

き裂伝播解析に基づく疲労設計法に関する研究

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

by Koji Terai*, *Student Member*
 Kiyoshi Hashimoto*, *Member*
 Yehong Wang*, *Student Member*

Yasumitsu Tomita*, *Member*
 Naoki Osawa*, *Member*

Summary

Nowadays, the fatigue design of ship structural members is performed based on each classification society rule. However, the considerable size of crack damage is reported sometimes soon after the service. And in the same type of ships, fatigue damage occurs in one and not occurs in the other. These facts cannot be analyzed and explained by the current fatigue design method.

Then, authors have proposed new fatigue design method. The differences from the current fatigue design method are the following three points.

- (1) Use of fatigue crack growth analysis as the basis for fatigue strength evaluation instead of the Miner rule.
- (2) Implementation of author's new storm model for the time history of stress.
- (3) Proposal of the new sailing model of the ship instead of the all headings model.

The developed method and proposed fatigue strength charts are applicable to the initial fatigue design instead of the current fatigue design method, and also the residual fatigue life prediction in cracked structural members when fatigue cracks are found after a certain service period.

1. 緒 言

現在、船体構造部材の疲労設計は各船級協会規則に基づいて行われている。現実には疲労き裂損傷は生じており、しかも就航後間もなく相当大きなき裂損傷例も報告されている。さらに同型船でありながら、ある船には損傷が起こり他の船には損傷が起きない事も日常経験している。これらの実情は現行の疲労設計法では解析並びに説明することができない。このことは現行の疲労設計法が必ずしも十分でないことを示唆している。

疲労設計法を構築するには次の2点、1)疲労強度評価法、2)航行中に船体構造部材に生じる応力評価法、を予め

定めなければならない。現行の疲労設計法は疲労強度評価法としてき裂発生寿命を評価基準とした線形累積被害則 (Miner 則) を、応力評価法としてはストリップ法を基にした all headings model による長期分布の計算法を各船級協会独自に与えている。なお疲労強度評価法に Miner 則を使用しているので、応力負荷順序に関しては何ら言及していない。

本論文では、疲労強度評価法として Miner 則に代り疲労き裂伝播寿命を基準とした Paris 則を用いた。き裂伝播を評価基準とすることで、ある波浪に出会ったとき船体に生じる応力の大きさだけでなく波浪に出会う順序すなわち応力の負荷順序が重要となる。そこで、応力の負荷順序に関しては著者らが提案した嵐モデル¹⁾を用い、作用応力は波高、波周期および船と波との出会い角で定まる応力を順次計算するため all headings model に代わる航行モデル²⁾を用いストリップ法に基づく応力応答関数から長期にわたる応力頻度を計算した。

* 大阪大学大学院工学研究科

本論文では bulk carrier の cargo hold の下部スツールと二重底頂板との溶接部を対象とし航路を北太平洋に選り、提案する疲労設計法で強度評価を行い疲労強度線図を求めた。

本論文で提案する疲労設計法或いは疲労強度線図は初期の疲労設計に適用できるだけでなく、重要な事であるが、ある航行期間後の船舶に生じているき裂損傷の解析並びにその後の残余寿命の推定にも適用できる。

2. 疲労設計法

船舶の疲労設計法は次の二点の評価法を定めることから始まる。

- (1) 疲労強度の評価法
 - (2) 航行中の船舶の船体構造部材に生じる応力の評価法
- この二点について、現行の疲労設計法および提案する疲労設計法を考察する。

2.1 疲労強度評価法

現行の疲労設計法では線形累積被害則 (Miner 則) を用いている。疲労き裂の発生およびその後の成長過程は応力の負荷順序によって左右される。しかし、周知のように Miner 則は応力の負荷順序に係わらず応力の大きさとその発生回数で被害度が一意に定まり応力の負荷順序による疲労寿命の差異を評価できない。

そこで著者らは Paris 則に代表されるき裂伝播解析によって疲労強度を評価する方法を提案する。き裂伝播解析ではき裂長さとおよびその後の成長過程は応力の負荷順序によってき裂進展量は異なる。すなわち、応力の負荷順序による寿命の差異を評価できる。

2.2 応力の評価法

応力の評価法においてはその頻度分布並びに応力の発生順序の2点が重要である。

2.2.1 応力の頻度分布

現行の疲労設計法では all headings model に基づいて応力の長期分布をワイブル分布 (もしくは指数分布) と仮定している。船体構造部材に生じる応力は波高、波周期、船舶と波との出会い角に依存する。ある波高、波周期の海象での船体構造部材に生じる応力はそのときの出会い角で唯一に定まり、この応力の集合が長期分布になる。応力評価に際し、現在用いられている all headings model による長期分布は次のようである。まず波向きを一定として長期の応力頻度分布を求め、この操作を各波向きで行う。次に各波向きでのある大きさの応力 σ_x の超過確率を Q_1 , $Q_2, \dots$ とする。そしてこれらの超過確率の単純平均値 Q_x を応力 σ_x の長期の超過確率とする。

航行中船舶は一つの波に対し、それぞれ一つの波高、波周期、波向きをとり、それらの組み合わせによって応力が決まる。それゆえ all headings model と実際に船舶に発

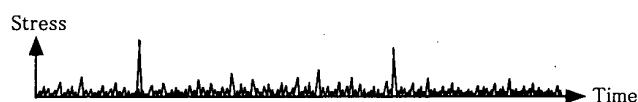


Fig. 1 Independent random loading model (Exponential distribution)

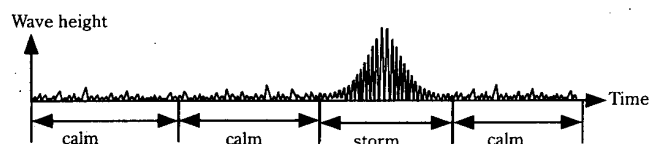


Fig. 2 Storm model

生する応力の長期分布とは必ずしも一致しない。著者らは船体構造部材に発生する応力をより現実近づけるため、波高、波周期を航路に応じた確率分布に従って生じるとし、これに船舶と波との出会い角を定める後述の航行モデルを組み合わせることにより応力を求めた。

2.2.2 応力の発生順序

Miner 則を基にした現行の疲労強度評価法では、応力の発生順序による疲労寿命の差異は評価できない。このため、現行の疲労強度評価法では、応力の発生順序は明確には考慮していないが、Fig. 1 に示すワイブル分布または指数分布の独立過程ランダムモデルを想定していると思われる。

提案する疲労設計法では海象状況のうち波高の発生モデル、すなわち応力の負荷順序として嵐モデル¹⁾ (Fig. 2) を導入する。

嵐モデルでは、海象状況を比較的穏やかな平穏状態と嵐状態に分類する。平穏状態では波高の出現は確率分布に従ってランダムに発生し、嵐状態における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。

3. 提案する疲労設計法

前述のように、提案する疲労設計法は応力強度評価法として、き裂伝播寿命を用いその解析に Paris 則を用いる。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次のように定めた。

- (1) 20 年間に発生する波の数を定める。—この論文では 10^8 個とした。次に波高の長期分布を指数分布とし、最大波高 (15 m) の超過確率は 10^{-8} である。なお波は規則波であると仮定している。
- (2) 平穏状態および嵐状態の持続時間を定める。—北太平洋における海象状態の観測の結果、嵐の平均持続時間は 3.5 日である¹⁾。そこで本論文では各海象の持続時間は全て 3.5 日であるとする。
- (3) 一つの海象に含まれる波の数を決定する。—北太平洋における平均波周期は観測結果より平均 6.3 秒で

ある¹⁾ので一つの海象(3.5日)に含まれる波の数は48000個とする。

- (4) 20年間に出現する海象の数を求める。一(1)および(3)より $10^8/48000=2084$ 。よって20年間に発生する海象の数は2084個となる。
- (5) 20年間に発生する海象を分類する。一最大波高に応じてTable 1のように分類される¹⁾。また波高は0mから15mまで1m刻みで変化するとしている。
- (6) 各海象における波高の分布形を求める。一嵐状態においては波高の頻度分布はレーリー分布である。また平穏状態における波高の分布形は、波高の長期分布(指数分布)から嵐状態で発生する波高を取り除いた残りの波高の分布を平穏状態で均一になるように定める¹⁾。
- (7) 波周期の発生確率を定める。一本論文では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。
- (8) 船舶と波との出会い角を定める。一本論文では出会い角の確率分布は一様ランダムとした。なお、航行中出会い角は30度毎に変化するとした。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。また出会い角は一つの海象状態(3.5日間)において常に一定であるとした。平穏状態中であれば波の進行方向も船舶の進路も頻繁に変化するとは考えられず出会い角を一定としても差し支えないと考える。一方、嵐状態においては波の進行方向は変化し、また船舶の進路も変化すると考えられる。しかしこの状態をモデル化する資料がないため本論文で

は嵐状態中においても波向きを一定とした。

以上が提案する疲労設計法における海象並びに航行モデルであるが、各航路における海象状況、操船状態が明らかになれば、それに応じてモデルは改良されるべきである。

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210,000 DWTのbulk carrierのカーゴホールドの下部スツールと二重底頂板の溶接部である(Fig. 3)。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

き裂伝播解析は以下のParis-Elber則を用いて行った。き裂進展速度は式(1)で表される。

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

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

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

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研究部会報告書⁵⁾を参照した。有効応力拡大係数 ΔK_{eff} は式(2)によって決定される。

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

ここで 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

このときき裂伝播寿命は式(3)で表される。

$$N_f = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{C(\Delta K_{eff})^m} \quad (3)$$

ここで a_0 : 初期き裂の大きさ

a_f : 最終的なき裂の大きさ

Table 1 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

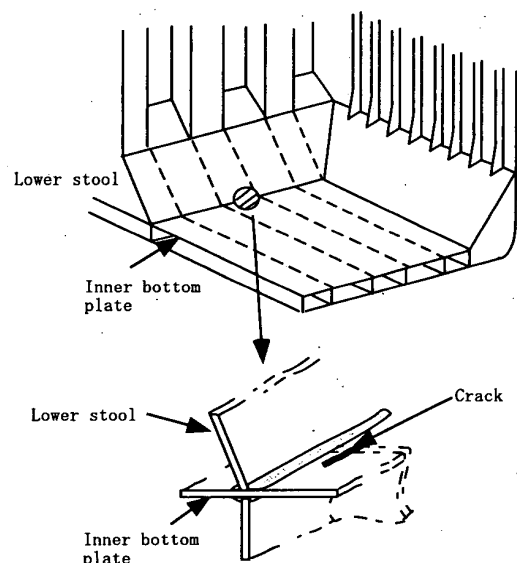


Fig. 3 Ship structural member (inner bottom plate at lower stool in the bulk carrier)

Nf: き裂が最終的な大きさになるまでの応力負荷回数

船体構造部材に発生するき裂の多くは表面き裂であり、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。これらの影響を考慮に入れた応力拡大係数を求める式は以下のように求められている⁵⁾。

$$Ka = Ks \times \sigma \sqrt{\pi b} \times Fa(a, b, t) \times MKa(a, b, L, t) \quad (4)$$

$$Kb = Ks \times \sigma \sqrt{\pi b} \times Fb(a, b, t) \times MKb(a, b, L, t) \quad (5)$$

ここで σ : 公称応力

a, b : 表面き裂の長さとし、

t : 板厚

L : 溶接ビードの脚長

Fa, Fb : 有限板表面き裂の修正係数

MKa, MKb : 溶接ビードによる修正係数

Ks : 構造的応力集中係数

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0.4 mm、初期き裂深さを0.2 mmとしている。またき裂が板厚(12 mm)を貫通した時点で疲労損傷が発生したと見なしている。なお溶接ビードの脚長は30 mmとした。き裂進展に伴い、き裂先端部の構造的応力集中係数 Ks は変化するが、この影響も考慮して解析した⁶⁾。

式(2)におけるき裂開口応力拡大係数 Kop 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 Kop を式(6)のように定めた。

$$Kop = \begin{cases} 0.333 \times K \max & (K \max \leq 50) \\ -0.75 \times K \max + 54.15 & (K \max > 50) \end{cases} \quad (6)$$

4.3 応力発生パターン

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、各積付け状態での平均応力を80 MPaおよび-80 MPaとした。現行法での応力の発生パターンの一例をFig. 4に、嵐モデルによる応力の発生パターンの一例をFig. 5に示す。

4.4 解析結果および考察

き裂伝播曲線をFig. 6に示す。き裂伝播曲線は荷重順序を嵐モデル(Fig. 5)としたときのall headings model(灰色の線)と提案する航行モデル(細い黒線)および荷重順序がFig. 4の独立過程ランダム(太い黒線)で、それぞれ12ケースの荷重順序に対して計算した。各海象の発生は復元抽出とした。なお、12ケースの荷重出現順序から求めた応力の長期分布の平均を用いて、船級協会規則⁸⁾を基に累積被害値を求めた結果、疲労寿命は20年以上である。変動応力下ではき裂伝播寿命は負荷順序に依存

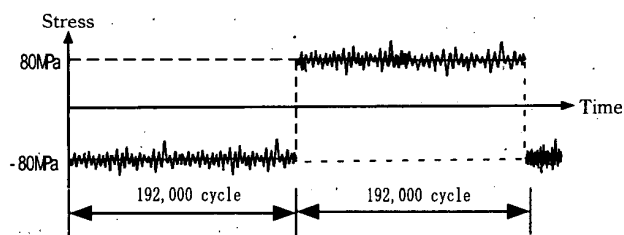


Fig. 4 An example of the independent random loading pattern with mean stress

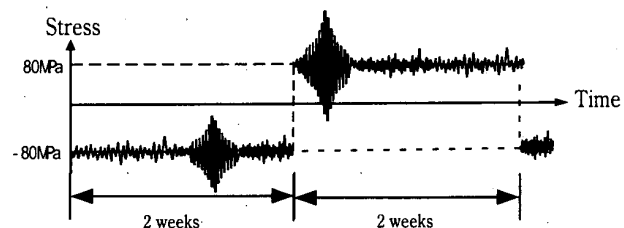


Fig. 5 An example of the storm model loading pattern with mean stress

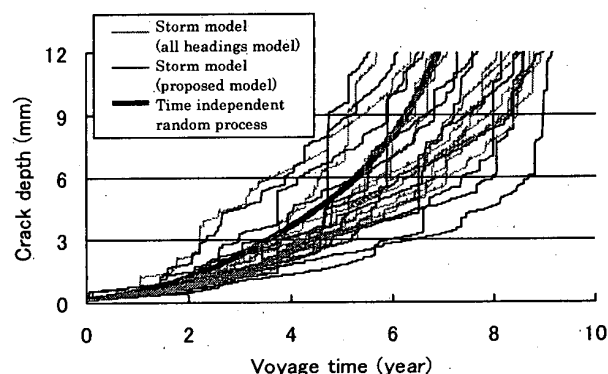


Fig. 6 Crack growth curves

すると考えられるが、独立過程ランダムではFig. 6の太い黒線(この線の範囲内に12の荷重ケースが含まれる)のように、負荷順序がき裂伝播寿命に与える影響はほとんど無いことが明らかである。

荷重順序が嵐モデルになると海象の出現順序が寿命に与える影響は大きく、寿命は広範囲に分布する。Fig. 6における計算結果ではall headings modelと提案する航行モデルではそれほどの差が見られない。しかしFig. 7に示すように海象の出現状況の一つに固定するとall headings modelはき裂伝播曲線も唯一になるが、提案する航行モデルではそのときの出会い角によりき裂伝播曲線は広範囲に分布する。

そこで海象の出現順序によるき裂進展量の違いについてさらに詳細に検討する。海象の発生パターンをFig. 8(a), (b), (c)に示した3通りとする。

Fig. 8(a)のgoing down patternは海象を最大波高の大きい順にF嵐を一個、E嵐を6個、…平穏状態を1991個と発生させたモデルである。逆に海象を最大波高の小さ

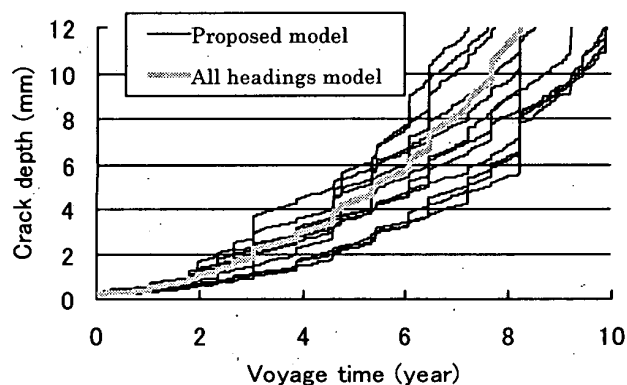


Fig. 7 Crack growth curves (the order of sea state is only one pattern)

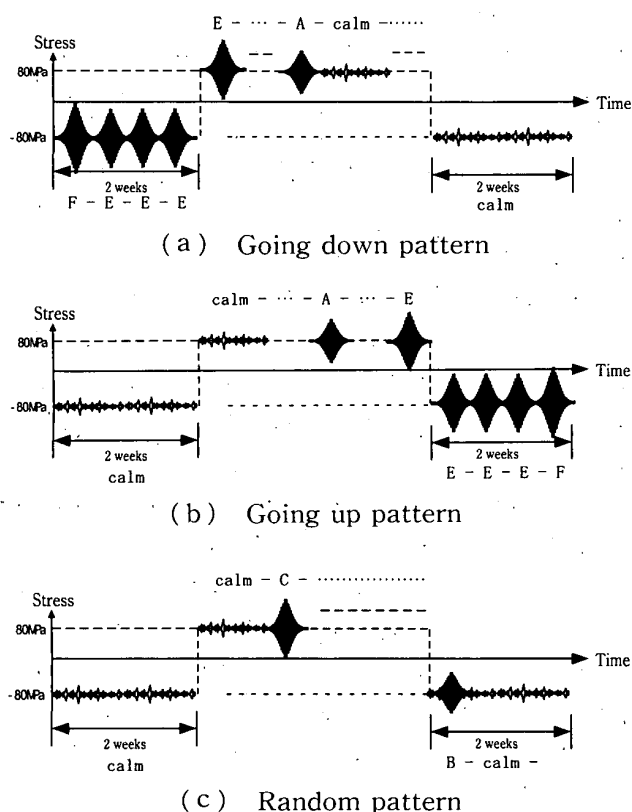


Fig. 8 Simulated loading patterns

い順に発生させたものが Fig. 8(b) の going up pattern である。そして海象を Table 1 の発現確率に従ってランダムに発生させたモデルが Fig. 8(c) の random pattern である。Going down pattern と going up pattern では波周期と波向きを、random pattern では海象の出現順序も変化させそれぞれ 12 ケースのき裂伝播解析を行った。解析結果を Fig. 9 に示す。

Fig. 9 から海象の出現順序によって疲労寿命が大きく異なることが判る。このような海象の出現順序による寿命の広範囲の分布が、船舶の寿命の初期にき裂損傷が発見されること、相当大きいき裂損傷であること、あるいは同型船などで、ある船にはき裂損傷があり、ある船にはき裂損傷がないことなどの理由の一つと考えられる。

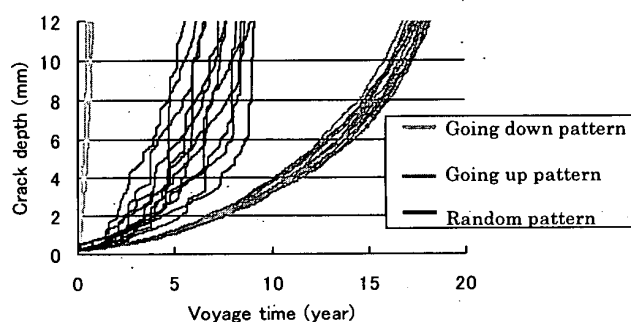


Fig. 9 Crack growth curves under three loading patterns

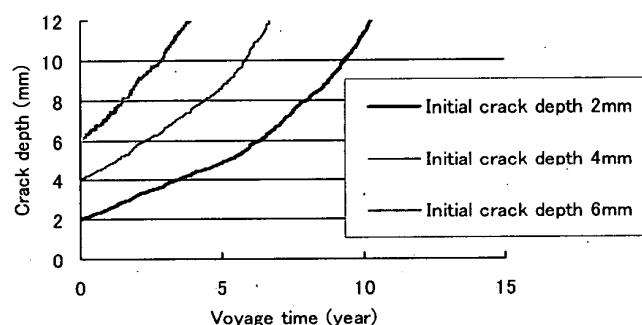


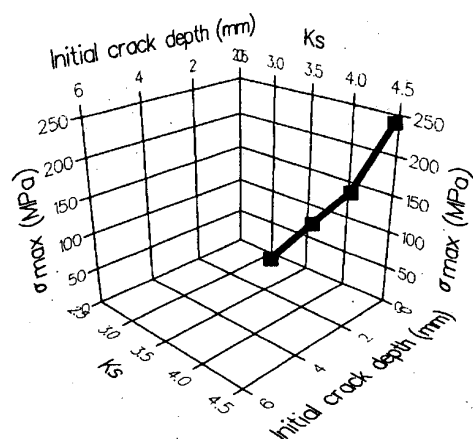
Fig. 10 Crack growth curves with different initial crack size under calm sea condition

大きな嵐に連続して遭遇し、ある程度き裂が成長するとその後平穏状態が続いてもき裂が進展し板厚貫通に至る。そこで初めに嵐に連続して遭遇し、き裂深さ(長さ)が 2 mm (6.4 mm), 4 mm (11.7 mm), 6 mm (17.8 mm) に進展した後、平穏状態が続いた場合のき裂進展の様子を Fig. 10 に示す。き裂深さがそれぞれの値に達するまでに出現した嵐の平均個数は 19.2 個, 35.5 個, 47.6 個である。Fig. 10 から、き裂深さが何らかの原因で 4~6 mm に達すると、その後は嵐状態に遭遇せず平穏状態の海象中でも十分にき裂は成長することが判る。以上から実際の船舶の設計に際し、いかなる海象状況を想定するかは今後の重要な課題といえる。

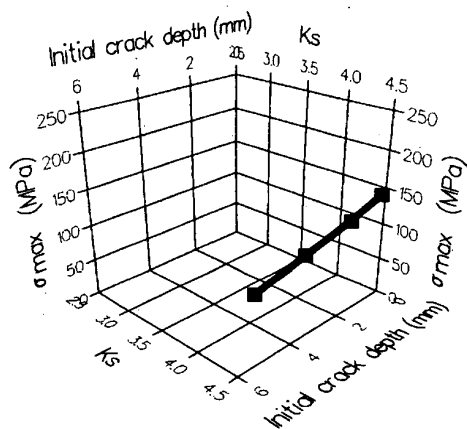
5. 疲労強度線図

提案する疲労強度線図を Fig. 11 に示す。提案する疲労強度線図は船体構造部材に発生する最大応力、構造的応力集中係数およびき裂深さの 3 つのパラメータから構成される。本論文では bulk carrier のカーゴホルドの下部スツールと二重底頂板の溶接部(構造的応力集中係数 4.5)について示した。疲労寿命は Fig 6 に示した 12 ケースの荷重パターンの平均寿命である。この疲労強度線図は以下の手順で作成することができる。

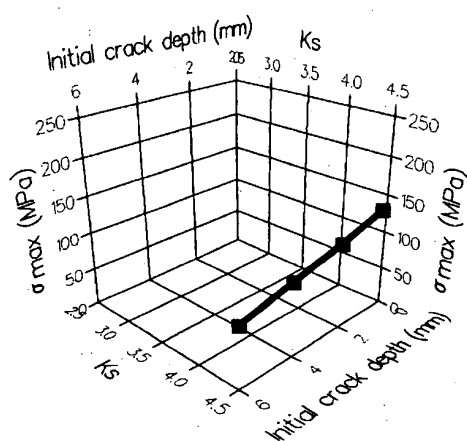
- (1) 船体構造部材を決める。本論文ではカーゴホルドの下部スツールと二重底頂板の溶接部。
- (2) 疲労寿命を選ぶ。(例えば 5 年, 10 年, 20 年。なお本例では板厚貫通時を寿命としている)



5 year life



10 year life



20 year life

Fig. 11 Fatigue strength chart

- (3) 表面き裂寸法を決める。
- (4) (3)で決めた表面き裂の伝播解析を種々の最大応力のもとで行い、(2)で選んだ疲労寿命に一致する最大応力を決定する。

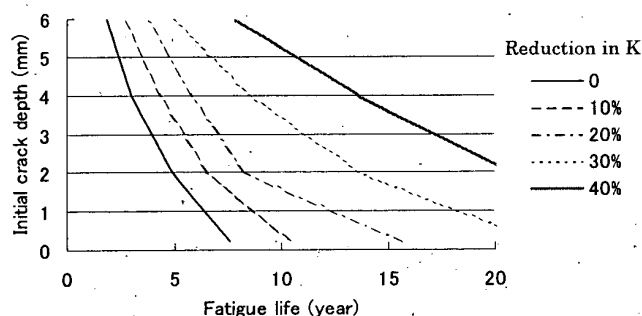


Fig. 12 Fatigue strength diagram

- (5) 任意の疲労寿命，表面き裂寸法に対し(2)～(4)を繰り返す。

仮に疲労寿命を20年とし，深さ(長さ)の表面き裂寸法を0.2 mm (0.4 mm) とすれば板厚貫通のき裂損傷が生じる最大応力範囲は133 MPa である。同様に5年または10年の疲労寿命なら最大応力範囲はそれぞれ243 MPa, 144 MPa となる。あるいは深さ(長さ)が3.5 mm (10 mm) の表面き裂がこの部材で発見されたとすると，次の5年間で板厚貫通する最大応力範囲は162 MPa で，10年とすれば112 MPa となる。船体構造部材に種々の寸法のき裂が発見されたときの残余寿命も同様の手順で疲労強度線図を作図し解析できる。他の船体構造部材あるいは他の航路に関しても応力応答関数および航路での嵐の発生回数，持続時間などの wave data, wave scatter diagram があれば疲労強度線図は作成できる。

船体構造部材の疲労寿命を向上させるには，もちろん部材寸法を増して式(4)，(5)中の公称応力 σ を減少させればよいが，応力拡大係数を減少させることでも可能である。Fig. 12 は対象とした船体構造部材に対し，応力拡大係数を減少させたとき，どれほどの疲労寿命の増加が得られるかを示した図である。

Fig. 12 から例えば，応力拡大係数を20%減少させると疲労寿命は2倍近く延び，大いに効果がある。応力拡大係数の減少は，単に部材寸法を増加して公称応力 σ を下げるだけでなく，構造的応力集中係数 K_s の減少あるいは溶接部応力集中係数の減少でも可能であるので，今後検討する価値は大きいと考えられる。

以上提案した疲労設計法および得られる疲労強度線図は初期設計に適用できるだけでなく，ある期間航海後き裂損傷が生じた部材の残余寿命の推定，あるいはそのき裂損傷の解析にも適用できる。

4.5 今後の課題

本論文では提案する疲労設計法と得られる疲労設計線図の導き方の手順を示した。疲労設計線図の信頼性を向上させるには，今後以下に示すいくつかの項目についての詳細な検討が必要となる。

- (1) 船体構造部材の表面き裂の応力拡大係数の計算式

- (2) 船体構造部材の応力応答関数
- (3) 航路の波浪発現頻度分布および海象状態に関する資料（例えば 20 年間の嵐の個数とその持続時間など）
- (4) 船舶と波との出会い角を定める航行モデル
- (5) 船体構造部材に発生する表面き裂の寸法、形状およびその数（複数き裂）
- (6) 表面き裂に関する変動荷重下（嵐モデル）での平均応力の評価式

など上記に関し更に考察を続けて、より信頼性の高い疲労強度線図を求めるつもりである。

5. 結 言

著者らは新たに疲労設計法を提案し、その疲労設計法を船体構造部材（bulk carrier のカーゴホールドの下部スツールと二重底頂板の溶接部）に対して適用し疲労寿命を考察した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 疲労寿命は海象（嵐状態と平穏状態）の出現する順序により極めて広範囲に分布する。従って今後疲労寿命評価にはいかなる海象の発生順序を対象とするかが重要である。なお、応力の負荷順序が独立過程ランダムである場合には、疲労寿命の分布範囲は極めて小さく負荷順序によらずほぼ同じ寿命となる。
- (2) 提案した疲労設計法を用いた疲労強度線図を示した。この疲労強度線図は初期設計に使えるのみならず、残余寿命の推定あるいはき裂損傷解析にも適用

できる。

参 考 文 献

- 1) 富田康光, 河辺寛, 福岡哲二, 田所誠次郎 “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
- 2) 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
- 3) 新開明二, 万順濤, “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
- 7) 河田典彦, “嵐モデル変動荷重下での疲労き裂伝播挙動に関する実験的研究”, 大阪大学卒業論文, 平成 8 年 3 月
- 8) Bureau Veritas, “Fatigue Strength of Welded Ship Structures”, NI 393 DSM R01 E, July, 1998