# 7 船体構造デジタルツインの早期実現に 向けた研究開発

岡 正義\*, 松井 貞興\*\*, 馬 沖\*, 小森山祐輔\*

# Development and Functional Requirements of Ship Structure Digital Twin

by

# OKA Masayoshi, MATSUI Sadaoki, MA Chong and KOMORIYAMA Yusuke

# Abstract

Digital Twin for Ship Structure (DTSS) is a system used to determine the state of ships that are in operation. The data obtained from the DTSS makes it possible to objectively evaluate the integrity of the hull. DTSS has been widely used recently, and it is expected to be used for operation support, maintenance, inspection, and evaluation of remaining life.

This paper describes the functional requirements for DTSS and its current development status. A data assimilation method is the main component of DTSS. We conducted a tank test in order to verify the data assimilation. We analyzed the tank test model using our developed tool, the Direct Load and Structural Analysis (DLSA) system. The hull stress and water pressure distribution on the model were obtained utilizing state-of-the-art measurement technology. The results of the tank test verified the effectiveness of the data assimilation method.

# 1. はじめに

船体構造デジタルツインは、実海域における船体をサイバ ー空間上に精緻に再現し、関係者がデジタルツインから得ら れる情報を元に船体の健全性を客観的に評価するシステム であり、運航支援、保守・点検、余寿命評価等への活用、長 期的には、AI 技術を利用した革新的設計や運航自動化に必要 なビッグデータの構築が期待され、現在普及が進んでいる. 当所では、今期重点研究で行ってきたハルモニタリングシス テムの研究開発の成果<sup>11</sup>と、設計支援ツールとして開発し社 会実装した荷重構造一貫解析システム<sup>21</sup>の技術を利用して、 オープンイノベーション型研究として、(一財)日本船舶技 術研究協会の船体構造デジタルツイン開発に取り組んでい る<sup>31</sup>.

本論では,船体構造デジタルツイン(Digital Twin for Ship Structure:DTSS)の開発状況について,DTSSに求められる機 能要件を説明し,各種機能を満たすのに重要な役割を果たす データ同化技術とその研究動向を説明する.さらにデータ同 化技術の検証を目的として行った水槽試験の結果を報告す る.

# 2. DTSS に求められる機能要件

#### 2.1 コンディション監視

船体構造デジタルツインの機能として,船の損傷や腐食に 対する船体状態(コンディション)の健全性の監視が挙げら れる.この機能は、メンテナンスコストの軽減あるいは売船 価格の適正化に結びつくことから期待度が高い.健全性監視 システムについては過去に研究開発がされている<sup>4</sup>が,損傷 や腐食に関する膨大なデータを蓄積して整備する方法や、デ ータを分析して評価する手法をができておらず社会実装に 至っていないのが現状と考えられる.当所では、ドローンや AI による画像認識技術等を用いた技術整備も進めて長期的 に対応をしている<sup>5</sup>.

# 2.2 航路支援

図-1 に当所で構築を目指す DTSS の概念図を示す.北大 西洋を航行する船舶と海象を同時に示したマップの上に, DTSS 構築に必要な要素技術を同時に表示した.荒天の波ス ペクトルから得られる波面の状態,前節で述べた船体コンデ ィション,積載状態等を基に波浪中構造応答の数値シミュレ ーションを行い,さらにはハルモニタリングとのデータ同化 を行って船体の状態量を予測し,強度の限界値を超えないよ う最適な航路及び・又は速力を推奨する.

図-1からは、多くの船が荒天を避けていることが分かる. 近年の波浪予測精度の向上に伴う荒天避航操船やウェザー ルーティングの結果と考えられる.ウェザールーティングは 燃料消費削減のため荒天を避ける航路を推奨することが多 いと考えられるが、航路(距離)と燃料消費との関係から荒 天を突っ切ることを推奨する可能性もある.DTSSの安全支 援機能を現状のウェザールーティングシステムに追加する ことで、安全で経済的な最適航路をユーザが享受できる様に なる.また将来的には、復原性能や波浪中主機出力の要件も 加味した統合型のデジタルツインの開発に繋げることを計 画している.

## 2.3 荒天中操船支援

図-1 では、大半の船は荒天(レッドゾーン:最大有義波 高約14m)を回避しているが、数隻の船はこれに遭遇してい る. 前節の航路支援ではこのような船を無くすことを目標と しているが、海象が自然現象である以上、ゼロにすることは 不可能である、そのため、荒天に遭遇した船の支援を行う機 能が必要になる.船体と波面の位置関係や船体コンディショ ンを元に,現在及び近未来における船体の状態量を即時に予 測して,安全にやり過ごすための変速や舵切りの判断支援を 行う.この即時の支援に要する時間は、長くても短期海象の 持続時間1時間内と想定されるが,船上で数値シミュレーシ ョンを行うには限界があり、データマネジメントの工夫が必 要になる.一つは,設計時に得られる応力の応答関数(RAO) をデータベースとして船上搭載する方法である. リアルタイ ムで得られる波浪スペクトルと応力 RAO から応力スペクト ルを求めて最大値予測をするシステムを構築して船上のエ ッジコンピュータで起動させる. もう一つは陸上から支援す る方法である. 船上で得られる波面の観測データや船体応答 データを衛星通信で陸上に送って,大型計算機でリアルタイ ムシミュレーションを行い、また船舶の管理者や設計者から のサポートを受けて安全支援を行う. 当所では、これら2つ の方法の複合システムの構築を見据え,船上での支援システ ムと陸上からの支援システムの開発に取り組んでいる.



#### 図-1 船体構造デジタルツインの安全運航機能のイメージ図

# 2.4 ビッグデータの構築と分析

DTSS の波及効果として、デジタルツインで蓄積されたビ ッグデータの活用が挙げられる.船体設計において経験的に 決められてきた操船ファクター等の不確定要素が、データに よって定量的に評価できるようになり、確率論に基づいて設 計の自由度を高めることや新しい設計規則の開発に繋がる と期待される.その一例を図-2に示すの.北大西洋を航行す る船舶の遭遇海象を統計解析して得られた有義波高の超過 確率である.遭遇海象は,衛星 AIS から得られる船舶位置情 報と北大西洋波浪追算データを組み合わせて求めた.通常の 船舶設計で用いられる波浪統計データ(IACS-Rec.34)及び/ 又は船舶位置を考慮しない北大西洋海域の平均的な海象

(Hindcast) と比べて約 15%波高が低く,設計波高を見直せ る可能性があることが分かった.今後,研究を発展させて確 率論的構造設計手法を確立に繋げるためには,ここで示した 波浪に関するデータの他,船体応答データや積荷に関するデ ータ等の整備が重要になる.そのためデジタルツインの普及 を図る必要があり,また手法の整備を同時に進める必要があ る.



図-2 北大西洋航行船の遭遇海象の統計解析結果

#### 3. データ同化技術

前章で掲げた船体構造デジタルツインの機能要件を満足 するには,船体構造部位の危険性を察知するため船体全域の 応力分布を精度良く知る必要がある.デジタルツイン開発の 背景には,ハルストレスモニタリングの汎用化がある<sup>1)</sup>. 歪 センサを用いた応力計測システムが商品化されて普及して いるが,費用に限りがあるため,計測できる部位は限られて いる.これに対して,非計測の部位の応力推定を目的に,数 値シミュレーションと計測データとを融合したデータ同化 技術の研究開発がされている<sup>3)</sup>.

応力推定を行うための手法には、大きく分けて順解析と逆 解析があり、順解析は、海象から波浪荷重を、あるいは、荷 重から応力を、応力から変形量や疲労・最終強度を求める一 般手法である.逆解析は、非計測の応力を推定するため、応 力情報から波浪を求めて波浪中応力解析を行う波浪逆推定、 変形量から応力を求める iFEM や、計測した応力から主要モ ードを介して非計測の応力を求めるモード法など、最低限の 計測データから多数かつ高精度な情報を得る手法である.い ずれの手法も荷重構造一貫解析で得られる波浪中応力応答 関数を必要とする.

# 3.1 順解析法

順解析は、海象から波浪荷重を、荷重から応力を、応力か ら安全余裕や寿命を求める手法で、設計時に行われる強度評 価も順解析に相当する.順解析の流れを図-3に示す.図-3の 下方の太矢印は直接荷重強度評価法の流れである.設計規則 に基づく設計では、④水圧は規則で与えられており、設計者 はこのあとを検討することが多い.直接荷重強度評価では、 行動海域・海象から検討を開始する必要があるが、設計段階 では一般に行動海域を特定できないため、一律北大西洋とす るなど安全側に設定されることが多い.

一方,船体構造デジタルツインで就航船の安全性を評価す る場合は、これまでの行動海域や遭遇海象の履歴を得ること ができるため、実データに基づく評価が可能になる.即ち図 -3 の①行動海域若しくは②海象でデータ同化を行うことが できる. また波浪をセンサ等で計測している場合は, ③波浪 のデータ同化を行う. 就航後のデータを用いることによっ て, 就航時よりも高精度な強度評価が可能になる. さらに, ハルストレスモニタリングを行っている場合は、図-3の⑤応 力のデータ同化が可能になる.まずは応力ピーク値を統計解 析して,最大応力,疲労寿命を検討する.応力に関しては計 測していない任意の部位の応力を得るためのデータ同化が 重要になる.計測した箇所の応力値を元に数値シミュレーシ ョンで求めた応力 RAO を補正する. あるいは波浪データが 正しくないことも考えられるので応力値を元に波浪データ を補正するのも一案である. また今後の重要アイテムとして ④水圧がある.現状では実船で水圧を測った事例はないが、 このデータが得られれば、波浪推定、応力推定の精度が飛躍 的に向上すると考えられ, 今後のセンサ技術等の研究開発を 期待する.





# 3.2 逆解析法

非計測部位の応力を推定する新しい手法として逆解析手 法がある.(一財)日本船舶技術研究協会で行われている「超 高精度船体構造デジタルツインの研究開発」においては,以 下の3つの手法が検討されている.

- 応答関数を用いた船体応答からの波浪スペクトル推定 (陳ら<sup>7</sup>)
- 2 逆有限要素法を用いた船体応答からのハルガーダー応答 推定(飯島ら<sup>8</sup>)
- 3 カルマンフィルタを用いた船体応答からのハルガーダー 応答推定(三上ら<sup>9</sup>) 方法1は,船体応答の周波数応答関数を求めておき,計測

された応答スペクトルから波浪スペクトルを推定する.得ら れた波浪スペクトルを用いて,船体の任意の箇所の応答スペ クトルを求めることができる.方法2は,船体のハルガーダ 一固有振動モードとモードパラメータを求めておき.計測さ れた応答時系列からカルマンフィルタを用いてモード応答 時系列を推定する.モード重ね合わせにより,任意箇所の応 答をリアルタイムに求めることができる.方法3は,逆有限 要素法を用いて計測ひずみ情報からハルガーダーの変位応 答を推定することにより,任意箇所の応答を推定する.

以上の順解析及び逆解析手法は、4. で述べる波浪中水槽試 験で検証された. その結果を、4.7 で後述する.

#### 4. 手法検証のための水槽試験<sup>10</sup>

# 4.1 水槽試験の目的

表-1に、従来のハルモニタリング及び数値シミュレーションからみた応力取得・推定方法のメリット・デメリットを整理した.船体構造デジタルツインのコアとなるデータ同化技術を用いることによって、任意の部位でかつ高精度な応力値が得られると期待される.一方、精度検証の課題がある.

手段	メリット	デメリット(課題)	
ハルモニタ	・計測部位の応力	・計測点数に限り	
リング	真値を取得可	(標準仕様では4点程度)	
		・波浪情報の精度	
数値シミュ	・任意の部位の応	・波浪/積付等の環境情報	
レーション	力値を取得可	が必要	
		・数値計算誤差	
デジタルツ	・データ同化技術	・データ同化技術の精度	
イン	を用いて、任意の部	検証が必要	
	位かつ高精度な応		
	力値を取得可		

表-1 応力取得・推定方法のメリット・デメリット

データ同化技術は実船データを用いて検証することが望 ましい.しかし、ハルモニタリングの対象船の隻数が少ない ことや、実海域で遭遇した波浪や積荷に関する情報が得られ ていないことから不確定要素が多く、実船データでは精度検 証できないのが現状である.一方、近年の模型実験の技術開 発によって、実海面を再現する技術や水槽試験で波浪中構造 応答を再現する模型技術が整い、波浪中での船体応答データ を密に取得することが可能になった.そこで本研究ではデー タ同化手法の検証を目的とした水槽試験を実施した.

# 4.2 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L=3.8m(縮尺 1/74.7)ウレタン製模型を用いた.模型 船の外観を図-4 に示す.本模型船は、縦曲げ及び捩り振動特 性が実船相似となるよう構造寸法を調整した弾性模型であ る<sup>11</sup>.



図-4 ウレタン製弾性模型

#### 4.3 模型船の全船荷重構造一貫解析

波浪中応力の推定精度を検証するため、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)を使用して模型船の応力解 析を行った.模型船の FE モデルを図-5 に、解析で得られた 応力応答関数の例を図-6 にそれぞれ示す.本研究では、荷重 計算は線形ストリップ法、応力解析は MSC.Nastran を用いた. Nastran の慣性リリーフ機能を用いてウェイト及び船殻の慣 性力を考慮した.ウェイトは質点要素でモデル化した.図-6 は船速ゼロノットでの船体中央甲板部の応力 RAO で、横軸 は波長船長比、縦軸は、船体中央甲板部(後述図-7の①⑩) の長手方向の応力応力値を波高で除した値である.





#### 4.4 試験条件

当所の実海域再現試験水槽で波浪中実験を行なった. 試験 条件を表-2 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 返し航走した.

本論文では、規則波中での結果を報告する.

	Head wave Oblique		Oblique			
	χ=180deg	head wave	follow wave			
		χ=120deg	χ=60deg			
Regular wave						
V=0 knot	H=6m	H=6m				
V=6 knot)	H=3m, 6m	H=3m, 6m	H=6m			
Irregular wave (Long crested)						
V=6 knot	Hs=5m	Hs=5m	-			
Irregular wave (Short crested)						
V=0 knot	_	Hs=5m	-			
V=6 knot	Hs=5m	Hs=5m	Hs=5m			

表-2 試験条件(実船スケール)

# 4.5 計測項目

#### (1) 歪

(株)シミウ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 60 点計測を行なった. 各断面へのゲー ジ配置を図-7 に示す.



図-7 船体横断面の歪センサ配置

(2) 水圧

(株)シミウス社製の光ファイバ型歪ゲージ 139 点を外板表面 にまんべんなく設置して、プログラムを用いて補間すること によって水圧の分布を取得した.水圧センサの設置位置を

図-8 に示す. なお, データ解析の結果の詳細については, 参考文献 12)に記載している.



図-8 水圧センサ配置

#### 4.6 試験結果

船体の局所歪の計測値に基づき計算した縦曲げモーメン トの応答関数と数値シミュレーションとを比較して図-9(a)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.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.図-9(b),(c)に示すヒーブ、ピッチ の船体運動には、実験と計算でピーク周期のズレは生じてい ないことから、長周期側での大運動に伴う形状非線形の影響 で、実験での長周期側の縦曲げモーメントが相対的に大きく なったことや、サージの曳航バネの影響、ウレタン製弾性模 型の応答特性等が可能性として挙げられる.



# 4.7 データ同化手法の検証の結果

3. で述べたデータ同化手法を検証した結果の概要を表-3 に示す.順解析は数値シミュレーションの検証という位置づ けになる.水槽試験のデータを用いて各手法の検証をした結 果,手法のメリット,デメリット及び推定精度が明確になっ た.この検証結果に基づき,全船応力の推定をするのに適し た手法の組合せを検討して構築し,船体構造デジタルツイン に実装する予定である.

# 5. まとめ

船体構造デジタルツインの開発に向け、デジタルツインシ ステムの機能要件とこれを満足するための課題を整理した. 4) システムのコア技術と位置づけられる、全船応力推定を行う ためのデータ同化技術について、順解析及び逆解析手法の特 5) 徴を整理して、機能及び精度検証のための水槽試験を行っ た.新しい試みとして、模型船の全船荷重構造一貫解析を行 い、波浪中試験で構造応答の推定精度を検証した.また最先 6) 端の計測技術を用いて模型船の応力及び船体水圧分布のデ ータを取得することに成功した.

今後,船体構造デジタルツインの機能要件に応じるために 必要十分な速さと精度でのシステムを構築するべく,データ 同化技術のブラッシュアップを行うとともに,各手法のモジ ュール化と複合利用を検討して,船体構造デジタルツイン実 用化の早期実現を図る.

# 謝辞

本研究は、日本財団の助成を受けた(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 (2018 年度~2019 年度)」の活動の一部として行われたも のである.関係者に深く御礼を申し上げる.

# 参考文献

- 岡正義,越智宏,有馬俊朗:船体構造モニタリングに関 する調査研究,海上技術安全研究所報告,第19巻第1号 (2019),pp.35-44.
- 松井貞興,村上睦尚,林原仁志,笛木隆太郎:船体構造設計のための全船荷重構造解析並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(2019), pp.373-393.
- 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一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)

- 二重殻タンカーの船体構造寿命に関する研究(SR245) 成果報告書,(一財)日本船舶技術研究協会(2003.3)
- 5) 平方勝他:損傷画像認識への深層学習の適用について、 日本船舶海洋工学会講演会論文集,第 29 号 (2019)、 pp.253-257.
- 6) 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.
- 7) 陳曦,岡田哲男他: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(2020)
- 8) 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(2020)
- 9) 三上航平,村山英晶他: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(2020)
- 10) 岡正義,小森山祐輔,馬沖: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(2020)
- H. Houtani, et.al, : Designing a hydro-structural ship model to experimentally measure its vertical bending and torsional vibrations, 2018, Journal of Advanced Research in Ocean Engineering, vol.4(4), pp.174-184.
- 12) 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(2019), pp.429-431.

データ同化手法	順解析(DLSA ベース)	波浪逆推定(陳ら <sup>ヵ</sup> )	iFEM (三上ら <sup>9)</sup> )	モード法 (カルマンフィルタ)		
				(飯島ら <sup>8)</sup> )		
特徴	歪計測が無くても推定可能	不規則波(実海域波浪)へ	船以外への応用が可能	動的応答(振動)評価が可能		
		の適用が可能				
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	_	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	・規則波中は概ね良好	非拘束の船に対する iFEM	・入力値であるデッキ側の応		
	は推定可能.	(逆算した波は設定波と	の適用課題を示した.	力の推定精度は良いが、ボト		
	・捩りモーメントは課題が	ほぼ一致).		ム側は局部変形モードを考慮		
	多い.(船底水圧分布の計測	<ul> <li>・不規則波中(多方向波)</li> </ul>		できないため精度が劣る.		
	値から捩りモーメントを求	を検証するには波面の詳		・弾性振動についても同様.		
	める方法を開発中 <sup>12)</sup> )	細計測が重要.				

表-3 データ同化の各手法の検証結果の概要