

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

2018年度 成果報告書

(概要版)

2019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 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（2019年度実施）。

## 1.4 研究期間

2018年4月1日～2020年3月31日の2カ年計画である。

## 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3回のSG会議、計2回のTG合同会議（一部、併催）、および、1回の技術会合を開催した。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（付録-1 参照）。

- 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、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
- 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 に模式的に示すが、おおよそ本図に従って実施された 2018 年度の研究結果を以下にまとめる。

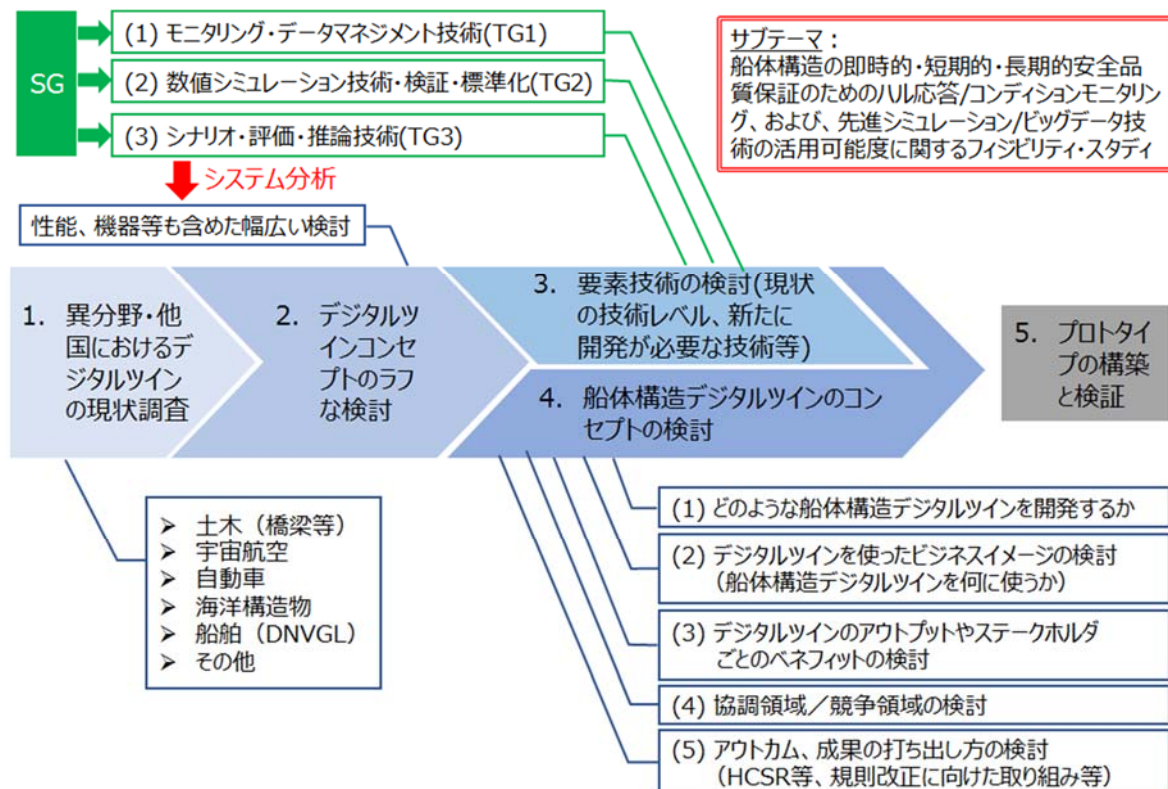


Fig. 1.6-1 船体構造デジタルツインの検討方案

### 1.6.1 デジタルツインに関する技術動向調査

本事業の目標は、「船体構造デジタルツインのコンセプトデザイン」、並びに、モニタリング技術、シミュレーション技術、および、シナリオ・評価・推論技術等を総合した「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の策定」である。

本調査においては、コンセプトデザインを行うための事前調査として、「デジタルツイン」が注目されている背景、また、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。

以下に調査結果の概要を示す。

#### (1) デジタルツインが生まれた背景

- デジタル化の潮流は、「**デジタイゼーション (Digitization)**」⇒「**デジタルライゼーション (Digitalization)**」⇒「**デジタル・トランスフォーメーション (Digital Transformation)**」と進展している。これは、ドイツ政府主導のIndutrie4.0、および、米国GE主導のIndustrial Internetの動きと連動している。
- この流れは、モノのインターネット (IoT) だけでなく、ヒトのインターネット (IoP) やサービスのインターネット (IoS) などの **IoX** が共通の技術であるが、その実現手段のベースになるのが「**サイバー・フィジカル・システム (CPS: Cyber Physical System)**」である。
- **CPS**は、実世界 (Physical System) の情報を、サイバー空間 (Cyber System) と結び付け、実情を的確に表現することによって、効率のよい高度な運用を実現するためのサービスシステムである。
- **デジタルツイン (Digital Twin)** は、主に製造業において、デジタルライゼーションの中核をなす考え方であり、**CPS**の技術を踏襲するものである。
- デジタルツインを実現するための具体的なキー技術は「CAD」と「CAE」であり、これらのキー技術をより効果的に扱うために、「IoX」や「AI」などの技術が必要となる。「CAD」と「CAE」は現実世界を「モデル化」する手段であるが、以下に示す2つの視点の「モデル化」が存在すると考えられる。
  - **技術軸**：現実世界で起きていること (状態) を「**如何に忠実 (リアル) にモデル化**」するかという視点
  - **プロセス軸**：設計・製造・運用・保守サービスなど製品のライフサイクルをモデル化 (デジタル化) してつなげ、業務を効率化し、「**如何に収益を高めるか**」という「**デジタルスレッド (Digital Thread)**」の視点。
- デジタルツインを実現するためには、実世界のデータをサイバー空間に提供することが必要となる。そのため、まずは、実世界で派生する様々なデータを収集 (モニタリング) し、「**ビッグデータ**」として活用できるようにする (データマネジメント) ことが重要となる。「**ビッグデータ**」として活用するためには、個々バラバラにデータを扱うのではなく、データを全体最適の観点で体系的に収集・統合し、目的別に利用できるようにプラットフォームの提供が理想とされ、各国でその取組が始まっている。

## (2) 「技術軸」視点のデジタルツイン動向調査

「技術軸」視点のデジタルツイン動向調査とは、現実世界で起きていること（状態）を如何に忠実（リアル）にモデル化するかという視点である。そのため、各業界がどのような取組みを行っているかを調査した。調査した項目をTable 1.6-1に示す。

Table 1.6-1 「技術軸」視点のデジタルツイン動向調査項目リスト

| No. | 区分   | 調査項目名称                      |
|-----|------|-----------------------------|
| T1  | 共通   | シミュレーションとデジタルツインの違い         |
| T2  | 共通   | デジタルツインとデジタルスレッドとは何か        |
| T3  | 共通   | IoT時代のCAD                   |
| T4  | 共通   | IoT時代のCAE                   |
| T5  | 共通   | デジタルツインに必要なCAE技術            |
| T6  | 宇宙航空 | 米空軍研究所：デジタルツインによる航空機の構造寿命予測 |
| T7  | 宇宙航空 | NASAラングレー研究所：デジタルツイン・パラダイム  |
| T8  | 船舶海洋 | DNV・GL：船体構造強度モニタリング         |
| T9  | 船舶海洋 | DNV・GL：コンテナ船の先進的全船解析手法      |
| T10 | 自動車  | 日産NYC Taxiヘルス・モニタリング        |
| T11 | 建築   | 上海タワーの構造ヘルス・モニタリング          |

## (3) 「プロセス軸」視点のデジタルツイン動向調査

「プロセス軸」視点のデジタルツイン動向調査とは、設計・製造・運用・保守サービスなど製品のライフサイクル全体プロセスをデジタル化して、いかに効率化して収益を高めるかという、謂わば「Digital Thread」の評価視点である。そのため、各業界がどのような取組みを行っているか調査した。調査した項目をTable 1.6-2に示す。

Table 1.6-2 「プロセス軸」視点のデジタルツイン動向調査項目リスト

| No. | 区分     | 調査項目名称                                    |
|-----|--------|---|
| P1  | 共通     | SIEMENS PLM Software                      |
| P2  | 共通     | DASSAULT SYSTEMS The 3DEXPERIENCE Company |
| P3  | 航空機ENG | GE：デジタルツインの取り組み                           |
| P4  | 船舶海洋   | Digitread社：デジタルツインを用いた統合型船舶設計             |
| P5  | 船舶海洋   | BV：デジタルツイン資産保全管理システム                      |
| P6  | 船舶海洋   | DNV・GLが考えるデジタルツインとCPS                     |
| P7  | 船舶海洋   | DNV・GL 海洋・エネルギー部門のデジタルツイン                 |
| P8  | 自動車    | 日産V-3P：デジタル開発プロセス                         |

|     |      |                                  |
|-----|------|----------------------------------|
| P9  | 自動車  | Siemens：自動車製造分野におけるデジタルツインの活用    |
| P10 | 自動車  | トヨタの「Connected」戦略                |
| P11 | 船舶海洋 | 大宇造船所 with SIMENS                |
| P12 | 船舶海洋 | Deltamarin with DASSAULT SYSTEMS |

#### (4) デジタルツインを活用したビジネスモデルにおける課題

船体構造デジタルツインの活用を前提としたビジネスモデルの課題を以下に整理した。

- 船舶のデジタルツイン実現のために、「どのようなビジネスモデルを構築するか」という課題がある。
- 航空機や自動車は販売後も、補修パーツ供給や修理、法規（リコール制度）などでメーカーは顧客とつながり続ける。一方、船舶は引き渡した後の造船所と船舶（海運会社）のつながりは濃厚ではない。
- また、航空機では、GEのように「顧客から得られる生の情報で新たなビジネスを構築する」というデジタルツインを使った新しいビジネスモデルが現れた（資料P3）。
- 自動車メーカーは、デジタルツインを活用した「ワランティ費用の低減」（資料T10）やクラウドと接続してデジタルツインを包含する「Connected Car」という「新しいサービス業への展開」を始めた（資料P10）。
- 船舶のデジタルツインの運営主体は誰になるのか？
  - デジタルツインの最大の受益者は「船主・船会社」だが、船舶のモデルやそれに関する情報を持っておらず、自分たちでモデルの更新もできない。
  - 「造船所」は実行技術を持っているが、デジタルツインのコストパフォーマンスが不透明である。船級規則の縛りがあるので、勝手に構造部材の安全率を変更することもできない。
  - 「船級協会」はその中間位置で立場が曖昧。しかし、船級規則決定者という強みがある。
- いずれも単独でデジタルツインを実行するのはハードルが高い。日本の造船海運業は「NK船級船」との関わりが強いので、「NK船級をコア」にして「海事クラスタが集結し」、単なる「構造安全」だけでなく、「サービスの提供」を含めた利益を出せる「デジタルツイン・ビジネスモデル」を考える必要がある。

#### 1.6.2 船体構造デジタルツインのコンセプトの検討（SG）

SGでは、船体構造デジタルツインのコンセプトに関して、以下の議論がなされた。

##### (1) 船体構造デジタルツインの検討の範囲

現実世界の製品挙動をサイバー空間に再現する、というデジタルツインの考え方は、船体構造だけでなく推進性能や機関応答等、多岐にわたることが予想される。本委員会は、船体構造に主眼を置きながらも、幅広い角度でデジタルツインの活用可能性・コンセプトを検討する。また、構造デジタルツインというと、ハルモニタリングに特化したセンサやシステムを考えがちであるが、燃費の改善や、フリートマネジメントの改善の要望から、船にセンサを取り付けて、その情報を活用する検討は既に



行われている。そのような既存システムに構造のセンサを加えるのが効率的な方法である。

## (2) ビジネスイメージの検討

SGは、船体構造デジタルツインが船体の実海域構造性能を明らかにするものであり、その意義を認めるものの、具体的にそれが各ステークホルダにとってどのようなベネフィットをもたらすかのビジネスイメージの検討がなければ、コンセプト倒れになりかねない、との認識で一致した。

過去の例から見て、純粋な技術の世界で価値が認められるものが、ビジネスとして成り立つかどうかは不明である。例えば、高性能の新材料が出て、結果的に広く普及しない例も多い。また中古船を買う船主は、鋼板は厚いほどよいというのが価値観としてあり、高強度の板を使って軽くすることに対して、ネガティブな視点が存在する。技術だけ見ていると、論文は書いてもその先に繋がらない。これらの点に留意が必要である。

一方で、船体構造デジタルツインには、以下のような期待が示された。まず船社からは、

- 近年、環境規制等からスピード感を持って船の進化を考える必要があり、船体構造についても、長期使用に囚われ過ぎると、性能の劣化により、世界的な環境対策のスピード感から取り残されてしまう恐れがある。したがってダイナミックにデザインを変えていきたいというニーズが増していきと考えられる。そうした中で、船体構造が頑丈過ぎるという現状に対し、船の構造に実際に何が起きているかといった情報を得たいというニーズは、当然あると思われる。
- 船の状態をモニタリングすることにより、個船のメンテナンス間隔は延ばせるようになると思われるが、船社の中には中古船のマーケットもあるため、時間軸ばかりではなく、モニタリングによって船の価値を高めるといった使い方もできると思われる。

造船所からは、

- 船の状態を明らかにすることは、アセットとしての船の価値を高める手段となり得る。
- デジタルツインのベネフィットの一つは、デジタル空間に再現された情報を、ステークホルダが「共有化」できるということにある。
- 船の性能にはEEDI等の指標があってPDCAを回しやすいが、構造に関しては、調和CSRという規則を満足しつつ、軽くて壊れなければよいということになっている。何を以て良い船だという指標がないために、PDCAも限定的になっている。EEDIのような指標ができればよいが、そうでなくとも、デジタルツインを通じて、船の健全度といった構造の格付けができる指標ができればよい。
- 船舶設計のコモディティ化が進む主要な要因の一つは、操船やメンテナンスなどのオペレーションや使用環境が各種の設計パラメータに与える影響が明確に把握されておらず、結果的に設計パラメータに無視できない程度の不確実性が存在することにある。しかし、仮に「就航中の船で実際に何が起きているのか」を把握できれば、オペレーションと設計パラメータの関係が明確になり、製品実績に縛られた統一的設計から脱却できる可能性がある。

船級協会からは、

- デジタルツインによりUnknown Factorが解明できるようになり、また様々な情報をタイムリーに可視化できることが見込まれる。このことは、各ステークホルダに客観的な指標を様々なレベ

ルで提示できることを意味し、船級協会が目指す経済性と技術的合理性を両立した規則及び認証サービスを、全ステークホルダが納得できるレベルで提供できる可能性を秘めている。

等の意見が出された。なお上記には、TGにおける議論から取得した意見も、一部含まれる。

以上のような多様な意見を整理してステークホルダ間の関係を明確にし、かつデジタルツインが効果的に実現されるために必要な海事ビジネスの姿を明らかにするためには、システムズ・アプローチによるSVNの構築が必要である。これをTG3/WG-SAにミッションとして託すことにした。

### (3) プロトタイプシステムの検討のための対象船種と評価事象の選定

本事業の目的の一つである「船体構造デジタルツインのコンセプト」を構築するためには、上述のように、その主要要素である「デジタルツインを使ったビジネスイメージ」、「ステークホルダごとのベネフィット」等の検討が必要である。一方、船体構造デジタルツインの根幹となる技術、すなわち、「モニタリング」・「数値シミュレーション」・「システム分析/評価推論」技術は、各TGにおいて個別に検討されるものの、デジタルツインとして統合するためには、TG1~TG3が有機的に連携して作業を進める必要があり、検討対象とする船種および構造事象を定めることが重要である。

このことについて、SG会議において議論され、本FSでは、「バルクキャリア」を対象とすることが以下の理由により決定された。

- 我が国海事クラスタの主要建造・運用・認証船種であること。
- コンテナ船等と比較してステークホルダ間の関係が明確であり、デジタルツインによる新たなビジネスイメージの構築も比較的容易と考えられること。
- CSR-Hの全面的な改正には時間を要するとはいえ、荷重の不確実性の明確化、安全率の適正化などを一つ一つ積み上げていくことが必要であり、デジタルツインはその有効手段となり得ると考えられること。

バルクキャリアは、経験豊富な船種であるとはいえ、その構造挙動は、積載条件と内圧荷重の関係、腐食・経年劣化の問題を初めとして複雑であり、構造モニタリングの技術的ハードルも高い。船価から見たデジタルツインシステムに対するコスト制約も厳しい。さらに、CSR-Hの適用船種である。これらのことから、研究対象として好適であると判断した。

つぎに、バルクキャリアの構造健全度評価事象として、本研究では、次の事象を取り上げることにした。

- ① 横隔壁下部スツール部の疲労強度
- ② Collision Bulkheadの疲労・座屈強度
- ③ ホギング荷重下の縦曲げ最終強度

①は、バルクキャリアの疲労強度評価上、最も重要な箇所の一つであり、ハルガーダ変形とホールド変形の両応答が関係する。②は、CHR-Hで新たに直接解析が義務づけられた船首部強度に関係する事象である。船首尾部の設計荷重は、縦曲げモーメント等に比べて不確実性が大きいと考えられ、デジタ

ルツインによる現象把握が可能になれば、設計合理化に寄与することが期待される。③の縦曲げ最終強度は、①と同様に二重底の曲げ変形が関係する。縦曲げ最終強度から見た危険度警告等に関するFSとして取り上げる。

#### (4) 協調領域/競争領域の取り扱い

本事業を進める上で、参加各機関の協調領域と競争領域を明確にすることが必要であり、以下のよう整理した。

「協調領域」は、委員会が主体となって調査・研究開発を担い、参加各機関が成果を平等に享受できる領域であると考えられる。例えば、

- ビッグデータの蓄積方法（Ship DC、データ変換など）、センサ、通信技術、シミュレーション、データ解析、設計情報・ノウハウの扱い方、などの考え方、理論（検証はTypicalな船型で）等
- CSR-Hに代わる新たな技術体系（合理的な新規規則体系）の構築

などが考えられる。

一方、「競争領域」は、基本的な部分は本委員会で検討するが、それを使う部分は各社がそれぞれ切磋琢磨する領域であると考えられる。例えば、

- 個別船の設計（構造様式、材質、部品形状、板厚など）及び設計モデル（FEMなど）
- 事業ノウハウ（設計・建造のやり方、個別船のデータなど）
- データ解析技術（ビッグデータから意味ある情報を取り出す技術）：いわゆるアプリ

などが考えられる。参加メンバーは、「協調領域」と「競争領域」を常に共有（意識）して検討を進めていくことを確認した。

### 1.6.3 船体構造デジタルツインシステムの開発（TG）

#### (1) システムの具体イメージ

第3.2.3項の船体構造デジタルツインシステムの具体イメージをFig. 1.6-2に示す。「実船におけるリアルタイムモニタリング+環境データ」、「デジタルデータ」、および「シミュレーション、評価・意思決定」の3つの要素から成っており、これらを結ぶ共通デジタルモデルとして「Basic Ship Model」が存在する。検査、モニタリングから得られる船体情報は、このデジタルモデルとその応答関数に逐次反映され、評価・意思決定に供される。3つの構成要素は、本委員会の3つの技術委員会TG1～TG3にそれぞれ対応する。以下、各TGの成果の概要をまとめる。詳細は、第4.2節を参照されたい。

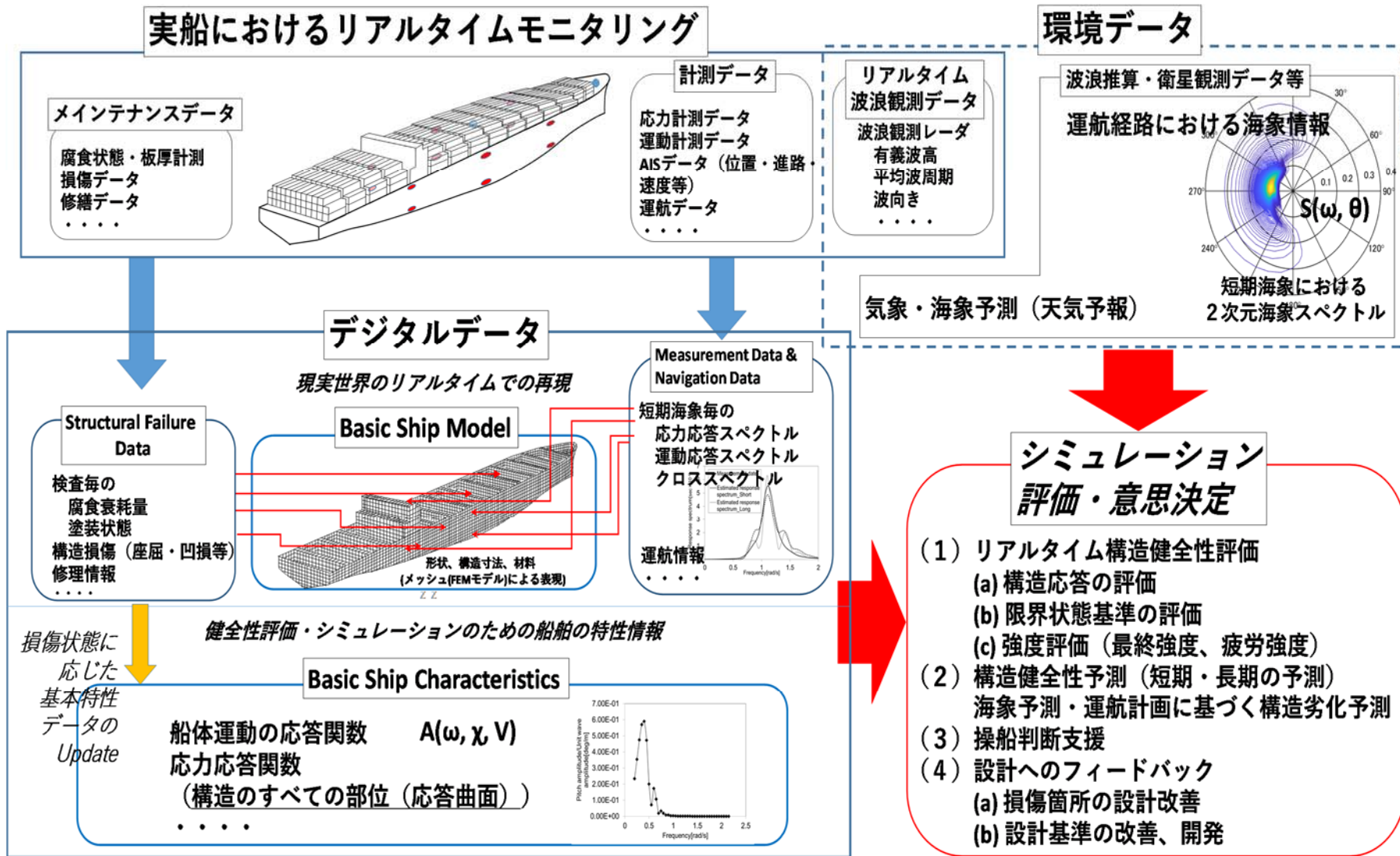


Fig. 1.6-2 構造健全性に関するデジタルツインシステムのコンセプト (出典：資料TG2-1-9；岡田・川村・満行)

## (2) モニタリングおよびデータマネジメント技術 (TG1)

モニタリングとデータ分析およびデータマネジメント技術に関する調査として、以下を実施した。

- 「デジタルツインにおけるモニタリングの役割」とは、限られた現在の情報（センサ出力）を入力として、構造健全性評価に必要な指標（構造健全性指標）を予測することにある。すなわち、「センサ出力（例えばひずみ）」、「それに基づく状態量（応力）」、「それに基づく構造健全性指標（ミーゼス応力）」の3つの量のモニタリングが必要である。また、船体のような大規模・複雑なシステムでは、逆解析・データ同化や統計・人工知能等を用いた「非計測位置でも、不確実性をできるだけ抑えて状態量や構造健全性指標を再現できる技術」が必要となる。
- 具体的な手段として、逆有限要素法 (iFEM) をベースとした船体構造デジタルツインのフロー、カルマンフィルタ等を利用する応力応答関数をベースとしたフロー、さらに短期Alert、長期疲労モニタリングなどを含む短期・中期・長期に渡り運用可能な総合的な船体構造デジタルツインのフローの例を示すとともに、実現のために必要な技術課題を明らかにした。また、各種センサや船体構造モニタリングシステムの開発の現状を調査した。

船体構造デジタルツインにおけるクラウド利用、船上通信、データセキュリティなど、データマネジメントに関する可能性と課題について調査した。

## (3) 数値シミュレーション技術・検証・標準化 (TG2)

モニタリングを活用した構造健全性の評価・推論に必要な数値シミュレーション技術について、以下を実施した。

- デジタルツインに関する先行研究事例を、航空宇宙・海洋分野を含めて幅広く文献調査した。
- 船体構造デジタルツインにおける数値シミュレーション技術の精度に関して特に検証を要する点として、①非計測状態量を予測するためのデータ同化の精度、②即時的に状態量を予測するための低次モデル（梁モデル等）やサロゲートモデルの精度、③静水応答および局部構造応答の精度を挙げた。また即時性、精度レベル、使用目的の観点から、各種計算技術を分類した。
- 疲労強度に関して、累積疲労被害度に基づく疲労寿命推定法とその不確定因子を整理した。また、波浪データベースとAISデータを用いた実運航履歴を加味した疲労寿命評価の考え方を示した。この場合も、波浪データの誤差や計測誤差など、誤差要因が存在することに留意が必要である。
- 縦曲げ最終強度に関して、非線形FEMとSmith法の適用性と課題を整理した。非線形FEMは、計算負荷が大きいため、即時性の観点から、サロゲートモデルの適用について研究が必要である。また縦曲げに関する船体構造モニタリングを操船判断支援（警報）やホイッピング部分安全係数に活かしているDNVGLの事例を紹介した。
- 本研究でコア解析プログラムに用いる予定の海上技術安全研究所、荷重構造一貫解析システム（DLSAシステム）の概要と、船体構造デジタルツイン実現に向けての開発課題を示した。またコンテナ船の船体運動、縦曲げモーメントおよび衝撃水圧に関する線形/非線形ストリップ法、3Dパネル法、CFDと水槽試験結果の比較結果を示した。
- 海上技術安全研究所で開発されたウレタン製一体型弾性模型船と実海域再現水槽における試験結

果の例を示した。本研究では、同様の水槽試験を行って波浪状態、船体運動、加速度、水圧、船体ひずみ等のデータを計測して、応力から波浪を逆推定する手法や、FBGセンサにより密に計測した水圧から詳細応力を推定する手法の精度検証を実施する。

「耐力」および「疲労寿命」に関する構造健全性指標の構築に向けた課題点を整理した。その他、船体構造デジタルツインに関する主要課題として、粒状貨物による内圧推定、静水中縦曲げモーメントの評価法、船首尾部の荷重推定精度、コンディションモニタリングと初期不整データの蓄積について、技術の現状と課題を整理した。

#### (4) シナリオ・評価・推論技術 (TG3)

バルクキャリアを対象としたデジタルツイン(BC DT)に提供する評価・推論・意思決定手法を調査する目的で、以下を実施した。

- ISSC2019のIV.2(Design Method)、V.7 (Structural Longevity)委員会レポートで引用されたデジタルツイン関連の文献21編を収集し、各文献で採用された推論・意思決定手法について調査した。必要性が高いと判断された理論・技法のプロトタイププログラムを今後作成・整備する。
- 意思決定における評価対象ならびに目的関数の選択を容易にする目的で、旗国コンテナ船およびBC（新造～売船）のシステムズ分析を実施して、ステークホルダバリューネットワーク(SVN)を作成した。BC（新造～売船）に関しては、DTを用いたコンサルタント機能を持つステークホルダ「DTコンサル」を新たに追加した時に、どのような価値を各ステークホルダに与えられるかを議論した。またBCデジタルツインへの利害関係者ニーズ（船社、造船会社、船級）を整理した。
- BC（建造～売船）SVNを使用して、利害関係者ニーズに合致した意思決定における評価対象（構造健全性指数）および目的関数の選択方法について検討した。また船の価値評価に係わる現状把握として、RightShip社による中古船格付けの現状について調査した。
- 委員会が開発するBC DTのための評価・推論・意思決定の理論・技法を準備する際にテストベンチとする目的で、TG2が提供可能な全船疲労被害度解析システムを解析エンジンに使用した疲労限定DTを開発することを提案した。
- 疲労限定DTの先行事例の文献調査を行い、暫定疲労限定DTに応用可能な評価・推論・意思決定の理論・技法のState-of-artを調べ、疲労限定DTの評価・推論・意思決定モジュールを含む全体構成の試案を提案した。

#### 1.6.4 今後の展望

本研究プロジェクトは、次の3つの事業項目からなる。

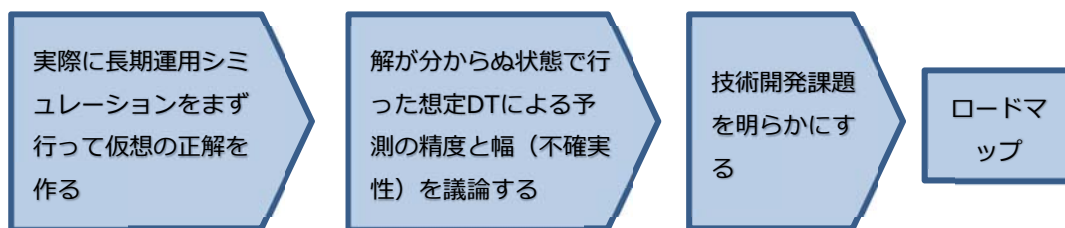
- ① 船体構造デジタルツインのコンセプトデザイン
- ② 根幹技術としての構造応答超高精度シミュレーション法の開発と検証
- ③ 実用化開発ロードマップの策定

2018年度は、①のコンセプト検討と、②の技術要素に関する調査を行った。2019年度は、①を継

続するとともに、上半期において②を実施し、技術的に現状で不足する箇所を明確にした上で、③の実用化のための技術開発ロードマップを策定する。したがって、②のデジタルツインシステムの構築が、最も喫緊の課題である。

デジタルツインシステムの解析コードは、海上技術安全研究所保有の数値シミュレーションコード（DLSA システム）に、データ同化と推論・評価の部分を組み合わせていく形とする。システムの検証は、次の2つの方法を考える。

- 海技研の実海域再現水槽にて所定の波を生成し、モニタリングと逆解析により、海象および構造応答をどの程度の精度で同定できるかを調べる。
- 下図のように、実際に不確実性を加味した長期運用シミュレーションをまず行って仮想の正解を作り、解が分からぬ状態で行ったデジタルツインによる予測の精度と幅（不確実性）を調べる。例えば、
  - 設定した海象、操船シナリオ、き裂発生ライフサイクルにわたる仮想実現値をMCSで設定しておいて、それを限られた情報と推論で予測できるか？
  - モニタリングすることで、不確実性の幅を低減できるか？
  - 点検+ベイジアン更新で構造健全性を合理的に確保できるか？



デジタルツインシステム構築と検討対象 BC に対するシミュレーションおよび評価の実施のため、TG 横断のタスクチームを編成し、次のようなタスク項目を分担して実施する。

- 全体データマネジメントとシステムの構築
- モニタリングシステムの設計
- 荷重・構造一貫解析プログラムとインターフェースの整備
- データ同化、逆問題解析コードの整備
- 評価・推論コードの整備
- 海象、航行モデルの設定
- 推定海象の誤差評価
- 水槽試験の実施
- 疲労シミュレーション
- 縦曲げ最終強度解析とサロゲートモデルの開発
- 累積疲労被害度に基づく構造健全度評価と設計・運用へのフィードバック
- 縦曲げ最終強度に基づく構造健全度評価と設計・運用へのフィードバック
- 物理アニメーション（CG）の作成

物理アニメーション（CG）は、シミュレーション結果を基に、波浪、船体運動、構造応答をサイバー上に充実に再現するものである。本FSの技術的アウトカムであるとともに、社会、若年世代に先端技術をアピールすることをねらいとする。構造変形量は運動変位に比べて小さいため、適宜増幅して、応力応答を含めて明確に可視化する。

上記のTG横断タスクと並行して、各TGでは技術調査を、より広範・密に実施する。TG3では、今年度は、BCにおける新造～売船までのスコープでSVNを作成したが、実際には、売船せずに解撤まで保有する場合、あるいは中古船を購入し解撤まで保有する場合が存在する。これらの船主の意向・価値観について調査して、建造～売船～解撤の寿命全期にわたるBC（建造～解撤）SVNを作成する。これを基に、中古船主を含む全ての利害関係者ニーズに合致したDTの構成を提案する。

SGでは、TG3との連携を強化しつつ、船体構造デジタルツインのビジネスイメージとプロトタイプコンセプトを明らかにする。また、デジタルツインでは、設計情報が船の生涯に渡って活用され、各種のシミュレーションに設計モデルが使われると想定される。これら個別船の設計情報や設計モデルを用いたデータ解析技術（アプリ）は、造船会社のノウハウに属するものであるため、その取り扱いについて、ステークホルダ間でコンセンサスを形成すべく調整が必要である。この点も、次年度のSGにおける検討課題とする。



## 2. 活動状況報告

### 2. 1 海事産業ステークホルダへの委員会参加依頼

本事業を円滑に進め、有益な成果を得るため、「超高精度船体構造デジタルツインの研究開発委員会」を立ち上げることにした。委員会の立ち上げに当たり、国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所の協力のもと、造船所、船級協会、船社、および、大学関係者に対し、本事業の目的、目標、アウトカム等の説明を行い、委員会への参加を依頼した。

#### 2.1.1 造船所および船級協会

一般社団法人日本造船工業会技術部のご協力により、以下のとおり造船所関係者への説明を行った。

- 2018年4月 5日：日本造船工業会・部長級会合（日本海事協会同席）
- 2018年4月19日：日本造船工業会・設計部会技術幹事会
- 2018年5月11日：日本造船工業会・技術委員会有志

#### 2.1.2 船社

邦船大手3社に対しては、以下のとおり、個別に説明を行った。

- 2018年6月 6日：日本郵船&MTI
- 2018年6月 7日：商船三井
- 2018年6月 7日：川崎汽船

#### 2.1.3 大学

2018年5月22日開催された2018年度日本船舶海洋工学会春季講演会（大阪）の開催期間中に、構造関係の先生方にご参集いただき、準備会を開催し、本研究委員会の説明を行った。

### 2. 2 全体会合

#### 2.2.1 第1回ステアリング・グループ(SG)会議

- 日 時：2018年7月10日(火) 15:30～17:30
- 場 所：AP虎ノ門11階Cルーム
- 配布資料：
  - 1) 資料-SG-1-1 委員名簿（案）
  - 2) 資料-SG-1-2 事業計画（案）
  - 3) 資料-SG-1-3 委員会構成（案）
  - 4) 資料-SG-1-4 SGおよび各TGの具体的作業イメージ（案）
  - 5) 資料-SG-1-5 SGでの議論の進め方について（案）
  - 6) 資料-SG-1-6 Phase 1全体スケジュール（案）
  - 7) 資料-SG-1-7 委員会の検討方針（私見）（藤久保委員長）
  - 8) 資料-SG-1-8 TG1 モニタリング・データマネジメント（村山委員）
  - 9) 資料-SG-1-9 TG2 波浪中船体応答シミュレーションの検討方針（岡委員）

- 10) 資料-SG-1-10 DS(Decision Support)技術に関する文献調査（その1）（大沢委員）
- 11) 参考-SG-1-1 Digital Twins for Blue Denmark
- 12) 参考-SG-1-2 Phase 2における進め方について（案）

### 2.2.2 第1回テクニカル・グループ(TG)合同会議

- 日 時：2018年9月5日(火) 10:30～15:45
- 場 所：AP虎ノ門11階Bルーム
- 配布資料：
  - 1) 資料-TG合同-1-1 委員名簿（案）
  - 2) 資料-TG合同-1-2 第1回SG 会議 議事録（案）
  - 3) 資料-TG合同-1-3 実用化に向けた開発ロードマップ（案）
  - 4) 資料-TG合同-1-4 委員会の検討方針（私見）（資料-SG-1-7）
  - 5) 資料-TG合同-1-5 話題提供
  - 6) 資料-TG合同-1-6 TG1 モニタリング・データマネジメント技術
  - 7) 資料-TG合同-1-7 TG2（数値シミュレーション技術・検証・標準化）検討課題（案）
  - 8) 資料-TG合同-1-8 TG3 FY2018 活動内容（案）
  - 9) 参考-TG合同-1 TG1モニタリング・データマネジメント（資料-SG-1-8）
  - 10) 参考-TG合同-2 TG2波浪中船体応答シミュレーションの検討方針（資料-SG-1-9）
  - 11) 参考-TG合同-3 DS(Decision Support)技術に関する文献調査(その1)（資料-SG-1-10）

### 2.2.3 第2回ステアリング・グループ(SG)会議

- 日 時：2018年11月9日(金) 13:30～17:15
- 場 所：AP虎ノ門11階Bルーム
- 配布資料：
  - 1) 資料-SG-2-1 第1回ステアリング・グループ（SG）会議議事録（案）
  - 2) 資料-SG-2-2 第1回テクニカル・グループ（TG）合同会議議事録（案）
  - 3) 資料-SG-2-3 船体構造デジタルツイン開発に向けた検討方針（案）
  - 4) 資料-SG-2-4 デジタルツインの調査 中間報告
  - 5) 資料-SG-2-5-1～2TG1 進捗報告
  - 6) 資料-SG-2-6-1～3TG2 進捗報告
  - 7) 資料-SG-2-7-1～5TG3 進捗報告
  - 8) 資料-SG-2-8 2018 年度成果報告書の目次案
  - 9) 参考-SG-2-1 委員名簿

### 2.2.4 第3回ステアリング・グループ(SG)・第2回テクニカル・グループ(TG)合同会議

- 日 時：2019年3月6日(水) 13:30～17:30
- 場 所：AP虎ノ門11階Bルーム

- 配布資料：

- 1) 資料-SG-3(TG合同-2)-1 第1回 テクニカル・グループ (TG) 合同会議 議事録 (案)
- 2) 資料-SG-3(TG合同-2)-2 第2回 ステアリング・グループ (SG) 会議 議事録 (案)
- 3) 資料-SG-3(TG合同-2)-3 TG1進捗報告と2018年度報告書案 (第4.1節)
- 4) 資料-SG-3(TG合同-2)-4 TG2進捗報告と2018年度報告書案 (第4.2節)
- 5) 資料-SG-3(TG合同-2)-5 TG3進捗報告と2018年度報告書案 (第4.3節)
- 6) 資料-SG-3(TG合同-2)-6 2018年度報告書 (案) 第1章 (研究概要)、第2章 (活動状況報告)、第3章 (船体構造デジタルツインのコンセプト検討)
- 7) 資料-SG-3(TG合同-2)-7 2018年度報告書 (案) 第5章 (まとめと今後の展望)
- 8) 参考-SG-3(TG合同-2)-1 2019年度事業計画書
- 9) 参考-SG-3(TG合同-2)-2 委員名簿

### 2.2.5 第1回技術会合

- 日 時：2019年3月19日(火) 13:30～17:00
- 場 所：新大阪ホテルワシントンホテルプラザ 桜ルーム
- 配布資料：

- 1) 資料-技術会合-1-1 2019年度事業計画
- 2) 資料-技術会合-1-2 2019年度活動方針 (案)
- 3) 資料-技術会合-1-2a 2019タスク、スケジュール、担当の検討
- 4) 資料-技術会合-1-3 2018年度報告書・第5章
- 5) 資料-技術会合-1-4 デジタルツインのCG制作について
- 6) 資料-技術会合-1-5 検討対象バルクキャリアについて
- 7) 資料-技術会合-1-5a 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
- 8) 資料-技術会合-1-6 カルマンフィルタによる船体応答推定に関する研究
- 9) 資料-技術会合-1-参考 委員名簿

## 2. 3 TG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) に付託された事項を検討するため、TGごとに個別会合が実施された。開催状況を以下にまとめる。

### 2.3.1 TG1個別会合

#### (1) 第1回会合

- 日 時：2018年11月1日(木)9:00～13:30
- 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-TG1-1-1 TG1第1回会議資料 (村山)

## (2) 第2回会合

- 日時：2019年1月8日(火)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-TG1-2-1 TG1第2回会議資料（村山）
  - 2) 資料-TG1-2-2 References（岡田）

### 2.3.2 TG2個別会合

#### (1) 第1回会合

- 日時：2018年10月26日(火) 13:30～16:30
- 場所：日本船舶技術研究協会大会議室
- 配付資料：
  - 1) 資料-TG2-1-1 委員会の検討方針（藤久保）
  - 2) 資料-TG2-1-2 事前会合メモ（海技研）
  - 3) 資料-TG2-1-3 研究線表案（岡）
  - 4) 資料-TG2-1-4 海技研シミュレーションツールの紹介（村上）
  - 5) 資料-TG2-1-5 研究内容（後藤）
  - 6) 資料-TG2-1-6 研究内容（田中智）
  - 7) 資料-TG2-1-7 研究内容（杉村）
  - 8) 資料-TG2-1-8 研究内容（辰巳）
  - 9) 資料-TG2-1-9 研究内容（川村）
  - 10) 資料-TG2-1-10 研究内容（柳原）
  - 11) 資料-TG2-1-11 流体からみたDTの文献調査（一ノ瀬）
  - 12) 資料-TG2-1-12 弾性模型（HYEL）論文
  - 13) 資料-TG2-1-13 水槽紹介資料（宝谷）
  - 14) 資料-TG2-1-14 荷重ベンチマーク事例（Marine Structure論文）（高見）
  - 15) 参考-TG2-1-1 事業概要（SG資料1-2）
  - 16) 参考-TG2-1-2 研究体制図（SG資料1-4）
  - 17) 参考-TG2-1-3 PJ全体スケジュール（SG資料1-6）
  - 18) 参考-TG2-1-4 SG/TG議事録
  - 19) 参考-TG2-1-5 TG3(9/26)議事録

#### (2) 第2回会合

- 日時：2019年1月10日(木) 9:00～12:00
- 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TG2-2-1 TG2会合用資料（海技研）

- 2) 資料TG2-2-2 TG2で仕様を検討する疲労強度及び最終強度評価フローについて  
(主査・副主査)
- 3) 資料-TG2-2-3 文献調査 (田中智)
- 4) 資料-TG2-2-4 文献調査 (杉村)
- 5) 資料-TG2-2-5 文献調査 (宝谷)
- 6) 資料-TG2-2-6 文献調査 (宝谷)
- 7) 資料-TG2-2-7 文献調査 (宝谷)
- 8) 参考-TG2-2-1 報告書の目次案 (TG2) に関して (藤久保)

### 2.3.3 TG3個別会合

#### (1) 第1回会合

- 日 時 : 2018年9月26日(木)10:30~17:30
- 場 所 : 航空会館504
- 配布資料 :
  - 1) 資料-TG3-1-1 第1回TG合同会議 議事録 (案)
  - 2) 資料-TG3-1-2 TG3 FY2018活動内容 (案)
  - 3) 資料-TG3-1-3 TG3活動におけるシステムズアプローチとSVNの説明
  - 4) 資料-TG3-1-4 MIT産学連携プログラム報告会

#### (2) 第2回会合

- 日 時 : 2018年11月5日(月) 10:00~18:00
- 場 所 : 大阪大学東京ランチ
- 配布資料 :
  - 1) 資料-TG3-2-1 シナリオ・評価・推論技術テクニカル・グループTG3・システム分析WG  
(TG3-WG-SA) 委員名簿Rev.Nov.05, 2018
  - 2) 資料-TG3-2-2 TG3・2018年度第1回会合 議事録 (案)
  - 3) 資料-TG3-2-3 第1回 船体構造デジタルツインTG2会合 議事録 (案)
  - 4) 資料-TG3-2-3-1 船体構造デジタルツイン研究線表 (案)
  - 5) 資料-TG3-2-4-1 調査対象文献 (第1陣)
  - 6) 資料-TG3-2-4-2 DT-TG3文献調査投稿フォーム (大阪大学)
  - 7) 資料-TG3-2-4-3 DT-TG3文献調査投稿フォーム (東京海洋大学)
  - 8) 資料-TG3-2-4-4 DT-TG3文献調査投稿フォーム (広島大学)
  - 9) 資料-TG3-2-4-5 DT-TG3文献調査投稿フォーム (横浜国立大学)
  - 10) 資料-TG3-2-4-6 DT-TG3文献調査投稿フォーム (海技研)
  - 11) 資料-TG3-2-4-7 DT-TG3文献調査投稿フォーム (海技研)
  - 12) 資料-TG3-2-5 【超高精度船体構造デジタルツインに関する研究開発】  
デジタルツインの調査 中間報告

13) 資料-TG3-2-6 船社殿への質問事項

**(3) 第3回会合**

- 日 時 : 2018年12月22日(金) 10:30~19:00、12月23日(土) 9:30~17:00
- 場 所 : 東京大学本郷キャンパス工学部3号館423、424
- 配付資料 :
  - 1) 資料-TG3-3-0 議事次第,TG3・WG-SA 委員名簿
  - 2) 資料-TG3-3-1 TG3・2018 年度第 2 回会合 議事録(案)
  - 3) 資料-TG3-3-2 第 2 回ステアリング・グループ(SG)会議 議事録(案)
  - 4) 資料-TG3-3-3a 第 2 回 SG 会議終了後の藤久保委員長コメント
  - 5) 資料-TG3-3-3b 船社殿からいただいたご意見のまとめ
  - 6) 資料-TG3-3-3c 造船所委員からのバルクキャリアを対象とした研究開発ニーズ
  - 7) 資料-TG3-3-3d 船体構造デジタルツイン検討対象に関する阪大内検討メモ
  - 8) 資料-TG3-3-4a 船体構造デジタルツイン研究開発委員会 主査レベル会合(WEB会議)メモ
  - 9) 資料-TG3-3-4b デジタルツイン(DT)TG1/2/3 活動計画(試案)
  - 10) 資料-TG3-3-5a 主査レベル会合後のメール審議メモ
  - 11) 資料-TG3-3-5b DT 検討課題のリスト案
  - 12) 資料-TG3-3-6 WG-SA 作業記録【電子ファイルのみ】

**(4) 第4回会合**

- 日 時 : 2019年1月30日(水) 13:30~17:00
- 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-TG3-4-1 TG3・2018年度第3回会合(合宿) 議事録(案)
  - 2) 資料-TG3-4-2 2018年度報告書4.3節目次案
  - 3) 資料-TG3-4-3a Structural Fatigue Life Assessment and Sustainment Implications for a New Class of US Coast Guard Cutters
  - 4) 資料-TG3-4-3b Risk informed life-cycle optimum inspection and maintenance of ship structures considering corrosion and fatigue
  - 5) 資料-TG3-4-3c Incorporation of risk and updating in inspection of fatigue-sensitive details of ship structure
  - 6) 資料-TG3-4-3d SR245 二重殻タンカーの船体構造寿命に関する研究 成果報告書
  - 7) 資料-TG3-4-4 バルクキャリアのDigital Twinに関して
  - 8) 資料-TG3-4-5 TG1にて検討中のDTにおける疲労評価フロー

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  
2018 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