一任意海域における疲労強度線図一

学生員	寺	井	幸	司*	正員	冨	田	康	光*
正員	橋	本	聖	史*	正員	大	沢	直	樹*
学生員	Ŧ		業	宏*					

The Study of Fatigue Design Method based on Fatigue Crack Growth Analysis (3rd Report) —Fatigue Strength Diagram for an Ocean—

by Koji Terai^{*}, *Student Member* Yasumitsu Tomita^{*}, *Member* Kiyoshi Hashimoto^{*}, *Member* Naoki Osawa^{*}, *Member* Yehong Wang^{*}, *Student Member*

Summary

Surface cracks occur at weld joints of ship structures. The details of fatigue damage during ship service are largely different from each other. There are many factors that affect the variability of fatigue damage, main ones among which are, 1) occurrence sequence of stress, 2) occurrence conditions of initial surface cracks. In the previous reports, the authors proposed a new fatigue design method, which studied the effect of occurrence sequence of stress. The storm model and sailing model were proposed to generate stress occurrence model. Establishment procedures for these two models were shown when we couldn't obtain enough information of an ocean.

In this report, the authors investigate the validity of the proposed procedure for the North Pacific Ocean and the Indian Ocean, and obtain fatigue strength diagrams for these two areas. Also the authors make a study of the inspection of fatigue damage in ship structural members.

1. 緒 言

船舶などの溶接構造物においては、繰返し荷重下で溶 接余盛止端部に沿って複数の表面き裂が発生し、それら が成長・合体してき裂発生部材の鋼板を貫通、その後隣 接部材へ進展という形態をとる。本論文では、疲労損傷 とは構造部材における表面き裂発生から成長の過程を 表すものと定義し、表面き裂の発生状況は大きさ、形状、 発生個数、発生位置及び発生範囲で表される。疲労寿命

原稿受理 平成 15 年 1 月 10 日

とは、疲労損傷の任意の状態を改めて定義する。

稼働期間中における疲労損傷の状況は一意の値を示 すことはなく、ある範囲で変動する。疲労損傷の変動性 には様々な要因が影響を与えるが、主な要因として、

- 1) 応力の作用順序
- 2) 初期表面き裂の発生状況

が挙げられる。著者らは、1)の応力の作用順序に着目し、 研究を行ってきた。

現行の疲労設計法(各国船級協会規則)は、疲労損傷評価法として線形累積被害則を用いているため、実際の疲労損傷状況、すなわち、表面き裂の発生、進展状況と線形累積被害則から得られる疲労被害度を対応させることができなかった。また、応力の作用順序の違いが疲労寿命に与える影響も考慮し得なかった。そこで、著者ら

^{*}大阪大学大学院工学研究科

50

は疲労損傷評価法としてき裂伝播解析を用い、応力履歴 モデルと組み合わせて疲労損傷評価を行う新しい疲労 設計法を前々報¹⁾で提案した。新しい疲労設計法では、 き裂伝播解析を行い、得られたき裂進展状況を用いて疲 労損傷を評価するため、疲労損傷の状況(き裂進展の様 子)を再現、予測することが可能である。また、応力の作 用順序の違いが疲労寿命に与える影響も考慮できるが、 そのためには応力履歴モデルを構築する必要がある。船 体構造部材に作用する応力は、応力応答関数と波高、波 周期、出会い角(船舶の進路と波の進行方向がなす角度) によって決まる。そこで、波高の出現モデルとして嵐モ デル²⁾を、出会い角を決定するために航行モデル³⁾を それぞれ導入した。しかし、嵐モデル及び航行モデルを 構築するためには、海象状態の分類と持続時間、出会い 角の確率分布と変化の様子、の情報が必要であり、必ず しも世界中の任意の海域において、これらの情報が揃う とは限らない。そこで、これらの情報が不十分な場合に おける両モデル構築法を前報4)で提案した。

本論文では、海象状態の分類と持続時間の情報が揃っ ている北太平洋航路とインド洋航路(日本~マラッカ海 峡~インド洋)において、必要な情報が揃っている場合と 不十分な場合の構築法でそれぞれ嵐モデルを構築して き裂伝播解析を行ない、前報で提案した嵐モデル構築法 の有効性の確認を行った。次に、北太平洋航路、インド 洋航路における嵐モデルを用いたき裂伝播解析を基に、 疲労強度線図を作成した。最後に、船体構造部材の検査 (発見すべき表面き裂の大きさ)に関する考察を行なった。

2. 疲労設計法

2.1 トータルライフ疲労健全性評価

本論文では、疲労寿命は表面き裂が発生した構造部材 において表面き裂が鋼板を貫通したときと定義する。ま た、トータルライフとは船舶(構造物)の稼働開始から終 了までを表し、その間の疲労健全性を評価できるとは以 下のようである。

- 初期設計の段階において、稼働期間終了時点におけ る疲労損傷状況を明示できること。疲労損傷状況は 種々の要因によって変動し、ある時点での疲労損傷 状況は一意の値を示すことはない。通常、この現象 を疲労損傷(疲労寿命)の変動性(variability)と呼んで いる。この変動を含めて、稼働期間終了時の疲労損 傷状況を明示できる必要がある。
- 2) 稼働期間中の任意の時点での疲労損傷状況の把握、 もしくは近似をして、それ以降の健全性の予測がで きること。たとえ同じ設計の船舶でも、稼働状況(運 用状況)に応じて疲労損傷状況は異なる。したがって、

初期設計の段階において想定した稼働状況と実際で の稼働状況とは通常一致せず、疲労損傷状況も異な る。

以上より、トータルライフでの疲労健全性を評価でき るとは、稼働期間中において船体構造部材に負荷される 種々の荷重条件、環境条件のもとで、その時点の疲労損 傷状況を明らかにし、かつ、それ以降の運用に際し稼働 期間の状況に応じ疲労損傷の進行程度(一般的には余寿 命。但しこの余寿命も確定値ではなく、稼働期間中の状 況に依存する)を明示できることである。

2.2 トータルライフ疲労健全性評価の手順

前節で述べたようにトータルライフでの疲労健全性 評価を行うには、稼働期間中において船体構造部材に負 荷される種々の荷重条件、環境条件の下で、その時点の 疲労損傷状況及びそれ以降の疲労損傷の進行程度を明 示できる必要がある。解析対象部材、海域の設定からト ータルライフ疲労健全性評価に至る手順を以下に示す。

- 1) 解析対象部材、解析対象航路を設定する。
- 2) 作用応力を決定する。

作用応力の決定に必要な情報は、解析対象部材の 応力応答関数と解析対象航路の海象情報(波高、波周 期、出会い角)である。波高及び出会い角の出現順序 を決定するために、嵐モデル(Fig.1)及び航行モデル を構築する。波高と波周期の結合確率は、波浪発現 頻度分布表を用いて決定できる。これらの組み合わ せより応力の大きさと作用順序が決まる。



3) 初期き裂を設定する。

初期表面き裂の設定(大きさ、形状、発生個数、発 生位置、発生範囲)を行なう。

- 4) 疲労損傷解析
 - a) 応力拡大係数を決定する。(簡易法)
 解析対象構造部材に応じて、様々な修正(例えば、
 溶接余盛が存在する場合の修正など)を応力拡大
 係数に対して施し、解析対象部材に存在する表面
 き裂の応力拡大係数を求める。
 - b) き裂伝播解析を行なう
 き裂進展速度式、実験定数(*C*, *m*)、応力拡大係数
 の下限界 *K_{th}*、き裂開口応力拡大係数 *K_{op}*を決定し、き裂進展量を求める。
- 5) トータルライフ疲労健全性評価を行なう。 様々な要因によって、疲労損傷状況は変動する。 この疲労損傷状況の変動性を評価する(例えば、平均 寿命を用いる)ことにより、初期設計及び余寿命の予

測を行なう。

3. 嵐モデル及び航行モデルの構築法

3.1 嵐モデル構築法

嵐モデルの構築に必要な情報は以下の通りである。

- 1) 波高の長期分布
- 2) 海象状態の分類
- 3) 海象状態の持続時間

これらの情報が揃っている場合における嵐モデル構 築法は参考文献 2)に詳述されている。しかし、世界中の 任意の海域において、1)~3)の情報が全て揃っている とは限らない。1)~3)のうち、波高の長期分布は波浪 発現頻度分布表から求めることができ、波浪発現頻度分 布表は世界の主要な海域について整備されている⁵⁾。そ こで、任意の海域において海象状態に関する上記の情報 のうち、2)海象状態の分類及び 3)海象状態の持続時間、 に関する情報がない場合、すなわち波高の長期分布のみ が判明している場合における嵐モデル構築法について 考察する。本論文では、前報で提案した嵐モデル構築法 を基に、以下の手順で嵐モデルを構築した。

- (1) 解析対象海域、航路における波高の長期分布を求める。本論文では、解析対象航路として北太平洋航路とインド洋航路を選んだ。波高の長期分布は指数分布に従うとし、参考文献2)及び6)より、最大波高はそれぞれ15mと8m、最大波高の超過確率は10⁻⁸とした。
- (2) 海象状態を平穏状態と嵐状態に分けるため、参考文献2)と同様に、平均波高の2倍より大きい波高は嵐状態でのみ出現するものとする。すなわち、北太平洋航路では波高6m以上、インド洋航路では波高3m以上の波は嵐状態においてのみ発生する。
- (3) 海象状態の持続時間を決定する。前報で行ったき裂 伝播解析の結果より、海象状態の持続時間が2~5日 間であれば、その持続時間を任意に定めても疲労損 傷に大きな差異はないことが判明している。本論文 では、参考文献2)及び6)に従い、海象状態の持続 時間を北太平洋航路では3.5日間(48,000 cycle)、イ ンド洋航路では5日間(69,600 cycle)と定めた。
- (4)海象状態の分類(最大波高と出現確率)と、その波高の 分布形を定める。本論文では、以下の条件に従って 海象状態(嵐の階級)の分類とその波高の分布形を 定めた。
 - a) 20 年間で、その海域の最大波高が出現する嵐(最 大の嵐)は1個とする。
 - b) 各階級の嵐の出現確率は1つ上の階級よりも多い ものとする(例えば最大波高10mの嵐が20年間 に8個出現する場合、最大波高9mの嵐は9個以 上出現する)。これは、最大波高の大きい嵐の方が

出現確率は小さいと考えられるからである。

- c) 最大の嵐を除き、各階級の嵐における最大波高の 超過確率は一つ上の階級の嵐との最大波高の差 の 2×(15/その海域の最大波高)倍以下に収める。 例えば、北太平洋航路において、最大波高 10m の 嵐における最大波高の超過確率が Qのとき、最大 波高 9m の嵐の超過確率は 2Q以下に収める。こ のように定めたのは、同じ海域、航路に出現する 嵐であれば、最大波高の違いによって波高の分布 形が極端に変化するとは考えにくいためである。
- (5) 上記の条件に従い、まず最大の嵐を決定する。最初 に、波高の長期分布から 20 年間に出現する最大の波 高(m)とその出現数を求める(例えば波高 X_{max}、出現 数 Y個とする)。20 年間で最大の波高とその出現数 はそれぞれ X_{max}、Yであるので、最大波高 X_{max}の波 が Y個出現するように嵐の波高分布(Rayleigh 分布) を定める。このとき、最大の嵐における最大波高 X_{max} の超過確率は Q_xとなる
- (6) 波高の長期分布からその海域における最大の嵐中で 出現する波高を取り除き、残った波高の中で最大の 波高とその数を調べる。このとき、残った波高の中 で最大の波高が X、その数が Y個だとする。(4)の条 件 b)及び c)より、仮に最大波高 Xの嵐の出現個数を 2個、最大波高の超過確率を

$$Q_{x'} = 2 \times \frac{15}{X_{max}} \times (X - X') \times Q_x \tag{1}$$

と定める。ここで X は一つ上の階級の嵐における最 大波高である。そして、これまでに構築した全ての 嵐中に含まれる波高 X以上の波の数と波高の長期分 布に含まれる波高 X以上の波の数を比較する。もし 前者の方が多ければ、(4)の条件 b)より、嵐の出現個 数を減らすことはできないため最大波高の超過確率 を下げる。逆に、後者の方が多ければ、(4)の条件 c) より、嵐の最大波高の超過確率を上げることができ ないため、嵐中で出現する波高 X以上の波の数が波 高の長期分布に含まれる波高 X以上の波の数が波 高の長期分布に含まれる波高 X以上の波の数を上回 るまで嵐の出現個数を増やす。次に、両者の波高 X' 以上の波の数が等しくなるように嵐の最大波高の超 過確率を下げる。この操作により、最大波高 Xの嵐 の出現個数及び最大波高の超過確率(波高の分布形) が定まる。

(7)同様の手順で、嵐中で出現する波を全て使い切るまで嵐を構築する。最後に、残った波を平穏状態に均等に分割する。

この方法に従って求めた海象状態の分類と出現確率 をTable 1,2に示す。 52

Table 1 Classification of sea state (the North Pacific Ocean)

Maximum wave height	Relative probability			
Maximum wave neight	Original storm	Estimated storm		
5m (calm)	1991/2084	1986/2084		
6m	42/2084	45/2084		
7m	25/2084	16/2084		
8m	12/2084	15/2084		
9m	7/2084	14/2084		
10m	-	7/2084		
11m	6/2084	-		
15m	1/2084	1/2084		

Table 2 Classification of sea state (the Indian Ocean)

Maximum wave beight	Relative probability			
Maximum wave neight	Original storm	Estimated storm		
2m (calm)	1406/1437	1348/1437		
3m	7/1437	-		
4m	12/1437	78/1437		
5m	8/1437	10/1437		
6m	3/1437	-		
8m	1/1437	1/1437		

3.2 航行モデル構築法

出会い角の確率分布が入手できない場合は、前報⁴で 提案したように、一様分布とするか、波向きもしくは風 向きに従うものとする。本論文では、出会い角の確率分 布は参考文献 7)に示されている出会い角の頻度分布に 従うものとした。但し、北太平洋航路ではほぼ等確率で あるので、一様分布とした。また、出会い角は 30° 刻み で変化するとし、前報のき裂伝播解析の結果に基づき、 1 つの海象状態中においてその持続時間中では出会い角 を一定とした。

3.3 波高と波周期の結合確率

波高と波周期の結合確率は、前々報¹及び前報⁴で示 した手法を用いて、波浪発現頻度分布表^{5).8}から決定し た。すなわち、波高 1m ごとにその波高における各波周 期の発現頻度より発生確率を求め、これをその波高にお ける各波周期の発生確率とする。また波周期は波一波ご とに、その波高における発生確率に従うものとする。

4. き裂伝播解析

4.1 解析对象部材

疲労強度評価の対象部材は、前々報¹⁾及び前報⁴⁾と同様 210,000DWT の bulk carrier の cargo hold の下部ス ツールと二重底頂板の溶接部とした(Fig.2)。応力応答関 数は日本造船研究協会第 228 研究部会の研究結果⁹⁾を用 いている。

4.2 き裂伝播解析

船体構造部材、特に溶接継手部に発生する表面き裂は 通常複数表面き裂であるが、本章では嵐モデル構築法の 違いが疲労寿命に及ぼす影響を検討するため単一表面 き裂として解析を行った。

初期き裂は半円形とし、初期き裂長さを 0.4mm、初 期き裂深さを 0.2mm とした。また、2.1 節で述べたよう に、き裂が鋼板(12mm)を貫通した時点で疲労寿命とし た。

き裂伝播解析は前々報¹⁾及び前報⁴⁾同様に、修正 Paris-Elber 則を用いて行なった。き裂進展速度は式(2) で表される。

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

$$\Delta K_{eff} = K_{\max} - K_{op}$$
(2)

ここで△K_{eff}:有効応力拡大係数

△K_{effth}:有効応力拡大係数の下限界

 $\Delta K_{eff,tb}$ =2.45MPa \sqrt{m}

Kmax:荷重1サイクル中での最大応力拡大係数

Kop: き裂開口応力拡大係数

m=2.75 (SI 単位)



Fig.2 Ship structural member (inner bottom plate at lower stool in the bulk carrier)

応力拡大係数は溶接ビードや部材形状によって変化 するが、これらの影響を考慮に入れて応力拡大係数を求 めている^{11),12)}。き裂進展に伴い、き裂先端部の構造的 応力集中係数 K_sも変化するが、この影響も考慮して解 析した¹³⁾。式(2)におけるき裂開口応力拡大係数 K_{op}は 応力の負荷パターンや平均応力の大きさに依存する。こ こでは嵐モデル荷重下の実験結果¹⁴⁾から得られた K_{max} と K_{op}の関係を用いて式(3)を定め、K_{max}が同じであれば 荷重履歴によらず Kop は等しいとした。

$$K_{op} = \begin{cases} -30.6 & (K_{max} \le -31.5MPa\sqrt{m}) \\ 0.75 \times K_{max} - 7.0 & (-31.5MPa\sqrt{m} < K_{max} < 38.5MPa\sqrt{m}) \\ 21.9 & (K_{max} \ge 38.5MPa\sqrt{m}) \end{cases}$$
(3)

解析対象船舶は満載およびバラスト状態を繰り返す。 北太平洋航路において日本一北米間、インド洋航路にお いて日本一ペルシャ湾間は片道が約2週間の行程である。 そこで両状態が約2週間(北太平洋航路では海象状態4 個、インド洋航路では海象状態3個)ごとに交互に出現 する航行状況を対象とした。なお、各積付け状態での平 均応力を80MPa および-80MPa とした。応力発生パタ ーンの一例をFig.3に示す。



Fig.3 An example of the storm model loading pattern with mean stress

4.3 解析結果及び考察

まず、北太平洋航路に対して、海象状態に関する情報 (分類及び持続時間)が判明している場合の嵐モデル (original storm)と 3.1 節の方法で構築した嵐モデル (estimated storm)で、海象状態をTable 1 の確率分布に 従って復元抽出でランダムに決定し、き裂伝播解析を 36 ケース行なった。すなわち、36 通りの海象状態の生起順 序で解析を行なった。両嵐モデルにおいて最短の疲労寿 命を示したケースと最長の疲労寿命を示したケースを Fig.4 に、寿命の平均と分散をTable 3 に示した。Table3 より 36 ケースの寿命平均、分散共に両嵐モデルで大き な差異は無いことが明らかになった。但し、最長の疲労 寿命に差異が見られた(Fig.4)。

次に、インド洋航路に対してき裂伝播解析を行なった。 海象状態をTable 2 の確率分布に従って復元抽出でラン ダムに決定し、き裂伝播解析を 36 ケース行なった。但 し、今回のき裂伝播解析の解析条件ではき裂進展速度が 北太平洋航路に比べ、非常に遅かった(80 年までき裂伝 播解析を行なったが、き裂深さ 1~2mm 程度であった)。 その理由として、同じ応力応答関数を用いてき裂伝播解 析を行なっているため、波高の違い(北太平洋航路では最 大 15m、インド洋航路では最大 8m)の影響が非常に大き かったと考えられる。そこで、き裂進展速度を速めるた め、作用応力を 2.5 倍にして解析を行なった。最短の疲 労寿命を示したケースと最長の疲労寿命を示したケー スを Fig.5 に、寿命の平均と分散を Table 4 に示した。 Table4 より分散に関して若干の差が見られるものの寿 命平均、分散ともに両嵐モデルで大きな差異はないと考 えられる。また、Fig.5 より最短の疲労寿命並びに最長 の疲労寿命は両嵐モデルで大きな差異は見られなかっ た。



Fig.4 Crack growth curves (the North Pacific Ocean)

Table 3 Average life and variance (the North Pacific

Ocean)		
	Average life (year)	Variance
Original storm	9.28	2.21
Estimated storm	9.79	2.41



Fig.5 Crack growth curves (the Indian Ocean route)

Table 4 Average life and variance (the Indian Ocean)

	Average life (year)	Variance
Original storm	15.31	9.34
Estimated storm	15.39	7.08

54

以上の解析結果より、海象状態の持続時間や出会い角 の確率分布が等しければ、嵐モデルの構築法が異なって も疲労寿命の平均及び分散に大きな差異は無いことが 北太平洋航路及びインド洋航路で示された。今後、嵐モ デル構築に必要な情報(海象状態の分類や持続時間)の無 い海域においてこれらの情報を収集する必要はあるが、 前報及び本論文で示した嵐モデル構築法を適用し嵐モ デルを構築して、疲労損傷解析を行なうことが可能であ ると考えられる。

4.4 疲労強度線図の作成

前々報¹⁾で提案した初期設計及び余寿命評価に用いる ことのできる疲労強度線図を、北太平洋航路及びインド 洋航路で作成した(Fig.6)。疲労強度線図作成法は前々報 にて示している。疲労強度線図は、稼動期間中に船体構 造部材に作用する応力範囲、構造的応力集中係数 K_s、表 面き裂深さの3つのパラメータから成り立つ。Fig.6の 疲労強度線図は平均寿命を与えるように作成されてお り、実線がインド洋航路、破線が北太平洋航路を示して いる。





Fig.6 Fatigue strength chart

この疲労強度線図より、船舶の運用海域として北太平 洋航路を想定して疲労設計を行うと、インド洋航路に比 べ最大応力を低く設定する必要があることがわかる。例 えば、疲労寿命を5年と設定した場合、深さ2.6mmの 表面き裂が存在するなら、インド洋航路では最大応力範 囲を233MPa以下に収めればよいのに対し、北太平洋航 路では最大応力範囲を159MPa以内に収めなくてはな らない。

また、最大応力範囲を 140MPa として設計を行った場合、深さ 4.1mm の表面き裂が発見されたときその余寿 命は北太平洋航路においては 5 年であるが、インド洋航路においては 20 年以上である。

今後、3.1 節で示した嵐モデル構築法を用いて、任意 の海域における嵐モデルを構築することにより、任意の 海域における疲労強度線図を作成することができる。

5. 複数き裂における疲労損傷検査法

オイルタンクなどに表面き裂(通常複数き裂)が発生し た場合、その表面き裂が鋼板を貫通することにより、オ イル漏れ、水漏れが生じる。しかし、船体検査において 表面き裂の長さを計測することは可能であるが、深さを 計測することは非常に難しい。それゆえ、船体検査で発 見された表面き裂の長さから、そのき裂深さを推測する ことが重要となる。しかし現在、き裂伝播解析に際して 初期き裂の設定に明確な基準は存在しない。そこで、著 者らの提案する複数表面き裂伝播解析手法¹⁵⁾を用い、単 一表面き裂及び複数表面き裂により裂伝播解析を行な い、日本造船研究協会第245研究部会(SR245)の船体構 造模型疲労試験結果(Fig.7)¹⁶と比較を行なった。



Fig.7 Surface crack growth behavior at weld toe¹⁶⁾

き裂伝播解析は、単一表面き裂(き裂深さ 0.1mm、き 裂長さ 0.2mm)を設定した場合と複数表面き裂(き裂深 さ 0.1mm、き裂長さ 0.2mm のき裂を応力集中部、すな わち疲労試験で表面き裂が発生した位置を中心に 100mm の範囲にランダムに 35 個配置)を設定した場合 で行ない、疲労試験結果と比較した。疲労試験結果とき 裂伝播解析における表面き裂長さと深さの関係を Fig.8、 き裂伝播曲線を Fig.9、に示す。 疲労試験結果より、表面長さ 70mm(初期複数表面き 裂がほぼ全て合体し、単一表面き裂となった以降の長さ) の時のき裂深さは 3~8mm (Fig.7,8 参照)であり、一意 の値とならない。これは、複数個の表面き裂が疲労損傷 の初期段階で合体し、その後深さ方向へ進展していくた めであると考えられる。次に、複数表面き裂を設定した 場合と単一表面き裂を設定した場合のき裂伝播解析の 結果(疲労寿命)を疲労試験結果と比較すると、単一表面 き裂を設定した場合、1)表面き裂長さからき裂深さを推 測する場合実際よりも深くみなす、2)疲労試験結果や複 数表面き裂の解析結果より疲労寿命を長めに評価する、 ことが明らかになった。



Fig.8 Comparison of crack total length between experiment and simulation



Fig.9 Comparison of crack depth between experiment and simulation

前々報¹⁾、前報⁴⁾を含め、き裂伝播解析の多くは単一 表面き裂で行なわれているが、1)船体構造部材に発生す る疲労損傷は複数表面き裂である。2)単一表面き裂では き裂形状及び疲労寿命が疲労試験結果と大きく異なる。 これより複数表面き裂としてき裂伝播解析を行う必要 があることは明らかである。船体検査で表面き裂が発見 された場合、表面き裂長さからき裂深さを推測し、修理 の必要の有無を判断するために、Fig.8,9で示した表面 き裂の長さと深さの関係及びき裂伝播曲線を様々な複 数表面き裂の初期条件(大きさ、形状、発生個数、発生位 置、発生範囲)の下で作成する必要がある。そして、これ らの線図から修理すべき表面き裂長さを決定する。例え ば、複数表面き裂でのき裂伝播解析結果(Fig.8,9)より、 表面き裂長さが 60mm~100mm であれば、その時表面 き裂の深さは 3mm~10mm(鋼板貫通)である。表面き裂 が鋼板を貫通するまでの荷重負荷回数が 130×10⁴~ 170×10⁴回なのに対し、表面き裂深さが 3mm に達する までの荷重負荷回数は 80×10⁴~100×10⁴ 回と約半分で ある。

余寿命評価に対し、検査時に発見すべき表面き裂の寸 法、形状を知ることは極めて重要である。溶接余盛止端 部に沿う表面き裂長さは目視により観察できるが、き裂 深さは不明である。き裂伝播寿命にはき裂深さが重要な 役割を演じるため、今後は実損傷での表面き裂長さと深 さの関係の資料を収集すると共に、提案した初期表面き 裂の設定法を基に、実構造部材での表面き裂の状況を解 析し、余寿命評価に役立てることが望まれる。

6. 結 言

本論文では、前々報、前報で著者らが提案してきた疲 労設計法を任意の海域に対して適用するために、前報で 提案した波高の長期分布(波浪発現頻度分布表)のみから 嵐モデルを構築する方法の有効性の確認を北太平洋航 路及びインド洋航路において行った。次に、両航路にお いて疲労強度線図を作成した。最後に、船体検査におい て発見すべき表面き裂長さについての考察を行った。そ の結果、以下の結果が得られた。

- 前報で提案した、波高の長期分布(波浪発現頻度分 布表)のみから嵐モデルを構築する方法の有効性を、 北太平洋航路とインド洋航路で確認した。これによ り、世界中の任意の海域において嵐モデルを構築し、 有用な疲労強度線図を作成できる可能性が示された。
- 2) 表面き裂のき裂長さからき裂深さを推定する場合、 発見されたき裂長さが同じでも、初期き裂の発生状況によってき裂深さは異なる。それゆえ、発見された表面き裂長さからき裂深さを推測し、修理の必要の有無を判断するために、Fig.8,9で示した表面き裂の長さと深さの関係及びき裂伝播曲線を様々な複数表面き裂の初期条件(大きさ、形状、発生個数、発生位置、発生範囲)の下で作成する必要がある。

参考文献

1) 寺井幸司、冨田康光、橋本聖史、大沢直樹、王業

宏、"き裂伝播解析に基づく疲労設計法に関する 研究"、日本造船学会論文集、第190号、2001

- 2) 冨田康光、河辺寛、福岡哲二、田所誠次朗、"波 浪荷重の統計的性質と疲労強度評価のための波 浪荷重のシミュレーション法"、日本造船学会論 文集、第170号、1991.
- 3) Tomita Y., Hashimoto K., Osawa N. and Terai K., "Fatigue Strength Evaluation of Ship Structural Members based on Fatigue Crack growth Analysis", International Conference on Ship and Shipping Research, NAV, 2000.
- 4) 寺井幸司、冨田康光、橋本聖史、大沢直樹、王業 宏、"き裂伝播解析に基づく疲労設計法に関する 研究(その2)、一任意海域における嵐モデルの構 築法一"、日本造船学会論文集、第192号、2002
- 5) Hogben N., Dacunha N. M. C. and Oliver G. F., "Global Wave Statistics", British Maritime Technology, 1986.
- 6) "実働荷重をシミュレートするランダム疲労試験 システムの構築に関する研究(研究課題番号 02555091)"、平成4年度科学研究費補助金(試 験研究 B)研究成果報告書、1993.
- 7) 小川剛孝、渡辺巌、"航海実績を加味した波浪荷 重等の長期予測について"、関西造船協会誌、第 224 号、1995.
- 新開明二、万順涛、"北太平洋の波浪統計データ の利用と長期予測"、西部造船学会会報、第90 号、1995
- 9) 日本造船研究協会第 228 研究部会、"波浪中の 船体構造の安全評価の研究"平成9年度報告書、

社団法人日本造船研究協会、1998.

- 日本溶接協会規格委員会、"日本溶接協会規格、 溶接継手の脆性破壊発生及び疲労き裂進展に対 する欠陥の評価方法"、社団法人日本溶接協会、 1997.
- 11) Maddox S. J. and Andrews R. M., "Stress Intensity Factors for Welded Toe Cracks", presented at Localized Damage 90, 1990.
- Pang H. J., "A Review of Stress Intensity Factors for Semi-elliptical Surface Crack in a plate and Fillet Weld Joint", Weld. Inst. Rpt. 426, 1990.
- 13) 土橋宏嗣、"船体構造部材での疲労き裂伝播解析 に関する研究、ーダブルハルタンカービルジナッ クル部の疲労き裂伝播解析一"、大阪大学卒業論 文、2000.
- 14) Tomita Y., Hashimoto K., Osawa N., Terai K. and Wang Y., Experimental Study of Mean Stress Effect on Fatigue Crack Growth under Variable Amplitude Loading", Extended Abstracts, American Society for Testing and Materials, SF2M, 2002.
- 15) 王業宏、冨田康光、橋本聖史、大沢直樹、寺井幸 司、"溶接構造部材の疲労強度解析のための初期 き裂設定法に関する研究"、日本造船学会論文集、 第 192 号、2002.
- 16) 日本造船研究協会第 245 研究部会、"二重殻タ ンカーの船体構造寿命に関する研究"平成 12 年 度報告書、社団法人日本造船研究協会、2001.

⁵⁶