

令和3年(第21回)海上技術安全研究所研究発表会

6 船体構造デジタルツインに必要な数値シミュレーション手法 検証のための水槽試験技術の開発



構造安全評価系
小森山祐輔、馬沖、岡正義



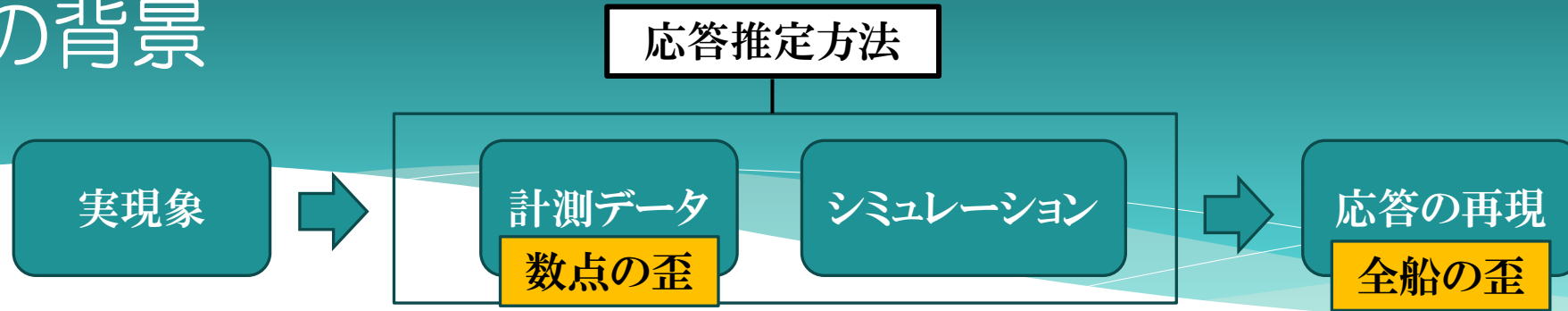
発表の概要

- * 研究の背景・目的
- * 模型船
- * 計測システム
- * 試験結果
- * まとめ

1. 研究の背景・目的



研究の背景



デジタルツインの概要

- 船体構造デジタルツインに必要な「応答推定方法」を検証するには、波浪→外力→応答(歪)に渡る詳細なデータが必要になる。
- 波浪・外力・応答を取得するには水槽試験が有効である。
- デジタルツインのための応答推定方法の検証のための水槽試験について検討した。



船体構造デジタルツイン

参照：<https://www.youtube.com/watch?v=Z7JhtkxloAY&t=10s>

研究の目的

- 船体構造デジタルツインに必要な数値シミュレーション手法を検討するための水槽試験技術として、水圧から構造応答を推定する手法の提案・検証を行った。

【計測データ】 水圧

【対象とした応答】 縦曲げモーメント

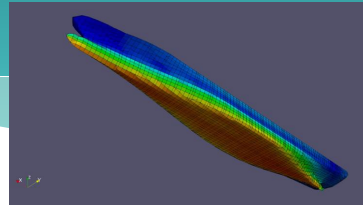
- これまで水槽試験では縦曲げモーメントを計測するために、分割模型や弾性模型などの模型船を使う必要があった。
→提案法では**剛体模型**で**任意位置**の縦曲げモーメントを計測することができる。
- 提案法を検証するために、弾性模型船を用いて多点の歪を計測し、歪から縦曲げモーメントを求めて、提案法による推定値と比較した。

研究の概要

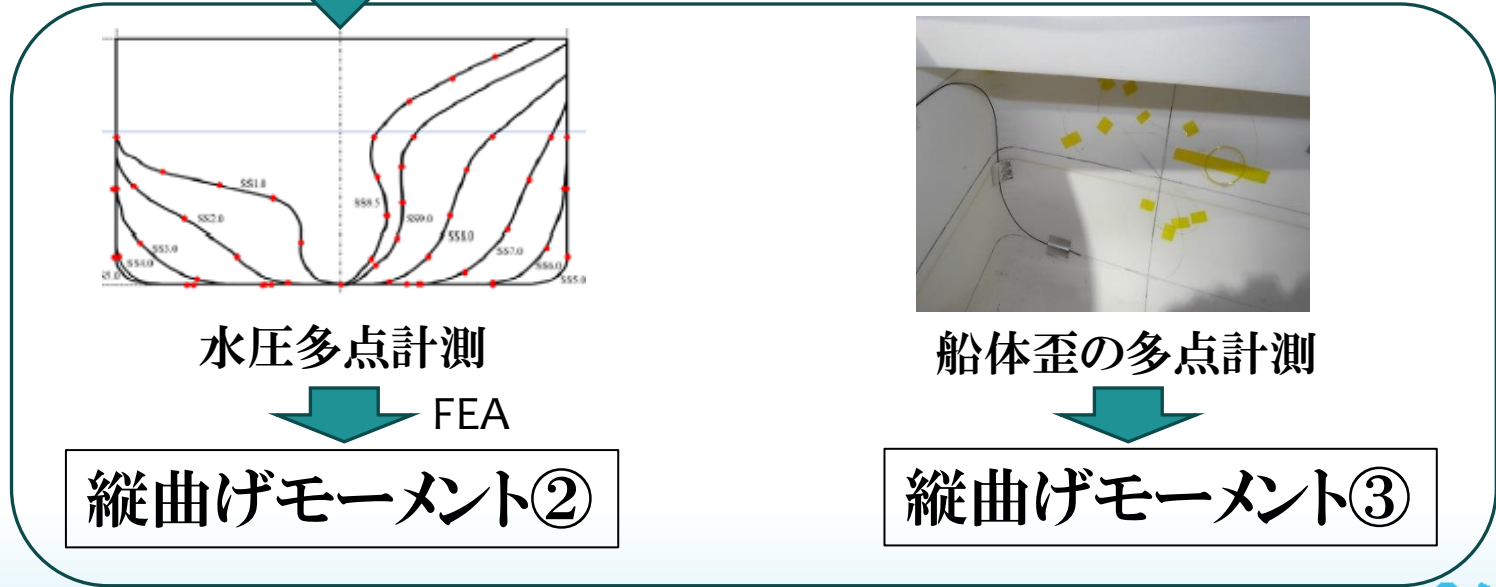
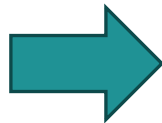
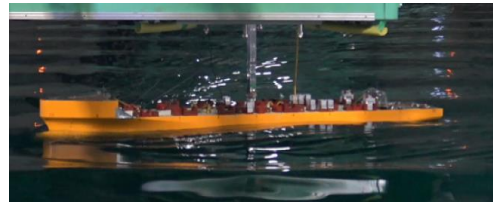
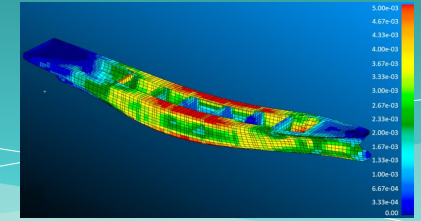


パネル法

縦曲げモーメント①

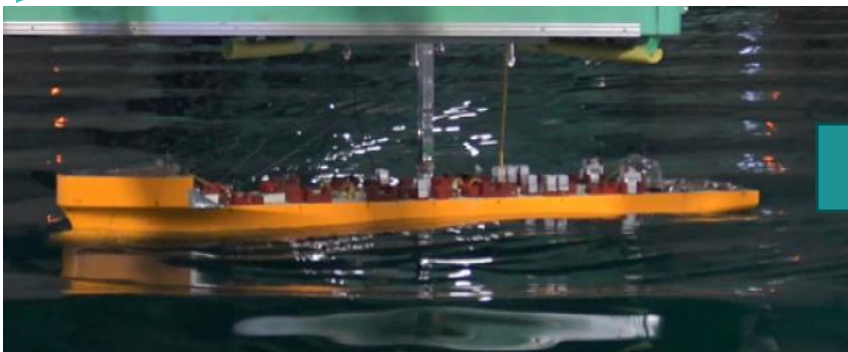


FEA

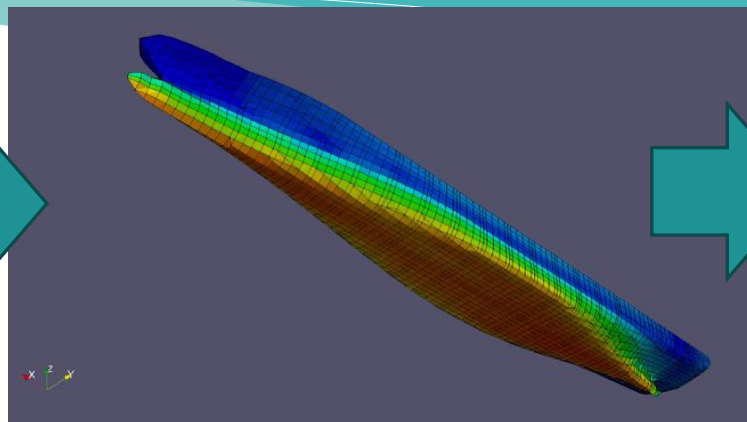


各手法から得られる縦曲げモーメントを比較し，提案法の検証を実施した。

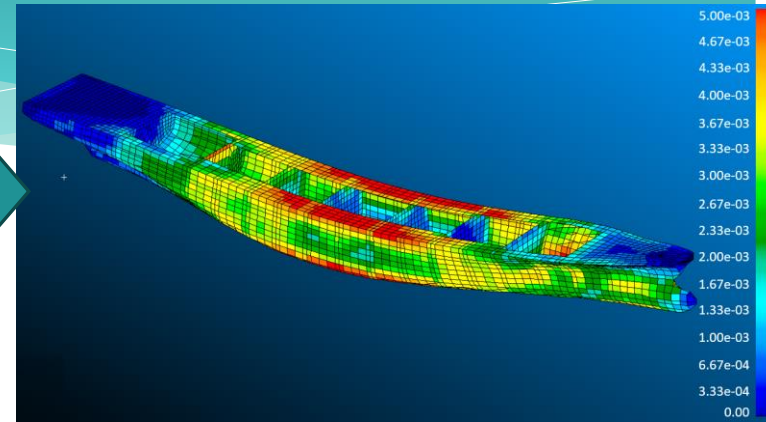
計算プログラム (水圧計測による縦曲げモーメント取得)



模型船表面の水圧の計測



補間による水圧分布の取得



水圧分布を用いた有限要素解析(FEA)

計算プログラムを構築

2. 模型船

模型船について

実船と模型船の主要目

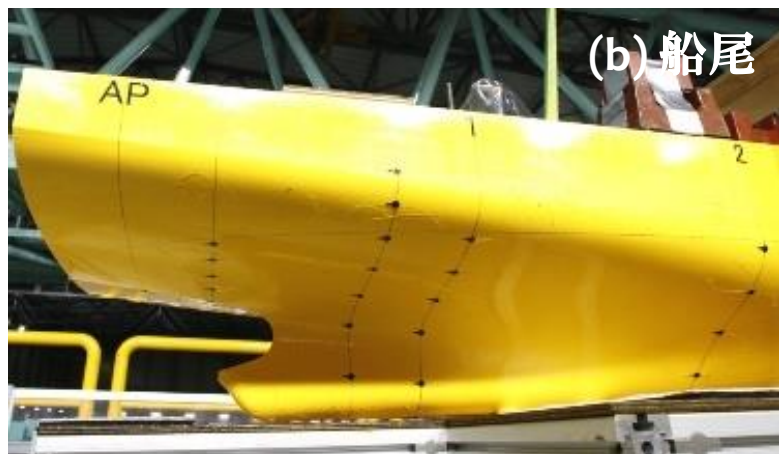
	Target ship	Ship model	Scaling ratio
Length L_{pp} (m)	283.8	3.800	α
Breadth (m)	42.80	0.5731	α
Draft (m)	14.00	0.1875	α
Depth (m)	24.40	0.3267	α
Disp. (ton)	109749.0	0.2573	α^3
KG(m)	18.15	0.2430	α
GM(m)	1.090	0.0147	α

模型船:ウレタン製弾性模型船

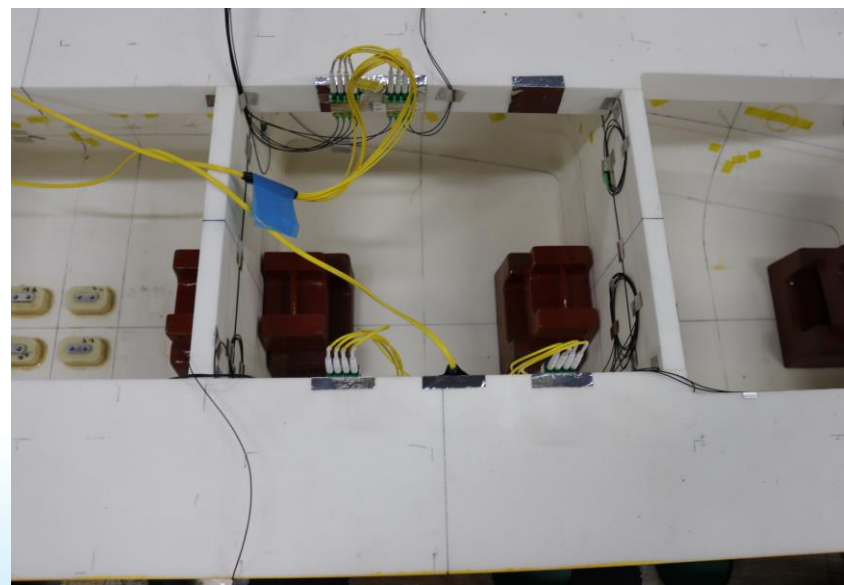
(6,600TEU型コンテナ船, 海技研モデル, 縮尺比 $\alpha=1/74.68$)

材質:ウレタン(ヤング率57.9MPa)

模型船について



※歪ゲージ式圧力センサではなく、表面貼付け型のFBG圧力センサを用いた。



弾性模型船の外観

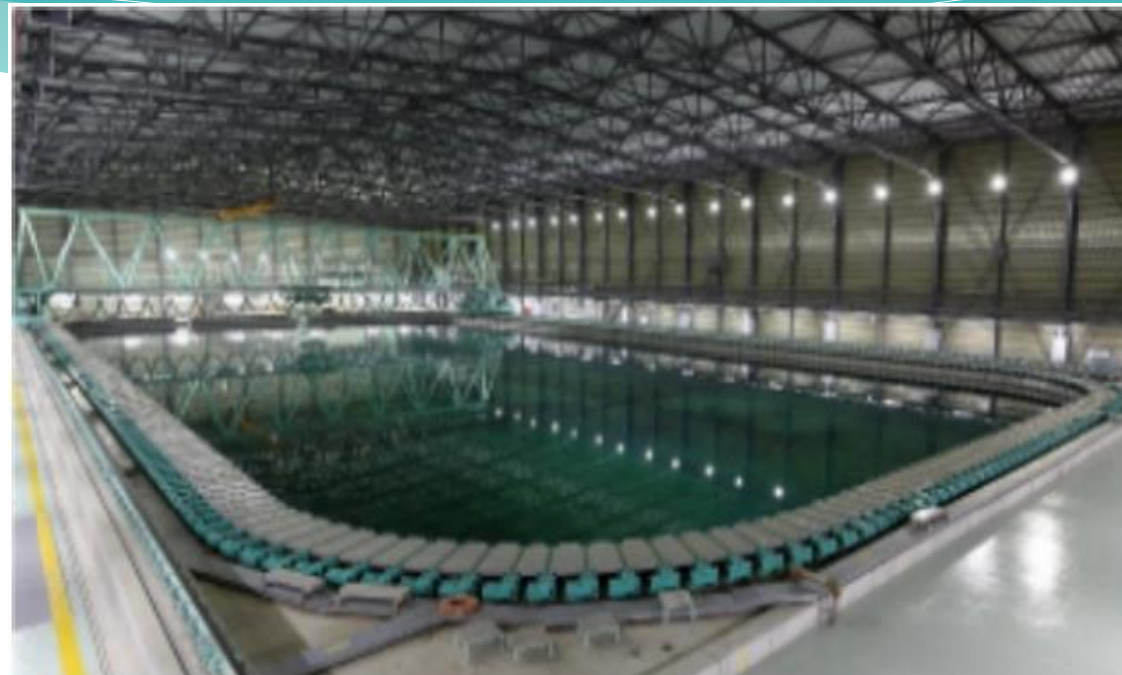
3. 計測システム



実海域再現水槽

- 長さ:80m
- 幅:40m
- 水深:4.5m
- 周囲に382枚のフラップ式の造波板
(造波と吸収が可能)

規則波, 長波頂不規則波, 短波頂不規則波
で試験を実施した. 規則波の試験結果を用
いて提案法を検証した.



実海域再現水槽

計測項目

1. 船体運動

模型船の曳船用ガイド装置に設置されたポテンシオメータを使用して重心位置での6自由度の運動 (surge, sway, heave, roll, pitch, yaw) を計測した。

2. 船体歪

Fiber Bragg Gratings (FBG)の歪センサを用いて、計測を実施した。

3. 船体水圧

Fiber Bragg Gratings (FBG)の圧力センサを用いて、計測を実施した。

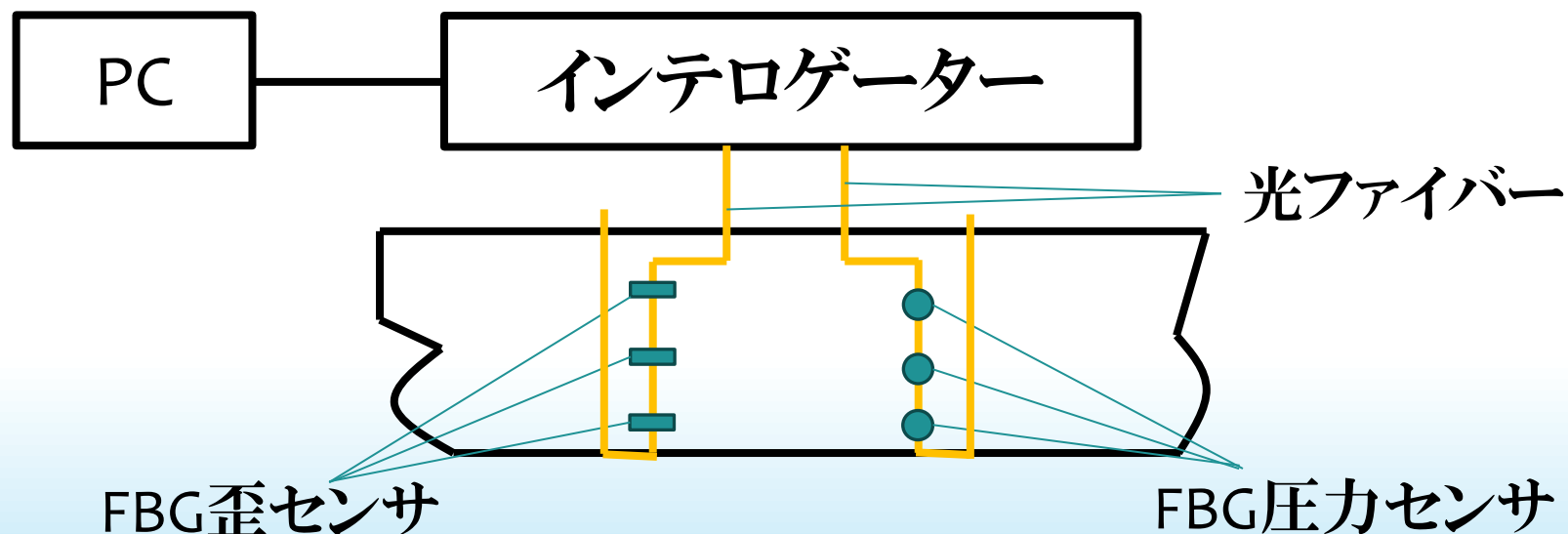
FBGのセンサを利用することで船体歪と表面水圧を多点で計測することを可能としている。



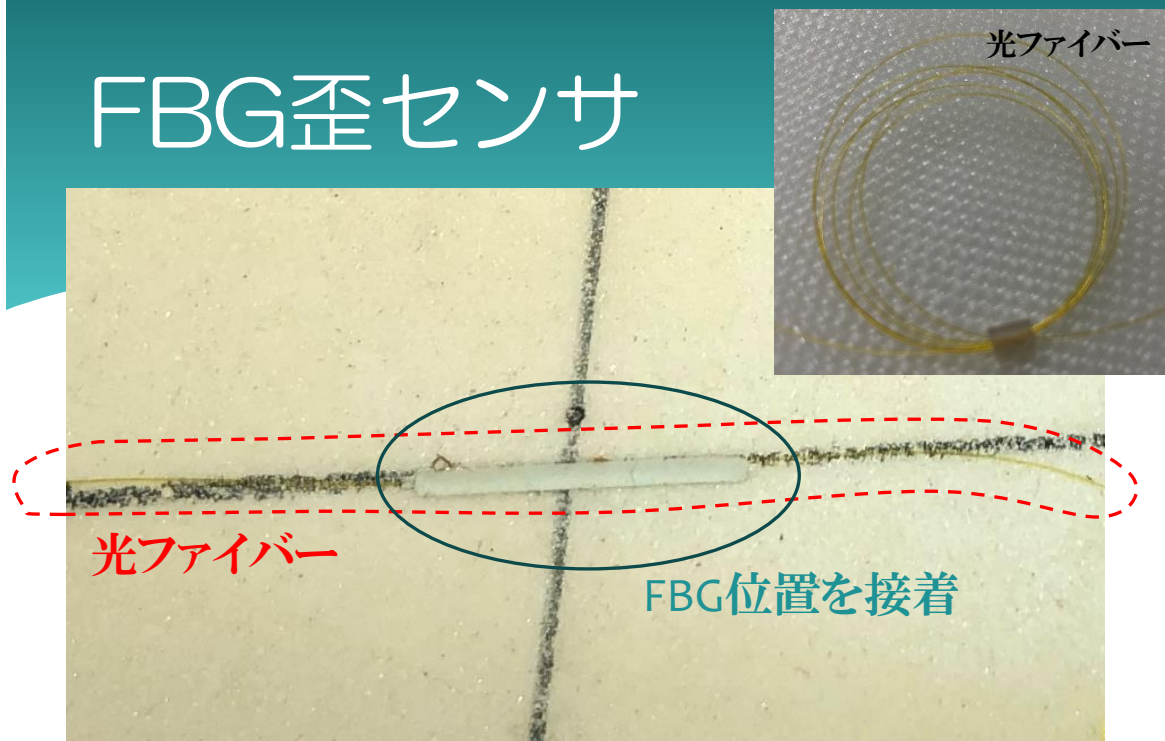
Fiber Bragg Gratings (FBG)

FBGとは・・・ある特定の波長の光を反射する格子を有する光ファイバー

- FBGが伸び縮みすると、格子間隔も変化することで反射する光の波長も変化する。
→伸び縮み量と波長の変化分の関係が分かっているならば、FBGで物理量を計測可能。
- 反射する光の波長が異なるFBGであれば1本の光ファイバーに複数のFBGを数珠繋ぎに接続し計測できる。
→センサ・配線が煩雑にならないので、多点計測に向いている。



FBG歪センサ



FBG歪センサ

接着: Loctite社製エポキシ系接着剤1C-LV
光の波長から歪への変換は以下の計算で実施した。

$$\varepsilon = \frac{(\lambda - \lambda_0) / \lambda_0}{F_g} \times 10^6, \quad F_g = 0.796$$

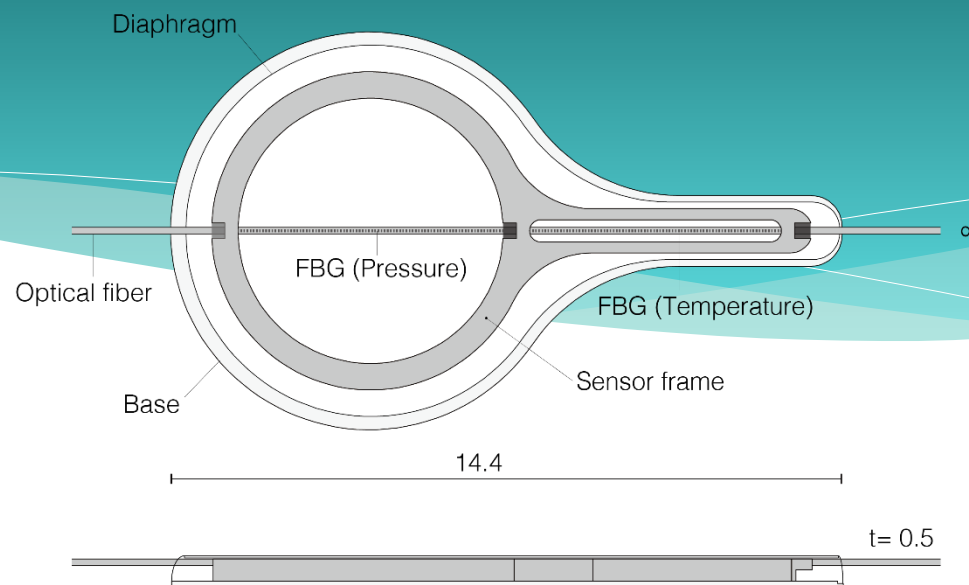
ε : 歪($\mu\text{m}/\text{m}$), λ : 光の波長(nm), λ_0 : 光の波長の初期値(nm)

Parameter	Specifications
Wavelengths	1460~1620nm
Length of BG	10mm
Temperature Range	-40°C~+275°C
Strain Range	~15,000 $\mu\varepsilon$ with 1.2pm/ $\mu\varepsilon$
Fiber Bend Radius	~17mm

FBG圧力センサ



FBG圧力センサ



FBG圧力センサの内部構造

接着：両面テープ

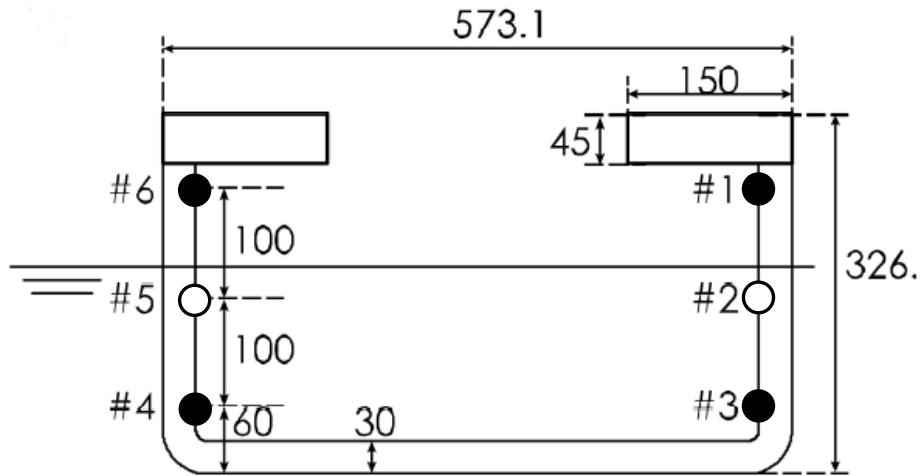
内部に圧力計測用と温度補償用の2つのFBGが内蔵されている。
光の波長から圧力への変換は以下の計算で実施した。

$$p = C_p \{ (\lambda_p - \lambda_{p0}) - S_t (\lambda_t - \lambda_{t0}) \}$$

p : 水圧 (mmAq), λ_p, λ_t : 光の波長 (nm), $\lambda_{p0}, \lambda_{t0}$: 光の波長の初期値 (nm)

FBG歪センサとFBG圧力センサの設置位置

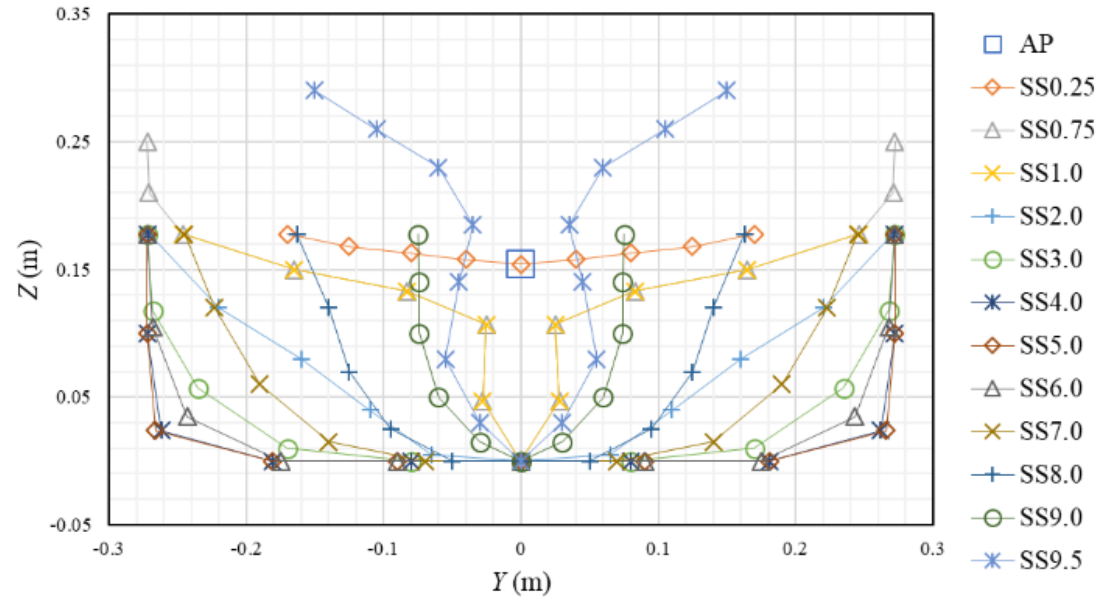
FBG歪センサ(130点) : 各ホールドの船長方向中央の断面等
 FBG圧力センサ(139点) : 船尾から船首までの各断面



(unit: mm)

- Gauges for normal strain
- Gauges for shear strain

FBG歪センサの配置



FBG圧力センサの配置

試験条件

船速	0.0m/s, 0.366m/s (実船相当0.0kt, 5.0kt)
波高	4.02cm, 8.03cm (実船相当3.0m, 6.0m)
波長船長比	0.7~1.1 (向波), 0.4~0.8 (斜め波)
波向き	180deg. (向波), 120deg. (斜め向波), 60deg. (斜め追波)

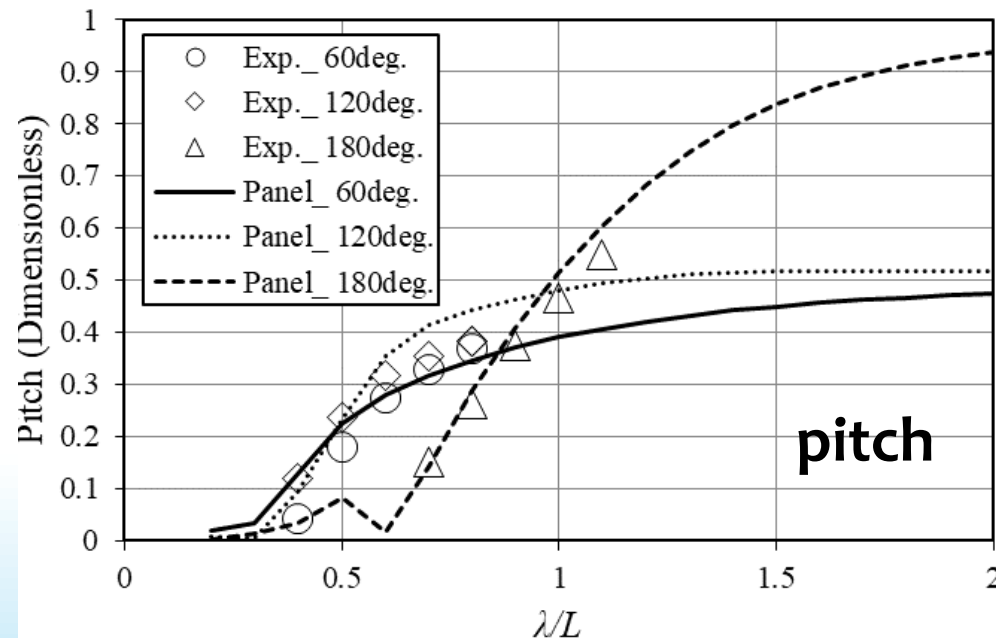
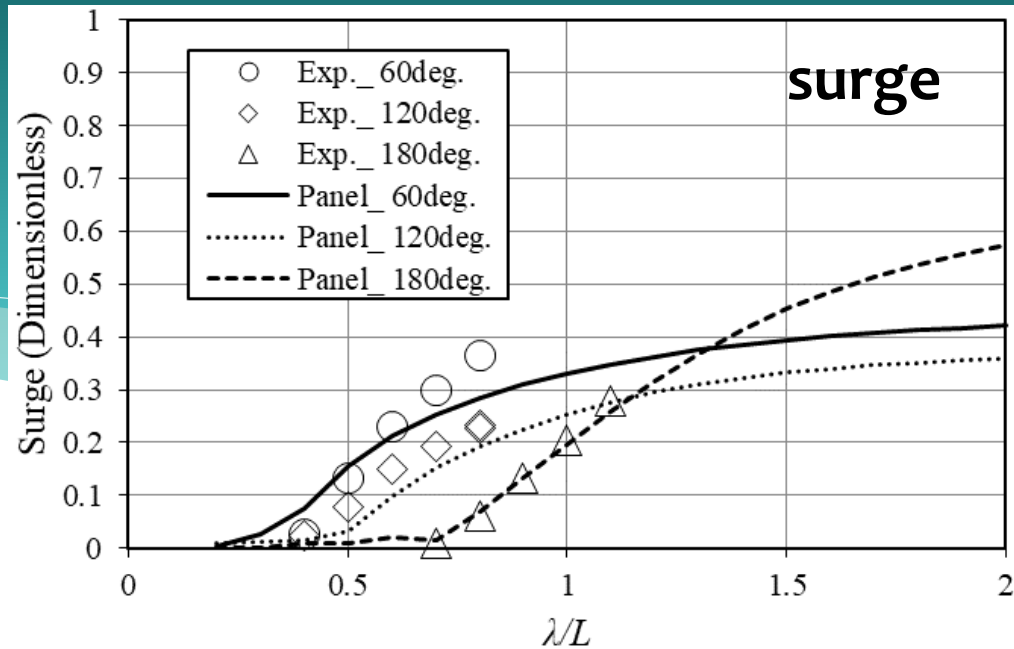
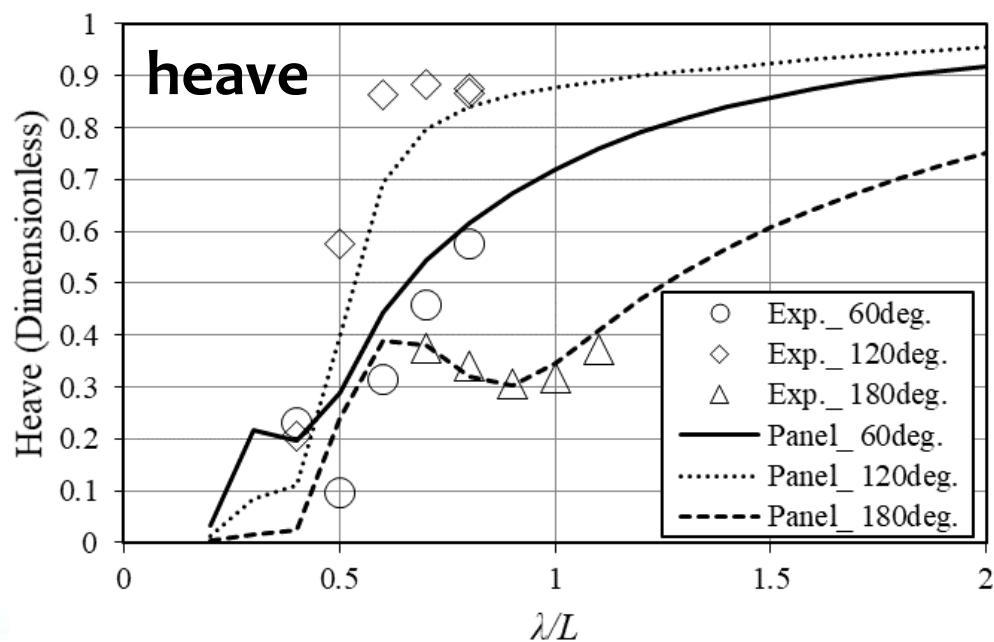
以上の条件より, 38通りの試験を実施した.

4. 試驗結果



船体運動

パネル法により波浪中での船体運動を良好な精度で推定できることを確認した。



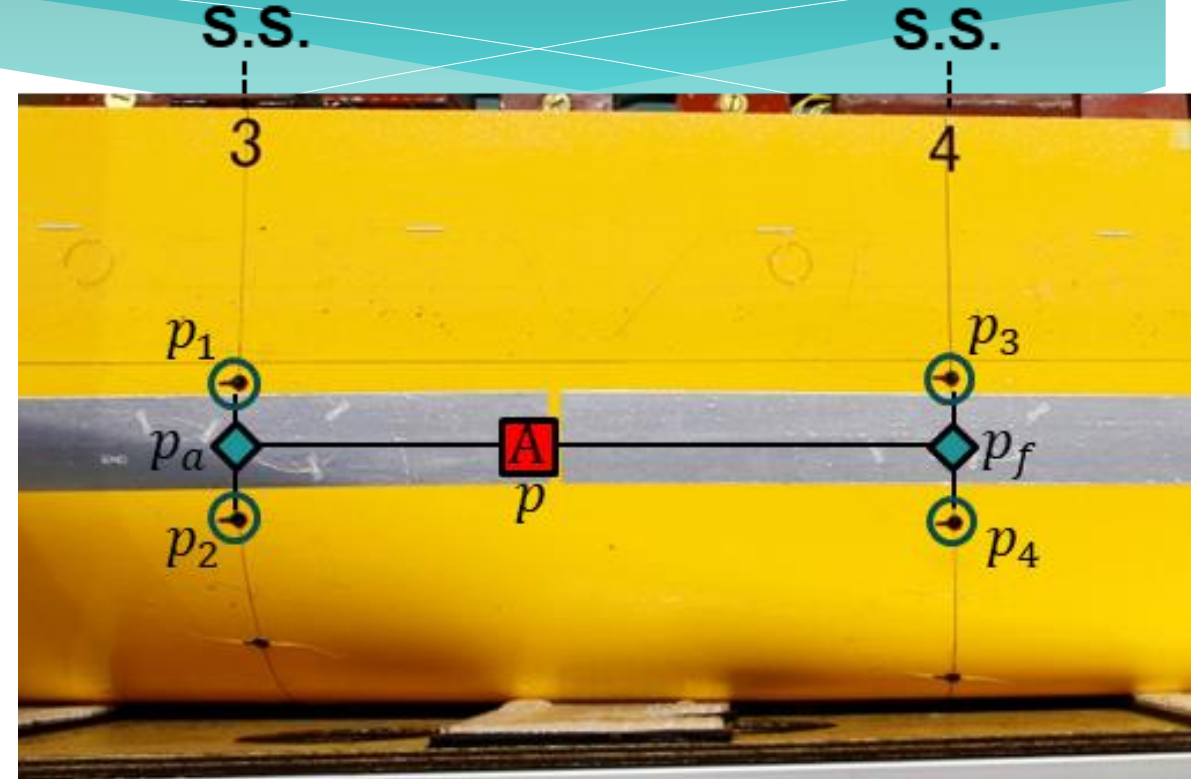
船体運動のRAO ($H_w=8.03\text{cm}$, $V=0.366\text{m/s}$)



水圧分布(1/2)

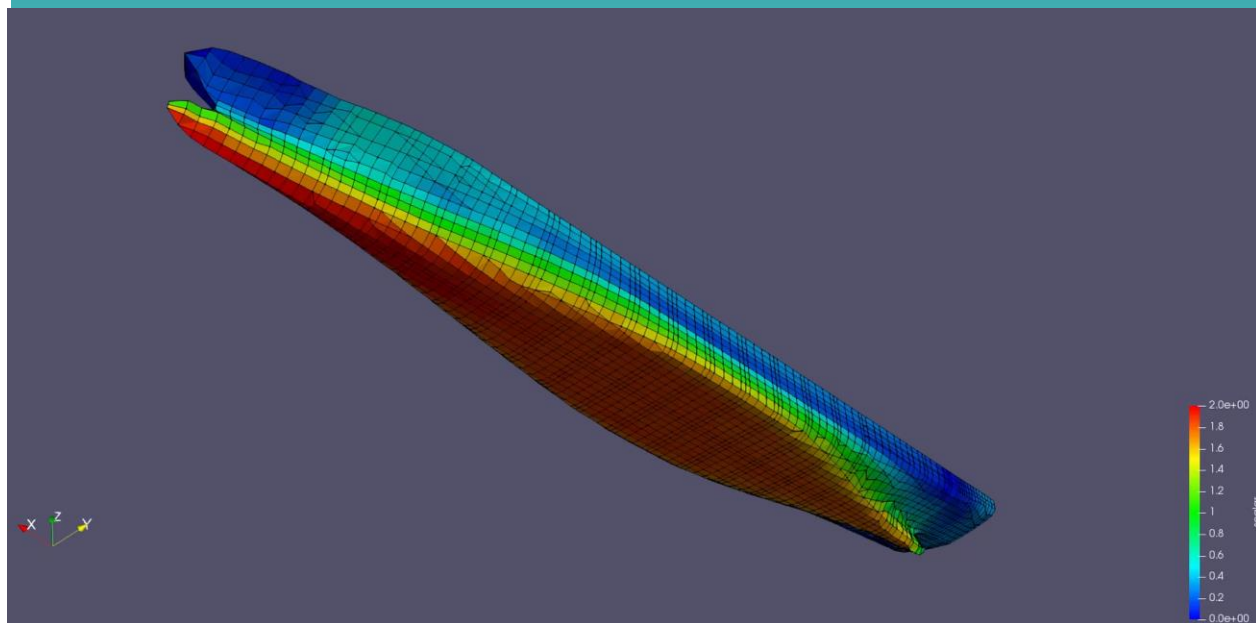
得られた水圧を補間して模型船表面全体の水圧分布を得る。

- ① 補間する位置(図中のA)の前後断面それぞれにおいて、補間する位置の高さに近い圧力センサ位置2点の水圧(図中のS.S.3では p_1, p_2 , S.S.4では p_3, p_4)を用いて、高さ方向の補間を行うことで、前後断面の補間する位置の高さでの水圧 p_a, p_f を求める。
- ② 前後断面で得られた水圧 p_a, p_f から、前後方向の補間を行うことで、補間する位置の水圧 p を求める。

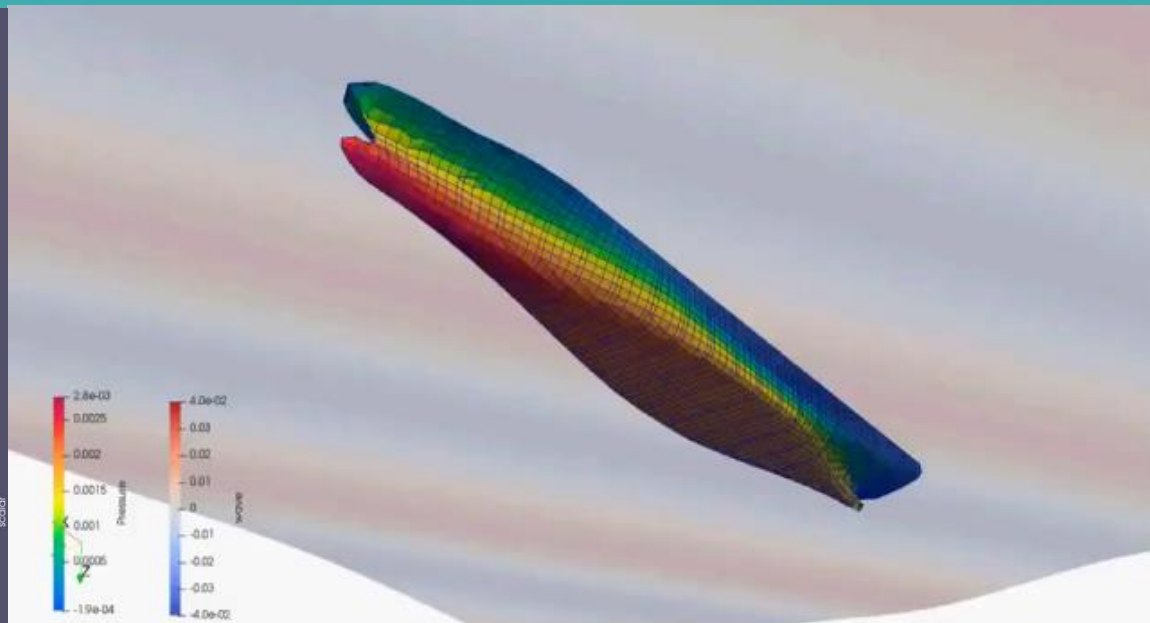


水圧の補間要領

水圧分布(2/2)



計測された水圧を補間して得られた水圧分布



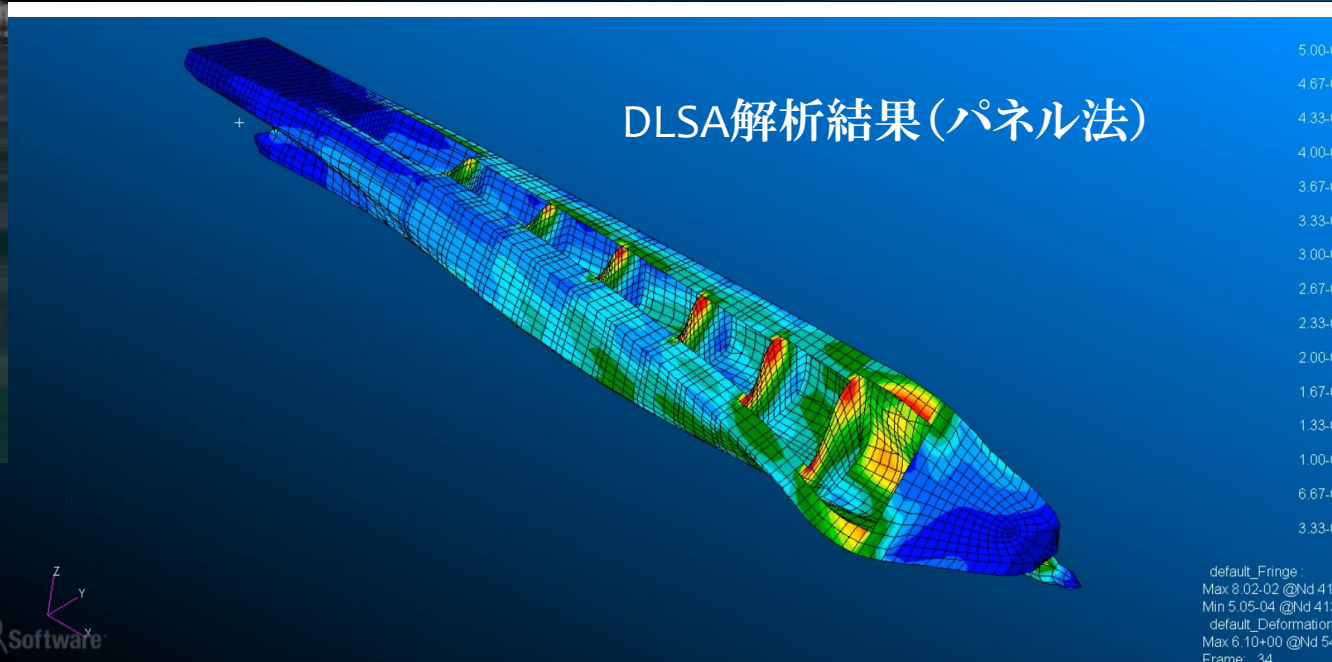
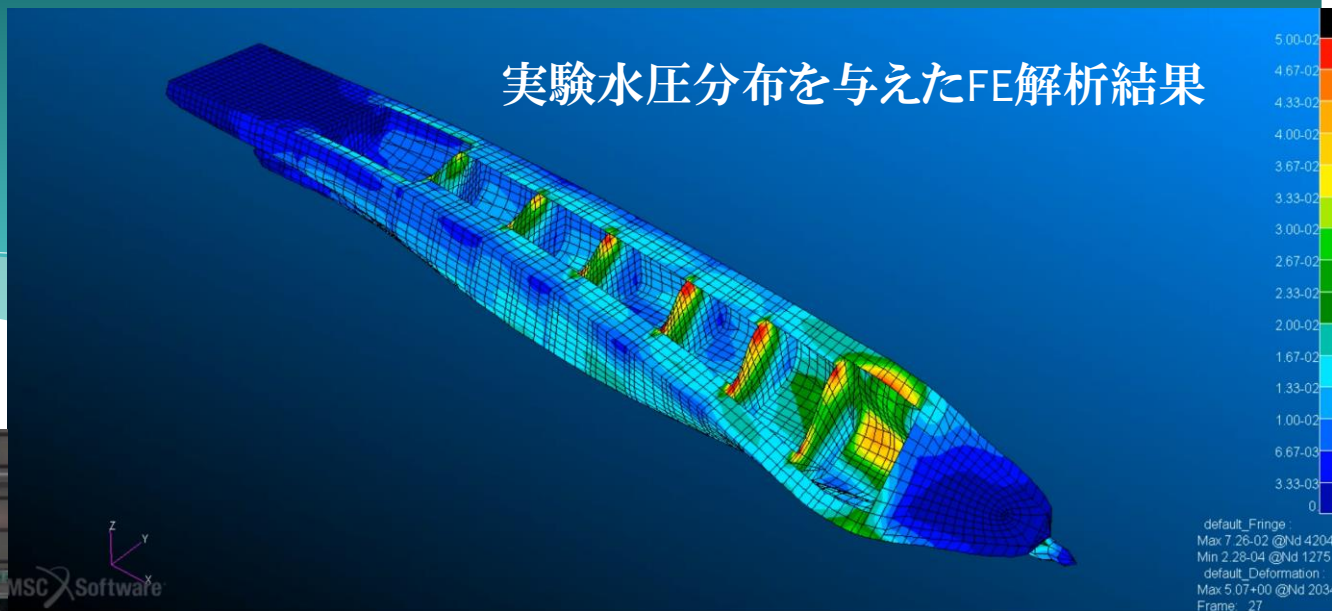
パネル法により得られた水圧分布

離散的に計測された水圧を補間することでパネル法の水圧分布と良い一致を示している。
→数値シミュレーションの結果を視覚的に検証することを可能にした。

FEA結果

<条件:斜め向波>

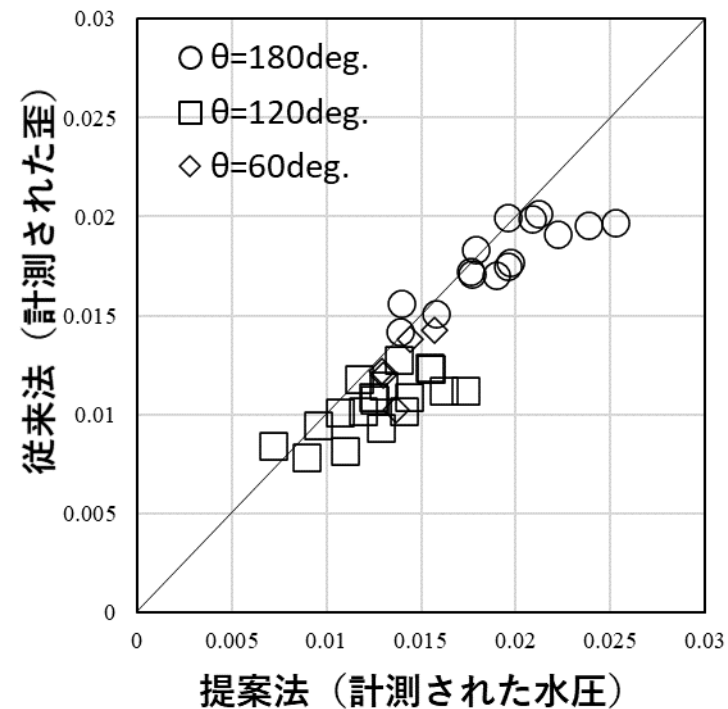
$V=0.366\text{m/s}$, $H=4.02$, $\chi=120\text{deg}$, $\lambda/L=0.6$



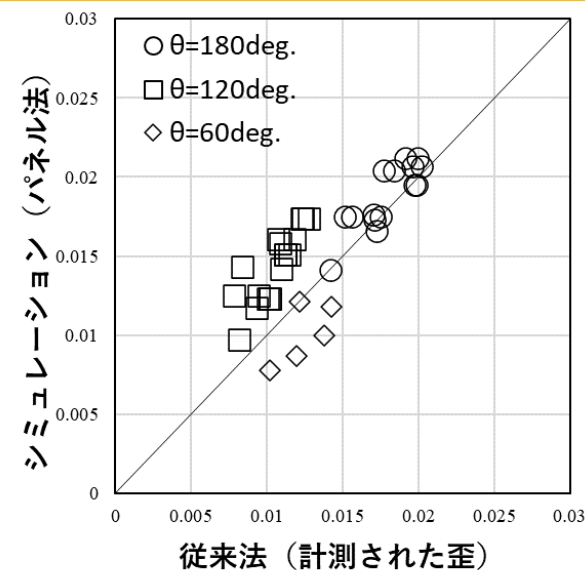
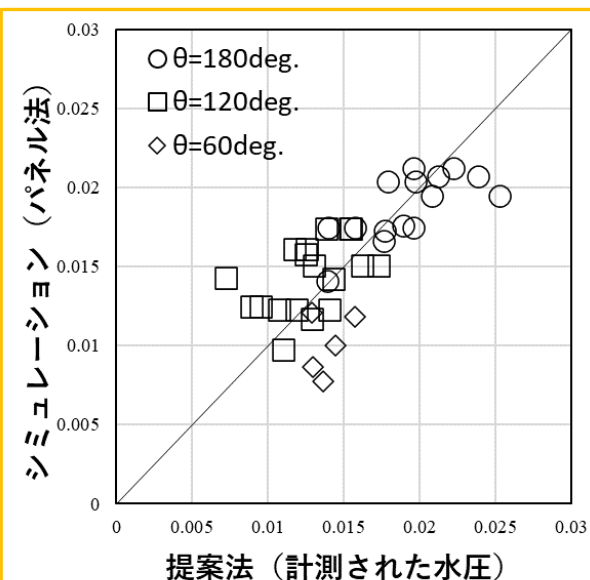
縦曲げモーメントの比較

- 提案法 (計測された水圧から求めた縦曲げモーメント) は, 従来法 (歪から求めた縦曲げモーメント) と良い相関があることが確認された。
- 提案法は, 従来法と同様に, パネル法において波向き120deg. で大きく, 60deg. で小さい傾向を捉えている。

→従来法, シミュレーション (パネル法) との比較により, 提案法の有効性を示すことができた。



※図は縦軸・横軸ともに縦曲げモーメントの無次元値を示す。



5. まとめ

まとめ

- 船体構造デジタルツインに必要な数値シミュレーション手法を検討するための水槽試験技術として、水圧から構造応答を推定する手法を提案した。
- 提案法では、模型船に働く水圧を補間して得られた水圧分布を用いて有限要素解析を実施し、縦曲げモーメントを求めた。
- 提案法の検証として、水槽試験結果の弾性模型船の歪から得られた縦曲げモーメントと比較し、その有効性を示した。

- 提案法では、計測された水圧を元に縦曲げモーメントを算出できるので、水槽試験では弾性模型ではなく**剛体模型**を使用可能である。
- 提案法を用いれば、水平曲げモーメントや振りモーメントも計測可能であり、検証結果等については今後報告する予定である。