

## 12 船体構造デジタルツインシステムの開発と 水槽試験による検証

小森山 祐輔\*, 三上 航平\*\*, 宝谷 英貴\*\*, 陳 曦\*, 馬 沖\*,  
辰巳 晃\*\*\*, 村山 英晶\*\*, 岡 正義\*

### Development of Ship Structure Digital Twin System and Verification by Towing Tank Test

by

KOMORIYAMA Yusuke, MIKAMI Kohei, HOUTANI Hidetaka, CHEN Xi, MA Chong,  
TATSUMI Akira, MURAYAMA Hideaki and OKA Masayoshi

#### Abstract

We developed a ship structure digital twin (DT) system. The DT system contains data measurement, data assimilation, and data visualization functions. The strain of the whole hull can be inversely estimated from the measured hull response by using the data assimilation, which is the core technology of DT. The DT system enables real-time monitoring of strain of the whole hull, and is expected to be utilized for safe ship operation. In this study, we developed and verified this system, and investigated the estimation accuracy of iFEM, Kalman filter, and wave spectral method, which are data assimilation methods, through towing tank tests. To develop the DT system by integrating the three functions (data measurement, data assimilation, and data visualization), we developed an integrated structural analysis system (i-SAS), an open platform which integrates multiple programs. Towing tank tests were carried out to compare and evaluate the data assimilation methods and the DT system. A ship model made of GFRP sandwich panels was used in the tests to measure hull strain. We verified that the data assimilation methods are sufficiently accurate for estimating the non-measured strain of the ship model, and the DT system is effective for visualizing the measurement data and inversely analyzed data in real-time.

---

\* 構造・産業システム系, \*\* 東京大学大学院, \*\*\* 大阪大学大学院

原稿受付 令和 4年5月13日

審査日 令和 4年5月23日

### 1. 緒言

近年、計算機能力と計測技術の発展が進み、様々な分野でこれらを融合したデジタルツインに関する研究・開発が実施されている。船体構造の分野では、2018年度～2021年度の4年間に（公財）日本財団の助成のもと（一財）日本船舶技術研究協会で「超高精度船体構造デジタルツインの研究開発」が実施された<sup>1)</sup>。航行中の船体の安全性を把握するため、以前からハルモニタリングシステムによる船体ひずみの計測が行われている<sup>例えば2)</sup>。しかし、限られた計測点のひずみだけから船体全体の健全性を評価することは困難である。そこで、データ同化手法により計測値と数値シミュレーションを組み合わせることで、船体全体のひずみ等の状態を仮想空間上に再現する、船体構造デジタルツイン（DT: Digital Twin）システムの研究・開発が上記プロジェクトで行われた。本講演論文では、DTの基盤技術であるデータ同化手法（逆有限要素法(iFEM)<sup>3)</sup>、カルマンフィルタ法(KF法)<sup>4)</sup>、波スペクトル法<sup>5)</sup>）と、計測・データ同化・可視化のプログラムを統合したDTシステムを実現するために開発したオープンプラットフォーム（i-SAS<sup>6)</sup>: integrated Structural Analysis System）の概要について説明する。そして、データ同化手法およびDTシステムの検証のために、海上技術安全研究所の実海域再現水槽にて実施した水槽試験による検証について説明する。なお、本講演論文は、著者らの論文<sup>6,7,8)</sup>を本講演会用に再構成したものである。

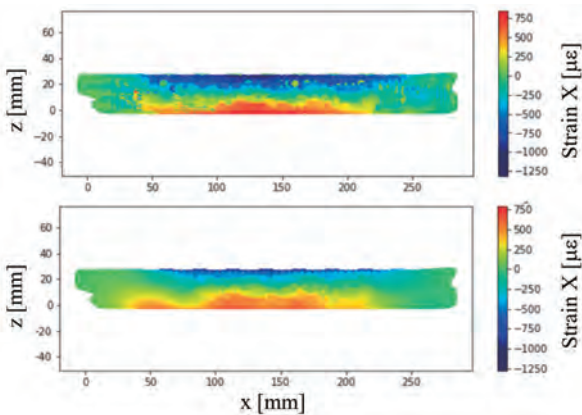


図-1 波浪中の船体のひずみ、(上図)FEM解析結果、(下図)30点のひずみデータを用いた iFEM 解析結果

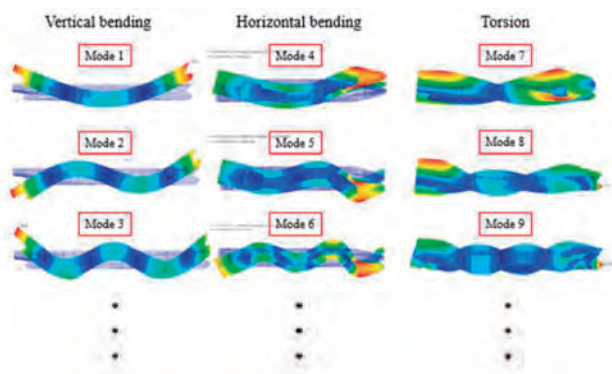


図-2 KF法に用いる固有モードの一例

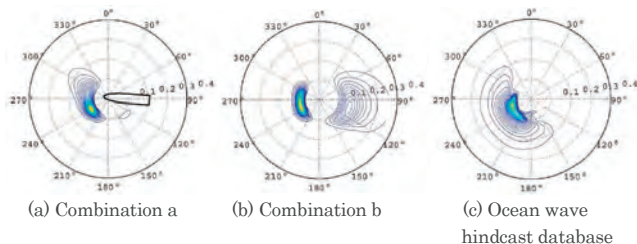


図-3 波スペクトル法により推定された方向波スペクトルの一例<sup>5)</sup>

表-1 波スペクトル法に使用した応力データの組合せ<sup>5)</sup>

	Measured responses component 1	Measured response component 2	Measured response component 3
Combination a	SCDLS	ACDLS	DBBS
Combination b	SCDLS	ACDLS	BLS

SCDLS: symmetric component of the deck longitudinal stress  
 ACDLS: antisymmetric component of the deck longitudinal stress  
 DBBS: double bottom bending stress  
 BLS: broadside longitudinal stress

### 2. データ同化手法

2章では、DTの基盤技術であるデータ同化手法（iFEM<sup>3)</sup>、KF法<sup>4)</sup>、波スペクトル法<sup>5)</sup>）について説明する。

#### 2.1 逆有限要素法 (iFEM)<sup>3)</sup>

逆有限要素法 (iFEM: inverse Finite Element Method) では、FEモデルより得られるひずみ・節点変位関係と、計測されたひずみを用いて、モデル全体の節点変位を推定する。さらに得られた節点変位より、ひずみ・節点変位関係を用いて、モデル全体のひずみ及び応力を推定できる。これを各時間ステップで実施することで、非計測箇所を含めたモデル全体のひずみ・応力の時刻歴を得ることができる。

例として図-1に数値シミュレーションによる双子実験の結果を示しており、約8000要素の船体ひずみと変形量を、30点のひずみ情報を用いて推定した結果である<sup>9)</sup>。なお、iFEMに使用するセンサの密度を減らすと、変位を小さく見積もる傾向が見られた。

#### 2.2 カルマンフィルタ法 (KF法)<sup>4)</sup>

カルマンフィルタ法(KF法)では、剛体・弾性モードを含む運動方程式から得られる状態方程式と、観測値をひずみとしてFEMによるモード解析から得られるひずみの固有ベクトルより構成された観測方程式を基に、高周波の振動応答を含め非計測箇所を含む船体全体のひずみをリアルタイムに推定できる。船体の固有モードとしては、図-2に示すような船体の主要な変形モードである縦曲げ・水平曲げ・振り変形モード等を採用し、これら固有モードの重ね合わせで変形を表現する。なお、固有モードに局部変形が含まれない場合、局部変形が生じるボトム部の推定精度に改善余地がある<sup>4)</sup>。

#### 2.3 波スペクトル法<sup>5)</sup>

波スペクトル法では、方向波スペクトルに応答関数を掛けて得られる応答スペクトルと、応答の計測値から得られる応答スペクトルの差が2乗最小になるような方向波スペクトルを、遺伝的アルゴリズムと修正Powell法を用いて推定する。

得られた方向波スペクトルに、任意の応答関数を掛けることで、任意の応答スペクトルを求めることができ、短期海象における応答の統計的性質（最大期待値、有義値、疲労被害度等）を算出できる。例として図-3に実船モニタリングデータを対象に波スペクトル法により方向波スペクトルを求めた結果を示す<sup>9)</sup>。図-3のCombination a, Combination bは表-1に示す通り、応力データの組合せが異なる波スペクトル法の逆推定結果である。

波スペクトル法の機能をハルモニタリングシステムに付与することによって、船体全域の応力状態に加えて、波浪及び波浪荷重の情報を得ることができ、システムの付加価値を高めることができる。

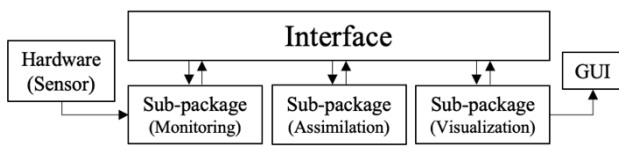


図-4 i-SASによるDTシステムの構成の一例

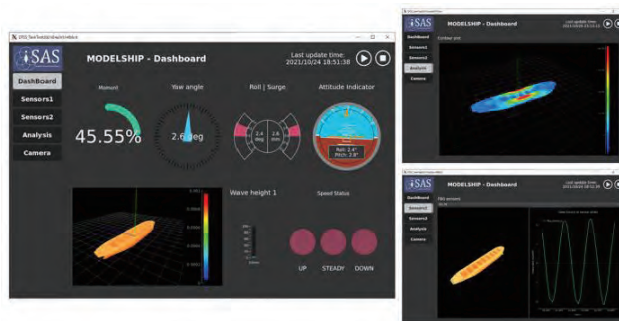


図-5 i-SASによるDTシステムのGUIの一例

### 3. オープンプラットフォーム i-SAS

2章で説明したデータ同化手法を用いてDTシステムを実現するためには、計測・データ同化・可視化のプログラムを統合する必要がある。そこで、複数のプログラムを統合して使用できるオープンプラットフォームとしてi-SASを開発した<sup>9)</sup>。i-SASはソフトウェア開発プラットフォームGitHubのi-SAS Organizationに属するリポジトリとして開発した。データの計測から可視化までの構成の概略図を図-4に示す。各開発者はSub-packageを実装することで、Interface上で他のSub-packageと接続することができる。また、生成されたデータは共通のデータ形式でDBに管理されるので、データの受け渡しなどは意識することなく計測から可視化まで一貫したDTシステムを構築することができる。i-SASのGUIの一例を図-5に示す。

### 4. 弾性模型船を用いた水槽試験

データ同化手法およびDTシステムを検証するために、水槽試験<sup>7)</sup>を実施した。以下に弾性模型船、計測項目、試験条件について記載する。

#### 4.1 GFRP サンドイッチパネル製弾性模型

水槽試験ではひずみを計測できるように弾性模型船を用いた。弾性模型船は以下の3つの要件を満たすように設計・製作を行った<sup>7)</sup>。

- (1) 船型相似性：既存の実船を縮尺した船型
- (2) ひずみの直接計測性：船殻に設置したひずみセンサにより、船殻に生じるひずみを直接計測することが可能
- (3) 局所変形の相似性：ハルガーダーとしての全体変形と、バルクヘッド間（ホールド内）の船底の局所変形の大きさが実船と相似である

(1)は、DTシステムを将来的に実船に適用することを考慮した要件である。本研究では、バルクキャリア船型（以下、海技研BC）を対象とする。模型船の主要目は表-2の通りである。

表-2 対象船の主要目

	full-scale	model
Length ( $L_{04}$ )	288.0 m	4.000 m
Breadth ( $B$ )	45.00 m	0.6250 m
Depth ( $D$ )	24.00 m	0.3264 m
Draft ( $d$ )	17.70 m	0.2458 m

(2)は、実船のハルモニタリングシステムで計測される船殻のひずみをDTシステムで利用することを考慮した要件である。この要件を満たすためには船殻自体が変形する一体型模型が候補となる。しかし、ウレタンのように柔らかすぎる素材を用いると、ひずみセンサの方が固くなり、センサ出力が実値より小さくなってしまいうため<sup>10)</sup>、ひずみ計測精度の面で懸念がある。

(3)は、近年の研究で、静的な二重底の局所変形が最終強度の低下を招くこと<sup>11)</sup>や、動的な全体変形が二重底の変形を誘起すること<sup>12)</sup>が明らかにされてきており、最終強度の観点からその影響が注目されている。応力の絶対量を評価する上でこのような局所変形の影響は必ずしも無視できない。そのため、データ同化手法を検証する上で局所変形も含むひずみが水槽実験でも計測されるべきであると考えた。

また、本研究の目的であるデータ同化手法の検証は、出会い波浪周期でのひずみ変動を取得できれば実施可能であり、必ずしも模型船の固有振動モードを実船と相似とする必要は無い。そのため、剛性の相似性は模型船が満たすべき要件には含めないこととした。

設計の詳細は文献<sup>7)</sup>に譲るが、結果として、図-6に示すようにGFRP板0.5mm、ウレタン30mmで構成されるサンドイッチパネルで弾性模型船（図-7）を製作した。また図-8のような弾性模型船のFEモデルを構築し、各データ同化手法で利用した。また、DLSA<sup>13)</sup>（図-9）を用いて弾性模型船の荷重構造一貫解析を行い、波スペクトル法に必要なRAOを計算した。



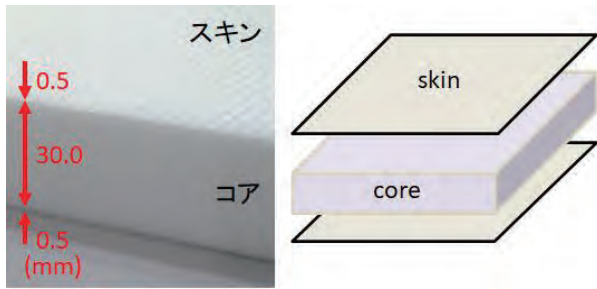


図-6 GFRP サンドイッチパネル

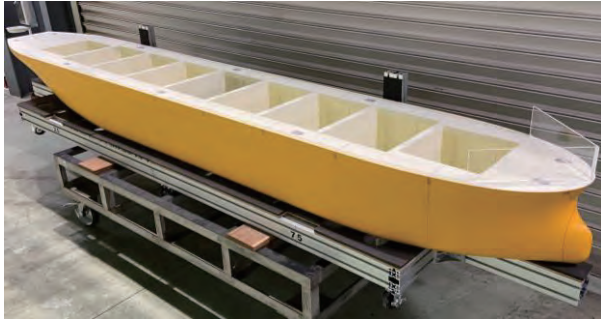
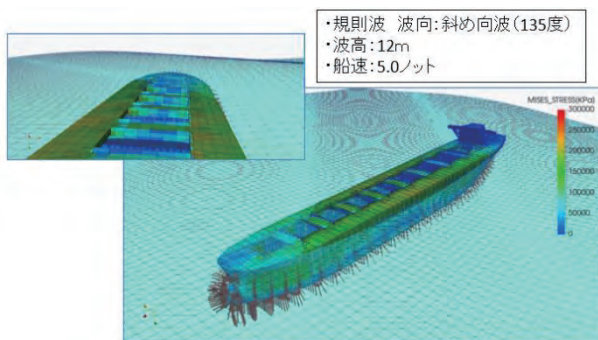


図-7 GFRP サンドイッチパネル製弾性模型船



図-8 弾性模型船のFEモデル

図-9 DLSAによるシミュレーションの一例  
(コンター：応力，ベクトル：水圧)

#### 4.2 計測項目

計測項目を表-3に示す。特徴としては、FBGセンサを利用することで、船体ひずみと船体表面水圧を多点で計測している点である。

表-3 計測項目

計測項目	センサ
ひずみ	FBG ひずみセンサ (141点)
水圧	FBG 圧力センサ (150点)
加速度	3軸センサ (Fabry-Pérot) 3点, 1軸センサ (FBG) 3点
6自由度運動	ポテンショメータ
出会い水位	容量式波高計 (船首/船側/船体 中央から約3.5mの位置)
映像	ビデオカメラ

#### 4.3 試験条件

水槽試験は、海上技術安全研究所が有する実海域再現水槽にて実施した。本水槽の全周には382枚の造波板が設置されており、実海域のような短波頂不規則波を造波できる。本試験では、1方向の長波頂規則波、長波頂不規則波、短波頂不規則波、2方向の長波頂不規則波、短波頂不規則波を造波し曳航試験を実施した。本講演論文では、表-4に示すような①規則波中曳航試験、②2方向短波頂不規則波中曳航試験の2ケースを対象に、各データ同化手法およびDTシステムの検証について説明する。

表-4 試験条件

	①規則波	②多方向不規則波	
		波(1)	波(2)
波高・有義波高	6.94 cm (実船 5 m)	4.17 cm (実船 3m)	2.78 cm (実船 2 m)
波周期・平均波周期	1.57 s ( $\lambda/L_{pp}=1$ )	1.41 s ( $\lambda/L_{pp}=0.8$ )	0.94 s ( $\lambda/L_{pp}=0.35$ )
出会い波向き	180 deg. (正面向波)	180 deg. (正面向波)	300 deg. (斜追波)
船速	0.303 m/s (実船 5 knot)	0.303 m/s (実船 5 knot)	

#### 5. データ同化手法とDTシステムの検証

4章で説明した水槽試験の結果を用いてデータ同化手法およびDTシステムの検証を実施した。

##### 5.1 データ同化手法 (iFEM, KF法) の検証

図-10に示す位置のひずみの計測データを用いて、iFEMとKF法で推定したひずみの時系列を図-11, 12に示す。図-11は規則波中曳航試験の結果であり、図-12は不規則波中曳航試験の結果である。また、図中には推定した位置で計測したひずみ、つまりデータ同化に使用していないひずみの時系列も載せている。図-11, 12より、iFEMとKF法によりデータ同化に使用していない箇所のひずみの時系列を良い精度で推定可能であることが検証できた。

### 5.2 データ同化手法（波スペクトル法）の検証

180deg.および 300deg.の2方向の短波長不規則波の水槽試験結果に対して、船体応答から方向波スペクトルの推定を実施した。図-13にその結果を示す。図-13上、左下、右下はそれぞれ、波計測結果、船体運動、ひずみから推定した方向波スペクトルである。これより、船体運動から推定した方向波スペクトルは 180deg.の方向の波が集中していることは推定できているが、300deg.から来ている波を明確に推定出来ておらず、0deg.近傍で推定している。一方で、ひずみから推定した方向波スペクトルは 180deg.と 300deg.の方向からの波を概ね推定できていることが分かる。これより、船体ひずみを用いることで方向波スペクトルの推定精度が良くなる結果が得られた。この推定に用いる応答の組合せについては、海象や船体の状況によっても異なると考えられるので、方向波スペクトルを推定するための最適な応答の組合せの検討が必要である。

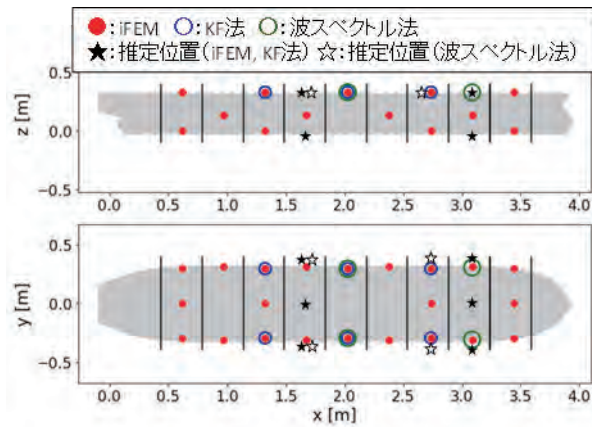


図-10 各データ同化手法に使用したひずみゲージの位置

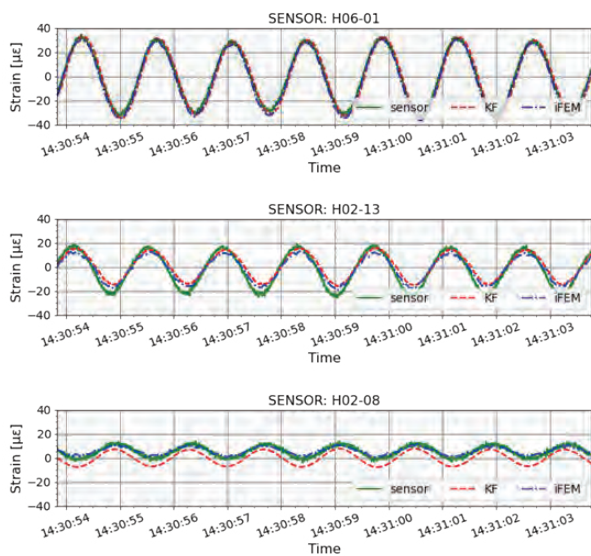


図-11 規則波中試験結果においてKF法とiFEM法により推定されたひずみの時系列の比較、(上図) No.6 ホールド左舷デッキ、(中図) No.2 ホールド右舷デッキ、(下図) No.2 ホールドボトム

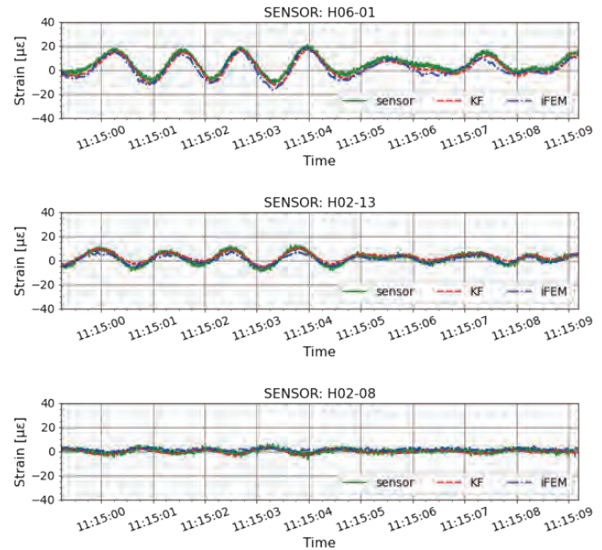


図-12 不規則波中試験結果においてKF法とiFEM法により推定されたひずみの時系列の比較、(上図) No.6 ホールド左舷デッキ、(中図) No.2 ホールド右舷デッキ、(下図) No.2 ホールドボトム

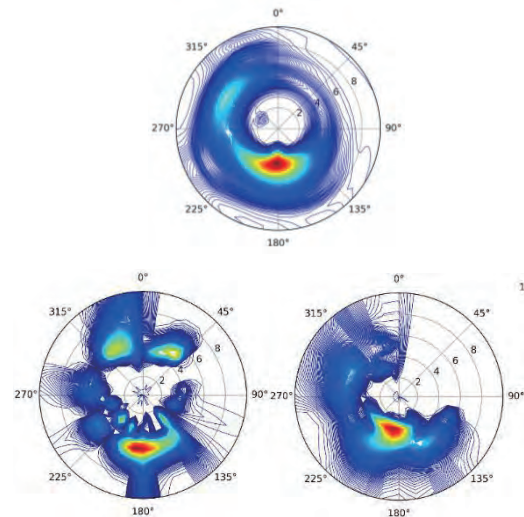


図-13 不規則波中試験において波スペクトル法により推定された方向波スペクトル、(上図) 模型船無しの波計測結果より推定された結果、(左下図) 船体運動より推定された結果、(右下図) ひずみより推定された結果

### 5.3 DTシステムの検証

図-14に水槽試験に適用したDTシステムの構成を示す。計測は2種類のハードウェアで行い、それぞれについて、データ取得の機能(Monitoring)を持つSub-packageがシステムに搭載されている。また、データ同化としてはリアルタイムで解析が可能なiFEMとKF法を実装した。最後にデータ可視化のためのSub-packageを搭載した。以上のDTシステムを構築し、図-15に示すように各計測データのモニタリングや、データ同化の結果をリアルタイムに出力可能であることを検証することができた。



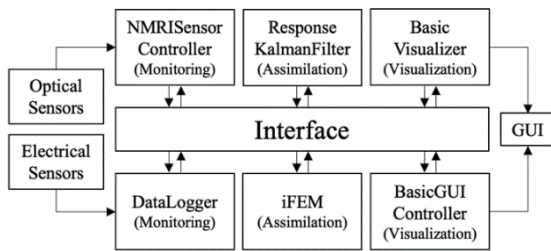


図-14 水槽試験での DT システムの構成



図-15 水槽試験での DT システムの GUI

## 6. 結言

データ同化手法を i-SAS で組合せ、DT システムの開発を実施した。水槽試験によりデータ同化手法および DT システムの検証を実施した。

今後の計画として、実船のバルクキャリア船に DT システムを搭載して検証を行う予定である。

## 謝辞

本講演論文は、日本財団のご支援の下、(一財)日本船舶技術研究協会が実施された「超高精度船体構造デジタルツインの研究開発」の一部であり、関係各位に謝意を表します。

## References

- 1) 一般財団法人 日本船舶技術研究協会：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。
- 2) Chong Ma, Masayoshi Oka, Hiroshi Ochi: An Investigation of Fatigue and Long-Term Stress Prediction for Container Ship Based on Full Scale Hull Monitoring System, Proceedings of the 14th International Symposium on Practical Design of Ships and other Floating Structures, PRADS 2019.
- 3) Kohei Mikami, Takuya Jumonji, Makito Kobayashi, Kimihiro Toh, Yusuke Komoriyama, Chong Ma, Hideaki Murayama: Deformation Estimation of Hydro-structural Container Ship Model by Inverse Finite Element Method (in Japanese), Conference Proceedings of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, vol. 30, (2020), pp. 229-233.
- 4) Yuto Miyake, Akira Tatsumi, Kazuhiro Iijima, Masahiko Fujikubo: Global Deformation Estimation of Ship Structure by Using Sensors and Numerical Model – Part 2: Application to

Monitoring Data of a Real Ship - (in Japanese), Conference Proceedings of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, vol. 33, (2021), pp. 287-292.

- 5) Xi Chen, Tetsuo Okada, Yasumi Kawamura, Taiga Mitsuyuki: Estimation of directional wave spectra and hull structural responses based on measured hull data on 14,000TEU large container ships, Marine Structures, 80, 103087, 2021.
- 6) Kohei Mikami, Makito Kobayashi, Tomoya Miyashita, Yusuke Komoriyama, Chong Ma, Akira Tatsumi, Kimihiro Toh, Rei Miratsu, Shinichi Hirakawa, Taiga Mitsuyuki, Hideaki Murayama: Development of i-SAS Platform for Digital Twin and Verification of Digital Twin System for Tank Test (in Japanese), Conference Proceedings of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, vol. 34, (2022).
- 7) Hidetaka Houtani, Kohei Mikami, Yusuke Komoriyama, Xi Chen, Yuto Miyake, Akira Tatsumi, Takako Kurada, Tetsuo Okada, Kazuhiro Iijima, Hideaki Murayama, Masayoshi Oka: Validation of the Data Assimilation Methods of the Digital-Twin System for Ship Structure via a Tank Test Using a Hydro-structural Bulk-carrier Model (in Japanese), Conference Proceedings of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, vol. 34, (2022)
- 8) Masayoshi Oka: Data Assimilation Technology for Digital Twin for Ship Structure (in Japanese), Conference Proceedings of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, vol. 34, (2022).
- 9) 三上航平：ひずみ場補間を用いた iFEM の船体構造モニタリングへの適用検討，東京大学大学院修士論文，2020。
- 10) Houtani, H. et. al.: Designing a hydro-structural ship model to experimentally measure its vertical bending and torsional vibrations. Journal of Advanced Research in Ocean Engineering, 4(4), 174-184, 2018
- 11) Akira Tatsumi, Masahiko Fujikubo: Ultimate Longitudinal Strength Analysis of Container Ships Considering Bottom Local Loads – Part 1: Nonlinear Finite Element Analysis - (in Japanese), Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, vol. 24, (2016), pp. 189-198.
- 12) Chen, J. et. al.: A study on whipping related double bottom response as well as its statistical characteristics based on full-scale measurements, Journal of Marine Science and Technology, 26, pp.846-860, 2021
- 13) Matsui, S. et. al. : Development of Direct Load and Structure Analysis and Evaluation System on Whole Ship DLSA-Basic for Ship Structural Design (in Japanese), 海上技術安全研究所報告，第19巻，第3号，研究報告，pp.373-393, 2019.