特集

溶接構造物のメンテナンス技術

船舶におけるメンテナンス技術とその動向*

松本 俊之**

Recent Trend of Maintenance Technology of Ships*

by MATSUMOTO Toshiyuki**

キーワード メンテナンス, 疲労, モニタリング

1. はじめに

多くの船舶は海上を航行し、物資や人間を輸送する。その際、船体の傾き（トリム）等を調整するために、船体構造の一部に専用の海水タンク（バラストタンク）を有し、適宜海水を漲水する。このため、他の構造物と比べ次のような保守管理上の特徴がある。

- ・ 厳しい腐食環境下で使用される
- ・ 波浪による不規則変動荷重を繰り返し受けるため、船体構造強度上、疲労強度が重要な因子の一つとなる

本稿では、このうちの疲労強度に関するメンテナンス技術として、疲労モニタリング技術の開発に関する取組みを紹介する。

船体構造強度評価において、疲労強度は降伏強度、座屈強度及び最終強度と並び重要な検討項目の一つである。現在、船舶は想定した就航期間（一般商船の場合は通常25年）に対し、十分な疲労強度を有するように設計されている。しかしながら、

- ・ 設計時に想定した標準的な航路と実際に本船が航行した航路が異なる場合
- ・ 想定以上に厳しい海象に遭遇した場合
- ・ 規則では想定していない荷重パターンを受ける場合（例えば、短期間で荷役を繰り返すシャトルタンカーなど）
- ・ 長期間（25年以上）に亘り運航する場合（LNG 船などの高付加価値船）

においては、設計時の想定と実際の疲労の蓄積度合いの差を把握する必要がある。そこで、本船の疲労の蓄積度合いを把握するために用いられるのが、疲労モニタリングである。疲労モニタリングにより船体構造部材における疲労の

蓄積度合いを監視することができれば、補強や切り替え工事を実施する時期及び範囲などについて、合理的な保守管理が可能になると期待される。また、現状の疲労の蓄積度合いが判明していれば、LNG 船などの高付加価値船の合理的な延命対策も可能になると思われる。

本稿では、この疲労モニタリングに関する研究について紹介する。

2. 疲労及び疲労モニタリング

2.1 疲労

船舶は航行中、繰り返し波浪を受ける。これにより、船体構造部材には繰り返し応力が作用する。一つ一つの応力は小さくても、少しずつ目に見えないダメージ（疲労）が船体構造部材に蓄積されていく。やがて、蓄積した疲労はき裂（疲労損傷）を発生させ、船体構造部材の強度低下を招く。このように、繰り返し応力が作用することにより船体構造部材にき裂を生じさせ、強度低下を招く現象を疲労と呼ぶ。

通常、疲労の蓄積度合いは目視で確認できない。それゆえ、疲労モニタリングにより現在疲労がどの程度蓄積しているかを把握することが重要となる。

2.2 疲労モニタリング

疲労モニタリングとは、疲労の蓄積度合いを監視（モニタリング）するシステムである。疲労モニタリングの手法は、以下のように大別できる。

- モニタリングツールを使用し、疲労の蓄積度合いを推定する手法
- 本船の遭遇海象データを基に疲労強度解析を実施し、疲労の蓄積度合いを推定する手法
- 上記の a) 及び b) を組み合わせた手法

どの疲労モニタリング手法を用いるかは、船種、モニタリング対象箇所数、疲労の蓄積度合いの推定精度、費用、定

*原稿受付 平成25年7月13日

**一般財団法人 日本海事協会 Nippon Kaiji Kyokai

期的なデータ回収法といった様々な因子を考慮のうえ、適切な手法を選択する。

2.3 モニタリングツール

モニタリングツールとは、船体構造部材に作用する応力の大きさ、頻度に反応する機器で、

- a) 犠牲試験片タイプ
- b) 歪ゲージや光ファイバー等を用いた応力頻度計測タイプ

に大別できる（図1）。

犠牲試験片タイプのモニタリングツールは一般的に薄い金属片であり、船体構造部材に溶接又は接着剤で取り付けられる。そして、犠牲試験片上に設けられた切り欠き又は初期き裂から進展したき裂について、その進展量を基に疲労の蓄積度合いを求める。

この犠牲試験片タイプのモニタリングツールの特徴は以下の通りである。

- ・電源が不要である（配線工事が必要ない）
- ・ツール自体は比較的安価である
- ・き裂長さを計測するために、作業員が直接設置箇所まで赴く必要がある
- ・基本的に一定応力下での使用を前提としているため、船舶特有のランダムな応力下での適用性を明確にする必要がある

一方、歪ゲージや光ファイバー等を用いた応力頻度計測タイプのモニタリングツールは、応力計測用の機器（歪ゲージや光ファイバー）と計測データを蓄える本体から成り立ち、船体構造部材に添付した計測用機器を介して作用応力の大きさ及びその頻度を計測する。

この応力頻度計測タイプのモニタリングツールの特徴は以下の通りである。

- ・電源又はバッテリーが必要である（配線工事や船種によっては防爆処理が必要）
- ・配線工事などを含めると、導入費用が掛かる
- ・データケーブル等を用いれば、作業員が直接設置箇所に赴かなくてもデータの回収ができる
- ・船舶に特有なランダムな応力にも適用できる

3. 犠牲試験片タイプの疲労モニタリングツール

3.1 犠牲試験片タイプの疲労モニタリングツール

犠牲試験片タイプのモニタリングツールが本来対象としている応力履歴は、図2(a)に示すような一定応力履歴である。しかし、船体構造部材に作用する応力は図2(b)に示すような、遭遇海象及び積付状態に応じて応力範囲及び平均応力が変化する変動応力履歴である。

そこで、犠牲試験片タイプのモニタリングツールを試験体に取り付け、実際の船体構造部材に生じる応力履歴を模擬した荷重パターン（嵐モデル）と、線形累積被害則に基づき嵐モデルと等価な疲労被害度を与える一定荷重パターン（等価応力モデル）の下で、平均応力を引張側（50 MPa）及び圧縮側（-50 MPa）それぞれ3ケースで疲労試験を実施した（図3）。

疲労試験結果を図4に示す。図4において横軸が繰返しセット数（1セット約15,000サイクル）を、縦軸が犠牲試験片上のき裂進展量を示している。（いずれも3ケースの平均を図示）。

このような疲労試験を様々に実施し、犠牲試験片タイプのモニタリングツールを船体構造部材に適用する場合の修正係数を提案した⁶⁾。

3.2 実船への試適用

各種モニタリングツールをLNG船、コンテナ運搬船、鉤

図1 モニタリングツールの一例（a：犠牲試験片，b：応力頻度計測器）

図2 応力履歴

図3 荷重モデル

図4 疲労試験結果

図5 モニタリングツールの設置位置

図6 二重底ボイドスペースにおける犠牲試験片上のき裂進展量

図7 二重底ボイドスペースにおける応力頻度計測結果

石運搬船及び油タンカー等に対し試適用した。そしてモニタリングデータを定期的に回収し、疲労の蓄積度合いの推定を実施した。ここでは、船の長さ318mの鉱石運搬船の例を示す。計測期間は2009年から2011年で、航路は日本—ブラジルである。なお、データの回収は8回行われた。

モニタリングツールは船体中央部における二重底ボイドスペース及び下部スツール内のそれぞれ2箇所に設置した（図5）。

計測結果の一例として、二重底ボイドスペースにおける計測結果を図6及び図7に示す。図6は犠牲試験片上のき裂進展量を示し、図7は応力頻度計測結果を示している。図6より、き裂進展量は計測時期により大きく異なることが分かる。また同様に、図7より応力頻度分布も計測時期により異なることが分かる。この計測結果より、遭遇海象に応じて疲労の蓄積度合いが異なるという現象をモニタリングツールにより把握できることが確認された。

また、実船への試適用を通じて判明したのが、「作業員が陸上から本船に乗船してデータを回収するシステムの場合、本格的な疲労モニタリングの運用を行うことは難しい」ということである。すなわち、

図8 疲労の蓄積の様子

・日本に寄港しない航路の場合、海外で作業員がデータの回収を行う必要がある

・多数の船舶で同時にモニタリングを行う場合、作業員の確保が難しくなるからである。

4. 疲労モニタリングシステムの構築

設計時における疲労強度評価からモニタリング箇所の選定、就航後の定期点検まで一貫した評価システムの構築に関する検討を行った。疲労モニタリングの流れを以下に示す。

- ①疲労強度解析及び過去の損傷事例に基づき、疲労強度上危険な箇所をリストアップする。
- ②疲労モニタリングの手法を決定する。
- ③損傷時の重大さ、アクセスの容易さ等を考慮してモニタリング対象箇所を決定する。
- ④疲労モニタリングツールを設置する。
- ⑤就航後、定期的にデータの回収作業を実施する。
- ⑥疲労の蓄積度合いを推定する。
- ⑦本船の保守、管理計画に疲労蓄積推定結果を反映させる。

これらの項目について、順次説明していく。

4.1 疲労モニタリング対象箇所のリストアップ

設計海域及び設計寿命を定めて疲労強度解析を実施するとともに、過去の損傷事例を考慮して疲労モニタリングの対象候補箇所をリストアップする。

4.2 疲労モニタリングの手法決定

船種、モニタリング対象箇所数、疲労の蓄積度合いの推

定精度，費用，定期的なデータの回収法等の様々な因子を考慮して，適切な手法を選択する。

- a) モニタリングツールの使用
- b) 遭遇海象データから疲労の蓄積度合いを推定
- c) 上記 a) 及び b) の組み合わせ

なお，b) の手法では，遭遇海象データを，

- ・航海日誌や気象情報を基に推測する
- ・加速度や傾斜角といった船体運動を計測し，そのデータを基に船体運動解析を実施して推測する

といった方法が考えられる。そして，推測した遭遇海象データを基に疲労強度解析を実施し，疲労の蓄積度合いを推定する。

4.3 疲労モニタリング対象箇所の決定

損傷時の重大さ，アクセスの容易さ等を考慮してモニタリング対象箇所を決定する。しかしながら，リストアップされた全ての危険箇所にモニタリングツールを設置できるわけではない。なぜなら，設置工事及びデータ回収に掛かる費用及び手間が膨大になるからである。

そこで，以下の基準を基にモニタリング対象箇所を決定する。

- ・疲労損傷が生じると船体構造に致命的な影響を与える箇所
- ・疲労強度上危険な箇所のうち，モニタリングツールの設置工事及びデータ回収が容易な箇所
- ・上記箇所が多数ある場合には代表的な箇所を選ぶ
- ・モニタリングツールを設置しない箇所については，疲労強度解析結果に基づきモニタリングツールを設置した箇所との相対評価を行う

4.4 モニタリングデータの回収

就航後，定期的にモニタリングデータを回収することになる。試適用では作業員が陸上から本船に乗船してデータの回収を行っていた。しかし，日本に寄港しない船舶で疲労モニタリングを実施する場合，又は同時に多数の船舶に対して疲労モニタリングを実施する場合のことを考慮すると，本船乗組員の手でデータの回収を行えるシステムが望ましい。

4.5 疲労の蓄積度合いの推定及び保守管理計画への反映

犠牲試験片タイプのモニタリングツールの場合は，犠牲試験片上のき裂長さから現時点での疲労被害度を換算する。

一方，応力頻度計測タイプのモニタリングツールの場合は，得られた応力頻度分布を用い，船級協会の疲労強度評価手法に則り疲労被害度を算出する。

現在までの疲労の蓄積傾向から将来の疲労の蓄積度合いを推定し，今後の保守管理計画に反映させる。図 8 に疲労モニタリング結果から疲労の蓄積度合いを推定した結果の模式図を示す。

5. ま と め

以上，犠牲試験片タイプの疲労モニタリングを用いたより合理的な船舶の保守管理の可能性について，これまでの試みを中心に述べてきたが，犠牲試験片タイプの疲労モニタリングは，特にデータの収集という点において実用上の問題がある。今後は，歪ゲージや光ファイバー等による応力モニタリングとの併用や，事前の構造解析により波浪荷重と船体構造応答との関係を把握しておき，それとの関係付けでより合理的かつ実地的なモニタリングデータの活用を考えるなどの検討が，疲労強度モニタリングの実用化及びその船体メンテナンスへの実地的な活用においては，重要と考える。

参考文献

- 1) 山本規雄，他：実船の応力計測と犠牲試験片観察，平成18年度日本船舶海洋工学会東部支部春季講演会，2006。
- 2) 山本規雄：船舶の疲労寿命の予測方法，日本海事協会会誌第278号，2006。
- 3) 高野裕文，他：疲労センサを使用した LNG 船の疲労強度管理システム，JCOSSAR2007 第6回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム，2007。
- 4) 山本規雄，他：疲労センサを応用した船体寿命監視システム，日本海事協会会誌第282号，2007。
- 5) 山本規雄：船舶の Total Life Assessment，溶接学会誌 Vol.77，2008。
- 6) 孝岡祐吉，他：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，平成20年度秋季講演会，2008。
- 7) 山本規雄：船体構造の寿命に大きな影響を及ぼす疲労・腐食問題及び管理，日本鉄鋼協会会誌 Vol.13，2008。
- 8) 技術研究所：LNG 船の生涯に亘るトータルサポートシステムの開発，日本海事協会会誌第288号，2009。
- 9) 技術研究所：疲労余寿命評価に基づく就航中管理に関する研究，日本海事協会会誌第295号，2011。