

船体構造デジタルツイン技術の実船適用

Application of digital twin for ship structure to actual ship

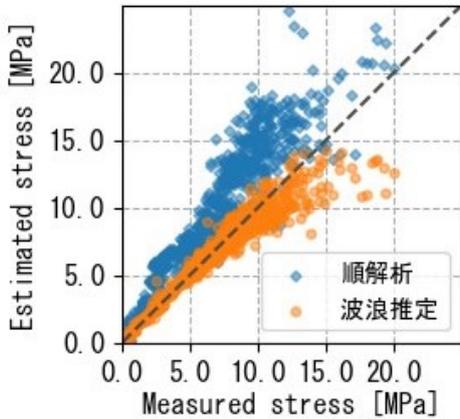
技術研究所

GREEN & SMART WORKS LABORATORY

構造研究 G

吉田 智美

YOSHIDA Tomomi



概要

実海域で発生している船全域にわたる応答を正確に把握するため、船体の状態を双子のようにサイバー空間上に再現する船体構造デジタルツインの研究や技術検証が進んでいる。本稿では、船体構造デジタルツインの基盤技術であるハルモニタリング技術やシミュレーション技術について、当社の取り組みを紹介する。また、ハルモニタリングとシミュレーションを融合させ正確な船全域の応答を求めるためのデータ同化技術について解説する。

1. 緒言

船舶の自動運航、遠隔監視・保守といったデジタル技術による海上輸送体系の変革を実現するための取り組みが活発に行われている。船体構造デジタルツインは、実海域における船体の状態を双子のようにサイバー空間上に再現する技術である。デジタルツインの実現により船体全域の構造応答が把握できるようになれば、設計や運航、保守管理の各段階での不確実性の低減につながり、より合理的な評価・意思決定が可能となる。具体的な活用としては、リアルタイムに船体の状態を監視し、船体構造が危険な状態と予見されたときの運航支援や、実際の応力履歴に基づく疲労解析結果を使用した保守管理計画の策定、操船ファクター等の定量的な評価による設計最適化などが考えられる。

船体構造デジタルツインの基盤技術として、図 1 に示す通り、ハルモニタリング技術とシミュレーション技術、またそれらを融合し推定精度を向上するためのデータ同化技術、評価技術があり、各技術の開発が進んでいる。

本稿では、船体構造デジタルツインの実現のため当

社が取り組んでいる、就航船でのハルモニタリングやシミュレーション技術を紹介し、それらのデータを用いて開発を行っているデータ同化技術について解説する。

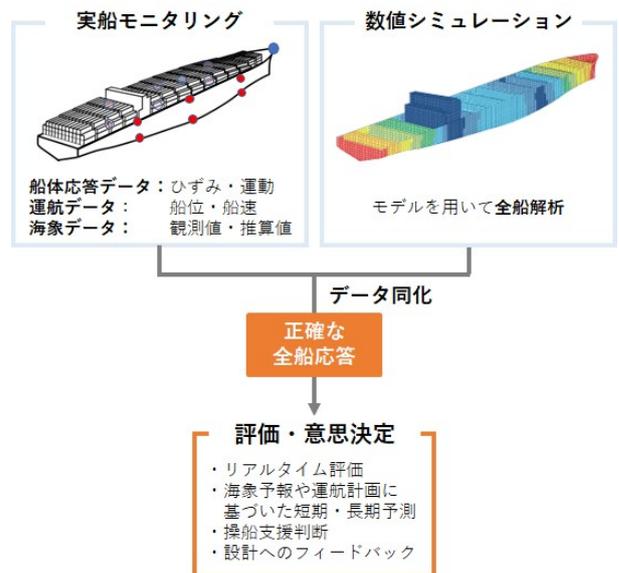


図 1 船体構造デジタルツインのコンセプト

Fig.1 Concept of digital twin for ship structure

2. モニタリングとシミュレーション

2.1 ハルモニタリング

2.1.1 モニタリングシステム概要

当社では実船モニタリングのシステムとして、船舶運航支援統合プラットフォーム『Sea-Navi®2.0』を開発している²⁾。本システムは、図2に示すフローの通り、下記(a)~(e)に示す項目を船上にて計測・処理し、データは衛星通信を通じて陸上クラウドに転送、それらのデータを解析・可視化するためのWebアプリケーションを実装している。

- (a) 運航・機関データ
- (b) 船体運動データ
- (c) 構造応答データ
- (d) 波浪データ
- (e) 積付データ

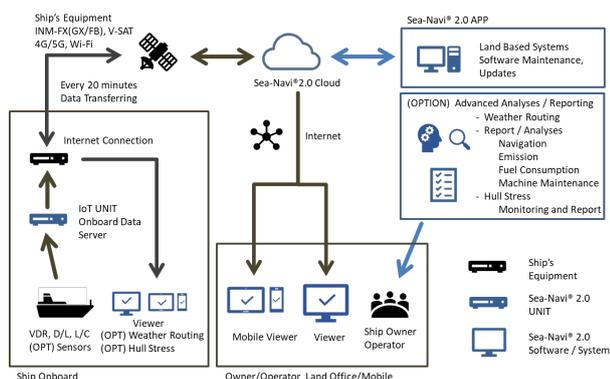


図2 Sea-Navi®2.0 データフロー

Fig.2 Data flow of Sea-Navi®2.0

2.1.2 センサ配置

図3にケーブルサイズばら積み貨物船で実施しているハルモニタリング³⁾のセンサ配置を示す。対象船では応力と加速度を下記の通り28箇所計測しており、図3中の赤点がひずみゲージ、黄色点が加速度計、緑点がジャイロセンサ、青点がデータ収録処理装置の位置を示す。

- ・応力計測点
 - (a) Deckの舷側3断面(左右舷)6箇所
 - (b) Cross Deck 1箇所
 - (c) C.L. Girder 6箇所
 - (d) Side Girder 12箇所
 - (e) Bottom Long 1箇所
- ・加速度計測点
 - (a) 船首部 1箇所
 - (b) 船尾部 1箇所

収録したデータはデータ収録処理装置上で、20分~1時間毎に平均値や標準偏差などを算出する統計解析やレインフロー頻度解析、スペクトル解析が行われ、出力されたデータはSea-Navi®2.0によって陸上に転送される。

2.1.3 モニタリング結果

対象船のモニタリングで得られた結果の一例を紹介する。図4に対象船のオーストラリア-日本間航路と、日本-ブラジル間航路を示す。オーストラリア-日本間

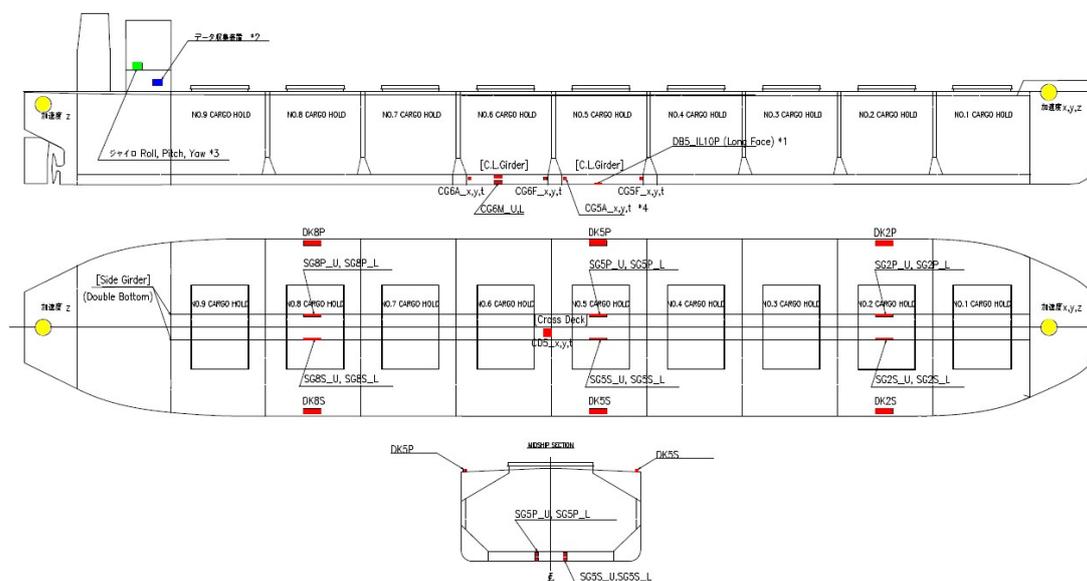


図3 センサ配置図

Fig.3 Location of sensors

航路では満載状態、日本ーブラジル間航路ではバラスト状態で航行している。



図4 航路図
Fig. 4 Route map

図5に計測したUpper Deckの船長方向応力(図3 DK5P)を、図6にC.L.Girder下部の船長方向応力(図3 CG6M_L)を、図7に船首部の上下方向加速度を示す。また、図8に同期間の波浪推算(ERA5⁴⁾)の有義波高を示す。

図5, 6の応力時系列は、20分間の平均値を青線で、その上下の赤線で波浪による変動分の大きさを表す標準偏差を示している。平均値に着目すると、日単位で変動しており、気温や日照の変化を受けるUpper Deckの方がC.L.Girderに比べ日変動が大きいことがわかる。また、波浪変動分である標準偏差や船首上下方向加速度については、有義波高との相関が確認できる。

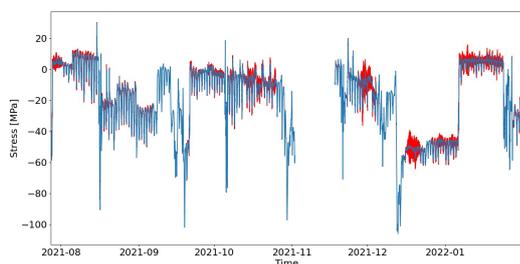


図5 Upper Deck 船長方向応力(DK5P)
Fig. 5 Longitudinal stress of Upper Deck (DK5P)

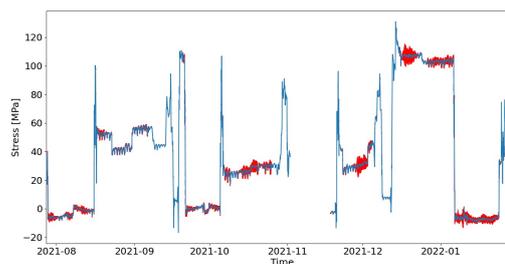


図6 C.L.Girder 船長方向応力(CG6M_L)
Fig. 6 Longitudinal stress of C.L.Girder(CG6M_L)

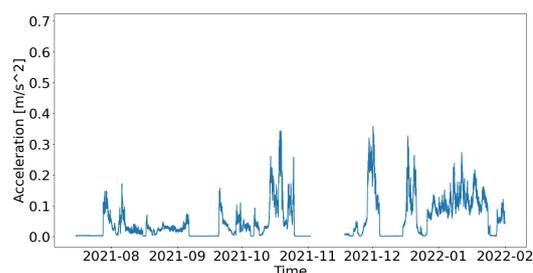


図7 船首上下加速度
Fig. 7 Vertical acceleration at Bow

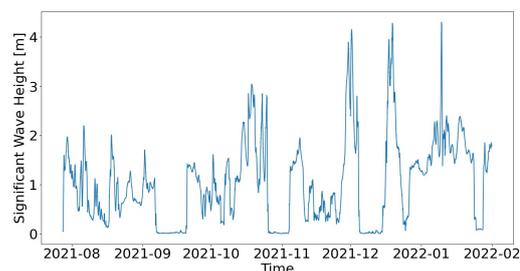


図8 有義波高
Fig. 8 Significant wave height

2.2 シミュレーション

航行中の船体応答を推定する手法として、荷重構造一貫解析で得られる応答関数に波浪スペクトルをかけ合わせる順解析手法が一般的である。

対象船でも荷重構造一貫解析ソフト DLSA-Basic⁵⁾を用いて解析を実施し、船体運動や加速度、ひずみ計測箇所の応力などの応答関数を出力している。線形ストリップ法による規則波中の船体運動・荷重の計算条件を以下に示す。

- 積付条件 : 満載状態とノーマルバラスト状態
- 船速 : 5, 10, 14.5 kt の3状態
- 波高 : 2.0 m
- 波向 : 0度~345度まで15度刻みで24状態
- 波長船長比 : 0.1~3.0まで0.1刻み、
3.0~5.0まで0.2刻みで40状態

上記で求めた船体運動・荷重から、図 9 に示す全船 FE モデルに内外圧を作用させ、FE 解析を実施し、応力応答関数を出力した。図 10 に Upper Deck の船長方向応力 (図 3 DK5P) の応答関数を示す。

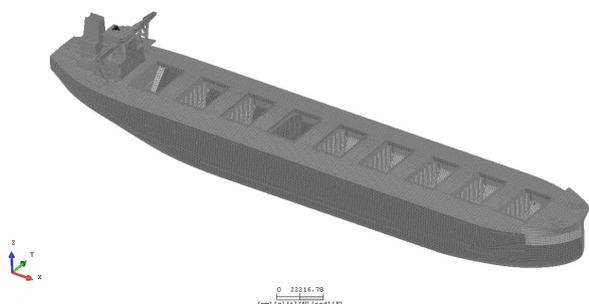


図 9 FE モデル
Fig. 9 FE model

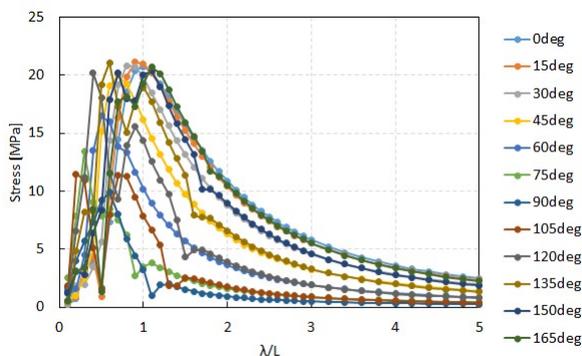


図 10 応答関数(DK5P)
Fig. 10 RAO(DK5P)

Upper Deck の船長方向応力について、図 10 の応答関数と ERA5 の方向波スペクトルを用いた順解析による推定値と、ハルモニタリングによる計測値の比較を図 11 に示す。図中の横軸に計測値を、縦軸に同時点の推定値をとり、対角線上にプロットがあれば計測と推定が一致している。推定値は概ね計測値の傾向を捉えられているが、過大推定のケースが多くみられる。推定誤差の要因として、荷重構造一貫解析は代表的な運航状態を想定して実施しており、必ずしも実運航状態を再現できていない場合があることや、用いた ERA5 の方向波スペクトルは約 50km 間隔のグリッドで計算されており、対象船の船位ピンポイントで提供されているわけではないことがあげられる。

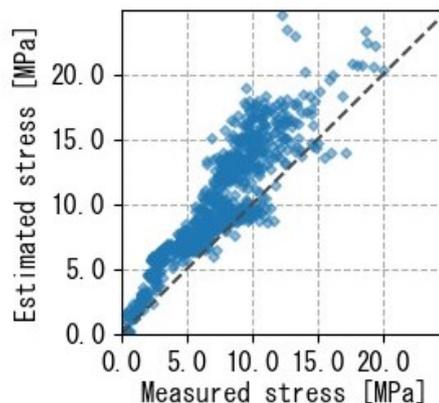


図 11 シミュレーションとモニタリングの比較
Fig. 11 Comparison of simulation and monitoring

2.3 データ活用の仕組み

船体構造デジタルツインを実船で運用するためには、ハルモニタリングやシミュレーション、データ同化技術、それらの結果を用いた評価・意思決定をシームレスにつなぐシステムが必要となる。Sea-Navi®2.0 では収集データを可視化した様々なダッシュボードをアプリケーションとして準備し、社内外で利用可能な環境を整備している。

構造分野では、前述したモニタリングとシミュレーション結果の比較等を自動化し、図 12 に示す Web アプリケーションで可視化している。



図 12 Web アプリケーション
Fig. 12 Web Application

3. データ同化

3.1 データ同化とは

前章で述べた通り、シミュレーションでは海象や運航条件などに様々な仮定を含むため、モニタリングで計測している船体応答と必ずしも一致しない。高精度に船体全域の応答を推定するため、シミュレーションとモニタリングを融合させるデータ同化技術の開発が行われている¹⁾。データ同化技術には、固有モード解析と計測点の応答時刻歴からカルマンフィルタを用い

て固有モードの時刻歴を求め、任意箇所の変位時刻歴を求める「カルマンフィルタ法⁶⁾」や、計測点のひずみ時刻歴と有限要素の変位—ひずみ関係から変位分布を逆推定し、任意箇所の変位時刻歴を求める「i-FEM⁷⁾」、計測点応答の分散の長期頻度分布に適合するように波浪頻度分布をもとめる「等価波浪頻度分布法⁸⁾」などが開発されている。

本稿では、計測した船体応答から遭遇波浪スペクトルを求め、任意箇所の変位スペクトルを推定する「波浪推定法⁹⁾」について詳しく紹介する。

3.2 波浪推定法

図 13 に波浪スペクトルを推定するフローを示す。波浪推定法では、計測応答スペクトルと、推定波浪スペクトルから求めた推定応答スペクトルの差を最小化するように、波浪スペクトルを最適化する。遭遇した波浪スペクトルが高精度に推定できれば、応答関数をかけ合わせることで任意箇所の変位スペクトルを推定できる。

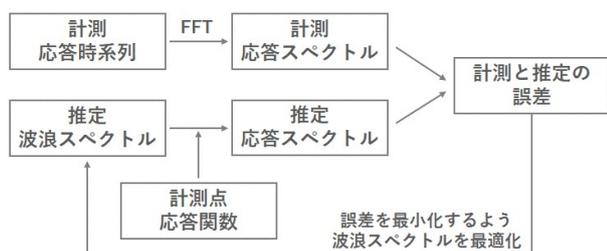


図 13 波浪推定のフロー

Fig. 13 Flow of wave spectrum method

図 14 に前章に示したケーブサイズばら積み貨物船で波浪推定法を適用し、図 11 と同様 DK5P の計測点応力を推定した結果を示す。図中の青点が 2.2 の順解析で推定した結果、オレンジ点が波浪推定法で推定した結果である。オレンジ点の方が対角線上にプロットが乗っており、順解析による推定と比較して、計測応力を精度よく推定できていることがわかる。

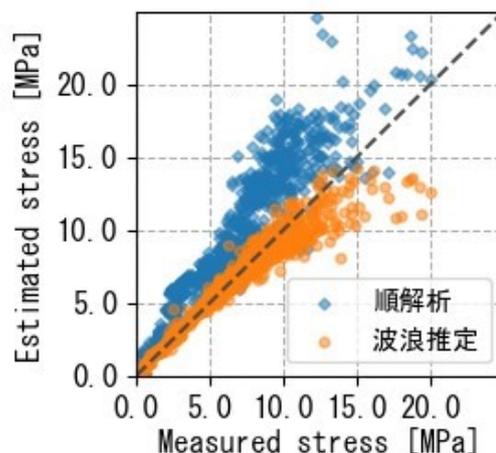


図 14 波浪推定法を用いた推定結果

Fig. 14 Comparison of estimation and measurement

4. おわりに

船体構造デジタルツインのコンセプトと実現に向けた当社の取り組みについて紹介した。波浪推定手法をはじめとしたデータ同化技術の開発・検証を進め、実船適用に向けて展開する予定である。また、船体構造デジタルツイン技術を活用した経済的メリットを生み出すサービスも立案しており、実現に向けモニタリングデータを用いた検証や適用効果の試算を行っていく。

参考文献

- 1) Fujikubo, Masahiro, et al.: A digital twin for ship structures R&D project in Japan, Data-Centric Engineering, 5, e7, (2024)
- 2) 片濱伸一、福井洋、吉田智美、河尻義貴：日本シッピングヤードにおける就航船データ活用の取り組み、日本船舶海洋工学会誌 KANRIN(咸臨)、第 106 号、pp14-19、(2023)
- 3) 平川真一、吉田智美、岡田哲男、辰巳晃、内田響、陳曦、関紀明、河尻義貴：ケーブサイズばら積み貨物船の静水中・波浪中応答評価、日本船舶海洋工学会講演論文集、Vol.34、pp156-161、(2022)
- 4) Hersbach, H., et al.: The ERA5 global reanalysis, Quarterly journal of the royal meteorological society, 146(730), 1999-2049, (2020).
- 5) 松井貞興、村上睦尚、林原仁志、笛木隆太郎：船

体構造設計のための全船荷重構造解析ならびに強度評価システム DLSA-Basic の開発、海上技術安全研究所報告、第 19 巻第 3 号（令和元年度）研究報告（2019）

- 6) 三宅雄登、飯島一博、辰巳晃、藤久保昌彦：ひずみセンサー情報と数値モデルによる船体変形と荷重の推定に関する研究、日本船舶海洋工学会論文集、Vol. 37、pp47-56、(2023)
- 7) 三上航平、十文字拓也、小林真輝人、藤公博、小森山祐輔、馬沖、村山英晶：逆有限要素法を用いたコンテナ船弾性模型の変形推定、日本船舶海洋工学会講演会論文集、Vol. 30、pp229-233、(2020)
- 8) 大沢直樹、辰巳晃、武内崇晃：8,600 TEU コンテナ船の短期・長期予測、日本船舶海洋工学会講演会論文集、Vol. 34、pp163-167、(2022)
- 9) Chen, X., Okada, T., Kawamura, Y., Mitsuyuki, T.: (2021). Estimation of directional wave spectra and hull structural responses based on measured hull data on 14,000 TEU large container ships. Marine Structures, 80, 103087. (2021).



吉田 智美