

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

船体部	小岩敏郎、高野裕文、 宇佐美陽生、土橋宏嗣
技術研究所	山本規雄、寺井幸司
川崎造船	孝岡祐吉、下田太一郎
川崎重工業	仁瓶寛太、小林朋平

1. 緒 言

一般に LNG 船は特定のプロジェクトに例えば 25 年という長期間の運送契約が結ばれることが多い船種である。また高付加価値船であるために、その減価償却期間を考慮すれば、資産の有効利用の観点から通常の船舶と比べて長期間使用されることが多い船種であるといえる。さらには、危険物である LNG を大量に運搬する船として、社会からの安全運送への要求、例えば荷主・運航者への CSR (Corporate Social Responsibility) の一部として、また国家のエネルギー政策上の主要一次エネルギー源としての LNG の安定供給への要求は年々高まりつつある。

このように LNG 船は長期間にわたり安全に貨物を運搬することが至上命題であるが、船舶を長期間安全に使用するに当たっての一番大きな問題はその経年劣化である。船舶の経年劣化の主因としては、

- 腐食による劣化（衰耗損傷）
- 疲労による劣化（疲労損傷）

があげられる。

本研究では“疲労による劣化”に焦点を当てる。

LNG 船では疲労損傷の早期発見は非常に重要である。このような疲労損傷対策としては、通常次の 2 つの方法が採用されている。

- 設計及び建造段階における対策
- 就航中の保守対策

これらはどちらが欠けても疲労損傷対策としては十分とは言えず、両者は相互を補完する関係にあると言える。

設計及び建造段階における対策としては、従来は経験に基づく応力集中を避ける詳細構造を採用するなど、定性的な手法が中心であったが、近年では設計時に疲労強度設計基準に従い構造詳細部への強度評価が行われる事が一般的である。例えば、NK では最新の研究開発成果に基づく実用的な疲労強度評価手法を PrimeShip-FA (Fatigue Assessment) として開発し、その手法は幅広く疲労設計に活用されている。[1]、[2]、[3]

就航中の保守対策とは、就航中の規則による検査、あるいは運航者の自主点検・保守である。保守・管理には大別して事後保全 (Passive management) と予防保全 (Pro-active management) の 2 種類がある。

事後保全とは損傷などトラブル発生後に対応を取っていく方法であり、予防保全とは損傷などを未然に防いでいく方法である。しかしながら、従来疲労損傷は発生した後、ある長さには達するまでは視覚的には発見できないのが実情である。疲労損傷を発見する度に類似構造箇所を含めて切り替え・補強するという事後保全的手法が取られてきた。

設計及び建造段階における対策では、個船の疲労寿命を考えたとき、設計基準における標準的な航路を標準的な積載で運航される場合もあれば、特定航路を特定の積載条件で運航さ

れている船舶もあるため、必ずしも個船の特定構造箇所の実際に蓄積した疲労損傷度について正確な値を与えるものではない。そのため、設計及び建造段階における対策のみでは個船の適切かつ合理的な保守・管理に直接活用するには必ずしも十分ではない。従って、個船に対して効果的に保守・管理を行い、長期間の安全運航の目的に供するためには、就航中の保守対策をより技術的に発展させた予防保全的な手法が期待されている。

この予防保全的手法は実際の特定制造箇所が受ける応力履歴あるいは疲労損傷度等の情報を直接あるいは間接に、また簡易に得ることができるツールを利用する新しいスキームにより、より有効に適用できると考えられる。著者らはこの新しいスキームとして、SR245で提案している船体寿命モニタリングコンセプト[4]を参照して、船体疲労管理システム(Hull Fatigue Management System)を船体経年劣化管理システム(Hull Aging Management System)の主要な構成要素として提案する。Hull Fatigue Management Systemは中核ツールとして、著者の一部が開発した疲労センサの観察結果に基づく、就航船の実構造の累積疲労被害度の評価を組み込むところに特長がある。

本研究ではこの船体疲労強度管理システムを提案するとともに、疲労センサを用いた、就航船の実構造の累積疲労被害度の評価手法の精度向上のための試験結果や実船適用試験結果について示し、実用化の可能性について考察する。

2. 船体疲労強度管理システム (HFMS)

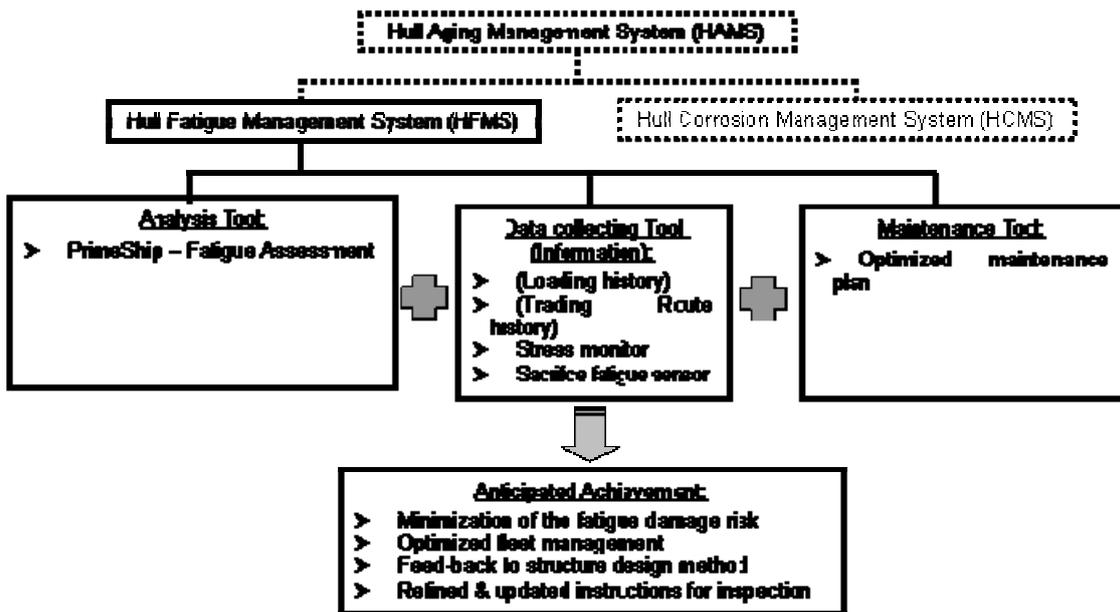


図 1 疲労強度管理システム概念図

図 1 に船体疲労強度管理システム (HFMS) の考え方を示した概念図を示す。HFMS は大きく分けて、以下の 3 つのツールより構成される。

Tool 1: 疲労強度設計ツール(Analysis tool)

Tool 2: 累積疲労損傷度収集ツール(Data collecting tool)

Tool 3: 保守&管理ツール(Maintenance tool)

Tool 1 は例えば NK で開発した PrimeShip-FA などの疲労設計 (評価) 手法を意味し、設計段階における評価結果から把握できる各構造箇所の相対的な疲労“感度”に基づき、Tool 2

による計測箇所を効果的に選択できる。また、Tool 2 で得られたデータに基づき疲労強度を再評価することにより、有効な保守管理上の情報を得ることができる。

Tool 2 にはいくつかの手法が考えられるが、3 つの代表的な方法を表 1 に示す。

表 1 累積疲労損傷度収集ツール比較

	A:	B:	C:
	Navigation Record Method	Stress Monitoring Method	Fatigue Sacrificial Specimen Method
Procedure	By recording for navigation routes and Ship's conditions	By stress monitoring for the subject members.	By fatigue sacrificial specimens attached on the monitoring members.
Equipment	-	Strain gauges, cables, computers for data accumulation, etc.	Fatigue sacrificial specimen
Fatigue damage assessment	Re-analysis by a fatigue design standard	Re-analysis by using accumulated stress history	By conversion from propagated crack length on the specimens.
Labor	Large	Large	Small
Maintenance	-	Large	Small

A の方法では保守計画等において定められた間隔で、記録された航路や積み付けデータを Tool 1 の疲労設計手法にフィードバックして再解析することにより、その時点での構造に蓄積した疲労損傷度を評価することができる。この方法では、実際に蓄積された疲労被害度、応力履歴などは直接的に知る事ができず、解析条件となる就航航路、積み付け頻度が明確でなければならないなど制限がある。また、想定している海象条件は観測値を統計処理したデータを用いるため、実際の遭遇した海象とも異なる。

B の方法では計測された応力履歴をもとに疲労解析を行うことで応力集中が問題となる部材に蓄積した疲労損傷度を計算することができる。この方法においては、実際に構造に作用した応力を用いることで、就航履歴を反映した疲労強度評価ができる。一方で計測機器の配線やコンピュータの設置など、施工上の労力コストは少なくない。

C の方法では疲労センサで計測された亀裂長さに、予め得られているセンサの亀裂進展と実構造の蓄積疲労損傷度を関連づける係数を掛けることで構造に蓄積した疲労損傷度を直接的に求めることができる。また、間接的に構造に作用した応力履歴を推定できると共に、施工上の労力・コストが非常に軽微である。

Tool 3 の保守・管理ツールとしては、運航者が運用するメンテナンスプランが挙げられるが、Tool 1 及び Tool 2 により得られる個船の特定箇所についてのより正確で update された蓄積疲労損傷度を用いて適宜改善することで、長期的な視野で最適化した保守計画を立てることができる。

このような新しいスキームである HFMS を実用化することにより、疲労損傷の未然防止、効果的な検査・点検、最適化されたフリートの運用・運航プランの策定等のメリットが得ら

れ、については LNG 船の長期間に亘る安全運航の実現、また資源としての船舶の有効活用といった目的達成に寄与することができる。

著者らはこのスキームを実現させるために、簡易的かつ実用的に蓄積した疲労損傷度を監視するツールとして「疲労センサ」(Table 1 の C に相当) を用いた疲労損傷度評価法を開発した。「疲労センサ」を用いた HFMS の運用フローを図 2 に示す。

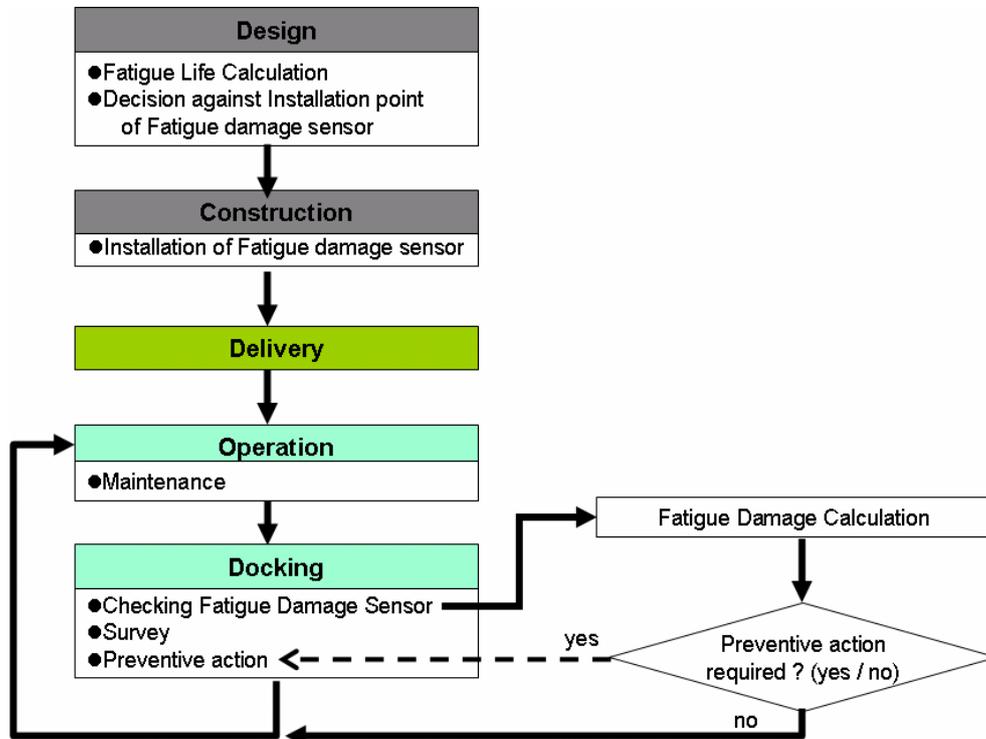


図 2 HFMS 運用フロー

3. 疲労センサ

3.1 疲労センサのコンセプトと概要

(a) 疲労センサのコンセプト

著者の一部が開発した疲労センサ (FDS:図 3) [4]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。

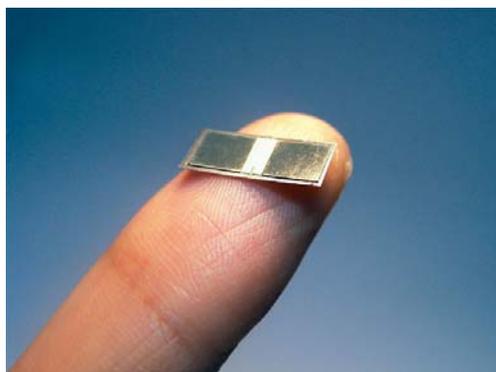


図 3 疲労センサ

図 4 に示すように、従来の歪ゲージによる方法（表 1 の B に相当）に比べて、以下の特長を持つ。

- 計測機器や配線が不要
- 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
- 小型で応力集中部への適用が可能
- 歪ゲージと同様な貼付け型

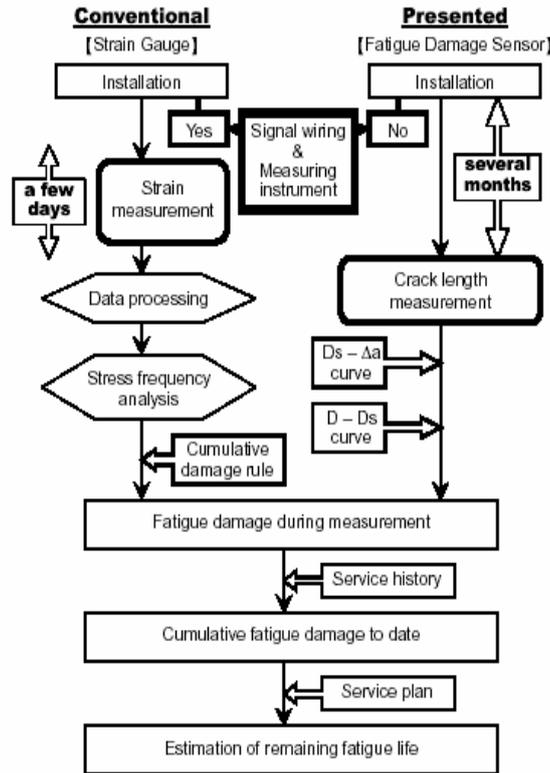


図 4 歪ゲージと疲労センサを用いた余寿命診断比較

(b) 疲労センサの概要

疲労センサは図 5 に示すようにセンサ箔とベース箔の 2 枚の金属箔で構成されている。センサ箔の中央部には歪を増幅するための溝が形成され、その溝の中央部の片端に初期スリットが形成されている。

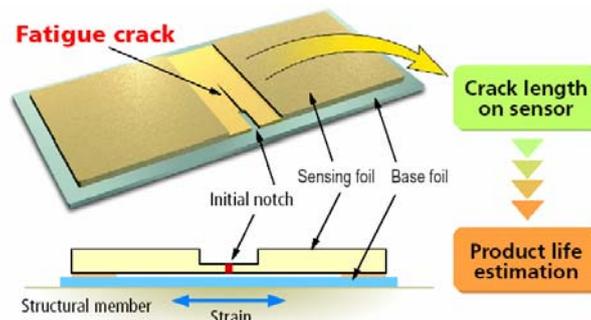


図 5 疲労センサの構造

疲労センサは構造部材のホットスポット近傍に貼付すると、ある程度の大きさの繰返し応力に対してセンサ箔のスリット先端から疲労亀裂が発生して進展する。疲労センサの亀裂進展量（長さ）は繰返し応力範囲の大きさと繰返し数に依存し、また、その亀裂進展特性はセンサ亀裂長さに無関係である。すなわち疲労センサの亀裂進展量（長さ）は貼付期間に構造が受けた疲労損傷度に比例する。すなわち疲労センサの亀裂進展量（長さ）は貼付期間に構造が受けた疲労損傷度に比例する。

したがって、図 6 に示す手順の通り、一定期間後に疲労センサの亀裂長さを計測し、その結果から実構造の累積疲労被害度即ち疲労寿命を相対的に求めることができる。

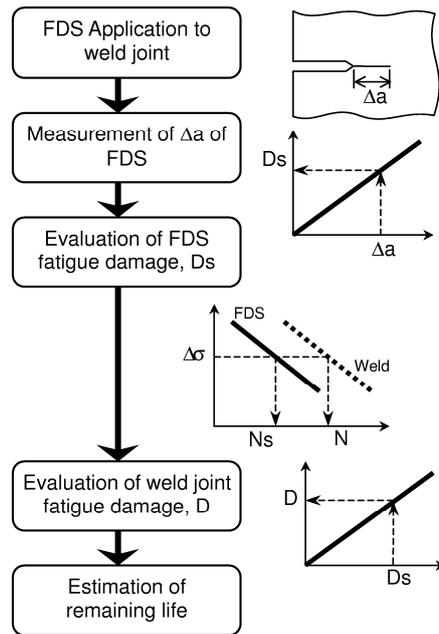


図 6 疲労センサを用いた疲労寿命評価フロー

3.2 実船応力下での疲労センサ特性取得試験

鋼橋や鉄道車両・台車枠については、その実働荷重下で疲労センサに基づき実機の疲労損傷度を精度良く求められることが検証されている。[6]、[7]

船舶では、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、また積載条件によって平均応力が大きく変化するなど船舶特有の応力状態が存在するが、そのような応力状態が疲労センサの亀裂進展特性に与える影響はまだ十分には解明されていない。そこで実船での実航海中の応力状態下における疲労センサの亀裂進展特性について実験による検証を試みた。

(a) 疲労センサ

1 回の試験につき、数種類の疲労センサを数枚ずつ板厚 8mm、板幅 40mm の JIS-SS400 鋼板へ微小なスポット溶接にて貼付した。なお、この貼付方法は後述の実船適用試験にて、長期間の耐久性が検証されている。疲労センサ被貼付部材を電気油圧サーボ式疲労試験機にて繰返し負荷した。試験環境は常温大気中である。

(b) 荷重条件

- 変動応力範囲試験

実船にて約 2 年間の計測で得られた船体縦曲げ応力波形のうち、最も荒れた海象相当での

20 分間計測データ[8]に、

- 平均応力がほぼゼロとなるように補正した。
- 試験波形は計測波形の比例倍とした。(任意の係数 α を計測された応力値に一律に乗じた。)
- 疲労センサの亀裂進展に影響しない十分小さい応力範囲 10MPa 未満を削除した。

等の加工をした波形を疲労試験機に入力した。一例として $\alpha=1.0$ としたときの入力応力波形を図 7 に示す。(このときの応力波形を Case 1 とおく) この応力波形を 1 ブロックとして繰返し負荷した。

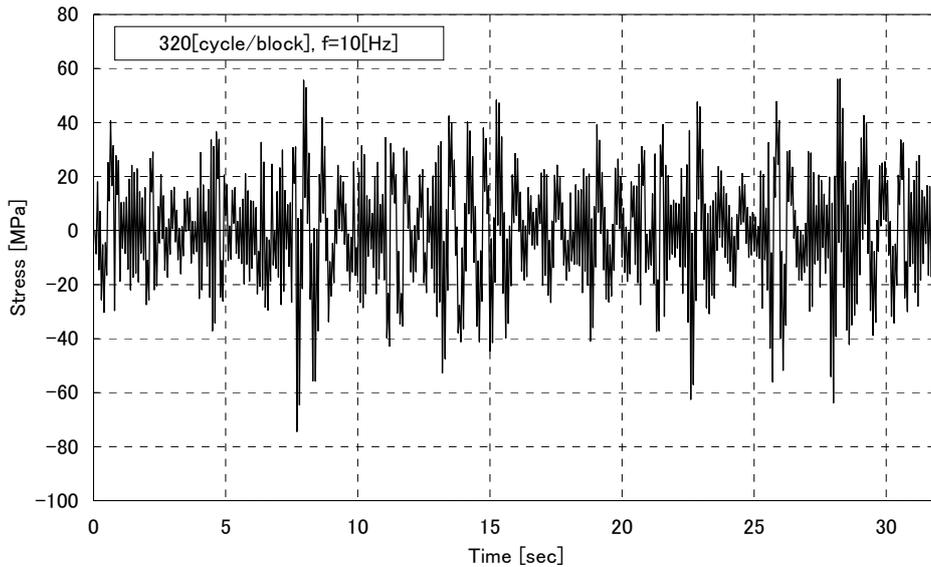


図 7 変動応力範囲試験で入力した応力波形 (Case 1)

計測された応力は部材の公称効力 σ_n に相当する。波浪により変動する公称効力範囲 $\Delta\sigma_{n,i}$ とその頻度について、等価公称効力範囲 $\Delta\sigma_{n,eq}$ とその等価繰返し数 n_{eq} は累積損傷則によると次式で算出される。

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

$$n_{eq} = \sum_i n_i$$

m は S-N 線図の傾きをあらわす指数で、疲労センサならびに溶接継手は $m=3$ とおける。変動応力範囲試験の一例として Case 1 の負荷条件を表 2 に示す。

表 2 試験条件 - 変動応力範囲試験

α	1.0
Frequency	10[Hz]
$\Delta\sigma_{n,max}$	131[MPa]
$\Delta\sigma_{n,min}$	10[MPa]
$\Delta\sigma_{n,eq}$	44[MPa]
σ_{mean}	0[MPa]
n_{eq}	320[cycle/block]

● 一定応力範囲試験

変動応力範囲試験との比較のため、一定応力範囲試験を実施した。一定公称応力範囲 $\Delta\sigma_n$ の値は、変動応力範囲試験での等価公称応力範囲 $\Delta\sigma_{n,eq}$ と一致させた。平均応力はゼロとし、応力比 $R=-1$ (両振り) とした。一例として Case 1 の試験条件を表 3 に示す。

表 3 試験条件 (一定応力)

Frequency	10[Hz]
$\Delta\sigma_n$	44[MPa]
σ_{mean}	0[MPa]

(c) 試験結果

前節に示した変動応力範囲及び一定応力範囲を負荷し、疲労センサの亀裂長さと負荷繰返し数の関係を取得した。一例として Case 1 の試験結果を図 8 に示す。図 8 は変動応力範囲試験ならびに一定応力範囲試験の疲労センサ各 2 枚の亀裂進展状況を示している。図 8 の縦軸は疲労センサの亀裂長さを疲労センサの幅 W で無次元化している。なお、横軸は負荷繰返し数を一定応力範囲試験での疲労センサ破断寿命で無次元化した、 N/N_f としている。

いずれの試験においても、疲労センサは亀裂長さに依らず、安定した亀裂進展特性を示しているが、今回使用した疲労センサの場合、その亀裂進展速度は変動応力範囲試験結果の方が一定応力範囲試験結果よりも、ある一定の比率で遅くなる傾向(遅延効果)が認められた。

したがって、疲労センサの基づき評価される疲労強度は、実航海での応力範囲の変動による影響がなく、累積疲労損傷が成り立つとの前提に立つと、予め得られている一定応力範囲での疲労センサの疲労特性に、変動応力に対する影響度を考慮することで評価できることが確認できた。

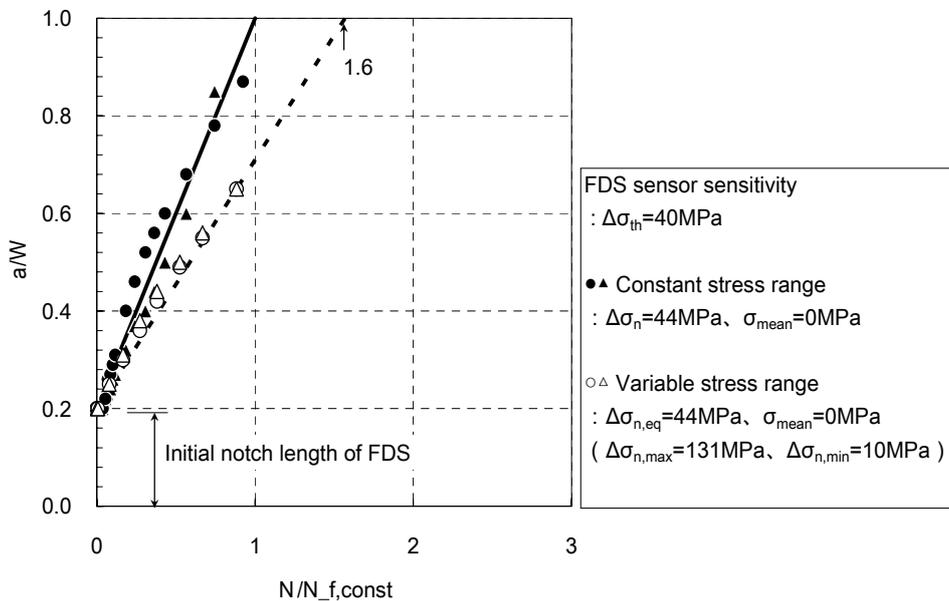


図 8 疲労センサの亀裂進展特性 (Case 1)

3.3 疲労センサの LNG 船への適用

(株)川崎造船建造の貨物容積 145,000m³、MOSS 型 LNG 船 (以下 A 船という) の船体構造に疲労センサを試験的に貼付し、実働荷重下での累積疲労被害度をセンサの実測値より求め、PrimeShip-FA による疲労寿命計算結果と比較し、疲労センサによる船体構造の余寿命

診断を実施した。

PrimeShip-FA の計算結果により、比較的累積疲労被害度が高いと考えられ、かつ、恒久足場の設置を必要としない、容易に検査可能な船体構造の応力集中部位 6 箇所合計 20 枚の疲労センサを貼付した。[9] 各部位にはセンサ感度 ($\Delta\sigma_{th}$) が 40MPa、60MPa、80MPa の 3 種類の疲労センサを貼付した。貼付後の状態の一例を図 9 に示す。A 船の Dock to Dock の診断期間に疲労センサが問題なく動作するように、対象部位へのセンサの取り付けは、耐久性が優れているスポット溶接により実施したが、一部、接着剤によるセンサの貼付も行い、耐久性の実船確認を行った。貼付した疲労センサは、防水のため保護構造により保護し、貼付位置にはマーキングを実施した。

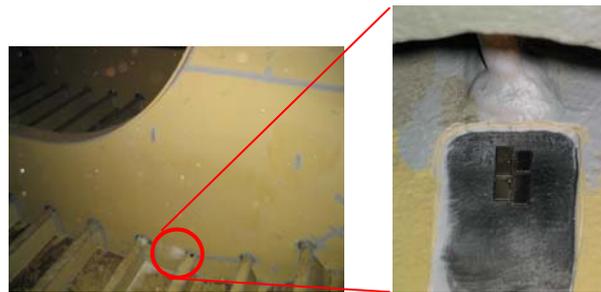


図 9 疲労センサ貼付例（塗装前）
（バラスタタンク内の船底縦通肋骨貫通部のヒール部に 4 枚貼付）

A 船は就航後、2年2ヶ月後に行われた第1回目のドライドック時に余寿命診断を行った。疲労センサによる累積疲労被害度の実測データの比較検証には、A 船航海中の種々の実測データが必要となるが、少ない解析工数による船体マネジメントシステムの実用化を考慮すると、出来るだけ少ない付随データを用いて、疲労センサによる累積疲労被害度の実測データを補完した方が良い。そこで、センサ計測中の A 船の航路データ（すなわち、積み地、揚げ地、及び航海日数）のみをこの付随データとして用いることにした。

A 船の就航後第1回ドライドック時における疲労センサの点検の結果、貼付した疲労センサ 20 枚とも、貼付状態に問題なく、船舶での 2~2.5 年毎の Dock to Dock の長期に亘る計測が十分可能であることが実証された。

計測点の位置における平均応力に注目すると、疲労センサに顕著な進展が見られなかったボトムロンジでは満載状態及びバラスタ状態での平均応力が圧縮側にあり、各々の変動応力範囲からみると、ほぼ応力比が圧縮側に無限大の変動応力状態に近い。一方、疲労センサに亀裂進展が認められた部位（タンクカバーと上甲板の暴露側溶接部）では満載状態及びバラスタ状態での平均応力が引張側にあり、各々の変動応力範囲からみると、ほぼ応力比が 0 の変動応力状態に近い。

図 10 に疲労センサの亀裂進展値より PrimeShip-FA の計算値（応力範囲）の比を用いて相対比較した推定疲労寿命に変動応力の 3 乗を乗じた値と各平均応力の関係を示す。

明確な亀裂進展が認められなかったセンサに関しては、同じ計測点で最も高感度のセンサに微小亀裂があったと仮定して、計測点の推定疲労寿命を求めた。

疲労寿命はおおよそ変動応力の振幅の 3~4 乗に反比例すると考えてよいので、センサの亀裂進展挙動が平均応力の影響を受けないのであれば、図 10 の傾きは水平に近くなる。しなしながら、図 10 から見る限り、センサによる疲労寿命推定値は平均応力値が圧縮にあるほど長寿命である傾向にあり、疲労センサにより平均応力影響を検知できていることが窺える。

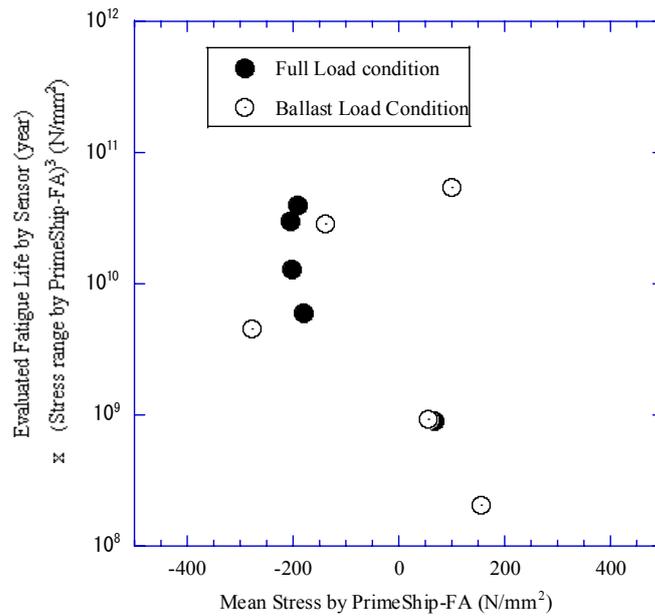


図 10 平均応力に対しての疲労センサの感度

4. 考察

4.1 航路域修正係数

A 船の処女航海からの就航路履歴により PrimeShip-FA の疲労強度計算に用いる航路域修正係数(η_s)を求めると $\eta_s = 0.25$ となる。図 8 に示すように、変動荷重下での疲労センサの亀裂進展の一定荷重下での亀裂進展に対する遅延度係数が各感度の疲労センサ毎に求められるので、この値(図 8 より遅延度係数 1.6)を、累積疲労被害度を求めるための修正係数 η_s に掛けて、変動荷重下での修正を行うと $\eta_{s, mod} = 0.4$ となる。

PrimeShip-FA の解析では、航路域修正係数は World Wide ルートで $\eta = 0.5$ 、北大西洋ルートで $\eta = 1.0$ と定義されており、今回疲労センサの実測値より導出された航路域修正係数 ($\eta_{s, mod} = 0.4$) は海域により定義された先の航路域修正係数との違いを良くあらわしている。A 船の航路データにより、疲労センサの実測値より導出された航路域修正係数は PrimeShip-FA で定義されている World Wide ルートより小さい。実際、A 船は World Wide ルートより少し穏やかな海象を航行していたため、実態にも一致している。

LNG 船に対して、疲労センサの特性を十分考慮した上で、PrimeShip-FA の疲労設計結果を参考にして、監視対象部材を選択すれば、その部位の累積疲労被害度即ち推定疲労寿命を精度良く求めることが可能になり、相対比較により他の応力集中部位に於けるそれらの値も推定することが可能となり、HFMS の Concept の実用化が可能になる。今後、LNG 船に関して、多くの実船計測データを集積することにより更に精度良い LNG 船における HFMS の構築が可能であると考えられる。

船舶において実働荷重下での寿命診断はこれまでほとんど行われておらず、今回の LNG 船の実船適用で、船体の補修時期や補修要領を Pro-active に判断できるようになったのは意義が大きいと考えられる。

4.2 HFMS 適用によるメリット

HFMS を適用することにより得られるメリットは実際運用した上で分かることであるが、大きく分けて 2 つのメリットが期待される。すなわち、潜在的亀裂発生リスクをコントロー

ルできるという信頼性向上のメリット及び合理的なメンテナンスを行うことで得られるコスト面からのメリットの2つのメリットである。疲労センサ等関連メーカーはさることながら、荷主、船主・運航者、造船所、船級も含めて、関連業界全てが様々な形で新技術取り入れへの評価を得ることができ、メリットを享受できるものと期待される。ひいては資源の有効活用につながることを期待でき、CSR（企業の社会的責任）の観点から関連業界全ての企業イメージの向上が期待される。

以下に享受できることが想定されるメリットについて列記した。

-1. 荷主

- ① 船舶の疲労の進行具合を認知できること、すなわち潜在的な亀裂発生リスクを把握することでより信頼性の高い船を選択的にチャーターできる。
- ② チャーターした船舶の疲労損傷を未然に防ぐことで積荷の長期に亘る安定供給を実現できる。→株主や社会全体から高い評価

-2. 船主・運航者

- ① 合理的なメンテナンスや最適な運航が実施でき、無駄なコストを省くことができる。→株主から高い評価
- ② 船体構造の疲労度を管理した信頼性の高い船舶を荷主に提供できる。→荷主から高い評価
- ③ 疲労損傷を未然に防ぐことで長期に亘って安定的な運送が可能となる。→荷主から高い評価

-3. 造船所

- ① 疲労を検知できるセンサの取り付けを意識した疲労設計をしている船舶を提案できる。→船主から高い評価（更なる受注）
- ② センサなどから得た知見を元にした船舶の疲労設計へのフィードバック。→船主から高い評価

-4. 機器メーカー

- ① 疲労センサなどの疲労を検知できる機器を供給できる。→船主から高い評価

-5. 船級

- ① 船舶の安全運航への寄与。→船主から高い評価
- ② センサなどから得た知見を元にした船舶の検査や図面審査へのフィードバック。→造船所、船主から高い評価
- ③ 新たな設計思想による設計船への保険的な適用。→造船所、船主から高い評価

以上のように HFMS を適用することで船舶を取り巻く関連業界全てに利益をもたらすことができるのは非常に意義が大きいと考えられる。なお、これらメリットの相関図を図 11 に示す。

今後は HFMS 適用の有無による利益の差を定量的に示していく必要がある。

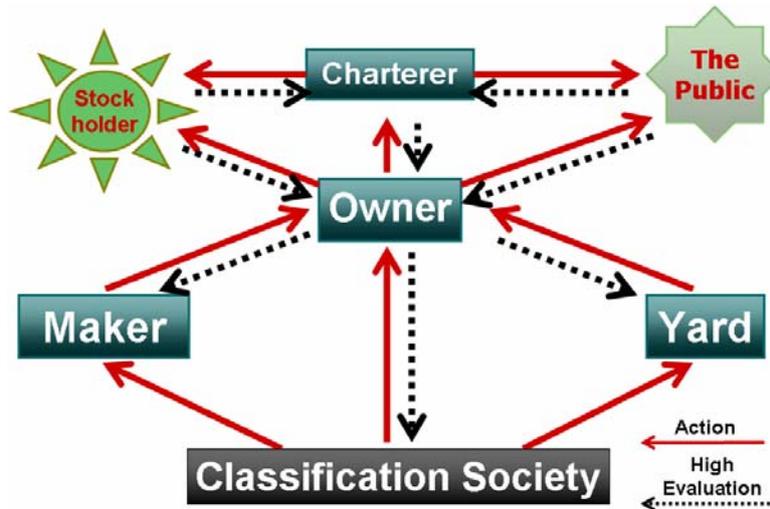


図 11 HFMS 適用によるメリット相関図

5. 結言

著者らは新しいスキームとして船体疲労管理システム（Hull Fatigue Management System）を船体経年劣化管理システム（Hull Aging Management System）の主要な構成要素として提案した。

この HFMS の中核となる Tool として、簡易的かつ実用的に蓄積した疲労損傷度を求める「疲労センサ」を用いた疲労損傷度評価法を開発した。

開発した評価法に対して、疲労試験を実施し、疲労センサの亀裂進展の遅延度係数をセンサ感度毎に設定することで、船舶特有のランダム荷重下での実構造の累積疲労被害度を精度良く求めることが可能であることを確認した。また、LNG 船への本評価法を試験的に適用することでこの評価法の検証を実施した。

今回、LNG 船への適用試験結果で得られたように、疲労センサ適用対象部位の平均応力の評価への影響、疲労センサ貼付時の船体コンディションの影響等については、今後更に研究を続けていく予定である。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、川崎造船・西山グループ長殿、川崎重工業・村岸課長殿より多大なご助力、ご助言頂きました事を深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 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)
- 2) 日本海事協会 “鋼船規則 C 編 2005 年度版”
- 3) YAMAMOTO, N and MATSUOKA, K, ‘Fatigue Assessment Method considering the Effect of Mean Stress’, Class NK Technical Bulletin, Vol. 20, 2002
- 4) THE SHIPBUILDING RESEARCH ASSOCIATION OF JAPAN, ‘Report of Ship Research Panel 245 -A Study on the Fatigue Life of Double Hull Tanker Structure’, 2002(in Japanese)
- 5) MURAGISHI, O., NIHEI, K. & KOBAYASHI, T., ‘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

- 6) KAWAGUCHI, Y., OHGAKI, K., KOBAYASHI, T., KAWAJIRI, K. & IMASHIOYA, M., 'Comparison of Remaining Life Evaluations by Fatigue Detecting Sensor and Stress Frequency Method', 58th Annual Meeting, Japan Soc.C.E., 2003. (in Japanese)
- 7) KOBAYASHI, T., MURAGISHI, O., NIHEI, K. & OKU, Y., 'Development of Small Fatigue Detecting Sensor and its Application to Products, 2nd symposium on Evaluation and diagnosis, Japan Soc.M.E.', 2003. (in Japanese)
- 8) 山本規雄、岡本和之、熊野厚：“実船の応力計測と犠牲試験片観察”、日本海洋工学会春季講演会、2006
- 9) MIYASHITA, K., KOBAYASHI, K., TAKAOKA, Y., EBIRA, K., TOMA, Y., & KUBO, M., 'The Larger LNG Carrier (145,000 m³ Type) Aiming at Low Operation Cost', Proceedings of the 14th International Conference & Exhibition on Liquefied Natural Gas, Doha, Qatar, 2004.