



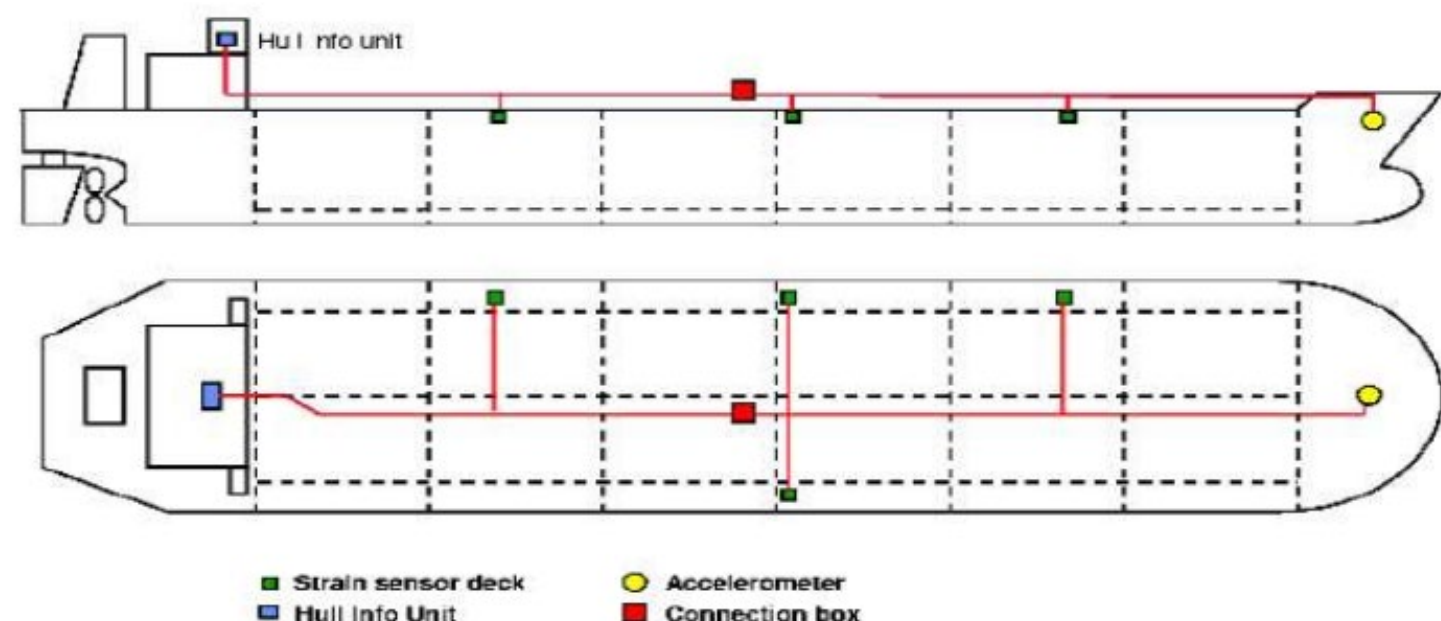
第22回 海上技術安全研究所研究発表会



船体構造デジタルツインシステムの開発と 水槽試験による検証

小森山祐輔*, 三上航平**, 宝谷英貴**, 陳曦*, 馬冲*, 辰巳晃***, 村山英晶**, 岡正義*

*海上技術安全研究所 構造・産業システム系, **東京大学大学院, ***大阪大学大学院



ハルモニタリングシステム
(Light Structure社)

安全な運航

安全な船体の
設計

効果的な保守

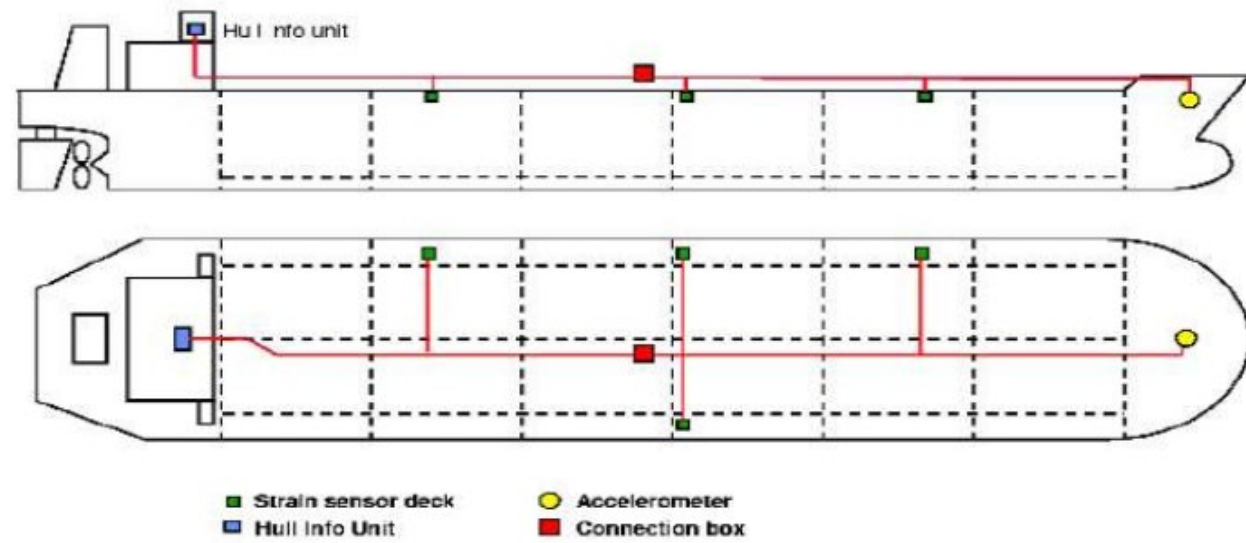
船の付加価値
向上

ハルモニタリングによる
期待される効果

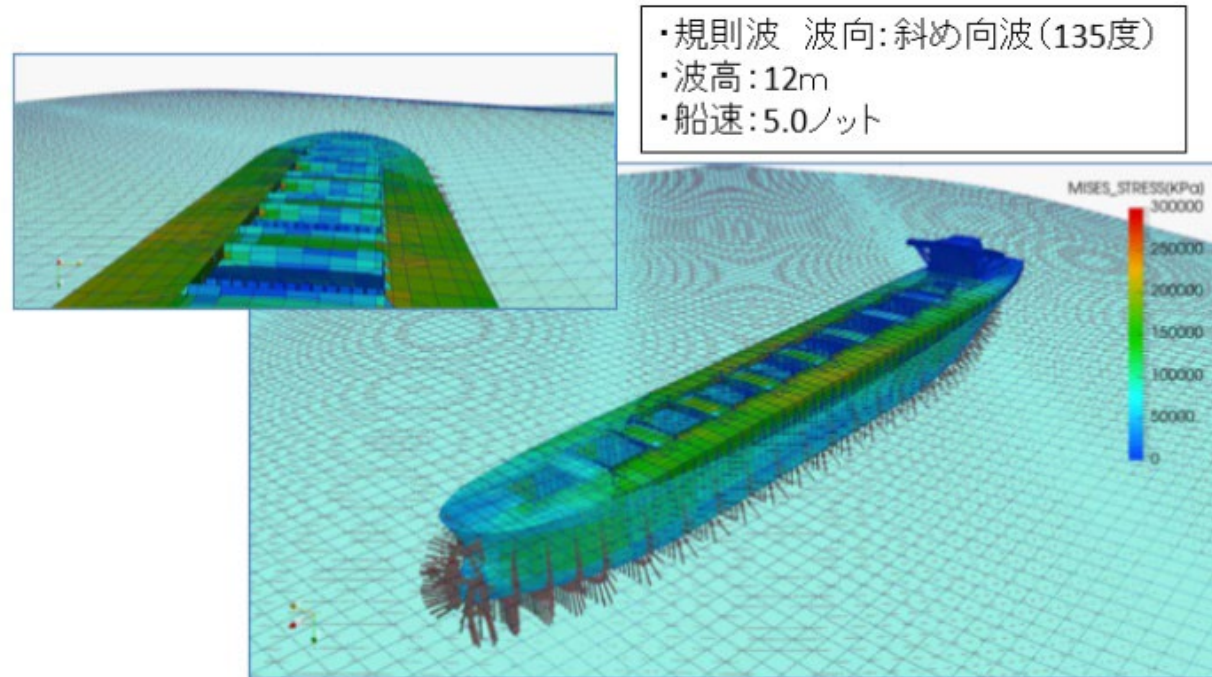
航行中の船体の状態をモニタリングすることは、安全な運航など様々な効果が期待できる。

→ハルモニタリングシステムによる船体の状態モニタリングが実施されてきた。

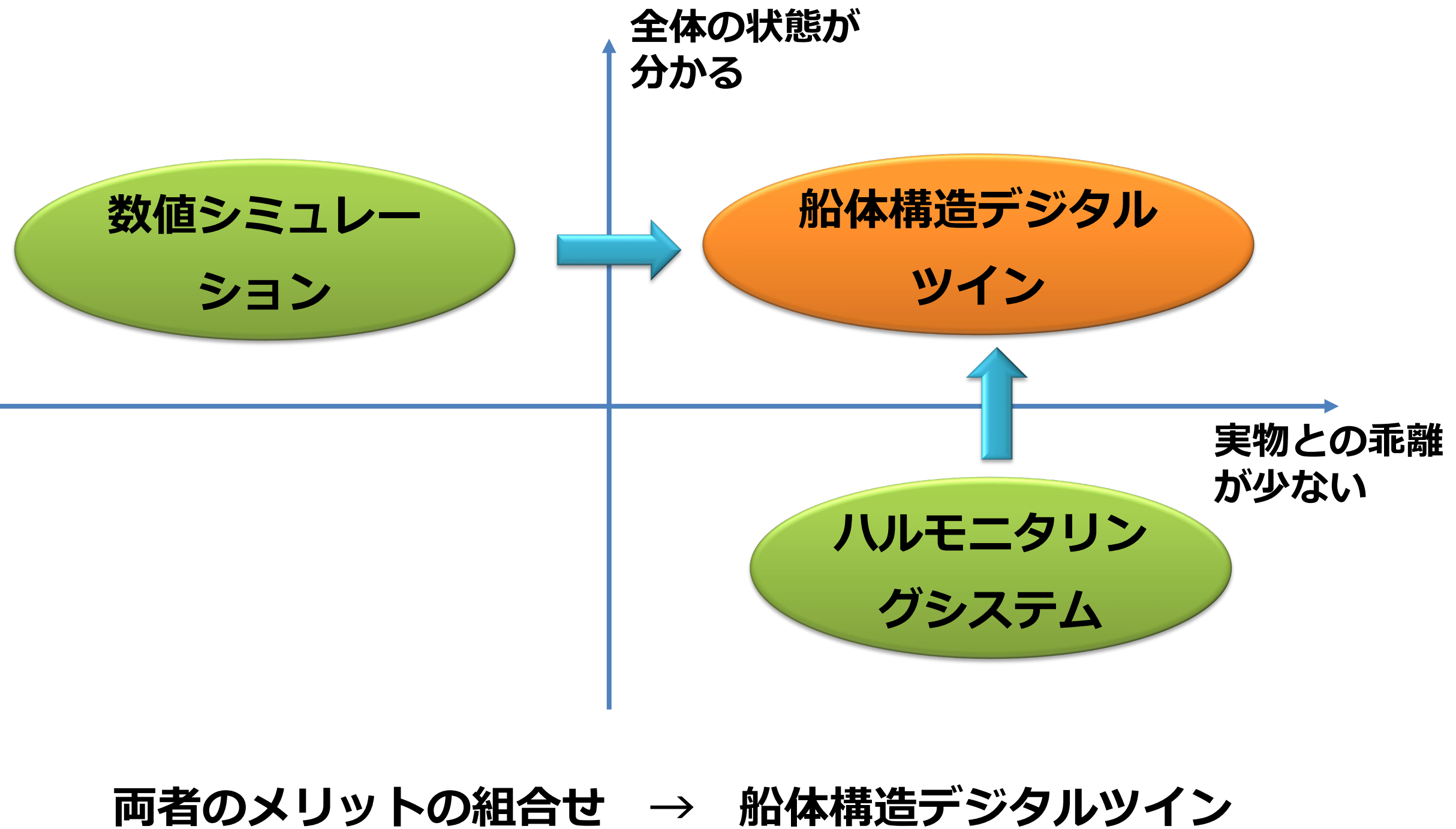
→計測データの利用方法に課題があり、期待された効果が得られていない。



ハルモニタリングシステム
(Light Structure社)



数値シミュレーション
(荷重構造一貫解析システム: DLISA)

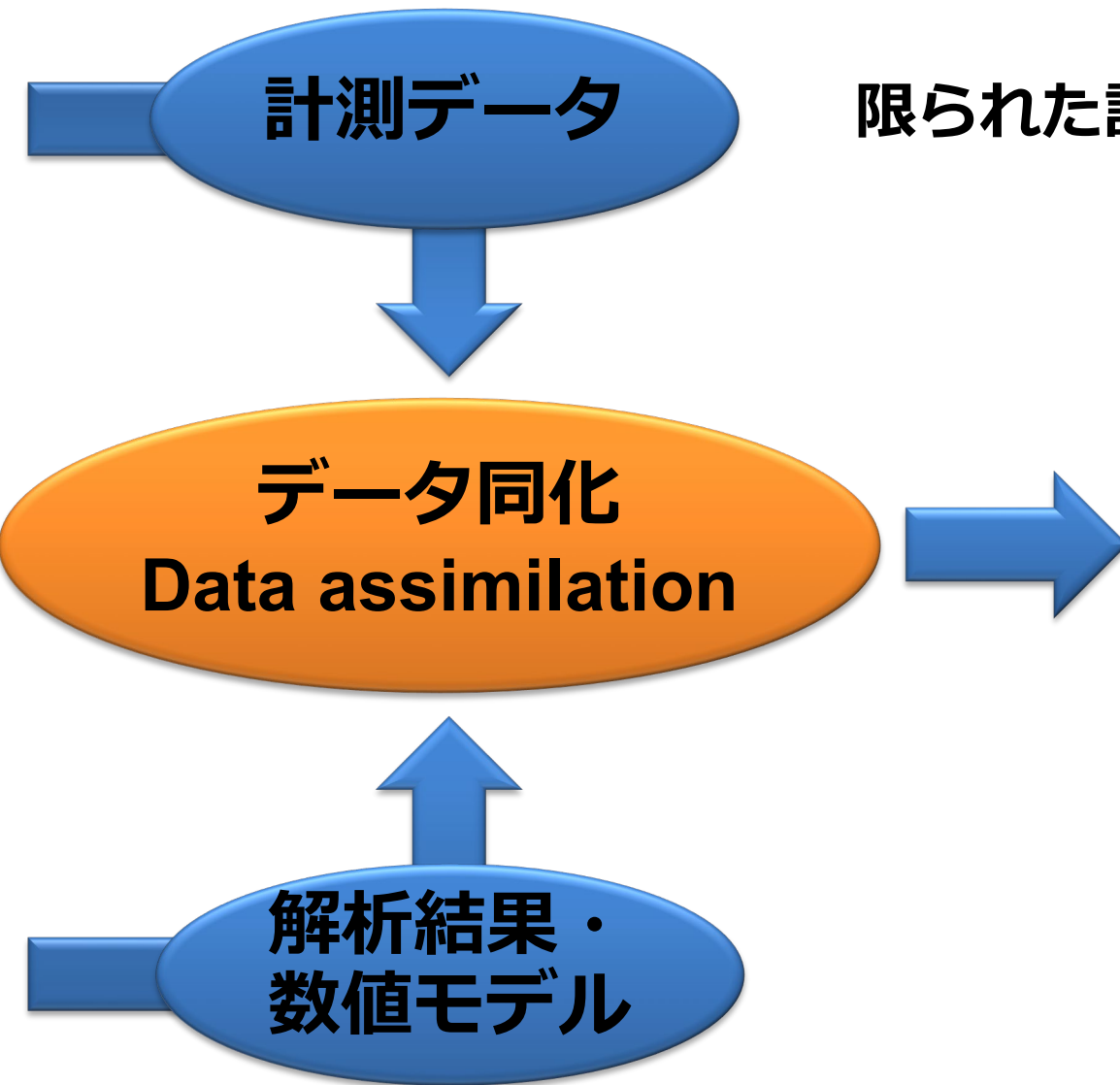


船体構造デジタルツイン・データ同化

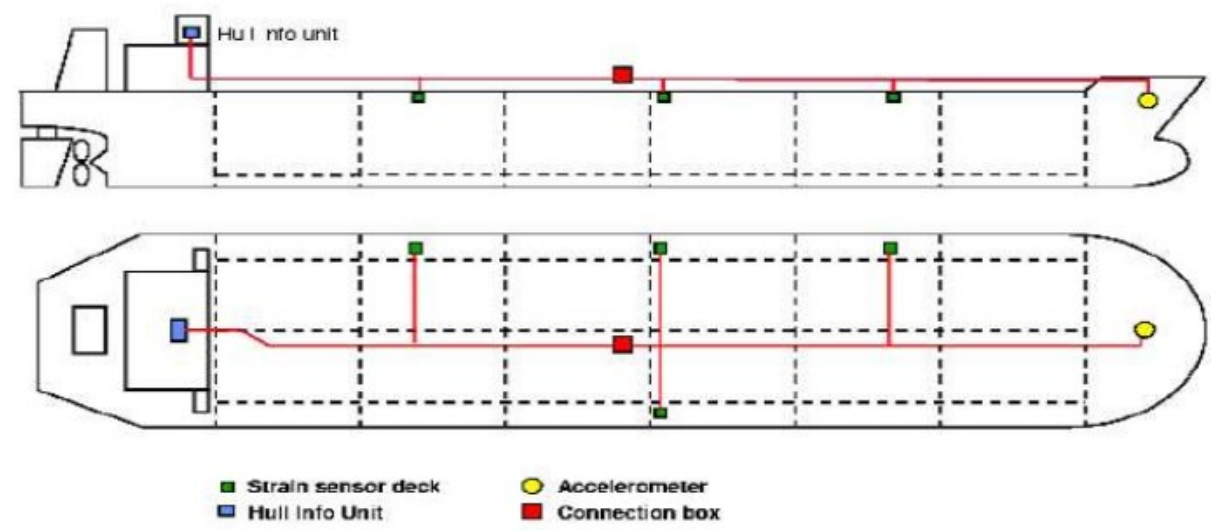


【ハルモニタリングシステム】 + 【数値シミュレーション】
= 【船体構造デジタルツイン】

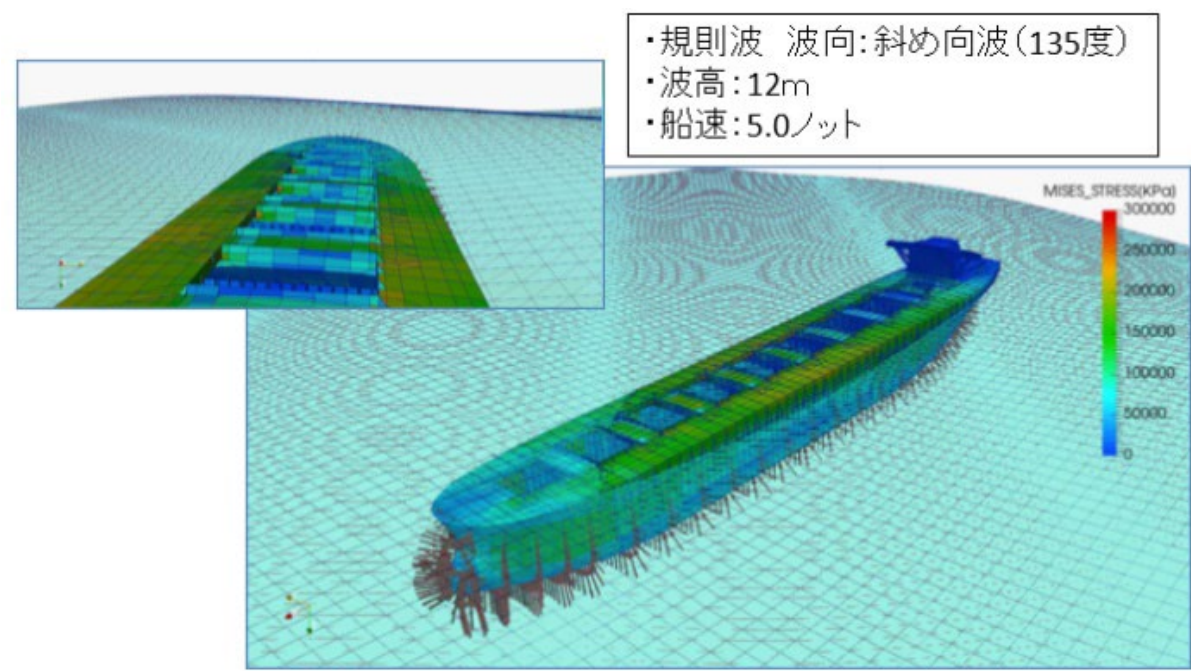
限られた計測データを基に、船体全体の状態を推定可能



船体構造デジタルツイン



ハルモニタリングシステム



数値シミュレーション

船体構造デジタルツインとは？

→ハルモニタリングシステムで得られる計測データと、数値シミュレーションを**データ同化**により組み合わせ、仮想空間上に対象船体全体の状態を再現する。

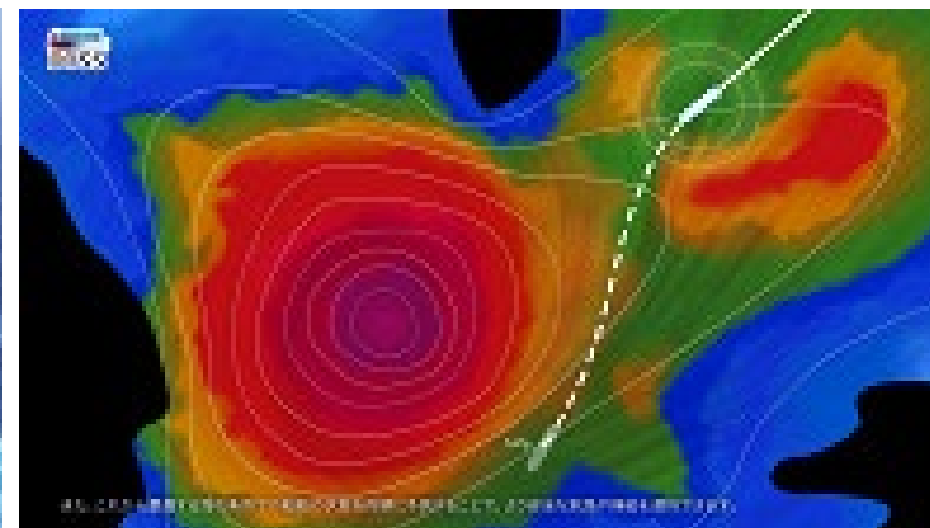
船体構造デジタルツインの効果



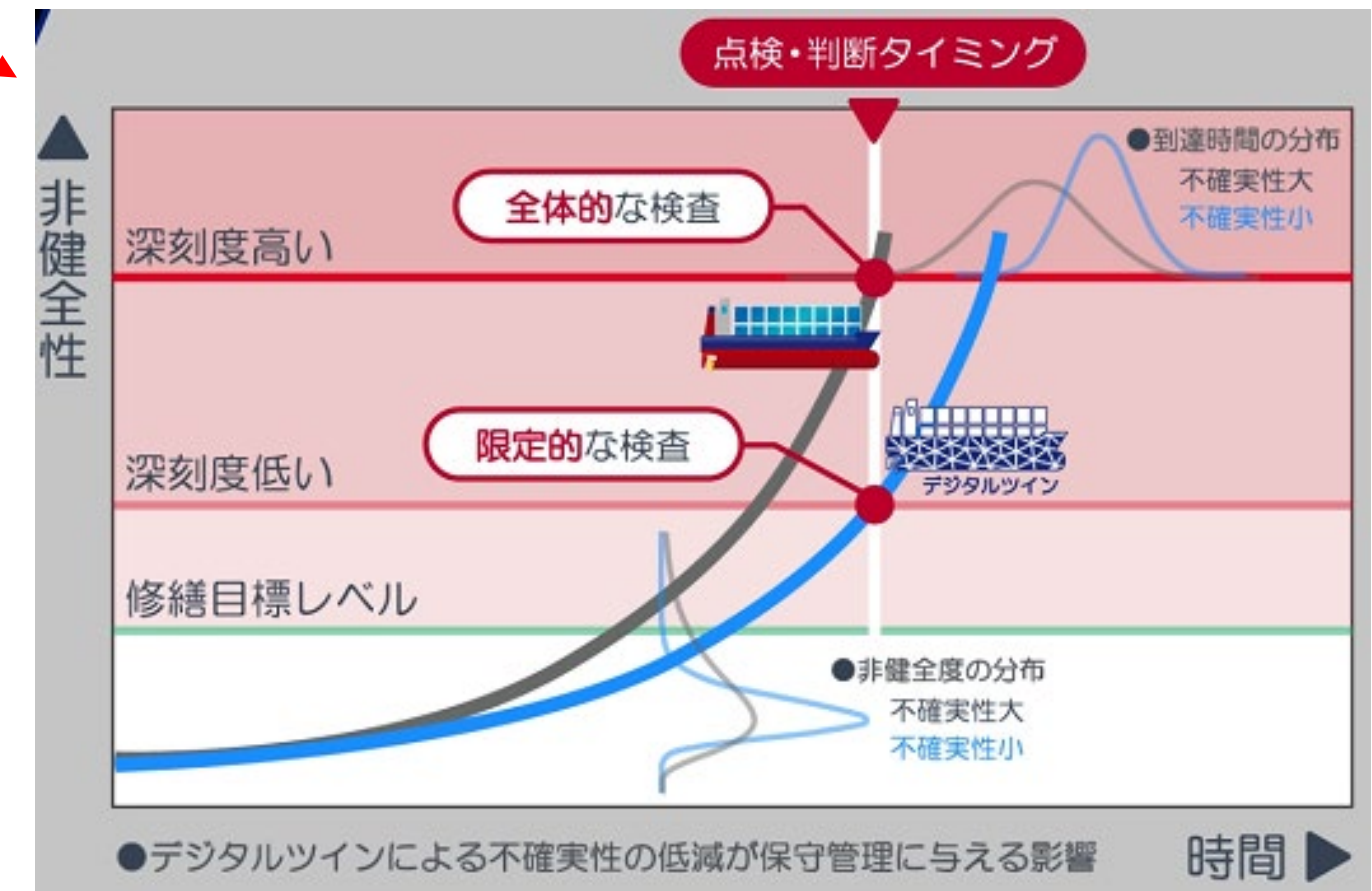
船体構造デジタルツイン



メンテナンス業務の効率化



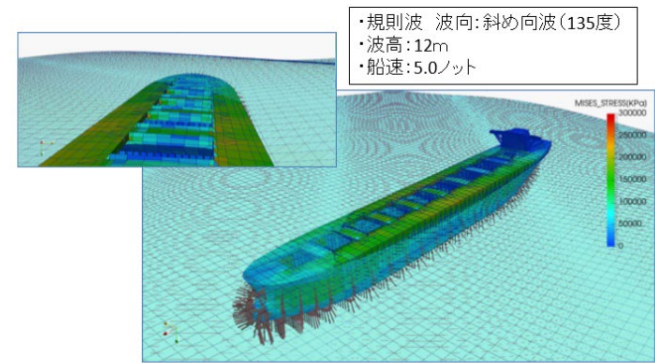
操船支援



検査の効率化・最適化

船体構造デジタルツインを実現することで様々な効果が期待できる。

船体構造デジタルツインの構成要素



Simulation

データ同化
Data assimilation

データ計測
Data measurement

データ可視化
Data Visualization

船体構造デジタルツインシステム
(DTシステム)

船体構造デジタルツイン実現には様々なソフトウェア・ハードウェアが必要であり、一機関で開発することは困難なテーマである。

船体構造デジタルツインに関するプロジェクト



「超高精度船体構造デジタルツインの研究開発」

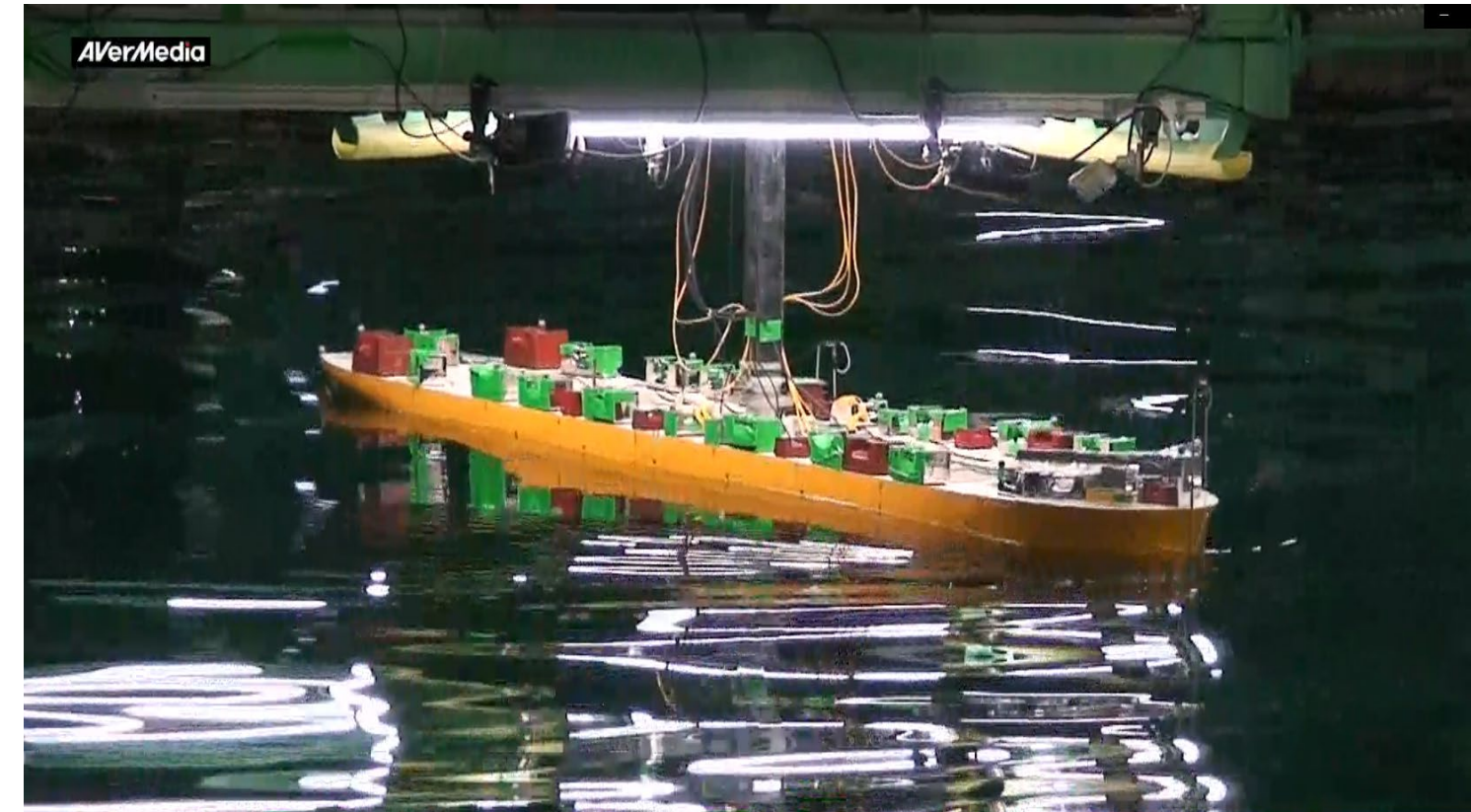
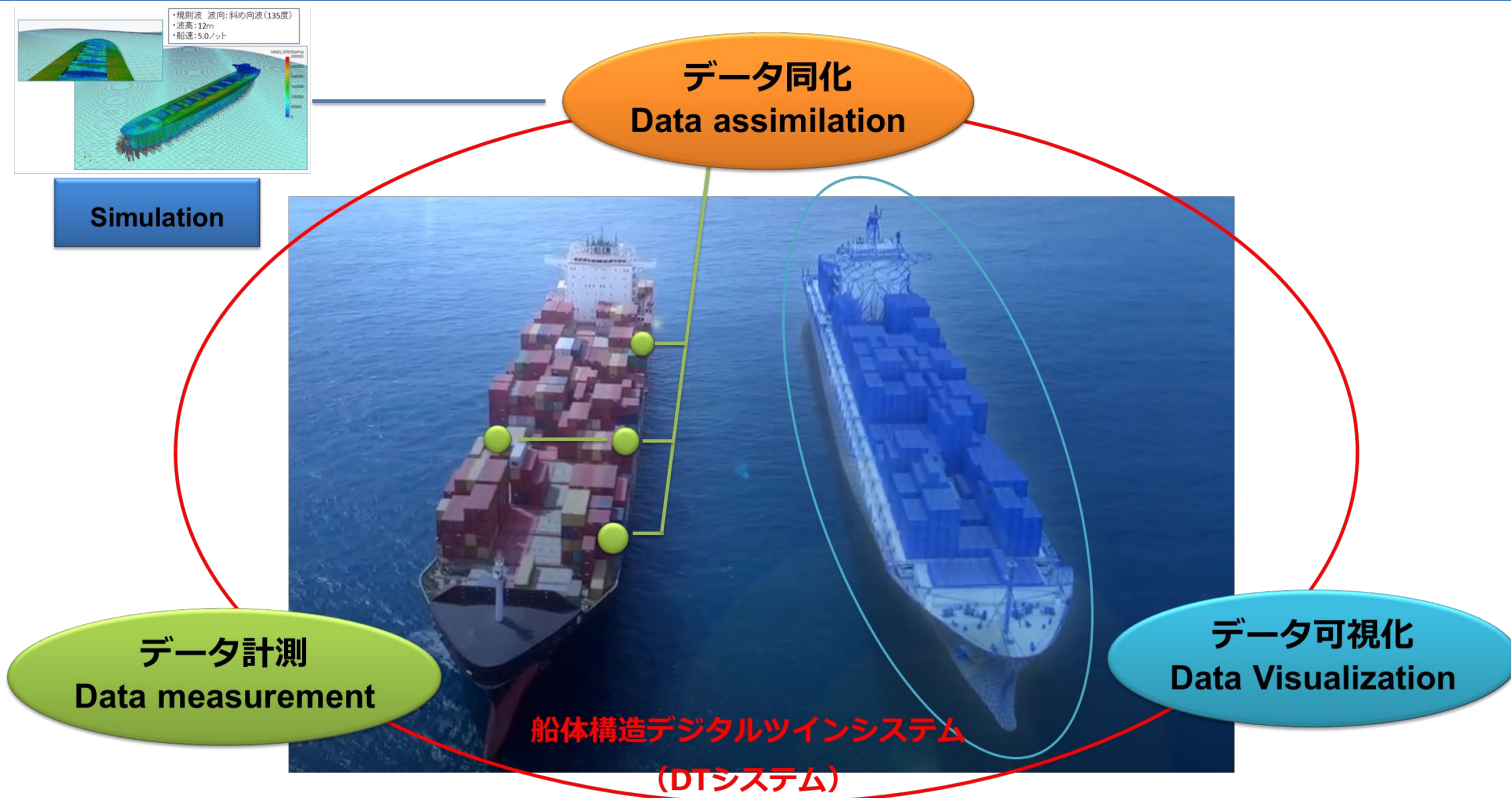
期間：2018年度～2021年度（4年間）

助成：（公財）日本財団

実施：日本船舶技術研究協会

多くの会社・機関が参加し、船体構造デジタルツインシステム（DTシステム）の開発および検証に取り組んだ。

データ同化・船体構造デジタルツインシステムの検証



船体構造デジタルツインの基盤技術であるデータ同化手法

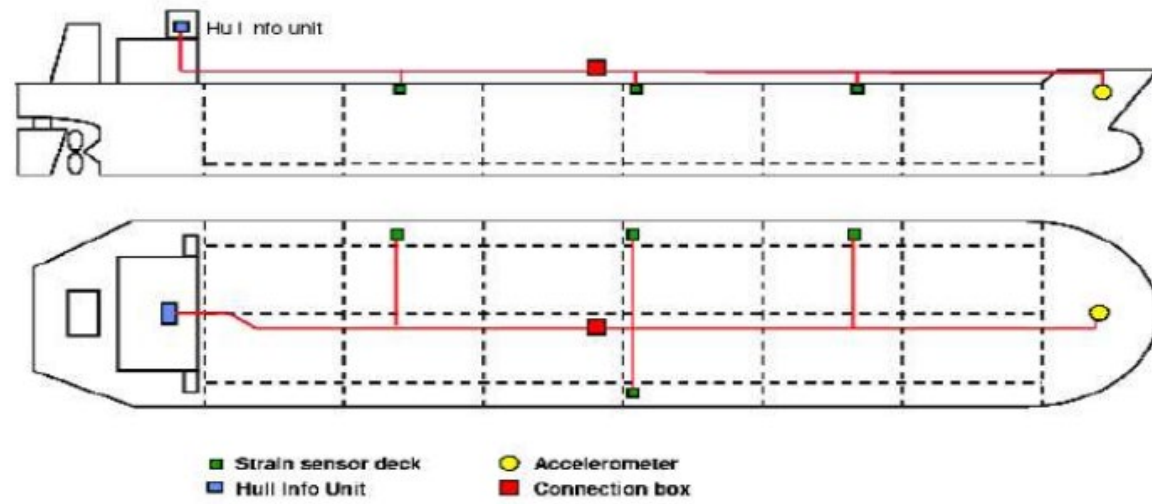
水槽試験による検証



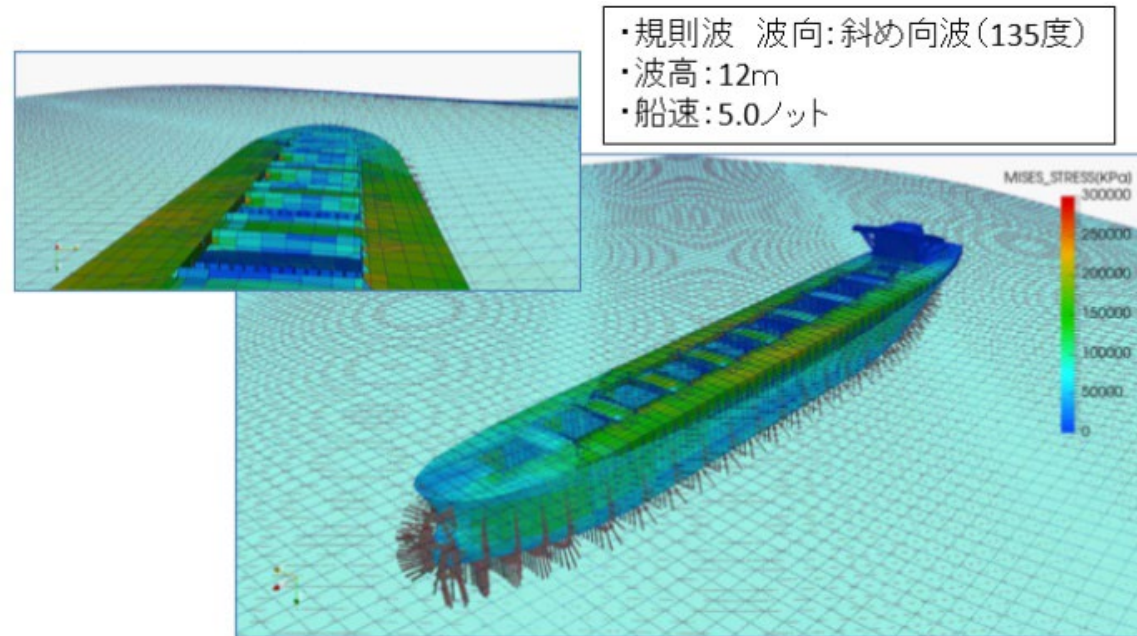
以下について発表する.

- ◆ データ同化手法
- ◆ オープンプラットフォーム
- ◆ 水槽試験による検証

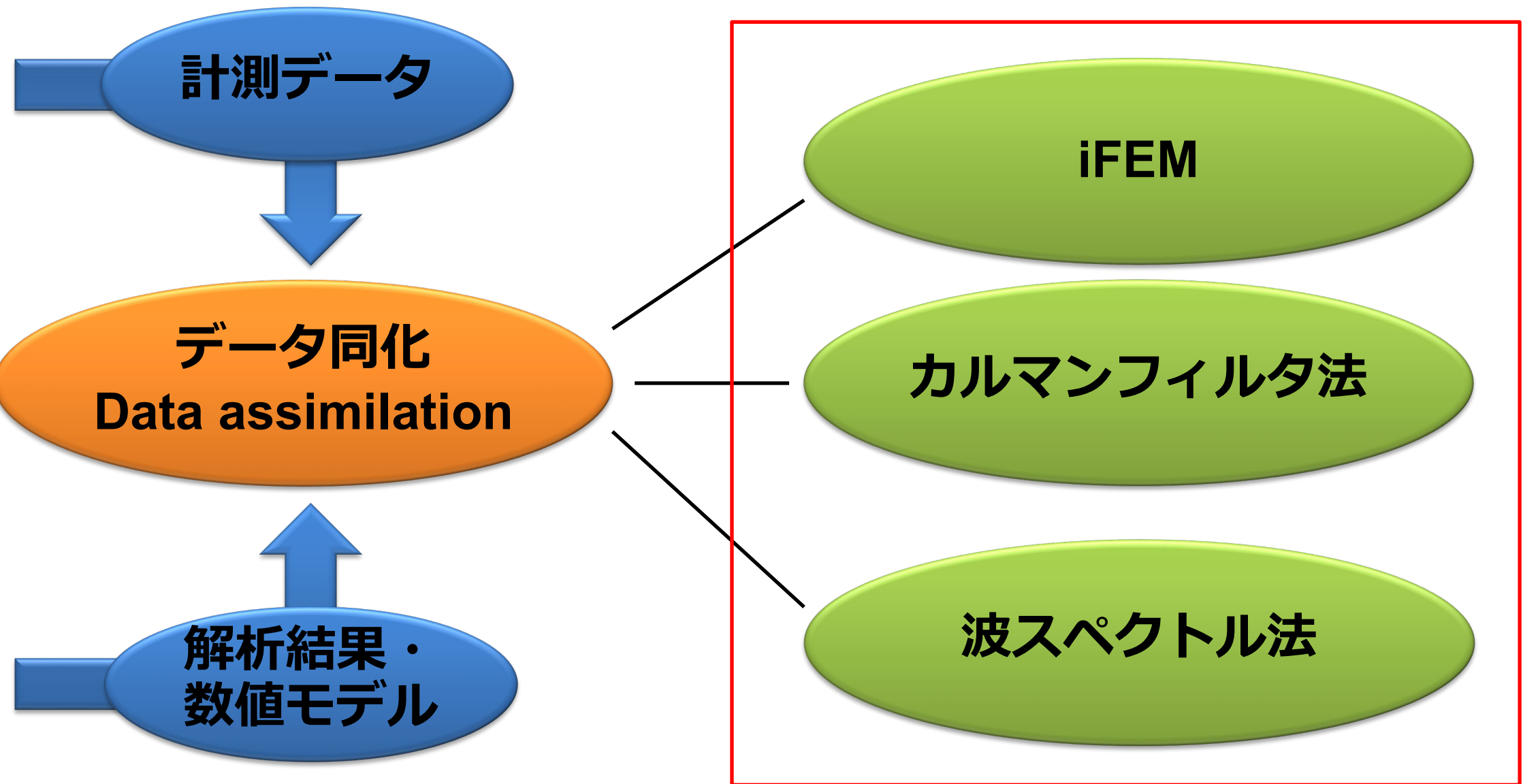
オープンプラットフォームによるDTシステムの構築



ハルモニタリングシステム

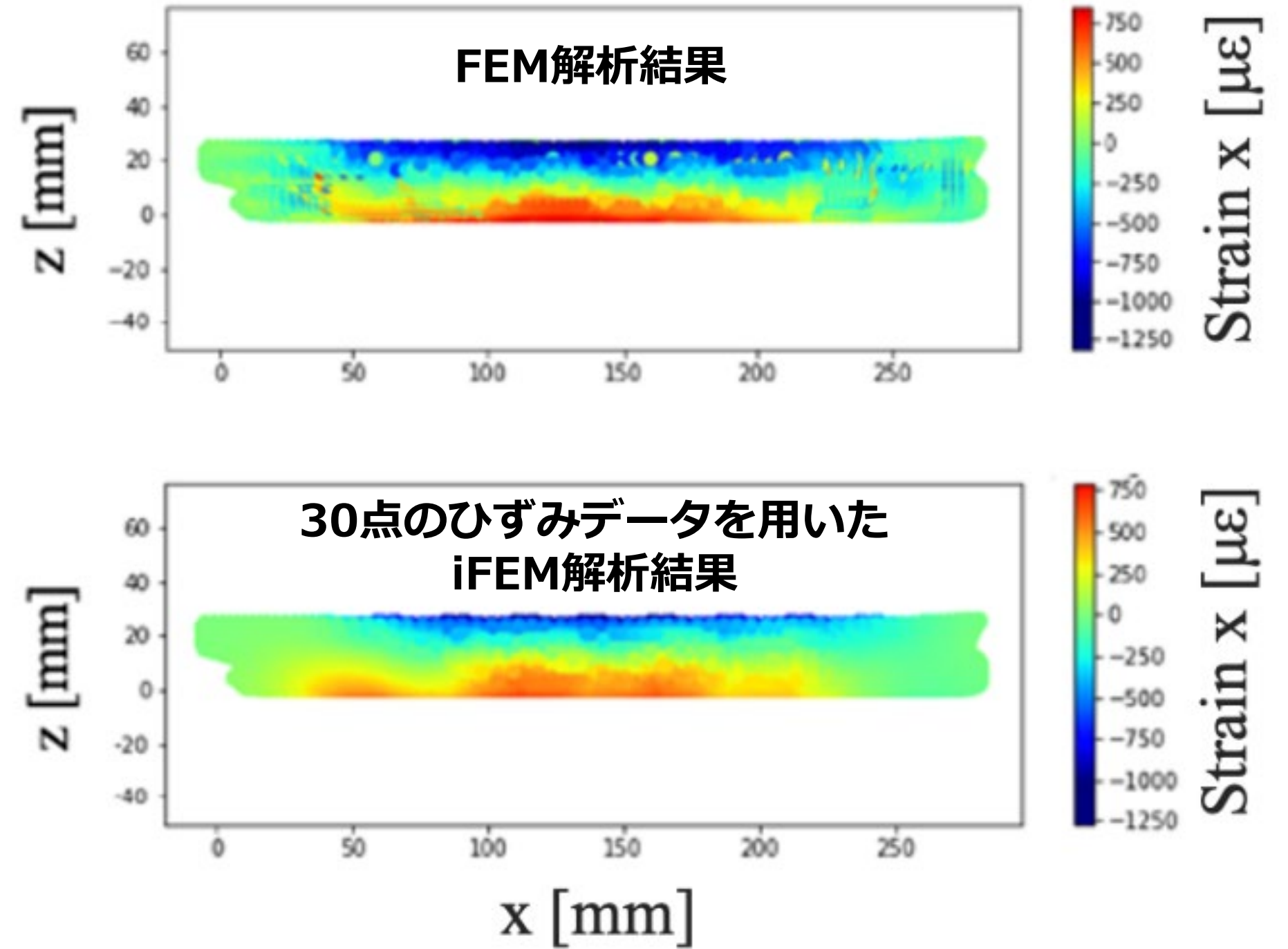
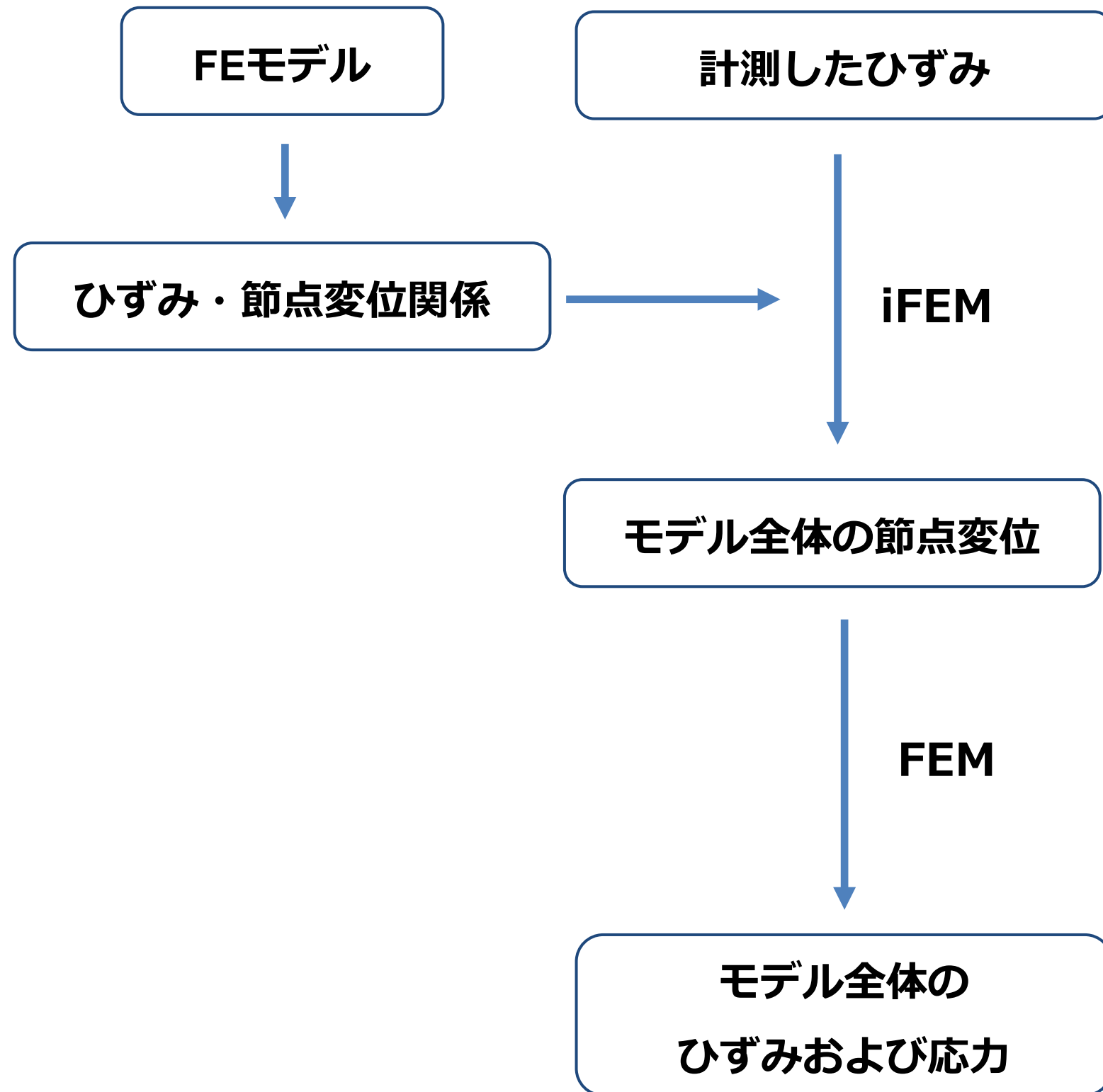


数値シミュレーション



データ同化手法

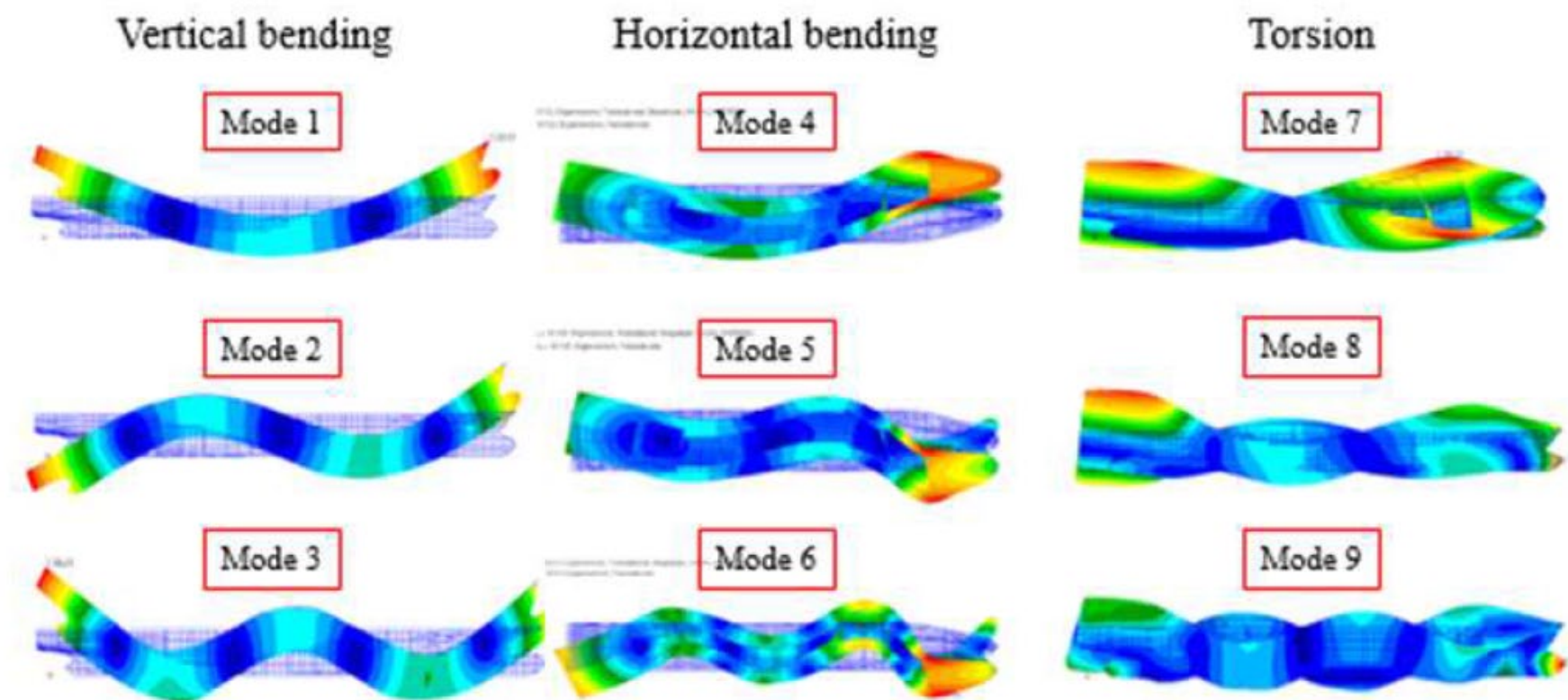
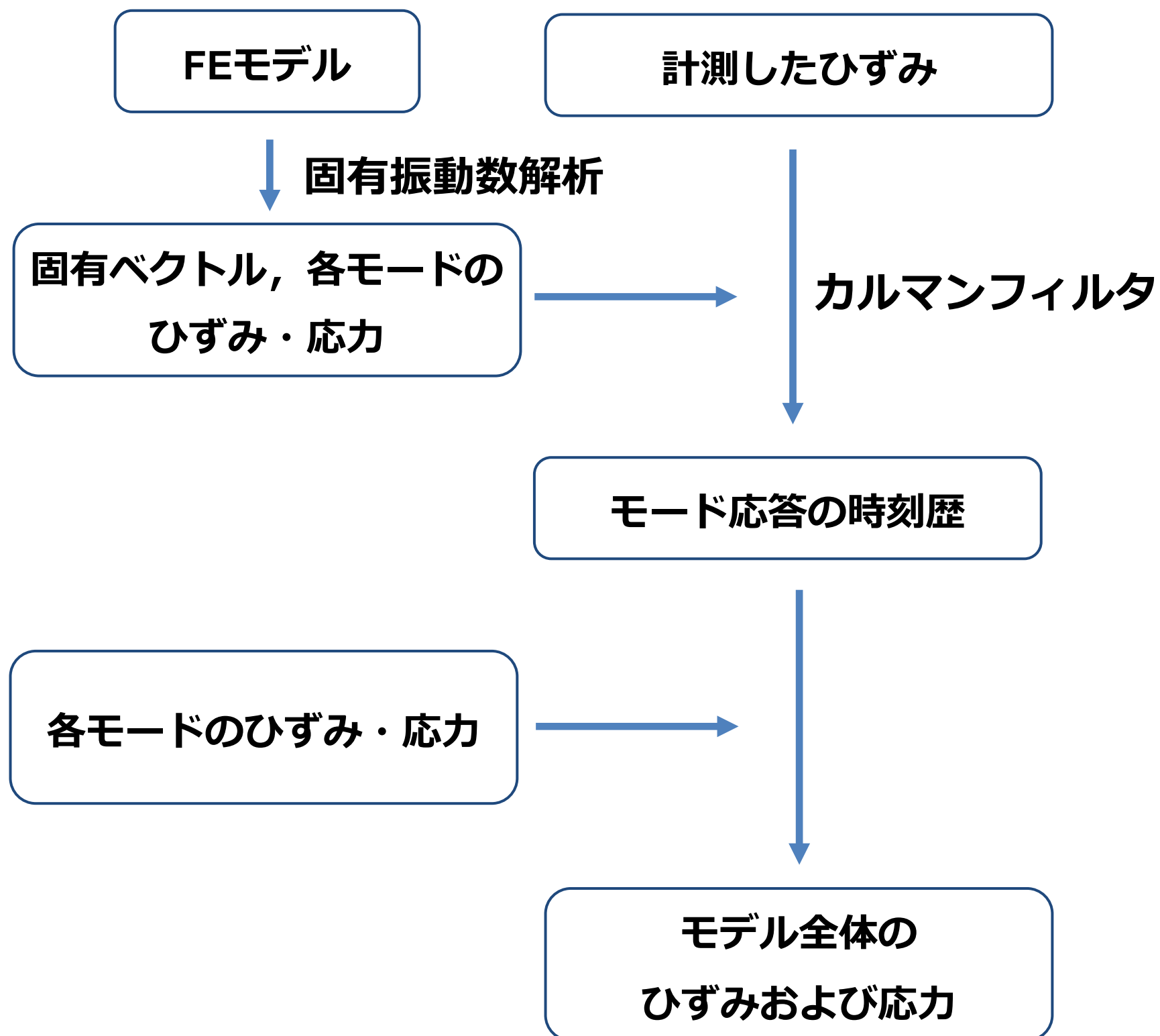
(iFEM : inverse Finite Element Method)



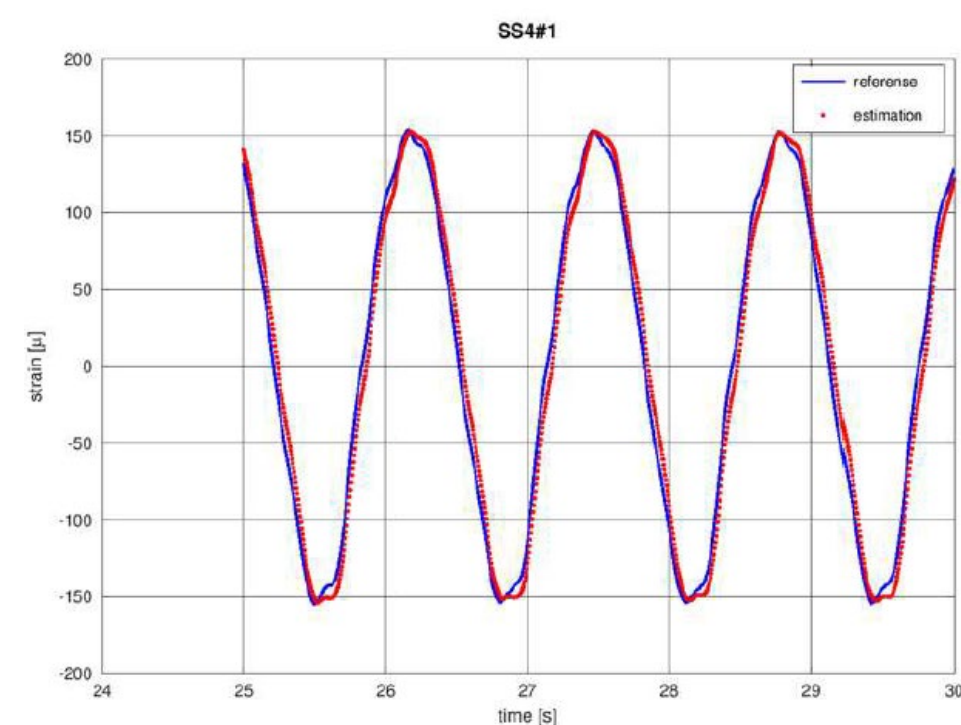
iFEMによる推定されたひずみの一例 [1]

[1] 三上航平 : ひずみ場補間を用いたiFEMの船体構造モニタリングへの適用検討, 2020.

データ同化手法 (カルマンフィルタ法)



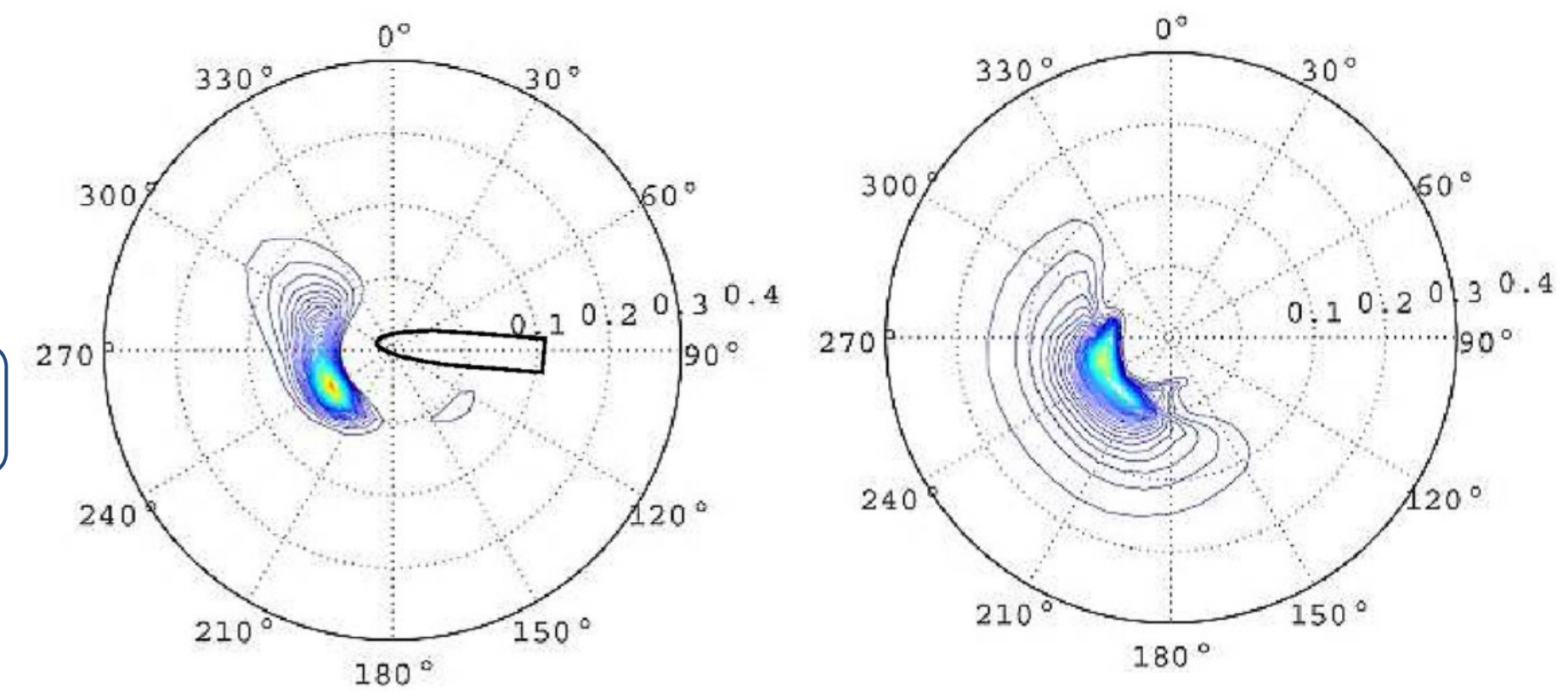
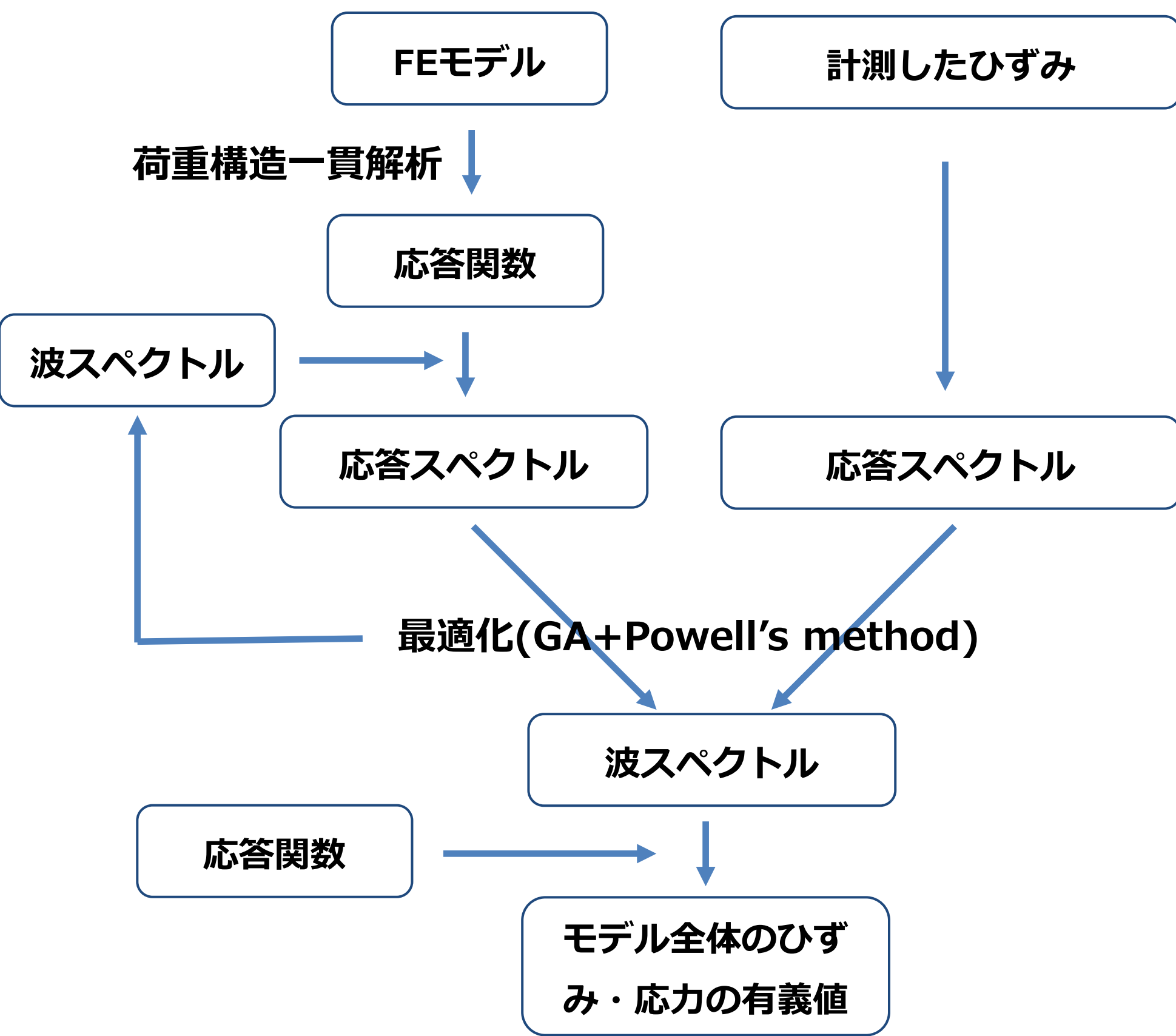
カルマンフィルタ法に用いる固有モードの一例 [2]



カルマンフィルタ法による推定されたひずみ
時系列の一例 [2]

[2] 飯島一博ら：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，2020.

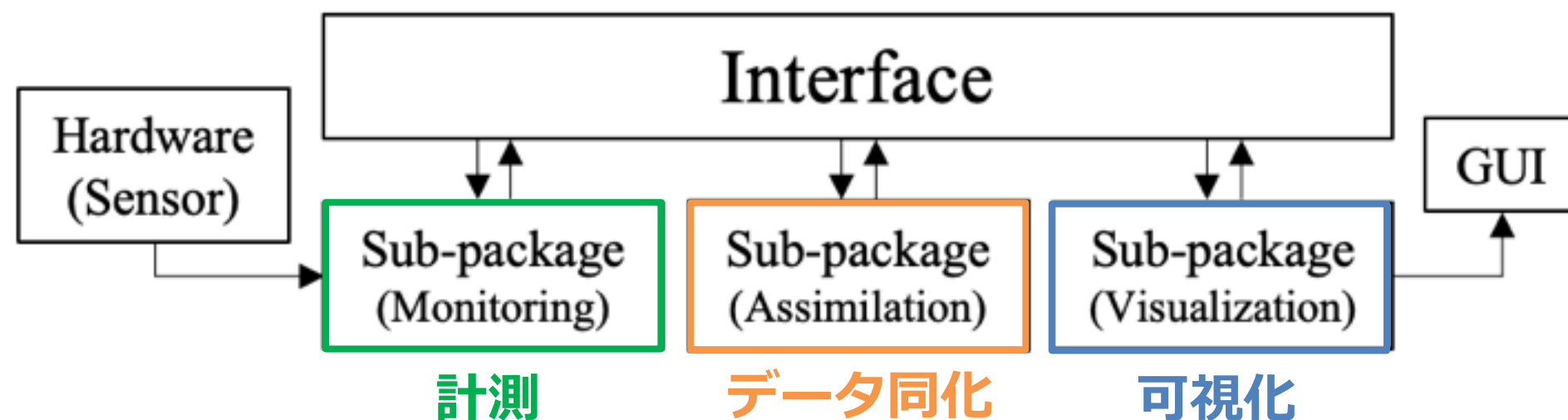
データ同化手法 (波スペクトル法)



(a) ひずみを用いた推定結果 (b) Hindcast
波スペクトル法により推定された方向波スペクトルの一例 [3]

[3] Chen et al.: Estimation of directional wave spectra and hull structural responses based on measured hull data on 14,000TEU large container ships, 2021.

オープンプラットフォーム (i-SAS : integrated – Structural Analysis System)



i-SASによるDTシステムの構成の一例



i-SASによるDTシステムのGUIの一例

複数のプログラムを統合して使用できるオープンプラットフォームとしてi-SASを開発した。

i-SASはソフトウェア開発プラットフォームGitHubのi-SAS Organizationに属するリポジトリとして開発した。

※Organization : GitHubの共通アカウントのこと

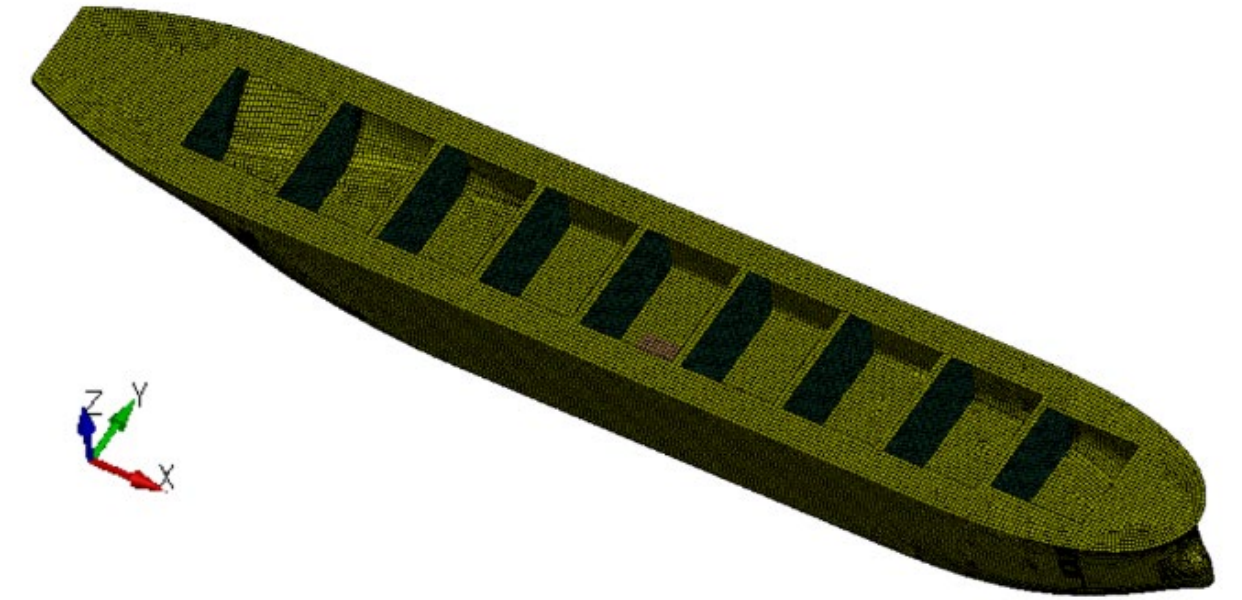
※リポジトリ : データやプログラムの情報が納められたデータベースのこと

各開発者はSub-packageを実装することで、Interface上で他のSub-packageと接続することができる。

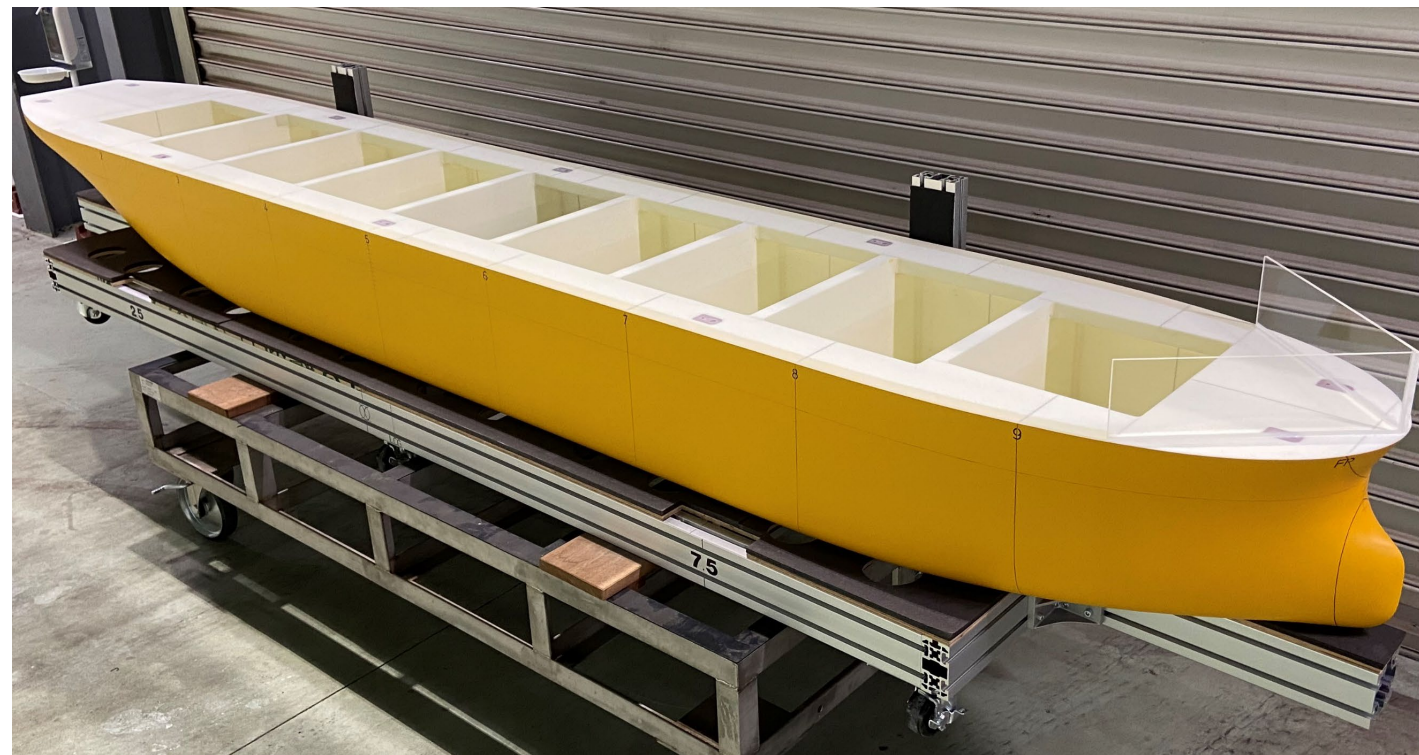
生成されたデータは共通のデータ形式でDBに管理される。

弾性模型船は以下の3つの要件

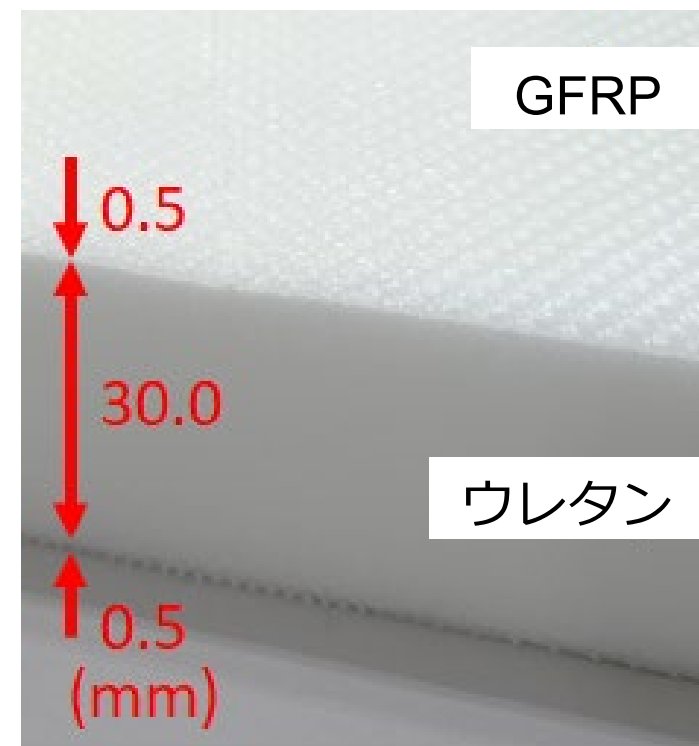
1. 船型相似性：既存の実船を縮尺した船型
2. ひずみの直接計測性：ひずみセンサにより船殻に生じるひずみを直接計測可能
3. 局所変形の相似性：ハルガーダーとしての全体変形と、ホールド内の船底の局所変形の大きさの比が実船と相似



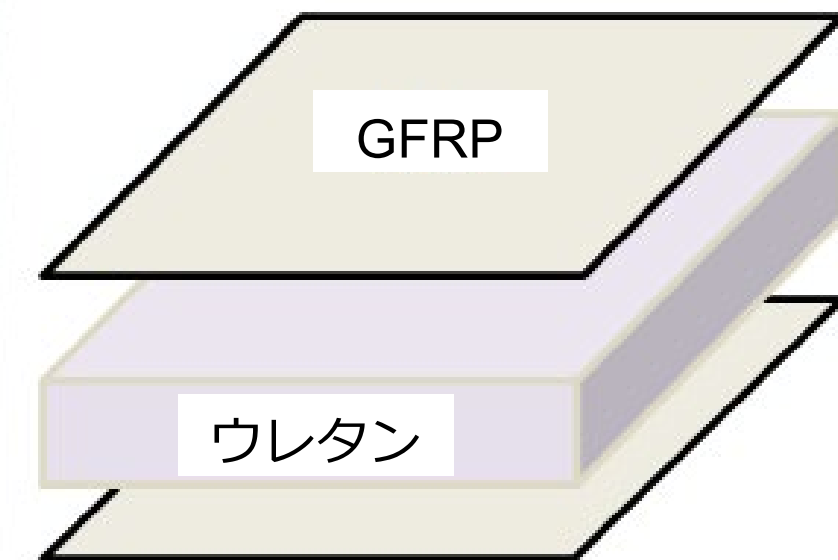
弾性模型船のFEモデル



GFRPサンドイッチパネル製弾性模型船



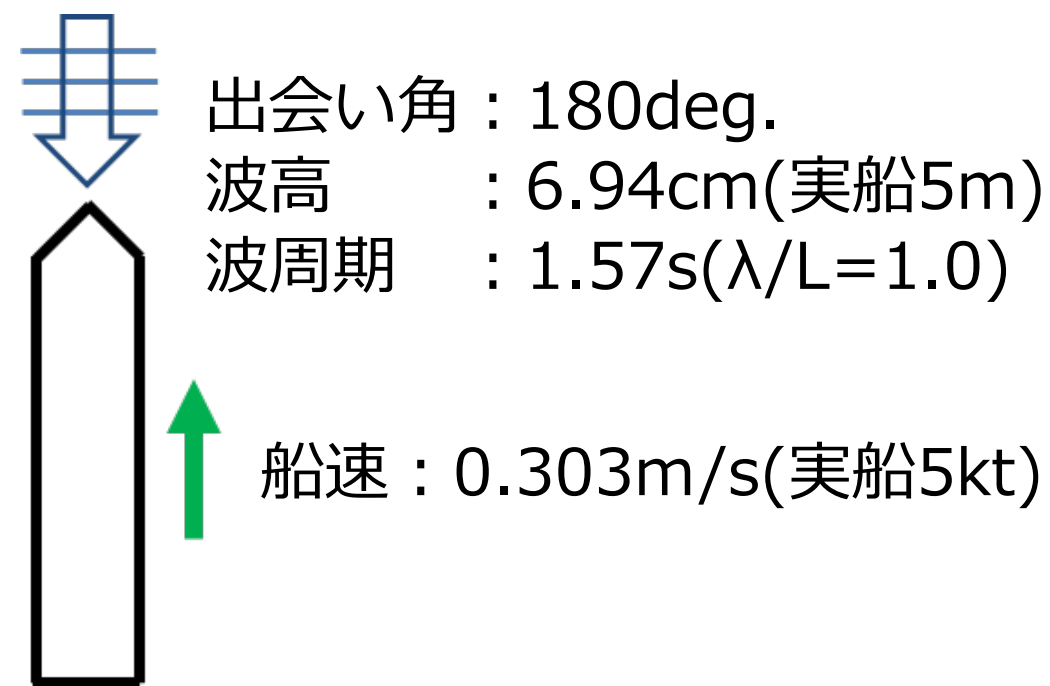
GFRPサンドイッチパネル



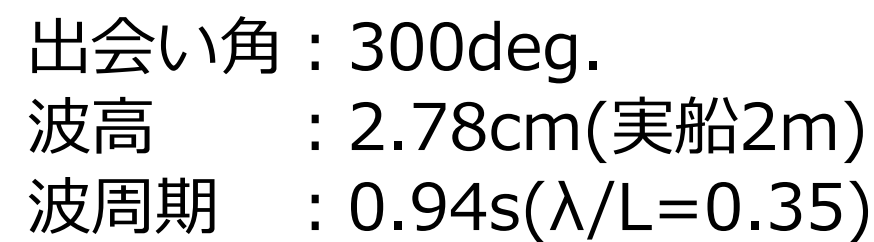
水槽試験の計測項目・計測条件



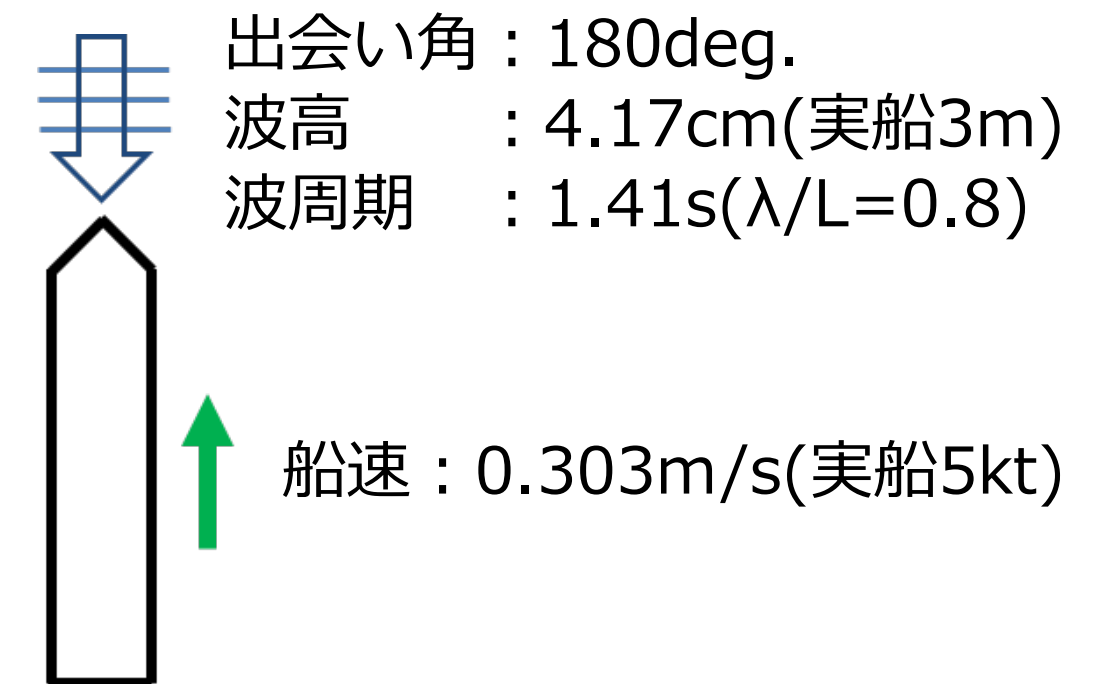
- ひずみ (141点)
- 水圧 (150点)
- 加速度 (3箇所)
- 船体運動 (6自由度)
- 出会い波高 (3箇所)
- 台車情報 (位置・速度)
- 水槽情報 (造波関連)
- 映像 (カメラ3台)



条件①(規則波)

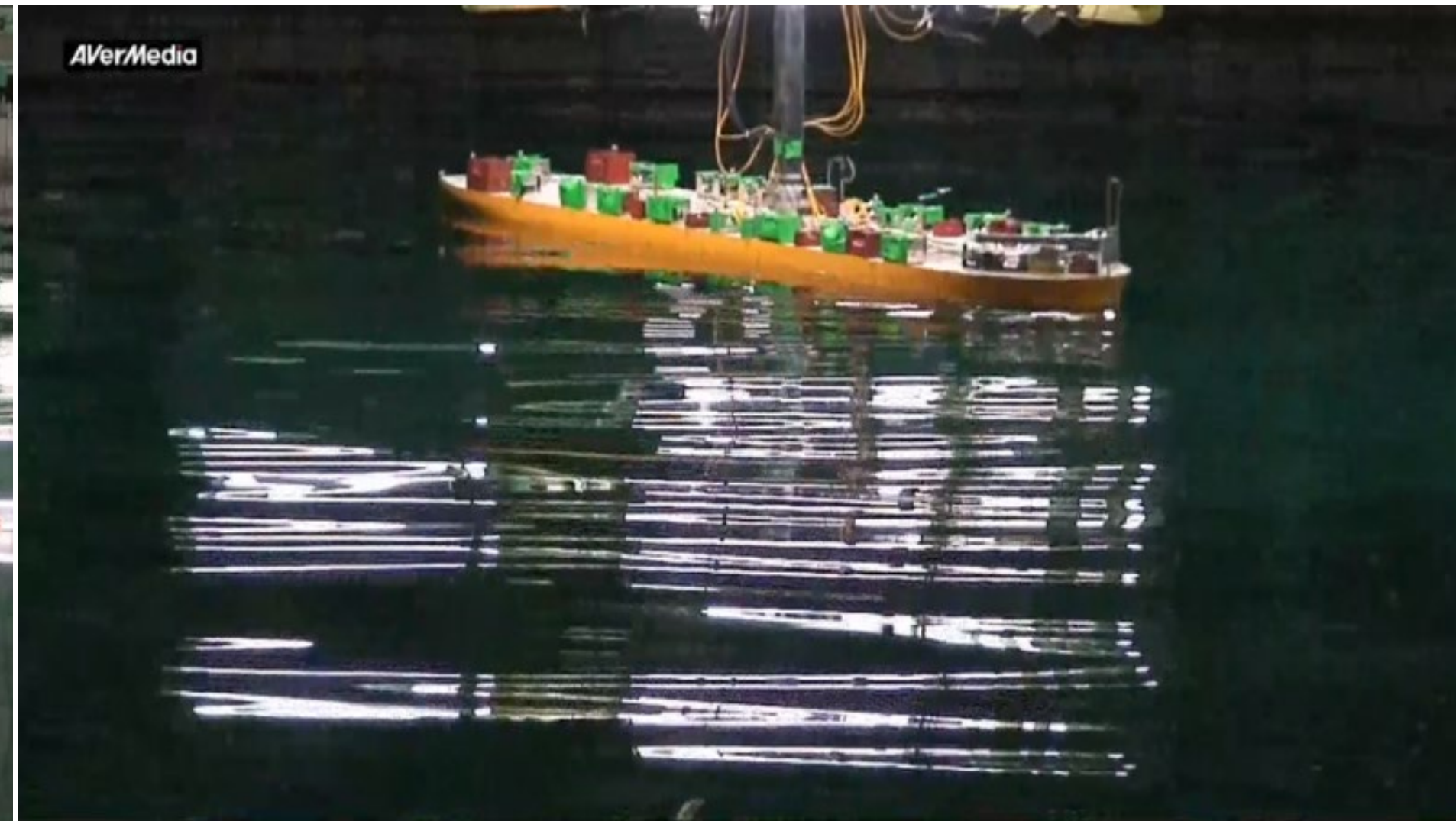


条件②(多方向不規則波)

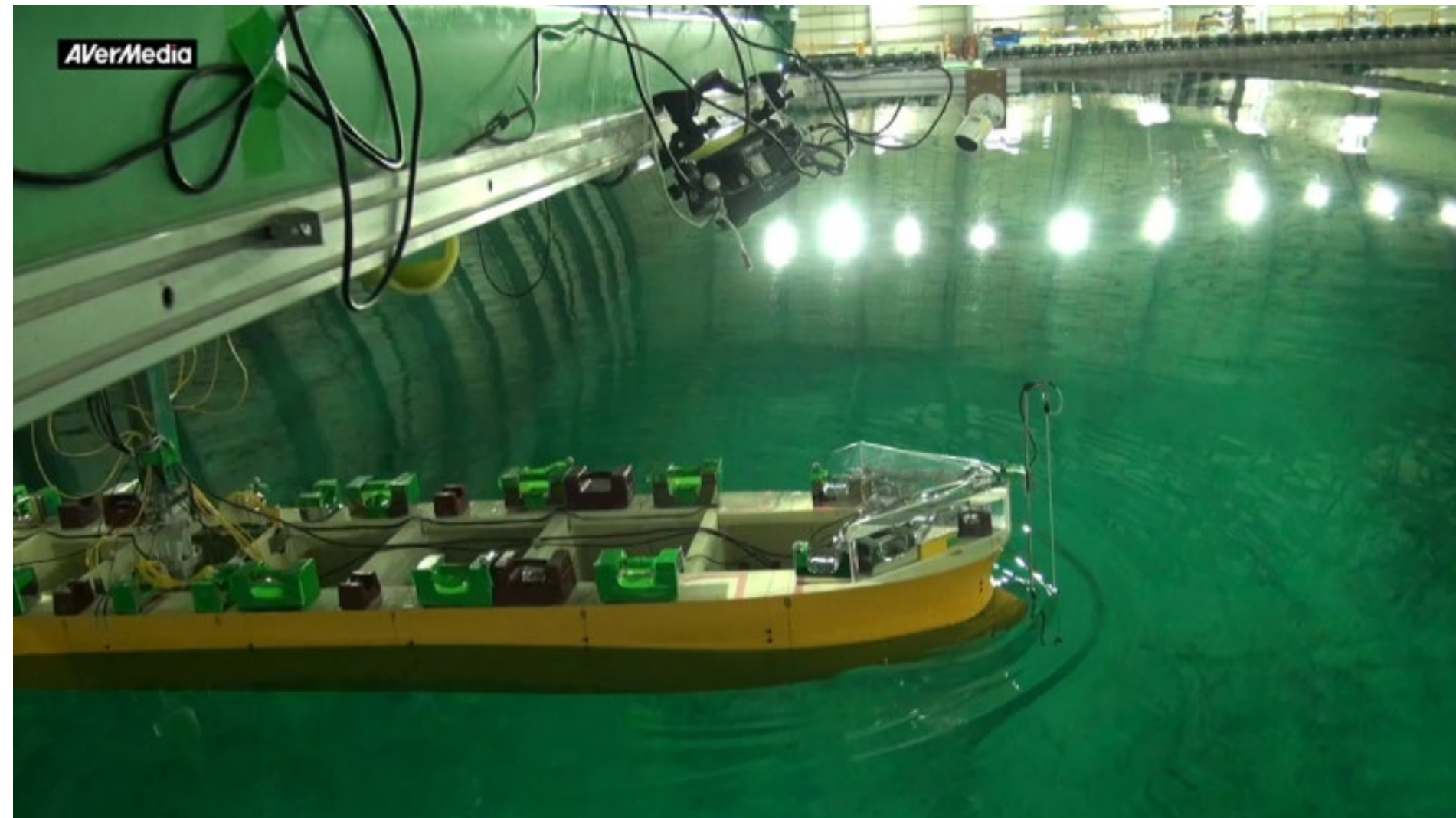




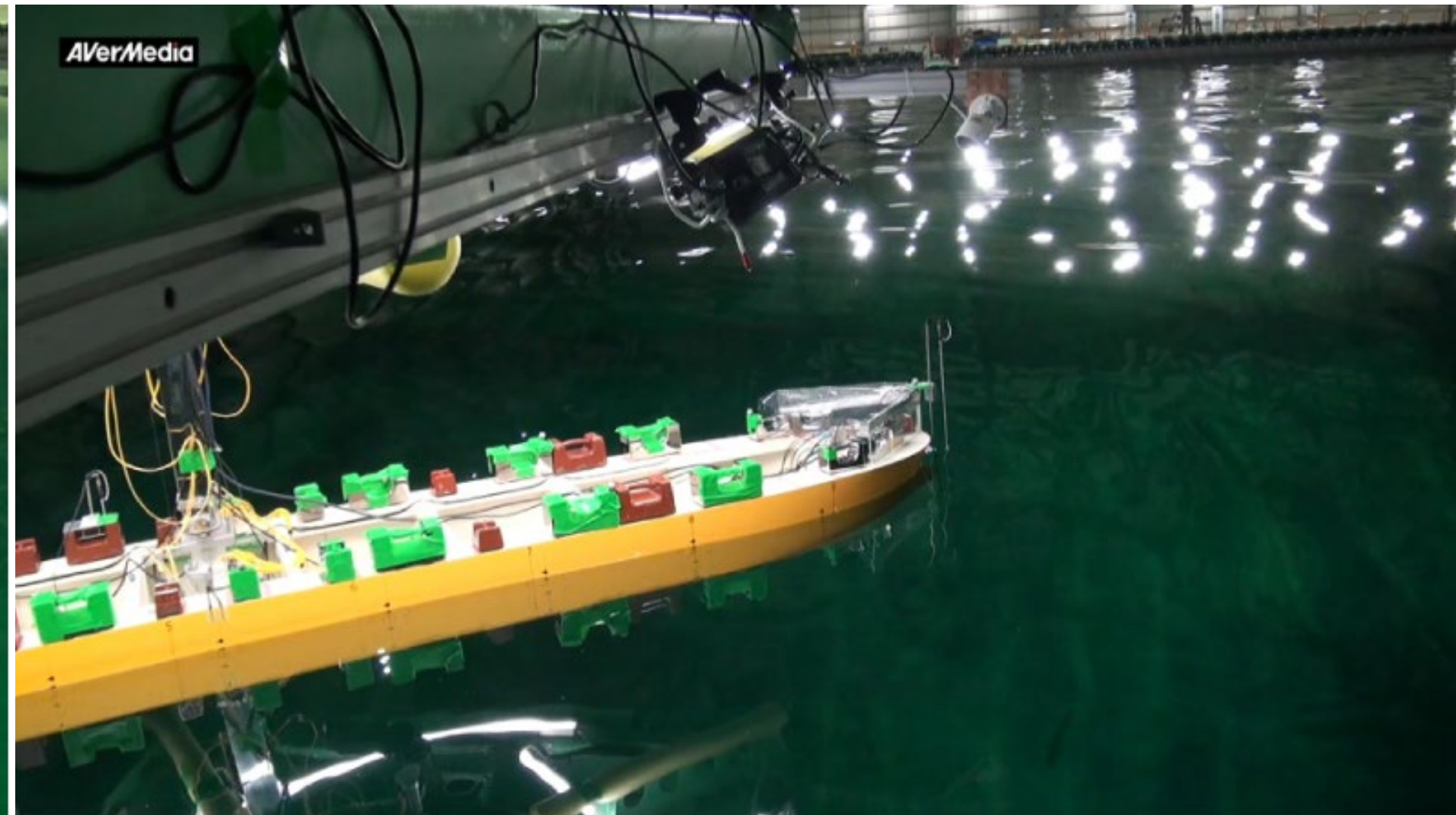
条件①(規則波)



条件②(多方向不規則波)

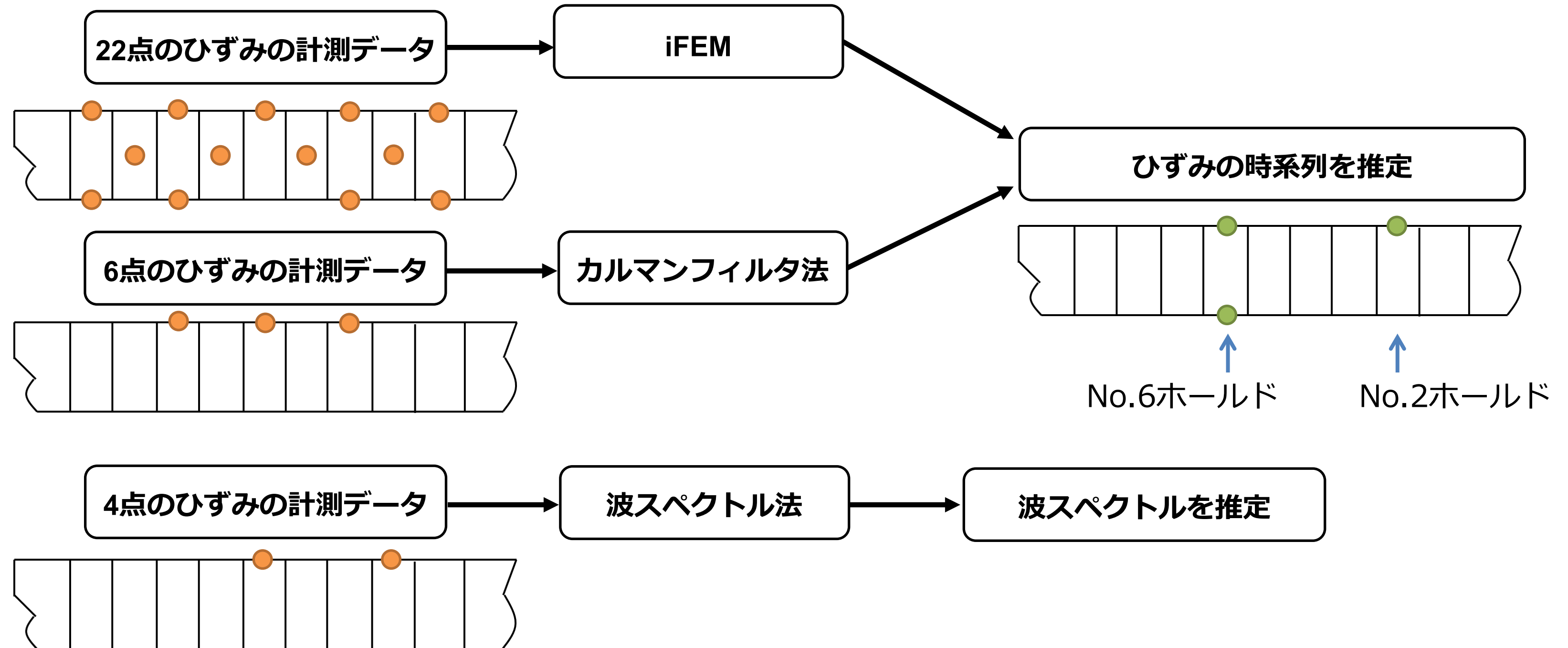


条件①(規則波)



条件②(多方向不規則波)

水槽試験結果を用いたデータ同化手法の検証方法



iFEMとカルマンフィルタ法では、数点のひずみを用いてデータ同化を行い、データ同化に使用していない位置のひずみを推定し、それとひずみの計測値を比較。

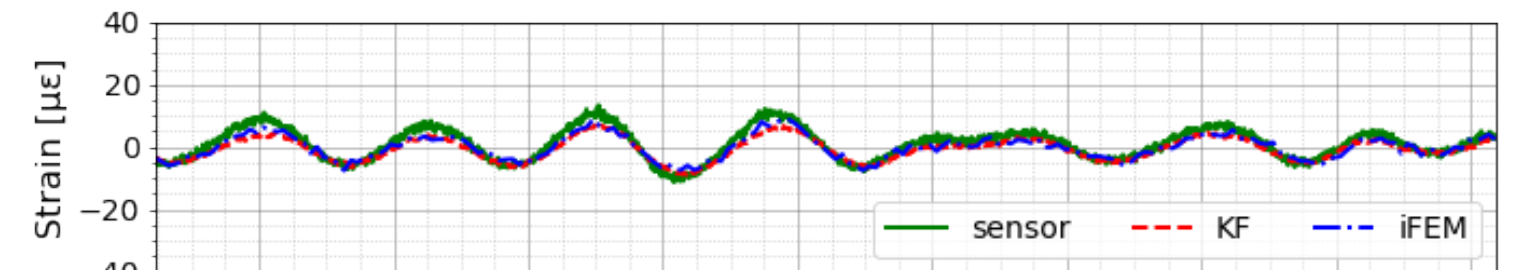
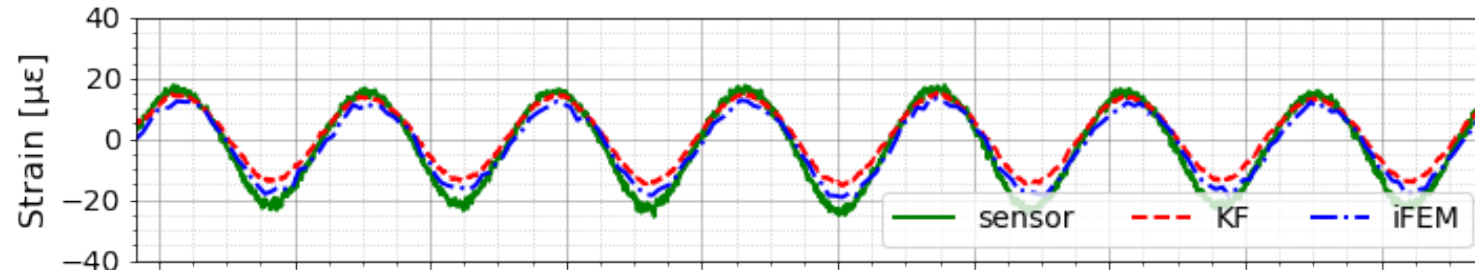
波スペクトル法では、数点のひずみを用いて、波スペクトルの推定を実施。

データ同化手法（iFEM, カルマンフィルタ法）の検証

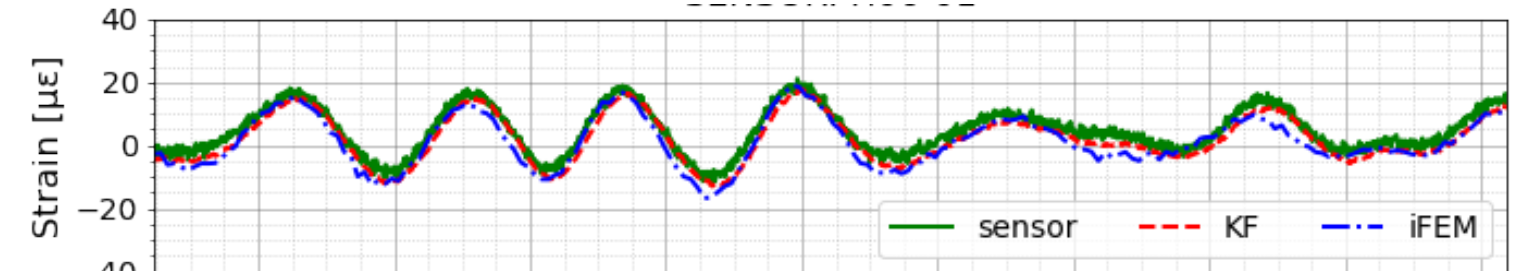
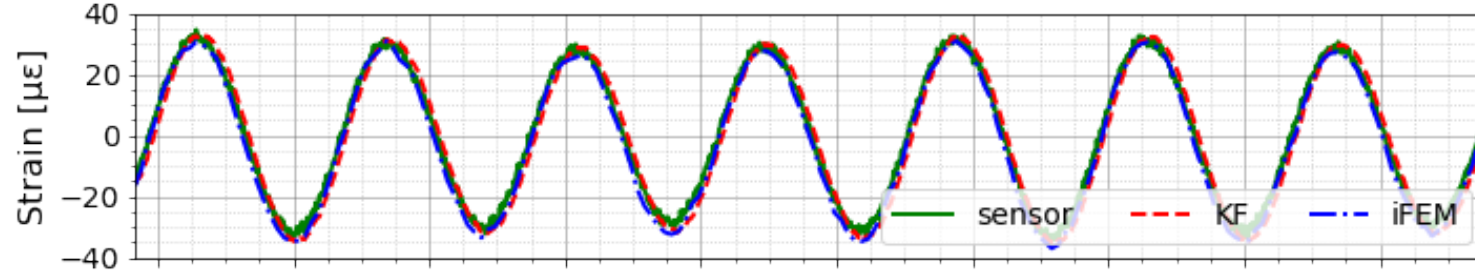


— 計測値 - - - カルマンフィルタ法 - · - · iFEM

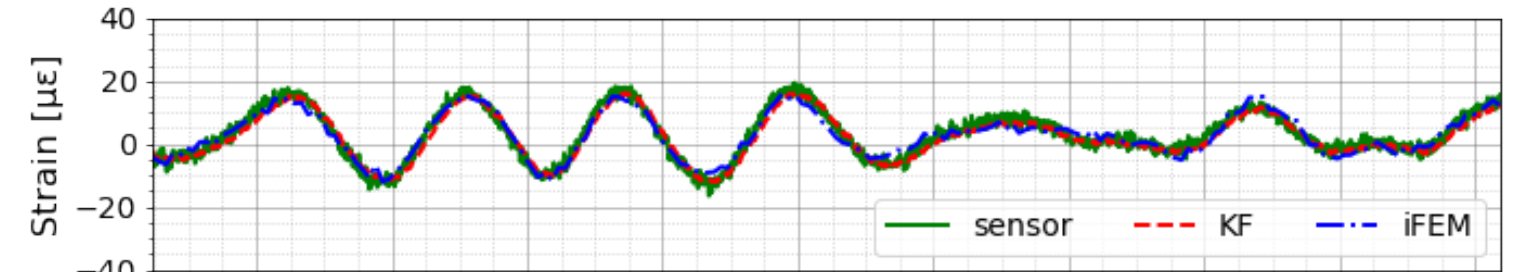
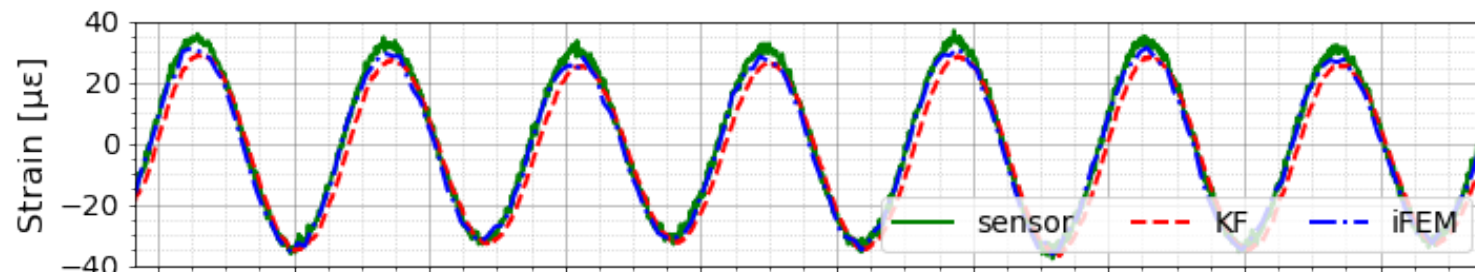
No.2ホールド
左舷デッキ



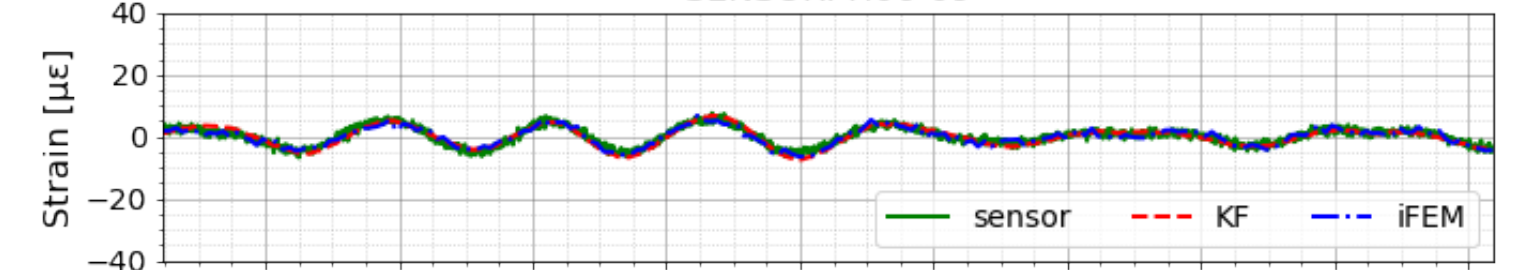
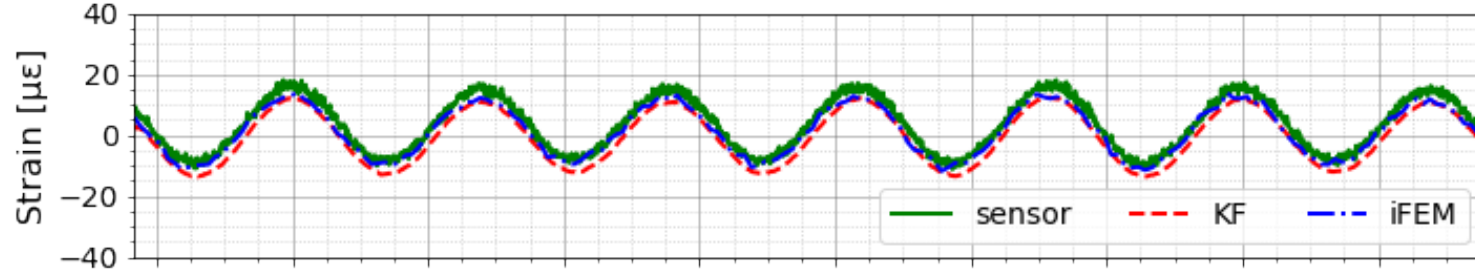
No.6ホールド
左舷デッキ



No.6ホールド
右舷デッキ



No.6ホールド
ボトム

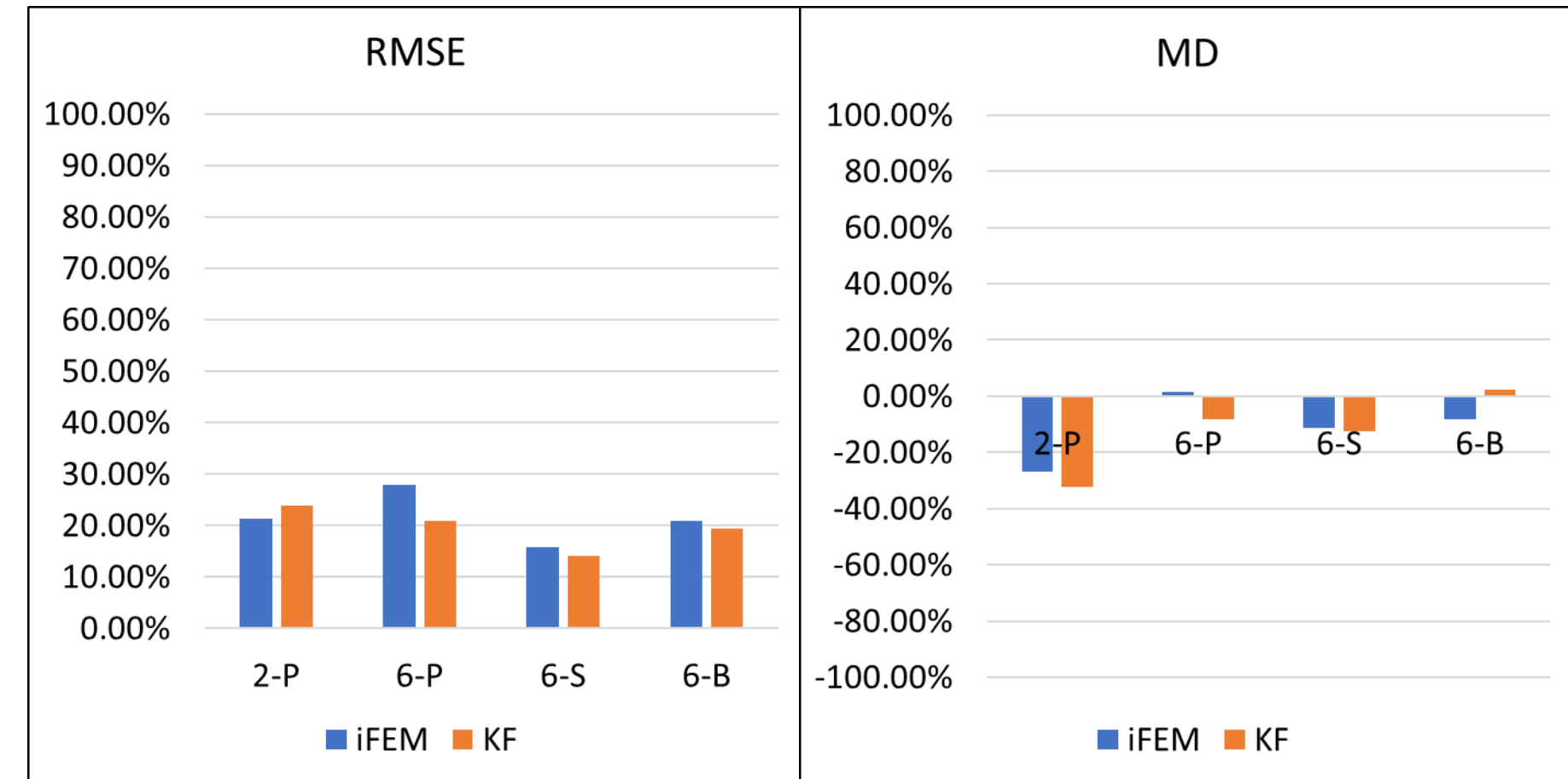
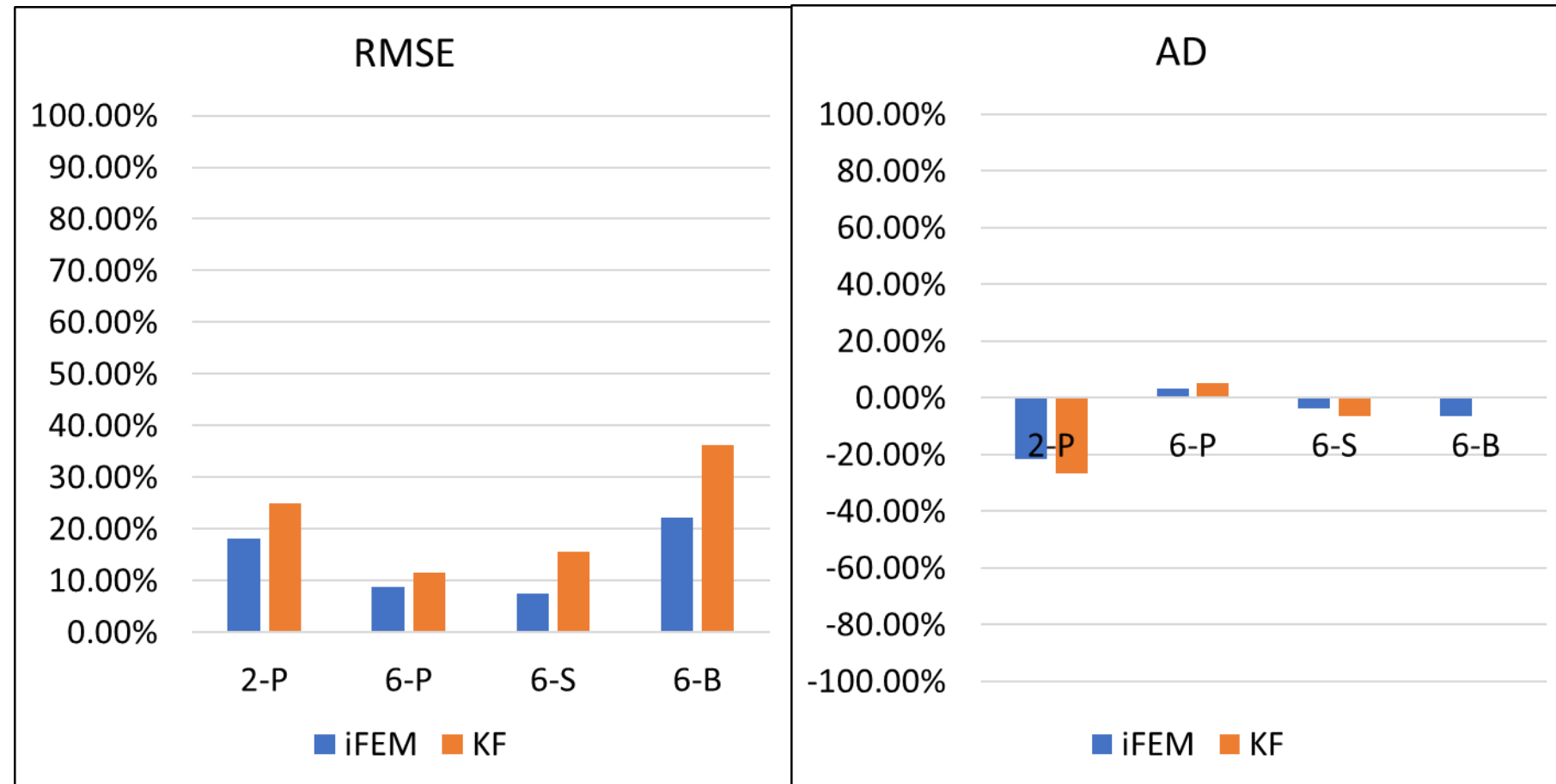


iFEMとカルマンフィルタ法により推定されたひずみの時系列 条件①(規則波)

iFEMとカルマンフィルタ法により推定されたひずみの時系列 条件②(多方向不規則波)

iFEMとカルマンフィルタ法によりデータ同化に使用していない位置のひずみの時系列を良い精度で推定可能であることを確認できた。

データ同化手法（iFEM, カルマンフィルタ法）の検証



iFEMとカルマンフィルタ法と計測値のひずみの比較
条件①(規則波)

iFEMとカルマンフィルタ法と計測値のひずみの比較
条件②(多方向不規則波)

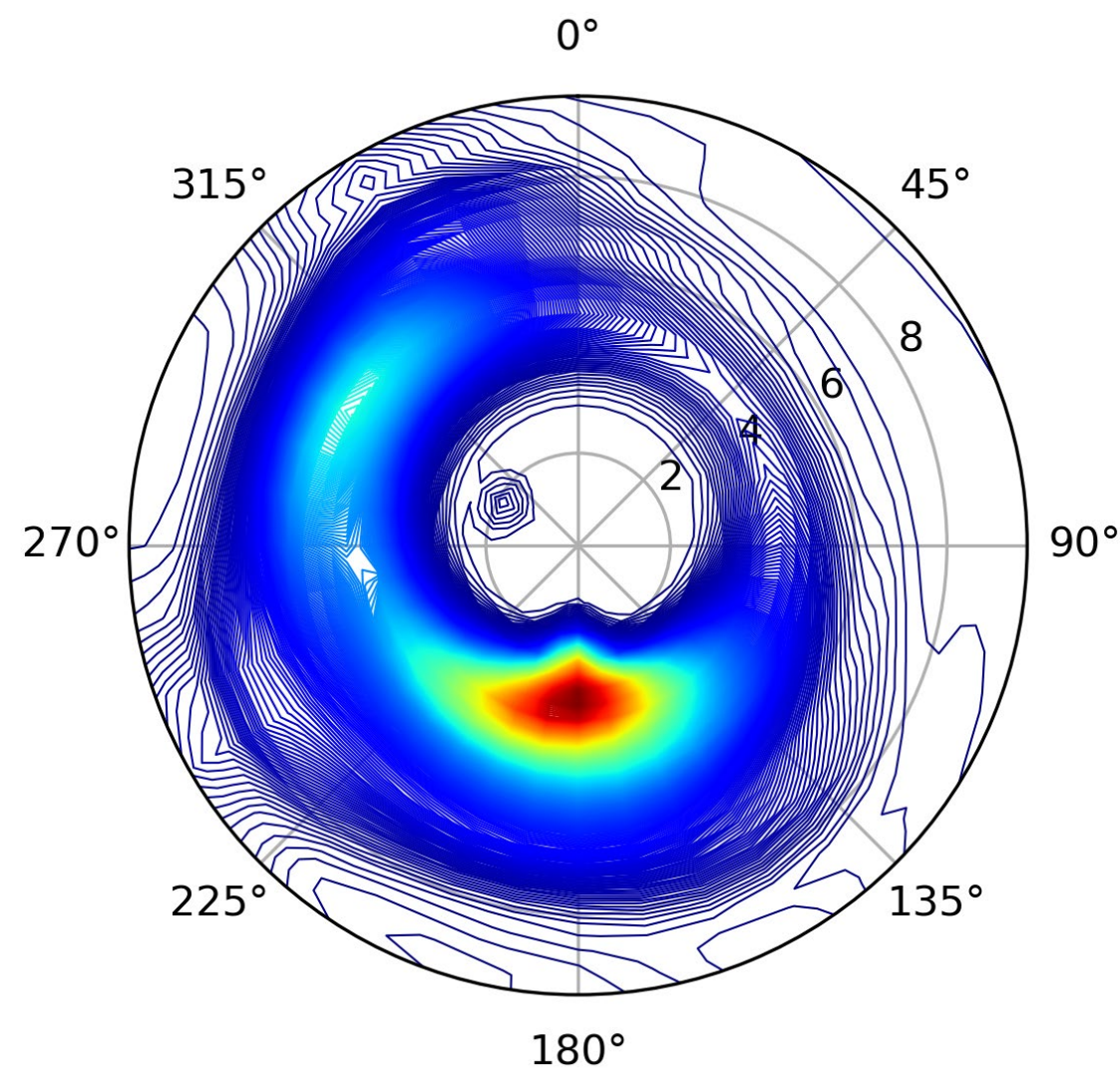
二乗平均平方根誤差：
$$RMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (e_i^e - e_i^m)^2}}{a^m} * 100 [\%]$$

振幅差：
$$AD = \frac{a^e - a^m}{a^m} * 100 [\%]$$

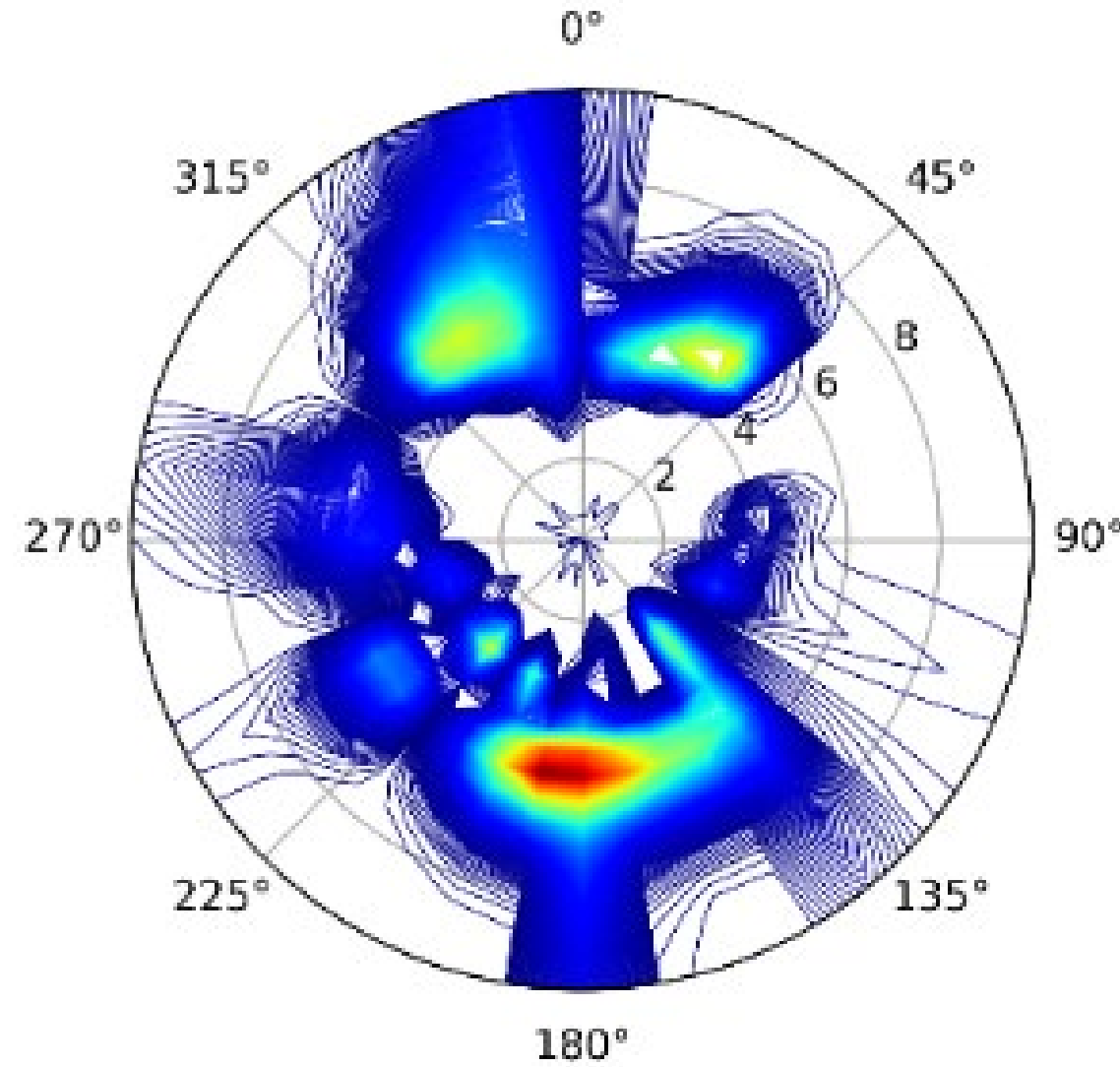
最大振幅差：
$$MD = \frac{\max(|e^e|) - \max(|e^m|)}{\max(|e^m|)} * 100 [\%]$$

- e : ひずみ
- a : ひずみ振幅
- N : 計測点数
- 添え字 e : データ同化推定値
- 添え字 m : 計測値

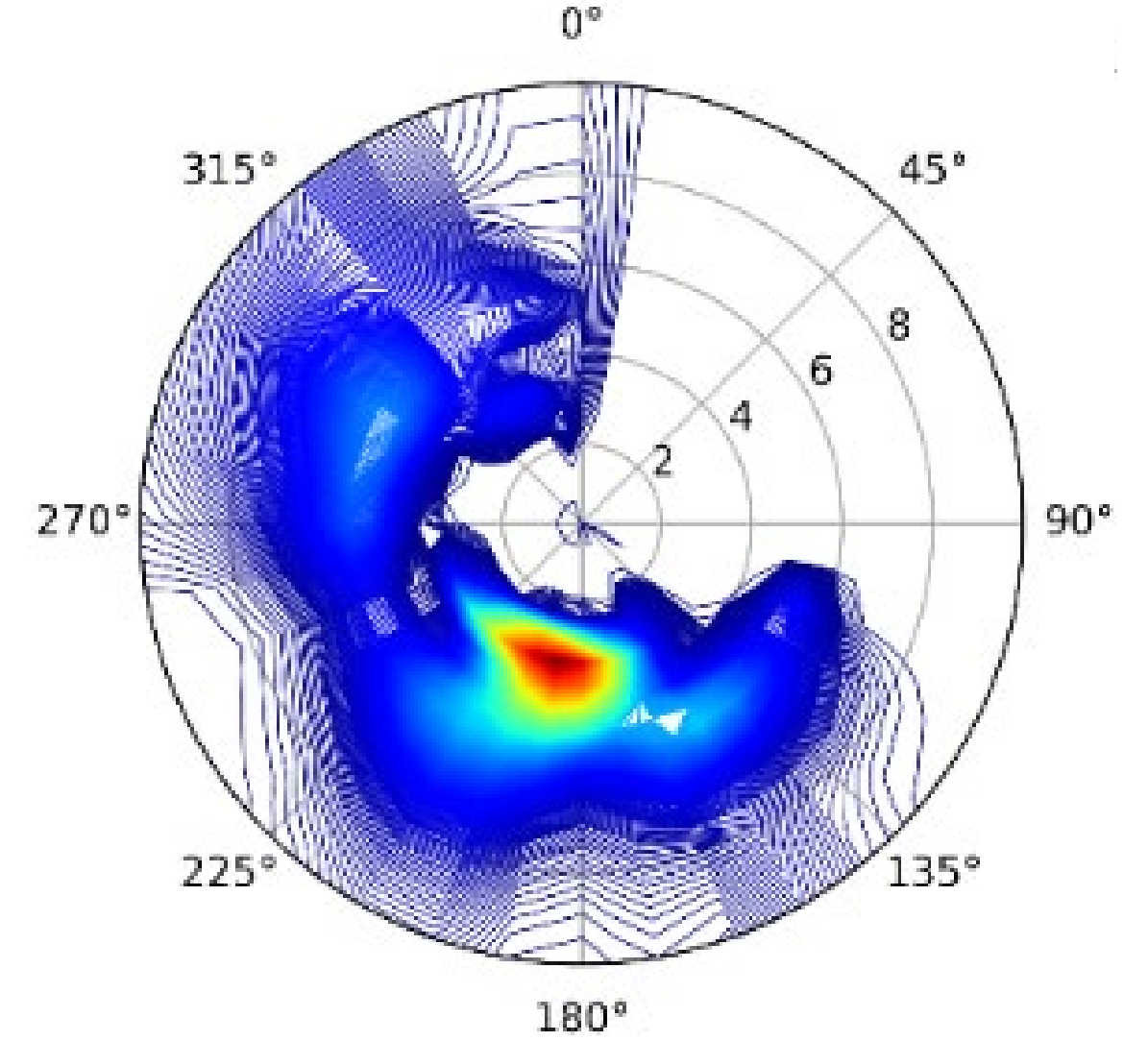
データ同化手法（波スペクトル法）の検証



波計測結果より推定された結果



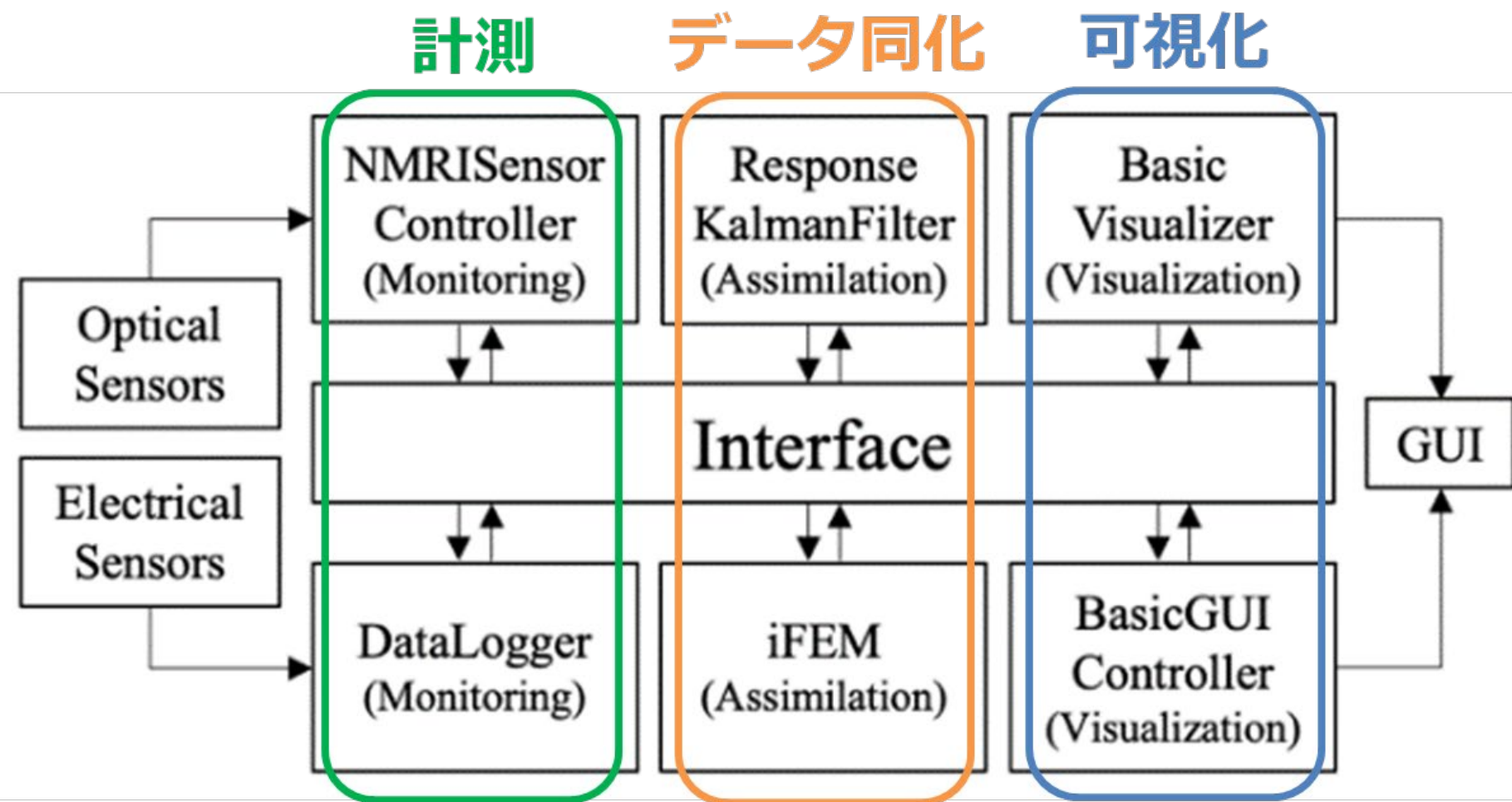
船体運動より推定された結果



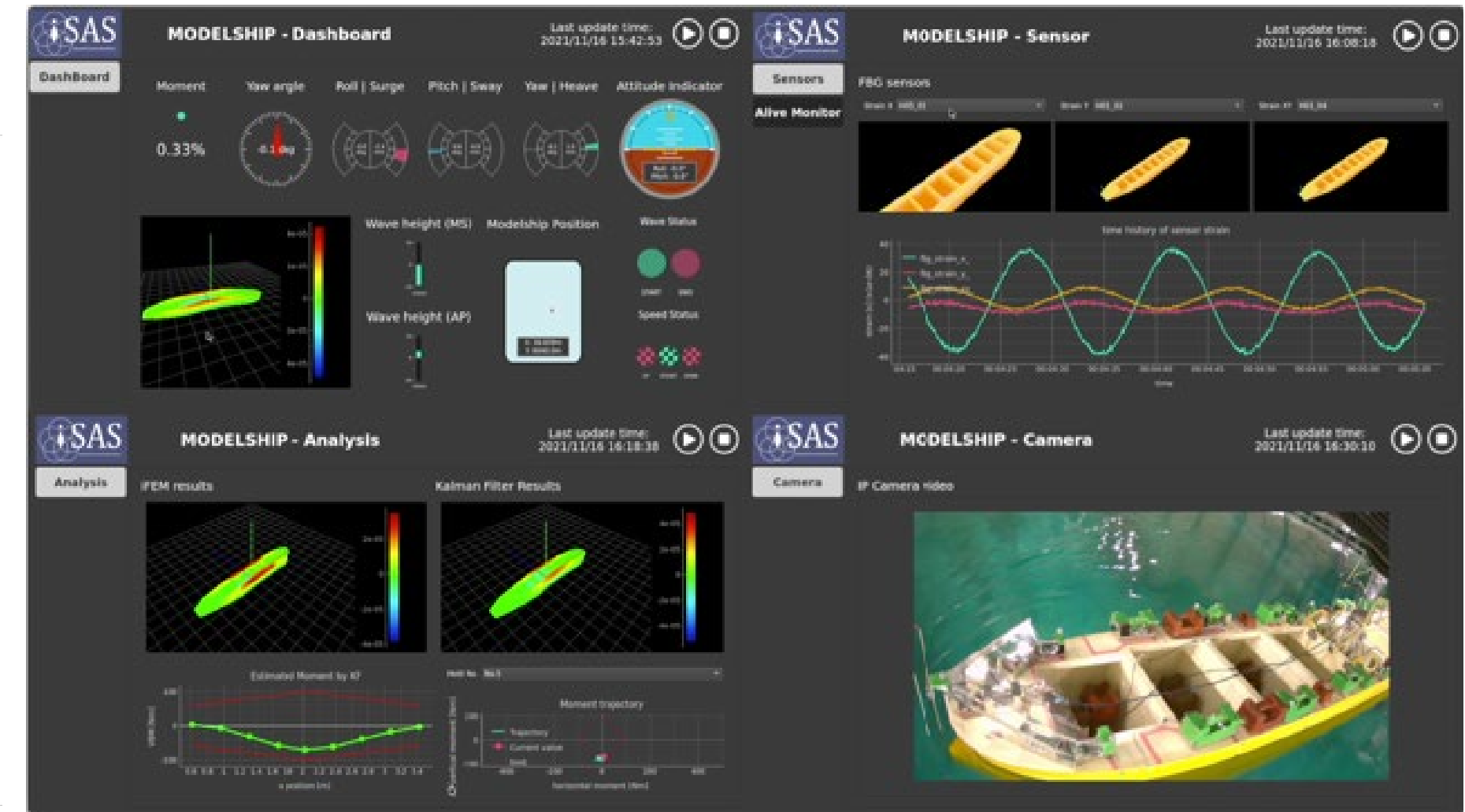
船体ひずみより推定された結果

波スペクトル法により推定された方向波スペクトル 条件②(多方向不規則波)

船体ひずみを用いることで方向波スペクトルの方向の推定精度が良くなる結果が得られた。



水槽試験でのDTシステムの構成



水槽試験でのDTシステム

DTシステムにより，各計測データのモニタリングや，データ同化の結果をリアルタイムに出力可能であることを検証できた。

船体構造デジタルツインシステムの検証

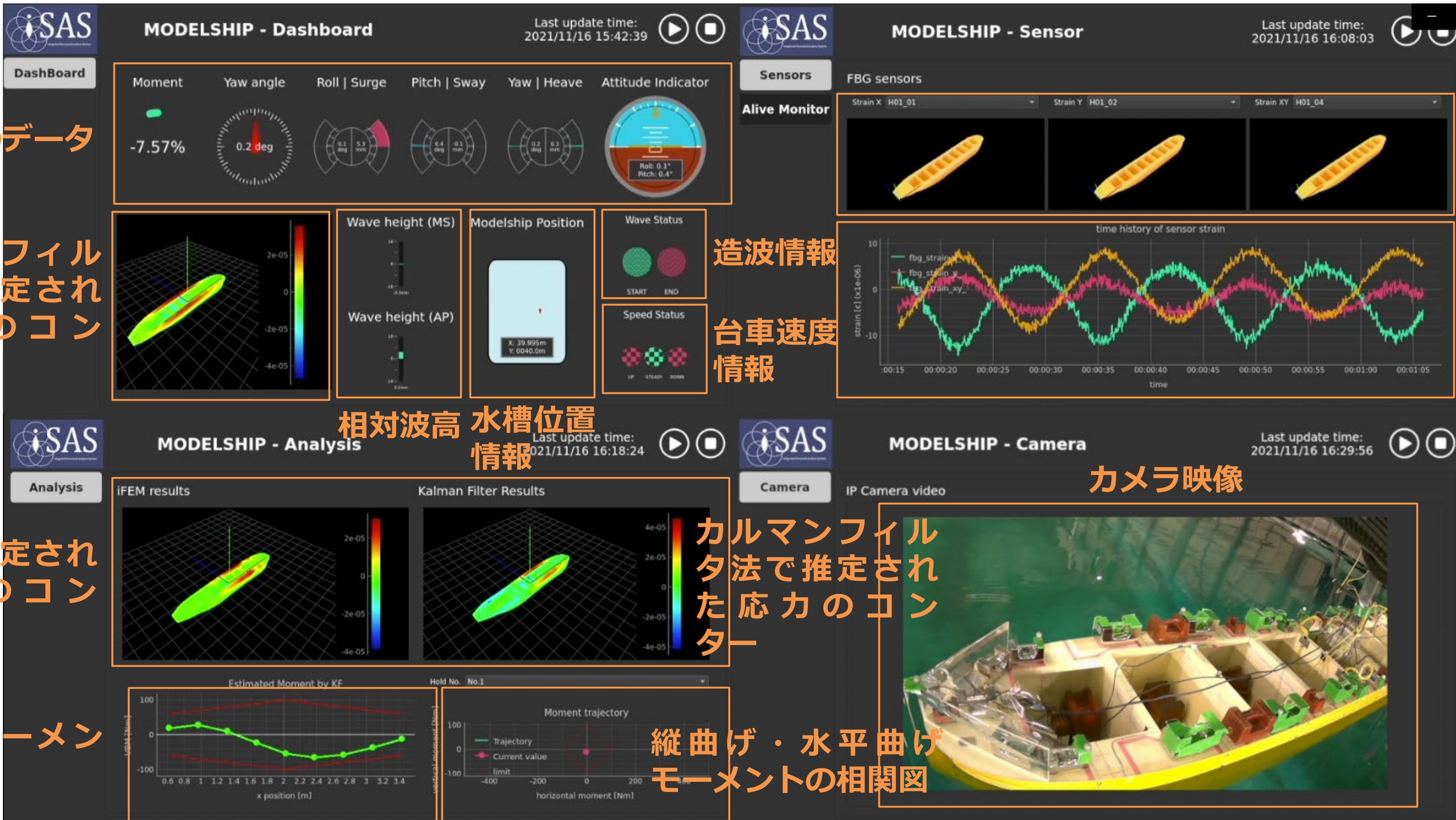


運動のデータ

カルマンフィルタ法で推定された応力のコンター

iFEMで推定された応力のコンター

縦曲げモーメント分布



ひずみセンサ位置情報

造波情報

台車速度情報

ひずみの時系列データ

相対波高 水槽位置情報

カメラ映像

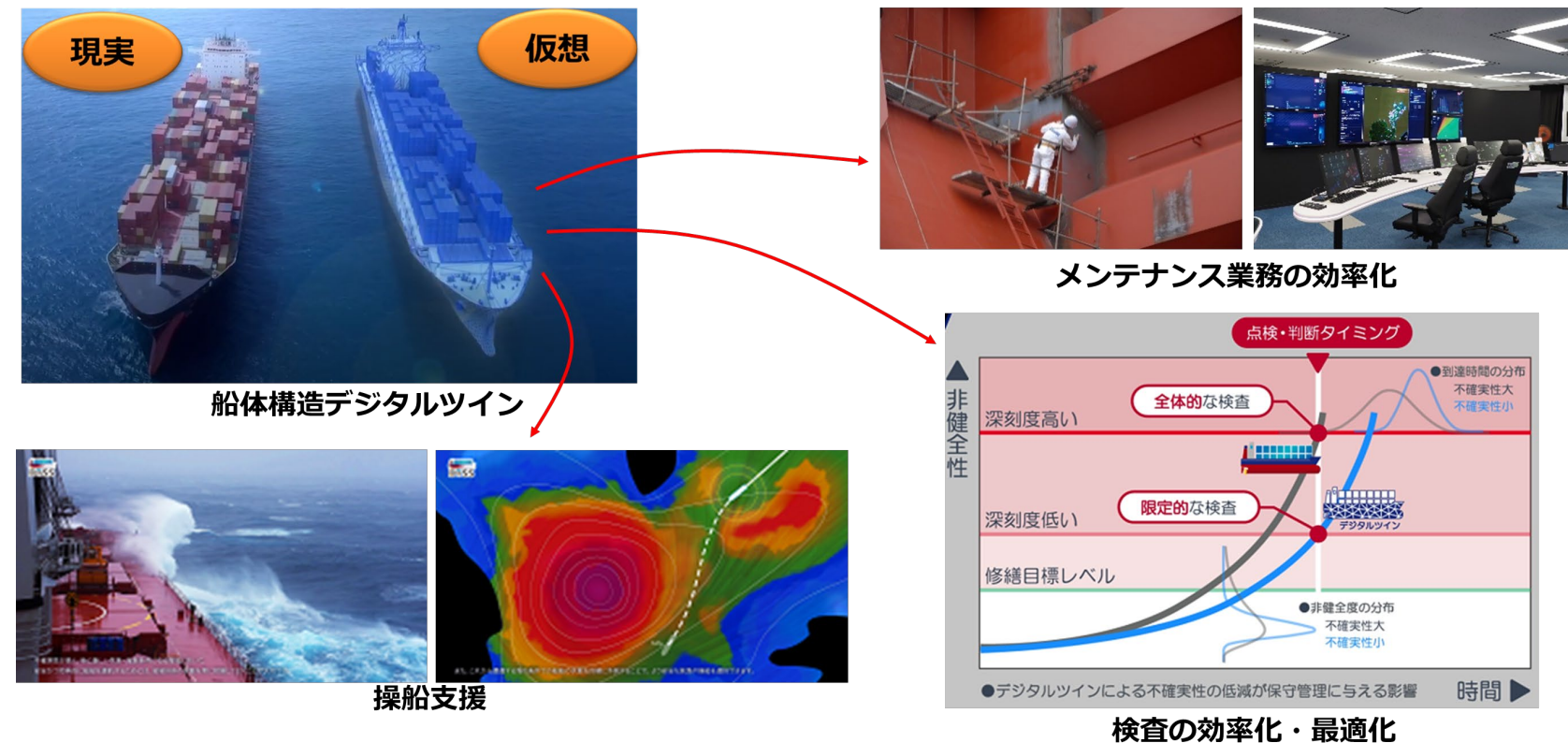
カルマンフィルタ法で推定された応力のコンター

縦曲げ・水平曲げモーメントの相関図

計測・データ同化・可視化のプログラムをi-SASで組み合わせることで、DTシステムを開発した。水槽試験によりデータ同化手法およびDTシステムの検証を実施し、その有効性を確認することができた。

今後の計画として、実船のバルクキャリア船にDTシステムを搭載して検証を行う予定である。

引き続き、DTシステムのメンテナンス・検査の効率化、操船支援への活用等に繋げる展望である。



本講演は、日本財団のご支援の下、（一財）日本船舶技術研究協会で開催された「超高精度船体構造デジタルツインの研究開発」の一部であり、関係各位に感謝申し上げます。