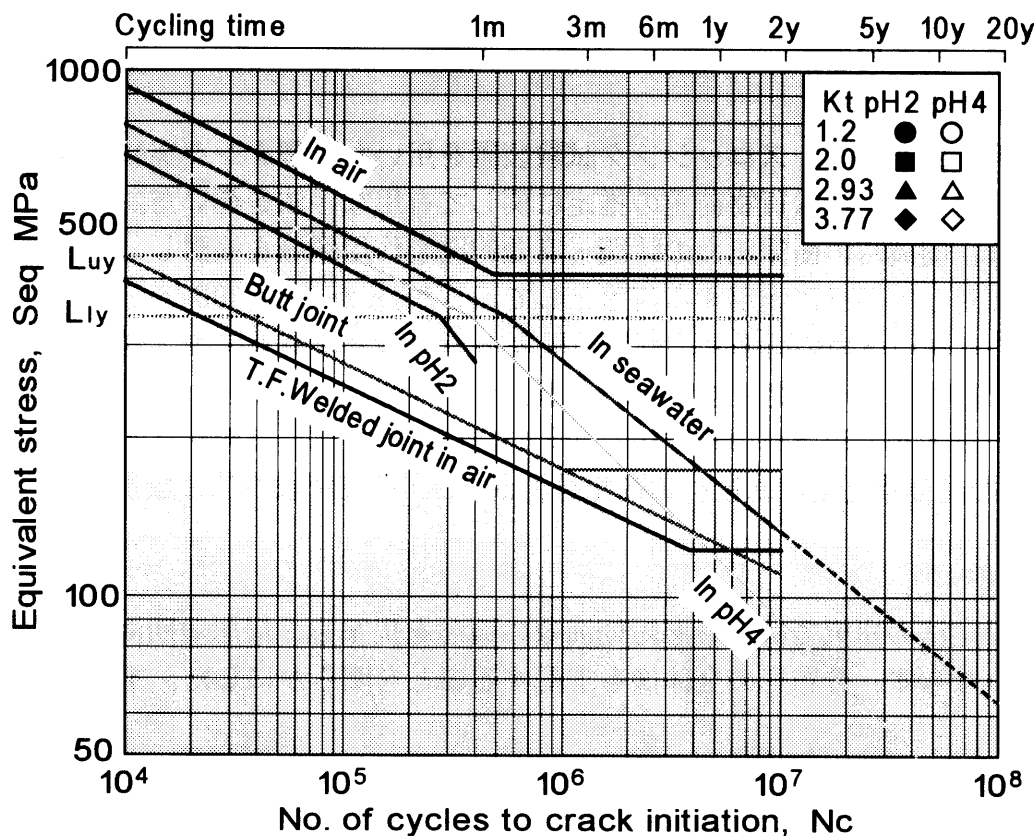


図 12 等価応力-疲労亀裂発生寿命関係

以上のように、大気中及び腐食環境中の溶接継手及び母材の疲労亀裂発生寿命は修正 MIL-HDBK-5 法で統一的にデータベース化された。

4.1.4 亀裂伝播速度

船体用鋼の大気中、人工海水中、pH 4 及び 3 での疲労亀裂伝播試験を実施し、図 13 を得た。

図を見ると、造船用鋼の亀裂進展特性は、pH 3 及び pH 4 の希硫酸でも海水中とほとんど変わらない。

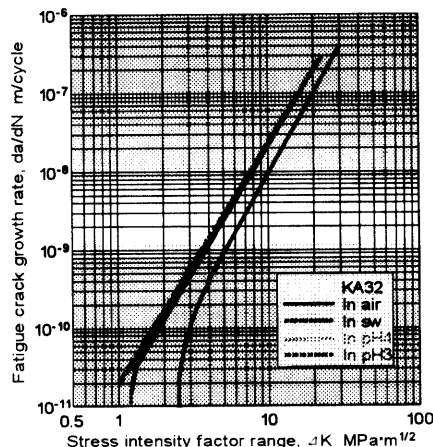


図 13 造船用鋼の各種環境における亀裂伝播特性

4.2 荷重設定法と寿命評価

船体応答、疲労亀裂発生箇所の応力応答を航行海域の波浪統計を考慮して長期予測するという概念は確立していた。しかし、船倉内荷重、簡単な長期予測法及び過大荷重等の荷重履歴の取扱いについては検討の余地があった。

4.2.1 荷重・荷重履歴

(1) 船倉内荷重⁷⁾

船倉内荷重の研究では、スロッシング試験装置を用いた模型タンク実験結果を基に、スロッシング荷重および粒状貨物荷重の推定に関して有用な手法を導いた。スロッシング荷重については、同調時の衝撃圧力の時間・空間的同時作用領域を検討し、液位、動揺角等種々の条件に対して部材に作用する荷重として示した。また、約 1,000 ケースの実験結果(液体の運動、各計測点圧力の時系列、解析結果等)をデータベース化した。粒状貨物荷重については、粒状貨物によって発生する静的荷重、動的荷重の推定法を Janssen の理論をもとに構築した。パネルと防撓材の剛性比を変えた防撓板模型により粒状貨物の押込み実験を行い、一般的な船体構造では防撓材の荷重分担がパネル部の約 2.5 倍になることを示した。

(2) 長期予測^{8, 9)}

波浪荷重設定法の研究では、最悪短期海象の概念を提案し、最悪短期海象が長期分布の最大荷重のみならず、分布形の全体像も支配することを明らかにした。すなわち、最悪短

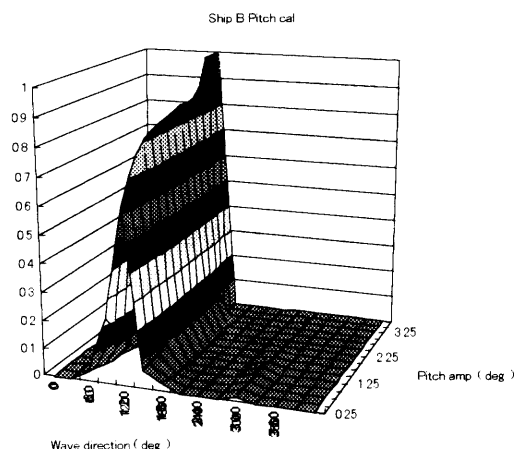


図 14 遭遇海象に基づく計算値

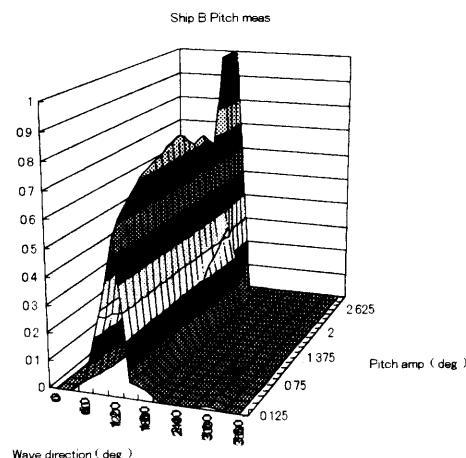


図 15 計測値

期海象から長期分布を精度よく推定できることを示した。この手法は、座屈・大変形、および、疲労被害度の検討のための統一的な波浪荷重の長期分布の解析法である。

図 14 及び 15 に、計算例と計測値を対比して示した。

(3) 過大荷重の統計処理¹⁰⁾

修正 MIL-HDBK-5 法の等価応力による疲労強度評価は、荷重が負荷されたときに最大応力（構造的な平均応力+残留応力+変動応力振幅）が降伏応力を超える場合には、シェイク・ダウンにより局所的な残留応力が変化するとしてモデル化している。従って、実際に評価しようとする場合、負荷される荷重の履歴を知る必要がある。

実際に船体構造が受ける荷重履歴はランダムであるため、シェイク・ダウンが生じるときの変動応力の大きさ及びその発生時期は確率変数として取り扱うものとし、図 16 の過程を得た。

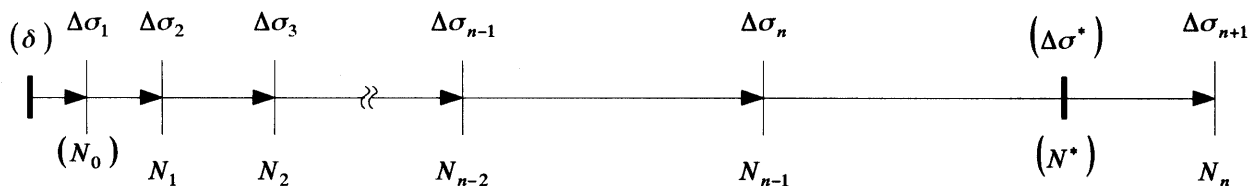


図 16 シェイク・ダウンの確率モデル

4.2.2 新しい疲労寿命評価法

以上をまとめると、新しい疲労寿命評価法が得られる。その手順を以下に示す。

(1) 航路の海象(波高、周期、波向)→遭遇波浪の短期分布→長期分布

従来手法に簡易手法を加味したもの。

(2) 荷付けによる平水応力、船体応答関数→応力範囲、平均応力、残留応力更新、過大荷重の統計処理

従来手法は、応力範囲を主とし、平均応力については修正グッドマン補正等を行っていた。ここでは、修正 MIL-HDBK-5 法を用いるため、最大及び最小応力の算出と過大荷重によるシェイク・ダウンを想定する。

(3) (修正)マイナー則の適用

従来法では、応力範囲・寿命(S-N)関係を用いるが、ここでは等価応力・亀裂発生寿命(Seq-Nc)関係を用いる。

4.2.3 評価法の検証

修正 MIL-HDBK-5 法に基づく疲労寿命評価方法の適用性は、実験結果及び損傷事例の評価を行って確認した。

(1) 実験

角回し溶接継手を用いて図 17 の荷重パターンで疲労試験を行った結果¹¹⁾、及び、DHT

ビルジナックル部構造模型に満載/バラストの平均応力変化を与えた疲労試験(図 18 参照)の結果¹²⁾について検討し、その適用性を確認した。

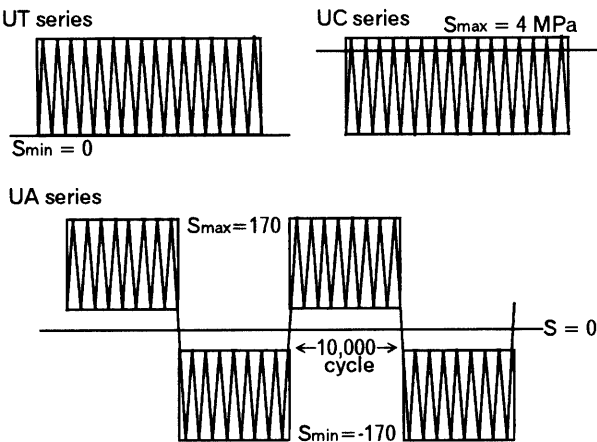


図 17 荷重パターン

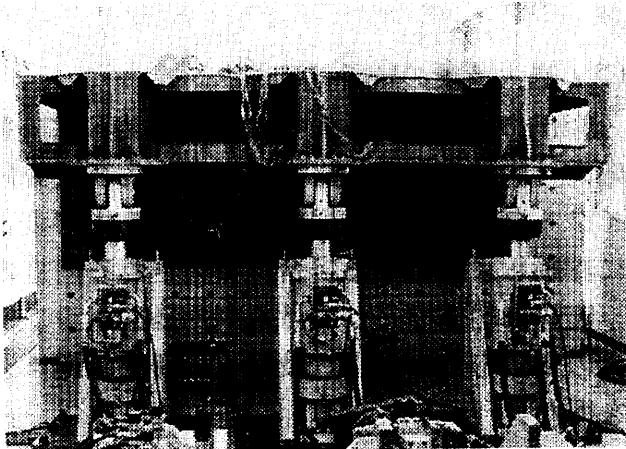
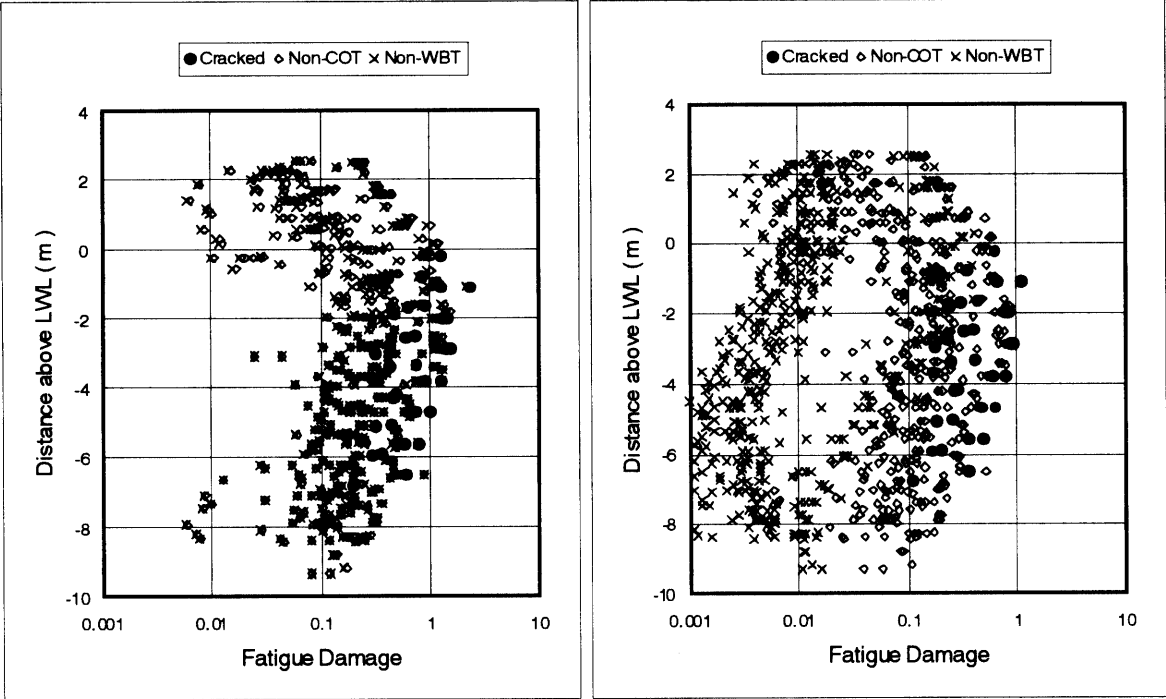


図 18 ビルジナックル模型疲労試験

(2) 損傷事例解析¹⁰⁾

SHVLCC のサイドロンジの損傷について、新しい寿命評価法を適用し、従来方法と比較した。結果を図 19 に示す。



(a) 従来法 (b) 新しい方法

図 19 損傷事例解析結果の比較

従来法では WBT と COT に差がなかったが、新しい方法では WBT より COT のサイドロンジの方が疲労損傷を被りやすいことが明白に説明できる。

5. さいごに—今後の研究

以上のような結果を残して、「船体の寿命評価技術に関する研究」は平成12年度で終了した。当初の予定より進んだ部分がある一方、積み残したものもある。この分野の研究として、平成13年度から4カ年計画で「ダブルハルタンカーの構造の経年劣化に関する研究」が開始されている。この研究は5ないし10年後には老朽化するDHTの検査方法を今から検討しておこうとするものであり、「船体の寿命評価技術に関する研究」の成果の上に構築されることを期待している。

参考文献

- 1) 前中、松岡：船体寿命評価法の研究、テクノオーシャン'98 船舶技術研究所講演会、(1998).
- 2) 小林 他：ばら積石炭船倉の腐食を模擬した希硫酸環境における造船用鋼の腐食および腐食疲労、日本造船学会論文集、第185号、(1999).
- 3) 松岡、藤井：溶接継手の疲労き裂発生寿命の一評価法、日本造船学会論文集、第178号、(1995).
- 4) Matsuoka, K. and Kobayashi, Y. : Influence of Maximum Stress on Fatigue Crack Initiation Life of Welded Steel Joints and Notched Steel Plates, Welding in the World, Vol. 42, No. 6, (1999).
- 5) 松岡、高橋、藤井：荷重非伝達すみ肉溶接継手の疲労強度に及ぼす降伏応力の影響、日本造船学会論文集、第171号、(1992).
- 6) 小林 他：造船用切欠き材の腐食疲労強度、日本造船学会論文集、第182号、(1997).
- 7) 田中 他：粒状貨物による艙内圧に関する実験的検討、日本造船学会論文集、第185号、(1999).
- 8) 河邊 他：各種荷重による疲労被害度の相関係数法による組み合わせ、日本造船学会論文集、第187号、(2000).
- 9) 河邊 他：波浪荷重の長期分布の簡易推定法、日本造船学会論文集、第188号、(2001).
- 10) 山本、松岡：平均応力影響を考慮した疲労強度評価法、日本造船学会論文集、第189号、(2001).
- 11) 松岡 他：溶接継手の疲労寿命に及ぼす荷重履歴の影響、日本造船学会論文集、第187号、(2000).
- 12) 第245研究部会平成12年度報告書、日本造船研究協会、(2001)