き裂伝播解析に基づく疲労設計法に関する研究 (その 2)

—任意海域における嵐モデルの構築法—

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

The Study of Fatigue Design Method based on Fatigue Crack Growth Analysis (2nd Report)
 —Development of Storm Model for an Ocean—

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

Summary

In the previous paper, authors have proposed a new fatigue design method based on storm model in the North Pacific using crack growth analysis. Following results were obtained: fatigue strength of ship structural members is strongly influenced by the number, the order, and the size of sea state. In order to develop the storm model for ocean route, many data are needed such as wave scatter diagram, a number of storm, a duration of storm and relative angle in storms. When we can obtain these data, we can make storm model according to our proposed procedure. However, in general, there are few data in ocean route.

In this paper, authors propose a procedure to develop storm model in any ocean route where there is only wave scatter diagram. Fatigue crack growth life is analyzed under following three different cases of relative angle and duration of storm: 1) relative angle is kept constant during a sea state, 2) relative angle is kept constant until reaching maximum wave height and then is reversed by 180 degree, 3) relative angle is changed every wave, and for duration of storms, 2 days, 3.5 days, and 4.7 days. Referring to the results of crack growth simulation, authors propose a procedure to develop storm model in any ocean route.

1. 結 言

前報¹⁾において、著者らは Paris 則に代表されるき裂伝播則と波高の発生モデルである嵐モデル（船舶が遭遇する海象を平穏状態と嵐状態とに分類するモデル、今後

平穏状態と嵐状態をまとめて海象状態と呼ぶことにする）²⁾を組み合わせる疲労強度を評価する方法を提案した。そしてその提案法に基づきき裂伝播解析を行なった結果、船体構造部材の疲労強度は海象状態の生起順序に大きく影響されることがわかった。現在著者らが提案している疲労設計法ではいずれの海象状態にも、また嵐の大小にもよらず、その持続時間を全て 3.5 日とし²⁾、また船舶と波との出会い角も各海象状態で一定としている。しかし実際には嵐中での出会い角は一定ではなく、嵐の持続時間も大きくばらついている²⁾。疲労強度は海象状態の生起順序に大きく支配されることから、信頼性

* 大阪大学大学院工学研究科

原稿受理 平成 14 年 7 月 10 日
 秋季講演会において講演 平成 14 年 11 月 14, 15 日

の高い疲労設計を行なうには、将来世界主要航路における海象状態の生起モデル（嵐モデル）を構築する必要がある。この場合、嵐の大きさとその持続時間並びに各海象状態中での出会い角を設定する必要がある。各主要航路に関して上記のデータが十分にあれば、それに従って嵐モデルを構築すればよい。しかしそのようなデータを十分に揃えることは容易ではない。そこで本論文では、嵐モデル構築のための基礎資料を得る目的で北太平洋のデータをもとに嵐中の出会い角並びに持続時間の変化による疲労強度の差異を検討した。

まず嵐中における出会い角として次の3つのモデルを用いた。すなわち、1) 嵐中出会い角一定、2) 最大波高に到達するまで出会い角一定とし最大波高を迎えた後出会い角は 180° 反転する、3) 出会い角は波一波ごとにランダムに変化する、の3パターンである。現実における嵐中での出会い角の変化をモデル化することは難しいが、1) と 3) のパターンの間に存在すると考えられる。次に嵐の持続時間について、北太平洋海域での観測結果²⁾より嵐の持続時間が2～5日間の場合が約6割を占め、2日間以下と5日間以上がそれぞれ約2割であることが分かっている。そこで海象状態の持続時間を2日間、3.5日間、4.7日間の3通りとしてき裂伝播解析を行なった。本論文ではこれらのモデルを用いてき裂伝播解析を行い、嵐モデル構築の違いによる疲労強度の差異を明らかにした。そしてこれらの解析結果を基に、嵐モデルを構築するために必要な上記のデータが十分そろっていない場合における嵐モデル構築の方法を提案した。

2. 疲労設計法

一般に船舶の疲労設計法は次の二点から成り立つ。

- (1) 疲労強度の評価法
- (2) 船体構造部材に生じる応力の評価法

本論文では、前報で提案した疲労設計法を用いて疲労強度解析を行なった。

2.1 疲労強度評価法

前報で著者は、現在用いられている Miner 則に代表される線形累積被害則に変え、Paris 則に代表されるき裂伝播則を用いて疲労強度を評価する方法を提案した。き裂伝播則はき裂長さとし、応力の大きさから、き裂進展量を求めている。よって同じ大きさの応力が発生しても、そのときのき裂長さによってき裂進展量は異なり応力の発生順序による疲労強度の差異を評価することができる。但し、応力の発生順序が time independent random process では発生順序による疲労強度の差異はほとんどない¹⁾。従って解析対象航路における応力発生

モデルとして、実航行状態をシミュレートできる嵐モデルの構築が不可欠である。

2.2 応力の評価法

き裂伝播則を用いて疲労強度を評価するには応力の長期分布のみならず、応力の発生順序を決定しなくてはならない。船体構造部材に発生する応力の大きさは波高、波周期、出会い角の三者の組み合わせによって決まる。そのため応力の発生順序を決定するには波高、波周期、波向きの発生順序をそれぞれ決定する必要がある。そこで著者らが提案した疲労設計法では波高、波周期は航路に応じた確率分布に従って発生するとしている。また波高の発生モデルとして嵐モデルを採用し、波高と波周期の結合確率を波浪発現頻度分布表から定め、出会い角を決定するために航行モデル¹⁾を導入した。

嵐モデルとは Fig.1 に示すように、船舶が遭遇する海象を比較的穏やかな平穏状態と、嵐に遭遇している嵐状態とに分離して考えるモデルである。平穏状態では波高は確率分布に従ってランダムに発生し、嵐状態では波高は最小値から徐々に大きくなり最大値を迎えた後徐々に小さくなるようにモデル化している。航行モデルとは出会い角を決定するためのモデルである。前報では海象状態において、その持続時間中出会い角は一定であるとし、また出会い角は 30° 刻みで考えた。よって航行モデルの一例を挙げれば、平穏状態（出会い角 60° ）—平穏状態（出会い角 150° ）—嵐状態（出会い角 0° ）—平穏状態（出会い角 90° ）・・・、という具合である。

Fig.1 Storm model

3. 海象並びに航行モデルの決定法

著者らが提案する疲労設計法は疲労強度評価法とし、き裂伝播則を用いる。また応力評価の際重要となる海象並びに船舶の航行モデルを、北太平洋航路を対象として前報で次のように定めた。

- (1) 20 年間に発生する波の数は 10^8 個で指数分布に従うとし、最大波高(15m)の超過確率を 10^{-8} とした。
- (2) 20 年間に発生する海象状態を最大波高に応じて Table1 のように分類した。波高は 0m から 15m まで 1m 刻みで変化するとしている。また各海象状態の持続時間は、嵐の大小によらず一定とした。なお、各嵐状態は 5m 以下の波高も含んでいる。

各嵐状態は5m以下の波高も含んでいる。

- (3) 嵐状態における波高の頻度分布はレーリー分布とした。また平穏状態における波高の頻度分布は次のように決定する。まず波高の長期分布(指数分布)から嵐状態で発生する全ての波高を取り除く。そして残った波高を均等に分割する。これを平穏状態における波高の頻度分布とする。
- (4) 波周期の発生確率を北太平洋の波浪発現頻度分布表³⁾を用いて次のように定めた。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、その発生確率を求め、これをその波高における各波周期の発生確率とした。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した。
- (5) 船舶と波との出会い角の確率分布は一様ランダムとし、航行中出会い角は 30° 刻みで変化するとした。これは北太平洋では波向きに極端な偏りはなく、ほぼ等確率と見なして差し支えないからである。但し、インド洋のように季節風などの影響によって波向きに極端な偏りがある場合は、その影響を考慮する必要がある。また海象状態において、その持続時間中は出会い角を一定とした。

以上が前報にて提案した疲労設計法における海象並びに航行モデルである。嵐モデルを構築するための基礎資料として航路上の波浪発現頻度分布表は必要不可欠である。その他に、航路上にて稼働中の船舶が遭遇する1) 嵐の数、2) 嵐の持続時間、3) 船舶と波との出会い角、の情報が望まれる。北太平洋航路では嵐の数並びに嵐の持続時間に関する情報はある。一方船舶と波の出会い角に関しては情報が不足しているため各海象状態中は出会い角を一定とし、海象状態ごとの出会い角はランダムに決めた。

Table1 Classification of sea state

Sea state	Maximum wave height	Relative probability
calm	5m	1991/2084
A-storm	6m	42/2084
B-storm	7m	25/2084
C-storm	8m	12/2084
D-storm	9m	7/2084
E-storm	11m	6/2084
F-storm	15m	1/2084

Table 2 Relative angle and duration of storm

	Current model	Newly proposed model
Relative angle	constant	180° reverse changed in every wave
Duration of storm	3.5 days	2 days 4.7 days

著者らが提案する疲労設計法を他の主要航路にも適用するためには、たとえ上記1)、2)、3)に関する情報が不足している場合でも嵐モデルを構築する必要がある。そこで本研究では嵐の数の算出法と共に、嵐の持続時間並びに出会い角が変化した場合 (Table 2) の疲労強度の差異を検討する。各モデルの詳細は後述する。そしてその解析結果を用いて、嵐モデル構築法の提案を行なう。

4. き裂伝播解析

4.1 解析対象部材

疲労強度評価の対象部材は前報と同様 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である (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⁴⁾を用いている。

4.2 き裂伝播解析

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

$$da/dN = C \{ (\Delta K_{eff})^m - (\Delta K_{eff,th})^m \} \quad (1)$$

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op}$$

ここで ΔK_{eff} : 有効応力拡大係数

$\Delta K_{eff,th}$: 有効応力拡大係数の下限界

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

K_{max} : 荷重1サイクル中での最大応力拡大係数

K_{op} : き裂開口応力拡大係数

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

C、mは材料定数： $C=1.45 \times 10^{-11}$ 、 $m=2.75$ (SI単位)

C、m、および $\Delta K_{eff,th}$ の値は日本造船研究協会第219研究部報告書⁵⁾を参照した。船体構造部材に発生するき裂の多くは表面き裂であり、本論文では単一表面き裂を扱っている。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としている。またき裂が鋼板(12mm)を貫通した時点で疲労損傷が発生したと見なしている。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⁵⁾。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⁶⁾。式(1)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。そこで嵐モデル荷重下の実験結果⁷⁾を用いて K_{op} を式(2)のように定めた。

$$K_{op} = \begin{cases} -30.6 & (K_{max} \leq -31.5 \text{MPa}\sqrt{m}) \\ 0.75 \times K_{max} - 7.0 & (-31.5 \text{MPa}\sqrt{m} < K_{max} < 38.5 \text{MPa}\sqrt{m}) \\ 21.9 & (K_{max} \geq 38.5 \text{MPa}\sqrt{m}) \end{cases} \quad (2)$$

また、解析対象船舶は満載およびバラスト状態を繰り返す。また北太平洋航路においては片道が約2週間の行程である。そこで両状態が2週間ごと交互に出現する航行状況を対象とした。なお、各種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。

4.3 解析結果および考察

4.3.1 嵐中における出会い角が疲労強度に与える影響

前報においては一つの高気象状態中出会い角を一定としていた。平穏状態においては波の進行方向はほぼ一定であり、船舶も進路を頻繁に変更することがないので、出会い角を一定としても問題は無いと考えられる。しかし、嵐状態では波の進行方向は複雑に変化する。また船舶の進路も船長の判断によって、例えば出会い角を一定に保つ(斜め前方から波を受ける様にする)、または嵐から逃れるため大きく変針する、など状況に応じた変化が考えられる。しかもこれらの判断に明確な基準はなく、船長の経験や勘、そして経済的要因(入港期日を守る、等)にも左右される。そのため、これらを考慮に入れたモデルを作ることは難しい。そこで出会い角の変化をFig.4に示すように、1) 嵐中出会い角一定(pattern 1、前報で採用したモデル)、2) 最大波高に到達するまで出会い角一定とし最大波高を迎えた後出会い角は180°反転する(pattern 2)、3) 出会い角は波一波ごとに

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

Fig.4 Patterns of relative angles in the storm

ランダムに変化する(pattern 3)、の3パターンとし、き裂伝播解析を行なった。実際に船舶が嵐に出会った場合の出会い角の変化は、pattern 1とpattern 3の間に収まる。またpattern 2は嵐に遭遇した場合、嵐の中心を過ぎた後、風向きおよび波向きが変わる現象をモデル化している。

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、き裂伝播解析をそれぞれのパターンで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。各パターンにおけるき裂進展速度の最も早いケースと最も遅いケースをFig.5に、平均寿命と分散をTable 3に示した。Fig.5およびTable 3から、嵐中においてどのパターンを用いて出会い角を決定しても、平均寿命はほぼ等しいことが分かった。一方分散値に関しては、pattern 3の値が他の2つのパターンの値に比べ小さい。そこで海象状態の生起順序を固定し、き裂伝播解析を行なった。出会い角の変化は前述した3つのパターンを用い、解析ケース数はそれぞれ12ケースである。解析ケースごとに出会い角の出現順序は異なる。Fig.6より海象状態の発生順序が固定されている場合、pattern 1と2では疲労強度のばらつきはほぼ

Fig.5 Crack growth curves under different relative angle patterns

Table 3 Average life and variance

Relative angle	Average life (year)	Variance
Pattern 1 (current model)	9.28	2.21
Pattern 2 (newly proposed model)	9.75	2.26
Pattern 3 (newly proposed model)	9.96	1.36

同じであることがわかる。一方 pattern 1 や 2 に比べ、pattern 3 の疲労強度のばらつき幅が小さいことが Fig.6 よりわかる。実際には同じ大きさの嵐に遭遇しても、出会い角によって船体構造部材が受けるダメージは異なる。しかし pattern 3 では、出会い角が変化しているにも係らず疲労強度に違いがほとんど見られない。これが Fig.5、および Table 3 における疲労強度の分散値の差として現れていると考えられる。よって各海象状態における出会い角の変化の様子が不明な時には、安全のためにも分散値の大きい pattern 1 もしくは pattern 2 を用いて疲労設計を行なうことが望ましい。

4. 3. 2 海象状態の持続時間が疲労強度に与える影響

嵐の持続時間は数時間から時には 10 日間以上にも及ぶ。Fig.7 は北太平洋航路において 38 隻の船舶が 14 年間に遭遇した嵐の個数とその持続時間を示している。嵐の大きさとその持続時間の相関に関する資料はないため、前報で提案した疲労設計法では一つの海象状態の持続時間を 3.5 日間としていた。これは北太平洋における嵐（ここでは波高 6m 以上の波が発生する海象を嵐と定義している）の平均持続時間に相当する²⁾。しかし実際には、Fig.7 からわかるように、嵐の持続時間は大きくばらついている。また航路によっては嵐の持続時間のデータがない場合もある。それゆえ海象状態の持続時間が疲労強度に与える影響を検討するために、北太平洋航路における平穏状態および嵐状態の持続時間を 2 日間（波の数 27,400 個）、3.5 日間（波の数 48,000 個、前報で採用した持続時間）、4.7 日間（波の数 64,460 個）の 3

Fig.6-1 Crack growth curves for pattern 1 (the order of sea state is only one pattern)

Fig.6-2 Crack growth curves for pattern 2 (the order of sea state is only one pattern)

Fig.6-3 Crack growth curves for pattern 3 (the order of sea state is only one pattern)

Fig.7 Duration of storms in the North Pacific

種類とし、き裂伝播解析を行なった。持続時間は Fig.7 より、嵐の持続時間が 2 日間以下は約 2 割、5 日間以上も約 2 割、2 日間から 5 日間の間が約 6 割を占めていることから決定した。そしてその解析結果から、嵐の持続時間のデータが存在しない航路、海域でどの様に海象状態の持続時間を決めればよいかについて検討した。

Table 4 Classification of sea state for each duration

Sea state	Relative probability		
	2 days	3.5 days	4.7 days
calm	3557/3650	1991/2084	1458/1551
A-storm	42/3650	42/2084	42/1551
B-storm	25/3650	25/2084	25/1551
C-storm	12/3650	12/2084	12/1551
D-storm	7/3650	7/2084	7/1551
E-storm	6/3650	6/2084	6/1551
F-storm	1/3650	1/2084	1/1551

Fig.8 Distribution of waves in the E-storm

但し海象状態の持続時間の変化に伴い、20年間に発生する平穏状態の数は変化する。北太平洋航路における嵐の大きさとその発生回数は実船観測データ²⁾から決定しているので、嵐の持続時間に依存しない。それゆえ海象状態の持続時間が変わっても嵐状態の大きさとその個数に変化はないが、平穏状態の個数は持続時間に応じて変化する。よって各海象状態の出現確率はTable 4で表される。また同じ大きさの嵐でも、嵐の持続時間により波高の分布形はそれぞれ異なる (Fig.8)。しかしながら海象状態の持続時間は異なっても同じ航路を解析対象としている以上、20年間に発生するの波高の大きさとその数は等しくなければならない。特に波高6m以上の波は嵐中においてのみ発生すると定義している²⁾ので、A嵐からF嵐に含まれる波高6m以上の波の総計が等しくなるよう (Fig.9) に嵐の波高分布 (レーリー分布) の分布形を定めた。また平穏状態における波高の頻度分布は、まず波高の長期分布 (指数分布) から嵐状態で発生する全ての波高を取り除く。そして残った波高を均等に分割、例えば持続時間が2日間の場合平穏状態は20年間で3557個としているので、3557分割する。

海象状態をTable 4の確率分布に従って復元抽出でランダムに決定し、き裂伝播解析をそれぞれ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。解析結果をFig.10およびTable 5に示す。出会い角の変化はpattern 1とし、最もき裂進展の早いケースと最も遅いケースをグラフに示した。これらの解析結果より、嵐の持続時間を2日間から4.7日間で変化させても、平均寿命はほぼ等しいことがわかった。しか

Fig.9 Total number of waves in the all storms

Fig.10 Crack growth curves under different duration of storm

Table 5 Average life and sample variance

duration time	Average life (year)	Variance
2 days	9.91	1.08
3.5 days	9.28	2.21
4.7 days	9.96	2.94

し分散値は、持続時間が大きくなればなるほど大きくなる傾向がある。もし嵐の持続時間を短くしていくと、最終的には海象状態に含まれる波の個数は1つになる。これは前報で行なったtime independent random modelそのものであり、このとき疲労強度のばらつきは少ない¹⁾。Fig.7からわかるように、嵐の持続時間は大きくばらつく。それゆえ嵐の大きさとその持続時間を関連づけるモデルが最も現実に近いが、そのモデルを構築するには情報が不足している。そのため、嵐の持続時間がランダムに変化するモデルを作りき裂伝播解析を実施し、嵐の持続時間を一定とした解析結果と比較する必要がある。そして持続時間と疲労強度の関連を更に詳細に検討することが望ましい。但し嵐の持続時間を一定とするモデルを用いて疲労設計を行なうのであれば、持続時間を長くして解析を行なうと疲労強度のばらつき幅が大きくなり、疲労設計を行なう上で安全であるといえる。また嵐の持続時間に関するデータがない海域、航路に関しては、その海域、航路で観測された最も大きな強風域を持つ嵐とその移動速度から、ある地点が強風域に入ってから抜け出すまでの時間を嵐の持続時間と定める方法

が考えられる。北太平洋のブイの定点観測によれば嵐の持続時間は平均で 2.5 日間²⁾である。例えば勢力の強い嵐で波高 4m 以上の領域は直径で約 1200km といわれているが、その進行速度を 20km とすると、ある定点における嵐の持続時間は 2.5 日間となり定点観測の結果と一致する。通常船舶は定点にとどまらず大洋を航行しているので、船速と嵐の移動速度の相対速度によって嵐に遭遇してから抜け出すまでの時間が決まる。それゆえ船舶からみた嵐の持続時間は 2 日間～4 日間程度であると考えられる。また冬の北太平洋、特にアリューシャン列島付近のように何日間も荒れた状況が続く海域での嵐の持続時間考えるのであれば、船舶がその海域を抜け出すのにかかった日数を嵐の持続時間とすればよい。従って嵐の持続時間の情報が不足している場合には、持続時間を変えた場合の疲労強度並びに上記の考察から、持続時間は 3 日間程度にすればよいと提案できる。しかし安全側の疲労設計を行なうのであれば、嵐中で船速が低下したものととして嵐の持続時間を長くして解析を行なえばよい。

5. 他の主要航路における嵐モデルの構築方法

緒言で述べたように嵐モデル構築に必要なデータがそろっているのであれば、前報や参考文献 2 に従って嵐モデルを構築することができる。しかし現状では、世界全全ての主要航路でそのようなデータは不足している。そこで本論文では、

- 1) 出合い角に関するデータがない場合
- 2) 嵐の持続時間、嵐の大きさおよびその発生回数に関するデータがない場合

についてそれぞれ嵐モデルの構築法を提案する。まず出合い角に関するデータがない場合、出合い角の確率分布は一樣ランダムとする。但しインド洋、すなわち日本—ペルシャ湾航路のように波の進行方向(風向き)に明確な偏りがある海域であれば、出合い角は風向きに従うと仮定してモデル化する方法も考えられる。また一つの海象状態における出合い角は、4.3.1 の解析結果より pattern 1 もしくは pattern 2 を用いれば安全側で疲労設計することができる。

次に嵐の持続時間、嵐の大きさおよびその発生回数に関するデータがない場合について検討する。嵐の持続時間に関するデータがない場合は、4.3.2 で述べたように 2 日間から 4 日間のあいだ、たとえば 3 日間とする。次に波浪発現頻度分布表などを用いて、波高の長期分布を決定する。波高の長期分布からその海域の平均波高を求め、平均波高の 2 倍より上の波高は嵐状態でのみ発生するも

のとする。また波高の長期分布から 20 年間で最大の波高とその超過確率を求める(例えば波高 15m、超過確率 10^{-8} とする)。そして最大波高が 15m で超過確率が 10^{-8} となるように嵐の頻度分布(レーリー分布に従う)を定める。このとき、嵐の持続時間によって頻度分布は異なる。これが北太平洋航路における F 嵐に相当するので仮に F' 嵐とする。次に波高の長期分布から F' 嵐中で発生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個数を調べる。最大の波高が 12m でその数が 4 個だったとすると、最大波高が 12m となるように嵐の頻度分布を定める。これが北太平洋航路における E 嵐に相当するので E' 嵐とする。但しその海域に発生する嵐の個数に応じて、E' 嵐における波高 12m の波の数を 1～4 個の間で調整する。すなわち E' 嵐を 2 個とするのなら、1 個の E' 嵐に含まれる波高 12m の波の数は 2 個となる。後は同様にして、嵐中で発生する波高を全て使い切るまで嵐を作成するという手順で、嵐の大きさと数が求められる。

6. 結 言

任意の航路上での嵐モデルの構築には、波浪発現頻度分布表の他に、嵐の数、持続時間、船舶と波の出合い角などの資料が必要である。本研究では、後者の資料が不足している際の嵐モデル構築のための基礎資料を得る目的で以下の解析を行なった。そしてその解析結果を基に嵐モデル構築法の提案を行なった。

- 1) 実際の嵐中での出合い角の変化のパターンは、嵐中出合い角を一定としたパターン (pattern 1) と、嵐中出合い角を波一つ毎に変化するパターン (pattern 3) の間に存在する。よって 3 つのパターンのうち、分散値の大きい pattern 1 もしくは pattern 2 を用いて出合い角を決定し、疲労設計を行なうのが安全である。
- 2) 北太平洋において嵐の持続時間は数時間から 10 日間以上と非常に大きくばらついている。嵐の持続時間を 2 日間、3.5 日間、4.7 日間と固定してき裂伝播解析を行なうと、平均寿命はほぼ等しいが分散値は持続時間が長くなるにつれ大きくなる。それゆえ、嵐の持続時間がランダムに変化するモデルを作りき裂伝播解析を実施し、嵐の持続時間を一定とした解析結果と比較する必要がある。その上で、各モデルの解析結果を実際の疲労損傷例と比較し、最も疲労設計に適切なモデルを選ぶ必要がある。
- 3) 上記の解析結果を踏まえ、嵐モデルを構築するためのデータが十分に存在しない場合における嵐モデルの構築方法を提案した。それは以下の通りである。

- (1) 出合い角の確率分布は一様ランダム、もしくは風向きに従うとする。出合い角の変化のモデルは pattern1 もしくは pattern 2 を用いる
- (2) 波浪発現頻度分布表などから波高の長期分布（例えば指数分布に従う）を作る。次に嵐の持続時間は2日間から4日間の間で決定する。また嵐における波高の頻度分布をレーリー分布とする。そして波高の長期分布から嵐中で発生する波高を順次取り除いく。残った波高を均等に分割し平穏状態での波高の頻度分布とする。
- 3) 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
- 4) 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、平成10年3月
- 5) 日本造船研究協会第219研究部会、“き裂伝播解析手法の実用化に関する研究”平成7年度報告書、社団法人日本造船研究協会、平成8年3月
- 6) 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、一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、平成12年3月

参考文献

- 1) 寺井幸司、富田康光、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) 富田康光、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
- 7) Yasumitsu Tomita, Kiyoshi Hashimoto, Naoki Osawa, Koji Terai, Yehong Wang 、 “Experimental Study of Mean Stress Effect on Fatigue Crack Growth under Variable Amplitude Loading ”、Extended Abstracts, American Society for Testing and Materials、SF2M、2002