

船体構造デジタルツインの開発

岡 正義*, 馬 沖*, 陳 曦*, 小森山祐輔*

Development of Digital Twin for Ship Structures

by

OKA Masayoshi*, MA Chong*, CHEN Xi* and KOMORIYAMA Yusuke*

Abstract

This paper presents the results obtained through the development of the digital twin, including the basic concept of the Digital Twin for Ship Structure (DTSS), hull monitoring, numerical simulation, data assimilation, and the digital twin open platform i-SAS. The DTSS can contribute to more optimal ship design, construction, and operation by clarifying and visualizing the actual hull structure performance during operation and reducing uncertainties in load and strength estimation for structural integrity assessment. The technical feasibility of the DTSS was verified through tank model tests and a field trial on an ore carrier in service. In addition, a fatigue evaluation method based on sequential analysis and numerical simulation was proposed as a necessary technology for digital twin development, and the estimation accuracy was verified using hull monitoring data from a series of eight container carriers. The DTSS developed in this study can predict both the structural response and wave conditions, thus expanding the possibility of reproducing any ship response in waves, including ship motion and cargo behavior. Such an extension is essential for the construction of future ship digital twins. Furthermore, the digital twin methodology and system developed in this study can be applied not only to ships, but also to offshore structures such as floating wind turbines, thus demonstrating a wide range of applications.

*構造・産業システム系

原稿受付 令和6年9月27日

審査日 令和6年12月2日

目 次

1. まえがき	50
2. 船体構造デジタルツイン	51
3. デジタルツイン構築のための要素技術	52
3.1 ハルモニタリング	52
3.1.1 供試船及び計測項目	52
3.1.2 計測波形の例	52
3.1.3 応力評価	53
3.1.4 疲労評価	54
3.1.5 応力を推定する方法の提案	56
3.1.6 推定精度の検証	56
3.2 数値シミュレーション	57
3.3 データ同化技術	58
3.3.1 波スペクトル法	58
3.3.2 カルマンフィルタ法	59
3.3.3 iFEM	60
3.3.4 各手法の特徴と活用方策	60
4. デジタルツイン・システム	61
4.1 デジタルツイン・プラットフォーム i-SAS	61
4.2 水槽実験による検証	62
4.2.1 データ同化手法の検証	62
4.3 フィールド実証	65
4.3.1 供試船	65
4.3.2 オンボード・モニタリングシステム	65
4.3.3 計測されたデータ	68
4.3.4 計測データの解析による健全性評価	68
4.3.5 データ同化手法のフィールド実証	70
4.3.5.1 固有モード解析	70
4.3.5.2 非計測の応力の推定	71
4.3.5.3 ハルガーダ荷重	71
5. まとめ	71
謝 辞	72
References	72

1. まえがき

センシング技術の向上により、歪センサ計測で船体構造の応力状態を監視する「ハルモニタリング技術」が実用化しつつある¹²⁾。ハルモニタリングは船体構造の損傷を未然に防ぐ手段として利用が期待されているが、コストの制約で計測点数に限りがあるため、巨大な船体の強度評価を行うに十分な情報が得られていない。ハルモニタリングの普及促進を図るためには、システムのコストに見合う情報をユーザーに提供する必要がある。本研究では、課題解決の手段として「デジタルツイン技術」に着目し検討を行った。波浪中船体シミュレーションで予測した船体構造の応力データをハルモニタリングと組み合わせてデジタルツインを構築し、これを利用してハルモニタリングシステムの付加価値を高めることを目的として技術的検討を行った。船体構造デジタルツインに

よって、船体全域の応力をオンボードでリアルタイムに再現できるとともに、推論技術と組み合わせることで構造座屈や疲労損傷の将来予測を可能にし、安全運航に資する情報を船舶運航者へ提供できる。また、集積したデータの活用により、設計や設計基準の改善に資する情報を造船設計者へ提供し、社会的貢献を実現できる。以上を背景として、重点研究「船舶の新構造基準作成に資する先進的な荷重・構造強度評価及び船体構造モニタリングシステムの開発」において、サブテーマ「船体構造デジタルツインの開発」を立ち上げて研究開発を実施した。

本論では「船体構造デジタルツインの開発」にかかる研究内容と成果を紹介する。第2章で船体構造デジタルツインのコンセプトについて説明する。第3章でデジタルツイン実現のコア技術となるデータ同化手法を含む要素技術について説明する。特にデジタルツインと関連の深いハルモニタリング技術に関しては、研究成果を交えて詳しく説明する。第4章で要素技術を集約したデジタルツイン・オープンプラットフォーム i-SAS と、水槽試験及びフィールド実証試験により、システムの機能及びデータ同化手法の精度を検証した結果を報告する。

2. 船体構造デジタルツイン

図2.1は、船体構造デジタルツインのコンセプトを示している³⁾。デジタルツインはサイバー空間で構築・維持され、実際の監視・検査データや環境データによって更新され、それらの組み合わせによって包括的な構造健全性評価に寄与する。評価段階には、例えば、過酷な環境に対する警告システムなどのリアルタイム評価や、極端な応答や累積疲労損傷を統計的に評価するための短期および長期の応答予測が含まれる。これらはすべて、航行や保守の意思決定支援、さらには設計や設計ルールへのフィードバックに活用される。船体構造デジタルツインは通常、3次元シェル有限要素（FE）モデルで表現されるが、用途に応じて、ビーム、ビームとシェルの組み合わせ、または他の適切な表現とすることもできる。船舶構造デジタルツインを実現するために不可欠な要素の一つがデータ同化技術である。何千もの構造細部における応力履歴を正確に推定できることが不可欠であるが、センサの設置やメンテナンスのコストを考慮すると、それほど多くの点で応力を測定することは不可能である。そのため、限られた数のセンサで得られた応力測定値から、センサが設置されていない場所の応力を推定する手法を確立する必要がある。この課題を解決するために、本研究ではいくつかのデータ同化手法を検討した。

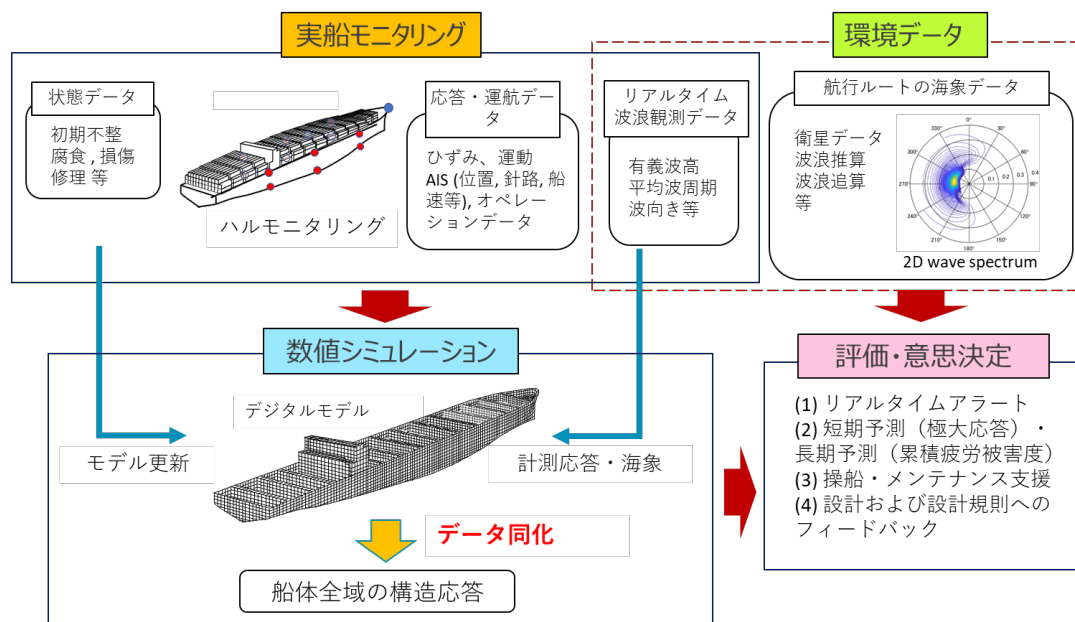


図2.1 船体構造デジタルツインのコンセプト

3. デジタルツイン構築のための要素技術

3.1 ハルモニタリング

3.1.1 供試船及び計測項目

船体構造デジタルツインの開発に必要なハルモニタリングに関して調査研究を行った。共同研究「大型コンテナ船における船体構造ヘルスモニタリングに関する研究開発（2016年度～2020年度）²⁾」において、14000TEU型コンテナ船シリーズ船 10 隻でハルモニタリングを行い、計測された構造歪のデータを解析して船体の健全性を評価するとともに、解析的予測の精度を検証した⁴⁾。供試船の概要及びセンサ配置を図 3.1 及び表 3.1 に示す。本調査研究では、Light Structure 社のシステム⁵⁾が採用され、各船では、図 3.1 に示すように、光ファイバー(FBG: Fiber Bragg Grating)を用いた歪計測システムにより、上甲板左舷 3 か所、右舷 1 か所、船底中央中心線に 1 か所の計 5 か所における縦方向応力、及び Bosun Store における加速度が計測された。データは 20Hz のサンプリング周波数で、1 日 24 時間×365 日の全データが記録された。生データは船上で一次統計処理され、モニター画面にて応力や加速度の平均値、標準偏差、ピーク値やトレンドなどをリアルタイムで確認することができる。ハルモニタリングでの計測データに加えて、運航モニタリングシステム（SIMS: Ship Information Management System⁶⁾）経由で船体運動、船位等の航海系データを取得した。また、波浪推算⁷⁾により個船が遭遇した海象のスペクトルデータを取得した。これらの実海域データを健全性の評価結果の分析、及び船体応力の解析的予測等に利用した。

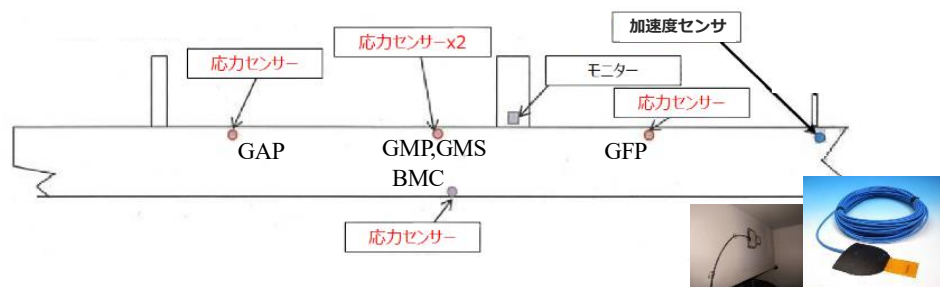


図 3.1 ハルモニタリングシステム

表 3.1 応力センサの設置箇所

ID	略称	設置断面	長手方向
1	BMC	2 重底（中央部）	船体中央部
2	GAP	Under Deck Passage（左舷）	船尾から 1/4L 前方
3	GFP	Under Deck Passage（左舷）	船尾から 3/4L 前方
4	GMP	Under Deck Passage（左舷）	船体中央部
5	GMS	Under Deck Passage（右舷）	船体中央部

3.1.2 計測波形の例

ハルモニタリングで計測された応力の波形の例を図 3.2 に示す。計測した歪にヤング率 $E(=206,000\text{MPa})$ を乗じて応力に変換した。約 10 秒間隔の変動が出会い波の成分、約 2 秒間隔の振動が船体縦曲げの固有振動の成分である。RAW は全ての成分を含む生波形、LPF はローパスフィルタで弾性振動成分を除去した波浪成分のみの波形である。フィルタのしきい値は 0.3Hz とした。またゼロクロス解析を行うため、短期間（1 時間）の平均値でゼロ点補正をした。

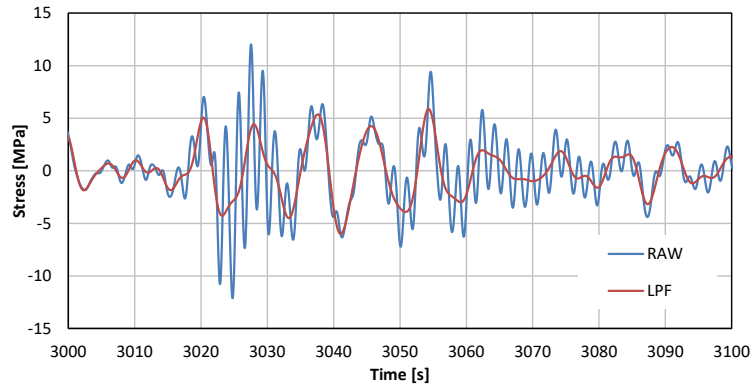


図 3.2 コンテナ船のハルモニタリングによる計測波形の例

3.1.3 応力評価

(1) 長期予測

計測波形をゼロクロス法で統計解析して得た応力振幅の長期分布（例）を図 3.3 に示す。RAW の波形の解析には、波浪の周期間での最大値（及び最小値）を振幅とするエンベロープ法を採用した。図の横軸は、出会い波の数を分母とした超過確率であり、超過確率 $Q=10^{-8}$ ($-\log Q=8$) が再現期間 25 年の最大期待値に相当する。縦軸は応力振幅で、図中に示す横線 Allowable は設計許容応力振幅（波浪成分）である。図 3.4 及び表 3.2 に全ての船／計測部位の計測最大値と計測期間を示す（モニタリング船 10 隻中 2 隻は、計測期間が不十分であったため除外した）。個船の計測期間を考慮して超過確率 $Q=10^{-8}$ に外挿した長期最大期待値は、許容値を下回る。図 3.4 の RAW（左）と LPF（右）との比較によりホイッピングの影響度を得ることができる。ホイッピング等の弾性振動の影響 W_{effect} を下式のように定義すると、応力計測データに基づく W_{effect} は 10～60%と推測される。

$$W_{effect} = \left(\frac{\sigma_{RAW}(Q = 10^{-8})}{\sigma_{LPF}(Q = 10^{-8})} - 1 \right) \times 100 [\%] \quad (3.1)$$

σ_{RAW} ($Q=10^{-8}$) : RAW 波形から得られる超過確率 $Q=10^{-8}$ 相当する最大応力

σ_{LPF} ($Q=10^{-8}$) : LF 波形から得られる超過確率 $Q=10^{-8}$ 相当する最大応力

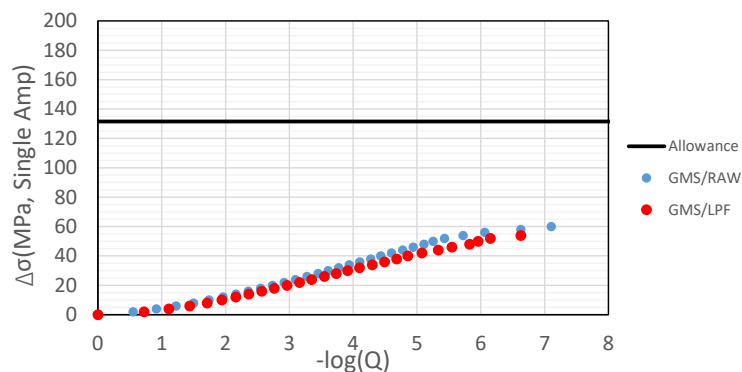


図 3.3 計測応力を統計解析した例（波浪中応力の長期超過確率）

表 3.2 各船の計測期間

Ship	A	B	C	D	E	F	G	H
Months	41	37	3	35	9	13	28	8

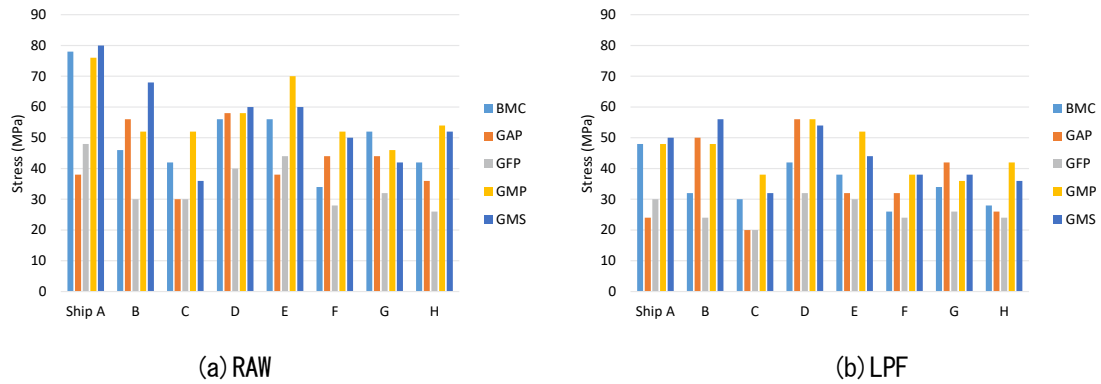


図 3.4 全ての船／計測部位の計測最大値

3.1.4 疲労評価

計測波形を解析して計測部位の疲労寿命の評価を行なった．疲労被害度の推定と疲労寿命評価の手順を図 3.5 に示す．

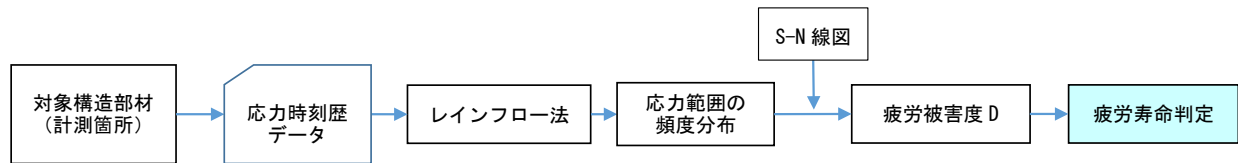


図 3.5 疲労評価の手順

疲労被害度 D は、マイナー則に従い求めた．

$$D = \sum_{i=1}^k D_i = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \cdots + \frac{n_i}{N_i} \quad (3.2)$$

i : 応力範囲のランクの ID

n_i : 応力範囲 ΔS_i での繰り返し数

N_i : 応力範囲 ΔS_i での破断までの繰り返し数

N_i は下式により求めることができる．

$$N_i = \frac{K}{\Delta S_i^m} \quad (3.3)$$

m, K は、材料や溶接、構造様式等で決まる定数である．公称応力の計測値であることから、突合せ溶接部に対する S-N 線図(D カーブ)を用いた．D カーブの定数は表 3.3 に示すとおりである．

表 3.3 S-N 線図の定数 (D カーブ) ⁸⁾

ΔS	K	m
$> 53.4 \text{ MPa}$	1.519E12	3.0
$\leq 53.4 \text{ MPa}$	4.239E15	5.0

疲労寿命 T (year) は、破断寿命 D_{CR} を用いて下式で表される。ここでは、 $D_{CR}=1$ として疲労寿命を評価した。

$$T = \frac{D_{CR}}{D} \times T_{meas} \quad (3.4)$$

T_{meas} : 計測した期間(year)

D : 計測期間での累積疲労被害度

図 3.6 に計測データの解析による累積疲労被害度の増加履歴を示す。また、全ての船／計測部位の累積疲労被害度を図 3.7 に示す。図 3.7 は、個船間で比較できるように、線形外挿した船齢 25 年の累積疲労被害度を表示している。累積疲労被害度 D が最も大きいのは Ship C の GMP（船体中央デッキ左舷）であるが、表 3.2 に示したように、Ship C の計測期間は 3 ヶ月と短いため誤差が大きいと考えられる。(3.4)式に従う疲労寿命は、累積疲労被害度が最大となった船／計測部位で約 750 年（25 年で $D=0.035$ を外挿）と見積もられた。S-N 線図による疲労評価の結果から、本論文の計測部位で疲労損傷が問題になることは無いと考えられる。また、図 3.6 及び図 3.7 の RAW と LPF との比較により得られるホイッピング等の影響は、70～200%の影響度と推測された。

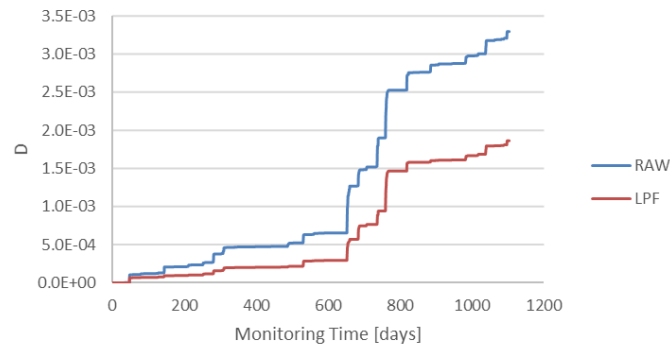


図 3.6 計測データを疲労解析した例（船体中央甲板の累積疲労被害度 D の増加履歴）

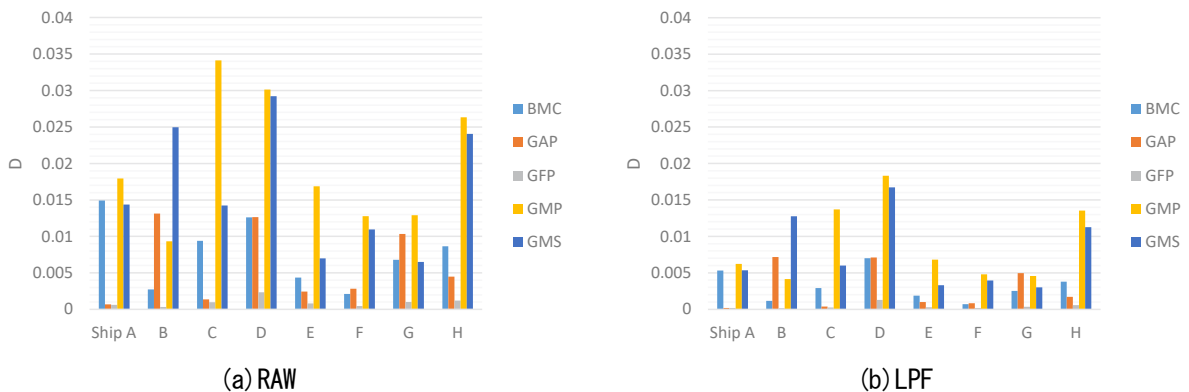


図 3.7 全ての船／計測部位の計測データを解析して得られた累積疲労被害度（船齢 25 年に線形外挿した結果）

3.1.5 応力を推定する方法の提案

(1) 更新した波浪発現頻度表を用いる方法

図 3.8 に Ship D の累積疲労被害度の増加履歴と海域を示す。北大西洋を航行した期間に疲労被害度が大きくっており、シリーズ船 10 隻の傾向を調べた結果、海域と疲労被害度との間には相関があることが分かった。設計時に用いる波浪発現頻度表に変えて実運航した海域の波浪発現頻度表を用いることで簡易的なモニタリングができる可能性がある。本研究では、図 3.9 の GWS (Global wave statistics; 全球波浪統計データ⁹⁾) による海域区分の存在時間の割合に応じた波浪発現頻度表を用いて、疲労被害度を再計算する【方法 1】を検討した。



図 3.8 Ship D の航路及び疲労被害度の増加履歴

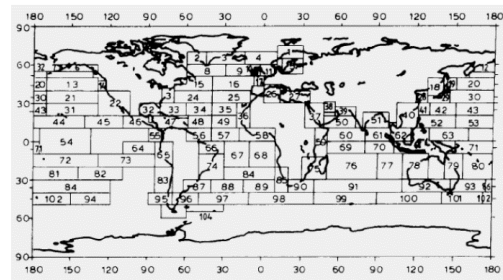


図 3.9 GWS⁹⁾ の海域区分

(2) 波浪推算データベースを用いる方法

近年、数値波浪モデリングの質が向上し、エンジニアリング分野で容易に利用できるようになってきた。ここでは日本気象協会の波浪推算データベース⁷⁾を利用して疲労被害度を推定する方法を検討する。波浪推算データベースでは、日時・地点に応じた短期海象の波スペクトルを得ることができる。SIMS 等運航モニタリングシステムによる船位情報と波浪推算を組み合わせることで、個船が遭遇した短期波スペクトルを取得し、予め用意した応答関数を用いて疲労被害度を推定した。遭遇海象の有義波高の超過確率を図 3.10 に示す。有義波高の最大値は Ship D が遭遇した $H_s=7.37\text{m}$ であった。実遭遇海象を用いた場合、波浪統計データによる【方法 1】よりも高精度な推定ができると考えられる。ここでは、波浪推算データベースによる方法を【方法 2】とした。

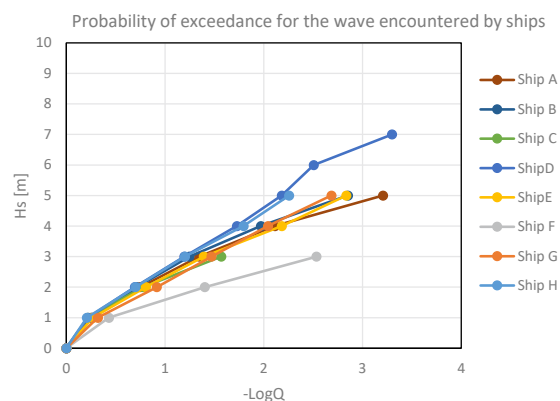


図 3.10 個船の遭遇海象の有義波高の超過確率分布

3.1.6 推定精度の検証

ハルモニタリングとの比較により、【方法 1】及び【方法 2】の精度を検証した結果の例を図 3.11 に示す。図中の凡例は下記に対応している。

GWS+RAO : 設計時の想定航路での海域の割合を考慮

GWS with ratio +RAO : 実航路に対応した海域の割合を考慮【方法 1】

HINDCAST+RAO : 実遭遇海象を考慮【方法 2】

HMS : ハルモニタリングによる計測データの解析結果

全ての船の船体中央甲板（GMS）の疲労被害度の推定値及び計測値を図 3.11 に示す。疲労被害度 D を $1/4$ 乗した値で応力レベルでの比較をしている。 $1/4$ は船体構造の疲労評価に使用される S-N 線図（Heibach 修正あり）の傾き $m=3$ 及び $m=5$ の中間値とした。【方法 1】で、実航路の海象を推定に用いることにより設計で想定した海象よりも精度を向上できること、【方法 2】で、実際に遭遇した海象を用いることで更に精度向上できることをそれぞれ確認した。船体中央甲板（GMS）以外の計測部位においても同レベルの精度向上ができることを確認している。図 3.12 に、全ての船の計測部位について、【方法 2】の推定値と計測値の散布図を示す。推定値は計測値と比べ 2 割程度高いが、相関係数 $R=98.4\%$ ($R^2=96.9\%$) であり良好な相関を有している。実際に遭遇した海象を用いることによって、計測と予測の間ギャップが大きく埋まり、応力換算値で約 20% の誤差範囲に収めることができることを確認した。残りの誤差の要因は、数値シミュレーションの精度不足、数値シミュレーションの積み付け状態の仮定（フルロード；一定）、海面状態のモデルと現実との不一致（波周期・方向スペクトル等）、計測データの信頼性等によって生じていると考えられる。今後のデータ収集及び分析によって各因子の影響度を一つずつ明確にして加味することで、より高精度な疲労被害推定が可能になると期待される。

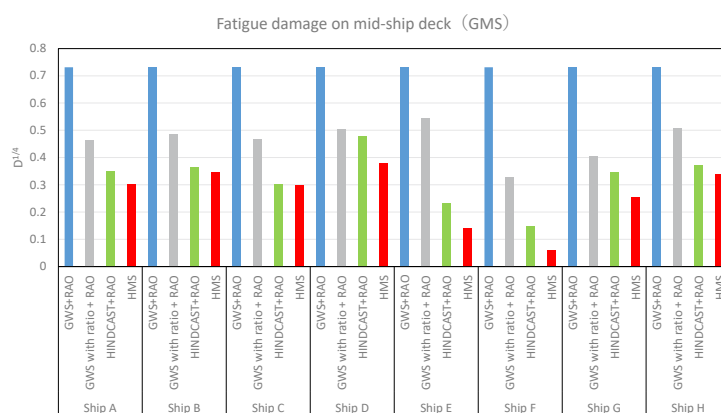


図 3.11 疲労被害度の推定値及び計測値（船体中央甲板）

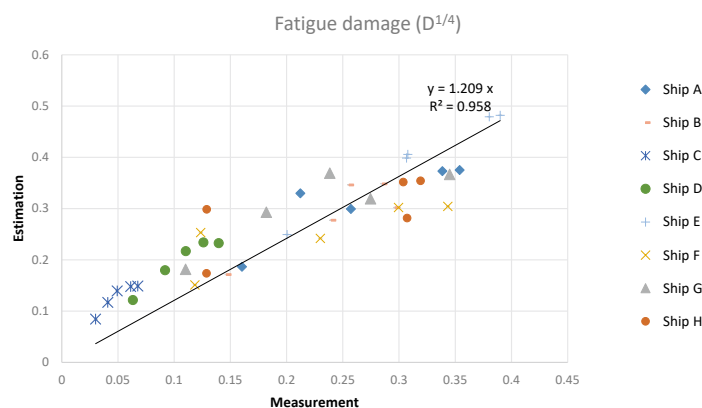


図 3.12 個船の疲労被害度の推定値【方法 2】及び計測値の比較

3.2 数値シミュレーション

図 2.1 に示したとおり、船体構造のデジタルツインを構築するには、波浪中船体応答を再現するための数値シミュレーション技術が必要になる。シミュレーションのレベルは様々であるが、本研究ではオンボードの利用を目指す観点から、汎用の計算機でも迅速に結果が得られることを必要条件とした。船体構造デジタルツインは、線形解析用の FE モデルを基本モデルとした。リアルタイム性を確保するため、事前に FE 解析を行い、船体変形モードや節点変位と歪の関係、応力の周波数応答関数などのデータベースを備え持つシステムとした。このうち応力の応答関数を取得するには、FE 解析だけでなく波浪中運動解析が必要になる。本研究では、当所で開発した

全船荷重・構造一貫強度評価システム DLSA (Direct Load and Structural Analysis system) を使用した。DLSA は 3 次元パネル法 (あるいはストリップ法) と FE 解析を組み合わせることで船体全域の応力応答関数を取得して、座屈や疲労の評価を行うシステムであり複数の造船所で利用され実用化している。本研究では線形解析システム (DLSA-Basic) を用いたが、非線形荷重や構造応答に対応した機能拡張に向けた研究が行われている。詳細については、関連する研究成果報告^{10),11)}及びソフトウェアの技術資料¹²⁾等を参照していただくと幸いである。

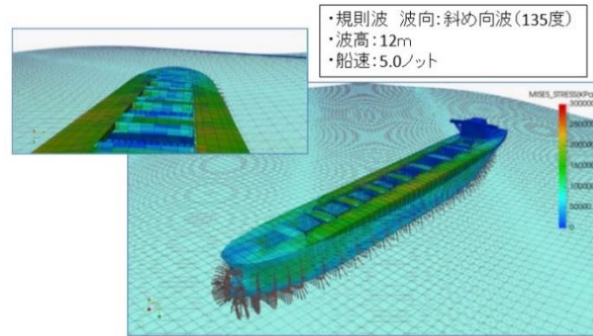


図 3.13 DLSA による計算結果の例 (ベクトル: 水圧, コンター応力)

3.3 データ同化技術

限られた数のセンサから船舶構造全体の構造応答を再構成するために、図 3.14 に示すような 3 つの異なるデータ同化手法を適用した。ここでは、波スペクトル法、カルマンフィルタ (KF) 法、逆有限要素法 (iFEM) と呼ぶ。

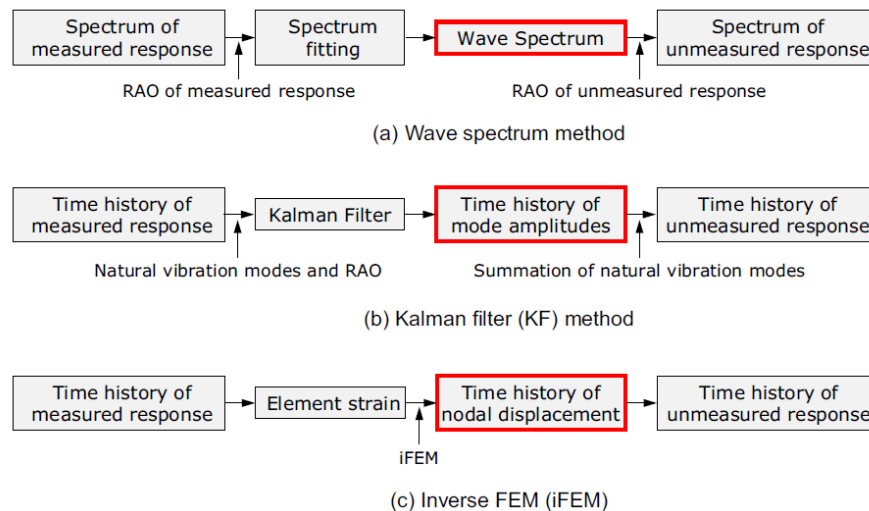


図 3.14 データ同化手法

3.3.1 波スペクトル法

波スペクトル法は、計測された船舶の応答と関連する線形伝達関数 (応答関数) から、遭遇する短期海象の波スペクトルを推定する手法である。一旦、波スペクトルが同定されれば、船体構造の任意の位置における未測定応答のスペクトルを推定することができる (図 3.14 (a))。計測された船舶応答から海況を推定する研究は、すでにいくつか提案されている。井関ら¹³⁾は、船舶運動データに基づく方向波スペクトルを推定するためのベイズモデリング手順を開発した。Nielsen¹⁴⁾は、ベイズ法といわゆるパラメトリック法を比較し、その適用性について議論した。前者では、波浪場の離散化された多数の点で方向波スペクトルを推定し、後者では、パラメータ化された多数の波スペクトルの和で波浪場を表現する。これらの先行研究では、主にヒープ、ピッチ、ロールのような船舶運動が測定応答として使用された。しかし、大型コンテナ船のような大型船では、高周波数波による船体運

動は比較的小さく、波浪外力による構造応答がより大きくなる。この観点から、陳ら¹⁵⁾は計測された船体曲げ応力を入力の一つとして用いる新たなパラメトリック手法を提案し、この手法により波スペクトルをより正確に予測できることを示した。陳ら¹⁶⁾は、この手法をさらに拡張し、多峰方向の波スペクトルを推定できるようにした。本研究では、波スペクトルを図 3.15 に示すように 36 方向に離散化し、式(3.5)で与えられる Ochi-Hubble の 6 パラメータ波スペクトル $S^{(q)}(\omega)$ を各方向に適用した。ここで T はピーク周波数である。

$$R_{mn}(\omega) = \int_{-\pi}^{\pi} [A_m(\omega, \chi + \theta)][A_n(\omega, \chi + \theta)]^* \times S(\omega, \theta) d\theta, \quad (3.5)$$

$A_m(\omega, \chi + \theta)$: m 次の応答の RAO (Response Amplitude Operator)

$S(\omega, \theta) = S^{(q)}(\omega)$: ($q = 1 \sim 36$: 波方向の離散化変数)

$$S^{(q)}(\omega) = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^2 \frac{\left(\frac{4\lambda_j^{(q)} + 1}{4} \omega_{p_j}^{(q)} \right)^{\lambda_j^{(q)}}}{\Gamma(\lambda_j^{(q)})} \frac{H_j^{(q)2}}{\omega^{4\lambda_j^{(q)} + 1}} \exp \left\{ -\frac{4\lambda_j^{(q)} + 1}{4} \left(\frac{\omega_{p_j}^{(q)}}{\omega} \right)^4 \right\}. \quad (3.6)$$

ω_p : ピーク波周波数 $\left(= \frac{2\pi}{T} \right)$

ω は波の円周周波数、 χ は船の針路と波向きの相対角度である。 $S^{(q)}(\omega)$ の添え字 $j (= 1, 2)$ は、多峰方向波を考慮した場合の峰数を表す。遺伝的アルゴリズム (GA) を用いて応答スペクトルの実測値と推定値の二乗差 $R_{mn}(\omega)$ が最小になるようにスペクトルパラメータ $T_j^{(q)}, H_j^{(q)}, \lambda_j^{(q)}$ を決定する。

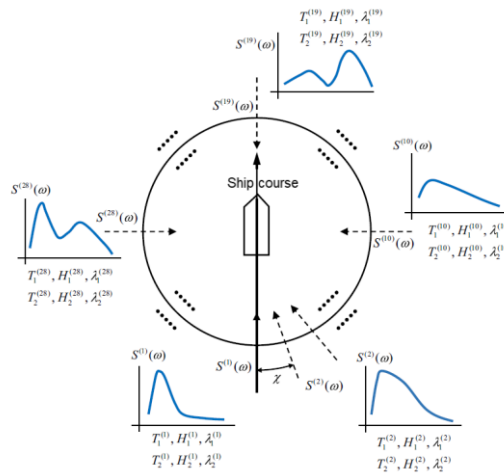


図 3.15 多方向波スペクトル推定のイメージ図

3.3.2 カルマンフィルタ法

カルマンフィルタ (KF) 法は、観測データに基づくロボットや車両などの動的システムの応答予測や制御に広く用いられている。三宅ら¹⁷⁾は、KF 法を船体構造デジタルツインのデータ同化に適用し、リアルタイムに計測された歪を用いて船体構造のリアルタイム応答を予測した (図 3.14 (b))。基本的な考え方は、船全体の変形を固有振動モードの線形和で表現することである。剛体運動と同様に弾性振動を考慮した運動方程式は、以下の式で表される。

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = F, \quad (3.7)$$

ここで, $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}$ はそれぞれモード変位, 速度, 加速度ベクトル, $\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{K}, \mathbf{F}$ はそれぞれモード質量, 減衰, 剛性行列, モード加振力ベクトルである. 式(3.7)は時間的に離散化した形で以下の式で表すことができる.

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{G}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{v} \quad (3.8)$$

ここで, $\mathbf{x}_k = [\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{F}_k]^T$ は状態ベクトル, $\mathbf{G}$ はシステム行列であり, $\mathbf{v}$ は荷重と応答のガウス過程を仮定したノイズベクトルである. 一方, 観測方程式は以下の形で与えられる.

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}\mathbf{x}_k + \mathbf{w} \quad (3.9)$$

は, 状態ベクトル $\mathbf{x}_k$ と観測データ $\mathbf{z}_k$ を関係付ける行列, $\mathbf{w}$ は正規分布に従うノイズベクトルである. 歪を含む実測応答を $\mathbf{z}_k$ とし, KF の標準的な手順を適用すると, モード変位 $\mathbf{q}$ の時刻歴が得られる. そして, 構造物の任意の位置における構造応答の時刻歴は, モードベクトルの線形和によって求めることができる. KF 法はリアルタイムに応答が得られるので, 例えば, 極限海域でのリアルタイム警報システムなどに利用できる. 最近の研究で, 小森山ら¹⁸⁾は実測応答を用いたリアルタイム波浪分布予測に KF 法を適用した. これにより, 構造物応答だけでなく, 貨物応答や付加抵抗など, 波浪中のあらゆる船舶性能の予測が可能になると期待されている.

3.3.3 iFEM

iFEM は, 限られた有限要素における歪に基づいて, 逆問題として全領域の構造変位を再構成するアルゴリズムである¹⁹⁾. 事前の解析や実験なしに複雑な境界条件の問題で歪から変位を求めることができる. FEM では, 節点変位 $\mathbf{u}^e$ から要素歪 $\boldsymbol{\varepsilon}^e$ を計算するが, iFEM では, 節点変位-要素歪の関係を満たすように, 次の最小化問題を解くことによって, 歪 $\boldsymbol{\varepsilon}^e$ から節点変位 $\mathbf{u}^e$ を逆推定する.

$$\mathbf{B}\mathbf{u}^e = \boldsymbol{\varepsilon}^e, \quad (3.10)$$

$$\text{minimize } \Phi^e(\mathbf{u}^e) = \frac{1}{2} \int_{\Omega^e} (\mathbf{B}\mathbf{u}^e - \boldsymbol{\varepsilon}^e)^T (\mathbf{B}\mathbf{u}^e - \boldsymbol{\varepsilon}^e) d\Omega^e, \quad (3.11)$$

$\mathbf{B}$ は, 歪-変位マトリックスである. Φ^e が最小となる $\mathbf{u}^e$ では微分値が 0 となることから,

$$\frac{\partial \Phi(\mathbf{u}^e)}{\partial \mathbf{u}^e} = \int_{\Omega^e} (\mathbf{B}^T \mathbf{B} \mathbf{u}^e - \mathbf{B}^T \boldsymbol{\varepsilon}^e) d\Omega^e = 0, \quad (3.12)$$

$\mathbf{u}^e$ は積分の外に出せるので式(3.12)は,

$$\frac{\partial \Phi^e(\mathbf{u}^e)}{\partial \mathbf{u}^e} = \mathbf{K}^e \mathbf{u}^e - \mathbf{F}^e = 0 \quad (3.13)$$

$$\mathbf{K}^e = \int_{\Omega^e} \mathbf{B}^T \mathbf{B} d\Omega^e, \quad \mathbf{F}^e = \int_{\Omega^e} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\varepsilon}^e d\Omega^e. \quad (3.14)$$

$\mathbf{K}^e, \mathbf{F}^e$ を全ての要素で計算し, 全体節点番号で並び替えた連立方程式を境界条件に注意して解くことで, 構造全体の節点変位 $\mathbf{u}$ を得る. 歪センサを取り付けた要素について測定された歪を $\boldsymbol{\varepsilon}^e$ として使用し, 式 (3.13) の要素方程式をグローバル方程式系に組み立て, これを解くことで未測定位置の歪を含む変形した構造形状をリアルタイムで求めることができる (図 3-14 (c)). iFEM のより詳細な手順は, Kefal ら²⁰⁾と Mikami ら²¹⁾に記載されている.

3.3.4 各手法の特徴と活用方策

3 つの手法のメリット等を表 3.4 に示す²²⁾. 3 つのデータ同化手法のうち, 波スペクトル法は構造応答の短期的な統計的評価に有用であり, KF 法と iFEM はリアルタイムの構造応答評価に適している. この 3 つの手法は, 単

独で使用することも、組み合わせて使用することもできる。例えば、KF法やiFEMから出力される時刻歴は、波スペクトル法の入力に使用することができ、iFEMは構造物の詳細解析のために他の手法と組み合わせて使用することができる。これらは将来の拡張として残る。

表 3.4 データ同化手法の特徴

手法	iFEM	カルマンフィルタ法	波スペクトル法
特徴・機能	汎用性・利便性	即時性・拡張性	波浪情報を介して波浪中船体応答を取得
入力データ	歪（数10点）	歪（数点）	歪（数点）
事前に準備するデータベース	FE解析による節点変位－歪関係	FE固有値解析による変形モードと固有値	荷重構造一貫解析による波浪中応答関数
推定項目	船体全域の変形・応力分布	船体全域の断面力分布ならびに応力分布	船体全域の応力分布を含む船体応答 - 波浪スペクトル
時間スケール	即時（アラート）	即時（アラート）	短期（安全運航支援）
水槽試験による検証結果	- リアルタイム機能を検証（データサンプリング10Hz） - 約20点の歪計測値から船体全域の変形・応力分布の推定が可能	- リアルタイム機能を検証（データサンプリング10Hz） - 6点程度の歪計測値から船体全域の応力分布の推定が可能	- 規則波及び多方向不規則波中において、甲板部4点の歪計測値を元に船底部位等局部応力を推定可能
ベネフィット	- 静荷重等を含む任意の周波数成分の船体全域の変形・応力応答の再現 - 利便性（FEモデルのみで計算可能）	- 静荷重等を含む任意の周波数成分の船体全域断面力・応力応答の再現 - 低コスト・リアルタイム性	- 応力等の波浪中船体応答の取得 - 波スペクトルの取得 - 低コスト性
	船体構造検査の合理化（板厚計測の緩和、リスクベース検査） 運航支援システムや自動運航船への利用（デジタルツイン統合システム） フロントローディング設計（模擬実験、モデルベース開発） データドリブン設計基準		

4. デジタルツイン・システム

4.1 デジタルツイン・プラットフォーム i-SAS

船体構造デジタルツインでは、操作者や意思決定者に対して構造物の応答をリアルタイムで可視化することも重要な要素である。デジタルツイン・プラットフォーム i-SAS は、この目的のために開発された²³⁾。i-SAS は、計測、データ同化、予測、意思決定支援の機能からなる任意の DT システムを構築するためのオープンプラットフォーム（インターフェース）とツールを提供する。図 4.1 は i-SAS の GUI ウィンドウの例であり、iFEM と KF 法によって得られたタンク試験モデルのリアルタイム応答を示している。i-SAS は、船体構造全体の変形、応力コンター、縦曲げモーメントとせん断力分布、指定した船体桁断面における断面力の軌跡、強度限界と安全裕度、カメラビューなど、必要に応じて任意の出力を提供することができる。なお、図 4.1 左下の船体桁の変形は、限られた数のセンサを使ったデータ同化によって再現されたものである。波浪水槽試験を通じて、i-SAS を構造応答のリアルタイム可視化に適用することに成功した。一般に実船は模型船に比べて波周期や荷重持続時間などの時間スケールが長く、データ同化に必要な CPU 時間も同程度であることから、開発したシステムは実船で利用可能であると考えられる。第 5 章の鉱石運搬船を用いた実船試験では、CPU スペックが AMD Ryzen 5 PRO 4650GE（3.30GHz 3MB）、メモリサイズが 32GB のパソコンで i-SAS が正常に機能することを確認した。

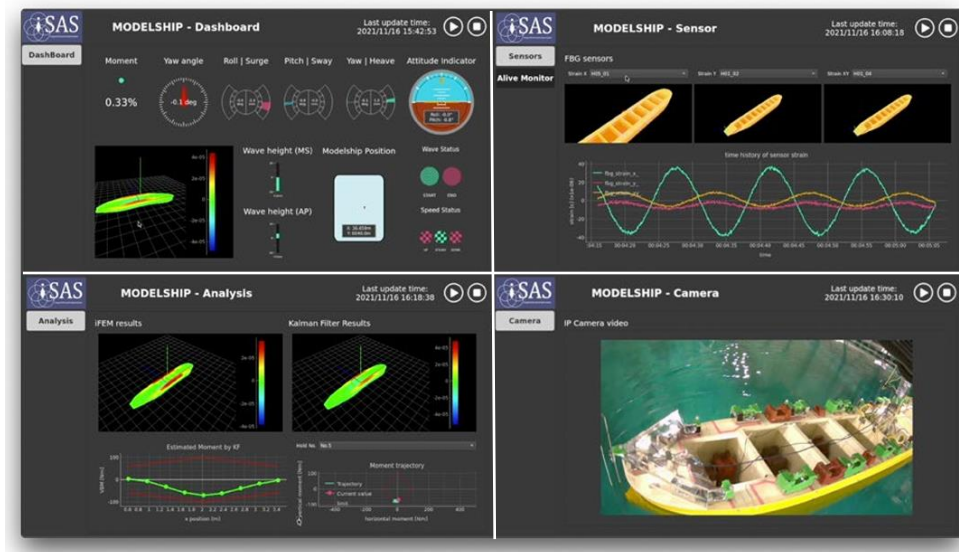


図 4.1 i-SAS の GUI ウィンドウの例（4 画面を同時に配置）

4.2 水槽実験による検証

DT システム（i-SAS）の機能検証のため、バルクキャリア模型の水槽試験を実施した²⁴⁾。ハルガーダとしての全体変形に加えて、横隔壁間の二重底の曲げ変形まで実船相似となる弾性模型船を開発し、局所変形を含めたデータ同化機能の検証を行うことを目的とした。模型船が満たすべき要件として「船型相似性、歪の直接計測性、全体・局所変形の相似性」の3つを定め、すべての要件を満たす弾性模型船として、GFRP（Glass Fiber Reinforced Plastics）サンドイッチパネルによる一体型の弾性模型を設計した（図 4.2）。スキン材により曲げ剛性と強度を持たせ、かつコア材の素材・厚さを調整することで、船底の局所変形の相似性を満足させている。このような弾性模型船は世界初である。模型船には、データ同化手法や DLSA の精度検証のため、FBG 歪センサを 141 点、FBG 圧力センサを 150 点、船殻に貼付した。

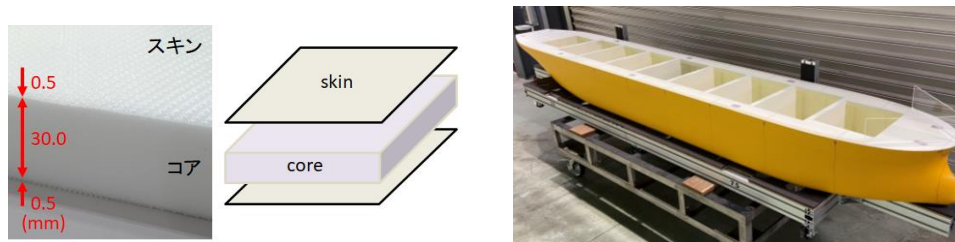


図 4.2 GFRP サンドイッチパネル製（左）の弾性模型船（右）

4.2.1 データ同化手法の検証

データ同化手法の検証のために波浪中水槽試験を実施した。試験は規則波と不規則波で行った。表 4.1 は、不規則波中試験で設定した波浪条件と船速を示しており²⁵⁾、うねりと風波を組み合わせた二峰性の短波頂不規則波を再現した。表 4.1 の（ ）内の値はフルスケールの値である。図 4.3 に歪センサの位置を示す。星印のセンサの歪を○印のセンサの歪から推定した。波スペクトル法では 4 個の甲板歪を、KF 法では 6 個の甲板歪を実測歪として用いた。また、iFEM 法では、サイド部、ボトム部を含めて 56 個の歪を計測歪とした。図 4.4 に KF 法、iFEM 法、実測歪の時刻歴比較を示す。推定誤差の定量化には、RMSE（二乗平均平方根誤差）と ME（最大値誤差）の 2 つの指標を考慮した。

$$RMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\varepsilon_i^{est} - \varepsilon_i^{meas})^2}}{\sqrt{2 \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^{meas^2}}} \times 100 [\%], \quad (4.1)$$

$$ME = \frac{\max(|\varepsilon^{est}|) - \max(|\varepsilon^{meas}|)}{\max(|\varepsilon^{meas}|)} \times 100 [\%]. \quad (4.2)$$

表 4.2 に示すとおり，船体中央甲板の No.6hold では，iFEM 法と KF 法はともに RMSE 約 20%，ME 約 10% の誤差の範囲内で歪の時刻歴を推定することができる．一方，No.2 で ME が大きいのは，No.2hold は船体縦曲げによる応力が No.6hold と比べて低いため応力レベルが低く，誤差が相対的に大きくなったこと，及び，大波高中での船体運動による船体形状非線形や iFEM 法や KF 法で考慮されない局所的な歪・応力の影響等が考えられる．KF 法が固有振動モードの総和として全場の変形を推定するのに対し，iFEM 法は変位と歪の関係と測定位置の歪から直接推定するため，一般に KF 法よりも多くの歪の測定値を必要とする．

図 4.5 に直接計測による波スペクトル（図 4.5 (a)）と波スペクトル法で推定されたスペクトル（図 4.5 (b,c)）の比較を示す．各図の半径座標は，各方向からの出会い波成分の円周波数を表す．波スペクトル法では，図 4.5 の (b) と (c) に対応する 2 つのケースを考慮した．(b) 法では，ヒープ，ピッチ，ロールの運動データを観測応答として用い，(c) 法では 4 つのデッキの歪を用いた．(b) 法では，大型船の運動の応答関数は高い周波数でゼロに近い値になり，エネルギーは観測応答を応答関数の値で割ることから，観測値がノイズ等により何かしらの値を持つ場合は，エネルギーを多く推定することとなる．そのため，図 4.5 (b) では，より高い周波数の波成分が抽出されているが，(c) 法では船体構造応答データを通して高周波数の応答を捉えることができるため，波スペクトルのピーク周波数が計測とほぼ一致する結果が得られた．表 4.3 は，下式による波スペクトル法と実測による歪($\mu\epsilon$)の標準偏差の差の比較である．

$$Difference = \frac{Estimation - Measurement}{Measurement} \times 100 [\%]. \quad (4.3)$$

図 4.5 および表 4.3 に示すように，歪を観測応答とみなすことで，推定精度が大幅に向上している．

表 4.1 波浪中水槽試験で使した波浪条件と船速

	Swell	Wind wave
Significant wave height H_s	4.17 cm (3m)	2.78 cm (2m)
Mean wave period T_m	1.41 s (12s, $\lambda/L_{pp} = 0.8$)	0.94 s (9s, $\lambda/L_{pp} = 0.35$)
Wave direction χ	180 deg.	300 deg.
Ship speed V_s	0.303 m/s (5 knot)	

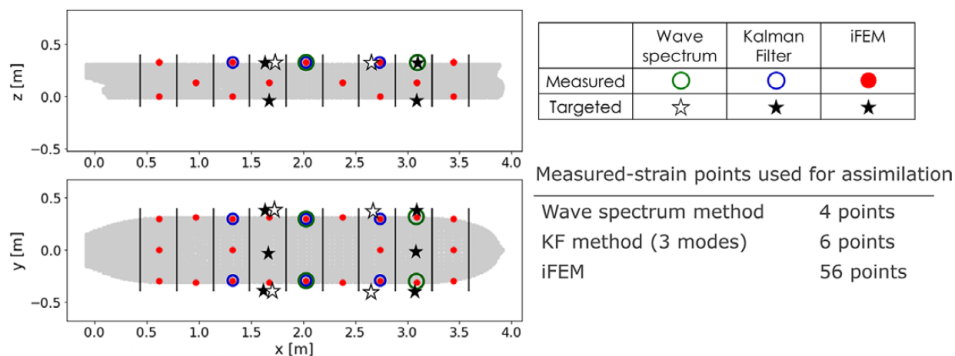


図 4.3 各データ同化手法に使した歪ゲージの位置

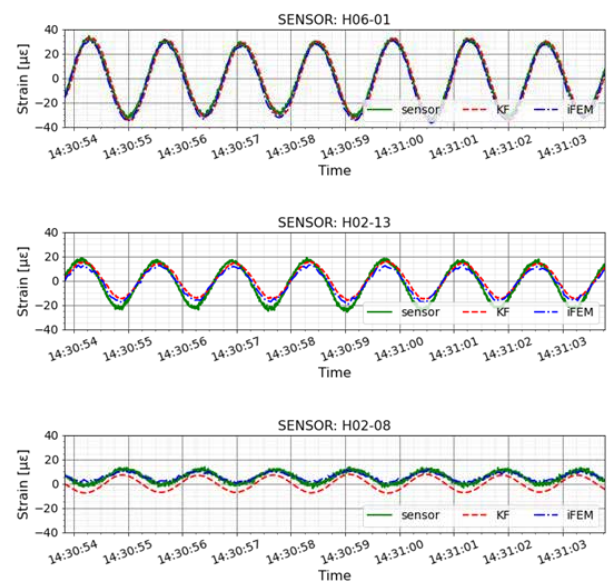


図 4.4 規則波中試験結果において KF 法と iFEM 法により推定された歪の時系列の比較
(上図) No. 6 ホールド左舷デッキ, (中図) No. 2 ホールド右舷デッキ, (下図) No. 2 ホールドボトム

表 4.2 iFEM 及び FE 法による歪の時刻歴の誤差の比較 (不規則波中試験)

	RMSE [%]		ME [%]	
	iFEM	KF	iFEM	KF
No. 2 hold, deck, portside	21.4	23.9	-26.9	-32.2
No. 6 hold, deck, portside	28.0	20.8	1.43	-8.15
No. 6 hold, bottom, center line	20.9	19.5	-8.23	2.27

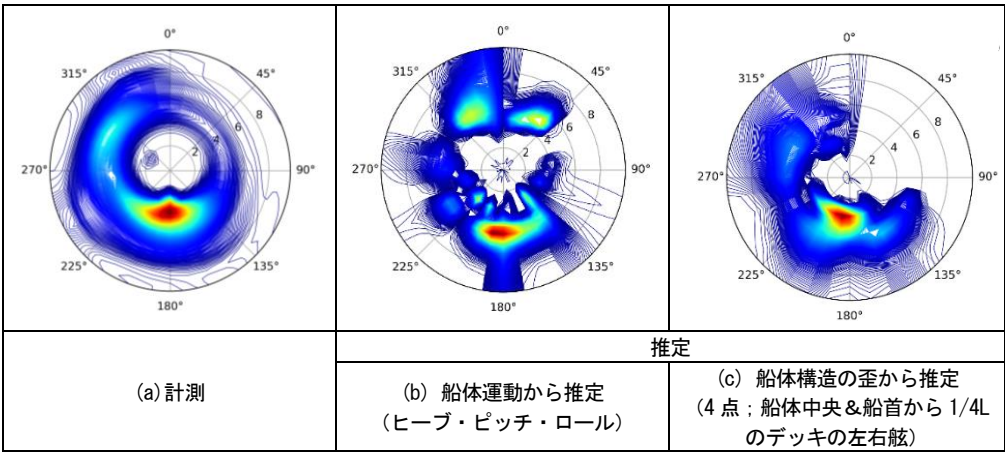


図 4.5 水槽で造波した短波頂 2 方向波スペクトルと船体応答からの推定結果

表 4.3 波スペクトル法による不規則波中での歪の標準偏差の差の比較

	Measurement [$\mu\epsilon$]	Difference [%] (motion)	Difference [%] (strain)
No. 3 hold, deck, portside	4.78	-67.8	3.35
No. 3 hold, deck, starboard side	4.83	-71.4	6.42
No. 6 hold, deck, portside	6.44	-63.0	5.90
No. 6 hold, deck, starboard side	6.73	-48.6	-12.6

4.3 フィールド実証

船体構造デジタルツインの社会実装に向けて、就航中の鉱石運搬船にデジタルツイン・システムを搭載してシステムの機能及びデジタルツインの再現精度を検証した。フィールド実証は、共同研究「鉱石運搬船での船体構造デジタルツインのシステム検証に関する共同研究(2023～)」の下で実施した。

4.3.1 供試船

日本一豪州航路を就航中の大型鉱石運搬船でレトロフィット・モニタリングを実施した。供試船の概要を以下に示す。

船種：ばら積み運搬船（鉱石専用船）
 Loa：約 320 m, B：約 55 m, D：約 24 m
 載貨重量：約 220,000 t

4.3.2 オンボード・モニタリングシステム

デジタルツイン・プラットフォーム i-SAS によるオンボード・モニタリングシステムの構成例を図 4.6 に示す。本研究では、供試船用にカスタマイズしたモニタリングシステムを利用した。本船のモニタリングシステムは構成例に準じて、「計測（Monitoring）」、「解析（Simulation）」、「可視化（Visualize）」の 3 つの Sub-package で構成した。

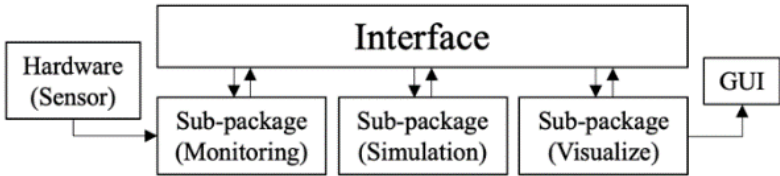


図 4.6 i-SAS によるオンボード・モニタリングシステムの構成例

(1) 計測システム

計測システムの Sub-package により、船体の歪及び加速度を計測してデータを収録した。歪及び加速度の計測箇所を表 4.4 及び図 4.7 に、システム構成図と外観画像と図 4.8 にそれぞれ示す。光ファイバー（FBG）型のセンサ（シミウス社製：OS3155 及び OS7500）及び計測システム（シミウス社製：Enlight）を採用した²⁶⁾。歪センサにより 16 箇所の歪を、加速度センサにより 2 箇所の加速度（X, Y, Z 方向で計 6 出力）を計測した。歪は、6 ホールド中の 4 つのホールドに対して縦通隔壁のデッキ部・左右限（2 箇所）、船底縦桁の上部・下部（2 箇所）、計 4 箇所を計測した。加速度は船首及び船体中央部のボトム・ボイドスペースで計測した。FBG 歪センサは温度補正型であり、ダミーゲージ（FBG-2）で計測される温度変化による歪を、本ゲージ（FBG-1）で計測される構造部材の歪から差し引くことにより、温度歪分を除いた歪が計測される。解析の際、歪値にヤング率 E（=206,000MPa）を乗じて応力値（単位 MPa）に変換した。計測のサンプリング周波数は 20Hz（50ms）とした。計測システムでは 1 日 1 ファイルで保存されるが、計測後の解析用に 1 時間 1 ファイルに分割した。

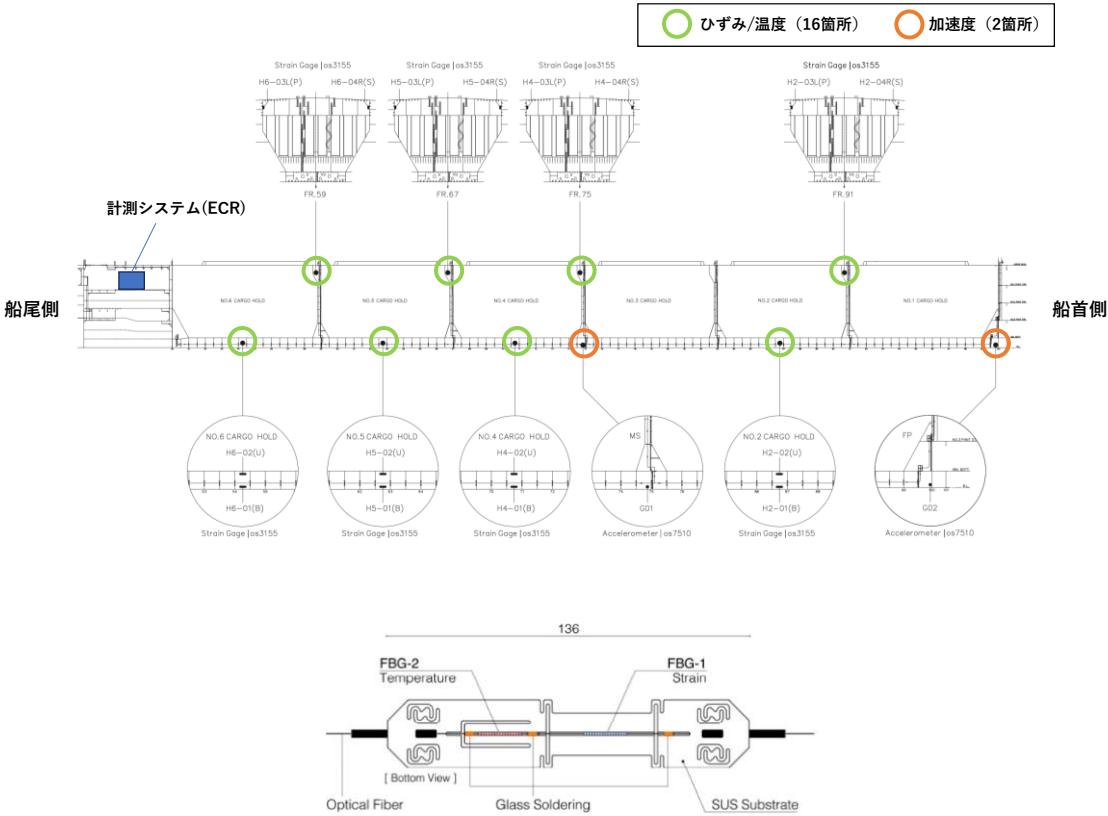


図 4.7 センサ設置箇所及び歪みセンサ

表 4.4 歪と加速度センサの設置箇所

ID	略称	センサ	設置断面	長手方向
1	H2_01B	歪	船底ガーダ下部	No2HLD 中央部(Fr.87)
2	H2_02U	歪	船底ガーダ上部	No2HLD 中央部(Fr.87)
3	H2_03L	歪	左舷縦通隔壁甲板側	No1HLD と No2HLD の間(Fr.91)
4	H2_04R	歪	右舷縦通隔壁甲板側	No1HLD と No2HMD の間(Fr.91)
5	H4_01B	歪	船底ガーダ下部	No4HLD 中央部(Fr.71)
6	H4_02U	歪	船底ガーダ上部	No4HLD 中央部(Fr.71)
7	H4_03L	歪	左舷縦通隔壁甲板側	No3HLD と No4HLD の間(Fr.75)
8	H4_04R	歪	右舷縦通隔壁甲板側	No3HLD と No4HMD の間(Fr.75)
9	H5_01B	歪	船底ガーダ下部	No5HLD 中央部(Fr.63)
10	H5_02U	歪	船底ガーダ上部	No5HLD 中央部(Fr.63)
11	H5_03L	歪	左舷縦通隔壁甲板側	No4HLD と No5HLD の間(Fr.67)
12	H5_04R	歪	右舷縦通隔壁甲板側	No4HLD と No5HMD の間(Fr.67)
13	H6_01B	歪	船底ガーダ下部	No6HLD 中央部(Fr.54)
14	H6_02U	歪	船底ガーダ上部	No6HLD 中央部(Fr.54)
15	H6_03L	歪	左舷縦通隔壁甲板側	No5HLD と No6HLD の間(Fr.59)
16	H6_04R	歪	右舷縦通隔壁甲板側	No5HLD と No6HMD の間(Fr.59)
17	MS_X	加速度	船底	MidShip (Fr.75)
18	MS_Y	加速度	船底	MidShip (Fr.75)
19	MS_Z	加速度	船底	MidShip (Fr.75)
20	FP_X	加速度	船底	FP (Fr.100)
21	FP_Y	加速度	船底	FP (Fr.100)
22	FP_Z	加速度	船底	FP (Fr.100)

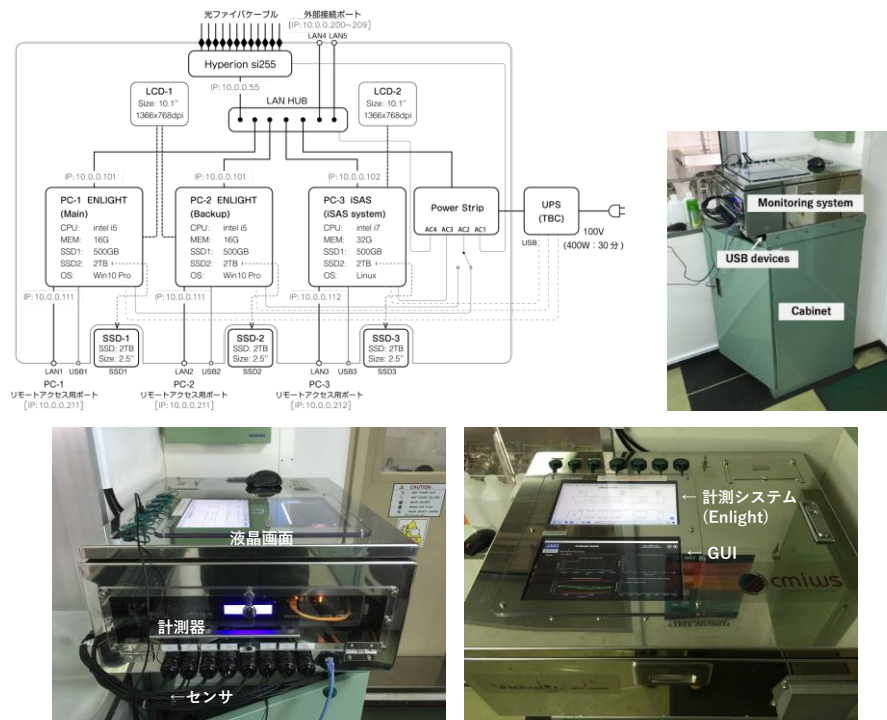


図 4.8 システムの構成図と外観画像

(2) 解析システム

計測システムにより収録したデータの解析システム Sub-package を構築した。解析フローを図 4.9 に示す。解析システムは、センサで計測した歪からデータ同化手法を用い、船体全域の構造応答を推定して、健全性評価に資する情報をオンボード・リアルタイムでユーザーに提供することを目的としている。データ同化手法にはカルマンフィルタ (KF) 法を採用した。

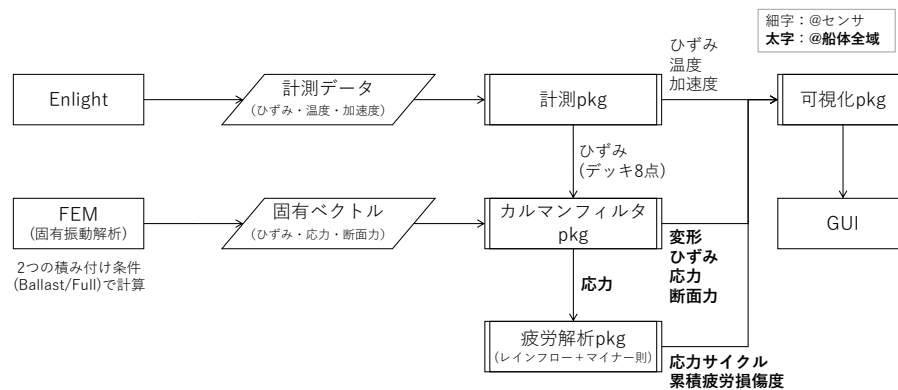


図 4.9 解析システムのフロー

(3) 可視化システム

可視化システム Sub-package により構成した GUI 画面を図 4.10 に示す。GUI 画面には船長方向の縦曲げモーメント (VBM) 分布や累積疲労被害度の履歴などを表示して、船体構造の状態が理解しやすい構成とした。KF 法による応力や縦曲げモーメントの推定結果を表示する機能、推定値と許容値を比較して安全判断に資する情報をユーザーに提供する機能、計測値の直接表示機能、画面を切り替えてセンサの死活監視を行える GUI 機能等を持たせた。



図 4.10 可視化システムによる GUI 画面

4.3.3 計測されたデータ

モニタリングシステムにより計測された歪の時刻歴波形の例を図 4.11 に示す。下方の図は最大値が計測された時刻付近の拡大図である。1 ファイルの計測時間（1 時間）の時間平均をゼロとしている。約 10 秒周期の応答が波浪成分、約 2 秒周期の応答が船体縦曲げの弾性振動成分である。本論では、波浪成分と弾性振動成分を含む計測生波形（RAW）及び波浪成分のみの波形（LPF）の解析結果を述べる。

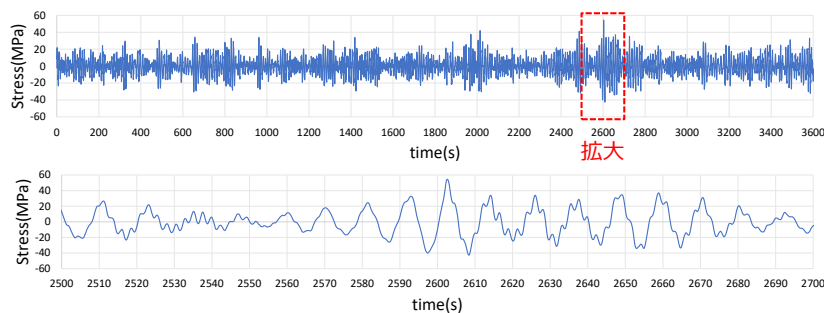


図 4.11 計測した歪の時刻歴波形（船体中央甲板の長手方向の応力）

4.3.4 計測データの解析による健全性評価

計測システムで収録した約 6 ヶ月間（2022.12～2023.5）のデータを解析した結果を報告する。なお、1 年以上のトライアルの期間を通じて、i-SAS の計測システムにより船体応答の時刻歴のデータが順調に計測されており、また解析システムにより本節と同じ解析結果がオンボードで可視化されており、本船用に構築したデジタルツイン・システムが長期間・自動で正常に稼働していることを確認している。

(1) 応力評価

モニタリングによる応力の波形をゼロクロス解析して得られた長期超過確率の例を図 4.12 に示す。図の横軸は、出会い波の数を分母とした超過確率であり、超過確率 $Q=10^{-8}$ ($-\log Q=8$) が再現期間 25 年の最大期待値に相当する。縦軸は応力振幅で、図中に示す横線 Allowable は設計許容応力振幅（波浪成分）である。図 4.12 から、超過確率 $Q=10^{-8}$ に外挿したときの応力値は許容値の半分以下と読み取れる。各部位の計測最大値を図 4.13 に示す。図 4.12 に示した H4_04R の応力が最も大きく、本船は設計寿命 25 年に耐えうる強度を有していると思われる。また、ホイッピングの影響はコンテナ船よりも少なく、式(3.1)に従う W_{effect} は約 10%である。

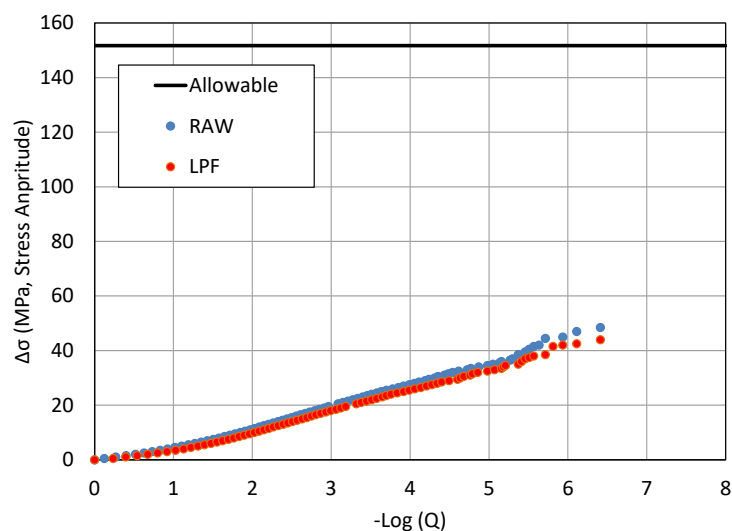


図 4.12 波浪中応力の長期超過確率の例

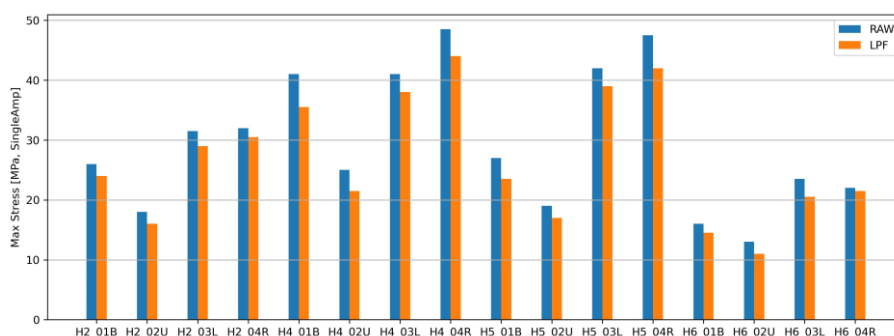


図 4.13 各部位の応力の計測最大値

(2) 疲労評価

図 3.5 に示したフローチャートに従い、計測データを解析して計測部位の疲労寿命評価を行った。RAW 波形及び LPF 波形をそれぞれ解析した。累積疲労被害度 D の増加履歴の例を図 4.14 に示す。累積疲労被害度 D が急に大きくなる時刻は、台風等の荒天遭遇に対応している。計測期間での累積疲労被害度を図 4.15 に示す。6 か月間の累積疲労被害度は、No.5 Hold (H5) の deck part の $D=0.00037$ (RAW), 0.00022 (LPF) が最大で、25 年に外挿すると $D=0.0185$ (RAW), 0.011 (LPF) である。この数値は、コンテナ船シリーズ船（図 3.7）と比べやや低い値であった。計測箇所では、甲板部（符号 03L 及び 04R）の累積疲労被害度が船底ガーダ（符号 01B 及び 02U）よりも大きい傾向にある。鉱石運搬船の縦曲げ中性軸は船底側に位置するので、甲板部位の方が船底部位よりも縦曲げ応力が大きくなるのが理由の一つと考えられる。船底ガーダの H4_01B が他と比べて大きく、今後の調査が必要である。理由としては、船底への外水圧の影響、ホールドへの積付などが考えられる。

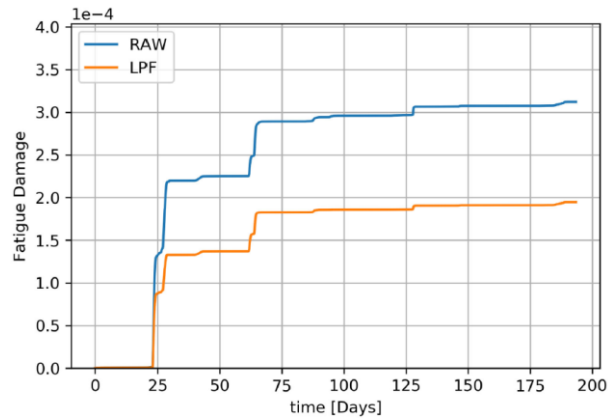


図 4.14 モニタリングシステムによる累積疲労被害度の増加履歴

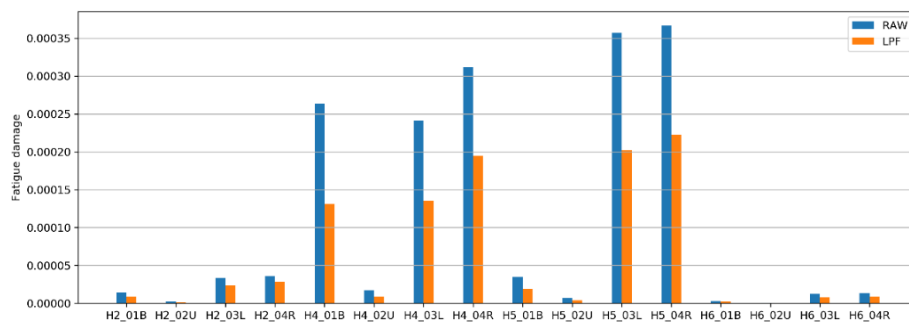


図 4.15 全ての部位の疲労被害度（6ヶ月間の累積疲労被害度）

4.3.5 データ同化手法のフィールド実証

フィールド試験によりデータ同化手法の実証を行った。データ同化手法は KF 法とした。計測したデッキ構造の歪データを元に非計測を仮定したボトム構造の歪を KF 法により推定し、実計測したボトム構造の歪と比較して精度を検証した。また、同定された固有モードの組み合わせから、断面力の固有ベクトルを用いて船体縦曲げモーメント等のハルガーダ荷重を推定する機能を検証した。

4.3.5.1 固有モード解析

KF 法に必要な固有モード解析の結果を図 4.16 に示す。KF 法は、計測した歪値との誤差が最小となる固有モードの組み合わせを推定し、船体全域の歪・応力の分布を求める方法である。本検証では、図 4.16 に示すとおり、垂直曲げ 4 モード、水平曲げ 2 モード、振り 2 モードの計 8 モードを使用した。

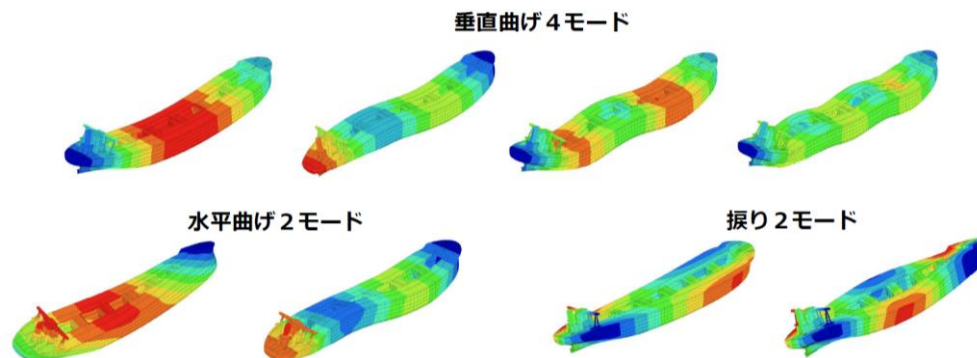


図 4.16 KF 法で使用了船体変形の固有モード

4.3.5.2 非計測の応力の推定

KF 法による歪の推定結果を図 4.17 に示す。船体中央のホールド (H4) のデッキ部材とボトム部材の例である。デッキ部の歪 8 点を入力値として使用した。デッキ部は、KF 法により推定値が計測値と一致するように更新され、推定値と計測値がほぼ一致している。ボトム部材は歪量に 10～20%の乖離があるが、定性的な傾向はよく一致しており、入力値から離れた構造部位の推定であることを考慮すると良好な推定結果が得られている。ボトム部材の乖離の要因は、二重底の局部変形等、固有モードに現れない変形で生じた歪の成分と考えられる。

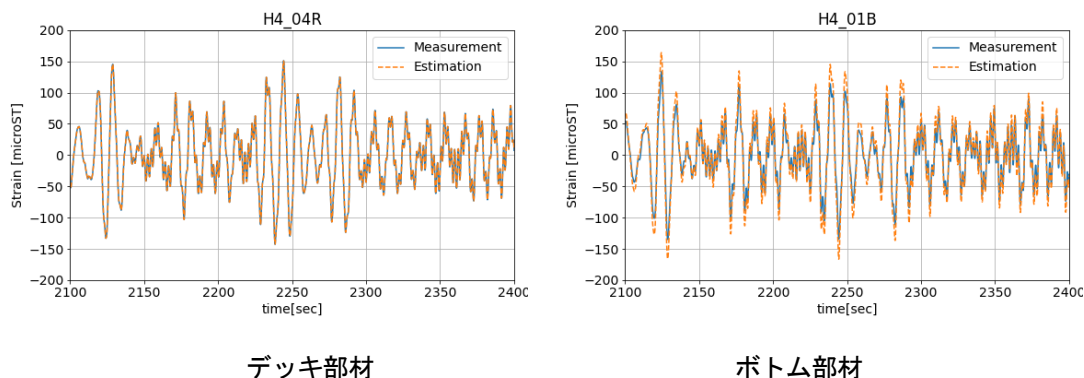


図 4.17 デッキ部 8 点の計測歪を使用して KF 法で推定した歪と計測値との比較

4.3.5.3 ハルガーダ荷重

KF 法によるハルガーダ荷重の推定結果の例を図 4.18 に示す。船体中央断面の垂直曲げモーメント、水平曲げモーメント、捩りモーメントを推定した結果である。実船で断面力を直接計測する技術は確立していないので、精度検証は今後の課題とするが、オンボードで断面力の分布を出力することができ、折損事故を未然に防ぐためのアラート機能に対応するシステムを整備することができた。

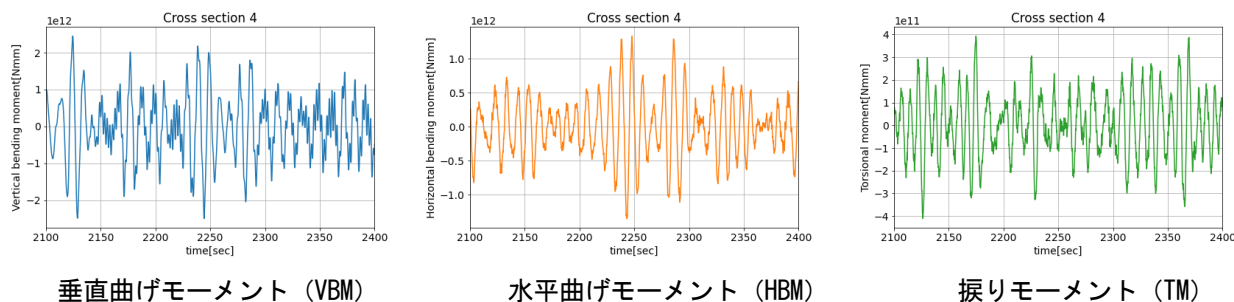


図 4.18 デッキ部 8 点の計測歪を使用して KF 法で推定したハルガーダ荷重（船体中央部）

5. まとめ

船体構造デジタルツインの基本コンセプト、ハルモニタリング、数値シミュレーション、データ同化、デジタルツイン・オームプラットフォーム i-SAS 等、デジタルツイン開発により得られた成果を報告した。船体構造デジタルツインは、運航中の船体構造性能の実態を明らかにし、可視化することで、構造健全性評価のための荷重や強度推定における不確実性を低減し、より最適な船舶の設計、建造、運航に貢献することができる。船体構造デジタルツインの技術的な実現可能性を水槽模型実験および就航中の鉱石運搬船でのフィールド実証によって確認した。また、デジタルツイン開発に必要な技術として、順解析・数値シミュレーションに基づく疲労評価法を提案して、コンテナ船シリーズ船（8 隻）のハルモニタリングデータで推定精度を検証した。

本研究で開発した船体構造デジタルツインは、構造応答だけでなく波浪状態も予測できるため、船の運動や貨物の挙動など、波浪中のあらゆる船の応答を再現できる可能性が広がる。このような拡張は、将来の船舶のデジタルツインを構築する上で不可欠である。さらに、本研究で開発されたデジタルツインの方法論とシステムは、船舶だけでなく浮体式風力発電装置などの海洋構造物等にも適用することができ、幅広い応用が可能である。

謝 辞

本研究は、1) 官民学共同研究プロジェクト「14000TEU級大型コンテナ船の船体構造ヘルスマニタリング (2016 ～ 2020)」で実施された内容を含みます。2) 日本財団のご支援の下、(一財) 日本船舶技術研究協会「超高精度船体構造デジタルツインの研究開発 (2018～2021)」で実施された内容を含みます。3) 共同研究「鉱石運搬船での船体構造デジタルツインのシステム検証に関する共同研究 (2023～)」で実施された内容を含みます。各研究プロジェクト及び関係各位に謝意を表します。

References

- 1) Oka, M., Arima and T., Ochi, H.: Research for Hull Stress Monitoring, Papers of National Maritime Research Institute, Vol.19 No.1(2019), pp.177-186. (in Japanese)
- 2) Okada, T, Kawamura, Y., Kato, J., Ando, H., Yonezawa, T. Kimura, F., Toyoda, M., Yamanouchi, A., Arima, T., Oka, M., Matsumoto, T., Kakizaki, H.: Outline of the research project on hull structure health monitoring of 14,000TEU large container ships, Conf. Proceedings of Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers 24 (2017), pp.31-35. (in Japanese)
- 3) Fujikubo, M., Oka, M., Ma, C., Chen, X. et al.: A digital twin for ship structures – R&D project in Japan –, Data-Centric Engineering Journal, 5: e7. (2024), <https://doi.org/10.1017/dce.2024.3>
- 4) Ma, C., Oka, M. and Ochi, H.: An Investigation of Fatigue and Long-Term Stress Prediction for Container Ship Based on Full Scale Hull Monitoring System, PRADS (2019), pp. 492-504., 10.1007/978-981-15-4672-3_31
- 5) Hull Stress Monitoring system , <https://www.lightstructures.com/solutions-and-systems/hull-stress-monitoring-system/> [accessed 1 August 2024].
- 6) SIMS3, https://www.monohakobi.com/ja/r_and_d/ship_and_logistics_iot/sims3/ [accessed 1 August 2024].
- 7) Matsuura, K., et al.: The estimation of meteorological and oceanographic and its accuracy, KANRIN; bulletin of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers 77(2018), pp.6-10, (in Japanese).
- 8) Class NK: ClassNK Rules for Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers (Part CSR-B&T) (2019).
- 9) Hogben, N., et al.: British Maritime Technology "Global Wave Statistics", Unwin Brothers Limited, London, 1986.
- 10) Matsui, S., et al.: Development of direct load and structural analysis and evaluation system on whole ship 'DLISA-basic' for ship structural design. Papers of NMRI 19-3 (2019), pp.373–393 (in Japanese).
- 11) Matsui, S., Murakami, C., Oka, M.: Validation of the Nonlinear Wave Load Analysis Program NMRIW- II in Comparison with Experiments -Ship Response in Regular Wave-, Papers of NMRI 17-3 (2017), pp.297–380 (in Japanese).
- 12) SPREME-web (An analysis tool for ship responses in waves), <https://cloud.nmri.go.jp/portal/pub/spreme-web>, (2023) [accessed 1 August 2024].
- 13) Iseki, T., and Ohtsu, K.: Bayesian estimation of directional wave spectra based on ship motions. Control Engineering Practice 8 (2000), pp.215–219. [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(99\)00156-2](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(99)00156-2).
- 14) Nielsen, U.D.: Estimations of on-site directional wave spectra from measured ship responses, onboard monitoring of fatigue damage rates in the hull girder. Marine Structures 19 (2006), pp.33–69. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2006.06.001>.

- 15) Chen, X., Okada, T. and Kawamura, Y.: Sea state estimation using measured hull responses on 14,000TEU large container ships. In Proceedings of the 7th International Maritime Conference on Design for Safety, 160–168. Kobe:DfS (2018).
- 16) Chen, X., Okada, T., Kawamura, Y. and Mitsuyuki, T.: Estimation of directional wave spectra and hull structural responses based on measured hull data on 14,000 TEU large container ships. Marine Structures 80 (2021), 103087. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2021.103087>.
- 17) Miyake, Y., Iijima, K., Tatsumi, A. and Fujikubo, M.: Estimation of ship hull girder deformation and load by using sensors and numerical model. Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers 17 (2023), pp.47–56 (in Japanese). <https://doi.org/10.2534/jjasnaoe.37.47>.
- 18) Komoriyama, Y., Iijima, K., Tatsumi, A. and Fujikubo, M.: Identification of wave profiles encountered by a ship with no forward speed using Kalman filter technique and validation by tank tests—long-crested irregular wave case. Ocean Engineering 271(2023), 113627. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113627>.
- 19) Tessler, A. and Spangler, J.L.: A Variational Principle for Reconstruction of Elastic Deformations in Shear Deformable Plates and Shells. Hampton, VA: NASA (2003).
- 20) Kefal, A., Mayang, J.B., Oterkus, E. and Yidis, M.: Three dimensional shape and stress monitoring of bulk carriers based on iFEM methodology. Ocean Engineering 147 (2018), pp.256–267. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.10.040>.
- 21) Mikami, K., Jumonji, T., Kobayashi, M., Toh, K., Komoriyama, Y., Ma, C. and Murayama, H.: Deformation estimation of hydrostructural container ship model by inverse finite element method, Conf. Proceedings of Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers 30 (2020), pp.229–233 (in Japanese).
- 22) Oka, M.: Data Assimilation Technology for Digital Twin for Ship Structure, Conf. Proceedings of Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers 34 (2022), pp.133–136 (in Japanese).
- 23) Mikami, K., Kobayashi, M., Miyashita, T., Komoriyama, Y., Ma, C., Tatsumi, A., Toh, K., Miratsu, R., Hirakawa, S., Mitsuyuki, T. and Murayama, H.: Development of i-SAS platform for digital twin and verification of digital twin system for tank test. Conference Proceedings of Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers 34(2022), pp.145–147 (in Japanese).
- 24) Houtani, H., Mikami, K., Komoriyama, Y., Chen, X., Miyake, Y., Tatsumi, A., Kuroda, K., Okada, T., Iijima, K., Murayama, H. and Oka, M.: Validation of the data assimilation methods of the digital-twin system for ship structure via a tank test using a hydro-structural bulk-carrier model. Conference Proceedings of Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers 34(2022), pp.137–143 (in Japanese).
- 25) Houtani, H., Mikami, K., Komoriyama, Y., Oka, M. and Murayama, H.: Consideration of bending and torsional testing methods suitable for hydro-structural ship models verification of static hull responses of a flexible ship model composed of GFRP sandwich panels. Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers 38(2023), pp.85–97 (in Japanese). <https://doi.org/10.2534/jjasnaoe.38.85>.
- 26) CMIWS Inc., <https://www.cmiws.jp/products/> [accessed 1 August 2024].