嵐モデルに基づいた 疲労センサによる船体構造の疲労寿命推定手法の高度化

—第2報：頻度データを活用した推定手法—

正会員 小林 朋 平^{*} 正会員 孝 岡 祐 吉^{*} 正会員 仁 瓶 寛 太^{**}
正会員 大 沢 直 樹^{***} 学生会員 Luis De Gracia^{***} 学生会員 市 橋 大 地^{***}

Improvement of Prediction Accuracy of Hull Fatigue Life by a Fatigue Damage Sensor under a Storm Model Loading
- Prediction method applying frequency distribution data related to ship sailing -

by Tomohei Kobayashi, *Member* Yukichi Takaoka, *Member* Kanta Nihei, *Member*
Naoki Osawa, *Member* Luis De Gracia, *Student Member* Daich Ichihashi, *Student Member*

Summary

The characteristics of Fatigue Damage Sensors (FDS) that are in use for fatigue life estimation of monitoring structural welding members in ship structures are discussed in order to improve prediction accuracy of estimated fatigue life exposed to random wave loads such as storms under various loading conditions peculiar to ship structures. In our past research, coefficients, which named load effect factors (LEFs) affected by loading histories against constant amplitude loading were introduced for the estimation procedure using FDSs and confirmed by numerical simulations and fatigue tests under simplified storm-type loading patterns or load histories based on a storm model in consideration of variable of sea areas and seasons. In this paper, we proposed the estimation method of the abovementioned LEFs using several frequency distribution data such as significant wave height and stress obtained from a storm model simulated actual sea condition.

1. 結 言

船体構造の疲労寿命を簡便にモニタリングする一手法として、疲労センサを用いる手法がある¹⁾。疲労センサは、モニタリング期間中に蓄積される疲労損傷度が疲労センサ上のき裂長さとして出力されるだけなので、取り扱いが単純で、施工上のコストも軽減できる。したがって疲労センサは、著者らが提案する船舶の就航中の予防保全(Proactive Management)の主要な構成要素である船体疲労管理システム(HFMS, Hull Fatigue Management System)の中核ツールとして有用と言える²⁾。

船舶は他の構造物や輸送機器^{3),4)}と異なり、波浪による変動応力範囲は平穏時と荒天時との差が大きく、その応力履歴

は嵐モデル⁵⁾で代表されるような特性を有している。それに加えてバラスト状態とカーゴ満載状態の繰り返しによる積み付け条件の変化により、ほぼ定期的に平均応力が大きく変化する⁶⁾。このような、船舶特有の複雑な荷重条件下での船体構造の疲労寿命を疲労センサで精度よく求めるためには、航行中の荷重負荷状態における疲労センサの出力特性と船体構造溶接部の疲労強度特性の相関を明らかにすることが必要である。

これまで著者らは船体構造溶接部に対して、疲労センサによる疲労寿命推定精度の向上を目的に次のような研究を行ってきた。船舶が実際の航路上で遭遇する波浪状態を模擬した嵐モデルによる応力履歴などを用いて、疲労センサの出力特性と船体構造溶接部の疲労強度特性の相関を明らかにすることを試みた^{7),8),9)}。そして、両者の相関を代表する係数(相関係数)は概ね、ある一定値で表現し得る見通しを得た^{8),9)}。したがってその係数を用いることで精度の高い寿命推定が可能であると考えられる。

一方で、実船での疲労センサ適用期間中においても、同時に応力波形を長期間に亘って計測し、そこから直接的に相関係数を評価することは可能である。しかしそれでは疲労セン

* 川崎重工業(株)

** 川重テクノロジー(株)

*** 大阪大学大学院工学研究科

サを使ったモニタリングにおいて、信号線、計測機器、データ集積装置等が不要といった、計測負荷が極めて小さいという利点が失われる。ただし計測負荷が比較的小さいデータを補完的に用いて、実海象荷重下のこれらの係数を評価・検証できるのであれば、疲労センサに基づく疲労寿命推定の信頼性向上にとって有意義である。例えば hind-cast data や航海記録等から入手可能なデータとして、(1)短期海象の有義波高 H_S の頻度データ、(2)一つの嵐中の最大有義波高 $H_{S,max}$ の頻度データ、が挙げられる。これらに加えてヒストグラムレコーダで比較的簡単に計測可能な、(3)応力範囲 $\Delta\sigma$ の頻度データ、が挙げられる。本報では上記3つのデータを活用して、後述する荷重履歴影響係数とその相関係数の推定手法について述べる。なお今回は、これら3つの頻度データには、実海象の実測データに代わり、実海象を模擬した嵐モデル^{9),10)}に基づくものを用いることとした。そして嵐モデルの応力履歴から直接的に評価した相関係数と、3つの頻度データから推定した相関係数の比較を行った。

2. 荷重履歴影響係数

疲労センサ (Fig.1) は、船体構造の部材に一定期間貼付し、その間に疲労センサに蓄積された疲労損傷度を読み取り、部材の疲労寿命を求めようとするものである。長期間の適用により、実機の運用状態の情報をより正確に把握することが可能である。

疲労センサによる溶接継手部の疲労ダメージ評価フローを Fig.2 に示す。疲労センサを溶接線近傍表面に、ある一定期間適用し、その間に疲労センサ上に生じるき裂長さの増分 Δa は疲労センサに蓄積される疲労ダメージ D_S を代表する。また、疲労センサと溶接継手の S-N 線図の傾きが両対数線図上で等しいという特性を利用すると、溶接継手部の疲労ダメージ D_W は(1)式で表されるように、 D_S と比例関係にある^{1),3),4)}。

$$D_W = \alpha_k \cdot D_S \quad (1)$$

ここで、 α_k は一定振幅荷重下での疲労センサ特性取得疲労試験により求められ、溶接継手形式毎に定まる、溶接継手部と疲労センサの疲労ダメージ相関係数である¹¹⁾。

しかし、船舶では遭遇する嵐による波浪変動荷重変化や、船体積み付け状態による平均荷重変化が生じる。このような変動振幅荷重履歴が、(1)式が成立する一定振幅荷重下に比べて、疲労センサのき裂進展寿命や溶接継手部の疲労寿命に影響を与える。そして多くの場合で寿命が延びる(遅延する)傾向にある²⁾。それに対して、著者らは疲労センサと溶

Fig.1 Fatigue Damage Sensor (FDS).

Fig.2 Flow of fatigue life evaluation using FDS.

接継手部が同じ負荷状態であれば、変動振幅荷重下と一定振幅荷重下の違いにより生じる、疲労センサや溶接継手部の疲労ダメージに及ぼす影響度合いには相関があると予想した。そして、それを荷重履歴影響係数(Load Effect Factor: LEF)と定義して(2)式で表すことを試みてきた^{7),8)}。

$$\beta_{st} = k_\beta \cdot \beta_{wt} \quad , \quad \gamma_{st} = k_\gamma \cdot \gamma_{wt} \quad (2)$$

ここで、 β は嵐による波浪変動荷重変化に対する荷重履歴影響係数を表す。そのうち β_{st} は平均応力が引張状態において、変動振幅荷重下とその等価一定振幅荷重下との負荷の違いにより疲労センサに生じる疲労ダメージ（き裂進展寿命）の比率を表す。また β_{wr} は溶接継手部に対して同様に定義される疲労ダメージ（疲労寿命）の比率を表す。また γ は船体積み付け状態による平均荷重変化に対する荷重履歴影響係数を表す。そのうち γ_{st} は平均応力が引張状態のみで波浪変動荷重変化を受ける場合と、平均応力が引張状態と圧縮状態が交互に繰り返される中で波浪変動荷重変化を受ける場合との違いにおける疲労センサのき裂進展寿命の比率を表す。また、 γ_{wr} は溶接継手部に対して同様に定義される疲労寿命の比率を表す。 k_p, k_γ は各々の荷重履歴影響係数の相関係数を表す。等価一定応力振幅の算出は線形累積損傷則に基づき、(3)式および(4)式で算出した。ここで、疲労センサが貼付された溶接継手に作用する公称応力を σ_n とし、嵐波形による変動公称応力範囲 $\Delta\sigma_{n,i}$ とその頻度 n_i に対して、等価公称応力範囲 $\Delta\sigma_{n,eq}$ とその等価繰返し数 n_{eq} と置く。また(3)式中の m はS-N線図の傾きをあらわす材料定数で、疲労センサおよび溶接継手は $m=3$ とおける^{1),3),4)}。

$$\Delta\sigma_{n,eq} = \left\{ \sum_i (\Delta\sigma_{n,i}^m \cdot n_i) / \sum_i n_i \right\}^{1/m} \quad (3)$$

$$n_{eq} = \sum_i n_i \quad (4)$$

(2)式の相関係数を用いることで、嵐荷重と平均応力変化が重畳する条件下での溶接継手部と疲労センサの疲労ダメージの相関は(5)式で表される。

$$D_W = k_p \cdot k_\gamma \cdot \alpha_k \cdot D_S \quad (5)$$

これにより船体構造溶接部に対して、嵐荷重と平均応力の変化が重畳する条件下での疲労寿命推定精度が向上できると考えられる。著者らの過去の検討では、 k_p は1.9~2.1、 k_γ は0.9~1.2と見積もられ、船体構造溶接部に対しては波浪変動荷重変化に起因する k_p が支配的と言える⁸⁾。そこで本報の以降の検討では波浪変動荷重変化に起因する荷重履歴影響係数 β とその相関係数 k_p に焦点を当てた。

3. 嵐モデル下での荷重履歴影響係数

頻度データを活用した荷重履歴影響係数とその相関係数の推定に先立ち、その元データとした嵐モデルの応力履歴から数値解析で求めた荷重履歴影響係数とその相関係数につ

いて述べる。ただし本章に関する詳細は過去に報告済み^{9),10)}なのでここでは概略を簡単に記す。

なお、疲労センサや溶接継手に対する荷重履歴影響係数の評価には、疲労き裂進展解析ソフトウェア FASTRAN II を利用している。FASTRAN II は荷重負荷によって生じるき裂先端の塑性域寸法から、き裂の開閉口挙動を考慮し、ランダム波形でのき裂進展寿命を評価できる機能を有している^{12),13)}。すなわちランダム波形に起因するき裂進展の遅延現象を評価できる。

3.1 嵐モデルと応力履歴

著者の一部が開発した嵐モデルは海域と季節により異なる波浪頻度と波向き出現率や、嵐の持続時間の変動を考慮した嵐プロファイルを設定できることを特長とするものである^{9),10)}。ここで波浪データには Japan Weather Association (JWA)の hind-cast data を利用した。

嵐モデルでのランダム荷重履歴の導出に用いた航海条件として、航路には北大西洋航路を用いた。対象船は2800TEUのコンテナ船で、評価対象位置の応力応答関数には上甲板ロジャスチフナ継手部のものを用いた⁹⁾。

発生応力は最大応力範囲 $\Delta\sigma_{max}$ が200MPa、最小応力範囲 $\Delta\sigma_{min}$ を20MPaとして1年分の波形を出力した。200MPaは疲労センサの使用上限値である。また、平均応力は50MPaで一定とした。これは平均応力が引張寄りであれば、FASTRAN II にてランダム波形でのき裂進展寿命を比較的良好な精度で得られることがこれまでにわかっているためである⁷⁾。解析数は9データパターンとした。

3.2 き裂進展解析

疲労センサのき裂進展解析では、入力データに用いた疲労センサのき裂進展特性（き裂長さ並びにき裂進展速度と応力拡大係数の関係）は一定応力範囲下でのき裂進展特性と一致させた。そして嵐モデル1年分の時系列応力範囲データを繰返し作用させた場合の疲労センサ破断寿命（初期き裂長1mmからき裂長5mmまでの寿命）を解析した。またこの嵐モデル1年分の時系列応力範囲データから求める等価一定応力範囲 $\Delta\sigma_{eq}$ を繰返し作用させた場合の疲労センサ破断寿命も別途解析し、両者の寿命比で定義される荷重履歴影響係数 β_{st} を求めた。なお、解析に用いた疲労センサは、標準的なタイプである、応力レンジ感度（疲労センサがき裂進展反応を示す応力範囲の下限閾値） $\Delta\sigma_{th}$ が40MPaのもの（川重テクノロジー製、標準型：KFS040F）とした。

また、溶接継手のき裂進展解析については、Table1に示す材料定数¹⁴⁾を用いて(6)式で表される評価式（修正パリズ則）に基づいて行った。Table1において $m=3$ は疲労センサ

のS-N線図の傾きが3と見なせることと調和する. また ΔK_{th} には応力比 $R=0.8$ 相当の値を用いた. これは, 溶接継手(特に疲労き裂の起点となる止端部)では, 引張残留応力の影響で高い応力比(今回は $R=0.8$ と仮定)の状態にあると考えられるからである¹⁵⁾.

$$da/dN=C(\Delta K^m-\Delta K_{th}^m) \quad (6)$$

da/dN : き裂進展速度[m/cycle]

ΔK : 応力拡大係数範囲[MPa $\cdot$ m^{1/2}]

C, m : 材料定数

ΔK_{th} : 疲労き裂進展下限界応力拡大係数範囲[MPa $\cdot$ m^{1/2}]

Table 1 Material properties of weld joints¹⁴⁾.

C	9.5×10^{-12}
m	3
ΔK_{th}	$6.0-4.56R=2.352$ (Stress ratio $R=0.8$)

なお溶接継手の応力拡大係数はWES2805記載の完全溶込み溶接継手止端部の表面き裂に対するものを用いた¹⁶⁾. ここで板厚は8mm, 初期き裂は半径0.2mmの半円表面き裂とし, 表面き裂の表面方向と板厚方向(き裂の最深部方向)の2方向へき裂進展解析を行った. そして嵐モデル1年分の時系列応力範囲データまたはその等価一定応力範囲 $\Delta\sigma_{eq}$ を繰返し作用させた場合の板厚貫通寿命(表面き裂深さ/板厚=1となる寿命)をそれぞれ求めた. そこから両者の寿命比で定義される荷重履歴影響係数 β_w が求まる. さらに(2)式で定義される荷重履歴影響係数の相関係数 k_β はFig.3の通りである. ここで $\Delta\sigma_{max}$ と k_β の関係をFig.4に示す.

Fig. 3 Simulation results of correlation factors under a storm model.

Fig.4によると $\Delta\sigma_{max}$ が大きくなるほど, k_β も増加する関係性が認められる. そして疲労センサの使用上限の応力範囲200MPaの場合(Data No.7)では, k_β はおおよそ2となる. こ

の値は過去のこれまでの検討結果⁸⁾と概ね一致する. 一方で $\Delta\sigma_{max}$ と k_β の関係性には, ある幅を持ったばらつきも若干認められ, これは波形データパターン毎に異なる個別応力波の出現順序に起因していると考えられる. 実船適用された疲労センサに対して, ばらつきを持ち得る k_β の値に実際よりも小さい値を適用すると非安全側の評価につながることから, 実海象下での k_β の簡便な検証方法が望まれる.

Fig. 4 Relation between maximum stress range and correlation factor.

4. 実海象標準応力履歴

疲労センサを適用された船が実航海中に受ける変動応力状態に対して, その荷重履歴影響係数や相関係数を比較的簡単に評価・検証するために, 計測負荷が比較的小さい頻度データを活用する手法について述べる. ここでは有義波高や応力の頻度データを利用することにし, それらから実海象を模擬して作成された応力履歴を「実海象標準応力履歴」と呼ぶことにする. その応力履歴に対して疲労センサによる寿命予測時に用いる荷重履歴影響係数やその相関係数の導出を試みた.

4.1 作成手順

実海象標準応力履歴の作成に際し, 疲労センサ適用船が航海中に遭遇する, 以下の頻度データを用いることとした.

- ①短期海象の有義波高 H_s の頻度データ
- ②一つの嵐中の最大有義波高 $H_{s,max}$ の頻度データ(全頻度数が, 航海中の嵐への遭遇数を表す)
- ③応力範囲 $\Delta\sigma$ の頻度データ

なお今回は実航海中の頻度データの代用として, 3章の嵐モデルにて生成された頻度データを用いて検討を行うこととし, 次に述べる2つの実海象標準応力履歴を作成した. 1つ目はFig.3に示すデータNo.7の頻度データに基づく実海象標準応力履歴である. データNo.7の嵐モデル応力履歴はそ

の最大応力範囲が 200MPa で、これは荷重履歴影響係数の評価に際してこれまで前提としてきた値と一致するためである。もう 1 つは Fig.3 に示す嵐モデル全 9 データの頻度データを平均化したもので実海象標準応力履歴を作成し、平均的な応力履歴に対する性向を確認することにした。嵐モデルデータ No.7 と全 9 データ平均の各頻度分布を Fig.5 に示すが、これらはすべて 1 年間相当の頻度である。

 (1) Significant wave height of short sea H_s

 (2) Maximum H_s in each storm $H_{s,max}$

 (3) Stress range $\Delta\sigma$

Fig.5 Frequency distributions of a storm model.

ここで有義波高は 0.5m から 19.5m まで離散的に 1.0m 間隔とした。また応力範囲は 5MPa から 195MPa まで離散的に 10MPa 間隔とした。

実海象標準応力履歴の作成上の手順概略を以下に示す。

(1) 短期海象の応力履歴作成

短期海象の頻度データと応力範囲の頻度データを以下の様に関連付けしたうえで、時系列データを作成する。

(1-1) 1 短期海象あたりの応力範囲 $\Delta\sigma$ の頻度数の決定

$\Delta\sigma$ の全頻度数を H_s の全頻度数で除すと、1 短期海象あたりの $\Delta\sigma$ の頻度数が求まる。データ No.7 の場合は 992 回となり、全 9 データ平均の場合は 1007 回となる。

(1-2) 短期海象中の応力範囲 $\Delta\sigma$ の頻度分布形の決定

各短期海象の最大応力範囲 $\Delta\sigma_{max,s}$ が 5MPa から 195MPa まで 10MPa 間隔ごとに表されると仮定したうえで、 $\Delta\sigma_{max,s}$ ごとに $\Delta\sigma$ 頻度分布を作成し、一例としてデータ No.7 の場合を Fig.6 に示す。この際、分布形は Rayleigh 分布に近似させた。なお Rayleigh 分布の確率密度関数 y は(7)式で表され、今回は $s = \Delta\sigma_{max,s} / 4$ と置いた。

$$y = \frac{\Delta\sigma}{s^2} \exp\left(-\frac{\Delta\sigma^2}{2s^2}\right) \quad (7)$$

 Fig.6 Frequency distributions of $\Delta\sigma$ in each maximum stress range $\Delta\sigma_{max,s}$ level. (Data No.7)

(1-3) 短期海象中の応力範囲 $\Delta\sigma$ の頻度分布の決定

前項にて決定された $\Delta\sigma_{max,s}$ ごとの $\Delta\sigma$ 頻度分布に H_s を割り当てる。このとき $\Delta\sigma$ のレンジ毎の頻度とそれら合計頻度が、元となる嵐モデルの $\Delta\sigma$ 頻度分布となるべく合致するように配慮した。また、(3)式と(4)式から求まる等価応力範囲 $\Delta\sigma_{eq}$ も、嵐モデルとなるべく合致するように配慮した。この作業の結果で得られた $\Delta\sigma$ 頻度分布をデータ No.7 を例に Fig.7 に示す。また、その H_s と $\Delta\sigma_{max,s}$ の対応関係を Table 2 に示す。

Table 2 Relationship between H_s and $\Delta\sigma_{\max,s}$ (Data No.7)

H_s	17.5	16.5	15.5	14.5	13.5	12.5
$\Delta\sigma_{\max,s}$	195	195	175	175	165	155
H_s	11.5	10.5	9.5	8.5	7.5	6.5
$\Delta\sigma_{\max,s}$	135	125	115	105	85	75
H_s	5.5	4.5	3.5	2.5	1.5	0.5
$\Delta\sigma_{\max,s}$	65	45	35	35	25	25

Unit : H_s [m], $\Delta\sigma_{\max,s}$ [MPa] Fig.7 Comparison of frequency distributions of $\Delta\sigma$ between storm model data and normalized data. (Data No.7)(1-4) 短期海象中の応力範囲 $\Delta\sigma$ の履歴決定

短期海象中の $\Delta\sigma$ の出現順序は、最大値を起点にその前後へ値の大きい順から均等に配置した。Fig.8 にその要領を模式図的に示す。Fig.8 では $\Delta\sigma$ の総数を簡略化して 15 回とした場合であり、線図内の丸数字は $\Delta\sigma$ の大きさの順位を表す。

Fig.8 Simplified chart about an order of sequence in stress ranges or sea conditions.

このような要領で作成したデータ No.7 の $H_s=17.5\text{m}$ の $\Delta\sigma$ 時系列線図を一例として Fig.9 に示す。なお Fig.9 では $\Delta\sigma=20\text{MPa}$ 未満について消去したので、データ No.7 の $\Delta\sigma$ 時系列データ数は 992 から 908 に減少した。消去した理由は、疲労センサのき裂進展に 20MPa 未満の $\Delta\sigma$ は寄与しないと見

なせるからである。このように以降の $\Delta\sigma$ の履歴の検討では 20MPa 未満についてすべて消去した。これは著者らが過去の検討で採用した $\Delta\sigma$ 時系列データとも共通である⁷⁾⁹⁾。

Fig.9 Stress range sequence in a short sea.
(Data No.7, $H_s=17.5\text{m}$)

(2) 個々の嵐の応力履歴作成

短期海象を時系列に並べることで、嵐の応力履歴を作成する。個々の嵐の大きさはその中の最大有義波高 $H_{s,\max}$ で代表させる。データ No.7 の場合では最大で $H_{s,\max}=17.5\text{m}$ の嵐が一つ出現し、嵐の総数は 25 個である。

(2-1) 嵐を構成する短期海象の数

嵐の期間は 3.5 日 (=84 時間) とした¹⁷⁾。本検討で用いた短期海象データは 2 時間ベースなので、一つの嵐は 42 個の短期海象で構成することにした。

(2-2) 嵐中の短期海象の配列

嵐の中央（すなわち 21 番目の短期海象）に $H_{s,\max}$ を配置し、そこを頂点に山形となるように H_s の大きい方から各嵐になるべく均等分配した。データ No.7 について $H_{s,\max}$ ほどの嵐の形を H_s で表現したものを Fig.10 に示す。なお、Fig.10 では嵐が比較的大きい $H_{s,\max}=11.5\text{m}$ 以上の嵐を記載した。嵐によっては山の頂点から若干非対称なものもあるが、これは嵐で消費する H_s 頻度を、元データの H_s 頻度と合致するようにしたためである。なお、 H_s 全頻度のうち大きい H_s は優先的にすべて嵐で消費させた。一例として Fig.11 はデータ No.7 の H_s 頻度分布を示す。◆印は元データとなる嵐モデルの H_s 全頻度分布を表し、□印は実海象標準応力履歴において嵐で消費した分の H_s 頻度分布である。◆印と□印の頻度の差で表される比較的小さい H_s （ここでは $H_s=3.5\text{m}$ 以下）の残存頻度は嵐と嵐をつなぐ平穏海象（次項で説明）に使用した。

Fig.10 H_s sequences in storm condition.
(Data No.7, $H_{s,max}=17.5, 13.5, 12.5, 11.5$)

Fig.12 Stress sequence of a normalized storm condition.
(Data No.7, $H_{s,max}=17.5$)

Fig.11 Comparison of frequency distributions of H_s between storm model data of all conditions and normalized data of storm conditions. (Data No.7)

以上の要領で嵐の応力履歴が完成する。一例としてデータ No.7 での最大嵐となる $H_{s,max}=17.5$ m の応力履歴を Fig.12 に示す。なお、この嵐の中央の低応力域において応力履歴が楡の歯状に見える理由は、嵐の中央に配置される高 H_s ほど、低 $\Delta\sigma$ の頻度数が少なくなり、それが $\Delta\sigma$ の配列に反映されるからである。その様子は Fig.9 に示す $H_s=17.5$ m の応力履歴から読み取れる。

(3) 平穏海象の応力履歴作成

全ての H_s 頻度から嵐に用いた H_s 頻度を差し引いた分で構成し、嵐と嵐の間に配置した。

(3-1) 平穏海象を構成する短期海象の数

嵐と同じ数の平穏海象を作成した。データ No.7 の場合は 25 個となる。

(3-2) 平穏海象中の短期海象の配列

平穏海象用として残った H_s 頻度を平穏海象数で除して、各平穏海象に等しく分配した。ここでは平穏海象も嵐と同様に H_s を山形に配置し、データ No.7 の例を Fig.13 に示す。この平穏海象中の短期海象は $H_s=3.5$ m 以下の 131 海象で構成され、出現する $\Delta\sigma$ は 35MPa 以下と十分小さく、疲労き裂進展量への寄与は大きくないと考えられる。したがって $\Delta\sigma$ 履歴図の記載は省略する。

Fig.13 H_s sequence of calm sea condition. (Data No.7)

(3-3) 余り海象の作成

H_s 頻度を平穏海象に分配後に、最終的に余った H_s 頻度も山形に配置して余り海象とした。例えばデータ No.7 では、 $H_s=3.5$ m 以下の 43 個の短期海象で構成される。これは平穏海象が 131 個の短期海象で構成されるのと比べて少ない。また出現する $\Delta\sigma$ も 35MPa 以下と十分小さい。したがって、余り海象は疲労き裂進展量への寄与が軽微と考えられ、 H_s や $\Delta\sigma$ の履歴図は省略する。

(4) 一年間分の応力履歴の完成

嵐は個々に大きさが異なる。その出現順序は上記(1-4)項の

応力履歴決定要領 (Fig.8) と同様に, 最大嵐を起点にその前後へ嵐の大きい順から均等に配置した. そして平穏海象, 嵐, 平穏海象, 嵐…と交互に整列させて, 最後に余り海象を追加して 1 年間分の応力履歴とした. まず嵐モデルのデータ No.7 の応力履歴を Fig.14 に示す. これに対してデータ No.7 の頻度データに基づく実海象標準応力履歴を Fig.15 に示す. Fig.14 と Fig.15 には疲労センサのき裂進展解析結果も併記した. 今回のき裂進展解析では, 1 年間の応力履歴が毎年繰返すという前提条件のもと, 疲労センサの初期き裂長さ 1mm から破断する 5mm まで解析したが, そのうち図中にはき裂長さ 1mm から 1.5mm までのき裂進展履歴を拡大して示す.

同様に全 9 データ平均の頻度データに基づく実海象標準応力履歴と疲労センサのき裂進展解析結果を Fig.16 に示す. なお, 以上の検討に用いた頻度データの概要を Table 3 にまとめた.

Fig.14 Stress sequence of storm model data No.7, and the crack propagation analysis result.

Fig.15 Stress sequence of normalized data No.7, and the crack propagation analysis result.

Fig.16 Stress sequence of normalized data of averaged storm model data, and the crack propagation analysis result.

Table 3 Outline of frequency distribution data of stress history.

(1) Data No.7

		S/M ^(*)	Normalized
Total number of $\Delta\sigma$ [cycle]	≥ 0 [MPa]	4,331,233	4,325,727
	≥ 20 [MPa]	485,705	476,282
Total number of H_S [count]		4,368	4,368
Total number of $H_{S,max}$ [count]		25	25
$\Delta\sigma_{max}$ [MPa]		200	195
$\Delta\sigma_{eq}$ [MPa]	≥ 0 [MPa]	19.2	19.5
	≥ 20 [MPa]	38.4	38.3

(2) Average of all data

		S/M ^(*)	Normalized
Total number of $\Delta\sigma$ [cycle]	≥ 0 [MPa]	4,373,861	4,366,234
	≥ 20 [MPa]	471,295	469,942
Total number of H_S [count]		4,343	4,343
Total number of $H_{S,max}$ [count]		24	24
$\Delta\sigma_{max}$ [MPa]		175	175
$\Delta\sigma_{eq}$ [MPa]	≥ 0 [MPa]	17.9	18.2
	≥ 20 [MPa]	36.0	36.0

(*)S/M : Storm Model

4.2 荷重履歴影響係数と相関係数

疲労センサならびに溶接継手の荷重履歴影響係数 β と $\Delta\sigma_{max}$ との関係を Fig.17 に, またその相関係数 k_β と $\Delta\sigma_{max}$ との関係を Fig.18 に示す. さらにそれらの一覧を Table 4 に示す. これら係数は, FASTRAN II によるき裂進展解析で得られた疲労センサや溶接継手の破断寿命に基づく. 求めた係数一覧を Table 4 にまとめた.

本検討の結果, 実海象標準応力履歴から求まる荷重履歴影響係数は, 元データの嵐モデルに対してやや大き目の値を与える傾向が読み取れる. これは実海象標準応力履歴では, 疲労き裂進展の遅延に寄与する比較的大きい嵐がほぼ等間隔に現れるために, 遅延度合が大きく表れやすかったと考えられる. 相関係数も嵐モデルより若干大きめの値を与えているが, その両者の差は荷重履歴影響係数よりも縮まり, 嵐モデ

ルの応力履歴や実海象標準応力履歴を問わず、データ No.7 の相関係数はおよそ 2 とみなせる。この値は、過去に著者が嵐を想定した標準嵐波形等をもとに実験及び解析で導出した相関係数 $k_p=1.9\sim 2.1$ （寿命評価時の採用値は 2.1）⁸⁾ と概ね一致する。なお、実応力波形に対して、本報で述べた頻度データをもとに推定した荷重履歴影響係数や相関係数がやや大きめに見積もられることは疲労寿命評価上で安全側であり、好ましい傾向とも言える。

Fig.17 Relation between $\Delta\sigma_{\max}$ and β_{st} or β_{wt} .

Fig.18 Relation between $\Delta\sigma_{\max}$ and k_p .

Table 4 LEFs and correlation factors.

	Data No.7		Average of all data	
	S/M ^(*)	Normalized	S/M ^(*)	Normalized
β_{st}	4.4	5.3	-	4.7
β_{wt}	2.4	2.6	-	2.5
k_p	1.9	2.0	-	1.9

(*)S/M : Storm Model.

なお今回の一連の検討では、時系列応力範囲データに対する荷重履歴影響係数とその相関係数の算出は FASTRAN II による数値解析に依っている。過去に行った嵐を模擬した応力波形に対するそれら係数の解析による算出結果によると、平均応力が引張寄りであれば実験結果と比較的良く整合す

ることを確認している^{7),18)}。したがって今回は解析的手法のみで検討を進めたが、実験による検証が今後の課題である。また、今回の検討に用いた時系列応力範囲データは実海象を模擬した嵐モデルに基づく。これに対して疲労センサを適用した船の実航海中の時系列データに基づく検証が今後の課題である。

5. 結 言

これまで著者らは船体構造溶接部に対して、疲労センサによる疲労寿命推定精度の向上を目的に、船舶が実際の航路上で遭遇する波浪状態を模擬した嵐モデルによる応力履歴などを用いて、疲労センサの出力特性と船体構造溶接部の疲労強度特性の相関を明らかにすることを試みてきた。その結果、両者の疲労寿命に対する相関係数は概ね 2 で代表できる見通しを得ており、この係数で精度の高い寿命推定が可能であると考えられる。

一方で、疲労センサを適用された船舶の実際の荷重状態は遭遇する波浪状態に起因してランダム性に富んでいる。これに対して計測負荷が比較的小さいデータを補完的に用いて、本論文で定義した荷重履歴影響係数とその相関係数を評価・検証できれば、疲労センサに基づく疲労寿命推定の信頼性向上にとって有意義である。そこで、(1)短期海象の平均有義波高 H_s の頻度データ、(2)一つの嵐中の H_s の最大値 $H_{s,\max}$ の頻度データ、(3)応力範囲 $\Delta\sigma$ の頻度データの 3 つの頻度データから、実海象下の応力履歴を比較的簡単に推定する手法を考案した。本手法の応力履歴から推定される荷重履歴影響係数や相関係数は、実応力波形から評価される値よりもやや大きめの推定値を与える傾向が認められるものの、過去の著者らの検討結果を勘案すると、おおよそ妥当な評価結果を与える見込みが得られた。ただし、今回の検討に用いた時系列応力範囲データは実海象を模擬した嵐モデルに基づく。これに対して疲労センサを適用した船の実航海中の時系列データに基づく検証が今後の課題である。

以上の結果を踏まえると、船舶が遭遇するさまざまな波浪状態においても、疲労センサによるモニタリングで得られる推定疲労寿命は、著者らが考案した荷重履歴影響係数とその相関係数を導入することで、精度向上が可能と考えられる。ここで、長期耐久性確保のため微小抵抗溶接で疲労センサをモニタリング対象部材に貼付した場合、波浪に起因する変動応力範囲がおおよそ引張側であれば、疲労センサによりモニタリング部位の精度良い疲労寿命の推定が可能と言える。このように得られた疲労寿命推定結果を個船の保全計画等へ反映させることで、船舶の構造信頼性が高まり、就航中の船舶の安全確保につながると考えられる。

謝 辞

本研究の実施にあたり, JWA hind-cast data をご提供いただいた一般財団法人日本気象協会・松浦邦明様, ならびに有益なご助言を賜った大阪大学・箕浦宗彦准教授へ御礼申し上げます. また, 疲労評価対象部の応力応答関数のご提供とご助言を賜った Chalmers University of Technology の Wengang Mao 教授に御礼申し上げます.

最後に, 一般財団法人日本海事協会殿におかれましては, 共同研究の成果を本研究に反映させていただきましたことを感謝申し上げます.

参 考 文 献

- 1) O. Muragishi, K. Nihei, T. Kobayashi: Remaining Life Evaluation by Fatigue Detecting Sensor, International Institute of Welding, Work in Progress on Fatigue Strength of Welded Joints in Japan, IIW Document No. XIII-2018-04 (2004)
- 2) 高野 裕文, 小岩 敏郎, 宇佐美 陽生, 土橋 広嗣, 山本 規雄, 寺井 幸司, 孝岡 祐吉, 下田 太一郎, 仁瓶 寛太, 小林 朋平: 疲労センサを使用した LNG 船の船体疲労強度管理システム, JCROSSAR 2007 論文集 (2007), pp. 501-508
- 3) Y. Kawaguchi, K. Ohgaki, T. Kobayashi, K. Kawajiri, M. Imashioya: Comparison of Remaining Life Evaluations by Fatigue Detecting Sensor and Stress Frequency Method, 58th Annual Meeting, Japan Soc. M. E., (2003)
- 4) T. Kobayashi, O. Muragishi, K. Nihei, Y. Oku: Development of Small Fatigue Detecting Sensor and its Application to Products, 2nd symposium on Evaluation and Diagnosis, Japan Soc. M.E., (2003)
- 5) Tomita, Y., Matoba, M., and Kawabe, H. " Fatigue Crack Growth Behavior under Random Loading Model Simulating Real Encountered Wave Condition, " Marine Structures, Vol. 8, Issue 4, (1995)
- 6) 山本 規雄: 船舶の疲労寿命の予測方法(現状と将来), 日本船舶海洋工学会誌 KANRIN 第 6 号 (2006)
- 7) 孝岡 祐吉, 仁瓶 寛太, 小林 朋平, 小岩 敏郎, 山本 規雄, 宇佐美 陽生, 土橋 広嗣: 疲労センサを用いた船体構造の疲労寿命推定精度向上について, 日本船舶海洋工学会論文集 第 9 号 (2009)
- 8) 小林 朋平, 仁瓶 寛太, 孝岡 祐吉, 下田 太一郎, 小岩 敏郎, 山本 規雄, 宇佐美 陽生, 土橋 広嗣: 疲労センサを用いた船体構造の疲労寿命推定精度向上について—第 2 報: 嵐波形のパターンが異なる場合の影響, 日本船舶海洋工学会論文集 第 13 号 (2011)
- 9) 小林 朋平, 仁瓶 寛太, 孝岡 祐吉, 大沢 直樹, Luis De Gracia, 市橋 大地: 嵐モデルに基づいた疲労センサによる船体構造の疲労寿命推定手法の高度化, 日本船舶海洋工学会論文集 第 23 号 (2016 掲載予定)
- 10) 小林 朋平, 仁瓶 寛太, 孝岡 祐吉, 大沢 直樹, Luis De Gracia, 市橋 大地: 嵐モデルに基づいた疲労センサによる船体構造の疲労寿命推定手法の高度化, 日本船舶海洋工学会春季講演会論文集, (2016)
- 11) K. Nihei, O. Muragishi, T. Kobayashi, K. Ohgaki and A. Umeda : Remaining life estimation by Fatigue Damage Sensor, Proceeding of ICE - Bridge Engineering 163 Issue BE1(2010)
- 12) J. C. Newman: FASTRAN II – A Fatigue Crack Growth Structural Analysis Program, NASA Technical Memorandum, 104159, (1992)
- 13) B.J. Murtagh, K.F. Walker: Comparison of Analytical Crack Growth Modeling and the A-4 Wing Test Experimental Results for a Fatigue Crack in an F-111 Wing Pivot Fitting Fuel Flow Hole Number 58, DSTO-TN-0108, DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory, Australia, (1997)
- 14) A.Hobbacher: Fatigue Design of Welded Joints and Components, The International Institute of Welding (IIW), XIII-1539-96/XV-845-96, (1996)
- 15) 独立行政法人 物質・材料研究機構: 圧力容器用鋼及び構造用鋼突合せ溶接継手の疲労き裂伝ば特性, 材料強度データシート資料 8, (1995)
- 16) 一般社団法人 日本溶接協会: 溶接継手のぜい性破壊発生及び疲労亀裂進展に対する欠陥の評価方法, WES2805:2011, (2011)
- 17) Fredhi Agung Prasetyo, Naoki Osawa, Tomohei Kobayashi (2012), Study on Preciseness of Load History Generation based on Storm model for fatigue assessment of ship structures members, Proceeding of 22nd ISOPE conference, vol. IV
- 18) T. Kobayashi, Y. Takaoka, K. Nihei, F. A. Prasetyo, N. Osawa : Improvement in prediction accuracy of hull fatigue life using a fatigue damage sensor under random wave loads, Proceedings of the 26th Assian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structure (TEAM 2012), (2012)