

(社) 日本船舶海洋工学会

海洋構造物のデジタルツイン技術に関するストラテジー委員会

令和2年7月～令和4年3月

最終報告書

令和5年7月

I. 研究組織

委員長

居駒知樹 日本大学

委員

新里英幸 日立造船
飯島一博 大阪大学
村井基彦 横浜国立大学
柳原大輔 九州大学
田中義和 広島大学
中條俊樹 海上技術安全研究所
安澤幸隆 九州大学
正信聡太郎 海上技術安全研究所

II. 研究発表

なし

目次

1. はじめに
 - 1.1. 研究背景
 - 1.2. 目的
2. デジタルツイン
 - 2.1. デジタルツインとは
 - 2.2. 国内の船舶工学分野でのデジタルツインの事例
 - 2.3. 海外におけるデジタルツインの活用事例
3. 日本におけるデジタルツインの技術提供状況
4. 日本における各分野のデジタルツイン活用状況
5. その他のデジタルツイン事例
6. 海洋工学分野でのデジタルツイン技術の適用の方向性への提言
7. おわりに

1. はじめに

1.1. 研究背景

各種の情報技術やデジタル技術の目覚ましい進歩により CAE と言われていた設計方法やツールや Simulation-Based Design などが当たり前活用するのが今日である。情報通信技術の発達には通信方法やそれを担うインフラ整備も進み、高速化・高度化してきたし、今後はさらにそれらが発達することは確実である。

このような状況下で新たな方向性としてデジタルツイン (Digital Twin, 以下 DT) 技術が多くの分野や作業工程の中で利用されるようになってきた。コンピュータ・シミュレーション技術と速度の向上など、前述のとおり技術背景によるものである。しかしながら、船舶海洋工学の特に日本国内での状況をみると、必ずしも積極的な DT 導入に至っていないようである。海洋構造物の種類は多種多様であり、洋上風力発電を始め、今後のさらなる提案の可能性を期待できる。それらの企画、設計、製造・建造から維持管理、さらには撤去までのライフサイクルの各段階における効率化のためにはデジタルトランスフォーメーション (Digital Transformation, 以下 DX) が効果的に行われる必要がある。その統合された一つのシステムとして DT に期待できる部分は大きい。日本における海洋工学技術と実際の利用・設置などの効率化のために DT 技術をしっかりと把握しながら、導入方法を検討することは喫緊の課題である。

1.2. 目的

本研究委員会では、日本の船舶海洋工学分野での DT 開発・導入状況を整理するとともに、海外のそれとを比較してみる。そのために、海外の海洋工学分野での状況から特筆すべき点について整理する。さらに、日本国内における他分野での DT 事例を調査することで、特に海洋構造物利用の提案や開発における DT 活用の可能性を提示する。これらを本ストラテジー研究委員会の目的として活動を行った。調査内容を整理すると下記のとおりである。

- ① 海洋構造物に関する DT のためのシミュレーション技術の調査
- ② 海洋構造物のモニタリング技術に関する調査
- ③ 海洋構造物システムへの DT の利用に関する調査

2. デジタルツイン

2.1. デジタルツインとは

デジタルツインではコンピュータ・シミュレーション技術が重要となる。このシミュレーションが数値的に進む過程で、それを再現しようとしている物理空間上でのリアルタイムの実際の情報（状況）が数値シミュレーションに反映されている仮想空間上の状態がデジタルツインである。数値シミュレーションにおいて、ところどころで実際の状態に補正するために同定される作業があるが、これをリアルタイムでかつ IoT 技術を駆使して数値シミュレーションと連動させている状態である。これが、単に数値シミュレーションで実現象を再現してそれを単にポスト処理として可視化しているものとは異なるところである。

このような DT が構築されることで、リアルタイムで実際の物理状態がどのように変わっているのか、またそのまま時間が経過すればどのように変わっていくかの短期予測も可能であるということである。DT は①製造・建造段階、②設置作業段階、③運用状態、④メンテナンス作業など、⑤撤去作業など、といった段階でそれぞれ活用できる可能性がある。よって、構築される DT のシステム要件のレベルや規模も異なっていく。

似たような概念に Cyber Physical System (CPS) なるものがある。これについては、ここでは触れないが、本報告の最後で、エンジニアが本来目指すべき姿はデジタルツイン技術を駆使して CPS を構築していることになることになる。

2.2. 国内の船舶工学分野でのデジタルツイン及び関連技術の事例

船舶海洋工学分野でのデジタルツイン開発・利用状況は他の分野と比較すると良くない。研究委員会で具体的に挙げられた DT は 1 つであった。その紹介と今後の参考となるモニタリング状況についての一例について以下に解説する。

1) 船体構造デジタルツイン

一般財団法人日本船舶技術協会における「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 2018 年に発足し、2020 年度から 2021 年度に実施されたフェーズ 2 までの 4 年間の研究開発が行われた。高精度な波浪中船体運動・構造応答シミュレーションを水槽実験結果との比較などから検証した上で採用した。DT では実モデルにおけるモニタリングデータから非計測部位を含む船体全体の詳細応力を得る必要がある。そのため、計測データと数値シミュレーションの融合のためのデータ同化が行われる。当該研究では船体応答、ハルガーダー応答までの推定のために 3 つの同化法が検討された。基本的には数値シミュレーションと実計測データとの融合による予測・推定精度の向上が基本であり、その開発と実装への課題整理がフェーズ 1 で行われた。

これを受けたフェーズ 2 では要素技術の統合と実海域試験による実証が行われるとともに

に、社会実装へのシナリオや技術標準化のためのルール案が検討・提案された。

- ① 船体構造デジタルツイン プロモーション動画（日本船舶技術研究協会）
<https://www.youtube.com/watch?v=Z7Jhtkx10AY>
- ② 参考文献
 - a. 藤久保昌彦：「船体構造デジタルツインの研究開発－フェーズ1プロジェクトの成果と今後の展開－」，日本船舶海洋工学会講演会論文集，第30号，2020S-OS8-1，2020.
 - b. 特集：船体構造デジタルツイン，日本船舶海洋工学会誌 KANRIN（咸臨），第94号，2021.4.
 - c. 事業成果物，「2021年度 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）」，<https://fields.canpan.info/report/detail/26947>，2022.3.

2) 浮体式洋上風力システム「響」でのモニタリングと課題についての一考

1)で解説されたようにDTの実現のためには対象となる実在船舶などの構造物のモニタリングとその計測データが重要である。浮体式洋上風力発電システムとして実証試験が行われている「響」では様々な項目および方法によってモニタリングが行われている。しかしながら、実証試験が目的であるから多くの計測ができるが、商用機となった場合にはごくごく限られた計測しかできないと思われる。

結果として、DT実現に必要となるモニタリングがどれだけできて、かつ限られた情報と数値シミュレーション結果の同化技術が課題となる。1)ではそれを以下に効率的に実施できるかについて複数の項目に対して複数の方法が検討された。

2.3. 海外におけるデジタルツインの活用事例

1) FPSOにおけるデジタルツインの事例^{*1}

スイスのアクセロス社が、イヤル・ダッチ・シェルがナイジェリア沖で創業するボンガ油田のメインFPSOへデジタルツインを導入することに成功した。DT技術導入については日本では三井海洋開発（MODEC）が進めており、トップサイドに活用して生産性の向上を目指している。

MODECがブラジルのプラントで試験導入した1年間では、稼働停止時間が従来比65%削減され、プラントの監視を行う作業員が陸上からの操業を監視することができる可能性を示唆した。（MODEC Webサイト^{*2}より）

*1 日本海事新聞，「シェル，デジタルツイン導入」，<https://www.jmd.co.jp/article.php?no=260539>，2020.9.8.

*2 三井海洋開発「Digital & Analytics」，https://www.modec.com/jp/business/digital_analytics/

2) DNV-GL でのデジタルツイン応用の提案^{*3}

DNV-GL は確率論的デジタルツイン (Probabilistic Digital Twin: PDT) を提案し、それはデジタルツインとリスク解析をつなぐシステムである。リスクモデルは一般的に運用時に適用されることはほとんどない。それは過去のデータ分析に基づいて潜在的なリスクが評価されるのみであるからである。しかしながら、DNV-GL は、リスクは本来はもっと動的に変化するものであるから、運用時の刻々と変化する状態がリアルタイムでフィードバックされるべきであり、リスクモデルにリアルタイム性が求められるとしている。これを解決するのがデジタルツインとの融合であるとしている。

^{*3} Offshore Energy, “DNV GL expands digital twin concept into risk analysis space,” <https://www.offshore-energy.biz/dnv-gl-expands-digital-twin-concept-into-risk-analysis-space/>, 2019.9.5.

3) その他

- 船舶、海洋構造物の設計・生産過程での DT 活用に関するレビュー (Chen ら^{*4})
 - IT プロバイダーDXC テクノロジーは DT 上で AI を用いた重要部品の故障を予測し火災がどのように延焼するかをシミュレートしている。実際の事故をシミュレートすることで、延焼予測と合わせて、脆弱な壁や断熱を強化すべき壁などを特定することができた。
 - 造船会社 Navantia は設計段階から引き渡し後の運用に至るまで、船舶のライフサイクルを追跡する DT ベースシミュレーションを実施している。全ライフサイクルで得られたデータは仮想環境で解析され、是正措置を抽出し、予防措置を推奨するための計算を提供する。Siemens 社とも提携した。
 - Bureau Veritas は高度なアセット・インテグリティ・マネジメント・プラットフォームを開発し、Veritar AIM3D とした。海洋構造物の供用期間を通して使用でき、運用経費の大幅な節約・安全性の向上やデータ収集、さらに適切なメンテナンスを実現するだけでなく、廃棄のタイミングも明確に提示する。
 - GE は MSC と協力して高速なデータサンプリングを行う技術を開発している。Predix プラットフォームにより、物理ツインからのリアルタイムデータと DT からのシミュレーションデータとの差異を検出する。これにより潜在的な故障や性能劣化を見つけ出すことが可能となる。
 - MPA シンガポールは Keppel Offshore & Marine 社および Technology Centre for Offshore and Marine 社と接岸、係留や曳航作業に関する港湾作業を含む様々な自動操船を今後提供していく予定である。65 m のタグボートの DT を用いて複数シナリオにおける船舶の挙動を計算し、より安全な海運オペレーションを提供できるようにしていく。

- DNV-GL は仮想的な曳船を確立しようと試みている。
- NTNU は DNV-GL, SINTEF Ocean, 現代重工と共同して DT モデルの作成を標準化するオープンソース・シミュレーション・プラットフォーム (OSP) を開発している。
- ノルウェー沖の Ivar Aasen プロジェクトでは、同鉱区における将来の全資源を対象にデジタル・ライフサイクル・オートメーションと能力分析ソリューションを開発する。
- 中国では CIMC の超大水深域でセミサブ型プラットフォーム (Blew Whale I) が 2017 年から南シナ海で可燃性氷の開発に成功しており、AR/VR, IoT, 仮想化, データ統合などの先進技術がプラットフォームの DT 形成に使用されており、効率的な遠隔運用手段を提供している。
- BP は新しい油田や関連するインフラの物理プロジェクトモデルのモデリングに DT を使用している。BP はアラスカにあるガス収集施設の DT をもっており、廃止措置のための設備の特定, メンテナンス計画, 設備設計計画の実行にそれを使用している。
- Shell は北海にある古いプラットフォーム (50 年の耐用年数に近い) で実施されている DT コンセプトは、運用モード解析 (OMA) とリアルタイムの環境負荷からの負荷と組み合わせることで構造物の予測疲労寿命を大幅に向上させている。
- Sivalingam ら^{*5} は、構造物の保全戦略として、洋上風力発電に DT を適用して残存耐用年数 (RUL) を予測する方法を提案している。数値タービンに下層センサーを配置して RUL を予測し、最適な運転とメンテナンス戦略の比較を行い、故障モードの故障リスクを抽出している。

*4 Bai-Qiao Chen, Paulo Videiro and Carlos Guedes Soares, "Review of digital twin of ships and offshore structures," Marine and Offshore Structures Maritime Technology and Engineering 5 Volume 1, 1st Edition, CRC Press, 2021.

*5 Sivalingam, K., Sepulveda, M., Spring, M. & Davies, P. 2018. A review and methodology development for remaining use-ful life prediction of offshore fixed and floating wind tur-bine power converter with digital twin technology perspec-tive. 2nd International Conference on Green Energy and Applications, Singapore, 24-26 March 2018. pp. 197-204.

3. 日本におけるデジタルツインの技術提供状況

本委員会では以下の企業による講演を行った。デジタルツインの構築と CAE 開発は基本的にセットとなるため、CAE ソフトウェア提供会社の DT への思想と開発状況について説明をお願いした。

3.1. ANSYS ジャパン

① Ansys 社の紹介

- シミュレーションと材料をつなぐプラットフォーム DX を支援
- ミネルバ：シミュレーションプロセスとデータ管理ツール
- 材料情報の管理・活用，データベースの充実
- プロセス・インテグレーション（自動化と設計最適化）
- コアのソルバーを多く持つが，これらをどのように連携させて・組み合わせて活用するようになっている（ここ 4，5 年）
-

② DX

- デジタル技術でビジネスモデルや働き方を変える（定義）
- データとデジタル技術で業務のしくみやサービス，事業モデルを新しく変える

③ デジタルツインの目的

- 物理空間にある現実の機器や設備の稼働状況，環境情報などをリアルタイムで収集する一方，仮想空間上に機器や設備を構築し，これらのデジタル情報（モデル）を用いてシミュレーションを実施することで，設計の改善や環境に応じた運転の最適化，故障予測などを可能にするソリューションである。デジタルツインによって，効率的な設計開発や運用管理コストの削減などが期待される。
- 2019 年には 38 億ドル（約 4000 億円相当）が 2025 年までに 358 億ドル（約 3 兆 6,000 億円相当）
- リアルタイム性が求められる。過去の再現はそれほど意味がない。

④ 効果

- 15% 生産性向上
- 10% コスト削減

⑤ 目指すもの

- 早期の製品化による競争力の向上
 - 試作等の削減と高速化

- 連携強化
 - CAE だけでなく，実現象（モニタリング）情報の密な連携とその強化が期待される
 - 勘（経験のみ）任せの意思決定からの脱却
 - 技術の継承そのものが困難（人だから）
 - 効率的な事業運営によるコスト削減
- ⑥ DT が表現するもの
- 故障の予測（部品レベル）
 - 製造プロセスの最適化（製品レベル）
 - 納入後の環境に合わせた調整（システム全体レベル）
 - 出来上がったもの（物理的）が最適なものを後から検討し，必要に応じて実物に変更のフィードバックができる
- ⑦ Digital Twin コンソーシアム（2020 年 5 月設立）に Ansys も参加，AutoDesk など
- ⑧ Ansys が提唱するデジタルツイン
- ⑨ シミュレーション・ベースの DT（simulation (Physics) Based Digital Twin）
- モニタリングデータをシミュレーションモデルに組み込む。シミュレーションによってより最適な状態を予測し，実物にフィードバックする。
 - マルチ・フィジクス，全体システム解析のための縮退化技術
 - 縮退化：関数化，AI 導入など
 - リアルタイム性の確保のための高速化
 - 精度を確保しつつ
 - 計算をし続けるのか
 - IoT プラットフォームとの連携
- ⑩ 摩耗の FEM での計算は簡単
- 実現象で追うのは大変だが計算はでき，予測も可能
 - CAE ができているときに，ROM 化（ROM 自体）の精度

3.2. IDAJ

- ① デジタルツイン（DT）を実現するために必須となる CAE がどのように活用されているのかの事例紹介（以下）
- ② 洋上風力発電への DT の応用
- 洋上風力発電システムは着目する点の違いによりスケールや現象が大きく変化する特徴がある
 - 商用 CFD ソフトウェア CONVERGE で解析可能（翼周りやモータ挙動など）
- ③ 海洋構造物や関連するテーマへの適用
- 混相流解析や移動境界との組み合わせで海洋系の様々なテーマに対して流体

—構造連成解析が可能である

- 浮体動揺解析が可能
- 係留浮体の計算も可能
- 係留索等の線状構造物への流体力を考慮した全体システムの計算が可能
- 多方向不規則波浪場の生成が可能

④ ROM化が今後のさらなる課題

4. 日本における各分野のデジタルツイン活用状況

4.1. ジャケット構造物に関するデジタルツイン

日本では港湾構造物を含めてジャケット構造物は数多く存在する。しかしながら、国内におけるジャケット構造物に関連する DT 活用事例は見当たらなかった。これは海洋構造物を始めとする海洋工学（港湾含む）分野での DT 活用が遅れているためであると思われる。一方で海外では設計・設置レベルでの DT 事例は見られた。

4.2. 超大型浮体等に関連するデジタルツイン

国内外において超大型浮体を対象とした DT 応用例やコンセプトに関する研究事例は見当たらなかった。ただし、海上都市のようなコンセプトは数多く出ているため、国内はもとより海外では DT を活用する事例は増えると推察される。関連することについては後述される都市のデジタルツインや本委員会にて提案する避難シミュレーション等に関連すると考えられる。

4.3. 建設業界でのデジタルツイン

建設業界は建築分野と土木分野に大別される。それぞれが業務の内容に合わせた DT を独自開発している。建築分野は BIM（Building Information Modeling）が積極的に活用されてきており、また土木分野においても BIM を独自に CIM（Civil Information Modeling）と呼称して様々な場面において活用している。

BIM は設計時の CAD データと積算情報・データが統合されたシステムだといえる。そのため、設計された建築物や構造物に対して 3D の CAD データと合わせて積算根拠となる部材情報を始めとするあらゆる情報がデジタル化されている。デジタルツインではモデリングされた対象構造物に対して各種数値シミュレーションが行われるのは言うまでもないが、例えば疲労に関して DT が活用されるのであれば、使用部材や耐用年数、そしてそれが使用された年限などの情報が必要となる。BIM はそれらの情報が一元管理されたシステムだといえ、それに CAE 関連ソフトウェアが統合されることで、多くの情報を内蔵した DT システムが構築できることになる。

4) 大手ゼネコンでの DT の事例

- iTwin は BIM から進化した統合 DT システムである
- そのため、CAD、積算、材料、維持管理（モニタリング）システム、生産プロセスデータが連携されている
- デジタルツインワークフロー
 - 計画、設計、解析、施工、運用・維持管理の全てにおいて活用される

- 鹿島建設の例（Press Release, 2020年5月11日）
 - 建物の企画・設計から施工, 竣工後の維持管理・運営までの各情報全てをデジタル化し, それらを仮想空間上にリアルタイムに再現する「デジタルツイン」を推進している。(プレス・リリースより)
 - BIMを基軸とした新たな生産システムの構築 (BIMによるデジタルツイン)
 - 企画・設計フェーズ
 - ◇ ビル風シミュレーションによる周辺環境への影響評価
 - ◇ 気流シミュレーションによる規格化したモジュールの評価・改善
 - 施工フェーズ
 - ◇ プレファブ・ユニット化
 - ◇ 工事プロセスのデジタル化と進捗管理
 - ◇ 仮想空間と現実空間を複合させる MR (Mixed Reality) 技術を活用した, モジュールモデルと実際の施工状況の確認
 - 維持管理・運営フェーズ
 - ◇ ファシリティマネジメントプラットフォームと BIM データの連携
 - ◇ 集積データのビッグデータ化
- 土木の工事現場 (陸上) でのデジタルツイン
 - 土木工事用の重機はすでに無人運転が行えるレベルであり, その運転状況を含めた現場のデジタルツインが運用されている
 - 重機の運転のデジタルツイン
 - 工事の進捗状況 (整地など) のデジタルツイン

5. その他のデジタルツイン事例

5.1. Virtual Singapore

シンガポールでは約 720 平方キロメートルの国土全体を 3D 空間に再現するプロジェクト「バーチャル・シンガポール」が進行している。これは 2018 年に一旦公開されている。ここではエネルギーポテンシャルの解析やエネルギーの流れなどが解析されている。

3D モデルには属性情報が含まれているので、下記のシミュレーションとそれによる計画改善案などが検討されるとのことである。

- 歩行者の導線シミュレーションによる施設へのアクセシビリティの改善
- 採光や通風などの環境シミュレーションに基づく各種インフラ整備の計画
- 発電量シミュレーションに基づく効率的な太陽光発電パネルの設置場所の計画
- シミュレーションを通じた効率的な公共交通機関の整備・運用

5.2. 東京都デジタルツイン実現プロジェクト^{*6}

Virtual Singapore を筆頭に都市のデジタルツイン化のコンセプトの元、東京都は 2030 年のリアルタイムデータを活用できる環境を目指して開発を進めている。このデジタルツインの目的は次のとおりで、それぞれの事業^{*7}が進められている。

- 衛星データを活用し、宙（そら）から見守る。みらいの防災
- 地下埋設物を管理する持続的な体制を構築し、安全なライフラインを確保
- デジタルツインと多様な主体をつなぐデータ連携

^{*6} 齊藤由希, 東京都のデジタルツイン化へ, 2030 年にリアルタイムデータを活用できる環境を目指す, MONOist, https://monoist.itmedia.co.jp/mn/articles/2107/06/news049_2.html, 2021.7.6.

^{*7} 東京都デジタルツイン実現プロジェクト, <https://info.tokyo-digitaltwin.metro.tokyo.lg.jp/>, 2023.7.14 閲覧

5.3. 空間計画 (Spatial Planning) への応用

陸域および海域における空間計画策定にデジタルツインが活用される提案がでている。

1) Digital twins for spatial planning

オランダのフローニンゲン市はロッテルダムやシンガポールに続き、3D デジタルモデルを開発しようとしている。このプロジェクトにより建設チェーン全体を最適化するためのものだとしている。3D モデルによって空間プロジェクトをより迅速にかつコスト効率性を高く、さらには透明性をもって実施できるとしている。

(<https://www.gim-international.com/content/article/digital-twins-for-spatial-planning> より)

2) Digital Twins and Next Generation Marine Spatial Planning Support Systems

(<https://pure.buas.nl/en/activities/digital-twins-and-next-generation-marine-spatial-planning-support> より)

3) Digital Twin of the Ocean

海洋の一貫した情報を高解像度、多次元的に、ほぼリアルタイムで提供するものであり、開発が進められている。海洋の物理情報はもとより、社会経済的な要素も含まれる。海洋に張り巡らされた幾千ものセンサーと多数の人工衛星からの連続的なリアルタイム観測と過去の観測データを統合しながら高度なモデリングが構築される。これにより、持続可能なブルーエコノミー市場を支援しながら、気候変動の緩和や適応措置に対する効果的な方法を設計するために役立つシステムとしている。

(<https://www.mercator-ocean.eu/en/digital-twin-ocean/> より)

5.4. デジタルツイン適用や提案コンセプトのまとめ

デジタルツインは現実空間のもの（ものは様々である）とコンピュータ上の仮想空間ものが同時に存在するものであり、仮想空間のものを実現するためのコンピュータ・シミュレーション技術や現実空間の状態をモニタリングするための技術などで支えられる。コンピュータ・シミュレーションはそれをする対象をもつ。その対象として実在する物理的な物や現象があるため、3Dモデルで構築されたシミュレータの精度が向上すれば、その用途に応じて“デジタルツイン”と呼ばれるようである。その目的も様々である。企画・設計や生産・建造工程の効率化や、運用における効率化という表現のものとはどのような内容、分野に対しても適用可能である。すなわち、工業製品の製造工程の管理にも適用できるし、大きな都市を形成していく過程においても適用できるということである。

そのため、デジタルツインは単に“物の状態”の再現だけには終わらず、環境や人の動きの再現までも対象となっている。都市のデジタルツインは物理的な物だけでなく、自然環境の変化や人々の動きまでも対象とする。そういった意味からは、火災の延焼がデジタルツイン化されることに違和感はなくなる。これと合わせれば、人の避難についてのデジタルツインの発想も必然であるといえる。

船舶や海洋構造物の設計や利用のためのデジタルツインを調査してきたが、その応用先は極めて幅が広いことが明らかとなった。

6. 海洋工学分野でのデジタルツイン技術の適用の方向性への提言

構造物や装置単体についての設計、製造・建造、維持管理については、早急にデジタルツイン化を進めて、作業およびコスト効率化を目指すべきである。ここでは、それ以外について、海洋工学分野（構造物を含む）でのデジタルツイン開発を以下に提言する。

6.1. 海洋空間利用デジタルツイン

1) 海洋空間計画デジタルツイン

すでに海洋デジタルツイン構想は出ていることから、日本の EEZ を含めた海域利用計画や管理計画を含めた海洋空間計画のためのデジタルツインの発想は必要である。欧州の例では社会学的情勢を含めるとしている。

2) 洋上風力発電ファームデジタルツイン

風車の機械装置に関するデジタルツインは早々に開発されるべきであるが、ウィンドファーム全体の発電出力の状態や送電状態などの全体システムを対象としたデジタルツインが考えられる。さらには、維持管理のための作業工程と作業のための CTV などの船舶運行状態と人員配置状態まで情報が含まれるとよい。都市のデジタルツインが実現化されるのであれば規模的には問題とすべきではない。

風車すべてのモニタリングができない場合に、数少ない風車の状態と気象・海象情報からファーム内全域の状態を再現できることで、コスト効率化が可能となる。

3) 海底資源開発フィールドでのデジタルツイン

海底鉱物資源開発では、海底の様子は基本的に目視できず、作業状態を正確に把握することが困難である。そこで、掘削装置はもちろん、掘削された周辺の状態までもシミュレートした結果を用いたデジタルツインは有効である。モニタリング技術の開発が重要である。

6.2. 洋上風力発電システムのためのデジタルツイン

洋上風力発電開発を進める上では様々な事項に対してデジタルツイン化が有効であると考えられる。その具体的な項目を提言する。

1) モニタリング技術の高度化とデジタルツイン開発

- 機械装置、構造物の健全度モニタリング技術開発（センシング、データ項目・解像度）
- メンテナンスロボット、ドローン技術開発とそれ自体のデジタルツイン化（土木作業では工事ロボットがすでにデジタルツイン化されている）
- デジタルツインと AI の統合による寿命予測（海外ではすでに行われている技術である）

- これらのための海洋構造物維持管理の DX 技術，それを支える IoT の発展と事例拡大が必須である。

2) 設置作業に特化したデジタルツイン

以下の実現による作業工程・時間・コストの効率化を目指す。

- 構造物の曳航計画，曳航時の状態把握などのためのデジタルツイン
- 海上での組み立てのデジタルツイン
- 陸上組み立て，生産ライン，さらにはサプライチェーンそのものがデジタルツイン化されることで大幅なコスト効率化が期待できる

3) 寿命・撤去判断

デジタルツインが高度化されることで，部品，部材，全体システムそれぞれのレベルでの劣化や耐久性能のオンタイム予測と将来予測が可能となる。撤去時期の効率的な判断に使われるようになる。

6.3. 防災，予防，避難のためのデジタルツイン

海洋構造物や船舶でのリスクには沈没や漂流といったハザードを原因とするものから，そこに至る過程において発生するものなどに分けられる。浮体式構造物と総称すれば，人の安全性に関わるリスクにおいては，その原因とそこから危険が拡大する過程，そしてその状態から人が避難するあるいは危険を回避するといった行動が発生する。すでに，延焼の例に見るようなデジタルツインがあることを考慮すれば，海洋構造物，それが大規模になればなおさらであるが，人の安全に関わる判断過程にデジタルツインが導入されることは将来的な必須事項であると考ええる。また，AI 導入事例も増えていることから，危険回避の判断には AI 導入も検討されることになると思われる。

- 浮体内でのハザード拡大過程のデジタルツイン（リスク評価に直結）
- ハザード拡大と人の避難状態のリアルタイム・シミュレーションを可能としたデジタルツイン
 - 人の動きのモニタリング技術が重要
 - 避難警告だけでなく，誘導するシステム構築が重要

7. おわりに

本委員会では海洋構造物を対象としたデジタルツイン技術やその普及状態などを調べるとともに、日本における今後のデジタルツイン技術の応用例などを議論した。機械製造分野ではすでにデジタルツインが現場レベルで活用されており、それは海外のみならず日本国内においてもそのような状況である。そして、特筆すべきは建設業界におけるデジタルツイン開発状況と適用事例である。設計における 3D-CAD の導入と BIM の導入が早かったことが理由であると思われる。しかしながら、船舶は別としても海洋構造物の設計分野では同様に 3D-CAD+BIM は行われていたことを考えれば、日本国内における海洋構造物の建造例や設置事例の少なさがこの分野におけるデジタルツイン開発や事例がほとんどないことの原因であると思われる。その根拠として、例えば三井海洋開発 (MODEC) は世界に先駆けるように FPSO そして FPSO の運用にデジタルツインを自社開発で導入している。需要が勝る典型的な例だといえる。

設計や生産・建造はその過程の慣例に基づく障害などがあるともいえるが、運用においてもデジタルツインの開発事例が多くなっていることから、単純に物を造ることに対するデジタルツインという固定観念は捨て、もっとソフトな場面での活用方法も検討される必要がある。それは本委員会からも提言したひとつである、避難や危険回避行動のためのデジタルツインである。都市のデジタルツインや陸上での避難シミュレーション技術の向上を考慮すれば、海上に隔離された船舶や浮体式海洋構造物内での避難状態がデジタルツイン化される意味合いは陸上のそれよりも大きいと思われる。

本委員会では今後に向けて、具体的なデジタルツイン開発を進めるための提案はできなかった。それは海洋工学分野を除けばデジタルツイン活用コンセプトや実際の開発のレベルは極めて高いことが明確になったからである。海外においてはさらにそれが進んでいる。すなわちこれは、モニタリング技術や CAE 技術、さらには AI などが極めて高度なレベルで統合される必要があることを意味している。よって、海洋工学分野においては適用先をより具体的に定めながらどのような具体的技術やノウハウを統合していくかを開発企業と協力しながら議論していくべきであると考えられる。

付録

委員会開催記録

令和2年度

第1回

開催日時：令和2年8月31日（月） 16：00～18：00

開催場所：Zoom ミーティングによる WEB 会議方式

第2回

開催日時：令和2年10月20日（火） 16：00～18：30

開催場所：Zoom ミーティングによる WEB 会議方式

第3回

開催日時：令和2年12月15日（火） 10：00～11：45

開催場所：Zoom ミーティングによる WEB 会議方式

令和3年度

第1回

開催日時：令和3年8月17日（火） 16：00～

開催場所：Zoom ミーティングによる WEB 会議方式

第2回

開催日時：令和4年1月25日（火） 13：00～

開催場所：Zoom ミーティングによる WEB 会議方式

第3回

開催日時：令和4年3月2日（水） 15：00～17:30

開催場所：Zoom ミーティングによる WEB 会議方式