

船体構造デジタルツイン～海事産業DXに向けて～



技術解説

藤久保 昌彦*

Digital Twin for Ship Structures - Toward Maritime DX -

Key Words : Digital twin, Ship structure, Maritime DX, Hull monitoring, Data assimilation

1. はじめに

ビッグデータ、AI技術等の進展とともに、海上輸送を支える海事産業においてもデジタル変革(DX)の波が加速している。自律運航船、デジタルシップヤード、遠隔監視・保守など、近未来の造船・海上輸送体系の実現に向けた研究開発が活発に進められている。船体構造デジタルツイン(Digital Twin for Ship Structures, DTSS)は、この海事産業DXの一翼を担うものである。

デジタルツインとは、現実世界の構造物や機器の物理情報を取得するとともに、シミュレーションを活用して、双子のように現象をコンピュータ(サイバー空間)上に再現する技術である(図1)。現実世界ではアクセス困難な箇所の変形、応力が把握できるなど、構造物の状態監視を容易に行える。また実遭遇海象や経年状態を把握できることから、不確実性を低減しつつ安全性を担保した、より合理的な船舶の設計、建造、運用が可能となる。

このような背景のもと、(一財)日本船舶技術研究協会にて「超高精度船体構造デジタルツイン」の産学連携開発プロジェクト(2018~2021)が日本財団の助成を受けて実施された¹⁾。筆者は、そのプロジェクトリーダーを務めた。本稿では、プロジェクトの成果と今後の展開について概説する。

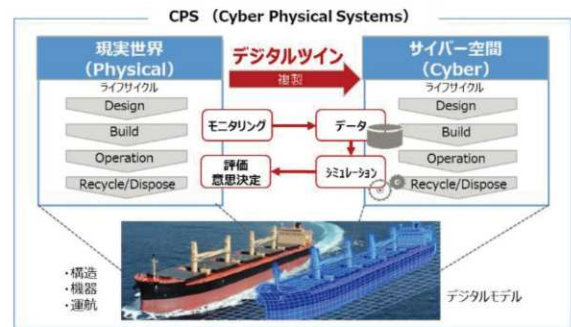


図1 船体構造デジタルツイン

2. 船体構造デジタルツイン

2.1 システムコンセプト

図2に、DTSSシステムのコンセプトを示す。大きく、「モニタリング」、「数値シミュレーション」、「評価・意思決定」の3つの部分からなり、これらをつなぐ共通デジタルモデルとして全船FE(有限要素)モデルが存在する。数値シミュレーションでは、データ同化、すなわち限られた計測点の計測データと数値シミュレーションを融合することにより、非計測点を含む船体全域の構造応答を推定する技術が鍵となる。「評価・意思決定」では、データ同化の結果に基づく多様な時間スケールの推論・評価を行う

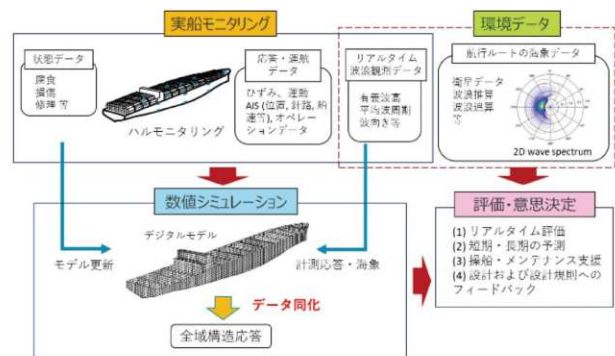


図2 DTSS システム



* Masahiko FUJIKUBO

1957年1月生まれ
 大阪大学大学院 工学研究科 造船学専攻
 攻博士前期課程(1981年)
 現在、大阪大学/広島大学 名誉教授
 工学博士
 専門/船体構造強度、最終強度、構造安全性
 E-mail : fujikubo@naoe.eng.osaka-u.ac.jp

う。例えば、荒天時の安全運航には、応答をリアルタイムに捉えられること、および最大応答を予測できることが必要である。一方、疲労強度評価やメンテナンス計画には、長期に亘る応力履歴と累積疲労被害度の把握および予測が必要となる。

2.2 データ同化法

モニタリングデータから船体全域の構造応答を推定するためのデータ同化法として、次の3つの方法を検討した (図3)。

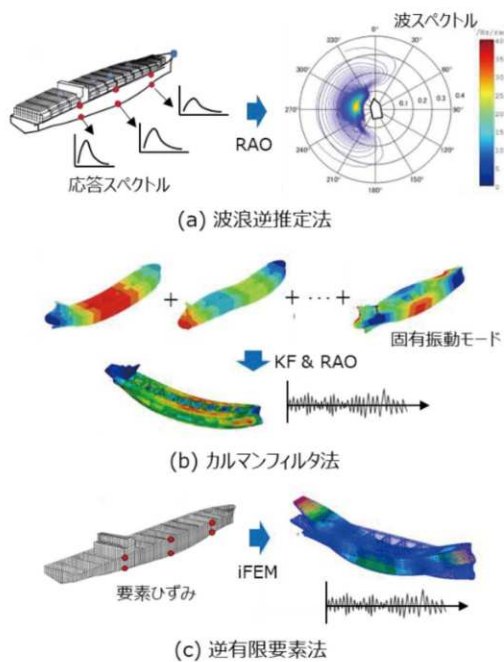


図3 データ同化法

波浪逆推定法²⁾：船舶が遭遇する波浪のスペクトルが分かれば、FE解析より求めた周波数応答関数あるいはRAO (Response Amplitude Operator, 応答振幅/波振幅比) を用いて、応答のスペクトルを求めることができる。この関係を利用して、有限個の計測点の応答スペクトルから、波スペクトルを逆推定する。一旦、波スペクトルが同定できれば、非計測点を含む船体の任意箇所の応答スペクトルを推定できる。具体的には、波スペクトルを図4のように多方向から入射する2次元波スペクトルに離散化する。この不規則波モデルから式(1)で計算される計測点位置の応答スペクトルと、実際の計測データによる応答スペクトルの差の自乗が最小となるよう、GA (Genetic Algorithm) を用いてスペクトルパラ

メータを同定する。

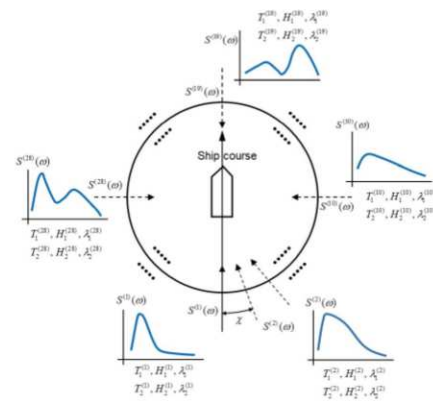


図4 多方向不規則波スペクトルの離散化²⁾

$$R_{mn}(\omega) = \int_{-\pi}^{\pi} [A_m(\omega, \chi)][A_n(\omega, \chi)]^* S(\omega, \chi) d\chi \quad (1)$$

式(1)で、 $S(\omega, \chi)$ は波スペクトル、 ω は角周波数、 χ は相対波角度、 $[A_m(\omega, \chi)]$ は応答 m の周波数応答関数、 R_{mn} は応答 m, n のクロススペクトルである。

カルマンフィルタ法 (KF法)³⁾：図3(b)のように船体の変形応答を有限個の固有モードの重ねあわせで表す。各モード変位に関する運動方程式 (状態方程式) および、モード変位と各計測点の応答の関係を与える観測方程式を用いて、カルマンフィルタを適用することにより、モード変位の時刻歴が求められる。得られたモード変位を考慮して固有モードを重ね合わせることにより、非計測点を含む船体の任意箇所の応答の時刻歴が得られる。

i-FEM (逆有限要素法)⁴⁾：通常のFEMでは、外力による構造変位を求め、次にひずみおよび応力を求める。i-FEMでは、計測点のひずみから船体の構造変位を逆解析的に推定する。KF法と同様、応答の時刻歴を求めることができる。

波浪逆推定法により得られる短期海象 (通常2~3時間程度) の短期統計量は、短期海象中の最大応答の予測や疲労被害度の算定に利用できる。一方、KF法およびi-FEMで得られる時刻歴応答は、荒天時のリアルタイムアラート等に利用できる。

これらのデータ同化法の適用性を調べるため、海上技術安全研究所実海域再現水槽にて模型試験を実

施した (図5)。模型は、ばら積み貨物船の縮尺 1/72 モデル (長さ 4m) である。GFRP サンドイッチパネルを用いて成形し、運動特性だけでなく、船体の縦曲げ、ねじり、さらに船底の曲げ剛性まで、実船相似にしている。また FBG (Fiber Bragg Gating) センサーにより、141 点のひずみおよび 150 点の圧力を計測した。RAO の計算には、海上技術安全研究所で開発の波浪応答解析システム DLSSA (Direct Load and Structure Analysis system) を使用した。

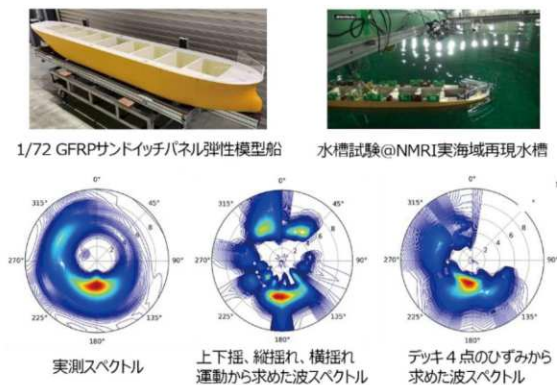


図5 波浪逆推定法による波スペクトルの推定

図5下段に、波浪逆推定法で推定した多方向波スペクトルと、波浪計測で得た実際の入射波スペクトル (最左図) の比較を示す。デッキ4点のひずみから推定した波スペクトルの方が、船体運動による推定よりも実スペクトルとよく一致している。これは、ひずみデータを用いることにより、高周波の入射波成分をより正確に捉えられることを示す。図6は、KF法とi-FEMで推定した、見なし非計測点のひずみ時刻歴を、実際のひずみ時刻歴と比較した結果である。いずれのデータ同化法の結果も、実測結果と良好に一致している。なお、各データ同化法の有効性は、実船計測でも確認されている¹⁾。

さらに後継研究においては、多方向不規則波を式(2)のように正弦波の重ね合わせとして表し、各成分波の振幅 a_{pj} , b_{pj} と計測点の応答データの関係を観測方程式として用いることにより、KF法により遭遇波の時刻歴を把握できることが示された⁵⁾。

$$\zeta_w(x, y, t) = \sum_{p=1}^{N_p} \sum_{j=1}^{N_w} (a_{pj} \cos \theta + b_{pj} \sin \theta), \quad (2)$$

$$\theta = \omega_j t - k_{wj} x \cos \chi_p - k_{wj} y \sin \chi_p$$

ここで、 ζ_w は絶対座標 x, y , 時刻 t における波振幅、 ω_j は角周波数、 k_p は波数 ($2\pi/\text{波長}$)、 χ_p は相対波角度である。図7に、模型試験においていくつかの入力応答ケースについて得られた遭遇波時刻歴の推定値と実測値の比較の例を示す。これにより、周波数領域 (波浪逆推定法) と時間領域 (KF法) の双方で、船舶が実際に遭遇する波を把握可能となった。このことは、DTSSが船体の構造安全性にとどまらず、推進性能、操縦性能、燃費性能など船舶の多様な波浪中性能の評価に利用可能であることを意味する。また、数値解析に基づくRAOの不確か性を考慮した波浪逆推定法の開発も進められている⁶⁾。

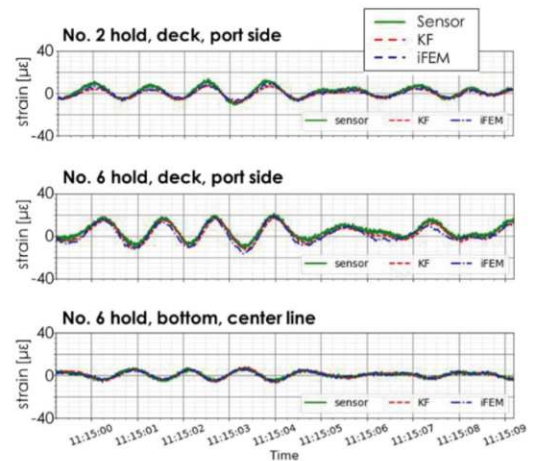


図6 KF法とi-FEMによるひずみ時刻歴の推定

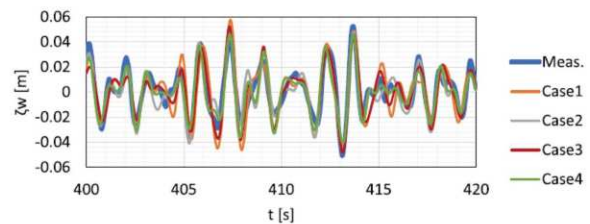


図7 KF法による遭遇波時刻歴の推定

一方、データ同化で再現した各種応答をオペレータにわかりやすく伝え、操船支援に供するためのDTシステムi-SAS (integrated Structural Analysis System) を開発している (図8)。i-SASは、計測・解析・可視化を接続するDTシステム構築のためのオープンプラットフォームとツール群を提供する⁷⁾。

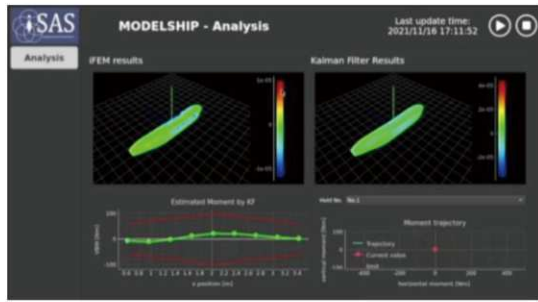


図8 DTシステム iSAS の表示例

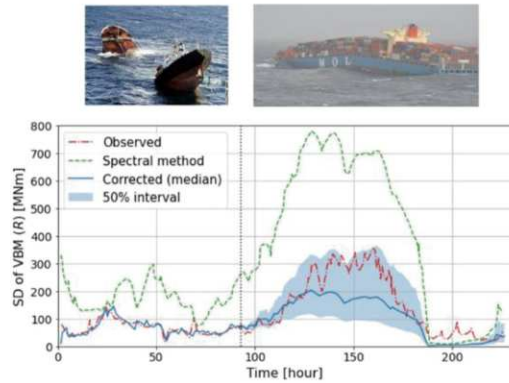


図9 縦曲げモーメントの標準偏差の時刻歴

2.3 評価・推論技術

DTSSの目的は、データ同化で再現した応答を、操船やメンテナンスの意思決定に活かすことである。図9は、船体の縦曲げ崩壊のリスク回避のため、現時点(横軸値90hour)までにDTSSで獲得した応答情報を基に、時系列統計モデルを用いて、以降の短期海象中の波浪縦曲げモーメントを予測した結果である⁸⁾。波浪推算から予測した応答(緑破線)は、波条件や仮定スペクトルの誤差によって実測値(赤)に比べ過大であるのに対し、ひずみ計測データからDTSSで補正した推定幅(水色)は、実測値を包含する予測幅を与えている。

一方、船体の累積疲労被害度は、長期波浪統計に基づく波浪頻度分布と航路履歴を基に、マイナー則(線形累積疲労被害則)によって算出される。しかし、このような計算法では、線形解析の仮定、波スペクトルの仮定、相対波角度の仮定など様々なモデル不確定性を伴うため、得られる累積被害度は観測値と一致しない。そこで、DTSSで再現される実際の応力頻度を用いて、累積被害度が観測値と一致するよう、入力である波浪頻度分布そのものを補正する。これを等価長期波浪頻度分布(Equivalent Long-term Wave Distribution, ELWD)とよび、そのパラメータを、ベイズ推論を用いて統計的に同定する方法を開発した⁹⁾。図10は、コンテナ船の航海AおよびBのデータからELWDを同定し、同船の12カ所の計測点について、従来の方法とELWDを用いる場合で累積疲労被害度を比較した結果である。ELWDによる推定値は、実測値とよく一致している。

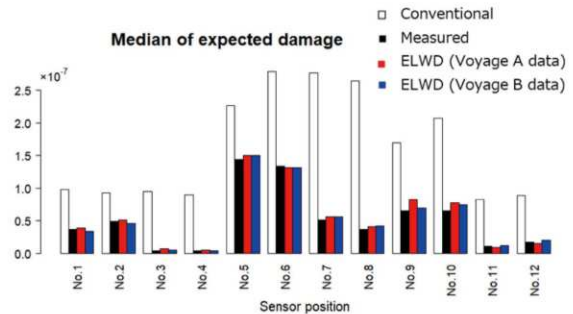


図10 累積疲労被害度の比較

2.4 活用シナリオ

図11は、DTSSの活用シナリオとして「操船支援」、「メンテナンス」、「構造規則」、「製品価値向上」に着目し、関連する具体項目を、比較的短期的に成果が期待できるものから時系列的に並べたものである¹⁰⁾。操船支援では、構造の安全余裕が見える化されることにより、事故の予防だけでなく、安全性が許容される範囲内でより定時性や燃費のよい航路を選択する可能性が生まれる。メンテナンスは、船体各部の疲労被害度が実績ベースで出力されることから、損傷リスクに応じたリスクベースメンテナンスへの移行を可能にする。また、遭遇海象、運航情報、作用荷重と発生応力の関係を一体として把握できることは、構造規則に関わる各種の不確実性を低減し、より柔軟かつ費用対効果の高い構造設計を可能にする。また仮に損傷が生じた場合にも、それが設計起因なのか運航起因なのかをより明確に特定できるため、生産の合理化、設計の高度化・多様化につながると期待される。

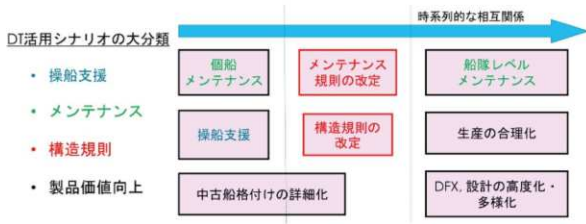


図11 DTSSの活用シナリオ

3. 今後の展開と課題

2.4に述べた活用シナリオは、実は構造DT単独では実現できない。図12に示すように、運航DT、エンジンDT、船型設計DT、建造DTなど、複数のDT間の連携と情報共有、すなわち「DTの統合化」があってはじめて実現する。これは、造船、海運、船級など海事産業のステークホルダー間の連携でもある。また、DTSSプロジェクトでは船体応答の推定・予測を対象としたが、腐食による減厚など船体状態データの取得および予測は取り扱っていない。これらの状態データを含めた、より統合的なDTの構築が求められる。

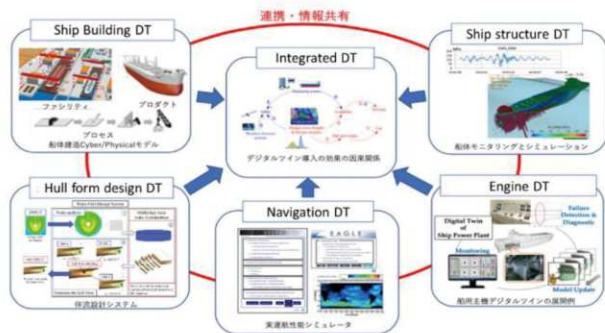


図12 統合化DT

その他、今後検討すべき課題として、以下の点が挙げられる。

- ・ データ同化および推論・評価技術のさらなる向上と実船検証
- ・ スラミングなどの強非線形応答への対応
- ・ デジタルツインの費用対効果の明確化と最大化
- ・ 持続的な開発・運用を可能にするビジネスモデルの構築
- ・ 普及に向けた技術標準化

特に第4の課題に挙げたように、どのような技術システムも、持続的な開発・運用のためにはビジネスモデルの構築が不可欠である。すなわちサービ

スと対価の関係構築が必須である。図13では、DTサービスを担うステークホルダーを「DTコンサル」と定義したが、これは特定のステークホルダーに帰属する可能性もある。技術開発と平行して、海事産業DXの推進に向けたビジネスモデルの議論が進むことを期待する。

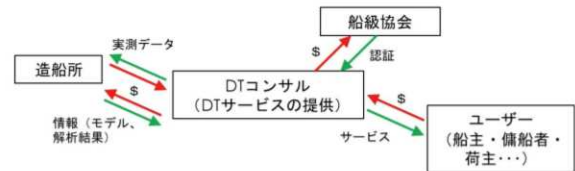


図13 DTのビジネスモデル案の例

4. おわりに

本稿では、船体構造デジタルツイン (DTSS) プロジェクトの概要と、海事産業DXの実現に向けての今後の展望と課題について述べた。DTSSのより詳細については、参考文献および動画¹¹⁾を参照いただきたい。

なお、2025年4月に、大阪大学大学院工学研究科に「先進海事システムデザイン共同研究講座、Open Collaboration Laboratory for Enabling Advanced Marine Systems (呼称：阪大OCEANS)」が産学連携講座として開設された。本講座では、船舶の設計、建造、運航、保守における先進的なAI活用、DT活用について研究開発が進められる予定であり、DTSSはその基盤技術の一つを提供することになる。

参考文献

- 1) M. Fujikubo et al., A digital twin for ship structures - R&D project in Japan, Data-Centric Engineering, 5: e7, 2024, doi:10.1017/dce.2024.3.
- 2) X. Chen, T. Okada, Y. Kawamura and T. Mitsuyuki, 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, doi.org/10.1016/j.marstruc.2021.103087.
- 3) 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, 第 37 号, pp. 229-233, 2023.
- 4) 三上航平他, 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, 第 30 号, pp. 47-56, 2020.
 - 5) Y. Komoriyama, K. Iijima and M. Fujikubo, Kalman filter technique for estimating encountered wave profiles and unmeasured ship responses using measurement data in short-crested irregular waves, *Applied Ocean Research*, 155, 104453, 2025, doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113627.
 - 6) X. Chen, T. Takami, M. Oka, Y. Kawamura and T. Okada, Stochastic wave spectra estimation (SWSE) based on response surface methodology considering uncertainty in transfer functions of a ship, *Marine Structures* 90, 103423, 2023, doi.org/10.1016/j.marstruc.2023.103423.
 - 7) 三上航平他, 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, 第 34 号, pp. 145-147, 2022.
 - 8) 大沢直樹, 辰巳晃, 武内崇晃, 8,600TEU 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, 第 34 号, pp. 163-167, 2022.
 - 9) T. Takeuchi 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* 80, 103476. 2023, doi.org/10.1016/j.marstruc.2023.103476.
 - 10) 濱田邦裕, 満行泰河, システムズアプローチによる船体構造デジタルツインの社会実装シナリオの提案, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 30 号, pp. 251-253, 2020.
 - 11) Digital Twin for Ship Structures – Sail to Cyber Sea, <https://www.youtube.com/watch?v=Z7Jhtkxl0AY> (日本語), <https://www.youtube.com/watch?v=hpG7-5lmUuU> (英語).

