

## 6 船体構造デジタルツインに必要な数値シミュレーション手法 検証のための水槽試験技術の開発

小森山 祐輔\*, 馬 冲\*, 岡 正義\*

### Development of Seakeeping Test Technique for Verifying Numerical Simulations Required for Digital Twin for Ship Structure

by

KOMORIYAMA Yusuke, MA Chong  
and OKA Masayoshi

#### Abstract

In a Digital Twin for Ship Structure (DTSS), the stress distribution across the entire ship is estimated by using few strain data obtained from hull stress monitoring and the results of numerical simulations, i.e., load analysis and finite element analysis (FEA). We propose a seakeeping test technique for verifying the numerical simulations required for DTSS. In the proposed technique, a seakeeping test is carried out with a ship model to obtain water pressure on the surface of the model in waves. Then the water pressure distribution on the surface of the model is calculated by interpolating the measured water pressure, and FEA is performed using the water pressure distribution. The numerical simulations, the 3D panel method, and FEA, are verified by comparing the water pressure distribution and vertical bending moment obtained by the proposed technique. In this study, the vertical bending moment obtained by the proposed technique is compared with the vertical bending moment obtained from the strain measured in the seakeeping test. The two are in good agreement, indicating the effectiveness of the proposed technique.

---

\* 構造安全評価系 構造解析研究グループ

原稿受付 令和3年5月17日

審査日 令和3年6月8日

## 1. はじめに

近年、運航時の船体の健全性を把握するため、歪センサを用いて船体の局所応力を計測するハルモニタリング<sup>例えば 1)</sup>の利用機会が増えつつある。しかし、主にコストの問題で計測点数に限りがあるため、全船の応力状態が得られないのが現状である。この課題を克服するため、船体デジタルツイン(DTSS)<sup>2)</sup>では、限られた計測点数の歪を荷重解析やFE(Finite Element)解析を用いた数値シミュレーション手法で補間して、全船の応力状態を把握するための技術開発が行われている<sup>3)-5)</sup>。

本論文は、数値シミュレーション手法を水槽試験で検証する方法を提案した。数値シミュレーション(荷重解析とFE解析)では、与えた波浪条件に対して、水圧と縦曲げモーメントを解析する。提案する検証方法では、水槽試験で模型船に働く水圧を計測する。計測した水圧を、数値シミュレーションによる水圧と比較して、荷重解析の部分を検証する。さらに、計測した水圧を補間してFEモデルに入力して、縦曲げモーメントを算出する。算出された縦曲げモーメントを、数値シミュレーションで解析された縦曲げモーメントと比較して、FE解析の部分を検証する。提案方法を確認するため、水槽試験で弾性模型船の歪と水圧を計測し、歪から得られる縦曲げモーメントと提案方法を比較した。なお、縦曲げモーメントが運航時の船体に作用する主要な荷重成分であることから、縦曲げモーメントを用いて比較している。また、提案方法により得られた水圧分布および応力分布と、3D panel法、3D panel法+FE解析の結果を比較した。

## 2. 模型船

対象船の主要目を表-1に示す。6,600TEU型コンテナ船(海技研モデル)の相似比 $\alpha=1/74.68$ の縮尺模型である。本研究では、DTSSに必要な数値シミュレーション手法の検証のために、歪が計測可能な模型船として、材質はウレタン製(ヤング率 $E=57.9\text{MPa}$ )の一体型弾性模型船<sup>6)</sup>を使用した。模型船の実物の写真とFEモデルを図-1、図-2に示す。

表-1 実船と模型船の主要目

|                     | Target ship | Ship model | Scaling ratio |
|---------------------|-------------|------------|---------------|
| Length $L_{pp}$ (m) | 283.8       | 3.800      | $\alpha$      |
| Breadth (m)         | 42.80       | 0.5731     | $\alpha$      |
| Draft (m)           | 14.00       | 0.1875     | $\alpha$      |
| Depth (m)           | 24.40       | 0.3267     | $\alpha$      |
| Disp. (ton)         | 109749.0    | 0.2573     | $\alpha^3$    |
| KG(m)               | 18.15       | 0.2430     | $\alpha$      |
| GM(m)               | 1.090       | 0.0147     | $\alpha$      |

## 3. 計測システム

### 3.1 実海域再現水槽

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(図-3)で実施した。本水槽は長さ80m、幅40m、水深4.5mで、周囲には382枚のフラップ式の造波板が設置されている。本試験では、規則波、長波頂不規則波、短波頂不規則波での

試験を実施した。本報では規則波の試験結果を報告する。

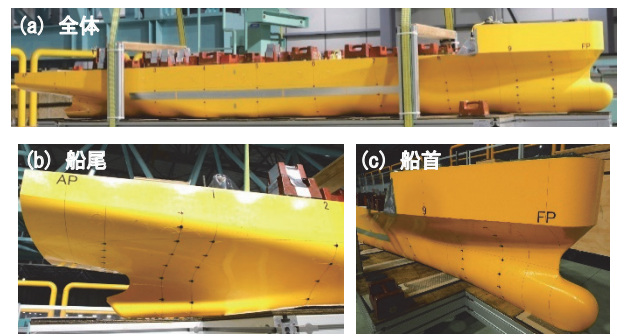


図-1 模型船の写真

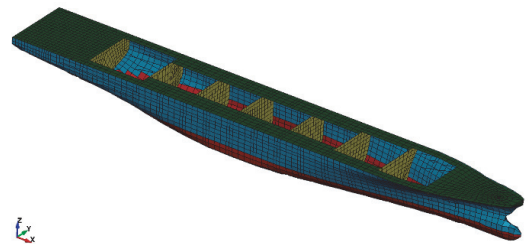


図-2 模型船のFEモデル

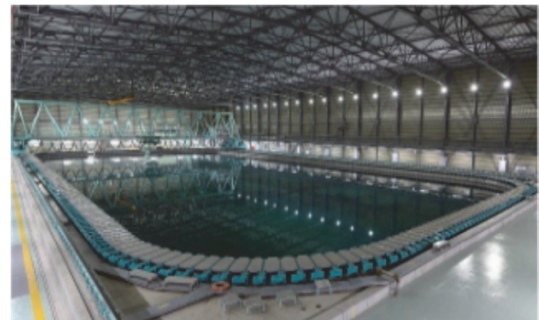


図-3 実海域再現水槽

### 3.2 計測項目

水槽試験では、船体運動、船体歪、船体水圧、船体加速度、出会い波高を計測した。ここでは、船体運動、船体歪、船体水圧について説明する。

#### 3.2.1 船体運動

模型船の曳航用ガイド装置に設置されたポテンショメータを使用して重心位置での6自由度の運動(surge, sway, heave, roll, pitch, yaw)を計測した。

#### 3.2.2 船体歪

提案方法の確認のため、FBG歪センサを用いて模型船の船体歪を計測した。FBG歪センサは、図-4に示すFBGと呼ばれる格子を有した光ファイバであり、FBGに入射した光から特定の波長の光のみを反射し、その他の波長の光は透過する。光ファイバが伸縮しFBGの格子間隔が変化すると、反射

する光の波長も変化するため、光の波長の変化と歪の関係から、歪を計測することができる<sup>8)</sup>。FBGの特徴として、反射する光の波長が異なるFBGを繋いで1本の光ファイバで多点の計測ができることから、配線等が煩雑にならないため、多点で歪を計測する本試験でもFBG歪センサを用いて歪を計測した。今回の試験では1本の光ファイバ毎に10点程度の歪の計測をし、計130点の歪を計測した。

光ファイバの仕様を表-2に示す。図-5には船体に設置したFBG歪センサを示しており、Loctite社製の2液のエポキシ系接着剤1C-LVを用いて接着した。

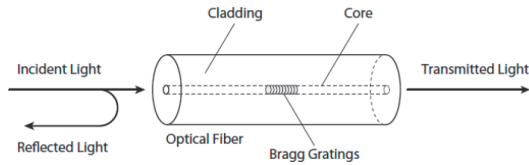


図-4 Fiber Bragg Gratingsの構造<sup>8)</sup>

表-2 光ファイバの仕様

| Parameter         | Specifications                              |
|-------------------|---------------------------------------------|
| Wavelengths       | 1460~1620nm                                 |
| Length of BG      | 10mm                                        |
| Temperature Range | -40℃~+275℃                                  |
| Strain Range      | ~15,000μ $\epsilon$ with 1.2pm/μ $\epsilon$ |
| Fiber Bend Radius | ~17mm                                       |

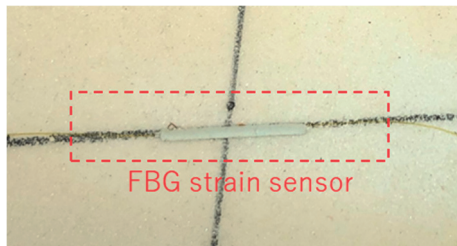


図-5 FBG歪センサ

表-3 インテロゲータsi255の仕様

| Parameter            | Specifications |
|----------------------|----------------|
| Number of Channels   | 16             |
| Wavelength range     | 1460~1620nm    |
| measuring frequency  | ~1000Hz        |
| Operating conditions | -20~60℃        |

FBG歪センサをLuna社製のインテロゲータsi255(Standard, 1000Hz)に繋ぎ計測を実施した。インテロゲータの仕様を表-3に示す。計測された光の波長 $\lambda$ (nm)は、(3-1)式で歪 $\epsilon$ (μst)に変換される。

$$\epsilon = \frac{(\lambda - \lambda_0)/\lambda_0}{F_g} \times 10^6, F_g = 0.796 \quad (3-1)$$

ここで、 $\lambda_0$ (nm)は光の波長の初期値であり、 $F_g$ は光の波長か

ら歪へ変換するための係数である。

歪は波浪中の主要な荷重成分である縦曲げモーメントに変換して、数値シミュレーション手法の検証を実施する。そこで、歪から縦曲げモーメントへの変換係数を求めるため、弾性模型船の各ホールドの中央断面に設置された図-6に示す位置#1, #3, #4, #6の歪を利用した。弾性模型船の縦曲げ試験を実施したところ、歪の出力は理論値より小さく、これはウレタン材がFBG歪センサより柔らかいため船体の歪み量に追従できなかったことが要因と考えられる<sup>6)</sup>。そのため、模型船の曲げ試験で得られた校正値を用いて、計測した縦曲げモーメントを補正した。縦曲げモーメントは(3-2)式及び(3-3)式を用いて求めた<sup>7)</sup>。

$$\epsilon_V = \epsilon_{\#1} + \epsilon_{\#6} - \epsilon_{\#3} - \epsilon_{\#4} \quad (3-2)$$

$$M_V/\epsilon_V = 5.53 \left( \frac{\text{kgfcm}}{\mu\text{st}} \right) \quad (3-3)$$

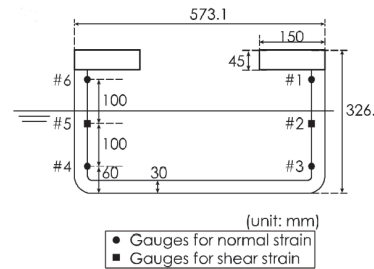


図-6 FBG歪センサの配置<sup>6)</sup>

### 3. 2. 3 船体水圧

提案方法に用いる模型船表面の水圧を得るため、FBG圧力センサを用いて船体表面の水圧を多点で計測した。FBG圧力センサの外観と内部構造を図-7に、仕様を表-4にそれぞれ示す。FBG圧力センサでは、面外方向の圧力により光ファイバが変形することでFBGから反射する光の波長が変化し、波長と圧力との関係から、圧力を計測する<sup>8)</sup>。

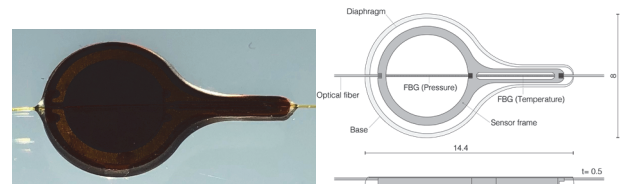


図-7 FBG圧力センサの外観と内部構造

表-4 FBG圧力センサの仕様

| Parameter         | Specifications  |
|-------------------|-----------------|
| Measurement range | -2,000~-4,000Pa |
| Length            | 14.4mm          |
| Breadth           | 8.0mm           |
| Thickness         | 0.5mm           |

FBG 圧力センサの特徴としては、FBG 歪センサと同様に 1 本の光ファイバに数珠繋ぎにセンサを繋ぎ多点で計測ができ、また厚さが 0.5mm で計測対象の表面に貼付けて設置をすることができる。従来は模型船に空けた孔に差し込む水圧計が使われていたが、本研究では、孔を空けることなく設置が可能かつ多点計測に向いている FBG 圧力センサを使用した。船体に FBG 圧力センサを設置した外観を図-8 に、FBG 圧力センサの配置を図-9 に示す。計 139 点で水圧を計測した。

FBG 圧力センサには、図-7 に示すように、圧力計測用と温度補正用の 2 つの FBG が内蔵されており、(3-4)式を用いて光の波長から水圧が求められる。

$$p = C_p \{ (\lambda_p - \lambda_{p0}) - S_t (\lambda_t - \lambda_{t0}) \} \quad (3-4)$$

ここで、 $\lambda_p, \lambda_{p0}(\text{nm})$  は圧力計測用の FBG の光の波長とその初期値、 $\lambda_t, \lambda_{t0}(\text{nm})$  は温度補正用の FBG の光の波長とその初期値である。また、係数  $C_p, S_t$  はセンサ毎に製品値が与えられているが、試験前にトリミングタンクに弾性模型船を固定し、水位を変化させることで、船体表面に取り付けた FBG 圧力センサの検定を行い、(3-4)式の係数  $C_p$  の校正値を求めた。



図-8 船体にFBG圧力センサを設置した外観

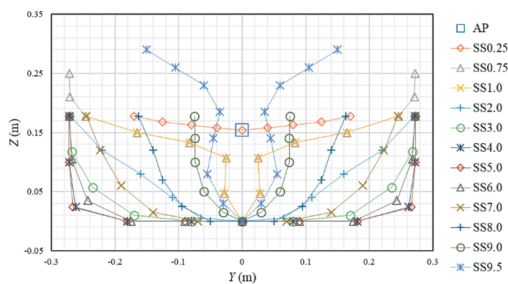


図-9 FBG圧力センサの配置

### 3. 3 試験条件

本報で対象とする規則波中試験は、船速を 0.0m/s と 0.366m/s (実船相当 0.0kt と 5.0kt)、波高を 4.02cm と 8.03cm (実船相当 3.0m と 6.0m)、波長船長比を向波条件で 0.7~1.1、斜め波条件で 0.4~0.8、波向きを 180deg. (向波)、120deg. (斜め向波)、60deg. (斜め追波) とし、これらの組合せで 38 通りの試験条件で実施した。

## 4. 試験結果

### 4. 1 船体運動

規則波中試験で得られた 6 自由度の船体運動の RAO と荷重解析手法である 3D panel 法による計算結果を図-10 に示す。図-10 の各運動の RAO は計測波形をフーリエ 1 次解析して求め、波振幅、波数で無次元化している。図-10 より、3D panel 法により波浪中での船体運動を良好な精度で推定できることを確認した。なお、図-10 の横揺れ (Roll) の実験値が計算値よりも大きいのは、実験時での計測時間が短く、また本模型船はビルジキールを有していないため、最初の出会波で生じた横揺れが収まり切れていなかった可能性があり今後の課題とする。

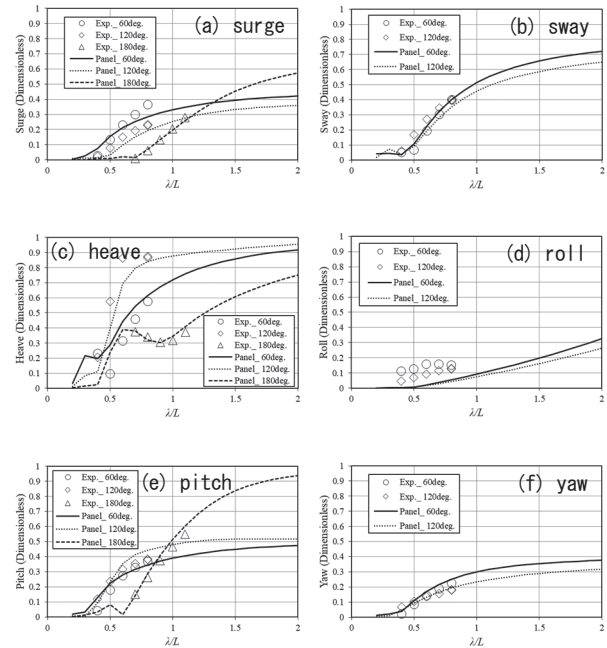


図-10 船体運動のRAO ( $H_w=8.03\text{cm}$ ,  $V=0.366\text{m/s}$ )

### 4. 2 水圧分布

模型船表面の多点で計測された水圧を補間して、模型船表面の水圧分布を求めた。後程水圧分布を荷重として FE 解析を実施するため、以下の手順で FE モデルの模型船表面のシェル要素に対して水圧の補間を行った。図-11 に補間要領を示す。

- ① 補間する位置 (図-11 中の A) の前後断面それぞれにおいて、補間する位置の高さに近い圧力センサ位置 2 点の水圧 (図-11 中の S.S.3 では  $p_1, p_2$ , S.S.4 では  $p_3, p_4$ ) を用いて、高さ方向の補間を行うことで、前後断面の補間する位置の高さでの水圧  $p_a, p_f$  を求める。
- ② 前後断面で得られた水圧  $p_a, p_f$  から、前後方向の補間を行うことで、補間する位置の水圧  $p$  を求める。

模型船表面で計測された水圧を補間して得られた水圧分布と、3D panel 法により得られた水圧分布を図-12 (a), (b) に示す。FBG 圧力センサより得られる水圧は波浪変動圧のみ

であるが、図-12の水圧分布には波浪変動圧に静水圧を足し合わせた全圧の分布を表示している。図-12より、離散的に計測された水圧を補間することで、補間した部分でも3D panel法の水圧分布と良い一致を示しており、紙面では割愛するが動画も組み合わせることによって、数値シミュレーションの結果を視覚的に検証することを可能にした。なお、喫水上の水圧分布に多少の差異が見られるが、これは提案方法において、喫水上の水圧分布も喫水下の計測水圧を用いた簡易的な補間で求めていることが要因だと考えられ、今後補間方法の改善を行う予定である。

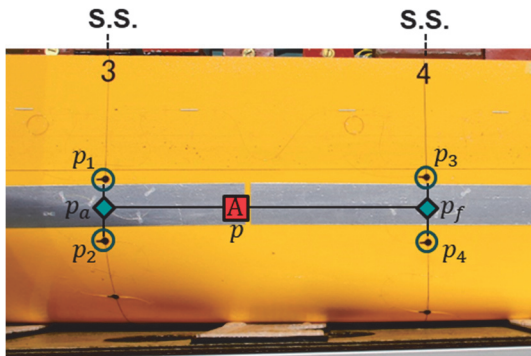


図-11 水圧の補間要領

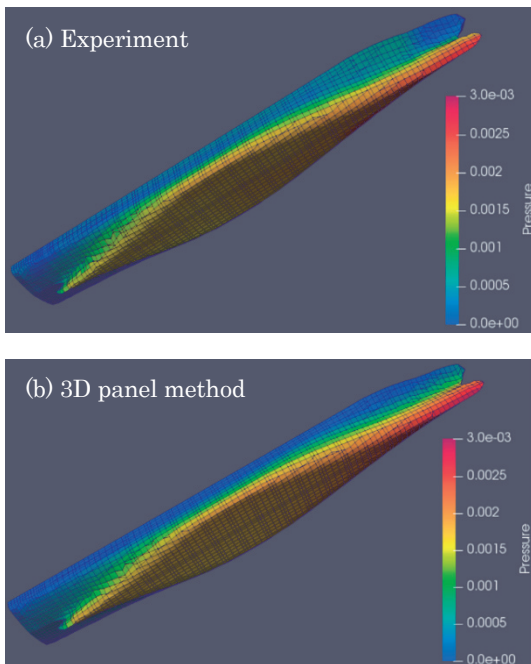


図-12 水圧 (MPa) のコンター図

#### 4. 3 FE 解析

多点計測と水圧補間により得られた水圧分布を FE モデルに与えて、FE 解析を行なった。解析には FE 解析ソフトウェア MSC. Nastran を用いて、船体運動により生じる慣性力は Inertia relief method<sup>9)</sup>を用いて考慮した。計測水圧を補間して得られた水圧分布を与えた FE 解析と、3D panel法の水

圧分布を与えた FE 解析により得られたミーゼス応力分布を図-13(a), (b)に示す。図-13よりその水圧分布を与えた FE 解析のミーゼス応力の全体の傾向は良く一致することが確認できた。これにより、水圧の補間法を含む計測水圧入力型の FE 解析用荷重データ生成プログラム<sup>10)</sup>に欠陥がないことを確認できた。なお、両者の応力分布に多少差異が確認できるが、これは 4. 2 章で述べた水圧の補間方法が要因だと考えられる。

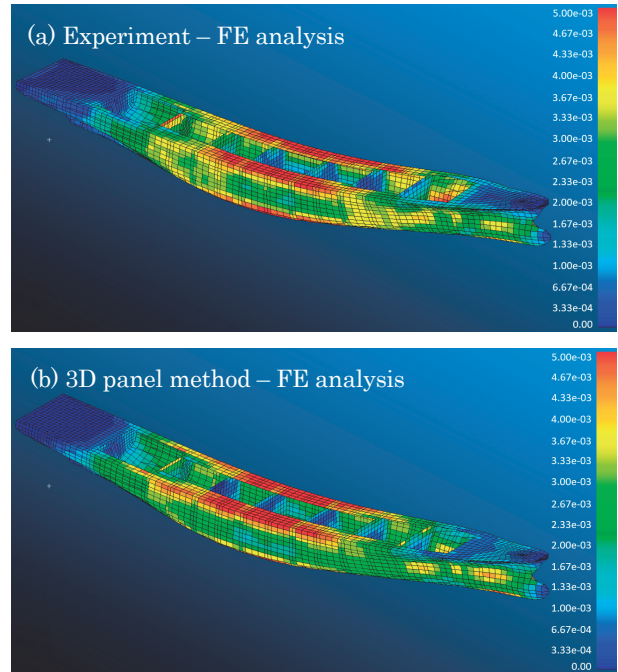


図-13 ミーゼス応力 (MPa) のコンター図 (変形200倍表示)

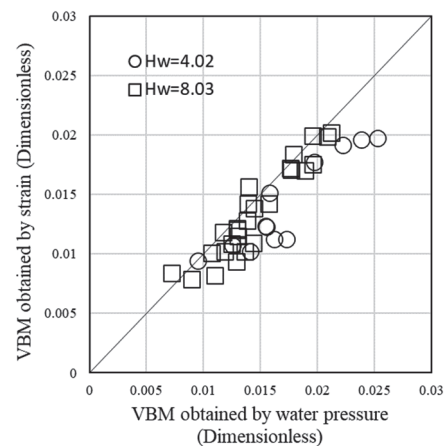


図-14 縦曲げモーメントの比較

#### 4. 4 縦曲げモーメント

最後に、計測水圧を用いた提案方法より得られる縦曲げモーメントの確認として、歪を用いて(3-2), (3-3)式より得られた縦曲げモーメントとの比較図を図-14に示す。提案方法では、選択した節点力の合力を求める Nastran コマンド MONPNT3<sup>11)</sup>を用いて、FE 解析結果から縦曲げモーメントを求

めた。図-14より、全体的には、水圧分布を用いたFE解析が、歪から求めた縦曲げモーメントと良い相関があることが確認された。一方、特に波高  $H_w=4.02\text{cm}$  の結果で、歪から求めた縦曲げモーメントより水圧分布を用いたFE解析結果の方が大きいケースがあり、これは、弾性模型船の歪の出力、水圧の補間方法等が要因と考えられるので、今後、より歪が計測しやすい弾性模型による検証、水圧の補間方法の改善を行う予定である。

## 5. まとめ

本研究では、構造デジタルツインに必要な数値シミュレーション手法を水槽試験で検証する方法を提案した。提案方法では、模型船に働く水圧を補間して得られた水圧分布を用いてFE解析を行い縦曲げモーメントを求めた。提案方法の確認として、水槽試験で得られた弾性模型船の歪から得られた縦曲げモーメントと比較し、その有効性を示した。

提案方法では、水槽試験による縦曲げモーメントの算出は、弾性模型による歪の計測結果を用いずに、計測された水圧をFEMモデルに作用させて算出しており、水槽試験には弾性模型ではなく剛体模型が使用可能である。さらに、提案方法を用いれば、本論で示した縦曲げモーメント以外に水平曲げモーメントや振りモーメントも計測可能であり、検証結果等について今後報告する予定である。

## 謝辞

本研究について様々なご助言を頂きました海上技術安全研究所の深沢塔一フェロー、FBG歪センサ及びFBG圧力センサによる計測に関してご助力を頂きました株式会社シミウスの若原正人博士に深く感謝申し上げます。

## References

- 1) Ma, C., Oka, M., Ochi, H.: 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.
- 2) Fujikubo Masahiko: R&D of Digital Twin for Ship Structures - Outcome of Phase-1 Project and its Future Extension (in Japanese), Conference Proceedings of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, vol. 30, (2020), pp.205-208.
- 3) Chen Xi, Okada Tetsuo, Kawamura Yasumi, Mitsuyuki Taiga: A Study on the Estimation Method of Wave Spectrum Using Measured Hull Responses in Tank Test on Digital Twin of Ship Structure (in Japanese), Conference Proceedings of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, vol. 30, (2020), pp.213-219.
- 4) Iijima Kazuhiro, Tatsumi Akira, Fujikubo Masahiko: Global Deformation Estimation of Ship Structure by Using Sensors and Numerical Model (in Japanese), Conference Proceedings of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, vol. 30, (2020), pp.221-227.
- 5) Mikami Kohei, Jumonji Takuya, Kobayashi Makito, To Kimihiro, Komoriyama Yusuke, Ma Chong, Murayama Hideaki: 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.
- 6) Hidetaka Houtani, Yusuke Komoriyama, Sadaoki Matsui, Masayoshi Oka, Hiroshi Sawada, Yoshiteru Tanaka and Katsuji Tanizawa: Designing a Hydro-Structural Ship Model to Experimentally Measure its Vertical Bending and Torsional Vibrations, Journal of Advanced Research in Ocean Engineering, 4(4), (2018), pp.174-184.
- 7) Yusuke Komoriyama, Daichi Ota, Chong Ma, Hiroshi Sawada, Masayoshi Oka, Sadaoki Matsui, Hidetaka Houtani: HULL STRUCTURAL STRENGTH EVALUATION BASED ON FIBER BRAGG GRATINGS PRESSURES TO MEASURE SPATIAL PRESSURE DISTRIBUTION ON SHIP'S HULL IN WAVES, Proceedings of the ASME 2020 39th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE 2020, OMAE2020-18434, pp.1-8.
- 8) Fukushima Hiroshi, Wakahara Masato, Nishikawa Tatsuo, Fukasawa Toichi, Kanai Takeshi: Hull Surface Pressure Measurement of the Affix-type Multipoint Pressure Sensor using FBG (in Japanese), Conference Proceedings of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, vol. 21, (2015), pp.327-332.
- 9) Lin Liao, A Study of Inertia Relief Analysis, Proceedings of the 52nd AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. AIAA, Denver, CO, (2020), pp.1-10.
- 10) DLSA-WPC, Registration number: P11056-1, 2020.
- 11) MSC Software: MSC Nastran 2017.1 Quick Reference Guide, (2017), pp.2968-2969.