

## 7 船体構造デジタルツインの開発に向けた取組み

構造安全評価系 \*岡 正義, 村上 睦尚, 越智 宏

### 1. はじめに

船体構造デジタルツインは、実空間における船体構造の状態を、モニタリングおよび数値シミュレーションによってサイバー空間上に精緻に再現するとともに、得られたデジタル情報を、船舶の運航支援、点検・保守管理、設計フィードバック等に活かすものである。

当所では、これまでに研究開発を行ってきたハルモニタリングシステムや FE モデルを用いた全船荷重構造一貫解析システムを利用して、安全運航と設計の高度化に寄与する船体構造デジタルツインの開発に向けた取組みを行っている。本論では、外部機関との連携研究を交えて、船体構造デジタルツインの研究開発の最新動向を紹介する。

### 2. 船体構造デジタルツインのコンセプト

船体構造デジタルツインと聞いてイメージするのは、まず応力モニタリングに基づく船体の健全性評価であろう。船体の健全性を正確に知ることは、船の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ため、この機能への期待は高い。信頼性のある健全性評価を実現するため、計測データを用いて客観的な状態量を評価する技術やデータに基づいて余寿命を推論する技術の開発が必要になる。

一方、安全運航の観点からは、船に作用する外力と船体が持つ耐力の大小関係で決まる状態量の評価が必要になる。荒天を予測して危険な海象を回避する或いは疲労被害を減らすための運航支援を行う機能、及び不運にも荒天に遭遇した場合は、即時に船長に指示を出し、安全にやり過ごすための操船支援を行う機能が必要になる。この機能要件は、コストには直結しないが、事故や損傷による油流出のリスク回避に繋がることから、重要性は高いと考えられる。

また、船体構造デジタルツインの波及効果として、デジタルツインで蓄積されたビッグデータを通じて船体設計上の不確定要素が徐々に分かるようになり、確率論に基づく設計及び設計規則の実現につながると期待される。データ活用も船体構造デジタルツインの重要な機能要件と位置づけられる。

以上の機能を有する船体構造デジタルツインを社会実装することが本研究の目的であり、そのためには、ハルモニタリングや数値シミュレーションの技術開発が必要になる。当所では、これまで培ってきた要素技術を集約して世界最先端システムを構築することを 2030 年に向けた長期ビジョンに掲げている<sup>1)</sup>。次章では、デジタルツインのコア技術となるハルモニタリングシステムや荷重構造一貫解析システム等の研究動向を紹介する。

### 3. コア技術

#### 3.1 ハルモニタリングシステム

当所では、平成 28 年度より 7 か年計画で船体構造モニタリングシステムの開発に関する研究を開始した<sup>2)</sup>。研究の概要を図-1 に示す。

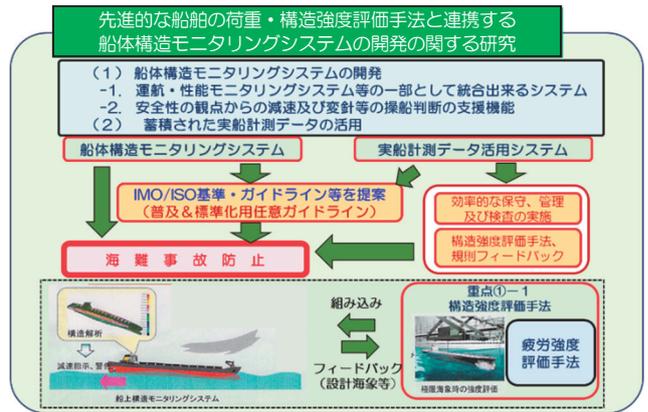


図-1 ハルモニタリングシステムの開発にかかる研究概要

この重点研究では、重大海難事故防止を目的に、「実海域の波浪及び船舶の状態監視(モニタリング)情報」に「船舶の構造応答特性等」及び船陸間通信等を組合せ、操船者に対して、船速及び針路決定等の操船判断に資するアドバイスを提供するシステムを開発するもので、実船計測データ活用システムを構築すると共に、その成果をガイドラインとして取りまとめ、さらには得られたデータから構造規則にフィードバックすることも想定している。重点研究で想定している統合型ハルモニタリングシステムの模式図とモニタリングによって得られるデータを活用した規則作成のイメージを図-2 に示す。

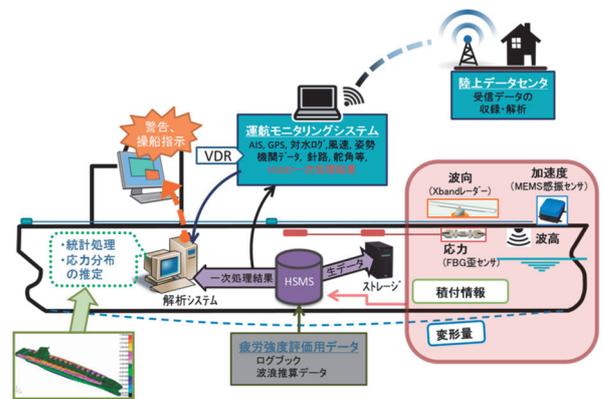


図-2 統合型ハルモニタリングシステムのコンセプト

### 3.1.2 ハルモニタリングシステムの提供会社と実船への適用事例

歪センサの提供会社は、センサを用いた安全装置のシステム全体をパッケージとして提案し、適用実績を伸ばしている。ハルモニタリングシステムの提供会社と適用実績等を表-1に示す。参考文献<sup>3)</sup>によると、海外の提供会社が大きく先行して実績を積んでいることが記されている。

表-1 ハルモニタリングシステムの提供会社<sup>3)</sup>

System Name	Vendor	Location	Instr olations	Approved
HMS Hull Monitoring System	MCA Consultants	Newport Beach, CA, USA		
HULLFIB	Micron Optics, Inc Global Maritime Engineering	Atlanta, GA, USA Busan, Korea		ABS, BV, DNV, LRS, etc
HULLMOS	Rouvari Oy Sirehna HMC	Helsinki, Finland NANTES, France Almere-Stad, Netherlands	20+	LRS, DNV, ABS, BV
Hull Stress Monitoring System	CPE System	Abbotsford, VIC, Australia		DNV
Naviscan HSMS	Korea Marine Technology Sea Structure Technology	Ulsan, Korea Daejeon, Korea	40 (2001 - 2008)	DNV, LRS, ABS, KR, B V, NK
Scimar	BMT Scientific Marine	Escondido, CA, USA		ABS
SENSFIB	Light Structure	Oslo, Norway	Over 100	DNV, LRS, BV, ABS, RINA
Ship Advanced Monitoring and Analysis	CETENA	GENOA, Italy		RINA
SMART^STRESS	BMT SeaTech	Southampton, UK		(Allmajor class)
StressAlert	Straininstall	Isle of Wight, UK	Over 100	LRS, DNV, ABS, etc

### 3.1.3 ハルモニタリングシステムによって得られる利点

ハルモニタリングを導入する目的として、まずは各種モニタリング情報に基づいて、本船の構造健全性に関する状態評価を行い維持管理の合理化を図ることが挙げられる。一方、構造設計基準との関係においては、大型コンテナ船の最終強度評価用の設計荷重について、構造モニタリングを行っていることを理由に、ホイッピングの荷重係数を減じることを許容する船級規則もある<sup>4)</sup>。この規定は、構造モニタリングデータに基づいて、図-3に例示する警告を出し、船長が適切な操船判断を採ることを前提としている。船長に対する安全操船支援の方法やセンサの信頼性等、実船への適用にはクリアすべき課題が多く残されているが、現状の安全性を維持し、かつ、船殻重量の軽量化を実現するには、ハルモニタリングの活用がキーになると考えられ、研究を加速する必要があると考えられる。

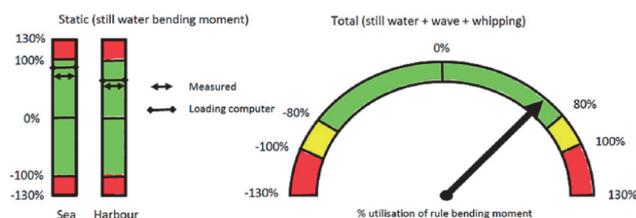


図-3 安全支援装置の例<sup>5)</sup>

### 3.2 構造応答シミュレーション

当所では、船体構造設計の高度化を目的として、ストリップ法などの荷重計算プログラムと、有限要素 (FE) 解析を組み合わせた全船荷重構造一貫解析システム(DLSA)を構築して、設計利用への社会実装を実現している。船体構造デジタルツインを実現するには、DLSA等の数値シミュレーションツールをシステムに組み込むことが必要不可欠となる。本節では、DLSAの開発動向について述べる。

#### 3.2.1 DLSA (Direct Load and Strength Analysis)

荷重構造一貫解析は新しい技術ではなく、船殻設計への適用も含め、ある程度確立されている手法である。しかしながら、荷重構造一貫解析を行うには図-4に示す荷重解析から構造解析、強度評価まで通して実施する必要があり、これらの各解析(以下、モジュール、とする)では入力作成から結果の評価などの様々なノウハウが伴い、同一の人物によってなされるには広範な知識が必要となる。このため、従来では一般的に、それぞれの専門家が解析を行うといった分業の形になり、これに加え、モジュール間で膨大なデータを受け渡すことから、適用するには過大な時間及びマンパワーが必要である。

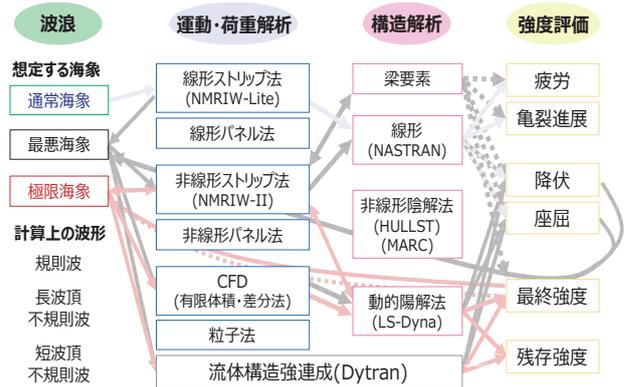


図-4 荷重構造一貫解析の流れ

最近では、国内外での規則においても、船体部分モデル或いは全船モデルを対象に荷重構造一貫解析が必須となりつつある。一方で、実船モニタリングと数値シミュレーションの融合により実現可能となる船舶デジタルツインに期待が高まりつつある。このような状況の中、当所では、シームレスかつ信頼性の高いDLSAシステム(全船直接荷重構造一貫解析・強度評価システム)を開発している(表-2参照)。

表-2 DLSA システム

(プログラム名, 評価項目, 評価に必要な日数)

【新設計・初期設計、不具合検証】		
DLSA-Basic	降伏・疲労(座屈)を網羅的に実施 →設計海象から最悪海象を特定	1日
DLSA-BasicW	最悪海象での強度評価	0.5日
DLSA-Professional	最終強度(極限海象・設計不規則波)	1.5日
【事故調査、研究】		
DLSA-Ultimate	事故時残存強度・最終強度	20日~

## (a) DLSA-Basic

DLSA-Basic は荷重解析にストリップ法（線形，非線形），線形パネル法（3次元グリーン関数法）で運動・水圧を周波数領域で計算し，線形構造解析を実行することで，各種強度評価が可能である．特に，疲労及び降伏に関しては，統計評価値（超過確率  $10^{-8}$  レベルの応力の最大期待値，疲労被害度，応力が最大となる波向き・波長など）を自動で出力し，全船構造 FE 要素へ描写すると共に，個船の最悪海象を特定することが可能であるところまで開発が完成している．また，DLSA-BasicW は最悪海象下での時刻歴解析を行って最大値評価を行うプログラムである．

## (b) DLSA- Professional

DLSA-Professional は荷重解析に非線形ストリップ法で運動・水圧を計算し，One-way 連成により動的な非線形構造解析を実行し，崩壊解析を再現可能であるところまで開発が完成している．ただし，One-way 連成を採用しているため，ポスト最終強度の現象については信頼性が低いと考える．図-5 に解析例を示す．コンターは船体長手方向の応力，船首部のベクトルは波か受ける圧力を表している．

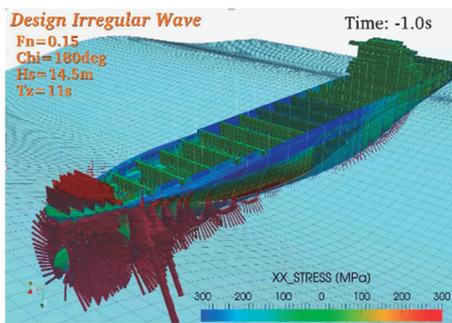


図-5 DLSA-Professional の解析例

## (c) DLSA- Ultimate

DLSA- Ultimate は荷重解析に CFD 等で運動・水圧を計算し，Two-way 連成により動的な非線形構造解析を実行し，崩壊解析を再現可能である．また，同等の解析手法として，流体構造強連成解析を行うことも想定している．現在，開発半ばである．また，本アプローチにおいては，正面向波・追波での実績例がほとんどであり，斜め波での計算実施手法の確立が必要である．図-6 に解析例を示す．上図は，汎用流体解析ソフト Star CCM+を用いた波浪荷重の解析結果で，下の図は非線形構造解析プログラム LS-Dyna を用いた最終強度解析の結果である．

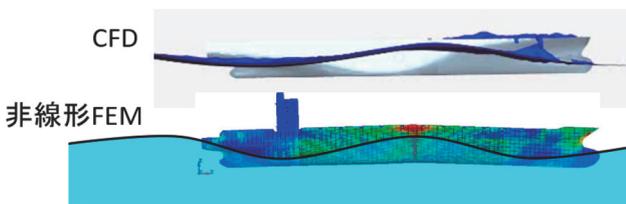


図-6 DLSA-Ultimate の解析例

## 3.2.2 模型試験による検証

DLSA 等の数値シミュレーションツールを用いることで波浪中での船体応答推定が行えるが，正しく推定できていることを示すには，実験での検証が必要になる．構造モニタリングデータで直接検証ができればベストであるが，実海域では波浪や船の情報が少ないあるいは得られていないことから，当所では構造模型を用いた水槽試験で検証を行っている．

当所では，ウレタン製の弾性模型を用いて，縦曲げ振動に加えて振り振動をも再現することに成功した．図-7 は，弾性模型による波浪中水槽実験の写真と，模型船の FE 固有値解析の結果である．FE 解析に基づいて，模型の板厚や骨の寸法を決めるという弾性模型の設計手法を確立した．

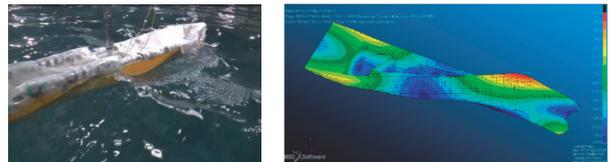


図-7 縦曲げ振り剛性相似模型と模型船の固有値解析の例

## 3.3 センサによる計測点以外の箇所の応力推定

表-1 に示した商用化したハルモニタリングシステムでは，4～5 点の応力計測が基本仕様となっている．船体の状態量を得るには計測点数が不十分であるため，3.2 節で説明した数値シミュレーション技術を活用して計測点数を補完するための技術開発が行われている．船体加速度や応力情報から波浪を逆算して波浪中数値シミュレーションを行う手法<sup>9)</sup>，或いは，カルマンフィルタを用いて船体の変形モードに基づいて非計測応力を求める手法<sup>10)</sup>など，逆解析に基づく手法の研究開発が行われている．

また，出会い波浪と操船状態，積載状態がリアルタイムで分かっているならば順解析で非計測箇所の応力を推定することができる．波浪スペクトル及び運航情報を入力として数値シミュレーションを行うことで，船上モニタリングを行っていない船の応力推定も可能になる．近年，AIS データによってモニタリングを行っていない任意の船の位置情報が分かるようになってきているので，これと波浪データとを紐付けることで，図-8 に示した GUI を介して，船舶の遭遇海象が分かるようになり，最大荷重や疲労被害度の推定やさらには設計規則へのフィードバック等が期待される．

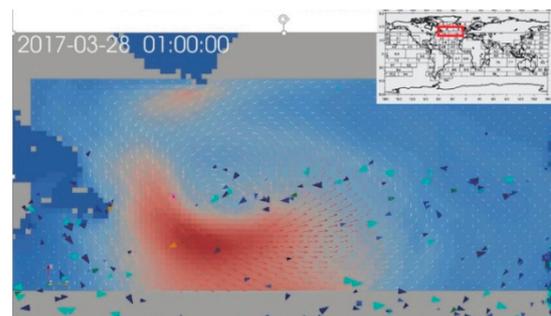


図-8 遭遇海象 GUI（北大西洋のコンテナ船の例）

#### 4. プロジェクト研究事例

##### 4.1 iShipping Operation

日本郵船/MTI 及びジャパンマリンユナイテッド等において、国土交通省の補助の下、14000TEU 型コンテナ船でのハルモニタリングに関する共同研究が、2016 年～2020 年の 5 年計画で実施され<sup>8)</sup>、当所もこれに参画している。連続建造の 10 隻の船に設置された応力センサの配置及び計測波形の例を図-9 に示す。応力波形はホイッピングが発生した時刻での例である。10 隻の同型船において、船の運航情報を考慮して応力評価や疲労評価を行うことで、作用荷重に対する操船影響や、ホイッピングの影響を知ることができ、高精度な船体健全性評価を可能にしている。本共同研究では、船上でのデータ計測、データの信頼性、データ解析及び設計・基準へのフィードバックなど、一連の課題の解決に向けて関係各社が取り組むことで、ハルモニタリングにかかる研究分野をリードしている。

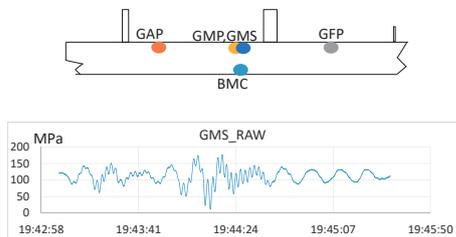


図-9 14000TEU 型コンテナ船のハルモニタリング (上：応力センサ配置，下：計測応力波形の例)<sup>9)</sup>

##### 4.2 超高精度船体構造デジタルツインの研究開発

日本船舶技術研究協会では、H30-31 の 2 カ年計画で、船体構造デジタルツインの開発に向けた研究プロジェクトを実施している<sup>10)</sup>。本プロジェクトでは、委員会及び以下の 3 技術部会を立ち上げて、協調領域でのコンセプトデザインを行っている。デジタルツインを活用した新たな船体管理及び船舶設計の在り方を検討し、船舶運航会社、造船会社、船級協会のステークホルダがともに利益を受けるビジネスモデルの構築を目指して研究開発に取り組んでいる。

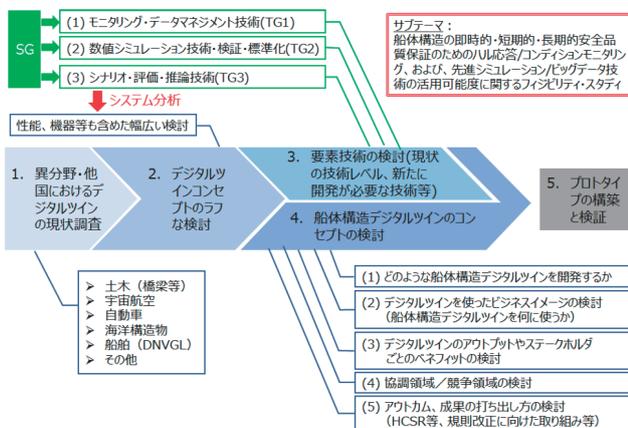


図-10 船体構造デジタルツインの開発に向けた研究プロジェクトの検討方案<sup>10)</sup>

#### 5. まとめ

本論では、当所が研究開発を行ってきたハルモニタリングシステムや数値シミュレーション技術を利用した船体構造デジタルツインの開発に向けた取り組み及び最新動向について紹介した。今後、船体構造デジタルツインの社会実装に向け、計測技術やシミュレーション技術等、各要素技術の高度化を行い、各ステークホルダとの連携を図ることで、有効で利用価値の高いシステムの実現を目指す。

#### 謝辞

本論は、

- ・先進船舶技術の研究開発に対する国土交通省の支援のもと、ジャパンマリンユナイテッド株式会社、日本海事協会、日本気象協会、横浜国立大学、東京大学、海上技術安全研究所、日本郵船株式会社および株式会社 MTI の共同研究「大型コンテナ船における船体構造ヘルスマニタリングに関する研究開発」で実施された内容を含みます。
  - ・日本財団の助成事業である（一財）日本船舶技術研究協会の「超高精度船体構造デジタルツインの研究開発」で実施された内容を含みます。
- 関係各位に謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 海上技術安全研究所の長期ビジョンー2030 年に海技研が目指す姿一，平成 31 年 4 月 9 日 [https://www.nmri.go.jp/pdf/vision\\_2019.pdf](https://www.nmri.go.jp/pdf/vision_2019.pdf)
- 2) 岡正義，馬沖，越智宏：船体構造モニタリングシステムの開発に関する研究，平成 30 年度（第 18 回）海技研研究発表会講演集，2018.7
- 3) Phelps, B., Morris, B., Australian Government Department of Defense, Review of Hull Structural Monitoring Systems for Navy Ship (DSTO-TR-2818), 2013.
- 4) DNVGL-RU-SHIP Pt.5 Ch.2. Sec.4 2.6.2 / Edition July 2016, amended July 2017.
- 5) DNVGL-RU-SHIP Pt.6 Ch.9 Figure 1 / Edition July 2017.
- 6) 吉平悠紀，岡田哲男，川村恭己，寺田優紀：14,000TEU 大型コンテナ船の船体応答実船計測に基づく波浪スペクトル推定について，日本船舶海洋工学会講演会論文集，2017.5
- 7) 西田大仁，植田莉加，飯島一博，藤久保昌彦：大型コンテナ船の流力弾性振動応答の特性と構造モニタリングに関する基礎的検討，日本船舶海洋工学会講演会論文集，2017.5
- 8) 平成 29 年度国土交通省 先進安全船舶技術研究開発補助事業「大型コンテナ船における船体構造ヘルスマニタリングに関する研究開発」
- 9) 米澤孝志：船会社における船体構造ヘルスマニタリングへの取り組み，Monohakobi Techno Forum 2017
- 10) 超高精度船体構造デジタルツインの研究開発 2018 年度成果報告書，（一財）日本船舶技術研究協会(2019.3)