

# 船体構造デジタルツイン ～海事産業 DX に向けて～



特集  
ハイテク推進  
セミナー

大阪大学／広島大学  
名誉教授 藤久保 昌彦 氏

## 1. 背景

IoT、AI、ビッグデータ技術等の進展に伴って、船舶による海上輸送を担う海事産業においても、デジタル変革 (DX) への動きが加速している。開発、設計、建造、運航・メンテナンスを含む船舶のライフサイクル全体に亘って 3D データを一貫して活用し、生産性の抜本的向上を図るデジタルシップヤードの実現、自動運航船の開発など、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行われている。船体構造デジタルツインは、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 (DT) とは、現実世界の構造物や機器の物理情報をセンサにより取得するとともに、数値シミュレーションと組み合わせて、双子のようにそれらをコンピュータ上 (サイバー空間) に再現する技術である (図 1)。現実世界でアクセス困難な構造部位の変形応答が把握できるなど、構造物の状態監視を容易に行えるようになる。また実際の遭遇海象、応答、経年状態等を一体として把握できることから、安全性を担保しつつ余剰な強度を廃した、より合理的な船舶の設計、建造、運用につながると



講師 藤久保 昌彦 氏

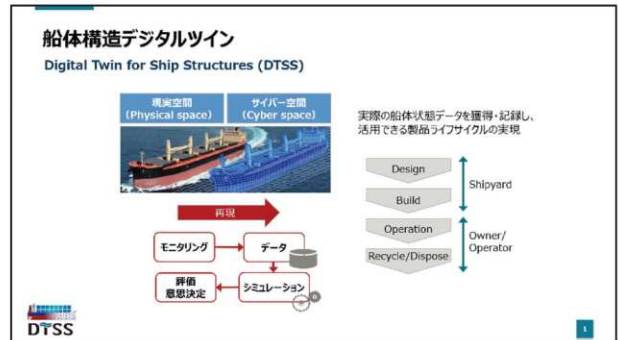


図1

期待される。

このような背景のもと、2018 年度から 4 年間に亘り、(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研究開発」プロジェクトが、日本財団の助成を受けて実施された。筆者はそのプロジェクトリーダーを務めた。ここでは、プロジェクトの概要とその後の展開、今後に向けた課題について概説する。

## 2. 船体構造デジタルツイン

### 2.1 コンセプト

図 2 に、船体構造 DT (DT for Ship Structures, DTSS) 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、すなわち計測データとシミュレーションの融合が重要となる。コスト制約を考慮して、いかに少ないセンサ数で、より広範囲かつ高精度に船体応答を再現できるかが鍵となる。「評価・意思決定」では、多様な時間スケールの DT の活用が考えられる。荒天時の安全運航には、応答をリアルタイムに把握できること、また最大応答を予測できることが必要である。疲労評価やメンテナンスには、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。

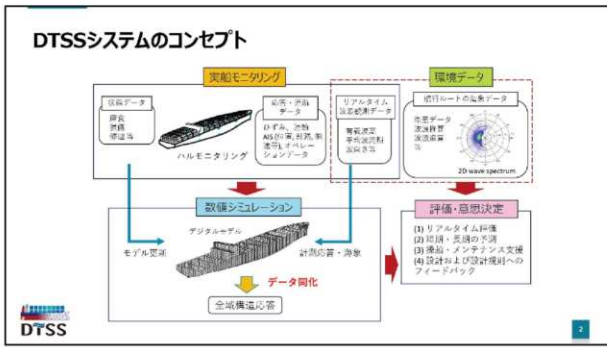


図2

## 2.2 データ同化技術

波浪中船体応答の数値シミュレーションには、(国研) 海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所で開発された運動・荷重・構造一貫FE解析システム DLSA (Direct Load and Structure Analysis system) を使用した。これと計測データを融合するデータ同化法として、図3に示す3つの方法を適用した。

**波スペクトル法**：船舶が遭遇する波浪のスペクトルが分かれば、数値シミュレーションで得られる応答関数を用いて、各種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が推定できる。

**カルマンフィルタ法 (KF法)**：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。計測した応答時刻歴から各モード振幅の時刻歴をカルマンフィルタで同定する。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を得る。

**i-FEM (逆有限要素法)**：FEMでは、外力による構造変位をまず求め、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。

これらのデータ同化法の適用性を調べるため、海洋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4)。模型は、ばら積み貨物船の縮尺

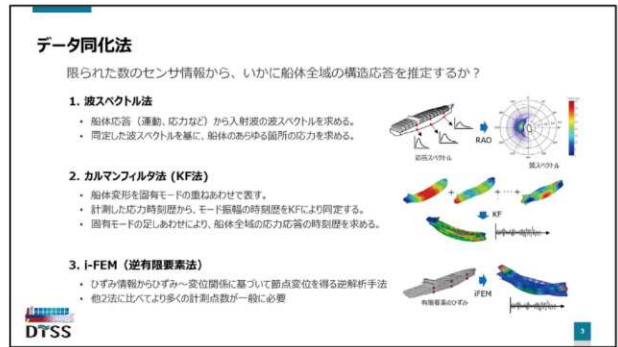


図3

1/72 モデル (長さ 4m) であり、運動特性だけでなく船体の縦曲げ変形、ねじり変形、さらに隔壁間の二重底の曲げ変形まで実船相似としている。また FBG (光ファイバ) センサにより、141 点のひずみおよび 150 点の船体表面圧力を計測した。図4左下部に、応答から推定した波スペクトルを実際に入射波スペクトルと比較して示す。デッキ4点のひずみから推定した波スペクトルの方が、上下揺、縦揺れおよび横揺れ運動から推定した場合よりも実スペクトルとよく一致している。これは、剛体運動では高周波の入射波成分が捉えられず、ひずみを計測してはじめて捉えられることを示す。図4右図は、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、当該箇所の実際のひずみ時刻歴と比較した結果であり、良好な一致を確認した。

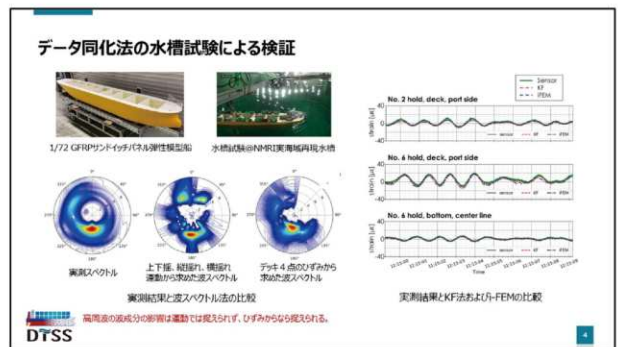


図4

以上のデータ同化法で得られる全船構造応答を可視化し、操船支援に供するためのDTシステム i-SAS (integrated Structural Analysis System) を開発した (図5)。i-SASは、計測・解析・可視化をリアルタイムに接続する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。構造DTのみならず、運動DT、エンジンDTなど

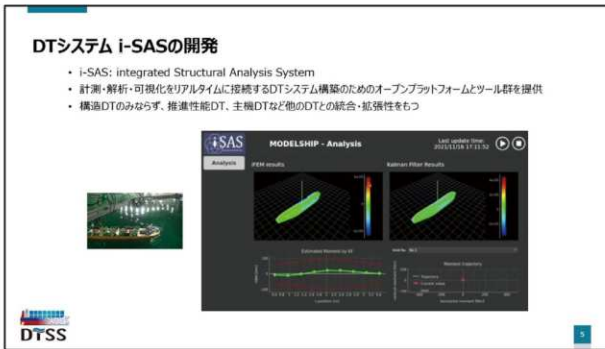


図5

他の DT との統合・拡張性をもつ。

DTSS の実船適用の一例として、鉱石運搬船（長さ 320m）に FBG センサを設置して計測したデッキとボトム部のひずみ時刻歴と、KF 法によってデッキ 8 点の計測ひずみから推定したひずみ時刻歴の比較を図 6 に示す。左図に示す 8 つの曲げおよび振り固有振動モードを考慮した。ボトム部（局所変形影響が大）のひずみ推定に改善の余地があるが、実船への KF 法の良好な適用性が検証された。

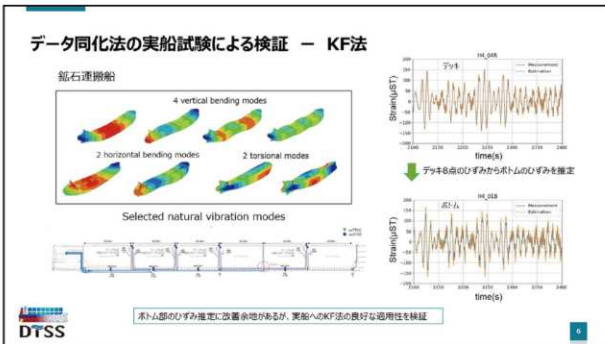


図6

DTSS プロジェクトでは、波浪による構造応答の推定に主眼を置いたが、その後の研究により、KF 法は、波のプロファイルの時刻歴推定、さらには静水中での船体曲げモーメントおよび荷重分布の推定にも有効であることが示された (図 7)。特に前者は、既述の波スペクトル法とともに、DTSS が構造応答だけでなく、遭遇波そのものを再現可能であること、言い換えれば、船そのものが波浪センサになる！ことを意味する。このことは、DTSS が、構造安全性のみならず、推進性能、操縦性、燃費など多様な船舶性能の評価に利用可能であることを意味し、幅広い応用が期待される。

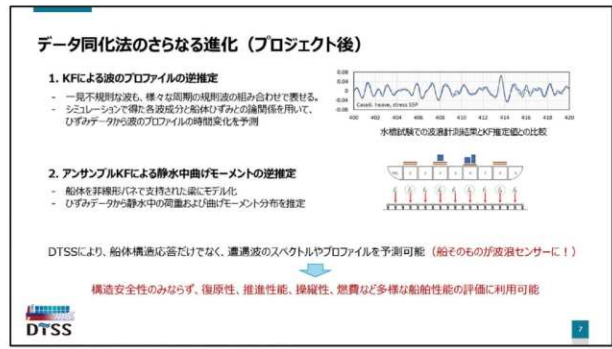


図7

### 2.3 評価・推論技術

DTSS の目的は、データ同化により推定した応答を、操船、メンテナンスなどの意思決定の支援に活かすことである。図 8 は、現時点（横軸値 90hour）までに DTSS で獲得した応答データを援用して、以降の遭遇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。波浪推算のみから予測した応答（黄緑）が、波条件や仮定したスペクトルの誤差によって実績値（赤）に比べ過大であるのに対し、DTSS で補正した推定幅（水色）は実績値を包含する予測幅を与えている。累積疲労被害度については、DTSS で得られた有限個の計測点の応力履歴データに基づいて長期波浪頻度分布を修正することにより、非計測点を含めて、実績値により適合する疲労被害度の推定が可能であることが示されている。

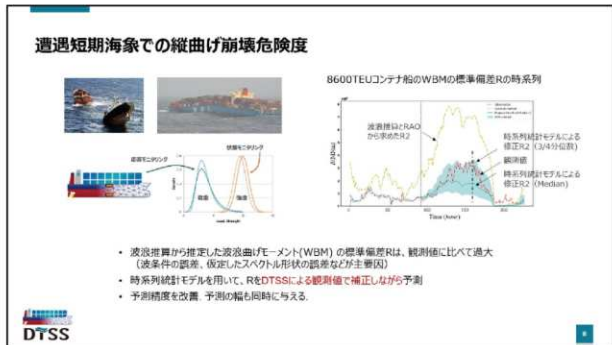


図8

### 2.4 活用シナリオ

図 9 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。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、重大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り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ことは、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。

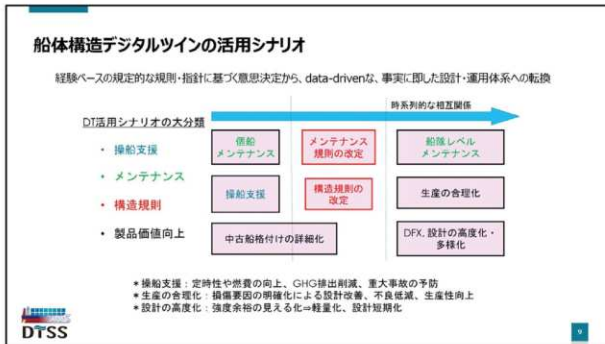


図9

### 3. 今後の展開および課題

2.4 に述べた活用シナリオは、構造 DT 単独で実現できるものではない。図 10 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、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・予測に注力したが、腐食による減厚など船体状態データの取得と予測は扱えていない。これら状態データに関する充実を含めた統合化 DT の構築が今後の課題である。

図 11 にその他、今後検討すべき課題を列記する。どのような技術システムも、それを持続的に開発、運用するためには、ビジネスモデル、すなわちサービスと対価の関係構築が必須である。図には 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、これがいずれかのステークホルダーに帰

属する場合もあり得る。技術と平行して、ビジネスモデルの議論が進むことを期待する。最後に、末尾に記載の通り、DT を正しく構築し使用するためには、物理現象に対するこれまで以上に深い理解と評価力が必要であることを付記する。

なお、DTSS プロジェクトのより詳細については、参考文献に上げた文献ならびに動画を参照いただきたい。

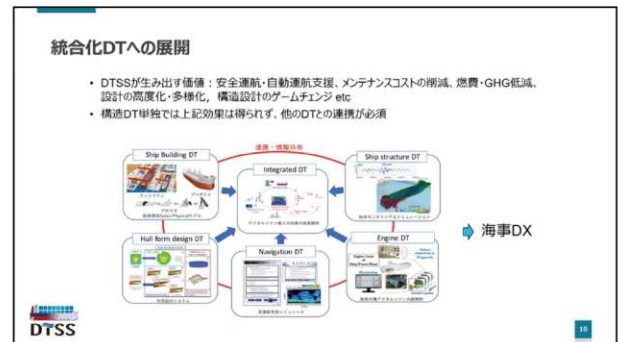


図10

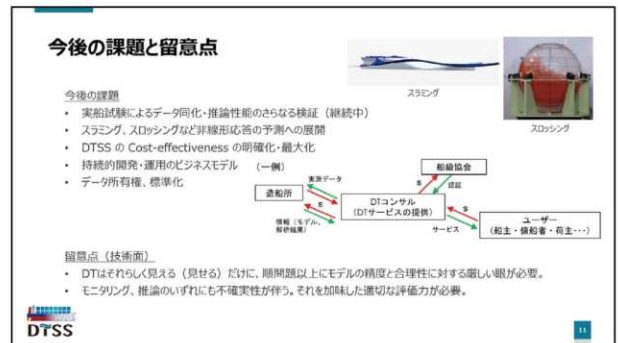


図11

### 参考文献

[1] M. Fujikubo et al.: A digital twin for ship structures - R&D project in Japan, Data Centric Engineering (2024), 5: e7, doi:10.1017/dce.2024.3

[2] Digital Twin for Ship Structures - Sail to Cyber Sea, <https://www.youtube.com/watch?v=Z7Jhtkx10AY> (日本語), <https://www.youtube.com/watch?v=hpG7-5lmUuU> (英語)