

Supported by  日本 THE NIPPON
財団 FOUNDATION

超高精度船体構造デジタルツインの 研究開発（フェーズ2）

2021年度 成果報告書
概要版

2022年3月



一般財団法人 日本船舶技術研究協会

1. 研究概要

1.1 背景と目的

船舶の無人運航等、IoT/AI時代の海上輸送体系を世界に先駆けて実現するためには、「船体構造デジタルツイン技術」を実用化し、船舶の設計・建造、運航、保守管理、解撤に至るまでをサイバー空間上で実行・管理できる技術が不可欠である。本事業のフェーズ1では、その基盤技術を構築するとともに、海事産業にもたらす価値についても検討を行い、その有効性を確認した。

本研究では、フェーズ1での検討結果を踏まえ、実装用船体構造デジタルツインの研究開発を産学官で連携して実施する。構築したデジタルツインを模型船及び実船を用いた実海域試験等により検証するだけでなく、関係する技術の標準化を目指すとともに、新たな海事産業ビジネスモデルを検討することにより、世界最先端の船体構造デジタルツインシステムの実用化を図ることを目的とする。

1.2 開発目標と期待される効果

1.2.1 本研究の達成目標

本研究では、フェーズ1において検討された船体構造デジタルツインを構成する基盤技術を実装用システムとして統合することを達成目標とする。具体的には、ハルモニタリングから得られる計測データと物理モデル（シミュレーション等）を融合（データ同化）させ、非計測箇所の応答を推定するほか、バイズ更新等を用いて将来の応答をも予測可能なデジタルツインシステムを構築する。複数船種の実船を用いて、実海域で本システムを検証することを最終達成目標とするが、局所ひずみレベルでの精度検証を、模型船を用いた水槽試験により行うほか、ハルモニタリングシステムの構成やデータの取得・蓄積・転送等の検証を、自航模型船を用いた実海域試験により行う。これらの結果を総合して、実用化に直結するシステムの標準仕様を構築し、日本の海事産業が世界に先駆けて船体構造デジタルツインの実用化に取り組む環境を整備する。

1.2.2 期待される効果

日本の海事産業が船体構造デジタルツイン技術の実用化に取り組む環境を整備することにより、以下の効果の発現を支援・促進する。

- 船体構造デジタルツインの実用化により、安心・安全な船舶の備船、健全性が見える化による船舶のアセットとしての価値判断材料の提供、荒天遭遇時のリアルタイムアラート等運航支援、日本の高精度建造技術を前提とした合理的な船舶の設計・建造、危険部位の事前把握及び最適・効率的な検査支援等が可能になると期待される。
- 遠隔モニタリングによる船舶の安全無人運航、並びに、船舶の軽量化や効果的なルーティングによるGHG排出削減等、世界に先駆けた海事デジタルトランスフォーメーションの実現に貢献することができる。

1.3 研究内容

船体構造デジタルツインの実用化に向け、2020年度および2021年度の2年間で、「超高精度船体構造デジタルツインの研究開発（フェーズ1）」で検討したハルモニタリング技術、シミュレーション

技術およびデータ同化技術を統合化し、状態量を見える化するためのデジタルツインシミュレータ(i-SAS)の開発を行う。また、構築したデジタルツインシステムを検証するための水槽試験および実海域試験を実施する。さらに、船体構造デジタルツインがもたらす新たなビジネスモデルや関連技術の戦略的標準化についての検討を行う。

1.3.1 船体構造デジタルツインシステムの開発

検証試験の詳細計画を検討するとともに、検証試験に供する模型船(GFRP サンドイッチパネル製弾性模型船および 1/10 自航模型船)および実船(ケープサイズばら積み貨物船および鉾石運搬船)に実装する船体構造デジタルツインシステムを開発する。

(1) モニタリング手法およびシミュレーション手法の構築

模型船および実船に対して、計測項目、計測位置、計測機器、計測センサ、試験内容等について詳細検討するとともに、デジタルツインシステムで使用するシミュレーション手法を整備する。

(2) 全供試験のデジタルモデルおよびシミュレータの構築

模型船および実船に対して、船体運動・荷重解析および構造解析のためのデジタルモデルを作成するとともに、ハルモニタリングデータ(計測箇所の応答)およびシミュレーション結果(非計測箇所の応答)等を見える化するデジタルツインシミュレータ(オープンプラットフォーム i-SAS)を構築する。

(3) 実装用船体構造デジタルツインシステムの構築

i-SAS や実船搭載する船舶運航支援統合プラットフォーム(SeaNavi[®]2.0)に、データ同化手法(波スペクトル法、カルマンフィルタ法、iFEM 法)を組み込み、実装用船体構造デジタルツインシステムを構築する。

(4) 健全度評価フローの構築

上記のデータ同化手法およびこれまでに検討した推論技術に基づき、疲労強度評価(長期予測)や縦曲げ最終強度評価(短期予測)を実現するためのフローを構築する。

1.3.2 水槽試験および実海域試験による検証

水槽試験および実海域試験を実施し、構築した船体構造デジタルツインシステムの性能や精度を検証する。

(1) 実船用のモニタリング装置、デジタルツインシステムの計画、設計、装備

模型船および実船に対して、ハルモニタリングシステムを設置する。また、1.3.1 で構築したデジタルツインシミュレータを搭載する。

(2) 模型船および実船によるシミュレータの検証、船体構造デジタルツインの標準仕様の提案

水槽試験および実海域試験の結果をもとに、構築したデジタルツインシステムの性能や精度等を検証する。また、モニタリング結果とシミュレーション結果の比較により、最低限必要なセンサ数やその設置個所を検討し、デジタルツインシステムの標準仕様を提案する。

1.3.3 技術標準化と新たなビジネスモデルの検討

船体構造デジタルツインの社会実装が促進され、日本の海事産業がその価値を享受するため、以下

の検討を行う。

(1) 関連技術の標準化と新たなビジネスイメージの具体化

標準化のスコープ等（例えば、国際標準 vs. 国内標準の選択）を戦略的な観点から議論し、ロードマップを構築して検討を行う。また、開発した「配船モデル」及び「INFINTモデル」により、費用対効果の観点からのデジタルツイン活用シナリオをより具体化・定量化するとともに、他のデジタルツインとの関係を踏まえた活用シナリオを具体化する。

(2) 構造規則のあり方と仕様の提案

船体構造デジタルツインによる不確実性の低減が、構造検査や構造規則に及ぼす影響を検討する。

1.3.4 成果報告会の開催

4年間にわたる研究開発の成果を報告するとともに、本研究成果の活用と他のデジタルツインとの連携によって実現される先進的な船舶の運航、設計・建造、保守・検査など、海事産業のデジタルトランスフォーメーション（DX）の重要性を広く理解いただくため、成果報告会を開催する。

1.4 研究期間

2020年4月1日～2022年3月31日の2カ年である。2021年度においても新型コロナウイルス感染拡大の影響により、本研究の一部の進捗に遅れが生じ、期間内での達成を断念した。残された課題については、後継プロジェクトで引き継ぐことを関係者間で合意し、研究期間を延長しないこととした。

1.5 研究体制

一般財団法人日本船舶技術研究協会をプラットフォームとする研究開発委員会を再構成し、ステアリング・グループ（SG）のもとに、テクニカルグループ（TG）および5つのワーキンググループ（WG）を組織した。グループの構成を Fig. 1.5-1 に示す。

2021年度は、事務局主催の委員会として計3回のSG会議を開催した。また、各グループにおける研究活動及び会合は個別に行われた。ただし、新型コロナウイルス感染症対策のため、オンライン会合等を活用した。

参加した大学関係者及び海事関係機関は以下のとおりである。

- 国立大学法人大阪大学 藤久保委員長、大沢委員、飯島委員、箕浦委員、辰巳委員、武内委員（2021年4月より）
- 国立大学法人九州大学 後藤委員、柳原委員、藤委員（2020年3月末までは東京大学）
- 国立大学法人東京大学 鈴木委員、村山委員、宝谷委員
- 国立大学法人東京海洋大学 田丸委員
- 国立大学法人広島大学 濱田委員、田中委員
- 国立大学法人横浜国立大学 岡田委員、川村委員、満行委員
- 国立研究開発法人海上・港湾・航空研究所 海上技術安全研究所
- 一般財団法人日本海事協会
- 川崎汽船株式会社

- 株式会社商船三井
- 日本郵船株式会社
- 株式会社 MTI
- 株式会社大島造船所
- 株式会社新来島サノヤス造船
- 株式会社新来島どつく
- 日本シッパード株式会社
(2020年度までは今治造船株式会社とジャパンマリユニテッド株式会社として参加)
- 三菱造船株式会社
- 三菱重工業株式会社
- 一般財団法人日本船舶技術研究協会 (事務局)

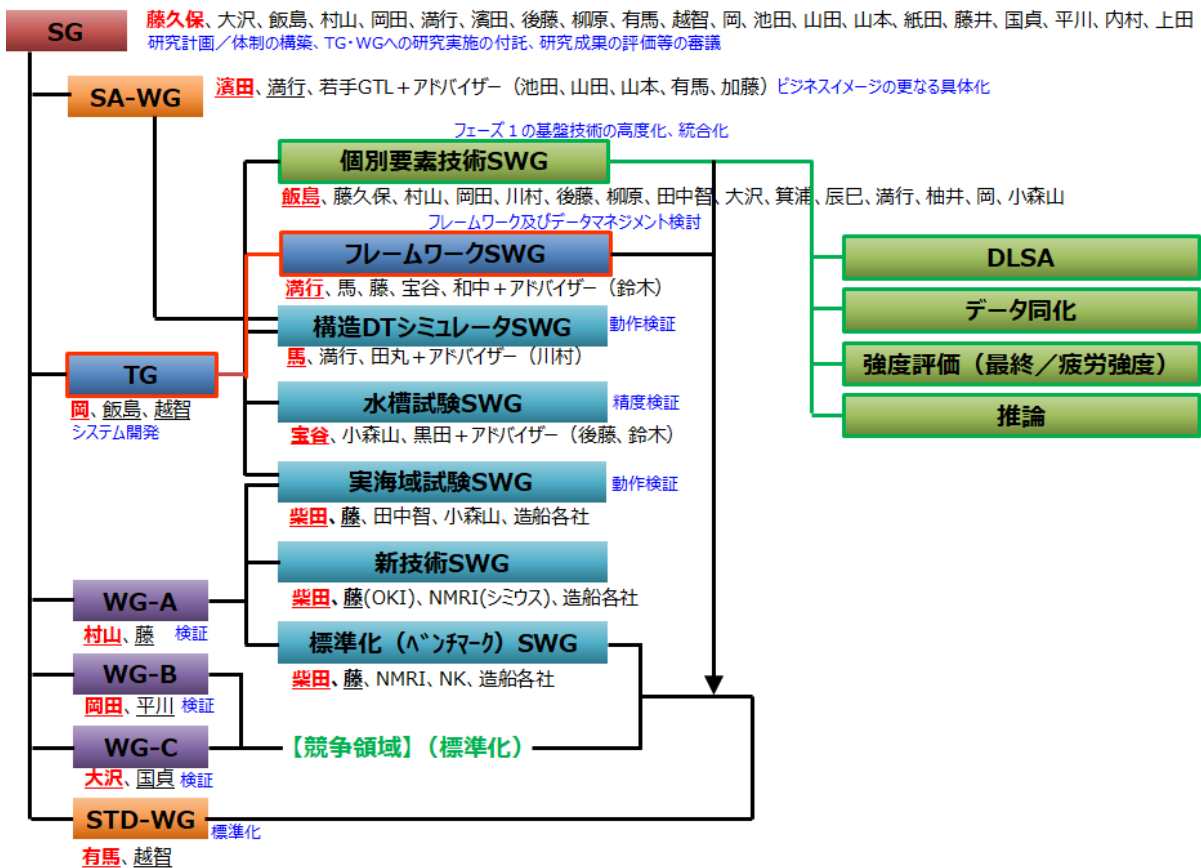


Fig. 1.5-1 船体構造デジタルツインの研究開発委員会 (フェーズ2) のグループ構成

1.6 研究結果

ハルモニタリングと数値シミュレーションを融合して、実海域における船体の構造応答をサイバー空間に詳細に再現し、設計・メンテナンス・操船支援等に利用することを目的として、船体構造デジ

タルツインシステムの開発と検証を実施した。

フェーズ 1 (2018~2019 年度) では、船体構造デジタルツイン (以下、DT) の基盤技術として「モニタリング技術、シミュレーション技術、評価・推論技術」を検討した。またシステム開発のロードマップを策定した。フェーズ 2 (2020~2021 年度) では、各基盤技術および GUI 機能をオープンプラットフォーム (i-SAS) に統合した DT システムを開発し、水槽試験と実海域試験によりシステムの精度と動作性能を検証した。また、船体構造 DT の社会実装シナリオとその波及効果を、運航・主機等の他の DT との関係を踏まえて具体化した。さらに、船体構造 DT の普及のための技術標準化の枠組みを検討した。

ここでは、4 年間のプロジェクトで得られた主要な成果を、技術項目別にまとめる。

1.6.1 モニタリング技術

船体構造DTシステムの起点となるのは、ひずみ、変位、加速度、圧力、温度等のセンサであり、その出力の精度と信頼性が重要となる。また実船実装に当たっては、センサの耐久性、設置の容易さやコストも重要な要素となる。

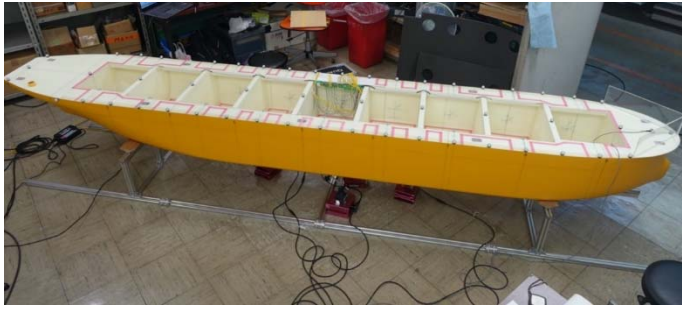
水槽試験 (Fig. 1.6-1(a)参照) では、FBGセンサによるひずみ・圧力・加速度の計測を行い、省配線での同時多点計測が可能であることを確認した。1/10自航模型船を用いた実海域試験では、複数の種類のFBGセンサを用いたフルモニタリングシステム (HMS) を構築し、各センサ出力の安定性、異なるセンサ間の出力の整合性、温度保障性能等を確認した。また、周因監視を含む実海域航行中のモニタリング情報の遠隔通信ならびに監視を、国産のセンサ・機器のみで実施することに成功した。

実船の実海域試験は、ケーブサイズばら積み貨物船を対象に、箔ひずみゲージを用いたHMSより実施した (同図(b)参照)。構造強度評価では、波浪応答成分だけではなく、静水成分を含む応答の絶対値が必要である。実船計測によると、停泊時、航行時とも、昼夜、緯度、海域に応じて温度影響による平均応力の明確なシフトが認められた。これに関して、梁理論に基づく温度影響補正法を示した。

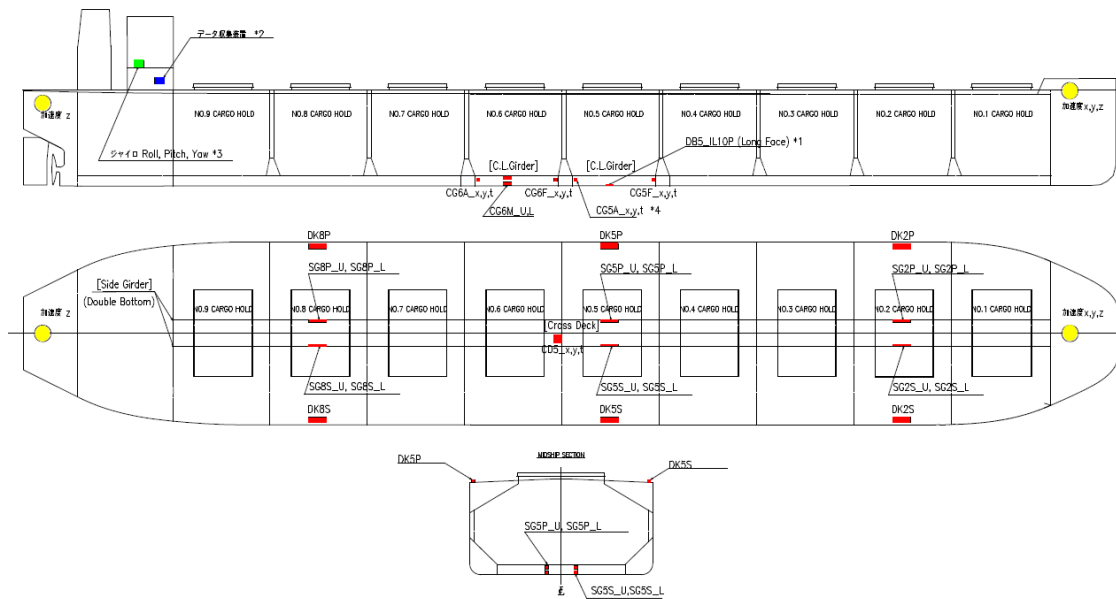
今後は、コロナ禍のため実施不可能となったFBGセンサによるモニタリングを含めて、実船モニタリングデータをさらに蓄積すると共に、温度影響補正を含む計測状態量の信頼性の向上、腐食環境など各種環境下のセンサの耐久性に関する検討、レトロフィット時を含むセンサ設置法や最小設置コストの検討、通信システム・コストなどデータマネジメントに関する検討が必要である。

1.6.2 数値シミュレーション技術

船体構造DTでは、波浪中船体の高精度の荷重・構造応答シミュレーション技術を有することが前提となる。本プロジェクトでは、海上技術安全研究所で開発された全船FEモデルに対する荷重・構造一貫強度評価システムDLSA (Direct Load and Structural Analysis system) をシミュレーションコードに定めた。同研究所実海域再現水槽で行った水槽試験の結果と比較して、その良好な精度を確認した。



(a) 供試弾性模型船とFBGひずみセンサ



(b) ケープサイズばら積み貨物船におけるセンサ配置

Fig. 1.6-1 本事業で実証したハルモニタリング技術例

1.6.3 水槽試験技術

船体構造DTに用いる数値シミュレーション法およびデータ同化法の精度検証のためには、ハルガーダーとしての全体変形に加えて、局部変形まで再現可能な弾性模型船が必要である。本プロジェクトでは、フェーズ1にて、ウレタン材を用いた弾性模型船を製作したが、ウレタン材とひずみセンサの剛性比が大きく異なることから、ひずみ計測値に補正を要した。次に製作したアクリル製弾性模型船は、形状加工性と局部剛性の再現性に課題を残した。そこで「船型相似性、ひずみの直接計測性、全体・局部変形の相似性」のすべての要件を満足する弾性模型船として、新たに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船を開発した。これにより、シミュレーション法およびデータ同化法の精度検証を可能にした。GFRP サンドイッチパネル弾性模型船の設計・製作技術は、本プロジェクトに限らず、弾性応答を伴う水槽模型試験全般に波及性を有する成果である (Fig. 1.6-1(a)参照)。

1.6.4 データ同化技術

船体構造DTでは、データ同化技術、すなわちモニタリングと数値シミュレーションを融合して、限られた計測点のデータから船体全体の構造応答を推定する技術がコア技術となる。

波浪応答に関して、次の3つのデータ同化法を開発した。

- ・ 波スペクトル法（波浪逆推定法）：計測点の周波数応答関数と応答スペクトルから波スペクトルを推定する。得られた波スペクトルから任意箇所の応答スペクトルを求める。
- ・ カルマンフィルタ法（KF法）：固有モード、固有振動数と計測点の応答時刻歴から、固有モードの時刻歴を求め、モード重ね合わせにより任意箇所の応答時刻歴を求める。
- ・ i-FEM：計測点のひずみ時刻歴と有限要素の節点変位～ひずみ関係から変位分布を逆解析することにより、任意箇所の応答時刻歴を求める。

各手法の精度を、水槽試験結果との比較により調べた。その結果、i-FEMおよびKF法についてはおおむね20%の誤差で非計測点のひずみが推定できること、また波スペクトル法についてはおおむね10%以下の誤差で非計測点のひずみの標準偏差値を推定できることを明らかにした。これらは、モデルの精緻化等により、さらに改善の可能性を有する。

波スペクトル法については、バルクキャリアの実船計測データに基づく検証も実施した。「モニタリングで直接計測した応力標準偏差」、「波浪推算等に基づいて設定した遭遇波スペクトルから求めた応力標準偏差（通常法）」および「波スペクトル法（デジタルツイン）により逆推定した遭遇波スペクトルから求めた応力標準偏差」の三者を比較した結果、波スペクトル法により、通常法よりも高い精度の応力推定が可能であることを確認した。なお、波スペクトル法は、いわば船体自体をセンサとして海象状態を推定する方法である。したがって、構造応答のみならず、動揺、貨物応答、推進性能等の推定にも応用が期待される（Fig. 1.6-2参照）。

静水応答に関しては、荷役時のモニタリング結果にアンサンブルカルマンフィルタ法を適用することにより、ひずみと喫水の計測値から積付荷重分布をリアルタイムに逆推定できることを明らかにした。静水応答は基本的にトリム計算により求められるが、デジタルツインにより積付荷重分布が推定できれば、静水応答の不確実性の低減に繋がると期待される。

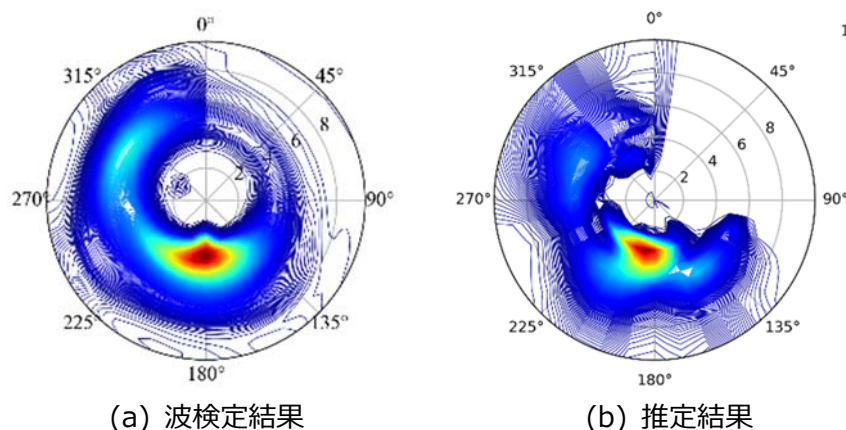


Fig. 1.6-2 データ同化（波スペクトル法）による方向波スペクトルの推定例（水槽試験）

1.6.5 評価・推論技術

船体構造DTの目的は、データ同化によって得られる全船構造応答を、点検・メンテナンスの合理化や操船・運航支援（アラート、運航計画など）に活かすことにある。これに必要な短期・長期の構造健全度・危険度の評価・推論技術を開発した。

まず、KF法で得られる縦曲げモーメントの時刻歴（観測値）と波浪推算データを組み合わせて、これから遭遇する短期海象下での縦曲げ崩壊危険度を予測し、安全航行判断を支援する手法を開発した。8,600TEUコンテナ船に対する既存のモニタリングデータを基に、提案手法による縦曲げモーメントの最大値分布を推定した結果、実績値と比べて良好な精度の予測値を得ることができた。併せて、波浪推算に基づく波スペクトルとRAOを用いる従来法では、最大応答を過大に推定する傾向が判明した。これは、線形RAOや仮定する波スペクトル形状等に、各種誤差が含まれるためと考えられる。

疲労被害度評価に対しては、モニタリング計測点の応力分散値の長期頻度分布を求め、これに適合するような波浪頻度分布の統計モデル（等価波浪頻度分布）を設定して、そのパラメータをベイズ推定する手法を開発した。等価波浪頻度分布を用いれば、任意点の累積疲労被害度を、計測点の累積疲労被害度と同化する形で推定することができる。8,600TEUコンテナ船の既存の実測データとの比較より、提案法が、実績値と比べて累積疲労被害度を良好な精度で推定すること、および波浪頻度分布と線形RAOを用いる従来法は、累積疲労被害度を過大に推定する傾向があることを明らかにした。

なお、短期予測、長期予測とも、従来法と提案法の推定の差異が何を要因とするかについて、さらなる検討が必要である。このことは、短期・長期予測における不確実因子を明確化することに繋がる。

1.6.6 DTシステム

モニタリングデータ入力、データ同化、評価・推論、およびGUIの各機能をオープンプラットフォーム（i-SAS）に統合したDTシステムを開発した。i-SASは、計測・解析・可視化をリアルタイムに接続したデジタツインシステム構築のための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、運航DT、主機DTなど他のDTとの統合・拡張性を有する（Fig. 1.6-3参照）。

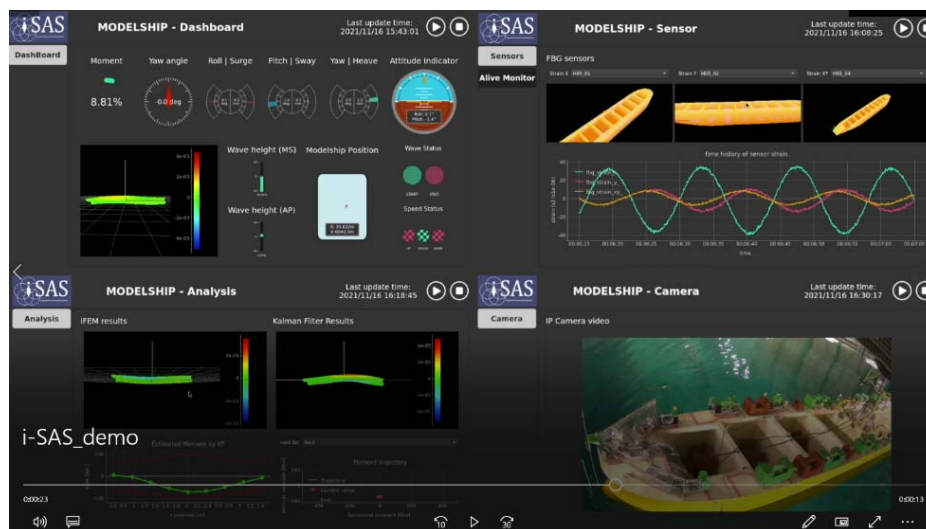


Fig. 1.6-3 開発したDTシステム（i-SAS）

開発したi-SASを水槽試験に適用した結果、映像、計測結果、解析結果のリアルタイムな表示が可能であることを確認した。データ同化に要する時間は実船と模型で大差ないこと、および実船では、応答の時間スケールが模型よりも長いことから、開発システムは、実船実装に十分に対応可能である。

1.6.7 社会実装シナリオの検討

船体構造DTを社会実装するための活用シナリオとその波及効果、さらに実現に向けて目指すべき方向性について検討した。まず、Stakeholder Value Network (SVN) を用いてバルクキャリアを対象とした構造DTに対する海事産業のシステム分析を行うとともに利害関係者のニーズの抽出を行った。次に、構造DTによって提供可能なサービスおよび価値を明確化し、構造DTの社会実装シナリオとその波及効果について検討した。一方で、海事産業全体を俯瞰すると、構造DT以外にも、運航DT、主機DT、設計DT、建造DTなど様々な角度からDT技術の活用が検討されている。これら他のDTの開発の方向性を踏まえた上で、構造DTにおける社会実装シナリオの具体化を検討した。

その結果、いずれの活用シナリオにおいても、構造DT単独ではシナリオ実現には不足であり、他のDTとの連携・統合によってシナリオの具現化が可能となる。特に、このような統合化DTの必須機能である意思決定機能が現状では検討されていないことが、問題点として挙げられた。各DT間の効果的連携のためには、各DTの範囲のみで考えた価値の改善ではなく、前後のステークホルダーを考慮して価値を考え、複数のDTで連携してその価値を向上させる活動が必要である。また、製品価値向上の観点からは、アンモニア燃料船、水素燃料船といった次世代船舶、すなわち安価で過去の経験がある船舶よりも、未知の高価な船舶でこそ、構造DTがより大きな製品価値を生み出すと期待されることが指摘された。

1.6.8 技術標準化

船体構造DTの社会実装・普及をはかるためには、製品の互換性・インターフェースの整合性の確保をはじめとして、技術の標準化が必要である。この場合、戦略的標準化、すなわち標準化によって市場拡大をはかりつつ、固有の技術・ノウハウについては差別化することで、市場的優位性を確保することが重要である。このような観点から、既存の関連規格の調査、標準化のあり方の検討を行った。

その結果、データ取得・一次処理部、データ出力部、および船上サーバ部は、既存のISO19847/19848に準拠することが有効であること、一方、データ同化部を含むデータ解析部については競争領域と見なすこと、ただしi-SASのようなオープンプラットフォームを活用することにより、他の先進技術の導入を阻害しないことが、現時点で最も適切であると判断した。これに従って、まずISO19848に船体構造DTに関わるNaming Ruleを追加登録すべく、規格原案を策定した。具体的には、計測・評価する構造箇所および応答を誤解なく特定できるよう、以下の階層項目からなるNaming Rule案を作成した。

- T1 Cargo Holdなどの区画名
- T2 ゲージ取付構造部材と部材の関係 (P/S/A/F等)
- T3 計測方向
- T4 取り付け場所 (上下面等)

- T5 計測項目（加速度、ひずみ等）
- T6 詳細位置（Frame No±mm）
- T7 瞬時値 or 統計値等

今後、このような技術標準化を、システムおよび機能の展開に応じて進めていく必要がある。

1.6.9 研究成果の公表

本事業で開発された様々な要素技術、デジタルツインのプラットフォームとして開発されたDTシステム（i-SAS）、並びに、DT関連技術の標準化や新たなビジネスモデルの提案等を行うため、日本船舶技術研究協会主催の成果報告ウェビナーを開催した（Appendix-1参照）。ウェビナーでは、パネルディスカッションを企画し、有識者ほか、船社、造船所および船級協会からのパネリストから、構造DTへの大きな期待が示された（第6章参照）。

また、外部発表については、フェーズ1の研究成果とフェーズ2の計画に関し、日本溶接協会誌「溶接技術2022年2月号」（産報出版発行）に特集記事を寄稿した（Appendix-2参照）。また、日本船舶海洋工学会2022年度春季講演会（2022年5月）でのオーガナイズドセッション（OS）を企画し、本事業の成果を講演論文として投稿した。

1.7 今後への提言

以上の成果概要が示すように、船体構造DTのコンセプトの構築、基盤ならびに実用化技術の開発と検証というプロジェクトの目標は、高いレベルで達成されたと考える。開発したデータ同化技術、評価・推論技術、DTシステムは、いずれも技術的に世界トップレベルをいくものである。続く課題は、これらを如何に早く効果的な形で社会実装に繋げるかである。

Table 1.7-1 は、構造DTの事業成果とその活用イメージをまとめたものである。短期的に実現可能性の高いものとして、船体構造検査における活用が期待される。構造DTによって得られる実際の応力履歴あるいは疲労被害度に基づいて、重点点検箇所の抽出、あるいはESPの緩和等を合理的に行えるようになると考えられる。さらに「安全性の見える化」により、荒天時のアラートの発出や航路選択時の強度余裕度の明示化が可能になる。応力履歴の保船への活用、オペレータ判断への活用は、第6章の船社からの期待にも示された。造船所からは構造DTデータにより強度余裕が保証される場合の規則の柔軟化への期待が示された。これも実績データの積み重ねにより可能性が広がるであろう。

一方、1.6.7に述べたように、構造DTの究極のねらいとすべきは、「安全性の見える化」を土台にしつつ「運航DT、機関DT等の様々なDTとの統合化による設計・建造・運航の最適化」を図ることである。Table 1.7-1では、統合化DTの実現を中長期の活用イメージとしたが、その実現に向けた検討を直ちにスタートすべきである。とりわけ、意思決定においては、安全性と運航効率の両立など、トレードオフの要素が多い。複合的なDT情報が獲得された時に、どのような評価軸と閾値で最適な意思決定を行うかは、定量的な技術情報だけではなく、オペレータの経験・知見にも大きく依存する。技術標準化もさらに広い視点から必要であろう。統合化DT構築に向けた海事クラスタ全体としての検討が必要である。

Table 1.7-1 事業成果とその活用イメージ (第5章)

事業成果 (output)	成果活用 (outcome) 短期	成果活用 (outcome) 中長期
①シミュレーション・データ同化技術 ・ ハルモニタリング(③)→海域再現(波スペクトル、等価波浪頻度分布)→ <u>構造健全性評価(短期・長期統計量)</u>	⇒ 船体構造検査での活用 ・ 検査強化プログラムESP (板厚計測の緩和) 等 (主に①)	⇒ 船体構造検査での活用 ・ リスクベース検査等 (主に①)
②シミュレーション・データ同化技術 ・ ハルモニタリング(③)→リアルタイム構造応答再現(カルマンフィルタ・iFEM)→ <u>構造健全性評価(リアルタイム)</u>	⇒ 運航支援システムでの活用 ・ Sea-Navi 2.0、FOCUS等の既存システムの機能拡張等 (主に①又は②+③)、i-SASとのリンク・サービス提供 (①②③)	⇒ 船体構造基準での活用 ・ 個船の基準適用の評価、基準の見直し等 (主に②) ⇒ 統合化DTの実現
③ハルモニタリング技術 ・ <u>センサー技術・データ管理・転送等</u>	⇒ i-SASの他分野での活用 ・ 自動運航・ダイナミックマップ等のデータ可視化等 (主に④)	・ 運航、機関、構造、荷役等の統合→船主経済等の効果 (①②③④すべて・効果に応じた検討の優先順位付け)
④DTシステム ・ i-SAS(①②)を計算、①②③の可視化ユニット等を内装可能なオープンプラットフォーム)	⇒ 船舶設計等での活用 ・ 構造健全性、モニタリング、船舶情報の可視化等 (①②③④実用可能なものから)	⇒ フロントローディング設計の実現 ・ モデルベース設計とリンクした統合化DTシステムの活用

GHG 削減、無人運航等の追求とともに、船舶システムの高度化・複雑化は急速に進んでいる。これに迅速かつ前広に対応すべく、モデルベースのフロントローディング (FL) 設計の重要性が高まっている。FL 設計では、設計・開発段階において運用時のリスク評価を含むシステムの安全性と機能性を検証することを意図するが、それを確実なものにするためには、運用後の実際の性能、応答、安全性のデータを獲得し、続く設計・開発にフィードバックすることが不可欠である。船体構造 DT、さらに統合化 DT は、これを支える技術となる。

基盤技術面では、1.6.4 で述べたように、波スペクトル法は、船自体をセンサとして海象条件を推定していることになる。1.6.5 の等価波浪頻度分布法も、時空間的な海象条件のデータ同化とみることが出来る。構造応答を考慮したこれらのデータ同化手法は、構造のみならず、耐航性、推進性能など多様な船舶性能評価に応用可能と考えられ、関連する分野の研究者の協働によりさらなる発展が期待される。統合 DT システムは、波、動揺、荷重、構造、機関を含む多様な「知の連携」を前提とする。

本船体構造 DT プロジェクトの成果が、統合 DT ひいては海事 DX 実現に向けた新たな起点となることを期待する。

2. 活動状況報告

本事業の2021年度の活動状況を以下に記す。なお、ステアリング・グループ（SG）会議の回数はフェーズ1からの通算回数である。

2. 1 全体会合

2.1.1 第11回ステアリング・グループ(SG)会議

- 日 程：2021年4月28日（水）13:30～17:00
- 場 所：WEB会議
- 議 題：
 - 1) 前回議事録（案）の確認（事務局）
 - 2) テクニカルグループ（TG）及び各SWG の成果と今後の計画について
（岡委員、満行委員、宝谷委員、岡田委員、飯島委員、村山委員、藤久保委員長、大沢委員）
 - 3) ワーキンググループ-A（WG-A）の成果と今後の計画について（村山委員）
 - 4) ワーキンググループ-B（WG-B）の成果と今後の計画について（平川委員）
 - 5) ワーキンググループ-C（WG-C）の経緯について（大沢委員）
 - 6) システム分析ワーキンググループ（SA-WG）の成果と今後の計画について（濱田委員）
 - 7) 標準化ワーキンググループ（STD-WG）の成果と今後の計画について（有馬委員）
 - 8) 2020 年度成果報告書について（事務局）
 - 9) 2021 年度事業計画について（事務局）
- 配布資料：
 - 1) 資料-SG-11-1 第10 回SG 会議（WEB）議事録（案）
 - 2) 資料-SG-11-2 テクニカルグループ（TG）成果報告
 - 3) 資料-SG-11-2a TG/フレームワークSWG（iSAS）成果報告
 - 4) 資料-SG-11-2b TG/水槽試験SWG 成果報告
 - 5) 資料-SG-11-2c TG/個別要素技術SWG/データ同化（波入°トル法）成果報告
 - 6) 資料-SG-11-2d TG/個別要素技術SWG/データ同化（加マフィル法）成果報告
 - 7) 資料-SG-11-2e TG/個別要素技術SWG/データ同化（iFEM 法）成果報告
 - 8) 資料-SG-11-2f TG/個別要素技術SWG/強度評価（最終強度）成果報告
 - 9) 資料-SG-11-2g TG/個別要素技術SWG/強度評価（疲労強度）成果報告
 - 10) 資料-SG-11-3 WG-A 成果報告
 - 11) 資料-SG-11-4 WG-B 成果報告
 - 12) 資料-SG-11-5 WG-C 活動報告
 - 13) 資料-SG-11-6 システム分析WG（SA-WG）成果報告
 - 14) 資料-SG-11-7 標準化WG（STD-WG）成果報告
 - 15) 資料-SG-11-8 2021 年度事業計画書
 - 16) 資料-SG-11-参考-1 2020 年度成果報告書・第1～2 章（案）（ホーム°ジ°公開版）
 - 17) 資料-SG-11-参考-2 委員名簿（2021 年4 月現在）

2.1.2 第12回ステアリング・グループ(SG)会議

- 日 時：2021年10月20日（水）9:00～12:00
- 場 所：WEB会議
- 議 題：
 - 1) 前回議事録（案）の確認（事務局）
 - 2) システム分析ワーキンググループ（SA-WG）の進捗と今後の計画について（濱田委員）
 - 3) 標準化ワーキンググループ（STD-WG）の進捗と今後の計画について（有馬・越智委員）
 - 4) ワーキンググループ-B（WG-B）の進捗と今後の計画について（平川委員ほか）
 - 5) ワーキンググループ-C（WG-C）の進捗と今後の計画について（大沢委員）
 - 6) テクニカルグループ（TG）及び各SWGの進捗と今後の計画について（岡委員ほか）
 - 7) ワーキンググループ-A（WG-A）の成果と今後の計画について（村山・藤委員）
 - 8) フェーズ2のゴールについて（委員長）
 - 9) 造船DXに関する調査研究（海事局）のご紹介（事務局）
 - 10) 今後のスケジュールについて（事務局）
 - ・2021年度成果報告書
 - ・成果報告セミナー
 - 11) その他
 - ・成果発信のための動画作成について（委員長・事務局）
 - ・後継課題の申請について（委員長・事務局）
 - ・中国からのISO規格提案：コンテナ船の長期モニタリングについて（事務局）
- 配布資料：
 - 1) 資料-SG-12-1 第11回SG会議（WEB）議事録（案）
 - 2) 資料-SG-12-2 システム分析WG（SA-WG）進捗報告
 - 3) 資料-SG-12-3 標準化WG（STD-WG）進捗報告
 - 4) 資料-SG-12-4 WG-B 進捗報告
 - 5) 資料-SG-12-4a （別紙1）ハルモニタリングデータ（2021_0728～0909）
 - 6) 資料-SG-12-4b （別紙2）スペクトル法による波浪推定の状況
 - 7) 資料-SG-12-4c （別紙3）船体変位計測&温度計測まとめ
 - 8) 資料-SG-12-4d （別紙4）静水中応答解析およびデータ同化の検討状況
 - 9) 資料-SG-12-5 WG-C 進捗報告
 - 10) 資料-SG-12-6 テクニカルグループ（TG）進捗報告
 - 11) 資料-SG-12-6a TG/個別要素技術SWG/強度評価（疲労強度）進捗報告
 - 12) 資料-SG-12-7 WG-A進捗報告
 - 13) 資料-SG-12-8 構造デジタルツインのゴールイメージ
 - 14) 資料-SG-12-10 2021年度後半の主な予定
 - 15) 資料-SG-12-11 Introduction on New Work Item Proposal
--Long-term monitoring system of container ship structure
 - 16) 資料-SG-12-参考 委員名簿（2021年10月現在）

2.1.3 第13回ステアリング・グループ(SG)会議

- 日 時：2022年1月24日（月）13:30～17:00
- 場 所：AP虎ノ門Aルーム（対面+WEB 会議）
- 議 題：
 - 1) 前回議事録（案）の確認（事務局）
 - 2) テクニカルグループ（TG）及び各SWG の成果について（岡・宝谷・大沢・飯島委員）
 - 3) ワーキンググループ-A（WG-A）の成果について（村山・藤委員）
 - 4) ワーキンググループ-B（WG-B）の成果について（平川・岡田・飯島委員）
 - 5) ワーキンググループ-C（WG-C）の成果について（大沢委員）
 - 6) システム分析ワーキンググループ（SA-WG）の成果について（濱田委員）
 - 7) 標準化ワーキンググループ（STD-WG）の成果について（有馬・越智委員）
 - 8) 2021年度成果報告書の作成について（事務局）
 - 9) 成果報告セミナーのプログラム（案）について（事務局）
 - 10) プロジェクト終了後の事業展開について（委員長・事務局）
 - 11) その他
 - ・プロモーション動画（改訂版）の制作について（事務局）
 - ・今後のスケジュールについて
- 配布資料：
 - 1) 資料-SG-13-1 第12回SG会議（WEB）議事録（案）
 - 2) 資料-SG-13-2a テクニカルグループ（TG）報告（岡委員）
 - 3) 資料-SG-13-2b 船体構造DTシステム（i-SAS）報告（村山委員・三上氏）
 - 4) 資料-SG-13-2c 水槽試験SWG報告（宝谷委員）
 - 5) 資料-SG-13-2d カルマンフィルタによる船体変形の推定（飯島委員）
 - 6) 資料-SG-13-2e 疲労長期予測SWG報告（大沢委員）
 - 7) 資料-SG-13-3 WG-A進捗報告及び取りまとめ案（村山委員）
 - 8) 資料-SG-13-4a WG-B 進捗報告（平川委員）
 - 9) 資料-SG-13-4b 別紙1 ハルモニタリングデータ（平川委員）
 - 10) 資料-SG-13-4c 別紙2 波浪逆推定中間報告（岡田委員）
 - 11) 資料-SG-13-4d 別紙3 静水中応答解析およびデータ同化検討状況（飯島委員）
 - 12) 資料-SG-13-5 WG-C 進捗報告（大沢委員）
 - 13) 資料-SG-13-6 SA-WG活動進捗報告（濱田委員）
 - 14) 資料-SG-13-7 STD-WG進捗報告（越智委員）
 - 15) 資料-SG-13-8 成果報告セミナープログラム案
 - 16) 資料-SG-13-9a 海事局・造船DXの政策動向
 - 17) 資料-SG-13-9b 構造DTの事業成果・成果活用イメージ
 - 18) 資料-SG-13-9c 構造DTの検査活用（当日配布）
 - 19) 資料-SG-13-参考 委員名簿（2022年1月現在）

2. 2 主査・副主査会合、テクニカルグループ（TG）、ワーキンググループ（WG）個別会合

主査・副主査会合のほか、ステアリング・グループ（SG）よりテクニカルグループ（TG）及びワーキンググループ（WG）に付託された事項は、それぞれのグループで検討され、必要に応じて個別の会合がWEB会議システムにより開催された。ここでは、各会合の主な開催状況を以下に記し、検討結果は第3章以降に示す。

2.2.1 主査・副主査会合

- 1) 2021年 7月 5日（第8回）
- 2) 2021年10月 4日（第9回）
- 3) 2021年12月16日（第10回）
- 4) 2022年 3月23日（第11回）

2.2.2 テクニカルグループ（TG）個別会合

- 1) 2021年 4月19日
- 2) 2021年 7月30日
- 3) 2021年10月18日
- 4) 2022年 2月 7日

2.2.3 ワーキンググループ-A（WG-A）個別会合

- 1) 2021年 4月20日
- 2) 2021年 6月 8日
- 3) 2021年 8月11日
- 4) 2021年 9月27日
- 5) 2022年 2月 7日

2.2.4 ワーキンググループ-B（WG-B）個別会合

- 1) 2021年 7月16日

2.2.5 ワーキンググループ-C（WG-C）個別会合

- 1) 2021年 4月 1日
- 2) 2021年 4月19日
- 3) 2021年 4月28日
- 4) 2021年 5月19日
- 5) 2021年 6月 8日
- 6) 2021年 6月16日
- 7) 2021年 7月 1日
- 8) 2021年 7月 2日
- 9) 2021年 7月13日
- 10) 2021年 9月13日

- 11) 2021年 9月22日
- 12) 2021年10月 8日
- 13) 2021年10月13日
- 14) 2021年10月18日
- 15) 2021年12月15日

2.2.6 システム分析ワーキンググループ (SA-WG) 個別会合

- 1) 2021年 4月21日 (コアメンバー)
- 2) 2021年 8月 2日 (コアメンバー)
- 3) 2021年 8月20日 (コアメンバー)
- 4) 2021年 8月25日 (コアメンバー)
- 5) 2021年 8月30日 (コアメンバー)
- 6) 2021年 9月13日 (コアメンバー)
- 7) 2021年 9月22日 (コアメンバー)
- 8) 2021年10月28日 (コアメンバー)
- 9) 2021年12月 6日 (全体)
- 10) 2022年 1月12日 (全体)
- 11) 2021年 1月18日 (コアメンバー)
- 12) 2022年 2月 2日 (全体)
- 13) 2022年 2月 4日 (コアメンバー)
- 14) 2022年 2月 7日 (コアメンバー)

2.2.7 技術標準化ワーキンググループ (STD-WG) 個別会合

- 1) 2021年 8月23日
- 2) 2021年11月16日
- 3) 2021年10月 1日
- 4) 2021年10月18日
- 5) 2022年 1月14日

2.3 成果報告ウェビナー

タイトル： 海事産業のDX実現に向けて

—船体構造デジタルツインの研究開発 成果報告—

日 時： 2022年3月 8日(火) 13:00～17:00

資 料：<https://www.jstra.jp/seminar/2022/03/dx.html>

Supported by  日本 THE NIPPON
財団 FOUNDATION

この報告書は、日本財団の助成金を受けて作成しました。

超高精度船体構造デジタルツインの研究開発（フェーズ2）
2021年度 成果報告書
概要版

2022年（令和4年）3月発行

発行 一般財団法人 日本船舶技術研究協会

〒107-0052 東京都港区赤坂2丁目10番9号 ラウンドクロス赤坂

TEL 03-5575-6428 FAX 03-5114-8941

URL : <https://www.jstra.jp/> E-mail info@jstra.jp

本書の無断転載、複写、複製を禁じます