

船体構造デジタルツインとその普及に向けて



研究ノート

辰 巳 晃*

A Step Toward Social Implementation of Digital Twin for Ship Structures

Key Words : Digital Twin, Ship structure, Data assimilation, Cost-benefit analysis

はじめに

生産と技術に寄稿させていただくことは今回が2回目である。前回は、2018年のVol.70, No.1(新春号)¹⁾の「若者」のコーナーに、「船体の縦曲げ崩壊」と題して寄稿させていただいた。船の縦曲げ崩壊とは、静水荷重および波浪荷重が船体の梁としての終局強度(縦曲げ最終強度)を超過し、船体が2つに折れ曲がる現象である。「若者」では2013年に発生したMOL COMFORT号の縦曲げ崩壊の事故²⁾を例に取り上げ、当時行っていた縦曲げ最終強度に関連する研究を紹介しつつ、将来への希望などを記させていただいた。

船体の縦曲げ崩壊の事故原因の解明を困難にする点が大きく2つあると考える。1つは、事故船では浸水が発生し、最終的には沈没にいたることである。多くの場合、事故船のサルベージは難しく、崩壊後の船体の様子(例えば、崩壊断面の変形など)を確認することができない。もう1つが作用荷重の把握である。事故当時の海象については波浪追算により推定可能であるが、得られる情報は波浪スペクトルなどの情報であり、事故船に時々刻々と働いた荷重を把握することは難しい。船の運航時に船体に働く荷重を時々刻々と把握できれば、船体の縦曲げ崩壊のような重大な事故を未然に防げるはずである。その一助になると考えるのが、本記事のタイトルにある「船体構造デジタルツイン」である。

船体構造デジタルツインの研究開発プロジェクト

「デジタルツイン」は工学分野の最近のバズワードの1つと思う。その定義は様々と思うが、デジタルツインの重要な点は、1)物理空間の対象物からセンサ等により得られたデータを、サイバー空間上の対象物の数値モデルに反映すること、2)モデルを用いた数値シミュレーションを通じて物理空間の意思決定を支援すること、と筆者は考える。筆者はこのデジタルツインの考え方を船体構造に適用するための研究を行っている。それらの研究のベースとなっているのが、(公財)日本財団の助成のもと、(一財)日本船舶技術研究協会にて行われた「超高精度船体構造デジタルツインの研究開発」のプロジェクト(フェーズ1:2018年4月~2020年3月,フェーズ2:2020年4月~2022年3月)である³⁾。本プロジェクトには、大学・研究機関、造船会社、海運会社、船級協会から多くの研究者・技術者が参加し、船体構造デジタルツインに関連する基盤技術の開発から実船での検証までが行われた。

上述の通り、デジタルツインでは物理空間での対象物の計測が必須である。対象物を船体構造とすると、その構造応答の計測が必要である。これまでも、ひずみセンサ等を用いた船体構造のモニタリングが行われてきており、そのシステムはハルモニタリングシステムとしていくつか製品化されている。また、(一財)日本海事協会から「船体構造モニタリングに関するガイドライン」が2021年に発行され⁴⁾、その技術が広く認知されるに至っている。船体構造デジタルツインは構造モニタリングを発展させた技術とみなせる。構造モニタリングでは得られる応答が計測点に限られるのに対し、構造デジタルツインでは数値シミュレーションと融合することで、計測点以外の応答も得られる。これは、いわゆるデータ同化であり、このデータ同化がデジタルツインの根幹をなす技術である。



* Akira TATSUMI

1988年10月生まれ
 大阪大学大学院 工学研究科 地球総合
 工学専攻博士前期課程修了(2013年)
 現在、大阪大学大学院 工学研究科 地球
 総合工学専攻 船舶海洋工学部門
 准教授 博士(工学)
 専門/船舶海洋工学
 TEL: 06-6879-7586
 FAX: 06-6879-7594
 E-mail: tatsumi.akira.ga.eng@osaka-u.ac.jp

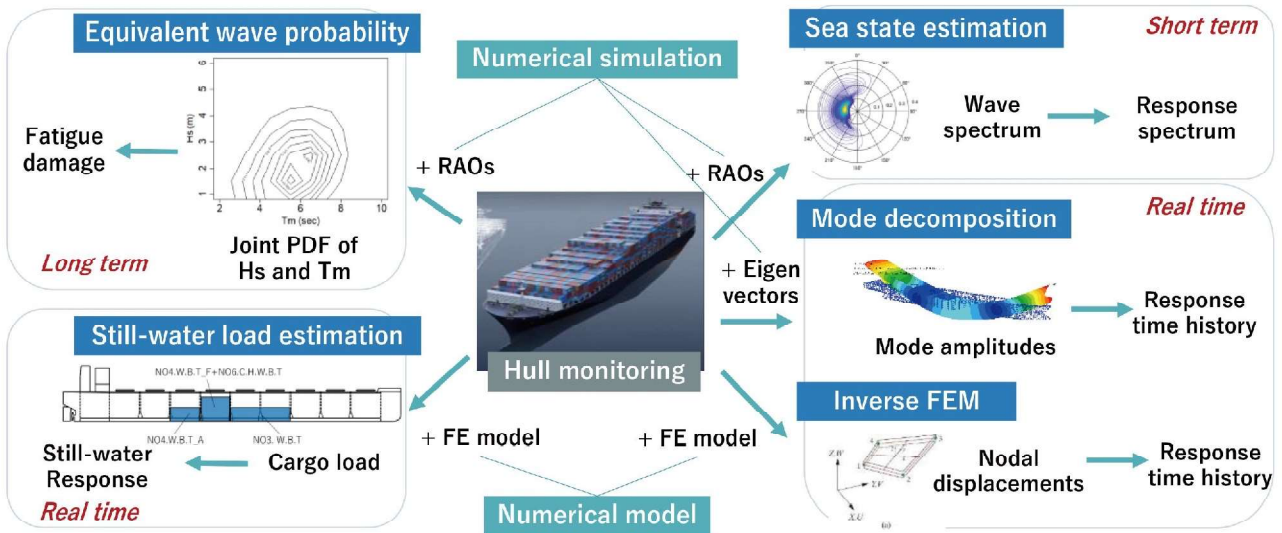


図1 船体構造デジタルツインに関連する様々なデータ同化手法

データ同化手法

図1に船体構造デジタルツインの研究開発プロジェクトを通じて開発されたいくつかのデータ同化手法を示す。計測された船体のひずみから非計測部の構造応答をリアルタイムに推定する手法としては、モード重ね合わせ法とカルマンフィルタを組み合わせた手法⁵⁾および逆有限要素法を用いる手法⁶⁾が提案された。また、事前に数値シミュレーションで準備したひずみの応答関数と計測したひずみから1～2時間の海象(短期海象)の波浪スペクトルを推定する手法⁷⁾が提案された。この手法では最適化計算に遺伝的アルゴリズムが用いられている。環境である波浪スペクトルを推定できれば、事前に準備する応答関数を通じて船体全体の構造応答を推定できる。さらに、構造に生じる疲労被害度の予測を目的に、より長期の視点で、計測ひずみから波浪の発現頻度(有義波高と平均波周期の同時確率分布)を推定する手法⁸⁾も提案された。本手法では同時確率分布の推定にMCMC法を用いたベイズ推論が採用された。以上に述べた手法は、リアルタイム、短期、長期と推定の対象とする時間に違いはあれど、いずれも波浪による構造応答を推定する手法である。一方、船体には静水中においても、自重、積荷、浮力により変形が生じる。この静水中における構造応答を推定することを目的に、梁有限要素法とアンサンブルカルマンフィルタを組み合わせて、ひずみから積載荷重を推定する手法⁹⁾が開発された。以上のように、構造モニタリングによりひずみの応答が

計測されることを前提に、数値シミュレーションを融合してモード振幅、波浪、積載状態などの状態量を推定し、船体全域の構造応答を推定する様々な手法が開発された。

この船体構造デジタルツインの研究開発プロジェクトに参加した研究者・技術者の多くは、船体の構造強度に関する専門家であり、データ同化に必要なベイズ推論や状態空間モデルについて(少なくとも筆者は)初心者であった。特に、研究開発の実務を担う若手は、関連する書籍を読むところから始め、次に簡単な例題を解くためのコードを作成し、勉強会を通じて情報を交換し、徐々に実問題を解くことに移行していった。プロジェクトに期間があるため苦労も多かったが、これらの作業を通じて面識のなかった若手の研究者・技術者と密な交流を持てたことは、筆者にとって大きな財産である。船舶海洋分野の若手の研究者・技術者の人的ネットワークを築けたことは本研究プロジェクトの大きな副産物であると言える。

実船検証

船体構造デジタルツインの研究開発プロジェクトのフェーズ2(2020年4月～2022年3月)では、新造船ではなく既存船(鉄鉱石運搬船)に船体構造デジタルツインのシステムを搭載し、システムの検証を行うことが計画された。まずは構造応答を計測するためのひずみセンサを複数個所に設置し、データ収集装置を置く機関室までケーブルを敷設する必

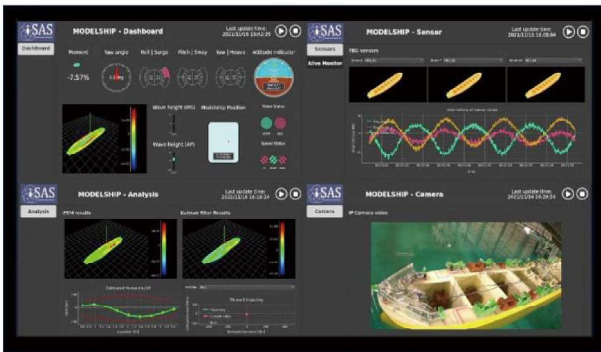


図2 i-SAS

要がある。その際、ケーブルを通すための貫通穴の設置、ケーブルの敷設後に水密を確保するための貫通穴のパテ埋めなど、付随する工事が発生する。ここで問題となったのが新型コロナウイルスである。船内でコロナの感染が生じると船の運航ができなくなるため、乗組員以外の訪船は不可となり、ひずみセンサの設置工事を延期せざるをえなかった。船体構造デジタルツインのプロジェクトは2022年3月をもって終了となったが、既存船でのシステム検証については継続することとなり、2022年11月によりやく工事が完了した。

鉄鉱石運搬船にはプロジェクトで開発された船体構造デジタルツインシステムであるi-SAS (Integrated Structural Analysis System)¹⁰⁾が搭載されている。i-SASは、計測データの解析・可視化をリアルタイムに処理するデジタルシステム構築のためのプラットフォームである。前述のデータ同化手法も解析ツール群として提供され、ユーザーが任意のツールを選択してデジタルツインを構築できる。図2は模型船を用いた水槽試験でi-SASの検証を行った際のキャプチャ画像である。鉄鉱石運搬船ではモード重ね合わせとカルマンフィルタを組み合わせたデータ同化手法がi-SASに実装された。搭載されたi-SASの検証およびデータ同化手法の改良を行うための共同研究が現在も継続されている。

課題と展望

プロジェクトを通じ、データ同化手法やデジタルツインシステムの開発および検証は進展したと言える。船体構造デジタルツインを普及させるためには、どのような意思決定の支援に活用できるかを考え、評価する必要がある。そこで、デジタルツインを用いて冒頭に述べた縦曲げ崩壊を回避すること対象に、

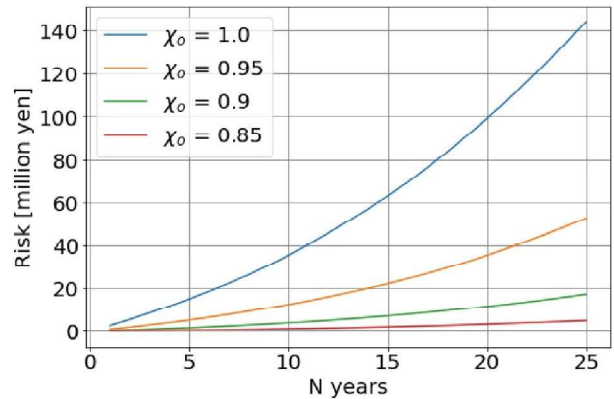


図3 縦曲げ崩壊のリスクの推移

簡単なコスト・ベネフィット分析を行った。縦曲げ崩壊により生じるコスト(リスク)＝縦曲げ崩壊が発生する確率×失われる価値を船の設計寿命である25年で評価した結果を図3に示す。詳細は割愛するが、評価に波浪荷重の不確実性、荷重・強度の推定手法に含まれる不確実性を考慮している。時間経過に伴い大きな波浪荷重に遭遇する確率が生じる一方、腐食による板厚の減耗により強度が低下するため、縦曲げ崩壊のリスクは年々増加する。ただし、操船者が行う平均的な荒天回避行動(図3の $X_0 = 0.85$ の線)を考慮すると、デジタルツインによる25年後のベネフィットは対象の鉄鉱石運搬船では数百万円程度である。これはデジタルツインの導入・運用コストを下回るため、縦曲げ崩壊の回避を目的とするだけでは不十分である。そもそも船は縦曲げ崩壊しないように船級規則に従って設計されるので、このような結果は当初から予期していた。

船体構造デジタルツインには、他にも多数のベネフィットがあるため、その評価を行う必要がある。デジタルツインにより船体全域の疲労被害度を知ることができるので、メンテナンスの計画を最適化することでメンテナンスコストを低減できると考えられる。また、日本の船主は新造した船を10～15年で売船することが多い。疲労被害度＝船の健全度を把握できることは、船の売船価格の向上につながると考える。ただし、これらの実現のためにはいくつかハードルがある。前者については、現在の船級規則では基本的に5年間隔でドック入りし点検することが義務付けられているため、規則の緩和が必要である。後者については、中古船市場の関係者の間で、構造健全度が売船価格に影響するという広い合意が必要である。一方、既に紹介したデータ同化手法の



図4 風力発電船¹¹⁾

いくつかは構造応答から波浪を推定している。データ同化に用いる数値シミュレーションが与える構造応答と計測された構造応答が一致するように入力を推定しているに過ぎないが、数値シミュレーションが正確であれば推定された入力は船舶が実際に遭遇した波浪とみなすことができる。波浪が分かればより正確に船の推進性能を評価でき、より最適な航路を選択することで、運航コストを低減できるだろう。

また、全く新しいコンセプトの船に適用することに船体構造デジタルツインの価値があるかもしれない。例えば、風力発電船¹¹⁾がある。この船は、物を運ぶのではなく、風況の良い海象に出向き、発電することを主目的とする。風況の良い海象では、自然と波浪も高くなることが多い。このような船は厳しい海象に敢えて向かうことになるため、作用する波浪荷重も厳しくなるであろう。船体構造デジタルツインを用いて構造の健全性を確認しながらオペレーションを行うことで、安全に発電を行うことができベネフィットも大きいと考える。

おわりに

船体構造デジタルツインの研究開発プロジェクトで開発されたデータ同化手法およびその実船検証を紹介しつつ、その普及に向けた課題と展望を述べた。本文でも述べたが、この研究プロジェクトに参加することで、研究者間のネットワークを持てたことが個人的な財産になったと感じる。研究者個人の基礎研究が大切であることはもちろん、専門の異なる研究者が集まり、社会実装につながるような応用研究を行うことも、総合工学である船舶海洋工学では重要である。このようなプロジェクトを提案する側になれるよう、日々の研究に取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) 辰巳晃：船体の縦曲げ崩壊，生産と技術，Vol. 70, No. 1, pp. 73-76, 2018.
- 2) 国土交通省海事局：コンテナ運搬船安全対策検討委員会最終報告書，2015.
- 3) 藤久保昌彦：船体構造デジタルツインの開発，日本船舶海洋工学会講演会論文集，Vol. 34, pp. 127-131, 2022.
- 4) 日本海事協会：船体構造モニタリングに関するガイドライン，2021.
- 5) 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, pp. 47-56, 2023.
- 6) 三上航平ら：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, pp. 229-233, 2020.
- 7) Chen X. et al: Estimation of directional wave spectra and hull structural responses based on measured hull data on 14,000 TEU large container ships, Marine Structures, Vol. 80, No. 103087, 2021.
- 8) Takeuchi T. et al.: Fatigue assessment of ship structures based on equivalent wave probability (EWP) concept (1st report): Proposal of EWP concept and its verification by 8600TEU container ship's onboard hull monitoring, Marine Structures, Vol. 91, 2023.
- 9) Tatsumi A. et al.: Estimation of still-water bending moment of ship hull girder using beam finite element model and ensemble Kalman filter, Proc. of International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, No. OMAE2022-78630, V002T02A017, 2022.
- 10) 三上航平ら：デジタルツインシステムプラットフォーム i-SAS の開発と水槽試験におけるシステム検証，日本船舶海洋工学会講演会論文集，Vol. 34, pp. 145-147, 2022.
- 11) 株式会社商船三井：BLUE ACTION 004 WIND HUNTER 風と水素で、未来をつくれ。、<https://www.mol.co.jp/bam/004/>、(参照 2024-01-11)