

2 海事関連技術のデジタル変革に向けて

岡 正義^{*}, 平方 勝^{**}, 松井 貞興^{***}, 北川 泰士^{*4},
ボンダレンコ オレクシー^{*5}, 黒田麻利子^{*6}, 粉原 直人^{*6},
一ノ瀬康雄^{*7}, 藤沢 純一^{*8}, 谷口 智之^{**},
佐藤 圭二^{*9}, 和中真之介^{*9}

Digital Twin Technology for the Digital Transformation of Maritime Technology

by

OKA Masayoshi, HIRAKATA Masaru, MATSUI Sadaoki, KITAGAWA Yasushi,
BONDARENKO Oksiy, KURODA Mariko, SOGIHARA Naoto, ICHINOSE Yasuo,
FUJISAWA Junichi, TANIGUCHI Tomoyuki, SATO Keiji and WANAKA Shinnosuke

Abstract

In March 2020, the National Maritime Research Institute established four project teams, one of which is the Digital Transformation (DX) team. The mission of this team is the development and social implementation of digital twins, a key technology needed for the digital transformation of the maritime industry. This paper describes the development status of digital twin technology and digital information base technology, which are important for the digital transformation of ships. In addition, we studied research strategies and business models for integrating digital twins.

^{*}構造安全評価系 構造解析研究グループ, ^{**}産業システム系 情報システム研究グループ, ^{***}構造安全評価系 基準開発グループ, ^{*4}流体性能評価系 運動性能研究グループ, ^{*5}環境・動力系 環境エンジン研究グループ, ^{*6}流体設計系 実海域性能研究グループ, ^{*7}流体設計系 流体制御研究グループ, ^{*8}流体設計系 水槽試験技術グループ, ^{*9}知識・データシステム系 知識システム研究グループ

原稿受付 令和2年4月30日

審査日 令和2年6月5日

1. はじめに

海上技術安全研究所では、2020年3月に4つのプロジェクトチーム（PT）が設置され、そのうちの 하나가、デジタルトランスフォーメーション PT である。このプロジェクトチームの任務は、海事関連技術のデジタル変革すなわちデジタルトランスフォーメーションを実現する上でのキーテクノロジーとなるデジタルツイン技術・デジタル情報基盤技術を開発し社会実装に繋げることにある。

今回の研究発表会において、デジタルツイン・デジタル情報基盤技術に関する講演が複数予定されており^{1)~6)}、この研究分野への期待の高さが表れている。本稿では、個別の技術開発要素として、船体のデジタルツイン技術、船用主機のデジタルツイン技術、運航のデジタルツイン技術、船型設計に係わるデジタル基盤技術、船舶建造に係わるデジタル基盤技術に関する取り組みを紹介するとともに、将来の統合型デジタルツインを見据えた研究戦略及びビジネスモデルについて考察する。

2. デジタルツイン技術

デジタルツインは、実空間にある物体を、センサ計測や数値シミュレーションを用いてサイバー空間上に精緻に再現したものである。これを活用することで将来の故障や変化の予測も可能となり、船舶の分野では、機関の故障予知や燃費の評価、安全運航支援への活用が、また特に造船分野では、短期間での設計・生産システムへの活用が期待されている。ここでは、当所で開発し、社会実装を実現或いは目指す個別のデジタルツイン技術について解説する。

2. 1 船体のデジタルツイン技術

船体のデジタルツインにイメージするのはまず、船の疲労損傷や腐食衰耗の度合いを高精度に推定する機能と思われる。船体の健全性を正確に知り、将来予測することは、メンテナンスの合理化や売船価格の適正化に繋がるため、この機能への期待は高いと考えられる。そのためには、大規模かつ複雑な構造体である船の健全性を、限られた計測データから推定する技術が必要になる。

船の安全運航の観点からは、船体に作用する外力（荷重）と船体を持つ耐力（強度）の大小関係で決まる状態量評価の機能が必要になる。加えて、荒天を予測して危険な状態を回避するための運航支援の機能、万が一、危険な状態に陥っても安全にやり過ごすための操船支援の機能が必要になる。これらの機能は折損事故や損傷による油流出といった社会リスクの回避に繋がることから、中立機関が中心となって取り組んでいる⁷⁾。

また、デジタルツインで蓄積されたビッグデータを分析することによって船体設計上の不確定要素が徐々に分かるようになり、確率論に基づく船体設計や新しい設計規則の開発

に繋がると期待される。

当所では、開発済み或いは開発中のハルモニタリングや数値シミュレーション技術を活用して、上記の機能要件を満足した船体構造デジタルツインシステムの社会実装を目標に研究を行っている³⁾。

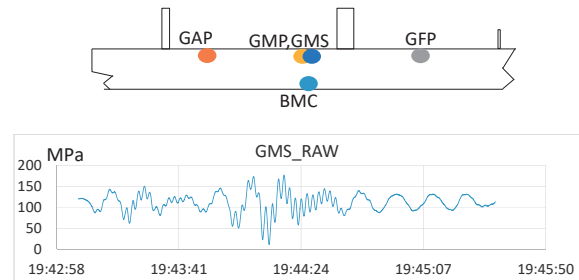


図-1 14000TEU 型コンテナ船のハルモニタリング
(上：応力センサ配置，下：計測応力波形の例)

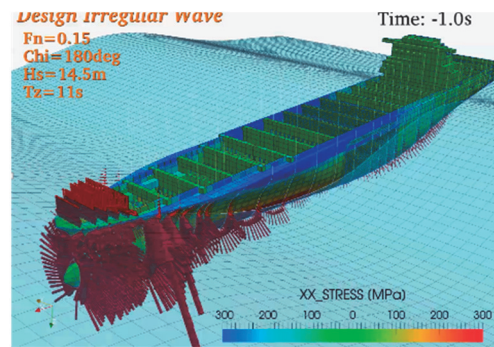


図-2 船体応答評価のための数値シミュレーション技術
(DLA※の解析事例；ベクトル：水圧，コンター：応力)
※ Direct Load and Strength Analysis system

2. 2 船用主機のデジタルツイン技術

船用主機デジタルツインの実現により船用主機の運用及び保守管理は従来よりも先進的なものとなる。一方、船用主機デジタルツインやその活用に関する技術開発は国際的に進められており、既に民間各社による競争がスタートしている。例えば、WinGD は船用主機のデータ収集と主機状態見える化及び異常診断システムを備えた WiDE (WinGD Integral Digital Expert) システムを提案している⁸⁾。

当所においても船用主機デジタルツインに関する研究開発を進めており、一部は外部機関と連携して実証研究等の取り組みを行っている。当研究におけるポイントは主機特性のデジタル空間上の表現方法である。具体的には、波浪中負荷変動による主機応答も含めてリアルタイムで計算することを目的に、Cycle Mean Value 方式の主機特性数学モデルを適用している。そして、CMV モデルとカルマンフィルタを組み合わせ、実機の限定された計測情報から主機特性数学モデル上の全ての主機状態変数を精度よく計算できる主機状態

オブザーバーを開発した。このオブザーバーを活用することで、モデル計算を活用した主機状態モニタリングが可能となり、実計測データを用いてモデル内係数を適切なタイミングでアップデートすれば、船舶主機デジタルツインによる主機状態モニタリングとして先進的な保守管理等に展開できる。これらの研究開発成果については、実運航データを用いた主機特性数学モデル内の係数同定に関する取り組みや主機異常検知手法の技術開発も含め、別の講演及び論文⁴⁾にて解説しているため詳細は其方を参照願う。

2.3 運航のデジタルツイン技術

運航のデジタルツイン技術として、ウェザールーティングシステムの技術開発を行っている。従来、ウェザールーティングシステムとしては、船会社や船舶運航会社向けのサービスとして気象予報会社等が展開してきたものが存在している。これらは、海象に対する船舶の性能を統計的に予測し、目的に応じた最適ルートを探索するというものが主である。

当所では、物理モデルをベースとした海象適応航法(WAN: Weather Adaptive Navigation)⁹⁾、高精度な船舶の実運航性能推定のため実運航性能シミュレータ VESTA(Vessel Performance Evaluation Tool in Actual Seas)を開発している¹⁰⁾。VESTAは、実海域で船舶に作用する外力を物理モデルにより推定し、主機作動制限および主機調速機（ガバナー）制御を考慮して船速低下や燃料消費量増加量を算定するプログラムである。外力推定機能については、水槽試験、風洞試験との比較により精度よく算定できることが確認されており¹¹⁾、また、実運航シミュレーションについても、実船計測データにより精度検証されている¹²⁾。そこで、従来の統計モデルに代わり、精度およびロバスト性を高めるため、VESTA モデルの計算機能を組み込み、実船計測データを利用したウェザールーティングシステムの開発を進めている¹³⁾。

ウェザールーティングシステムの開発には、1) 実船計測データのリアルタイム取得、2) VESTA 機能の組み込み、3) VESTA 計算実行のための入力データ作成機能の組み込みが必要となる。1) のデータおよび対象船の基本的な情報から 3) を実施し、2) で組み込んだ機能を実行し、船速や燃料消費量を予測する。

正確な実運航性能シミュレーションを実施するためには、本船の平水中性能が重要となる。当所では、実船計測データから、平水中性能を導出するプログラム EAGLE(Evaluation Assistant with a Goal of Low Emission from shipping)を開発している¹⁴⁾。サービス開始時の実船データが存在していない段階では、同船種の類似船データなどから推定される平水中性能を用いて VESTA の計算を実施することになるが、EAGLE の機能も組み込むことにより、実船計測データによる本船ごとの平水中性能を用いた計算が可能となり、また、データの蓄積により随時精度を高めることができる。

開発中のウェザールーティングシステムについて、実船適用による検証例を図-4 に示す¹³⁾。これは、自動車運搬船を対象に、VESTA 搭載モデルと統計モデルのウェザールーティ

ングシステムによる燃料消費量を計算し、実船計測結果との差をパーセントで示したものである。VESTA model 及び statistical model はそれぞれ 1 時間ごとに計測される実船計測データを元に VESTA 搭載モデル、統計モデルで評価した結果であり、conventional model は Noon Report を元に統計モデルで評価した結果である。運航は VESTA 搭載モデルによる結果に基づいて行われた。

図-4 は計算方法の違いに起因する差と、それぞれの計算に基づき推奨される航路での燃料消費量の差を含んでいるが、VESTA 搭載モデルを用いると統計モデルに比べて 5% の燃料消費量削減につながることが確認された。

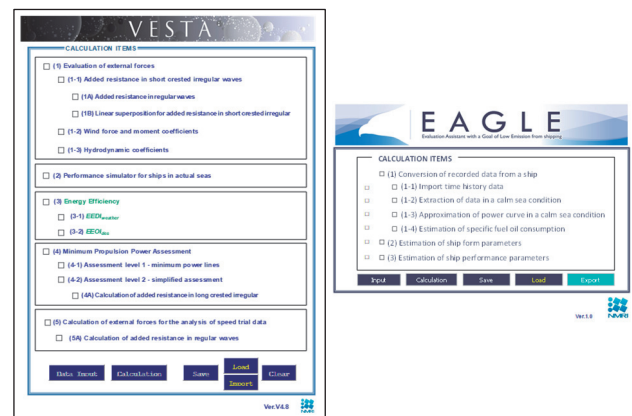


図-3 プログラム（左:VESTA、右:EAGLE）

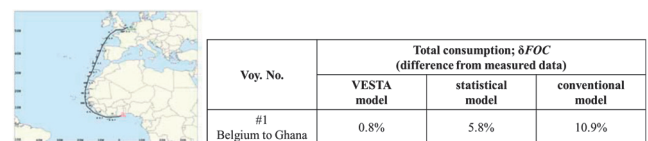


図-4 ウェザールーティングシステム検証例

（左：検証ルート、右：燃料消費量の比較）

2.4 船型設計に係わるデジタル基盤技術

船型設計に係わる基盤技術として、当所ではこれまで水槽試験技術およびシミュレーション技術の高度化に取り組み、これらの技術は造船所をはじめとした海事業界で幅広く活用されてきた。現在デジタル技術を船型設計に応用する手法として、当所では水槽試験のロボット化、計測データのデータベース化と数値解析結果のデータ融合ならびにデータベース解析技術を応用した設計手法の開発を進めている。

水槽試験のロボット化とは、完全自律計測、多機能流場計測の実現とそのデータベース化を目指すものである。当所では令和元年度に 400m 水槽および中水槽において自動運転・計測システムを整備し現在不確かさ評価等による実用化に向けた検証を進めており、今後も高精度な実海域実船性能計測・解析評価に必要な多機能流場計測システムを有するスーパー400m 水槽の実現に向けた取り組みを推進していく予定である。

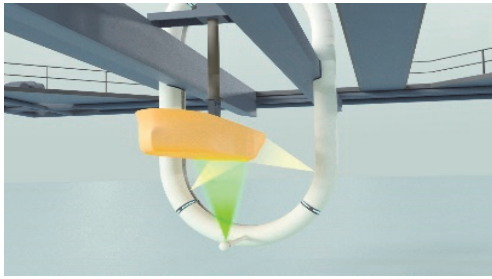


図-5 多機能流場計測システムのイメージ

スーパー400m水槽で計測された船型・流場データベースの設計応用として、当所ではAI技術（機械学習）を応用した船型設計システムの開発¹⁵⁾¹⁶⁾をしている。

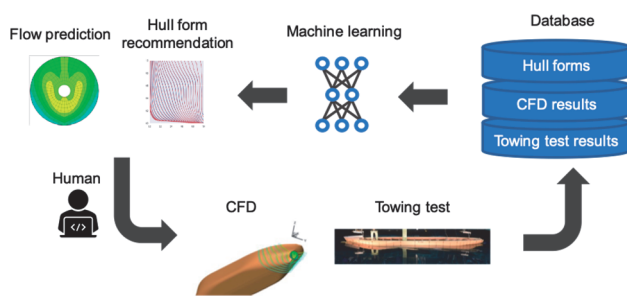


図-6 機械学習の船型設計への応用

その一例として当所では省エネ付加物と船体との干渉を考慮した船型設計を実現する伴流設計システムを開発した¹⁷⁾。伴流設計システムは数値計算を基にした船型・流場データベースを機械学習手法で解析することにより、理想的な流場に合致する船型形状を求める所謂逆問題を解くことを可能にしたシステムであり、従来ベテラン技術者の経験知により実現していた伴流設計を系統的に実現することを可能にした。

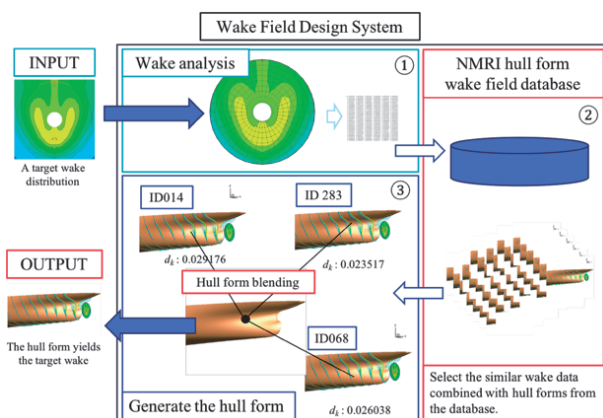


図-7 伴流設計システム

今後、数値解析結果と水槽データベースを融合した船型データベースを構築することで、優秀船型を短期間で設計でき

る船型設計システムの開発に取り組む。

2. 5 船舶建造に係わるデジタル基盤技術¹⁸⁾

我が国の造船業を取り巻く環境は、以前に増して、非常に厳しい状態が続いており、造船業の安定した経営基盤の確立と国際競争力強化は喫緊の課題である。国土交通省においても、海事クラスターや付加価値領域の変化など、我が国造船・船用工業が向かうべき将来像について、「海事産業将来像検討会」で議論を行ってきた。当所は、このような産官学が一体となった海事産業の将来像に関する議論の流れを踏まえ、「次世代造船設計システム研究会（以下、研究会という）」を設置した。研究会では、デジタル化などの技術革新の動きを踏まえて、今後の我が国造船業の生産性向上にむけて、以下に示す二つの提言をまとめた。

一つ目は、設計の長期化、設計コストアップを抑えるため、例えばアライアンスを組んで開発・設計、営業・引き合い、調達、建造を行い、様々な段階において、リソースを集約する。アライアンスの効果を発揮するために、船舶の設計・建造に必要なデータ構造の標準化・データ連携基盤を確立することが求められる。

二つ目は、初期段階における精緻、最適な生産計画、コスト算出のために建造シミュレーションによる計画(Plan)を行えるようにすること、さらに、建造工程のモニタリングによる管理に加え、分析、評価・シミュレーションモデルの改善等をCyber空間とPhysical空間のツインを構成し、工程管理の徹底によって手戻りを低減し、コストアップを回避することを目指す工場デジタルツインを確立することである。

これらを実現するには、産官学が一体となった取り組みが必要である。また、他産業の動向も参考に必要がある。特に、建築業界においては、BIM (Building Information Modeling)を推進している。BIMは、コンピュータ上に作成した主に3次元の形状情報に加え、室等の名称・面積、材料・部材の仕様・性能等属性情報を併せ持つ建物情報モデルを構築するシステムであり、設計から施工、維持管理のプロセスの標準化・共通化に向かっている。建築業界におけるデータ構造の標準化、コード体系化にあたって、システムベンダーも参加する標準化検討会議の活動も参考になると考える。

標準化・データ連携基盤の整備に関連して、造船BOM (Bills of Materials)を構築することも課題と考える。BOMを整備することによって、艤装品の手配等効率化が進むなど、造船業界のアライアンスだけでなく、調達品等を製作する関連産業との連携が円滑になることが期待できる。これにより、造船会社に納品される大量の舶用品の納期を管理し、生産効率の改善につながると期待する。

現在、デジタルイゼーション、デジタルツイン、デジタルトランスフォーメーションといったデジタル基盤技術に期待が寄せられている。当所は、我が国造船業の国際競争力強化に向けて、デジタル基盤技術を活用した次世代造船所の実現に貢献していく。

3. 統合型デジタルツイン

前章では、個別のデジタルツインについて説明をした。本章では、これらを統合した統合型デジタルツインについて、統合の必要性と統合によって得られるシナジー効果を、具体例を交えて説明する。また、海事産業のデジタルトランスフォーメーションを実現するための戦略とビジネスモデルについて考察する。

3.1 統合型デジタルツインのニーズとシナジー効果

本 PT は、前章で示した個別のデジタルツインが抱える開発課題やニーズを共有して互いの成果の向上を図ると同時に、これらを統合した統合型デジタルツインの開発を目標に掲げている。ここでは統合型デジタルツインの例を示す。図-8 は、2.1 節の船体デジタルツインの一環として作成した遭遇海象の GUI である。図-8 は船舶の衛星 AIS データを基に、複数の船舶が嵐（図-8 の赤色のエリア）を回避する様子や遭遇した船の状況を事後解析で表している。この情報がリアルタイムで得られるようになれば、自船及び周囲の他船が遭遇している海象を元に、安全操船支援ができるようになる¹⁹⁾。しかし、船長判断は安全性だけでは決まらず、船の置かれた事情を総合的に勘案している。一方、2.3 節で説明したウェザールーティングでは、燃料消費を最小にする最適航路を指示するが、船体や機器へのダメージを含む耐航性の観点で十分安全かどうかは考慮されておらず、船長の判断に委ねられているのが実情である。運航デジタルツインシステムに、船体デジタルツインの安全支援機能を Add-on することによって、安全安心な運航への支援ができ、統合化のシナジー効果が期待できる。

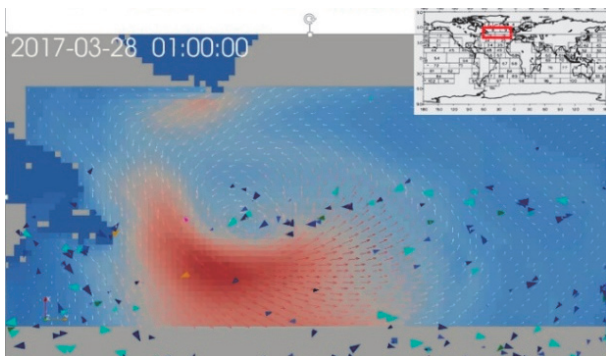


図-8 遭遇海象 GUI（北大西洋のコンテナ船の例）

3.2 デジタルトランスフォーメーションを実現するための戦略とビジネスモデルの検討方法

これまで紹介したデジタルツイン技術の社会実装を実現するためには、導入によって生まれる価値を明示した戦略が必要となる。図-9 に構造デジタルツインを例としたデジタルツイン技術導入による効果の因果関係モデル(Causal Loop Diagram)²⁰⁾を示す。この図は、モニタリングシステムを活用した構造デジタルツインを用いて、遭遇海象、船体のコンデ

ィションを正確に把握した安全評価を組み入れ、設計波高と安全率の合理化を行うことで、船舶運航の可用性(Availability)を下げることなく、建造コスト (CAPEX : Capital Expenditure) を中心としたコスト低減が可能となることを示している。このように、技術導入による効果のモデルを作成し、シミュレーションによる数値計算を行うことによって、その効果を定量的に評価することができる。

図-9 のモデルをベースにして、以下の通りモデルを仮定し、日本-オーストラリア間を航行する鉄鉱石運搬船を対象に、定量的に評価を行った。

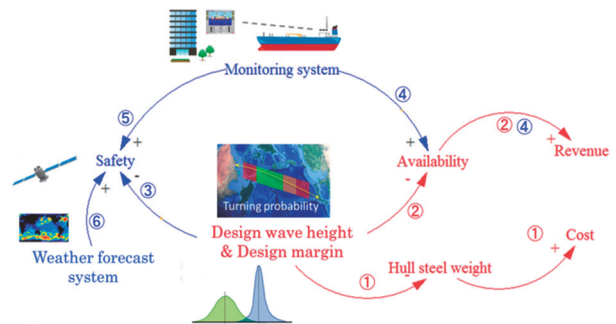
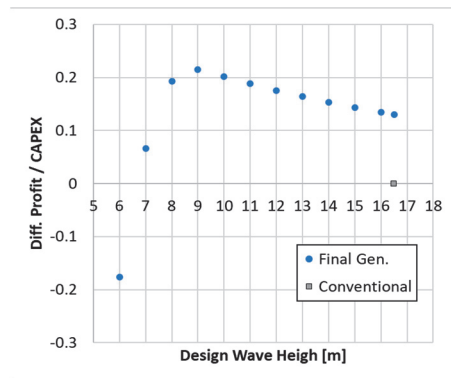


図-9 構造デジタルツイン導入による効果の因果関係モデル

- ① 設計波高と船体縦曲げ強度は線形の関係
- ② 設計波高を超える海象に遭遇した際には迂回し、その海域を2倍の距離で航行
- ③ 船体 DT により設計マージンを最大 10%削減
- ④ 船体 DT によりオンデマンドで検査が可能となり、初回の検査をスキップ
- ⑤ 船体重量減少による燃費削減効果は排水量比の 2/3 乗比

計算結果を図-10 に示す。横軸は設計波高を、縦軸は従来ケースでの利益から船体 DT を入れたケースでの利益を減じて、CAPEX で除した値を示している。利益は、運賃収入 (Revenue) からコスト (CAPEX+OPEX) を減じたものである。四角が従来のケース、丸が船体 DT を採用して、十分に実績データを収集し、設計マージンを 10%削減できているケースである。評価の結果、従来の設計波高であっても、設計マージンを十分小さくすることにより、CAPEX に対して 10%以上の利益を獲得できることが分かり、さらに、特定の航路に対し、適切に設計波高を合理化することでさらに利益が増すことが分かった。一方で、設計波高が 9m を下回ったところから収入が大きく下がっている。この要因としては、設計波高を超過する海象に遭遇する確率が急増し、船の稼働率が下がり、運賃収入が著しく低下することがあげられる。



図－10 構造デジタルツインによるコスト低減の定量評価

このような導入効果のモデル化とそのシミュレーションは、それぞれのデジタルツイン技術を社会技術システムの一部として設計する際に重要となる。本節では船体 DT の導入によるビジネスモデルの検討を示したが、今後、個別の DT 技術を統合したシステムについても、コンセプトを明確化し、その効果を定量的に示すことで、社会実装に向けた意思決定を加速させることが可能となる。

4. おわりに

海事関連技術のデジタル変革を実現する上でキーテクノロジーとなるデジタルツイン技術・デジタル情報基盤技術の開発状況と社会実装に向けた取り組みを紹介し、統合型デジタルツインを見据えた研究戦略とビジネスモデルについて考察した。本 PT での活動を通じて、個別のデジタルツインの開発で経験した課題や新たなニーズ等の情報を共有して、研究に活かすことによって、個別デジタルツインの技術確立と社会実装の加速、並びに統合型デジタルツインの開発の実現に繋げる。

参考文献

- 1) 粉原直人, 黒田麻利子, 櫻田顕子, 横田早織, 辻本勝: 海技研が提供する船舶の実海域性能に対するソリューション, 海上技術安全研究所報告, 第 20 巻別冊(2020)
- 2) 黒田麻利子, 杉本義彦, 粉原直人, 佐藤秀彦, 久米健一, 折原秀夫, 辻本勝: OCTARVIA プロジェクトによる実海域実船性能評価と性能向上への寄与, 海上技術安全研究所報告, 第 20 巻別冊(2020)
- 3) 岡正義, 松井貞興, 馬沖, 小森山祐輔: 船体構造デジタルツインの早期実現に向けた研究開発, 海上技術安全研究所報告, 第 20 巻別冊(2020)
- 4) 北川泰士, ボンダレンコ オレクシー, 福田哲吾, 他: 船用主機デジタルツインに関する研究開発と技術的課題, 海上技術安全研究所報告, 第 20 巻別冊(2020)
- 5) 平方勝, 松尾公平, 谷口智之, 竹澤正仁: 次世代造船システムの構想, 海上技術安全研究所報告, 第 20 巻別冊(2020)
- 6) 佐藤圭二, 一ノ瀬康雄, 和中真之介: 海技研クラウドの紹介と展望, 海上技術安全研究所報告, 第 20 巻別冊(2020)
- 7) 岡正義: 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～, 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 Phase-1 研究開発報告—, (一財) 日本船舶技術研究協会(2020.2)

8) WinG: WiDE WinGD Integrated Digital Expert, https://www.wingd.com/getattachment/Digital-Solutions/WiDE/WiDE_Brochure_8pp_FINAL.pdf?lang=en-GB.

9) 辻本勝, 谷澤克治: 実海域性能を考慮した航海計画システムの開発—気象海象の予測精度が航海計画に与える影響—, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 2 号(2005), pp. 75-83.

10) 辻本勝, 粉原直人, 黒田麻利子, 櫻田顕子: 実運航性能シミュレータ VESTA, 海上技術安全研究所報告, 第 15 巻第 4 号 (2015), pp. 55-65.

11) ITTC: Specialist Committee on Performance of Ships in Service Final Report and Recommendations to the 27th ITTC, Proc. of 27th Conference, Volume II (2014), pp.585-638.

12) M. Tsujimoto, N. Sogihara, M. Kuroda and A. Sakurada: Development of a Ship Performance Simulator in Actual Seas, Proc. of OMAE2015, OMAE2015-41708 (2015) .

13) M. Tsujimoto, N. Sogihara, K. Hirayama, Y. Sugimoto, K. Hasegawa and K. Yokokawa: Advanced Weather Routing System for Ships in Actual Seas -Development and Validation by a Ship-, Proc. Of The 16th IAIN World Congress 2018.

14) 粉原直人, 黒田麻利子, 櫻田顕子, 横田早織, 辻本勝: 実船モニタリングデータ解析のための船体形状・船体性能推定プログラム EAGLE の開発, 第 19 回海技研研究発表会 (2019)

15) Y. Ichinose, T. Taniguchi: A Fast Stern Wake Prediction Method Utilizing Convolutional Neural Network, Proc. of OMAE2020-18339(2020)

16) T. Taniguchi, Y. Ichinose: Hull form design support tool based on machine learning, Proc. of Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries (2020)

17) Y. Ichinose, Y. Tahara: A wake field design system utilizing a database analysis to enhance the performance of energy saving devices and propeller, Journal of Marine Science and Technology, vol.24 (2019), pp.1119-1133

18) 平方勝: 次世代の造船設計システム構想, 日本船舶海洋工学会東部支部ワークショップ『AI/IoT を活用した設計・生産技術』, (2020) (予定)

19) 岡正義, 高見朋希, 馬沖: AIS データに基づく実運航船の波浪荷重推定 —最大荷重に対する操船影響の評価法—, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 28 号 (2018), pp. 89 -97.

20) 佐藤圭二, 小早川広明, 渡部享尚, Marc Andre Macdonald, 稗方和夫, Bryan Moser: 船舶設計へのシステムズアプローチの活用に関する研究, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 27 号 (2018), pp. 109-113.