

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

2019年度 成果報告書
概要版

2020年3月



一般財団法人 日本船舶技術研究協会

目 次

1. 研究概要	1
1. 1 背景と目的	1
1. 2 開発目標と期待される効果	1
1.2.1 本研究の達成目標	1
1.2.2 期待される効果	1
1. 3 研究内容	2
1.3.1 船体構造デジタルツインのコンセプト検討	2
1.3.2 超高精度構造応答シミュレーション手法の開発	2
1.3.3 実用化開発ロードマップ策定	2
1. 4 研究期間	2
1. 5 研究体制	2
1. 6 研究結果	3
1.6.1 デジタルツインに関する技術動向調査（2018年度実施）	4
1.6.2 船体構造デジタルツインのコンセプトの検討（SGおよびSA-WG）	4
1.6.3 船体構造デジタルツインの要素技術の検討	6
(1) 数値シミュレーション技術（TG2）	6
(2) データ同化技術（TG1）	7
(3) 評価・推論技術（TG3）	8
(4) データマネジメント技術（TG1）	9
1.6.4 船体構造デジタルツインのプロトタイプ構築（TG2/TG3）	10
1.6.5 開発ロードマップ（SG）	10
1.6.6 成果報告セミナーの開催	10
1.6.7 今後の展望	11
(1) フェーズ2の実施	11
(2) 他のデジタルツインとの統合	11
(3) 成果報告セミナーでのパネリストからのご指摘	11
2. 活動状況報告	13
2. 1 全体会合	13
2.1.1 第4回ステアリング・グループ(SG)会議	13
2.1.2 第5回ステアリング・グループ(SG)会議	13
2.1.3 第6回ステアリング・グループ(SG)会議	14
2.1.4 第7回ステアリング・グループ(SG)会議及び 第3回テクニカル・グループ(TG)合同会議	15
2. 2 テクニカル・グループ、ワーキング・グループ個別会合	16
2.2.1 TG1 個別会合	16
(1) 第3回会合	16

(2) 第4回会合	16
(3) 第5回会合	17
2.2.2 TG2 個別会合	17
(1) 第3回会合	17
(2) 第4回会合	17
(3) 第5回会合	18
2.2.3 TG3 個別会合	18
(1) 第5回会合	18
(2) 第6回会合	19
(3) 第7回会合	19
(4) 第8回会合	19
(5) 第9回会合	20
(6) コアメンバ会議	20
(7) 第10回会合	20
(8) 第11回会合	20
(9) 第12回会合	20
(10) 第13回会合	21
2.2.4 SA-WG 個別会合	21
(1) 第1回会合	21
(2) 第2回会合	21
(3) 第3回会合	21
(4) 第4回会合	21
(5) 第5回会合	22
(6) 第6回会合	22
2.3 成果報告セミナー	22

1. 研究概要

1.1 背景と目的

船舶の無人運航等、IoT や AI を活用した近未来の海上輸送システムを世界に先駆けて実現するためには、大洋上での気象・海象や船舶の状態（リアル空間における物理現象）をコンピュータ（サイバー空間）上で精緻に再現するだけでなく、船舶の設計・建造から運航、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。このサイバー空間上での実現象の再現技術は「デジタルツイン」と呼ばれる。この技術を活用し、個船ごとに運航状態や経年劣化度を考慮することにより、安全性は保持しつつ余剰な強度を排した、より競争力の高い（いわゆるジャパンプレミアム）船舶の設計・建造が可能となり、中韓において建造される船舶との有意な差別化が可能になると期待される。

本研究では、船体構造強度が船舶の安全性を担保する最重要要素であることを踏まえ、船体構造のデジタルツイン構築に不可欠な基盤技術である、「ハルモニタリング、および、データマネジメント技術」、「船体の運動・荷重、および、応力応答の超高精度シミュレーション技術」、並びに、「デジタルツインを機能させるためのシナリオ、評価、推論技術」の研究開発を行い、世界最先端の「超高精度船体構造デジタルツイン」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

船体構造の安全性に影響を及ぼす諸要素（実海域における波浪外力、操船影響、建造精度、就航後の構造変化（腐食・疲労等））について検討し、船体構造デジタルツインのコンセプトデザインを行う。さらに、その根幹技術である波浪中の構造応答の超高精度シミュレーション手法について、計算法および数学モデル化を研究し、水槽試験による計測値と高い精度で一致させるための技術を確立する。これらを総合して実用化開発ロードマップを策定し、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

船体構造デジタルツインのコンセプトデザインと、その根幹技術である超高精度構造応答シミュレーション手法の基礎を確立し、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、船舶の設計時・就航中の安全性を容易かつ高精度に予測・評価できるようになることから、遠隔モニタリングによる安全無人運航や劣化予測に基づく高精度メンテナンス、また、実海域の状況に即したより軽量で安全な合理的構造設計や、日本の高精度建造技術を前提とした最適安全設計なども可能になると期待される。
- 船舶の無人運航をはじめ、世界に先駆けた「超スマート海事社会」の実現に貢献することができる。

1.3 研究内容

実海域での船体の応答挙動をサイバー空間上に再現し、高精度な船体設計および陸からの遠隔運航支援、さらには無人運航船の実現を図るため、以下の研究を実施する。

1.3.1 船体構造デジタルツインのコンセプト検討

船体構造の安全性構成要素の影響およびその解析・予測手法について検討し、デジタルツインの全体コンセプトデザインを行い、必要な基盤技術やシステム等を明らかにする。

また、安全性の重要な基盤要素である実海域波浪の統計解析と最悪海象予測のため、船舶が実際に遭遇する波浪と操船影響（荒天避航、減速運航等）の実態を調査する。

1.3.2 超高精度構造応答シミュレーション手法の開発

現実の波浪中の船体構造応答を極めて精緻に表現する計算法（CFD+波浪荷重・船体構造応答の連成シミュレーション等）や数学モデル化手法を検討し、超高精度のシミュレーション手法を開発する。

1.3.3 実用化開発ロードマップ策定

船体構造デジタルツインのコンセプト検討、超高精度構造応答シミュレーション手法等の研究成果に基づき、実用化のための開発ロードマップを策定する。

1.4 研究期間

2018年4月1日～2020年3月31日の2カ年である。

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立ち上げ、ステアリング・グループ（SG）および3つのテクニカル・グループ（TG）を組織した。今年度は、事務局主催の会議として、計4回のSG会議、計1回のTG合同会議（一部、SG会議と併催）を開催した。また、各TGにおける研究活動および会合は個別に行われた。参加した大学関係者およ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
- 国立大学法人九州大学 後藤委員、柳原委員
- 国立大学法人東京大学 鈴木委員、村山委員、宝谷委員、藤委員
- 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
- ロイドレジスターグループリミテッド
- 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
- 今治造船株式会社
- 株式会社大島造船所
- 株式会社サノヤス造船
- 株式会社新来島どっく
- ジャパンマリンユナイテッド株式会社
- 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）

1.6 研究結果

実用化に向けた「船体構造デジタルツインの開発ロードマップ」を作成するためには、デジタルツインシステムに要求される機能やこれに基づく新たな海事産業ステークホルダのあり方など、コンセプトの検討が必要である。また、現状でシステムに利用可能な要素技術を把握するとともに、新規に開発すべき技術課題も明らかにしておく必要がある。これらの検討方案について、本委員会の第1回ステアリング・グループ（SG）会議において議論が行われた。議論の結果を Fig. 1.6-1 に模式的に示す。

Phase 1 フロー

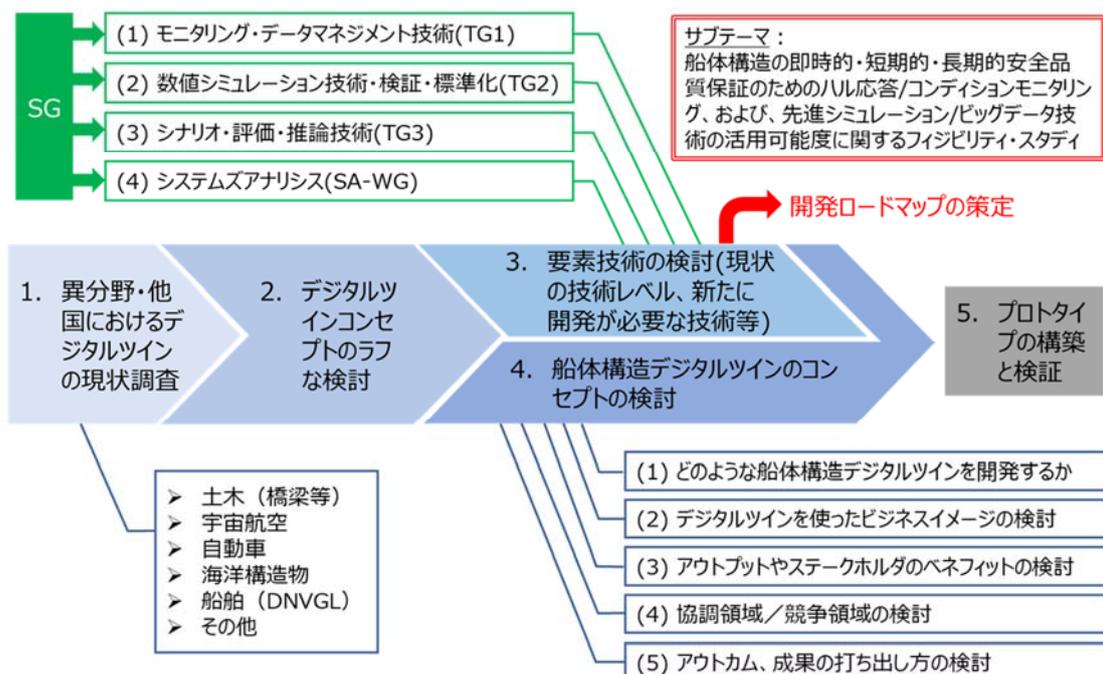


Fig. 1.6-1 船体構造デジタルツインの検討方案

2019年度においてもおおよそFig. 1.6-1に従い、船体構造デジタルツインのコンセプトの検討、要素技術の開発、プロトタイプシステムの構築、および実用化にむけた開発ロードマップの検討を行った。研究体制は、2018年度と同様に、SGの下に、TG1（モニタリング・データマネジメント技術）、TG2（数値シミュレーション技術）およびTG3（シナリオ・評価推論技術）を設けた。また当初TG3に置いたSA-WG（システムズ・アナリシスWG）をSG直轄とするとともに、WG内にSG委員を含むアドバイザリーグループを設けた。以下に、2019年度の研究成果をまとめる。なお、2019年9月に開催されたPRADS2019の基調講演にて本プロジェクトの紹介を、また2020年2月の当会主催セミナーにて成果報告を行った。

1.6.1 デジタルツインに関する技術動向調査（2018年度実施）

デジタルツインのコンセプトデザインを行うための事前調査を実施した。デジタルツインが注目されている背景、国内外の海事産業および他業界（宇宙・航空、自動車等）における取組状況と技術、さらには、デジタルツイン実現に向けての期待や想定される課題等について、株式会社富士通総研に調査を依頼した。調査結果の概要については、2018年度成果報告書を参照されたい。

1.6.2 船体構造デジタルツインのコンセプトの検討（SGおよびSA-WG）

SGでは、船体構造デジタルツイン（DT）のコンセプトの検討ならびに社会実装に向けた開発ロードマップの策定を行った。コンセプトについては、「ビジネスモデルまで考慮した活用シナリオと波及効果の検討」が重要であるとの認識の下、詳細検討をSA-WGに託した。

SA-WGでは、システムズ・アプローチの手法を用いて船体構造デジタルツインの社会実装の形を検討した。まず、バルクキャリアを対象として、Stakeholder Value Network (SVN) を用いた海事産業の現状分析を行った。デジタルツインを用いて各種のサービスを行う仮想のステークホルダとして「DTコンサル」を設定し、構造DT実現後の海事産業における情報や価値の流れを、SVNを用いて分析した。その結果、DTコンサルが、データドリブンな船舶の設計・建造・運用のために必要な情報やサービスの核となることを確認した。また、構造DTに対するステークホルダのニーズを抽出した。

次に、構造DTの提供しうる新たなサービスと価値について検討した。具体的なサービスとして「操船支援」「メンテナンス」「構造規則」および「製品価値向上」に着目し、それぞれに関する具体的な活用シナリオ、構造DTに求められる情報と機能、および構造DTが生み出す価値について検討した。構造DTが提供可能なサービスについてSA-WGで検討された結果をFig. 1.6-2に示す。例えば、操船支援では、事故リスク低減効果とともに、強度余裕が明確化されることによる定時性・燃費向上への効果が指摘された。メンテナンスでは、船体情報の「見える化」により、個船のみならず、将来的にはフリートレベルのメンテナンスの最適化が期待できる。これらの検討により、構造DTが海事産業にとって新たな価値を産み出すものであることを確認した。同時に、実際に社会実装を行うためには、システム運用における費用対効果の算定、国際条約化に向けた海外との調整などの課題が残されていることを認識した。

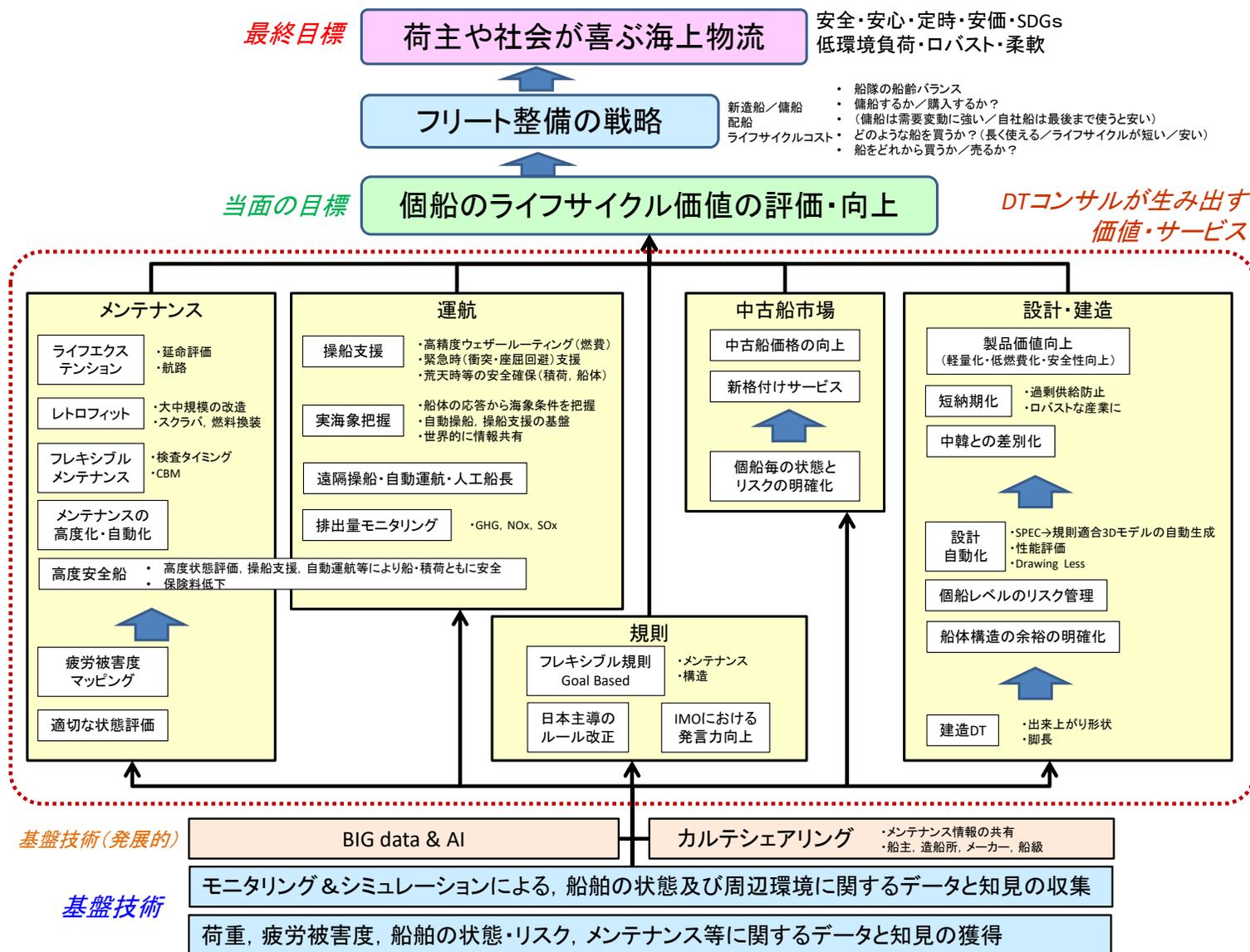


Fig. 1.6-2 DTコンサルが提供するサービスと価値

1.6.3 船体構造デジタルツインの要素技術の検討

(1) 数値シミュレーション技術 (TG2)

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荷重・構造一貫強度評価システム (Direct Load and Structural Analysis system: DLSA) を数値シミュレーションコードに定め、その精度を、同研究所実海域再現水槽で実施した水槽試験との比較により検証した。供試船は、ポストパナマックスコンテナ船の縮尺1/74.1模型であり、弾性応答を計測するため、縦曲げおよび振り振動特性が実船相似となるウレタン製弾性模型とした。光ファイバ型ひずみゲージを用いて多数点のひずみおよび圧力を計測した。構造DTに関わる課題として、与えられた波条件に対する順方向の解析だけでなく、有限点数のひずみ応答から、他点のひずみ応答を計測する逆方向解析も実施した。数値シミュレーションと水槽試験結果との比較より、DLSAが運動、弾性応答ともに良好な精度を有することが検証された。規則波中試験結果より得られた運動と縦曲げモーメントのRAOとパネル法 (NMRIW3D-Lite) との比較した結果をFig. 1.6-3及びFig. 1.6-4に示す。

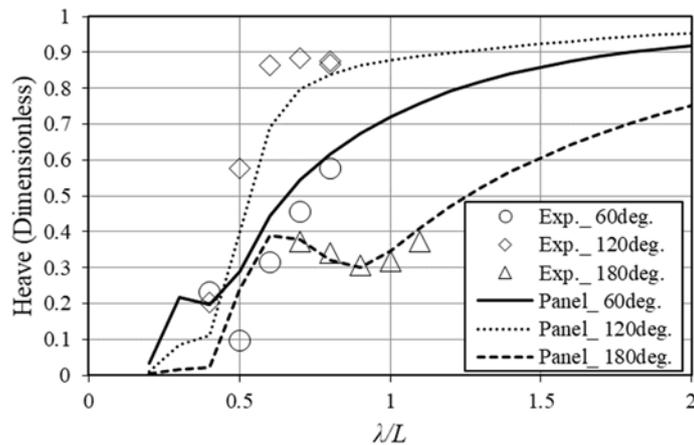


Fig. 1.6-3 運動RAO比較 (試験結果 vs パネル法)

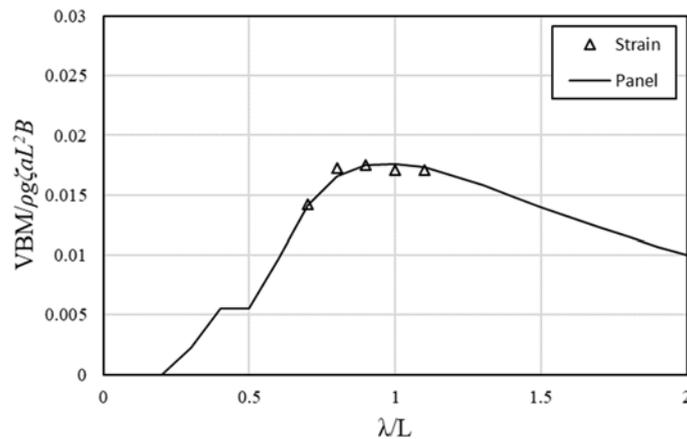


Fig. 1.6-4 縦曲げモーメントRAO比較 (試験結果 vs パネル法)

水槽実験で得られたデータを用いて、次節のTG1で提案している手法を検証し、構造DTのコアとなる全船応力推定機能を実装するため、各手法が有効であることを確認した。波浪逆推定及び船に対するカルマンフィルタやiFEMの適用等、新しい技術を構造DTに実装することで高精度なシステムの実現を可能にしたと考えられる。またTG2の疲労評価で用いているAISデータから求めた波浪履歴及び応力標準偏差の履歴を元に行なったTG3の推論手法は新規性が極めて高いものであり、今後の実船での検証、開発・実用化に直結する貴重な成果を得た。

(2) データ同化技術 (TG1)

船体構造デジタルツインでは、限られた箇所のモニタリング計測データから、非計測箇所を含む船体全域の詳細応力を知る必要がある。このためには、観測データと数値シミュレーションとの融合、いわゆるデータ同化が必要となる。本研究では、次の3つのデータ同化法について検討した。

【方法1】 応答関数を用いた船体応答からの波浪スペクトル推定 (横国大)

【方法2】 カルマンフィルタを用いた船体応答からのハルガーダー応答推定 (阪大)

【方法3】 逆有限要素法を用いた船体応答からのハルガーダー応答推定 (東大)

方法1および方法2のフローをFig. 1.6-5に示す。方法1は船体応答の周波数応答関数を求めておき、計測された応答スペクトルから波浪スペクトルを推定する。得られた波浪スペクトルを用いて、船体の任意箇所の応答スペクトルを求める。方法2は船体のハルガーダー固有振動モードとモードパラメータを求めておき、計測された応答時系列からカルマンフィルタを用いてモード応答時系列を推定する。任意箇所の応答をリアルタイムに求めることができる。方法3は、逆有限要素法 (iFEM) を用いて計測ひずみ情報からハルガーダーの変位応答を推定することにより、任意箇所の応答を推定する。Fig. 1.6-6に重みづけiFEMの結果を示す。水槽試験あるいは静的負荷試験との比較から、各方法の推定精度、メリット・デメリット、今後改良すべき課題点を明らかにした。

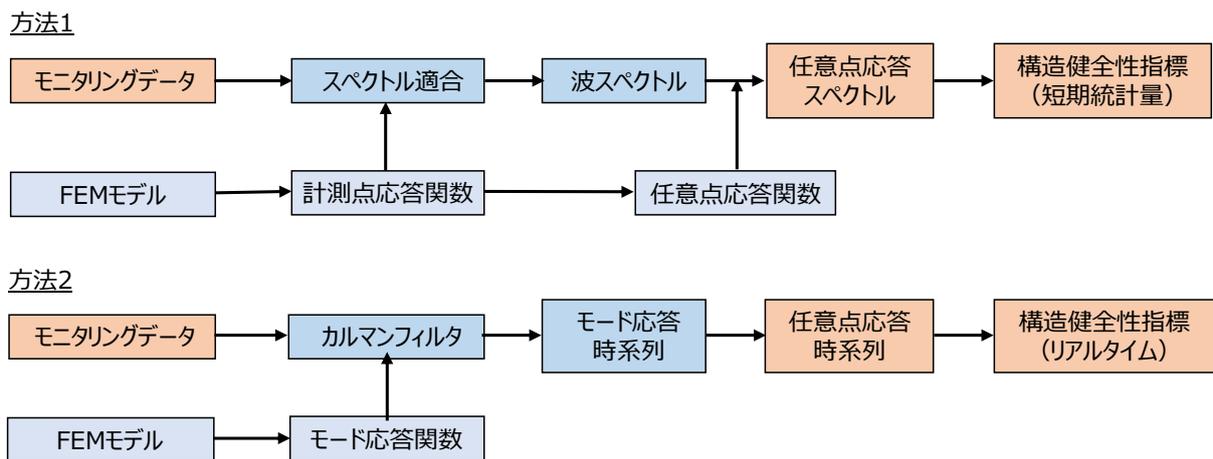


Fig. 1.6-5 方法1および方法2のフロー

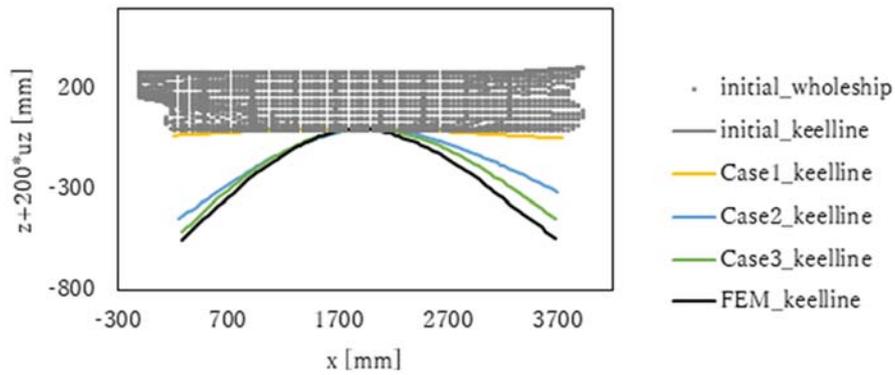


Fig. 1.6-6 重みづけiFEMの結果

(3) 評価・推論技術 (TG3)

不規則海象下の船体応答を把握し、構造健全性に関する評価・意思決定に結びつけるためには、統計的なアプローチが必須となる。本研究では、ベイズ推定の船体構造デジタルツインへの応用について検討した。ベイズ推定は、対象事象に関する統計モデルを設定し、そのパラメータを、ベイズ定理を基に観測データを用いて更新し、観測データに適合した統計モデルを推定するものである。

現遭遇海象における縦曲げ荷重の推定では、例えば、30分間を予測の基準となる時間間隔に設定し、過去30分間の観測データからパラメータの事前分布を設定、次の30分間で得られる観測データを用いてパラメータの事後分布を推定し、縦曲げ荷重の予測分布を得ることを検討した。予測分布はさらに次の30分間で発生しうる縦曲げ荷重の確率分布とみなすことができる。これにより、遭遇海象における波浪曲げモーメント極値の分布を予測できる可能性を示した (Fig.1.6-7参照)。

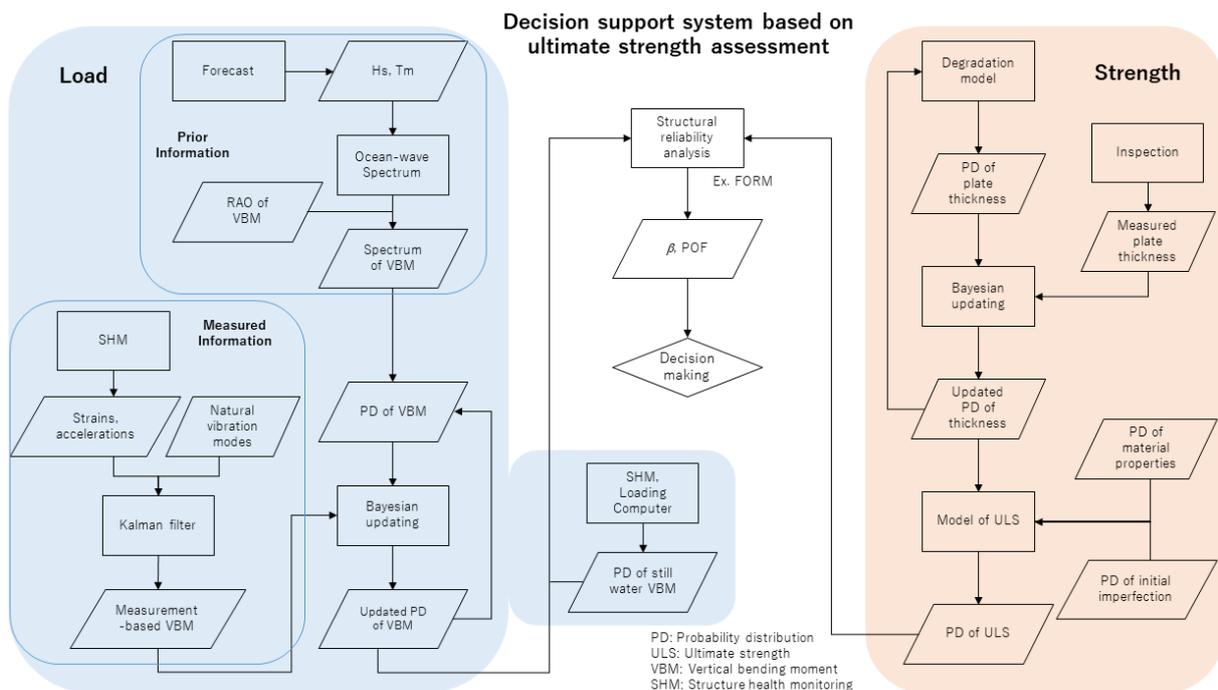


Fig.1.6-7 遭遇短期海象における縦曲げ崩壊危険度の評価フロー

累積疲労被害度推定では、1時間おきに応力振幅の分散が観測されることを前提に、その観測値の発生が説明可能な等価波浪頻度分布を推定する方法を開発した。ここでいう等価波浪頻度分布とは、波浪観測データに基づく通常の長期波浪頻度分布ではなく、遭遇した応力頻度履歴に基づく等価波浪頻度分布という新しい概念であり、応答の非線形性など個船固有の特性が含まれる疲労被害度評価用の長期波浪頻度分布である。これにより、当該個船の任意の部材の累積疲労被害度を、実績応答により即した形で推定可能になる。Fig. 1.6-8に疲労評価応力の分散 R^2 の疑似観測値と再現データから計算された1短期海象あたりの累積疲労被害度の比較結果（IACS Rec.34）の例を示す。

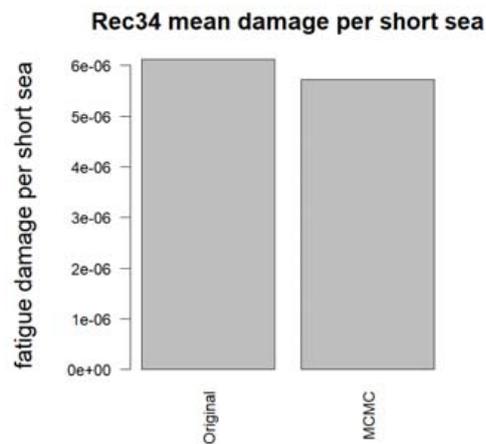


Fig. 1.6-8 開発手法による累積疲労被害度の推定例

最大荷重推定、疲労被害度推定のいずれについても、合理的な推定結果を得ることができた。いずれも、さらなる検証、改善を必要とするが、船体構造デジタルツインにおける評価・意思決定のための基盤となる技術を獲得できたと考える。

(4) データマネジメント技術 (TG1)

船体構造デジタルツインでは、多様かつ複数のセンサ出力、固有データを取得し、それらのデータが計算機に転送されて状態量や構造健全性指標を計算することになる。これらのデータの保管・処理手法として、クラウドコンピューティングについて調査した。特に、海事分野におけるクラウドデータサービスの現状、船体構造デジタルツインでのクラウド利用のメリットと課題を整理した。課題の一つとして、航行中は衛星回線を介した通信のみとなるため、大量の通信が行えない点が挙げられる。この緩和策としてエッジコンピューティングが効果的であり、特に船では重量、スペース、電力等の制約がないことから、車などと比べてエッジコンピューティングとの親和性が高いことが指摘された。また、データを取得してから必要な対応をとるまでの期間（猶予）は、利用法によって異なり、荒天時アラートのような場合はオンボード処理が必要であるし、保守管理のように長期の場合はデータの陸送でも済む。一方、重要かつ即時性を要する情報は、衛星回線を必要とするなど、利用方法に応じたマネジメントパターンを整理した。

1.6.4 船体構造デジタルツインのプロトタイプ構築 (TG2/TG3)

船体構造デジタルツインのソフトシステム開発に向けて、数値シミュレーションと推論とを連携したプロトタイプシステムの構築を検討した。疲労寿命および縦曲げ最終強度を評価対象とした。

疲労寿命評価に関しては、AISデータと波浪推算データを組み合わせて、船体が実際に遭遇したと考えられる海象の頻度に基づいて累積疲労被害度を計算し、併せて操船影響を評価できるシステムを構築した。また、DLSAにより求めた応力応答関数を用いて、ベイズ推定に基づく等価波浪頻度分布を推定するシステムを整備した。

縦曲げ最終強度に関しては、スミス法を用いて船体横断面の縦曲げ最終強度の船長方向分布を計算し、併せてDLSAにより求めた応答関数から短期海象下の縦曲げモーメント分布の時間変化を求めた。これらをディスプレイ上に同時表示することにより、縦曲げ最終強度に関するアラートシステムの具体イメージを与えた。縦曲げモーメント分布として、7.1.2(3)のベイズ推定に基づく遭遇海象下の縦曲げモーメント統計量を用いることにより、より合理的な支援システムに発展させることが可能と考えられる。

1.6.5 開発ロードマップ (SG)

船体構造デジタルツインの実用化に向けた開発ロードマップを示した。実用化のための検討課題として、基盤要素技術の充実と実用展開、デジタルツインシステム（ソフトウェア）の開発、シミュレーション技術の模型試験による検証、実船搭載に向けた技術検討と検証、および社会実装のための検討の5項目を挙げ、時系列的に開発ロードマップにまとめた。また、ロードマップの最終ステージとして、運航性能、機関等の他のデジタルツインにまたがる統合化デジタルツインの構築が、社会実装に不可欠の要素であることを示した (Fig. 1.6-9参照)。



Fig. 1.6-9 船体構造デジタルツインの実用化に向けた開発ロードマップ

1.6.6 成果報告セミナーの開催

2020年2月10日 (月) に赤坂インターシティコンファレンス4階 the AIRにて、当会主催の成果報告セミナー「実データに基づく構造設計・建造・運航の革新に向けて—船体構造デジタルツイン フェ

ーズ1 研究開発報告」を開催した。造船、海運、船用工業等の海事関係者のほか、計測機器メーカー等から、約110名の参加があった。講演者及び講演表題をTable 1.6-1に示す。

Table 1.6-1 成果報告セミナーの講演者および講演表題

(1) はじめに	大阪大学大学院 藤久保昌彦教授	船体構造デジタルツインコンセプトとプロジェクトの趣旨
(2) 基調講演	(国研) 海上・港湾・航空技術研究所 大和裕幸理事長	デジタルライゼーションと海事社会の未来
(3) 講演 1	東京大学大学院 村山英晶教授	状態を知る～リアルデータとシミュレーションの融合～
(4) 講演 2	(国研) 海上・港湾・航空技術研究所 岡正義氏	再現する～水槽実験による船体構造デジタルツインの精度検証～
(5) 講演 3	大阪大学大学院 大沢直樹教授、辰巳晃助教	予測する～ベイズ統計の船体構造デジタルツインへの応用～
(6) 講演 4	広島大学大学院 濱田邦裕教授	価値を生み出す～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の検討～
(7) パネルディスカッション	タイトル：船体構造DTの可能性と今後の展開 モデレータ：藤久保昌彦教授（大阪大学） パネリスト：和裕幸理事長（海上・港湾・航空技術研究所）、辰巳晃助教（大阪大学）、満行泰河准教授（横浜国立大学）、加藤謙治講師（横浜国立大学）、山本泰氏（日本郵船）、太田垣由夫氏（JMU）、有馬俊朗氏（日本海事協会）	

1.6.7 今後の展望

(1) フェーズ2の実施

フェーズ2プロジェクトの申請が採択され、2020年4月からの実施が決まった。開発ロードマップに沿って、「船体構造デジタルツインの実用化技術の開発」を目標として研究開発を行う。

フェーズ2では、実船検証として、バルクキャリア1/10自航模型船を用いた実海域試験と、実船バルクキャリア（複数）の実海域試験を行う。1/10自航模型船を用いた実海域試験は、主としてモニタリング・データマネジメントに関する実船実装技術の調査・検証を目的としている。実船試験では、応答推定、操船支援を含むデジタルツインシステムの精度および適用性を検証する。

(2) 他のデジタルツインとの統合

構造、性能、機関等にまたがる統合的なデジタルツインシステムの構築が将来的に重要であり、実海域推進性能プロジェクト、自動化船プロジェクト、建造デジタルツインなどの関連する取り組みとの情報交換および連携に努める（Fig. 1.6-10参照）。

(3) 成果報告セミナーでのパネリストからのご指摘

2020年2月10日に開催したフェーズ1 成果報告セミナー「実データに基づく構造設計・建造・運航の革新に向けて—船体構造デジタルツイン フェーズ1 研究開発報告—」のパネルディスカッションにおいて、パネリスト各位より、船体構造デジタルツインへの期待と課題として、貴重なご意見をいただいた。その主なものを記し、今後の参考としたい。

- 実遭遇海象ベースの累積疲労被害度評価が可能になれば、船級による状態評価指標の改善、延命・改造時のコスト削減が可能となり、マーケットバリューの向上が期待できる。客観・公正な個船評価による技術力の格付け、管理レベルの高い船が価値を得る仕組みにつながることを期待。
- 構造デジタルツインの出力指標として、応答だけでなく経年劣化（腐食衰耗、塗装劣化）に関わる定量情報が必要である。衰耗、塗装劣化は物理化学反応の結果としてもたらされる現象であり、反応パラメータのモニタリング、データベース化から抜本的に取り組む必要がある。
- 燃費・定時性確保の観点から、安全性・強度に関わるような海域は、現状で既に避けて航行しているのではないか。「安全性・強度」だけに偏らず、「定時性・燃費」との相関評価から、適切な操船指針につなげることが必要である。
- 構造DTによって、実際の強度余裕、荷重が明確になり、構造設計のコモディティ化からの脱却、自由度のある設計・規則体系の構築（DT-CSR、DT-Notation等）につながることに期待する。
- 持続可能な開発目標（SDGs）は、今やあらゆる産業の経営課題であり、その定量化手段としても、デジタルライゼーションは必須の要素である。DT等を含む海事産業のデジタル変革（DX）は急速に進む。NKでは Data Driven Survey Scheme（データ主体の検査）への変革に向けて検討を進めている。
- 新たな国際規則・標準化へのハードルは決して低くない。シミュレーションの精度検証レベルでは不足であり、デジタルツインが真にどれだけ有益・有効であるかを理論と実証データを揃えて、エビデンスとして戦略的に提示していくことが必要である。

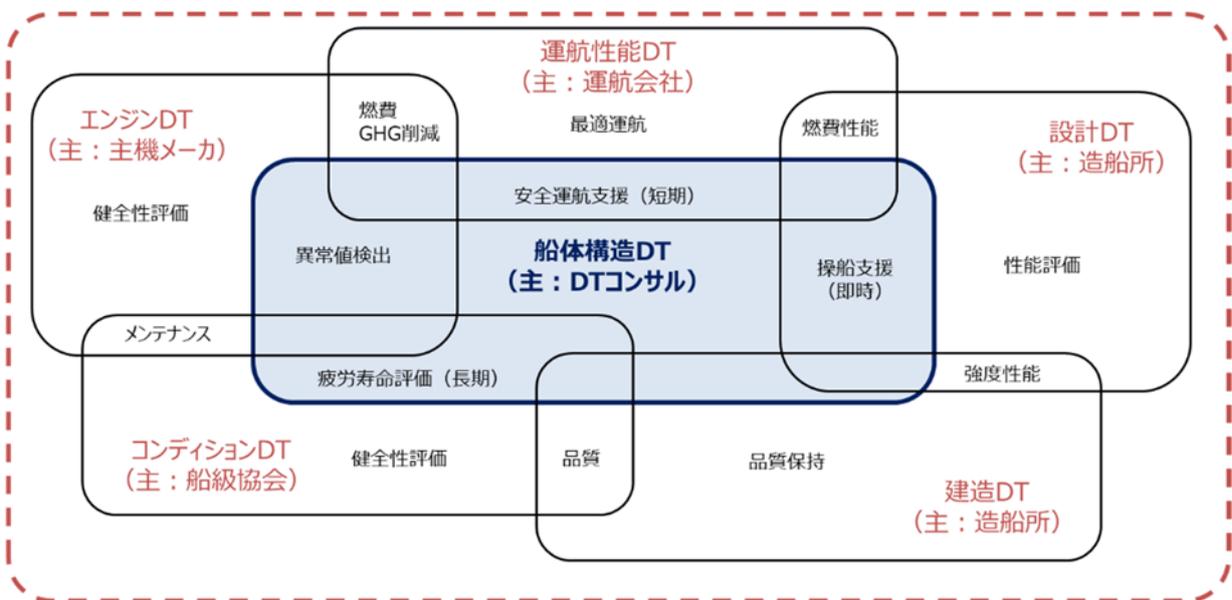


Fig. 1.6-10 船体構造DTを中心とした統合型DTの関連イメージ

2. 活動状況報告

本事業の2019年度の活動状況を以下に記す。昨年度の活動状況は、2018年度成果報告書を参照されたい。

2. 1 全体会合

2.1.1 第4回ステアリング・グループ(SG)会議

- 日 時：2019年5月14日（火） 13:30～17:00
- 場 所：AP虎ノ門11階Bルーム
- 議 題：
 - 1) 開会挨拶
 - 2) 配布資料の確認
 - 3) 議事録（案）の確認
 - 4) 2019年度活動計画について（SG）
 - 5) 2019年度活動計画について（TG1）
 - 6) 2019年度活動計画について（TG2）
 - 7) 2019年度活動計画について（TG3）
 - 8) 2019年度活動計画について（システムズアプローチWG）
 - 9) その他
- 配布資料：
 - 1) 資料-SG-4-1 第3回SG・第2回TG合同会議（2019/3/6）議事録（案）
 - 2) 資料-SG-4-2 第1回技術会合（2019/3/19）議事録（案）
 - 3) 資料-SG-4-3 第2回主査・副主査会合（2019/4/19）議事録（案）
 - 4) 資料-SG-4-4 船体構造デジタルツイン2019年度活動計画について
 - 5) 資料-SG-4-5a 2019年度第1回TG1会合 議事録（案）
 - 6) 資料-SG-4-5b TG1活動計画案
 - 7) 資料-SG-4-6 TG2での作業計画案
 - 8) 資料-SG-4-7 船体構造デジタルツイン研究開発にかかる水槽試験計画案
 - 9) 資料-SG-4-8 TG3活動計画案 Rev. May-14-2019
 - 10) 資料-SG-4-8a TG3・第5回会合議事録（案）
 - 11) 資料-SG-4-9 システム分析WG活動計画（2019）
 - 12) 資料-SG-4-参考1 旗国コンテナ船およびBCに関するSVN
 - 13) 資料-SG-4-参考2 委員名簿

2.1.2 第5回ステアリング・グループ(SG)会議

- 日 時：2019年8月27日（火） 13:30～17:00
- 場 所：AP虎ノ門11階Bルーム
- 議 題：

- 1) 開会挨拶
 - 2) 配布資料の確認
 - 3) 議事録（案）の確認
 - 4) SA-WGの進捗について（濱田委員）
 - 5) TG1の進捗について（村山委員）
 - 6) TG2の進捗について（岡委員）
 - 7) TG3の進捗について（大沢委員）
 - 8) フェーズ1の今後の作業とフェーズ2の申請について（委員長）
 - 9) その他：次回SG会議、技術セミナー開催日程等（事務局）
- 配布資料：
 - 1) 資料-SG-5-1 第4回SG会議（2019/5/14）議事録（案）
 - 2) 資料-SG-5-2 システム分析WG（SA-WG）活動報告（濱田委員）
 - 3) 資料-SG-5-3 TG1活動報告（村山委員）
 - 4) 資料-SG-5-4 TG2活動報告（岡委員）
 - 5) 資料-SG-5-5 TG3活動報告（大沢委員）
 - 6) 資料-SG-5-5a 短期的／長期的DTのフローについて（辰巳委員）
 - 7) 資料-SG-5-6 フェーズ2説明資料（案）（委員長）
 - 8) 資料-SG-5-参考-1 船体構造デジタルツイン2019年度活動計画について
（第4回SG会議資料より抜粋）
 - 9) 資料-SG-5-参考-2 Digital Twin for Ship Structures – Research Project in Japan
（PRADS2019 Plenary Lecture 1 Abstract）
 - 10) 資料-SG-5-参考-3 委員名簿

2.1.3 第6回ステアリング・グループ(SG)会議

- 日 時：2019年12月4日（水）13:30～17:00
- 場 所：AP虎ノ門11階C+Dルーム
- 議 題：
 - 1) 開会挨拶
 - 2) 配布資料の確認
 - 3) 議事録（案）の確認
 - 4) SA-WGの進捗について（濱田委員）
 - 5) TG1の進捗について（村山委員）
 - 6) TG2の進捗について（岡委員）
 - 7) TG3の進捗について（大沢委員）
 - 8) 技術セミナーのプログラムについて（委員長、事務局）
 - 9) フェーズ2の申請について（委員長、事務局）
 - 10) 開発ロードマップについて（委員長、事務局）

11) 2019年度成果報告書の目次案について（事務局）

12) 今後の予定その他（事務局）

● 配布資料：

- 1) 資料-SG-6-1 第5回SG会議（2019/8/27）議事録（案）
- 2) 資料-SG-6-2 SA-WGの進捗報告（濱田委員）
- 3) 資料-SG-6-3 TG1の進捗について（村山委員）
- 4) 資料-SG-6-4 TG2の進捗について（岡委員）
- 5) 資料-SG-6-5 TG3の進捗について（大沢委員）
- 6) 資料-SG-6-6 技術セミナープログラム（案）
- 7) 資料-SG-6-7 フェーズ2申請資料（事業計画等）
- 8) 資料-SG-6-8 開発ロードマップ（案）
- 9) 資料-SG-6-9 2019年度成果報告書の目次（案）
- 10) 資料-SG-6-参考-1 委員名簿
- 11) 資料-SG-6-参考-2 PRADS2019 Presentation資料（委員長）

2.1.4 第7回ステアリング・グループ(SG)会議及び第3回テクニカル・グループ(TG)合同会議

● 日時：2020年3月23日（月）～3月26日（木）

● 場所：書面審議

● 議題：

- 1) 前回議事録（案）の確認（事務局）【審議】
- 2) SA-WGの進捗と成果報告書（案）について（濱田委員）【審議】
- 3) TG1の進捗と成果報告書（案）について（村山委員）【審議】
- 4) TG2の進捗と成果報告書（案）について（岡委員）【審議】
- 5) TG3の進捗と成果報告書（案）について（大沢委員）【審議】
- 6) 開発ロードマップ案について（藤久保委員長）【審議】
- 7) フェーズ1のまとめと今後の展望について（藤久保委員長）【審議】
- 8) 成果報告書（案）第1章～第2章について（事務局）【審議】
- 9) セミナー開催報告（事務局）【情報提供】
- 10) JASNAOE 2020年度春季講演会オーガナイズドセッション開催について
(藤久保委員長、事務局) 【情報提供】
- 11) フェーズ2の採否結果と事業計画について（事務局）【審議】
- 12) フェーズ2の研究計画と体制について（事務局）【審議】

● 配布資料：

- 1) 資料-SG-7-1 第6回SG会議（2020/12/4）議事録（案）
- 2) 資料-SG-7-2 成果報告書（案）第3章（SA-WG）
- 3) 資料-SG-7-3 成果報告書（案）第4.1節（TG1）
- 4) 資料-SG-7-4 成果報告書（案）第4.2節（TG2）

- 5) 資料-SG-7-5 成果報告書（案）第4.3節（TG3）
- 6) 資料-SG-7-6 成果報告書（案）第5章（開発ロードマップの検討）
- 7) 資料-SG-7-7 成果報告書（案）第6章（まとめと今後の展望）
- 8) 資料-SG-7-8 成果報告書（案）第1章（研究概要）～第2章（活動状況報告）
- 9) 資料-SG-7-9 セミナー開催報告（事務局）
- 10) 資料-SG-7-10 JASNAOE 2020年度春季講演会オーガナイズドセッション投稿原稿
- 11) 資料-SG-7-11 フェーズ2事業計画（事務局）
- 12) 資料-SG-7-12 フェーズ2の研究計画と検討体制（事務局）
- 13) 資料-SG-7-参考-1 委員名簿
- 14) 資料-SG-7-参考-2 セミナー関連記事

2. 2 テクニカル・グループ、ワーキング・グループ個別会合

ステアリング・グループ（SG）より各テクニカル・グループ（TG）及びワーキング・グループ（WG）に付託された事項を検討するため、個別会合が適宜実施された。その開催状況を以下にまとめる。

2.2.1 TG1個別会合

(1) 第3回会合

- 日 時：2019年5月8日(水)15:00～18:00
- 場 所：東京大学本郷キャンパス工学部3号館423
- 配布資料：
 - 1) 資料-TG1-3-1 DT主査・副主査会合（2019年4月19日）
 - 2) 資料-TG1-3-2 DT-PJ TG1共通検討事項（案）
 - 3) 資料-TG1-3-3 DT主査・副主査会合 議事録（案）
 - 4) 資料-TG1-3-4 DTフローチャート（FY2018報告書抜粋）

(2) 第4回会合

- 日時：2019年7月8日(月)14:00～16:00
- 場所：東京大学本郷キャンパス工学部3号館423
- 配布資料：
 - 1) 資料-TG1-4-1 TG1会合議事次第
 - 2) 資料-TG1-4-2 第3回会合議事録（案）
 - 3) 資料-TG1-4-3 船体応答からの波浪スペクトル推定の試行
 - 4) 資料-TG1-4-4 飯島委員（阪大）からの資料
 - 5) 資料-TG1-4-5 逆有限要素法（iFEM）を用いたデジタルツインコンセプト
 - 6) 資料-TG1-4-6 データ処理システムについての検討案

(3) 第5回会合

- 日時：2019年9月4日(水)16:00～18:00
- 場所：東京大学本郷キャンパス工学部3号館423
- 配布資料：
 - 1) 資料-TG1-5-1 TG1第4回会合議事録（案）
 - 2) 資料-TG1-5-2 デジタルツイン水槽試験結果による波浪推定－規則波
 - 3) 資料-TG1-5-3 データマネジメントの検討（TG1）
 - 4) 資料-TG1-5-4 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）
 - 5) 資料-TG1-5-5 Digital twin in Maritime Industry

2.2.2 TG2個別会合

(1) 第3回会合

- 日 時：2019年4月26日(金) 9:30～12:00
- 場 所：当会大会議室
- 配付資料：
 - 1) 資料-TG2-3-1 TG2会合用資料
 - 2) 資料-TG2-3-2 DT主査・副主査会合（2019年4月19日）
 - 3) 資料-TG2-3-3 船体構造デジタルツイン研究開発にかかる水槽試験計画案
 - 4) 資料-TG2-3-4 弾性模型船実験の概要とスケジュール（案）
 - 5) 資料-TG2-3-5 Life Cycle Management of Hull Structures (JIP)
 - 6) 資料-TG2-3-6 Response predictions using the observed autocorrelation function
 - 7) 資料-TG2-3-7 A brute-force spectral approach for wave estimation using measured vessel motions
 - 8) 資料-TG2-3-8 第3回SG・第2回TG合同会議 議事録（未完）
 - 9) 資料-TG2-3-9 第1回技術会合議事録（案）

(2) 第4回会合

- 日 時：2019年7月8日(月) 16:00～18:30
- 場 所：東京大学本郷キャンパス工学部3号館423
- 配付資料：
 - 1) 資料-TG2-4-1 TG2会合用議事次第
 - 2) 資料-TG2-4-2 第3回TG2会合 議事録（案）
 - 3) 資料-TG2-4-3 最終強度DT
 - 4) 資料-TG2-4-4 DT最終強度－簡易強度評価手法の具体的な手順について
 - 5) 資料-TG2-4-5 検討すべき積載荷重ケース、静水応力の把握について
 - 6) 資料-TG2-4-6 BC FEモデル
 - 7) 資料-TG2-4-7 疲労DTプロトタイプ構築について（TG3との連携課題）

- 8) 資料-TG2-4-8 船体構造デジタルツイン研究開発にかかる水槽試験計画案
- 9) 資料-TG2-4-9 弾性模型船の荷重構造一貫解析について
- 10) 資料-TG2-2-10 第4回SG会議 議事録 (案)

(3) 第5回会合

- 日時：2019年9月4日(水)14:00～16:00
- 場所：東京大学本郷キャンパス工学部3号館423
- 配布資料：
 - 1) 資料-TG2-5-1 第4回TG2会合 議事録 (案)
 - 2) 資料-TG2-5-2 船体構造デジタルツイン研究開発にかかる水槽試験の結果【第一段】
 - 3) 資料-TG2-5-3 DT水槽試験による手法の検証要領
 - 4) 資料-TG2-5-4 デジタルツイン水槽試験結果による波浪推定 - 規則波
 - 5) 資料-TG2-5-5 バルクキャリアモデル縦曲げ最終強度計算
 - 6) 資料-TG2-5-6 デジタルツイン最終強度アラートについて
 - 7) 資料-TG2-5-7 疲労DTプロトタイプ構築について (TG3との連携課題)
 - 8) 資料-TG2-5-8 短期的／長期的DTのフローについて
 - 9) 資料-TG2-5-9 デジタルツイン・プロモーション動画 シナリオ案

2.2.3 TG3個別会合

(1) 第5回会合

- 日 時：2019年5月9日(木)13:30～17:00
- 場 所：当会大会議室
- 配布資料：
 - 1) 資料-TG3-5-0 議事次第
 - 2) 資料-TG3-5-1 TG3・2018年度第4回会合議事録 (案)
 - 3) 資料-TG3-5-2 第3回SG・第2回TG合同会議 議事録 (案)
 - 4) 資料-TG3-5-3 デジタルツイン第1回技術会合 議事録 (案)
 - 5) 資料-TG3-5-4 DT主査・副主査会合 議事録 (案)
 - 6) 資料-TG3-5-5 TG3活動計画 (案)
 - 7) 資料-TG3-5-6 疲労限定Digital Twin (FAT-DT)のシステム構成 (案) と検討課題
 - 8) 資料-TG3-5-6-1 疲労被害度の推定フロー
 - 9) 資料-TG3-5-6-2 打ち合わせ資料 (九大-海技研：TG2)
 - 10) 資料-TG3-5-7 ベイズ推論学習の実施項目 (案)
 - 11) 資料-TG3-5-7-1 Life Cycle Management of Hull Structure JIP
 - 12) 資料-TG3-5-7-2 状態空間モデルを用いた階層ベイズ推定法によるキョン (Muntiacus reevesi)の個体数推定
 - 13) 資料-TG3-5-8 システム分析WG活動計画 (2019)

(2) 第6回会合

- 日 時：2019年6月7日(金) 13:30～17:30
- 場 所：東京海洋大学 越中島キャンパス1号館2階会議室
- 配布資料：
 - 1) 資料-TG3-6-1 TG3・2019年度第5回会合 議事録(案)
 - 2) 資料-TG3-6-2 ベイズ推論について(東京海洋大学)
 - 3) 資料-TG3-6-3 ベイズ推論・MCMCの勉強(横浜国立大学)
 - 4) 資料-TG3-6-4 ベイズ推論とMCMCの勉強(大阪大学)
 - 5) 資料-TG3-6-5 IACS腐食モデル計算PRG iacscal Rev. 2.1 of Jun-01-2014簡易マニュアル(暫定版)(大阪大学)
 - 6) 資料-TG3-6-6 DT-TG3第6回会合(FY2019第2回)MCMC/フィルタに関する論文調査(海技研)

(3) 第7回会合

- 日 時：2019年8月2日(金) 13:30～17:00
- 場 所：当会大会議室
- 配付資料：
 - 1) 資料-TG3-7-1 TG3第6回会合議事録
 - 2) 資料-TG3-7-2 TG-3 井関先生から頂いたデータについて
 - 3) 資料-TG3-7-3 DT-TG3 第7回会合(FY2019第3回) 進捗報告
 - 4) 資料-TG3-7-4 縦曲げモーメントの確率分布の更新
 - 5) 資料-TG3-7-5 Mohammadrahimi and Sayebani(2019) Bays推論のStanによる実装の試み(速報)
 - 6) 資料-TG3-7-6 最終強度評価に基づいた短期海象レベルの操船支援

(4) 第8回会合

- 日 時：2019年9月18日(水) 13:30～17:00
- 場 所：当会大会議室
- 配付資料：
 - 1) 資料-TG3-8-1 TG3第7回会合議事録
 - 2) 資料-TG3-8-2 第5回ステアリング・グループ(SG) 会議 議事録(案)
 - 3) 資料-TG3-8-3 TG3活動報告
 - 4) 資料-TG3-8-4 第5回TG2会合議事録(案)
 - 5) 資料-TG3-8-5 2019/9/17までに報告があった方の開発環境(概要)
 - 6) 資料-TG3-8-6 井関先生例題続報およびガウス過程サンプリングについて
 - 7) 資料-TG3-8-7 縦曲げモーメントの確率分布の更新(その2) 辰巳
 - 8) 資料-TG3-8-8 荷重Rayleigh分布サンプリング試行(PyMC3での実装) 満行

- 9) 資料-TG3-8-9 RStanにより縦曲げモーメントの確率分布の更新 柚井
- 10) 資料-TG3-8-10 Mohammadrahimi and Sayebani(2019) Bays推論のStanによる実装の試み(第2報)

(5) 第9回会合

- 日 時 : 2019年10月8日(火) 13:30~17:00
- 場 所 : 当会5階会議室
- 配付資料 :
 - 1) 資料-TG3-9-1 TG3第8回会合議事録
 - 2) 資料-TG3-9-2 超高精度船体構造DT研究会開発委員会第5回ステアリング・グループ(SG) 会議 議事録(案)
 - 3) 資料-TG3-9-3-1 超高精度船体構造デジタルツインの研究開発
 - 4) 資料-TG3-9-3-2 超高精度船体構造デジタルツインの研究開発 (Phase2)
 - 5) 資料-TG3-9-4 日本財団向けPhase1, 2概要説明用のヒアリング資料
 - 6) 資料-TG3-9-5 RStanによる縦曲げモーメントの確率分布の更新の検証
 - 7) 資料-TG3-9-6 疲労DTプロトタイプ構築について (TG3との連携課題)
 - 8) 資料-TG3-9-7 波浪頻度から応力頻度計算手続き
 - 9) 資料-TG3-9-8-1 TG3波浪頻度推定手法の開発計画 (案)
 - 10) 資料-TG3-9-8-2 DT TG3 作業線表 (案)

(6) コアメンバ会議

- 日 時 : 2019年11月8日(金) 15:00~18:30
- 場 所 : 横浜国立大学工学研究院 N10棟204号室
- 配付資料 :
 - 1) 海象シミュレーションプログラムの開発状況等 (インターネット配布)

(7) 第10回会合

- 日 時 : 2019年11月21日(木) 12:00~14:30
- 場 所 : 姫路・西はりま地場産業センター会議室 (日本船舶海洋工学会秋季講演会会場)

(8) 第11回会合

- 日 時 : 2019年12月19日(木) 13:30~17:00
- 場 所 : 当会大会議室

(9) 第12回会合

- 日 時 : 2020年1月14日(火) 13:30~17:00
- 場 所 : 当会大会議室

(10) 第13回会合

- 日 時：2020年2月21日(金) 13:30～16:30
- 場 所：東京大学 本郷キャンパス 工学部3号館3階317号室
- 配付資料：
 - 1) FY2019報告書案（インターネット配布；<https://drive.google.com/drive/folders/1QmEJX64AupcSbfirxQQ7YnJvm09X7emP>）

2.2.4 SA-WG個別会合

(1) 第1回会合

- 日 時：2019年7月12日(金) 13:30～17:00
- 場 所：当会大会議室
- 配付資料：
 - 1) 資料-SA-1-1 TG3・2019年度第5回会合議事録（案）
 - 2) 資料-SA-1-2 船体構造デジタルツイン2019年度活動計画について（SG-4-4）
 - 3) 資料-SA-1-3 SG・2019年度第4回会合議事録（案）

(1) 第2回会合

- 日 時：2019年8月9日(金) 14:00～17:45
- 場 所：NK管理センター別館会議室
- 配付資料：
 - 1) 資料-SA-2-1 DTコンサルが提供するサービスと価値

(3) 第3回会合

- 日 時：2019年9月24日(火) 14:00～17:00
- 場 所：日本海事協会本館7階中会議室A
- 配付資料：
 - 1) 資料-SA-3-1 SA-WG第1回議事録
 - 2) 資料-SA-3-2 第5回SG議事録
 - 3) 資料-SA-3-3 SA-WGで提出した成果物(A4)

(4) 第4回会合

- 日 時：2019年11月7日(木) 14:00～17:00
- 場 所：当会大会議室
- 配付資料：
 - 1) 資料-SA-4-1 SA-WG第3回議事録
 - 2) 資料-SA-4-2 シナリオ案のまとめ

(5) 第5回会合

- 日 時：2019年11月13日(水) 14:00～17:00
- 場 所：当会大会議室
- 配付資料：
 - 3) 資料-SA-5-1 SA-WG第4回議事録
 - 4) 資料-SA-5-2 シナリオロードマップ

(6) 第6回会合

- 日 時：2020年1月7日(火) 13:30～16:30
- 場 所：当会大会議室
- 配付資料：
 - 1) 資料-SA-6-1 SA-WG第5回議事録
 - 2) 資料-SA-6-2 構造DTシナリオごとのSVN

2. 3 成果報告セミナー

実データに基づく構造設計・建造・運航の革新に向けて－船体構造デジタルツイン フェーズ1

研究開発報告－

- 日 時：2020年2月10日(月) 13:30～17:30
- 場 所：赤坂インターシティコンファレンス 4階 the AIR

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
2019 年度 成果報告書
概要版

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 : 03-5575-6425 (総務グループ)

03-5575-6428 (研究開発ユニット)

FAX : 03-5114-8941

URL : <https://www.jstra.jp/>

本書の無断転載・複写・複製を禁じます