

GFRPサンドイッチパネル製 弾性模型船を用いた水槽試験

超高精度船体構造デジタルツインの研究開発委員会 テクニカルグループ 水槽試験SWG主査

東京大学大学院工学研究科 システム創成学専攻

宝谷 英貴



水槽試験の目的

- 開発したデータ同化技術の精度検証
- 開発したDTシステム“i-SAS”の動作検証

本発表の内容

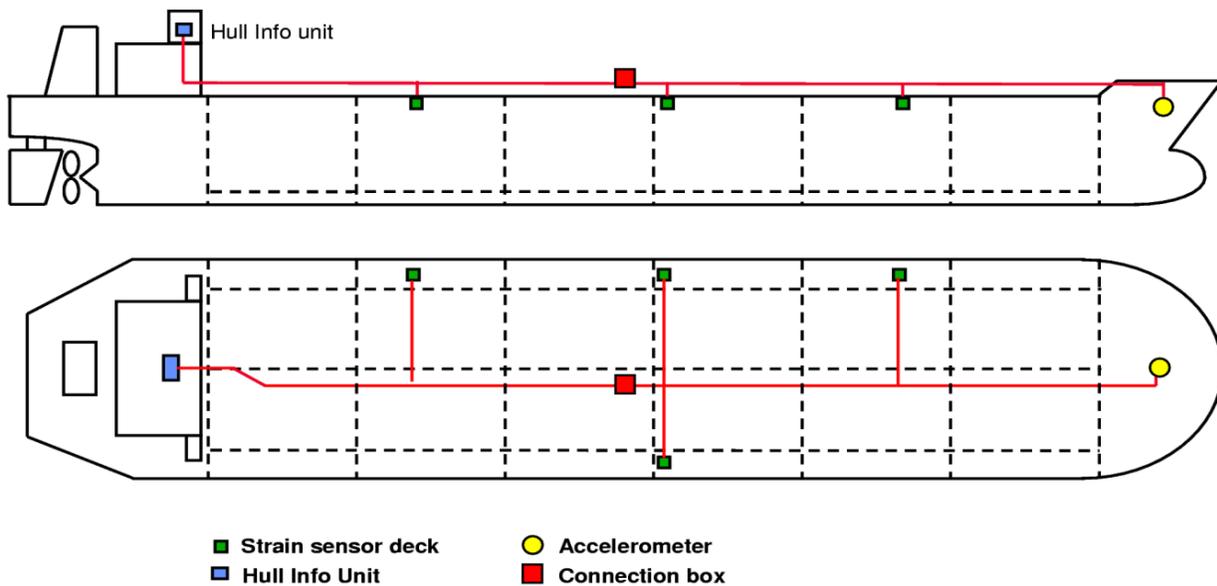
1. 目的を達成するための模型船の製作
2. 製作した模型船による水槽試験の実施
3. 水槽試験によるi-SASおよびデータ同化技術の検証

水槽試験用模型船に求められる要件

1. 船殻のひずみを直接計測することが可能
2. 船底の局所変形を再現
3. 実際の船型を考慮

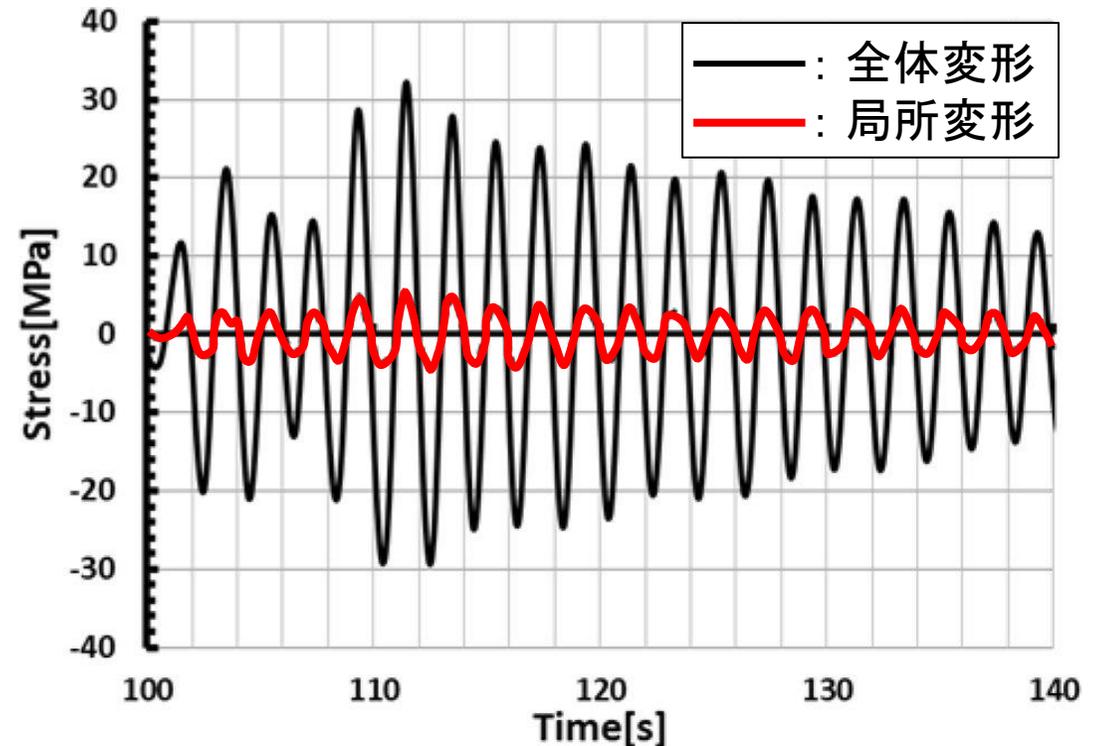
* 剛性相似性は必ずしも要求しない

➤ 既存の hull monitoring system (LightStructures社)



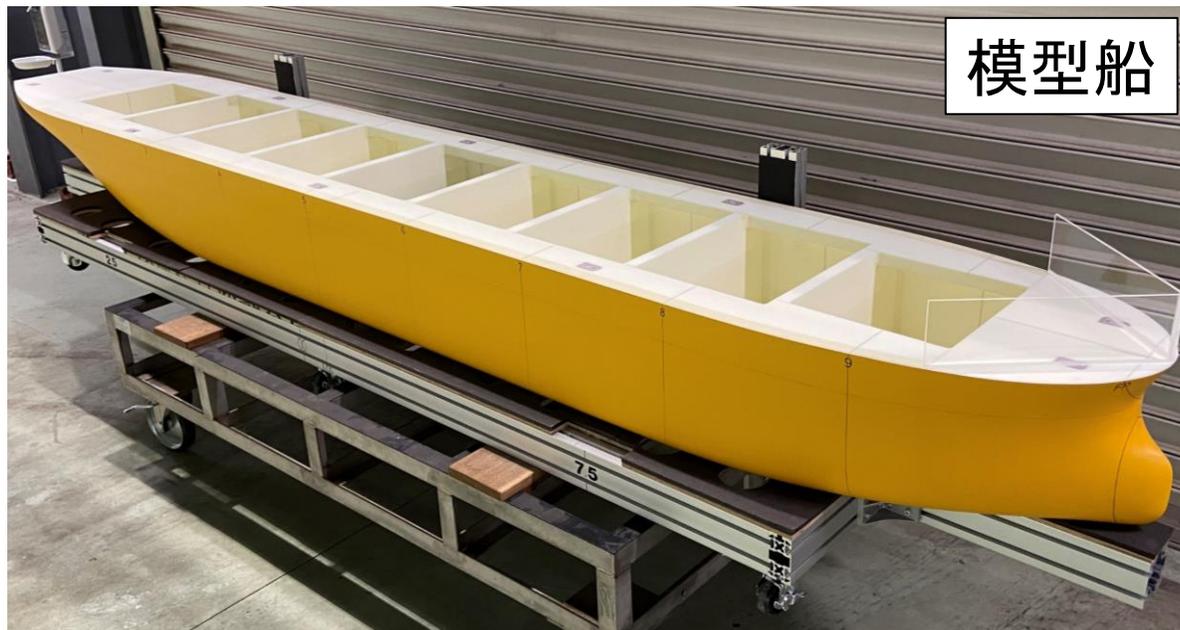
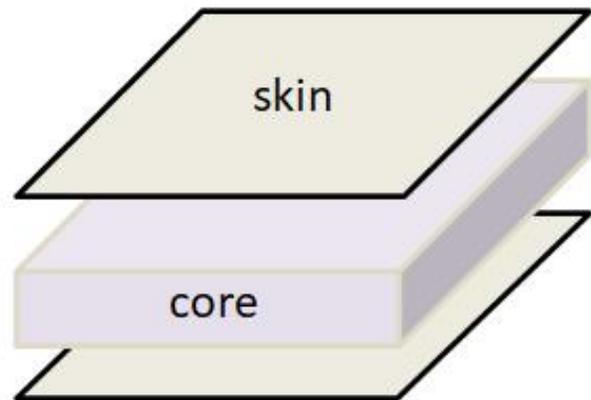
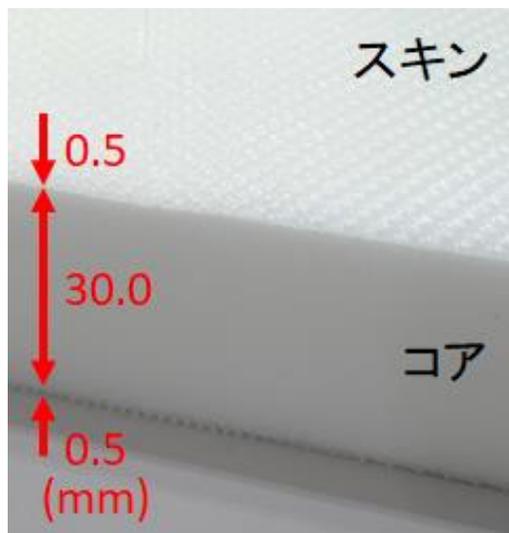
Sagvolden & Jensen (2011)

➤ 実船における船底の局所変形の観測



Chen et al. (2021)

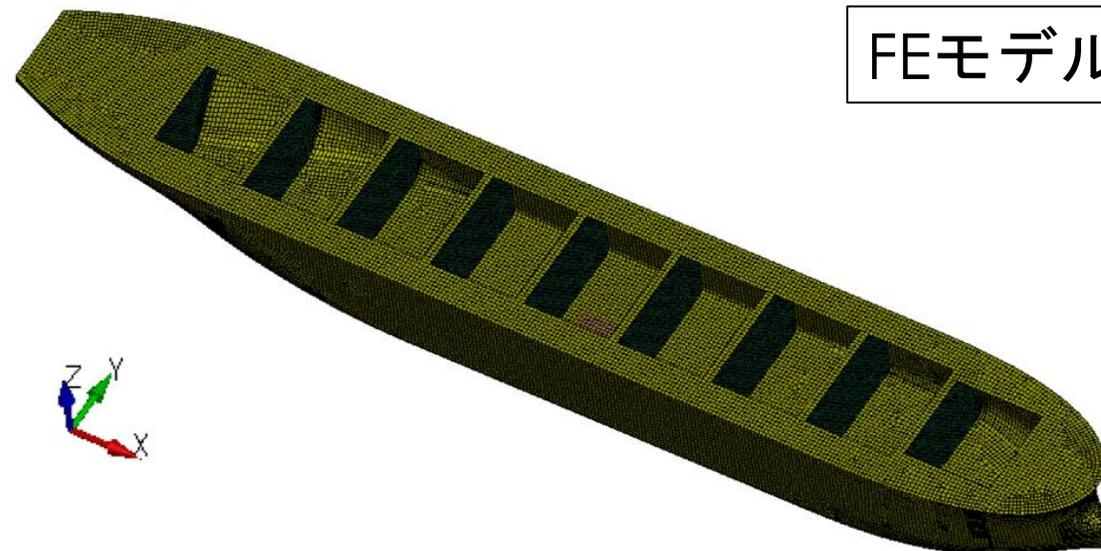
GFRPサンドイッチパネル製バルクキャリア弾性模型の製作



スキン材：ガラスクロス (196 g/m²)
コア材：硬質ウレタン (~120 kg/m³)

模型船主要目

全長 (L_{OA})	4.00 m
型幅 (B)	0.625 m
型深さ (D)	0.326 m
喫水 (d)	0.246 m
排水量 (∇)	501 kg



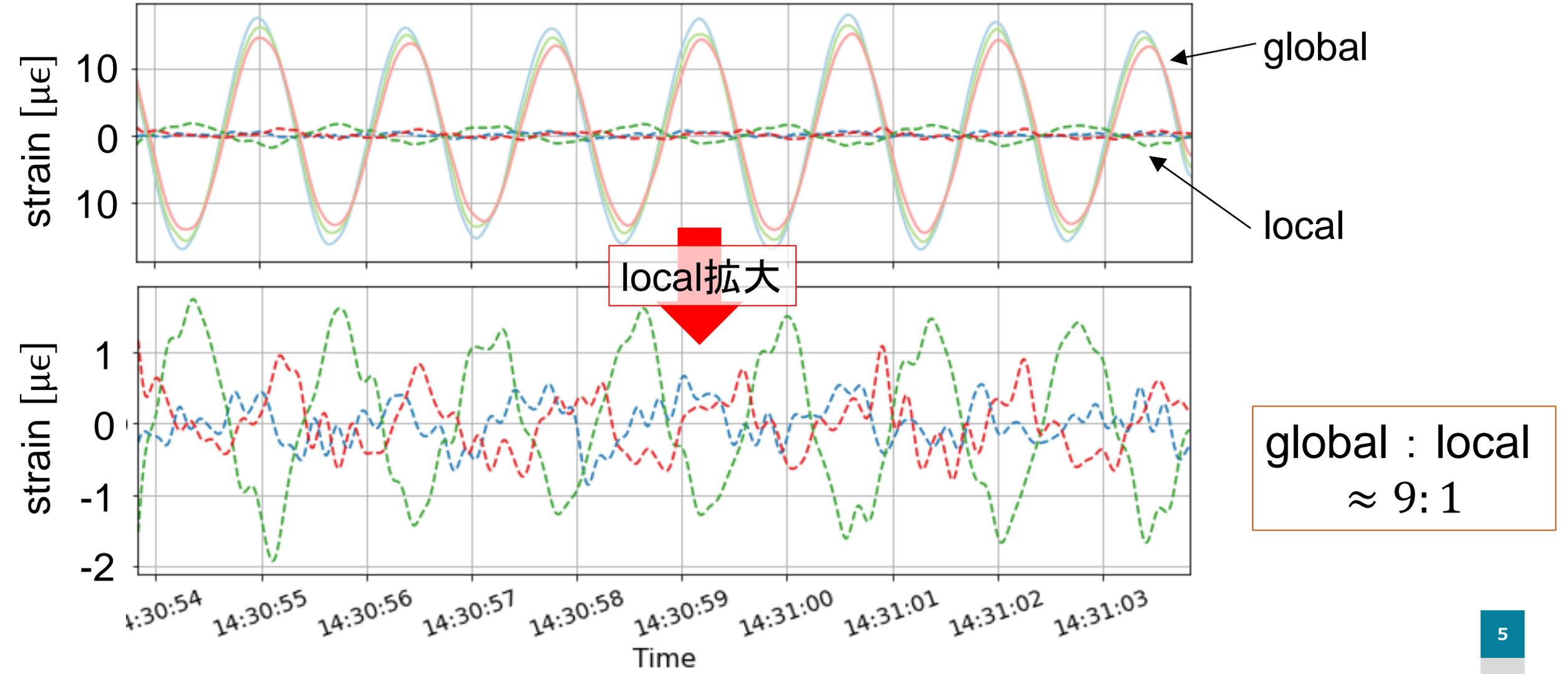
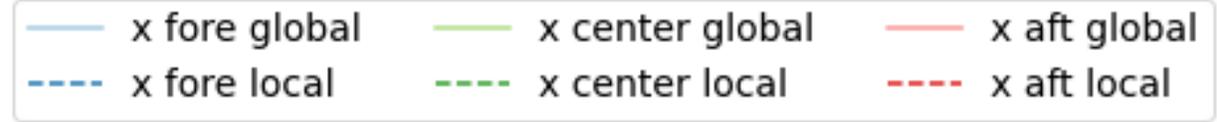
船底の局所変形の計測例

$\lambda/L_{pp} = 1, H = 5\text{m}$ の規則波中のひずみ変動

前方

中央

後方



水槽試験@実海域再現水槽（海上技術安全研究所）

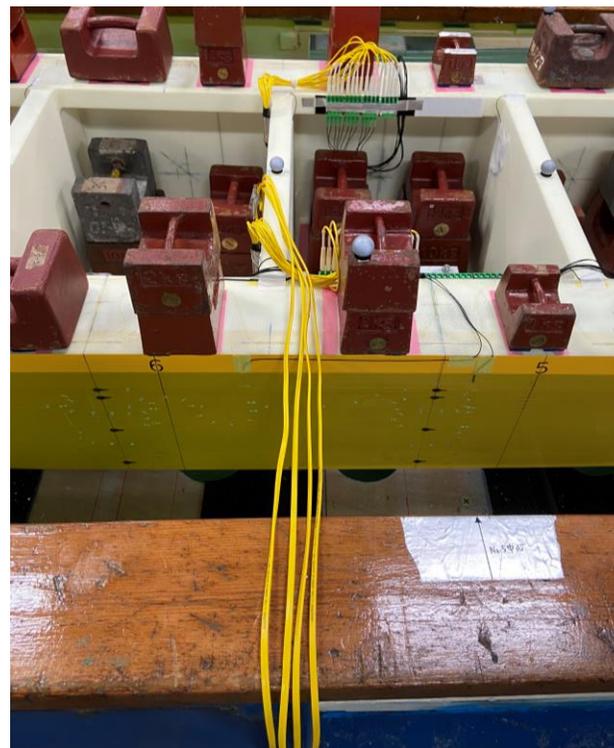


波浪条件

- 規則波
- 長波頂不規則波（1方向／2方向）
- 短波頂不規則波（1方向／2方向）

計測項目

ひずみ	FBGひずみセンサ（141点）
水圧	FBG圧力センサ（150点）
加速度	FP / FBG センサ（6点）
6自由度運動	ポテンショメータ
出会い水位	容量式波高計（3点）
映像	ビデオカメラ（3台）



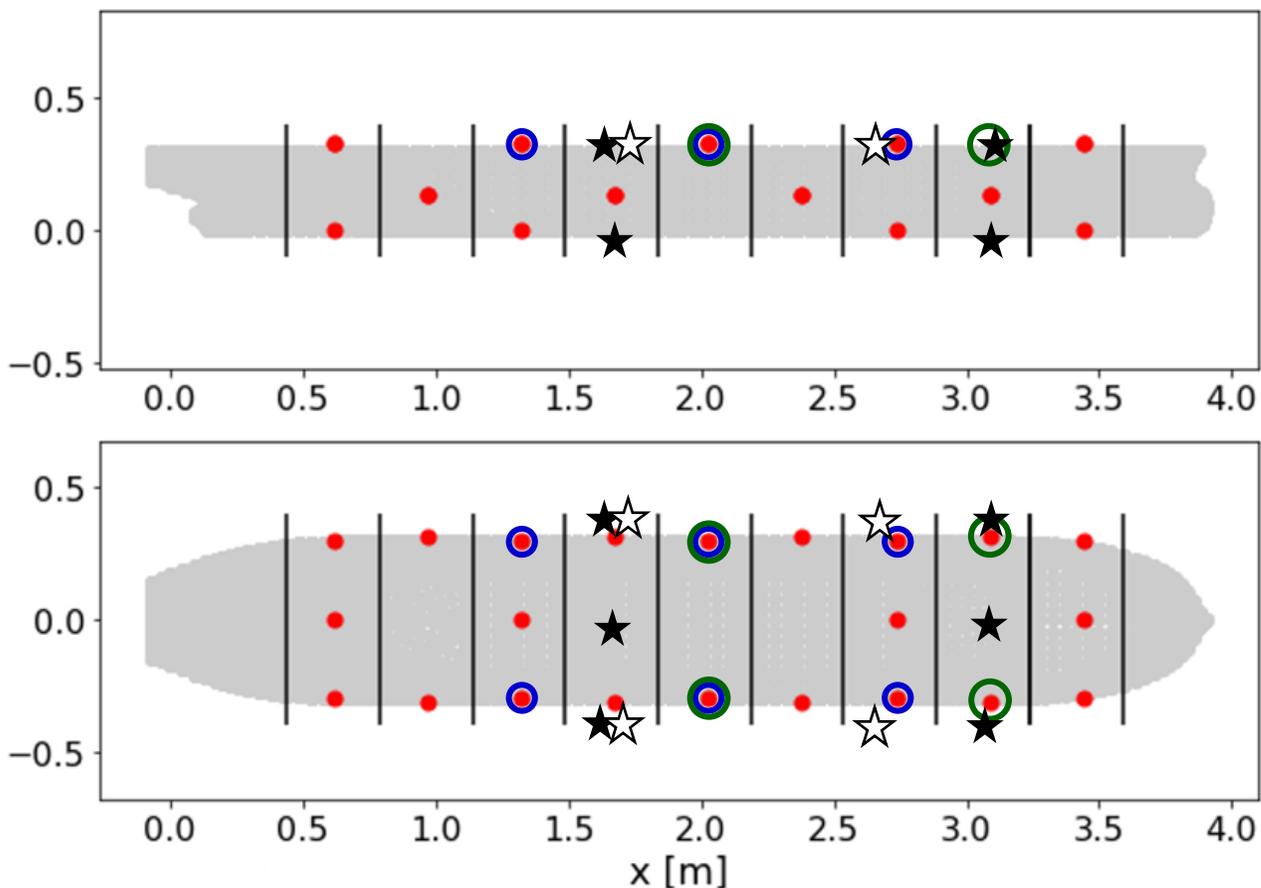
fiber Bragg grating
センサの利用により、
省配線での同時多点
計測が可能

データ同化3手法の検証

■ 検証に使用するひずみセンサ

	iFEM	KF法	波スペ法
解析に使用	●	○	○
推定対象	★	★	☆

みなし非計測部位



✓ 解析に使用する計測点数

iFEM	56点
KF法	6点
波スペクトル法	4点

✓ 推定内容

iFEM, KF法

- ひずみ値の時間変動推定
- 2断面, デッキ/船底

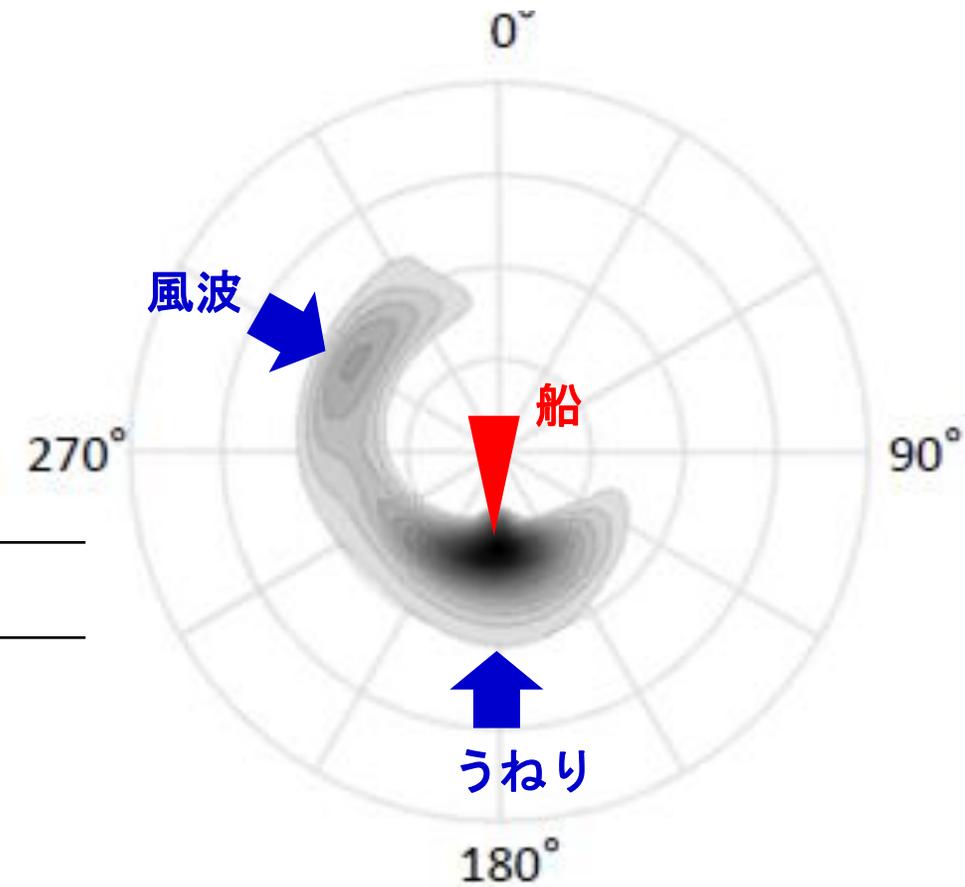
波スペクトル法

- ひずみの統計値推定
- 2断面, デッキ

検証試験条件

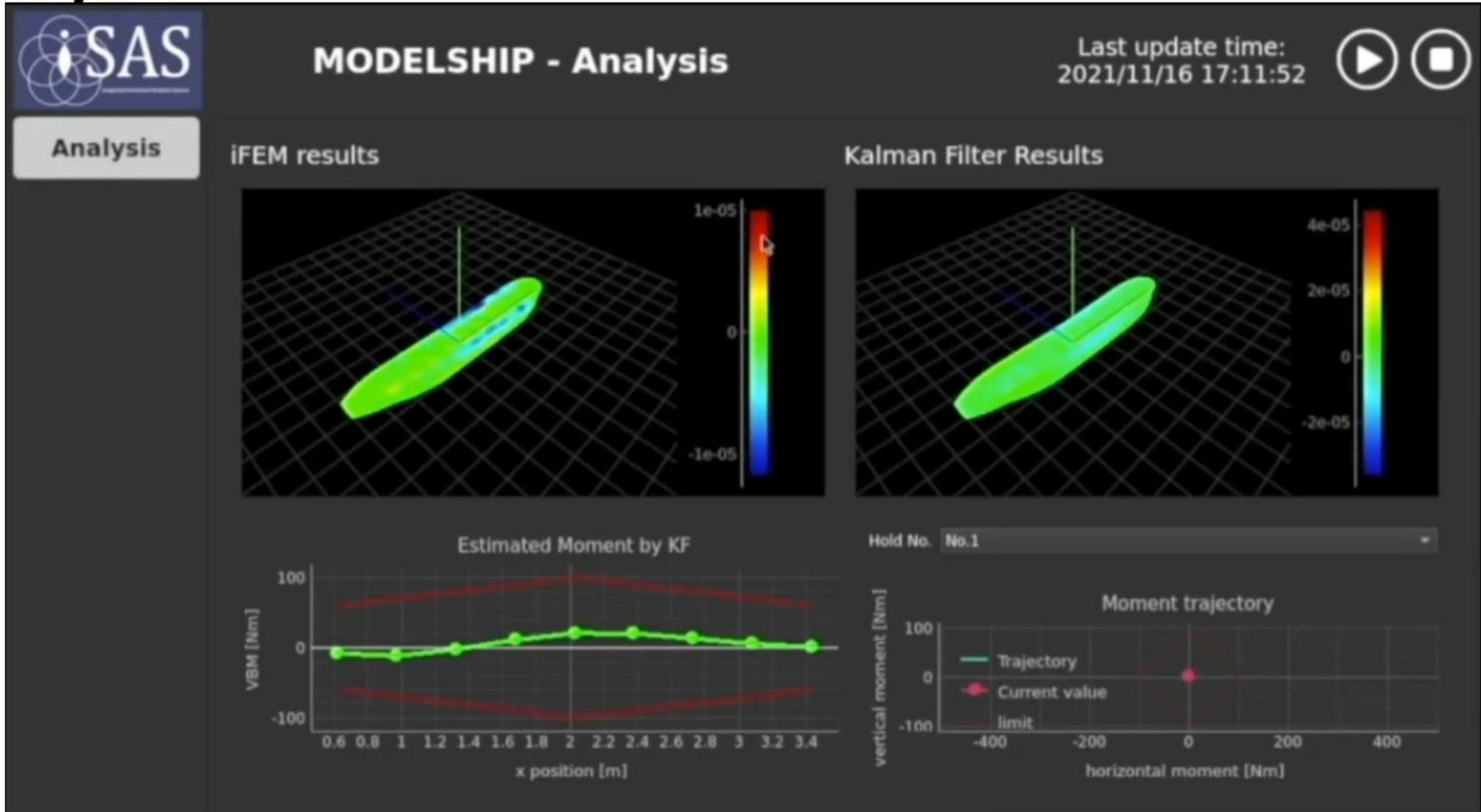
- 2方向短波頂不規則波中曳航
うねりと風波が共存する海象を想定

	うねり	風波
有義波高	4.17 cm (実船3m)	2.78 cm (実船2m)
平均波周期	1.41 s ($\lambda/L_{pp} = 0.8$)	0.94 s ($\lambda/L_{pp} = 0.35$)
出会い波向	180 deg. (正面向波)	300 deg. (斜追波)
船速	0.303 m/s (実船5 knot)	



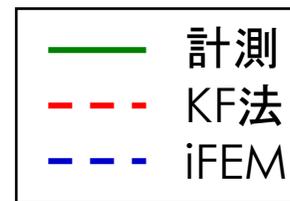
iFEM/KF法の検証

➤ 解析結果のリアルタイム表示／比較

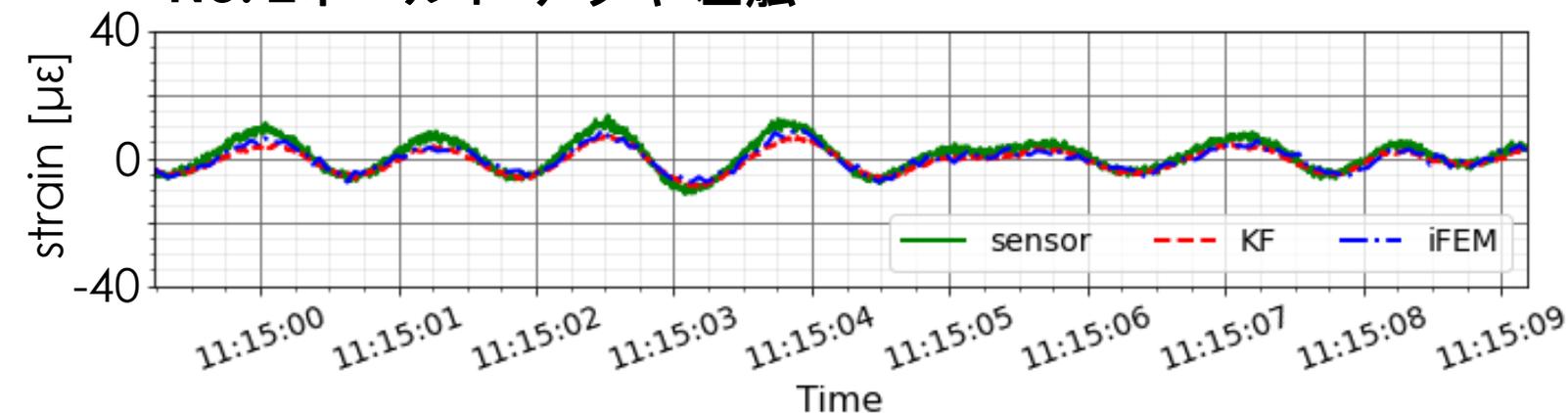


➤ 高性能PCを使用することで、約10Hz間隔でリアルタイムに解析・描画が可能

iFEM/KF法の検証



No. 2ホールド デッキ 左舷



	RMSE	最大値差
iFEM	21 %	-27 %
KF法	24 %	-32 %

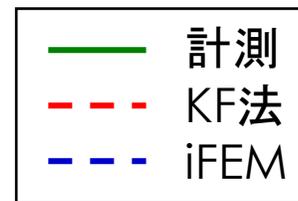
$$RMSE = \frac{\sqrt{\langle e_{est}^2 - e_{meas}^2 \rangle}}{2\sqrt{\langle e_{meas}^2 \rangle}}$$

振幅の有義値

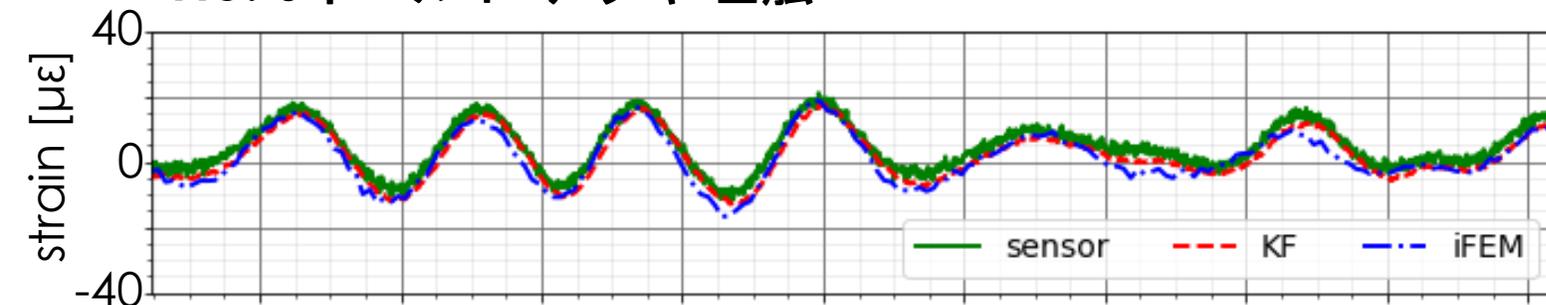
$$\text{最大値差} = \frac{\max(|e_{est}|) - \max(|e_{meas}|)}{\max(|e_{meas}|)}$$

(e : ひずみ)

iFEM/KF法の検証

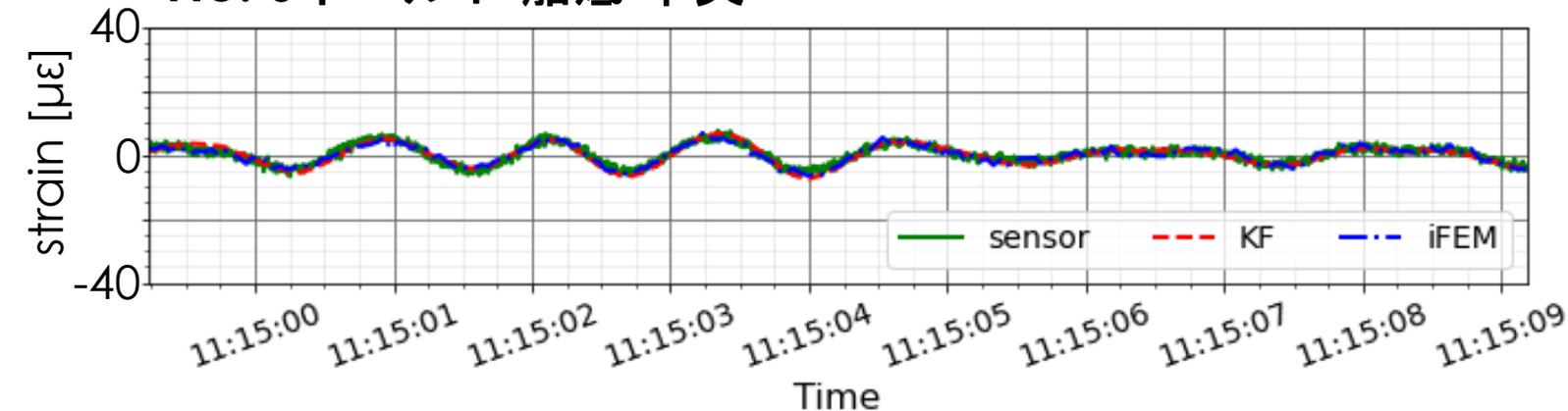


No. 6ホールド デッキ 左舷



	RMSE	最大値差
iFEM	28 %	1.4 %
KF法	21 %	-8.2 %

No. 6ホールド 船底 中央



	RMSE	最大値差
iFEM	21 %	-8.2 %
KF法	20 %	2.3 %

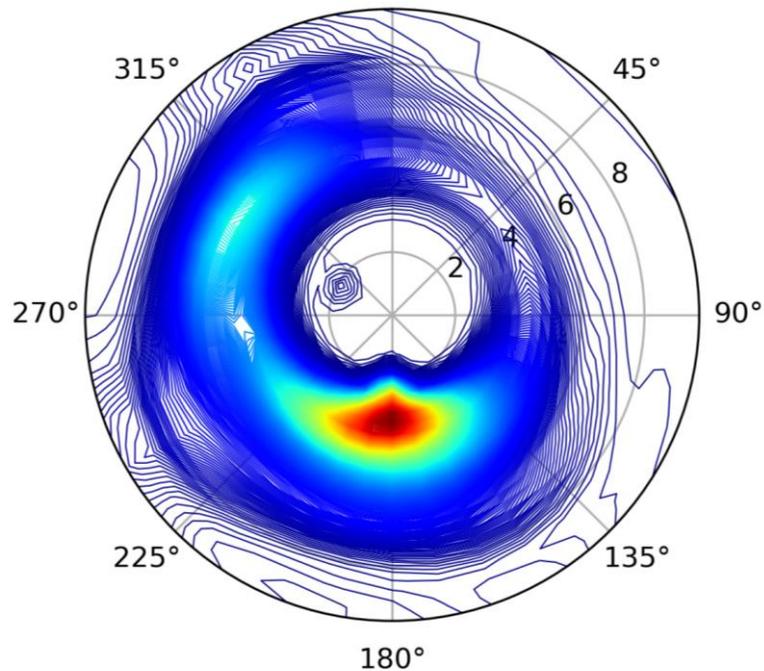
- ✓ 両手法ともおおむね20%の誤差でひずみの時間変動を推定可能
- ✓ 中央ホールド付近のひずみの最大値を約10%以下の誤差で推定可能

波スペクトル法の検証

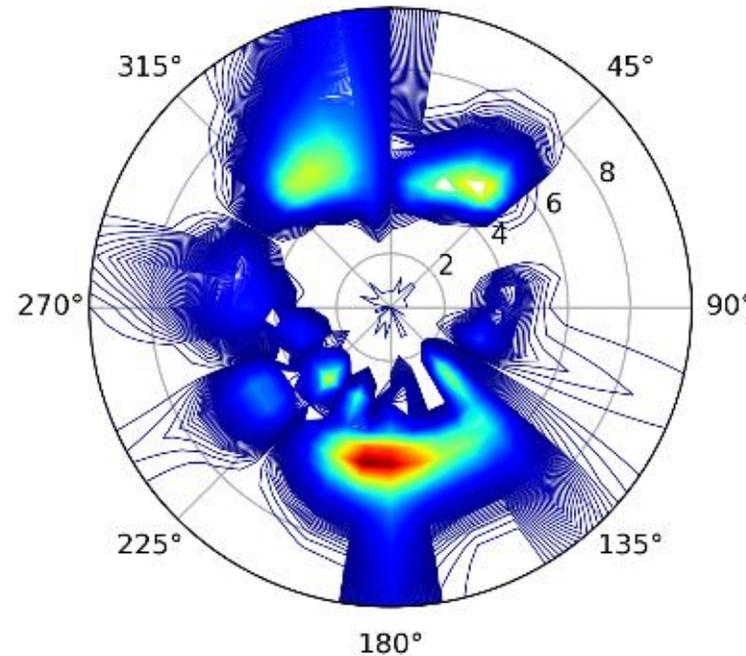
- A) 【従来手法】 運動 (heave, pitch, roll) を利用
- B) 【提案手法】 ひずみを利用

➤ 方向波スペクトルの推定

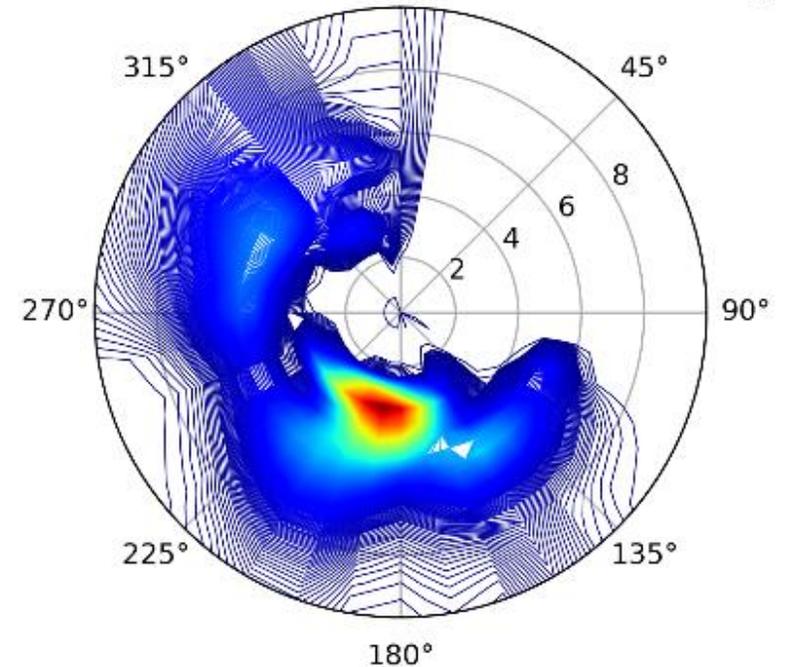
波検定



手法(A)



手法(B)



1.

✓ 高周波応答の活用により方向スペクトル推定精度が向上

波スペクトル法の検証

➤ ひずみの標準偏差値の推定

	計測	誤差 (A)運動	誤差 (B)ひずみ
No.3 デッキ (左)	4.78 $\mu\epsilon$	-67.8 %	3.35 %
No.3 デッキ (右)	4.83 $\mu\epsilon$	-71.4 %	6.42 %
No.6 デッキ (左)	6.44 $\mu\epsilon$	-63.0 %	5.90 %
No.6 デッキ (右)	6.73 $\mu\epsilon$	-48.6 %	-12.6 %

- ✓ ひずみの利用により従来の運動からの推定よりも精度が向上
- ✓ ひずみの標準偏差値をおおむね10%以下の誤差で推定可能

まとめ

- DTシステムのデータ同化手法の精度検証を行うため、GFRPサンドイッチパネル製のバルクキャリア弾性模型を製作した。
- 製作した弾性模型船を用い、水槽試験を実施した。
- 水槽試験のi-SASを適用し、映像、計測結果、解析結果のリアルタイムな表示が可能であることを確かめた。
- 水槽試験結果から、データ同化3手法（波スペクトル法、KF法、iFEM）の精度を検証し、iFEMおよびKF法ではおおむね20%程度の誤差で非計測部位のひずみの時間変動を、波スペクトル法ではおおむね10%以下の誤差で非計測部位のひずみの標準偏差値を推定できることを明らかにした。