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—

正員 小林 朋平* 正員 仁瓶 寛太* 正員 孝岡 祐吉** 正員 下田 太一郎**
正員 小岩 敏郎*** 正員 山本 規雄*** 正員 宇佐美 陽生*** 正員 土橋 宏嗣***

Improvement of Prediction Accuracy of Hull Fatigue Life using a Fatigue Damage Sensor
- Influences of Storm Patterns for Estimation of Fatigue Life -

by Tomohei Kobayashi, *Member* Kanta Nihei, *Member* Yukichi Takaoka, *Member* Taichirou Shimoda, *Member*
Toshirou Koiwa, *Member* Norio Yamamoto, *Member* Akio Usami, *Member* Hirotsugu Dobashi, *Member*

Summary

The characteristics of Fatigue Damage Sensors (FDS) that are in use for fatigue life estimation of monitoring structural 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. Coefficients affected by loading histories against constant amplitude loading and mean stress levels are introduced for the estimation procedure using FDSs and confirmed by several series of fatigue testing. This newly proposed fatigue life estimation procedure using obtained coefficients is checked by comparison results of application to a marine structure on which FDSs and strain gauges are provided simultaneously and to which random loads by varying wave are applied.

1. 緒 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ことから、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である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おり、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。

前報⁷⁾で著者らは疲労センサを用いた船体構造溶接部に対する疲労寿命推定精度の向上を目的に、嵐を想定した代表的な負荷パターン(標準嵐波形)を仮定し、その嵐荷重と平均応力の変化が重畳する条件下で、疲労センサの特性取得試験、十字隅肉溶接継手の疲労強度試験、および船体構造モデル試験体を用いた疲労センサのモニタリング精度検証試験を実施し、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。その中で、疲労センサの出力特性と溶接部の疲労強度特性のそれぞれに対して変動荷重負荷履歴の影響と平均応力の変化の影響を表す荷重履歴影響係数を導入し、その相関係数で修正することで、疲労センサによる溶接部の推定疲労寿命の精度を向上させる方法を提案した。そこで本報では、嵐波形のパターンが異なる場合について、前報と同様に疲労センサの特性取得試験と十字隅肉溶接継手の疲労強度試験を実施し、それらの結果から、疲労センサおよび溶接部の荷重履歴影響係数と、その相関係数を求めて、著者の導入した荷重履歴影響係数の

* 川重テクノロジー (株)

** 川崎重工業 (株)

*** (財) 日本海事協会

汎用性を考察した。

最後に、本研究で考察した荷重履歴影響係数を用いた疲労センサによる船体構造溶接部の疲労モニタリングの適用例の一つとして、著者の一部が属する川崎重工業(株)がMARIN(オランダ海事研究所)と実施した共同研究成果の一部⁸⁾を紹介し、前報および本報で提案した疲労センサによる溶接部の推定疲労寿命の精度を向上させる方法の妥当性を示した。

2. 荷重履歴影響係数

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.1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線図の傾きが同等である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、溶接継手と疲労センサの疲労ダメージ相関係数である⁹⁾。

Fig.1 Flow of fatigue life evaluation

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、多くの場合で寿命が延びる(遅延する)ことが前報等で明らかになった^{2),7)}。それに対して、著者らは疲労センサと溶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、それを荷重履歴影響係数と定義して(2)式で表すことを試みた⁷⁾。

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

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し、 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_{wt} 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。さらに 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し、 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_{wt} 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_β 、 k_γ は各々の荷重履歴影響係数の相関係数を表す。これら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と疲労センサの疲労ダメージの相関は(3)式で表される。

$$D_w = k_\beta \cdot k_\gamma \cdot \alpha_k \cdot D_s \quad (3)$$

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の向上を可能とする手法を提案した⁷⁾。

3. 疲労試験

本章では、航行中の船舶が受ける嵐モデルの負荷パターンを変えて疲労試験片に負荷して、疲労センサの出力データと溶接継手部の疲労寿命データを取得し、両者の荷重履歴影響係数を取得する。

3.1 嵐波形の負荷パターン

ある船舶の上甲板付船体中央縦通肋骨の縦曲げ応力を

2.5年に亘り2時間おきに20分間を1ブロックとして、合計1万ブロック計測したデータより、遭遇した5回の嵐の前後データを抽出して、嵐のピークを頂点に嵐前後で対称となるように調整した平均線を求め、嵐のピーク前後約16時間分の時系列データを1ステップの“標準嵐波形”（Standard Storm Waveform: SSW）と定義した。これは、20分間の実測データを1ブロックとする時系列データを、Fig.2に示す嵐波形に沿うように各ブロックの応力範囲を調整し、それらを合計49ブロック（ブロックNo.-24~24）順列させて構成した。嵐波形の構成に用いた各ブロックの時系列データには2種類の基本型（波形データ）を応用した。嵐のピーク時の最大応力範囲 $\Delta\sigma_{\max,0}$ に比して、各ブロックの最大応力範囲 $\Delta\sigma_{\max,i}$ が0.75倍以上の場合には波形データ①を、0.75倍未満の場合には波形データ②を用いた。波形データ①は2.5年間の実船計測期間で嵐のピーク時に計測された1ブロック分の時系列データであり、波形データ②はピーク時より応力範囲が半分となる波形が計測されたときの1ブロック分の時系列データである。前報⁷⁾では以上のように定義した標準嵐波形を、船舶に作用する代表的な負荷パターンとして用いた疲労試験を行い、疲労センサによる溶接部の疲労寿命評価に用いる相関係数を取得した。本報では、その相関係数の汎用性を調査するため、Fig.2に示すように、標準嵐波形とは異なる2種類の負荷パターンを用いて、疲労試験を行った。一つの波形は標準嵐波形に比べて嵐の周期が長い“嵐波形A”（Storm Waveform-A: SWA）で、もう一つは標準嵐波形に比べて嵐の周期が短い“嵐波形B”（Storm Waveform-B: SWB）であり、2.5年に亘る実船での縦曲げ応力モニタリング結果を参考に、船舶が実際に遭遇し得る嵐波形のパターンとして各々モデル化した。

Fig.2 Definition of storm shapes

これら嵐波形Aと嵐波形Bについて、平均応力が引張側と圧縮側で交互に負荷する場合の2ステップ分の時系列データ例をFig.3とFig.4にそれぞれ示す。疲労センサの応力

範囲に対する適用上限を考慮して、嵐波形の最大応力範囲は200MPaに設定した。なお嵐波形AとBとでは波形データ①と②の構成比率が異なるため、1ステップ中の時系列データ数（Count）が異なっている。

Fig.3 Time-varying changes of alternate tensile and compressive stress ranges under consecutive storm waveform-A load

Fig.4 Time-varying changes of alternate tensile and compressive stress ranges under consecutive storm waveform-B load

一定振幅荷重下に対する変動荷重下でのき裂進展の遅延度合いをあらわす荷重履歴影響係数を求めるため、嵐波形の負荷パターンに対して線形累積損傷則に基づき、疲労ダメージが同じとなる等価一定応力範囲を(4)式および(5)式で算出し、その応力範囲を負荷する疲労試験も行った。

$$\Delta\sigma_{n,eq} = \left\{ \frac{\sum_i (\Delta\sigma_{n,i}^m \cdot n_i)}{\sum_i n_i} \right\}^{1/m} \quad (4)$$

$$n_{eq} = \sum_i n_i \quad (5)$$

ここで、疲労センサを貼付した鋼板および溶接継手に作用さ

せる公称応力を 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} とおく。また(4)式中の m はS-N線図の傾きをあらわす指数で、疲労センサおよび溶接継手は $m=3$ とおける。このとき嵐波形Aと嵐波形Bの等価公称応力範囲はそれぞれ77MPa, 53MPaとなる。また標準嵐波形の等価公称応力範囲は64MPaとなる。

3.2 疲労センサの特性取得試験

板厚8mmのSS400鋼板に対して、船舶などを対象とした長期間モニタリングに適する貼付方法である微小抵抗溶接¹⁰⁾により、疲労センサを試験毎に3枚貼付した。室温大気中の環境下にて電気油圧サーボ式疲労試験機で、疲労センサを貼付した鋼板に所定の繰返し応力(公称応力)を負荷し、疲労センサのき裂進展長さを適時計測した。試験に用いた疲労センサには、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)を用いた。

Fig.5には嵐波形Aを作用させた場合の疲労センサ特性取得試験結果を示す。嵐波形Aのステップ数に対して、3枚の疲労センサ上に生じたき裂長さ a を疲労センサ幅 W で無次元化した値をそれぞれ●, ▲, ■印でプロットし、同時にそれらの平均を実線で示す。また、比較対象となる等価一定応力範囲を作用させた場合の試験結果を○, △, □印でプロットし、同時にそれらの平均を破線で示す。平均応力が引張側のみで行われた嵐波形Aと、その等価一定応力範囲に対する疲労センサのき裂進展履歴の比較から、疲労センサの荷重履歴影響係数は $\beta_{st}=1.5$ が得られる。なお、Fig.5では同様に平均応力が圧縮側のみで行われた試験における疲労センサのき裂進展履歴も示しているが、圧縮側のみでは3枚の疲労センサのき裂進展履歴の個体差が比較的大きく、一部の疲労センサではき裂進展が停留している。これは疲労センサを鋼板に微小抵抗溶接で貼付したため、圧縮荷重負荷時にセンサ箔が座屈挙動を示し、疲労センサ上のき裂進展が不安定になったのが一因と推測される。このことは接着剤により疲労センサを貼付した場合は、常時圧縮状態においても出力の安定性が改善されるという過去の試験結果に矛盾しない。船舶では、疲労センサの点検は就航後の修繕ドック毎に実施されることを想定し、長期モニタリングに適した微小抵抗溶接での疲労センサ貼付を前提として、疲労センサの出力が安定している引張負荷状態のデータを基準に疲労センサの荷重履歴影響係数 β を算出することとした。

Fig.6には、同様の試験片を用いて、嵐波形Aについてその平均応力が引張側と圧縮側を交互に負荷した(Fig.3に示

す時系列の)場合の疲労センサのき裂進展履歴を示す。この場合、嵐波形Aを引張側のみ作用させた場合と同様に、3枚の疲労センサのき裂進展履歴の個体差は小さく、疲労センサは安定した出力を示している。両者のデータを比較して、荷重履歴影響係数 $\gamma_{st}=2.3$ が得られた。

Fig.5 Results of fatigue tests for FDSs under tensile and compressive storm waveform-A loads comparing with their equivalent nominal loads

Fig.6 Results of fatigue tests for FDSs under alternate tensile and compressive storm waveform-A loads comparing with tensile storm waveform-A load

Fig.7 Results of fatigue tests for FDSs under tensile and compressive storm waveform-B loads comparing with their equivalent nominal loads

Fig.7 と Fig.8 には同様に嵐波形 B に対する試験結果を示す。この嵐波形 B に対しては $\beta_{st}=3.3$, $\gamma_{st}=0.83$ が得られた。

Fig.8 Results of fatigue tests for FDSs under alternate tensile and compressive storm waveform-B loads comparing with tensile storm waveform-B loads

3.3 溶接継手の疲労試験

溶接部に対して 2 章で定義した各荷重履歴影響係数 β_{wt} , γ_{wt} を求めるために, Fig.9 に示す荷重非伝達型十字隅肉溶接継手試験片 (材質: SM400B, 板厚 9mm) を用いて疲労センサの特性取得試験と同一環境下で疲労試験を実施した。

Fig.9 Fatigue test specimens for welded joints

引張側の嵐波形 A を用いて試験した S-N データの平均に対して, 平均応力が同じく引張側で一定振幅応力下で取得した S-N データの平均との比較により, $\beta_{wt}=0.81$ を得た。また, 嵐波形 A を引張側と圧縮側で交互に負荷した場合の S-N データの平均との比較により, $\gamma_{wt}=2.0$ を得た。

同様の試験を嵐波形 B についても行い, $\beta_{wt}=1.6$, $\gamma_{wt}=0.92$ を得た。

4. 相関係数

前章で示した各種疲労試験の結果より得た, 嵐波形毎の荷重履歴影響係数 β と γ を Fig.10 と Fig.11 に示す。これらの図には前報⁷⁾で示した標準嵐波形に対する荷重履歴影響係数も併記する。Fig.10 によると, 波浪に起因する疲労センサの荷重履歴影響係数 β_{st} は, 溶接継手の β_{wt} よりも値が大きくなっている。嵐のような変動振幅荷重場における疲労センサの

き裂進展の遅延度合いへの影響は, き裂先端の塑性化に起因している。それに比べて, 溶接継手の疲労寿命ではき裂進展が支配的とは言え, 実際にはき裂発生に要する寿命も無視できないので, 相対的に遅延の度合いが小さくなったと考えられる。Fig.11 に示す積み付け条件変化に起因する荷重履歴影響係数についても, 疲労センサの γ_{st} は, 溶接継手の γ_{wt} よりも値が大きくなる傾向が認められた。

Fig.10 Correlation factor k_β between β_{st} and β_{wt}

Fig.11 Correlation factor k_γ between γ_{st} and γ_{wt}

嵐波形の違いによる影響に着目すると, 標準嵐波形 (SSW) の場合と比べて嵐の周期が長い嵐波形 A (SWA) の場合では β_{st} は小さく, γ_{st} は大きくなる傾向があった。反対に嵐の周期が短い嵐波形 B (SWB) の場合では β_{st} は大きく, γ_{st} は小さくなる傾向があった。すなわち嵐荷重と平均応力変化が重畳する場合, 両者のき裂進展特性に与える遅延の度合いは相反する関係にあることが推察される。例えば, 嵐波形 B のほうが, 嵐波形 A に比べて, 海象が穏やかな状況から嵐のピークへ急激に到達するので, 波浪によるき裂進展特性に与える遅延の影響は大きくなる分, そこに重畳する急激な平均応力の変化に対しては, さほど敏感ではなくなるのではないかと考えられる。

(2)式で定義される相関係数 k_β と k_γ についてもそれぞれ

Fig.10 と Fig.11 に示す. 今回の試験に用いた嵐荷重の負荷パターン範囲においては, k_β は 2.1~1.9 の範囲となった. また, k_γ は 1.2~0.90 の範囲となった. 嵐荷重と平均応力変化が重畳する条件下では, (3)式に基づいて, 疲労センサの出力から船体構造溶接部位の疲労寿命推定を行う際の修正に用いる値となる相関係数の積 $k_\beta \cdot k_\gamma$ は, Fig.12 に示すように 2.5~1.8 の範囲にあるが, 代表的な嵐波形を表す“標準嵐波形”の場合に 2.5 と最も大きく, この値を用いることを推奨したい. なお, この値は嵐波形の最大応力範囲を疲労センサの応力範囲に対する適用上限 200MPa に設定した試験結果に基づく. 別途に実施した標準嵐波形の最大応力範囲を 100MPa に設定した試験結果では, 相関係数の積 $k_\beta \cdot k_\gamma$ は 2.3 となり, 嵐波形の最大応力範囲が小さくなると, $k_\beta \cdot k_\gamma$ もやや小さくなる傾向がでたが, 最大応力範囲の大きさにより, $k_\beta \cdot k_\gamma$ が大幅に変わるものではないと推察される.

Fig.12 The product of k_β by k_γ

以上の結果を踏まえ, 相関係数の積 $k_\beta \cdot k_\gamma$ を 2.5 とおくと, 溶接継手部の疲労ダメージは $D_w = 2.5 \cdot \alpha_k \cdot D_s$ で表される. また, 嵐荷重がおよそ引張側で, 平均応力変化を無視できる場合には, 標準嵐波形の $k_\beta = 2.1$ を用いることを推奨し, その場合には $D_w = 2.1 \cdot \alpha_k \cdot D_s$ (ただし $k_\gamma = 1.0$ とする) と表される. このように, 荷重履歴影響係数から求まる相関係数を用いて, 従来の(1)式に基づく推定疲労寿命を修正することで, 船体構造溶接部に対する寿命推定精度を向上できると考えられる.

5. 疲労センサによる船体疲労モニタリング

著者らが提案した荷重履歴影響係数を用いた疲労寿命評価高精度化手法の有効性の検証の一例として, 著者の一部が MARIN と共同で実施したある浮体式海洋石油・ガス生産貯蔵積出設備 (FPSO) 上甲板の主として船体縦曲げ荷重履歴に対する疲労モニタリング結果⁸⁾を紹介し, 考察を加える.

本例では疲労センサ及びひずみゲージを同じモニタリング点に貼付し, ひずみゲージの出力値からレインフロー法により求めた疲労寿命と疲労センサによる推定疲労寿命を比較して, 疲労センサによる推定疲労寿命の妥当性を検証している.

この例では MARIN の主催する関連 JIP (Joint Industry Project)¹⁰⁾ 期間中に成果を得るために, モニタリング期間が約一年間と短期間であり, FPSO 船上では安全上施工が制限されているため, ひずみを約 3 倍に増幅する機構が設けられた Life Time Sensor (LTS)¹¹⁾ と呼ばれる犠牲試験片の一種にあらかじめ疲労センサを貼付しておき, その LTS を上甲板に予張力を与えて接着剤にて取付けた. 1 体の LTS につき, 疲労センサは応力レンジ感度が 40MPa (標準型: KFS040F) と 25MPa (高感度型: KFS025F) のものを 2 枚ずつ貼付した. LTS 中央の表裏にはひずみゲージも 1 枚ずつ貼付し, ひずみ波形をモニタリングした. LTS は FPSO 上甲板の左舷側 (PS) と右舷側 (SB) の対称位置に 1 体ずつを取付けた.

LTS を上甲板に取付けてから, 150 日後に 1 回目, 330 日後に 2 回目の疲労センサのき裂長さの点検を行った. その結果, 応力レンジ感度が 25MPa の疲労センサは感度が高すぎたために点検時点で分離破断していたので, 感度 40MPa の疲労センサ 2 枚のき裂長さの平均値を用いて, 日本鋼構造協会 (JSSC) の疲労設計指針¹²⁾の強度等級 D に準じて疲労寿命評価を行った. このとき, 荷重履歴の影響を寿命評価に加味するための相関係数の積 $k_\beta \cdot k_\gamma$ には 2.5 を用いた. その寿命評価結果を Fig.13 に示す. また, 従来から一般的に用いられる手法である, ひずみゲージでモニタリングしたひずみ波形から, レインフロー法 (RFC) にて応力頻度に換算し, 累積損傷則に基づいて疲労寿命評価した結果も Fig.13 に比較のため併記する. 疲労センサとひずみゲージで推定した疲労寿命を比較すると, 両者は概ね一致する結果が得られた. なお, これらの寿命は LTS 上の出力結果に基づいており, LTS の実部材に対する応力増幅率を考慮すれば, 実構造である上甲板溶接部の疲労寿命は 85 年と推定される.

Fig.13 Comparison of fatigue life estimations⁸⁾

ひずみゲージを用いた従来手法で疲労寿命を評価するには、長期間の応力履歴を、大量のデータとして蓄積して解析する必要がある。それに対して、疲労センサを用いた手法では、疲労センサ上のき裂長さを計測するだけで簡便に疲労寿命推定を行うことができた。また、(3)式を用いた疲労センサによる疲労寿命評価手法において、相関係数の積 $k_\beta \cdot k_\gamma$ に 2.5 を用いると、従来手法と同等の寿命推定結果が得られることを確認した。

6. 結 言

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精度よく推定するために、嵐を想定した複数の負荷パターンを仮定し、その嵐荷重と平均応力の変化が重畳する条件下で疲労センサの特性取得試験と十字隅肉溶接継手の疲労強度試験を実施し、疲労センサの出力特性と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。その結果、船舶が遭遇する嵐波形のパターンが異なる場合についても、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、波浪に起因する変動振幅荷重の影響と、積み付け条件の違いによる平均応力変化の影響を表す荷重履歴影響係数を導入することで、精度向上が可能と言える。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ること、および積み付け条件による平均応力が重畳して変動応力範囲が引張状態と圧縮状態で繰り返されるような応力場であれば、(3)式を用いて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である。

本手法を実船に適用する際には、事前に FEM 等の計算結果よりモニタリング部位の疲労センサ貼付時を含む就航状態の応力状態をおおよそ把握し、上記条件を満足する部位を疲労センサによるモニタリング部位として抽出すべきである。また、疲労センサによるモニタリングを実施する際には、事前に PrimeShip-FA のような船体疲労強度計算^{13),14)}を実施し、モニタリング位置の疲労寿命計算値を入手しておくことで、モニタリング結果を用いて、疲労センサの貼付していない部位についても、計算値との相対比較により、実構造の疲労寿命を把握することができる。そして、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

本研究を実施するにあたり、(財)日本海事協会・高野部

長、寺井研究員、川崎重工業(株)・西山基幹職、村岸基幹職より多大なご助力、ご助言を頂きました事を深く御礼申し上げます。

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, JCOSSAR 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. C. 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) 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 (その 2) —任意海域における嵐モデルの構築法—, 日本造船学会論文集(2002)
- 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 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) Takaoka, Y., Nihei, K., Vargas, P., Aalberts, P., and Kaminski, M.L., Application of Fatigue Damage Sensors in the Monitas System, Offshore Technology Conference, 3-6 May 2010, Houston, Texas, USA, OTC-20870
- 9) 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)
- 10) 小林 朋平, 村岸 治, 仁瓶 寛太, 西山 五郎, 延地 義一: 小型疲労センサの実船への適用—耐環境性の向

上, 日本船舶海洋工学会講演論文集 第 1 号 (2005)

- 11) Aalberts, P., Cammen van der, J., and Kaminski, M.L.,
The Monitas system for the Glas Dowl FPSO, Offshore
Technology Conference, 3-6 May 2010, Houston, Texas,
USA, OTC-20873
 - 12) 日本鋼構造協会(JSSC): 鋼構造物の疲労設計指針・同
解説, 技報堂 (1993)
 - 13) 日本海事協会: タンカーの構造強度に関するガイド
ライン (2001)
 - 14) N. Yamamoto, K. Matsuoka, Fatigue Assessment Method
considering the Effect of Mean Stress, Class NK
Technical Bulletin, Vol. 20 (2002)
-