

## 10 船舶の構造強度評価技術に関する研究の成果と 今後の研究計画

岡 正義\*, 村上 睦尚\*, 松井 貞興\*

林原 仁志\*, 藤本 修平\*, 山田 安平\*\*

### Results and Future Prospects of Developed Techniques for Evaluating Ship Structural Strength

by

OKA Masayoshi, MURAKAMI Chikahisa, MATSUI Sadaoki,  
HAYASHIBARA Hitoshi, FUJIMOTO Shuhei and YAMADA Yasuhira

#### Abstract

To prevent accidents and ship damage and while preserving the environment, it is necessary to design and build ships that are both efficient and safe. Although the classification rules that regulate structural strength have had requirements for recognizing equivalent efficacy, it was difficult to prove the equivalence of alternative designs, and application for alternative designs was extremely limited. However, the subsequent research and development of numerical simulations and establishment of big-data related to production and operation have raised expectations for alternative designs. Against this background, the NMRI has begun researching technology for evaluating hull structure. Utilizing the previously developed Direct Load and Structural Analysis (DLSA) system and digital twin for ship structure, we have been developing technology for rational hull structure design. Toward this end, we have developed (1) sensing technology for obtaining data during the design, construction, and operation lifecycle; (2) prediction technology utilizing accumulated big-data and data assimilation technology; and (3) a data platform for these technological developments. This report provides an overview of the DLSA and the digital twin system, i-SAS, and describes the future prospects of our research.

---

\* 構造・産業システム系, \*\* 海難事故解析センター

原稿受付 令和 5年 4月 27日

審査日 令和 5年 5月 22日

## 1. はじめに

船舶の事故・損傷を防止し、かつ省エネ化や省資源化を目指す社会ニーズに応じるためには、安全性を保持しつつ余剰な強度を排除した合理的な船舶の設計・建造が必要であり、早期にこれを実現することが我が国の海事産業の競争力確保につながる。船体の構造強度を規定した船級規則には、古くから、同等効力を認める要件が設けられているが、代替設計に必要な同等効力すなわち同等の安全性を証明することは難しく、適用は極めて限定的であった。しかし、近年の数値シミュレーション技術の向上や船舶の建造・運航にかかるビッグデータの構築によって、代替設計を実現できる可能性が高まりつつある。

以上を主な背景として、今期の重点研究において「船体構造評価技術に関する研究」の題目で、7年間の研究・開発に取り組む。前期の重点研究で開発した全船荷重・構造一貫解析システム(DLSA)及びDLSAとハルモニタリングを複合利用した船体構造デジタルツイン技術を活用して、安全性と環境適合を両立可能な次世代の船体構造設計に必要な基盤技術の構築を図る。この目標を達成するため、設計・建造・運航に渡るデータを得るためのセンシング技術、データ同化技術を利用した解析予測技術、蓄積したビッグデータを活用する技術、及びこれら技術開発に必要なデータプラットフォームの構築に向けた研究を行う。

本報では、全船荷重・構造一貫解析システムDLSA及びデジタルツイン統合システムi-SASについて紹介し、今期重点研究の計画と展望を述べる。

## 2. 前期研究の成果

### 2.1 NMRI-DLSA

構造強度設計の高度化に資するため、数値シミュレーションに基づく解析・評価システムDLSA(Direct Load and Structure Analysis system)の研究開発を行なった。システムは研究開発の段階に応じてレベル分けをして、-Basic, -Professional, -Advanced technology の符号をつけた。

#### 2.1.1 DLSA-Basic

単独の設計者が一貫解析を通して実施することを念頭に置いた、シームレスかつ信頼性の高い全船荷重構造一貫解析ならびに強度評価システム”DLSA-Basic”を開発した<sup>1)</sup>。DLSAシステム自体は非線形荷重・非線形構造解析までを含めた包括的なシステムであるが、DLSA-“Basic”はその中の線形荷重・線形構造解析から成るシステムを指す。DLSA-Basicでは荷重解析から強度評価までを同一のプラットフォーム上で行うことができ、各フェーズにおける解析の妥当性のチェックを容易に確認することができる。加えて構造応答の結果に基づく強度評価のフェーズにおいては、全船構造要素の応力の統計値及び疲労被害度、さらには応力や疲労被害に対して支配的となる海象条件をFEMモデル上にコンター表示できる機能(図-1)を有しており、波浪中の現象がどのように構造応答に影響しているかを容易かつ網羅的に理解できる。

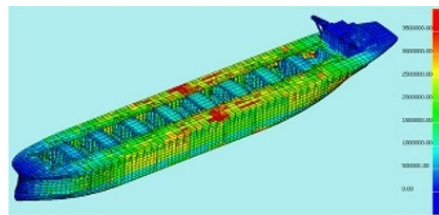


図-1 船体に作用する応力の最大期待値のマッピング

#### 2.1.2 DLSA-Professional

DLSA-Professionalは、重点研究で開発した非線形ストリップ法(NMRIW-II)<sup>2)</sup>でスラミング衝撃を含む水圧やこれに続く非線形船体応答等を計算して、必要に応じ流体と構造の連成を考慮して動的な非線形構造解析を実行することで、構造崩壊を含む時刻歴応答の再現を可能にしている。図-2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ら受ける圧力を表している。構造解析には汎用ソフトウェアLS-Dynaを用いた。DLSA-Professionalは、実用化を見据えた開発の段階にあり、その一環として、線形解析用のFEモデルを元に非線形解析用モデルに自動で作成する機能等を構築した。

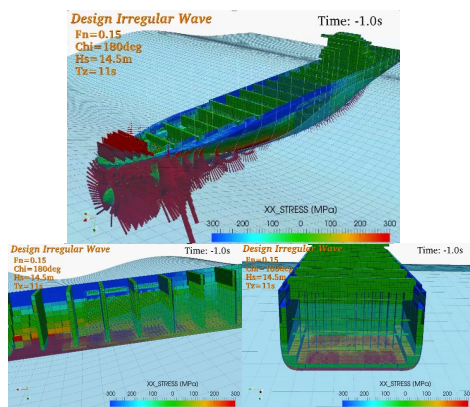


図-2 DLSA-Professionalによる時刻歴応答解析

#### 2.1.3 DLSA-Advanced Technology

DLSA-Advanced Technologyは、最先端の解析技術を利用した強度評価システムであり、現在、研究開発の段階にある。CFD等の数値流体力学手法と、動的な非線形構造解析を連携させて用いることにより、流体-構造連成を考慮した船体挙動を再現した。最近の研究成果を図-3に示す。当所で開発されたCFDプログラム(NAGISA)を利用して、CFD-FEA連成解析を行い、船体のスプリング振動を再現した。

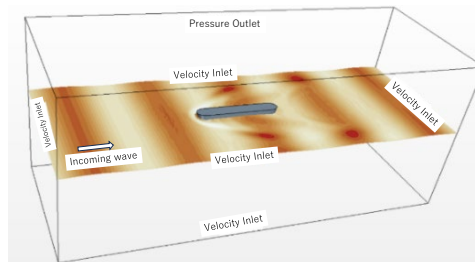


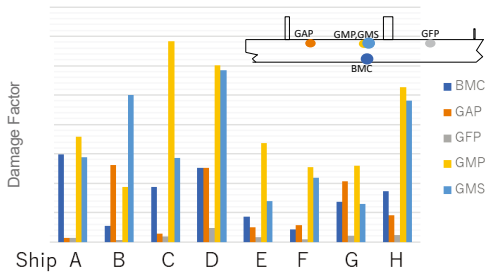
図-3 連成解析用のCFDモデル

## 2.2 船体構造デジタルツイン

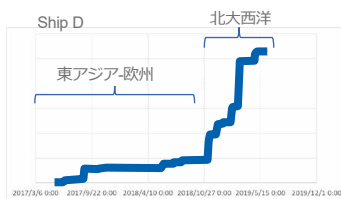
デジタルツインは、実空間における物体の状態をモニタリングや数値シミュレーションによってサイバー空間上に再現する技術である。前記重点研究では、デジタルツイン技術を利用して、船舶の運航支援、点検・保守管理、新設計の高度化・合理化を図ることを目的に研究開発を行なった。ハルモニタリングシステムとDLSAによる数値シミュレーションとのデータ融合によって高精度な船体構造デジタルツインを構築した。さらに船体構造デジタルツインに必要な要素技術を集約したプラットフォームとして、デジタルツイン統合システム i-SAS を開発し、水槽実験及び実船でシステムの精度及び機能を検証した。

### 2.2.1 ハルモニタリング

前期重点研究の前半において、ハルモニタリングに関する調査研究を行なった。その一環で、国土交通省の支援の下、14000TEU 型コンテナ船のハルモニタリングに関する共同研究<sup>3)</sup>に参画し研究を行った。ハルモニタリングで得られた10隻のシリーズ船の船体応力を解析して、最大荷重や疲労寿命に対する運航・操船の影響を評価した。図-4(a)に各船・各計測部位での疲労被害度を示す（1隻は評価のため十分な期間のデータが取得できなかったため9隻になる）。疲労解析には重点研究で開発したハルモニタリングシステム<sup>4)</sup>を使用した。疲労被害度の差は主に航路の違いによって生じており、図-4(b)に示すように、北大西洋海域でより多くの疲労被害を蓄積すること等の知見を得た。



(a) 個船の疲労被害度



(b) 疲労被害の成長履歴

図-4 応力データにより推定した疲労被害度

### 2.2.2 データ同化手法

センサ数に限りがあるというハルモニタリングの弱点を補うため、データ同化技術を利用することで計測箇所だけでなく、船体全域の応力を求めることを目的に研究開発を行った。船舶が遭遇している波浪のスペクトルが分かれば、DLSA 等による応力応答関数を元に、船体の任意箇所の応力

が分かる。前記重点研究では、船上モニタリングデータを元に波スペクトルを逆算する「波スペクトル法」を開発して、弾性模型による水槽試験で検証した（図-5）<sup>5)</sup>。実海域再現水槽で造波した、向波（180度）と斜追波（300度）の2方向短波頂不規則波を、デッキ部4点（船体中央両舷及び船首から1/4L 両舷）の歪情報を用いて推定した。完全な一致を得るには未だ課題があるが、限られた歪情報から実用に耐える波浪スペクトル情報とこれに続く船体の状態量を知ることができる。

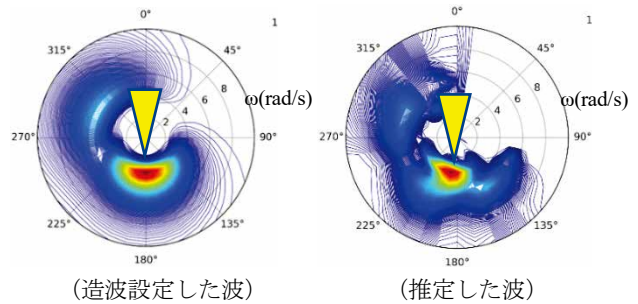


図-5 波スペクトル法を用いて推定した波浪スペクトル

### 2.2.3 デジタルツイン統合システム

船体構造デジタルツインシステムは、波スペクトル法の他、「逆有限要素法(iFEM)」, 及び「カルマンフィルタ法」のデータ同化手法<sup>5)</sup>を実装している。いずれも限られた計測点から任意の点の応力を得るための手法である。これらのデータ同化プログラム等の機能を統合したシステムを、共同研究を通じて開発した<sup>6)</sup>。デジタルツイン統合システム i-SAS (integrated Structural Analysis System) は、計測・解析・可視化をリアルタイムに接続可能なデジタルツインシステムを構築するためのツール群及びデータのプラットフォームを提供する。i-SAS の表示画面 GUI の例を図-6 に示す。図は4つの画面を同時に表示したものである。船の状態や計測箇所・時系列波形、及び一次解析やデータ同化手法による解析の結果等を統合して確認できる。i-SAS は船体構造のデジタルツインだけでなく、流体性能や機関など、海技研で開発中のデジタルツインとの統合・拡張性をもつ。また、船舶だけでなく、洋上風力発電装置等の海洋構造物等にも拡張して利用することができる。



図-6 デジタルツイン統合システム i-SAS



### 3. 今期の研究計画

船舶の運航・設計・建造の高度化に資することを目的として、7年間の重点研究計画を立てた。今期の重点研究の全体概要を図-7に示す。前記重点研究の成果を利用・発展させて「ライフサイクル安全監視・支援システム」の構築を目指す。本重点研究では、目標達成に必要な要素技術の研究開発を行なう。重点研究計画に掲げた研究項目を1.~5.に示す。項目ごとに研究期間内にマイルストーンを設定し、個別に成果を得るとともに、個別の成果を随時システムへ集約することで目標の達成を図る。

1. 建造・運航モニタリングデータによる全船構造シミュレーションを活用した設計・建造・保守支援システムの開発
  2. 船体応答計測に基づく非線形構造応答及び強度の推定技術
  3. 船体の環境・塗装劣化・腐食進行モニタリングによる管理・修繕支援技術
  4. 船体外板の in-situ モニタリングによるメンテナンスの高度化
  5. 事故時の安全性評価並びに海難事故解析のための評価ツール開発に関する研究
- 各研究項目の詳細について次節以降で説明する。

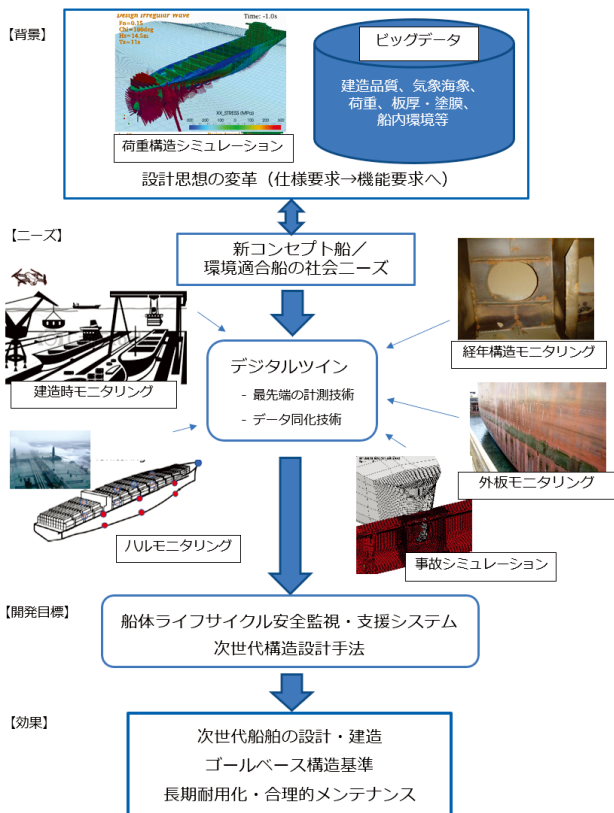


図-7 今期の重点研究の全体概要

#### 3.1 設計・建造・保守支援システムの開発

全船構造シミュレーションを活用した設計・建造・保守支援システムの開発を目標として研究を行なう。研究の要素課

題を以下に示す。

- ① ライフサイクル安全性確保及び生産・作業支援のため、建造・運航モニタリングデータを活用した設計・建造・保守支援システムの開発
- ② 建造時の精度・誤差，経年劣化を考慮した降伏・座屈・疲労・最終強度を評価可能な安全設計システムの開発
- ③ リスクベースメンテナンス手法及び合理的な船体品質の評価技術の確立
- ④ 建造時や点検・修繕時における作業効率及び安全性向上に資するMR等を活用した支援システムの開発
- ⑤ 総合システムの開発

例として，上記②のシステムに搭載予定の SfM (Structure from Motion : 地図・地理情報の分野では実用されている手法で，造船の分野でも海外では適用され始めている<sup>7)</sup>) による3D形状生成のイメージを図-8に示す。本手法を適用することでブロック寸法，初期撓み等の工作精度を抽出する。これにより，全船 FE モデルを基に建造誤差，初期不整を有した構造解析用全船モデル及び搭載シミュレーター用のブロック及び搭載済みモデルを作成し，解析に供する。

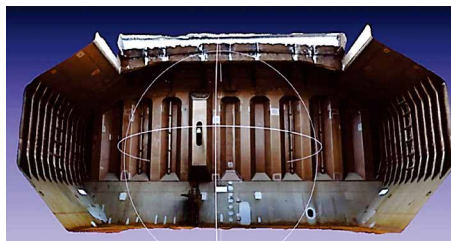


図-8 SfM によるカーゴホルドの3D形状再現モデル例

#### 3.2 非線形応答の推定技術

波浪中運航支援及び合理的な構造設計の実現のため，実データ及び数値シミュレーションに基づく非線形荷重・構造応答推定及び強度評価に関する研究を行なう。研究の要素課題を以下に示す。

- ① 粒子法等による非線形船体応答推定手法の研究・開発
- ② オンボードにおける非線形応答及び強度の推定に向けた高速化手法の開発
- ③ 極値応答予測への非線形統計予測法の適用
- ④ 波浪情報の不確実性解析手法の開発
- ⑤ 構造模型による水槽試験及び実船データを用いた検証

一例として，粒子法を用いた非線形船体応答の解析の例を示す。粒子法-パネル法連成法 (Hybrid 法) を用いて，LNG 船の船体タンク連成解析を行なった (図-9)。Hybrid 法ではタンク内流体力を粒子法で，船体運動をパネル法でシミュレートしている。線形計算との比較により，Hybrid 法でタンク内スロッシングを再現できていることが分かる。本重点研究では，実海域不規則波中での大波高対応への機能拡張及び精度向上に取り組む。

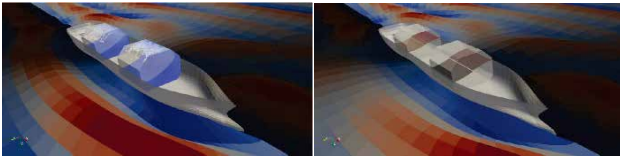


図-9 粒子法を用いた非線形船体応答の解析の例  
(左, 粒子法パネル法のHybrid法, 右: 線形パネル法)

### 3.3 船体維持管理・修繕支援技術

船体の環境・塗装劣化・腐食進行モニタリングによる腐食発生・進行の推定精度向上及び評価システムの開発を行う。研究の要素課題を以下に示す。

- ① 腐食環境予測及びモニタリングを組み合わせた船体構造の塗装劣化・腐食進行推定プログラムの開発
- ② 船舶における腐食環境で長期耐久可能な塗装劣化・腐食進行検知センサの開発
- ③ 実船試験及び推定法の適用によるモニタリング・推定システムの検証
- ④ 塗装劣化・腐食進行推定結果を全船構造解析へ反映するアプリケーション開発

本研究計画の概要を図-10に示す。実船の環境を入力パラメータとし、船体構造の腐食衰耗量を予測モデルに基づいて推定するアプリケーション及びそれを全船構造解析用のFEモデルに反映可能なアプリケーションを開発する。これと平行して、実用的なセンサの開発に取り組む。

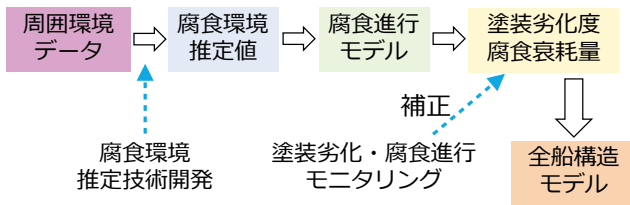


図-10 塗装劣化・腐食進行推定システム及び全船構造解析への反映の流れ

### 3.4 船体外板の in-situ モニタリング

船体の合理的メンテナンスに資するため、船体外板の in-situ モニタリングによるメンテナンスの高度化に向けた研究を行う。研究の要素課題を以下に示す。

- ① 塗膜条件の差異等が塗膜計測に及ぼす影響の調査
- ② 多波長計測等による外板表面への生物付着検出技術の検討
- ③ 実船の外板塗装表面状態等の調査

例として、①の初年度の研究内容を示す。船体外板に塗装される防汚塗料は様々な種類が使われている。また、実際の運航中の船の外板は複数回塗装を塗り重ねたこと等により平滑ではなく凹凸になっていることも多い。こうした塗層表面形状や塗料種別などの差異が超音波による膜厚計測結果にどのような影響を及ぼすかは明らかになっていない。そこで

i) 複数種の防汚塗料それぞれを使用した試験片, ii) 塗膜表面に凹凸のある試験片などを作成し、塗膜条件の違いが超音波計測に及ぼす影響を実験的に調査する。加えて、超音波による膜厚計測の分解能を見極めるため、iii) 膜厚を細かく変化させた試験片を作成し、超音波計測実験を実施する。これまでの検討では、塗装膜厚と超音波エコー（の一部成分）の時間遅れの間に関係があることが明らかになっている（図-11）。塗膜条件の差異により、この関係がどのように変化（線形近似のパラメータが変化、非線形に変化など）を調査する。

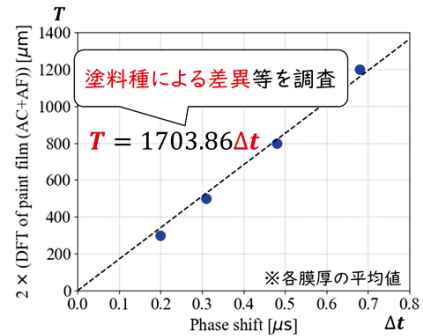


図-11 超音波エコーの位相変化と塗装膜厚との関係

### 3.5 事故時の安全性評価並びに海難事故解析のための評価ツール開発

当所は、国の運輸安全委員会等の委託を受けて、海難事故の事故原因究明に資する解析等を実施している。様々な事故解析に迅速かつ的確に対応するために、既存のツールに加えて、常に最先端の技術を取り入れ、事故原因究明のための最適なソリューションを社会に提供することが重要であると考えている。一方、一部の船舶の設計規則において、事故限界状態（Accidental Limite State : ALS）においても一定の強度（船体が折損しない等）を保持することが義務付けられるようになってきており、設計段階から、事故時の安全性評価が必要となってきたものもある。

このような背景から、海難事故解析技術の高度化・迅速化、事故時の安全性評価に資するツールの開発に関する研究を行う。研究の要素課題を以下に示す。

- ① 数値水槽を用いた流体構造連成及び構造破壊を考慮した事故再現シミュレーションツールの高度化、簡易推定手法の検討・開発
- ② 事故時の AIS 活用技術の高度化・迅速化（衝突危険度評価技術の半自動化等）
- ③ リバースエンジニアリングを用いた事故船体及び損傷部位のデジタイジング・システムの開発
- ④ 海難事故データベース（DB）システムの構築・拡充及びその類型化

図-12は、①で用いる、数値水槽モデル（1km×1km）における規則波中での小型船の動揺解析例である。これまで、船舶の非線形形の動的構造解析では、海水影響を圧力荷重等与えることが多かった。しかし、近年、開発された数値計算手

法及び大規模並列 PC クラスタ計算機を用いることにより、現実的な時間内で、流体構造連成+構造破壊までを考慮した非線形シミュレーションが実施できるようになりつつあり、当該技術を事故解析等に迅速に活用できるようにすることを目指している。船舶が剛体であれば通常の CFD でも解析可能であるが、本研究で目指している手法では、流体構造連成と構造破壊（座屈崩壊や、船体折損等）を同時に扱えるようにすることがポイントとなっている。数値水槽を用いることにより、対象船舶のみを入れ替えることにより、効率的に事故解析等に対応することを目的としている。

図-13 は、②は、AIS データの活用技術の迅速化である。衝突事故等においては、事故後すぐに事故船の航跡を確認したいとの要請があることがある。このような要請に迅速に対応するために、AIS の可視化システムを迅速化するものである。本研究では、既存のツールの機能統合や改修を行い AIS データを半自動的に取得し、かつ、船舶位置の動画データを再生するツールを整備する。

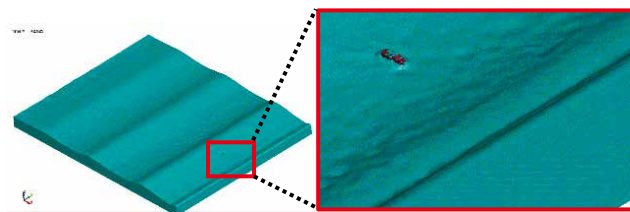


図-12 数値水槽を用いた波浪中（規則波）の小型旅客船の船体運動解析例

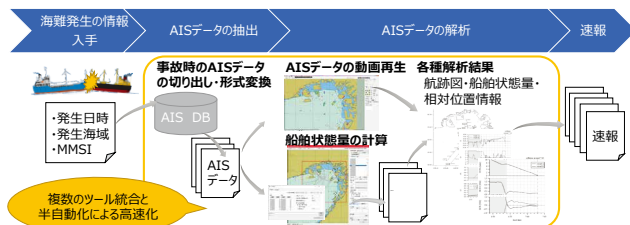


図-13 AIS 活用技術の高度化・迅速化概念図

#### 4. 今後の展望

本重点研究では、これまでに開発してきた数値シミュレーションシステム及びデジタルツインシステムを高度化することでユーザの拡大を目指す。各サブテーマで個別のニーズに対応して実用化を図り、データ連携によりライフサイクルでの安全監視・支援を行うシステムの開発に取り組む。開発したシステムを、ゼロエミッション船等の次世代船舶の安全な設計・建造・運航に欠かせない標準システムとしての定着・普及を図るため、機能・精度の拡充に向けた研究開発を行う。各研究項目の出口戦略を以下に示す。

- ・設計・建造・保守支援システムによるライフサイクルでの船体安全性の確保
- ・非線形船体応答シミュレーションプログラムの安全運航利用及び安全率の適正化等の設計利用

- ・塗装・腐食の予測・計測・評価システムによる安全確保及び長期耐用化
- ・船体外板モニタリングシステムによるメンテナンス工数の削減
- ・海難事故解析・評価ツールによる迅速な海難事故対応環境の構築

#### 5. まとめ

前期重点研究「船舶の新構造基準作成に資する先進的な荷重・構造強度評価及び船体構造モニタリングシステムの開発に関する研究」での成果、及び研究成果の活用・発展・普及を目指して計画した今期重点研究「船体構造評価技術に関する研究」の概要を述べた。今後7年間の中長期計画の研究を通じて、データ及びシミュレーションを基盤とした次世代構造設計手法の開発及び標準化を含む普及促進を図るとともに、デジタルツイン等の新技術により船舶の安全安定運航の実現に貢献する。

#### 謝辞

本研究は、日本財団のご支援の下、（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」で実施された内容を含みます。また、官民学共同研究プロジェクト「14000TEU 級大型コンテナ船の船体構造ヘルスマニタリング」で実施された内容を含みます。各研究プロジェクト及び関係各位に謝意を表します。

#### References

- 1) 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.
- 2) 松井貞興，村上睦尚：構造設計のための非線形波浪荷重解析プログラム NMRIW-II，海上技術安全研究所報告第 17 巻第 3 号，pp.33-293, 2017.
- 3) 岡田哲男他：14,000TEU 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の概要，日本船舶海洋工学会講演会論文集第 24 号，pp.31-35, 2017.
- 4) 馬沖他：船上モニタリング用マルチユーザ・フレキシブル・遠隔監視システム（P 第 11237-1）2022.5.
- 5) 岡正義他：船体構造デジタルツイン構築のためのデータ同化技術，日本船舶海洋工学会講演会論文集第 34 号，pp.133-136, 2022.
- 6) 三上航平他：デジタルツインシステムプラットフォーム i-SAS の開発と水槽試験におけるシステム検証，日本船舶海洋工学会講演会論文集第 34 号，pp.145-147, 2022.
- 7) Kolyvas, E., Drikos, L., et al.: Application of photogrammetry techniques for the visual assessment of vessels' cargo hold., 16th International Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean, IMAM 2015, 2015.