

再現する

—船体構造デジタルツインの検証のための水槽実験技術—

正会員 岡 正義*
正会員 馬 沖*
正会員 小森山 祐輔*

1. はじめに

(一財)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委員会(フェーズ1)テクニカルグループ2(TG2)¹⁾は、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技術及び検証・標準化に関する調査研究を行った。船体構造デジタルツインシステムにおいて必要な数値シミュレーションとして次のものが挙げられる²⁾。

- ① 応答計測データから、海象(波スペクトル)、荷重分布、モード応答などを推定するための逆問題解析(データ同化): iFEM, カルマンフィルタ, 非線形最適化など
- ② ①で与えられた荷重条件, 荷重履歴等に対する, より広範・詳細な構造応答解析
- ③ 降伏・座屈・最終強度など構造耐力の解析
- ④ 疲労亀裂進展挙動, 腐食劣化挙動など構造状態の経時変化の推定

これらの解析から、累積疲労被害度、残余強度、残余寿命などの構造健全度指標を求め、評価・意思決定プロセスにつながるのが数値シミュレーションの役割である。

本稿では、実海域波浪中での構造応答を再現するのに必要な数値シミュレーションの機能及び精度の検証を目的とした、弾性模型船による水槽実験の結果を報告する。

2. FE解析を用いた弾性模型の設計と
応力応答関数の取得

2.1 弾性模型

本研究では、ポストパナマックスコンテナ船(NMRIモデル)のウレタン製弾性模型を用いて波浪中水槽実験を行なった。弾性模型を図1に示す。本模型は、図2のFE固有値解析を行ない縦曲げ及び振り振動特性が実船相似となるよう部材寸法を調整した、いわゆる剛性相似模型である。

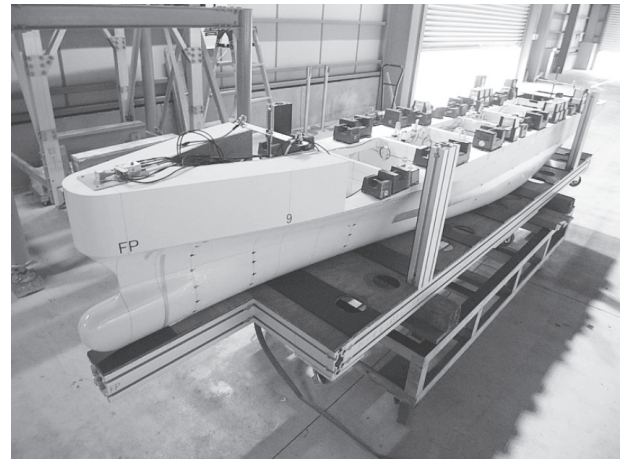
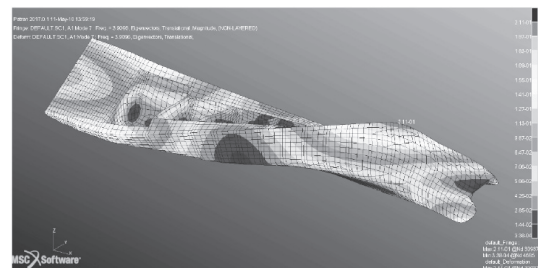
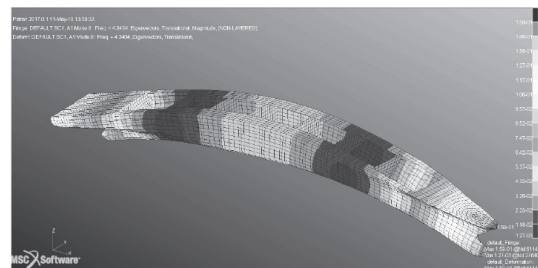


図1 ウレタン製弾性模型³⁾



(a) 第1次モード(1節振りモード)



(b) 第2次モード(2節縦曲げモード)

図2 模型船の固有値解析³⁾

2.2 全船荷重構造一貫解析

海上技術安全研究所で開発された全船荷重構造一貫解析システムDLSA(Direct Load and Structure Analysis system)を模型船に適用して、模型船の応力応答関数を取得した。模型船のFEモデル及び

* 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

DLSAにより得られた応力応答関数の例を図3に示す。DLSAは目的に応じて、線形/非線形、周波数領域/時間領域、弾性/塑性等、解析法を選択出来るが、ここではDLSA-Basic⁴⁾を用い、荷重計算は線形パネル法、構造解析はMSC.Nastranの線形静解析で解析を行なった。図1に写っている重量調整用ウェイト及び模型船船殻の慣性力は、MSC/Nastranの慣性リリース機能を用いて考慮した。ウェイトは質点要素でモデル化した。図3は船速ゼロでの船体中央甲板部応力の応答関数で、横軸は波長船長比、縦軸は応力値を波高で除した値である。波長船長比が6付近で応力が高くなっているのは、この波長での出会い波周期が横揺れ固有周期に相当したため、大きい横揺れによる応力が生じたためである。

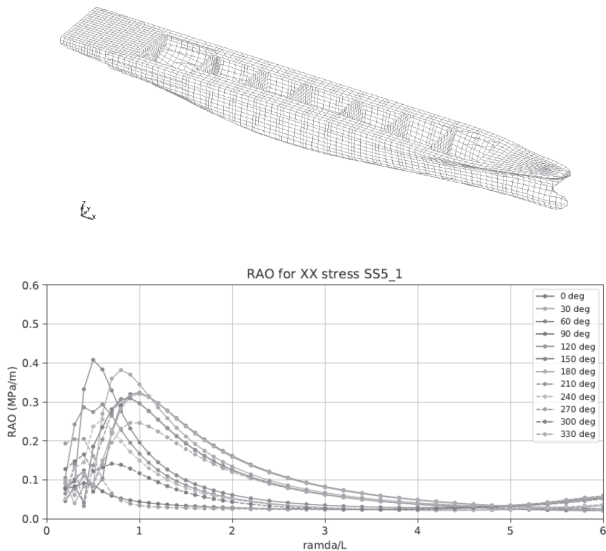


図3 模型船のFEモデルとDLSAで得られた応答関数(縦曲げ応力)

3. 水槽実験

3.1 実海域再現試験水槽

水槽実験は、海上技術安全研究所の実海域再現試験水槽で行なった。試験条件を表1に示す。規則波中試験ではピーク周期付近の波長を変えて5条件で計測した。不規則波中試験では、各試験条件で300波の応答が得られるよう造波の乱数を変えて繰り返し航走を行なった。低速条件で、構造設計に一般に用いられる5ノット⁵⁾でなく6ノットを選択した理由は、これまでに本船型で行った水槽実験の条件⁶⁾と一致させるためである。

本稿では、規則波中での試験結果を報告する。

表1 試験条件 (実機スケール)

	Head wave $\chi = 180 \text{ deg}$	Oblique head wave $\chi = 120 \text{ deg}$	Oblique follow wave $\chi = 60 \text{ deg}$
Regular wave			
V = 0 knot	H = 6 m	H = 6 m	
V = 6 knot	H = 3 m, 6 m	H = 3 m, 6 m	H = 6 m
Irregular wave (Long crested)			
V = 6 knot	Hs = 5 m	Hs = 5 m	-
Irregular wave (Short crested)			
V = 0 knot	-	Hs = 5 m	-
V = 6 knot	Hs = 5 m	Hs = 5 m	Hs = 5 m

3.2 計測項目

3.2.1 船体歪

(株)シミュス社製の光ファイバ型歪ゲージ130点を模型船に設置して詳細応力データを取得した。SS2~SS8の各断面に10点ずつとその他の局部応力を60点計測した。各断面へのゲージ配置を図4に、船体への設置外観を図5に示す。

3.2.2 水圧

(株)シミュス社製の光ファイバ型圧力ゲージ139点を外板表面にまんべんなく配置して水圧を取得した。計測値を補間して水圧分布の時刻歴応答を取得した⁷⁾。圧力センサの設置箇所を図6に、設置外観を図7に示す。

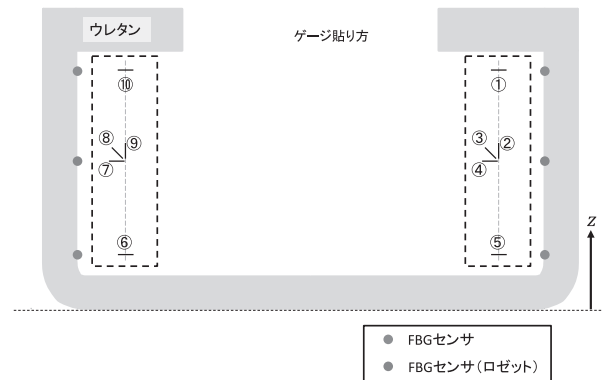


図4 歪センサの配置

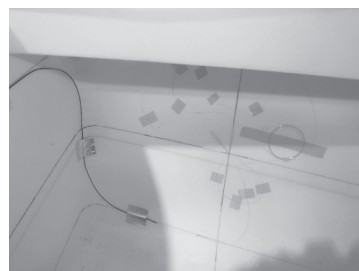


図5 FBG型歪センサの設置外観

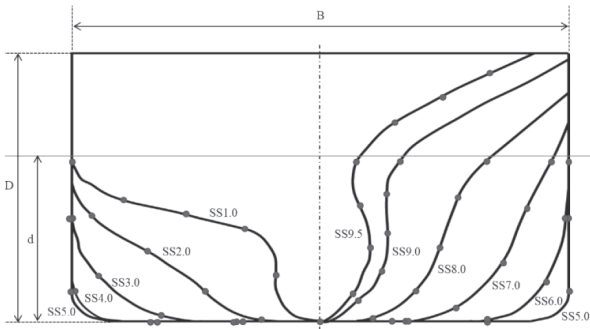


図6 圧力センサの配置

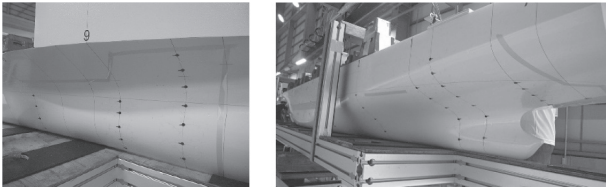


図7 FBG型圧力センサの設置外観

4. 実験結果

4.1 波浪中応答関数

実験で得られた縦曲げモーメント VBM と数値シミュレーションとの比較を図8に示す。縦曲げモーメントは、歪の計測値を梁理論で換算した。また、船体運動の応答関数を図9に示す。実験の振幅は、計測波形をフーリエ1次解析して求めた。縦曲げモーメントについて、振幅量は実験と計算値が良く一致しているがピーク周期にずれがあることが分かる。船体運動の応答関数では、実験と計算との間にギャップはないことから、重量分布の不一致や大運動による波浪荷重の非線形性の影響が考えられる。またウレタン材が波浪中での動的荷重に対して応答が鈍る可能性も考えられる。

図10に規則波中での縦曲げモーメントの振幅値を示す。横軸に計算値、縦軸に実験値をとって数値シミュレーションの推定精度を調べた。向い波中では比較的良好な推定精度が得られているが、斜波中では推定精度が悪く、斜向波では高め、斜追波では低めの推定となっている。斜波中での船体運動の推定精度が悪い要因として、波浪中での船首部の没水に伴う形状非線形の影響、及び、数値計算では Surge, Sway, Yaw の復元力を与えていないが、実験ではこれらの運動成分にバネで復元力を与えて曳航しているため、条件が完全に一致していないことが要因として考えられる。

なお、実験結果の詳細については参考文献2) 及び8) を参照されたい。

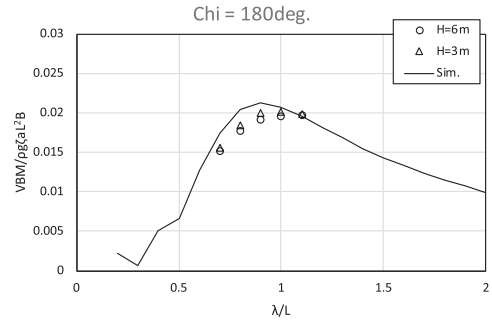
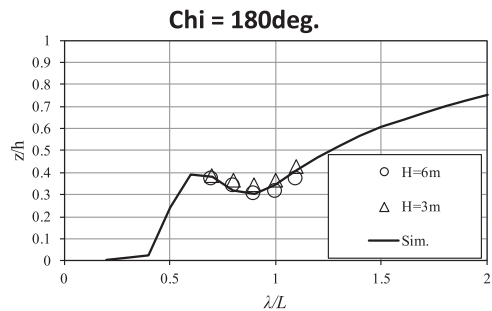
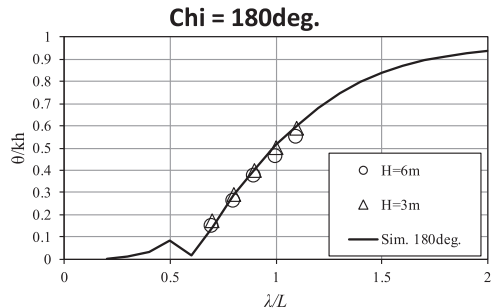


図8 縦曲げモーメントの応答関数 (V = 6 knot)



(a) 上下揺れ (Heave)



(b) 縦揺れ (Pitch)

図9 船体運動の応答関数 (V = 6 knot)

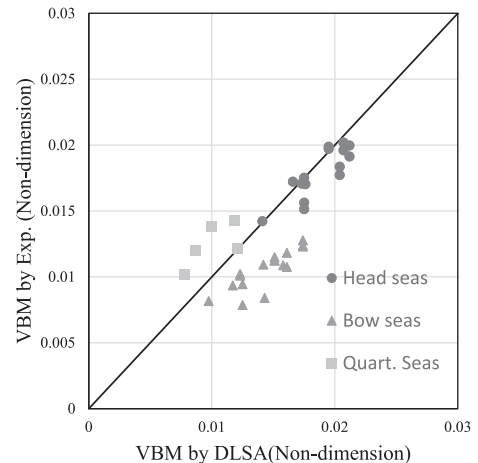


図10 規則波中縦曲げモーメント振幅値の比較

4.2 水圧分布の計測と検証

実験での計測値を補間して得た船底水圧の分布を数値シミュレーションと比較して図11に示す。水槽実験で圧力分布を得ることに成功し、数値シミュレーションを高密度で検証することが可能になった。紙面では示されないが、動画を観察することで圧力の流れが分かり設計に資する情報が得られ、また計測異常があれば、これを動画で即座に察知することができ実験ミスの回避にも繋がる。

参考文献7)で、水圧を用いて縦曲げや振りの断面力を求める手法を提案しており、船体強度評価を目的とした水槽実験に必要な要素技術の一つとして、開発に取り組んでいる。

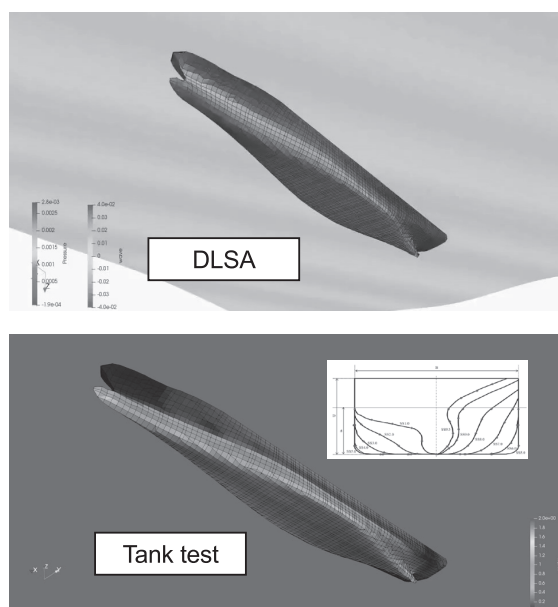


図11 船底水圧分布の比較⁴⁾
(上) DLSAによる推定値
(下) FBGセンサによる計測値

法の検証を通じて、各手法のメリット、デメリット、及び船体構造デジタルツインに必要な精度を得るための課題を明らかにすることができた。

5.3 船体構造デジタルツインの構築に向けて

図12にDLSAでシミュレートした水槽模型のサイバー空間モデルを実物と対比して示す。ここに示したように数値シミュレーションだけでサイバー空間モデルを作り出すことも出来るが、実物とのギャップはセンサによる計測データで補間するだけでなく、精緻なサイバー空間モデルすなわちデジタルツインを創出するのに有効なデータを見極めて、それらを効率的に取得することが、デジタルツインシステム開発のキーになると考えられる。

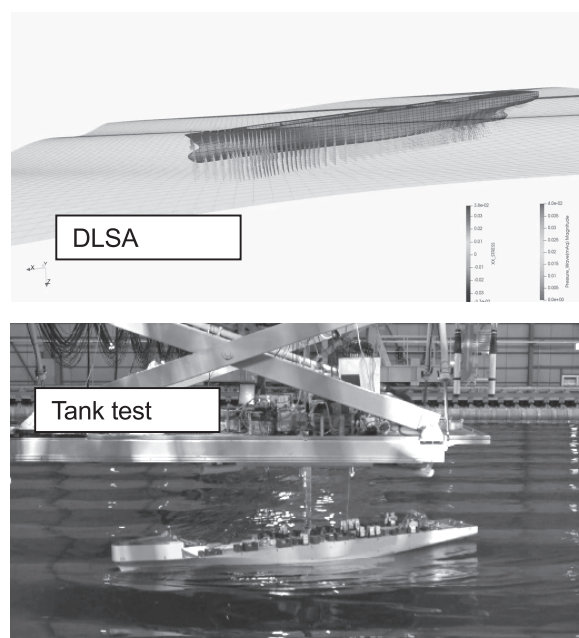


図12 水槽模型船のサイバー空間モデルとフィジカル空間モデル

5. データ同化手法の検証結果

5.1 データ同化手法

水槽実験データを用いてデータ同化手法の精度と有効性を検証した。手法としては、

- ・DLSAを用いた順解析手法
- ・波浪逆推定手法⁹⁾
- ・インバースFEM¹⁰⁾
- ・モード法(カルマンフィルタ)¹¹⁾

を選択した。

5.2 検証

検証の結果を表2に示す。詳細については、参考文献9)~11)を参照されたい。水槽実験での手

6. おわりに

船体構造デジタルツインの精度及び機能の検証を目的に行った波浪中水槽実験について紹介した。最先端の計測技術を用いて模型船体の応力及び船底水圧分布を取得し、模型船の全船荷重構造一貫解析の結果と比較して推定精度を検証した。また、計測データを利用して、データ同化手法のベンチマークを行い、手法の特徴と課題を整理した。今後、各手法のブラッシュアップ及び複合利用による精度向上、水槽実験での更なる検証、実フィールドでの検証、データマネジメントと予測機能の充実等の開発フェーズを経て、船体構造デジタルツインの社会実装へと繋げる計画である。

表2 応力推定手法の検証の概要

データ同化手法	順解析 (DLSA ベース)	波浪逆推定 ⁹⁾	iFEM ¹⁰⁾	モード法 ¹¹⁾ (カルマンフィルタ)
特徴	歪計測が無くても推定可能	不規則波 (実海域波浪) への適用が可能	船以外への応用が可能	動的応答 (振動) 評価が可能
入力データ (計測)	・波浪 or 水圧 or 歪	・歪 (数点)	・歪 (数点~多点)	・歪 (数点)
入力データ (解析)	応力 RAO	応力 RAO	応力 RAO	応力 RAO
逆推定する項目	ー	波浪スペクトル	たわみ, 圧力	各変形モード
推定する項目	非計測点の歪	非計測点の歪	非計測点の歪	非計測点の歪 (振動含む)
結果 (概要)	・運動・縦曲げモーメントは推定可能。 ・振りモーメントは課題が多い。(船底水圧分布の計測値から振りモーメントを求める方法を開発中 ⁷⁾)	・規則波中は概ね良好 (逆算した波は設定波とほぼ一致)。 ・不規則波中 (多方向波) を検証するには波面の詳細計測が重要。	非拘束の船に対する iFEM の適用課題を示した。	・入力値であるデッキ側の応力の推定精度は良いが、ボトム側は局部変形モードを考慮できないため精度が劣る。 ・弾性振動についても同様。

謝辞

本稿で紹介した研究は、(一財)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委員会」フェーズ1テクニカルグループ2 (TG2) の活動として実施された。研究の実施にあたっては、同委員会の委員各位から貴重なご教示、ご議論、ご協力を賜った。本稿のおわりにあたり、関係各位に厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 藤久保昌彦：船体構造デジタルツインのコンセプト，日本船舶海洋工学会誌 KANRIN92 号，2021.
- 「超高精度船体構造デジタルツインの研究開発」成果報告書，(一財)日本船舶技術研究協会，2019.
- H. Houtani, Y. Komoriyama, S. Matsui, M. Oka, H. Sawada, Y. Tanaka and K. Tanizawa: Designing a hydro-structural ship model to experimentally measure its vertical bending and torsional vibrations, Journal of Advanced Research in Ocean Engineering, vol.4(4), pp.174-184, 2018.
- 松井貞興他：船体構造設計のための全船荷重構造解析ならびに強度評価システム DLSA-Basic の開発，海上技術安全研究所報告，第 19 巻第 3 号，pp.1-21, 2019.
- IACS HARMONISED CSR TB-REPORT, No.4 EDW Definition of Extreme Loads, 2014.
- 松井貞興，村上睦尚，岡正義：実験との比較による非線形波浪荷重解析プログラム NMRIW-II の適用性の検証ー規則波中船体応答ー，海上技術安全研究所報告，第 17 巻第 3 号，pp.83-166, 2017.
- 小森山祐輔他：FBG 圧力センサにより計測された船体表面の水圧分布を用いた有限要素解析について，日本船舶海洋工学会講演会論文集，第 29 号，pp.429-431, 2019.
- 岡正義他：船体構造デジタルツインの精度検証のための水槽実験，日本船舶海洋工学会講演会論文集，第 30 号，pp.209-212, 2020.
- 陳曦，岡田哲男，川村恭己，満行泰河：船体構造デジタルツイン水槽試験における船体応答計測結果に基づく波浪スペクトル推定，日本船舶海洋工学会講演会論文集，第 30 号，pp.213-219, 2020.
- 三上航平，十文字拓也，小林真輝人，藤 公博，小森山祐輔，馬沖，村山英晶：逆有限要素法を用いたコンテナ船弾性模型の変形推定，日本船舶海洋工学会講演会論文集，第 30 号，pp.229-233, 2020.
- 飯島一博，辰巳晃，藤久保昌彦：ひずみセンサー情報と数値モデルによる船体変形の推定に関する研究，日本船舶海洋工学会講演会論文集，第 30 号，pp.221-227, 2020.



岡 正義 (おか まさよし)
 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 構造安全評価系
 構造解析研究グループ グループ長
 船体構造，波浪荷重，疲労強度，船体振動
 moka@m.pmat.go.jp



馬 沖 (マ チュウ)
 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 構造安全評価系
 構造解析研究グループ 主任研究員
 船体構造解析，流体構造連成，スロッシング
 ma-chong@m.pmat.go.jp



小森山 祐輔 (こもりやま ゆうすけ)
 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 構造安全評価系
 構造解析研究グループ 研究員
 最終強度，弾性模型船，船体構造，衝突解析
 komoriyama-y@m.pmat.go.jp