



第25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のための計測応答データ を用いたカルマンフィルタによる出会い波時刻歴 および非計測応答の推定技術

令和7年7月18日

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

海上技術安全研究所

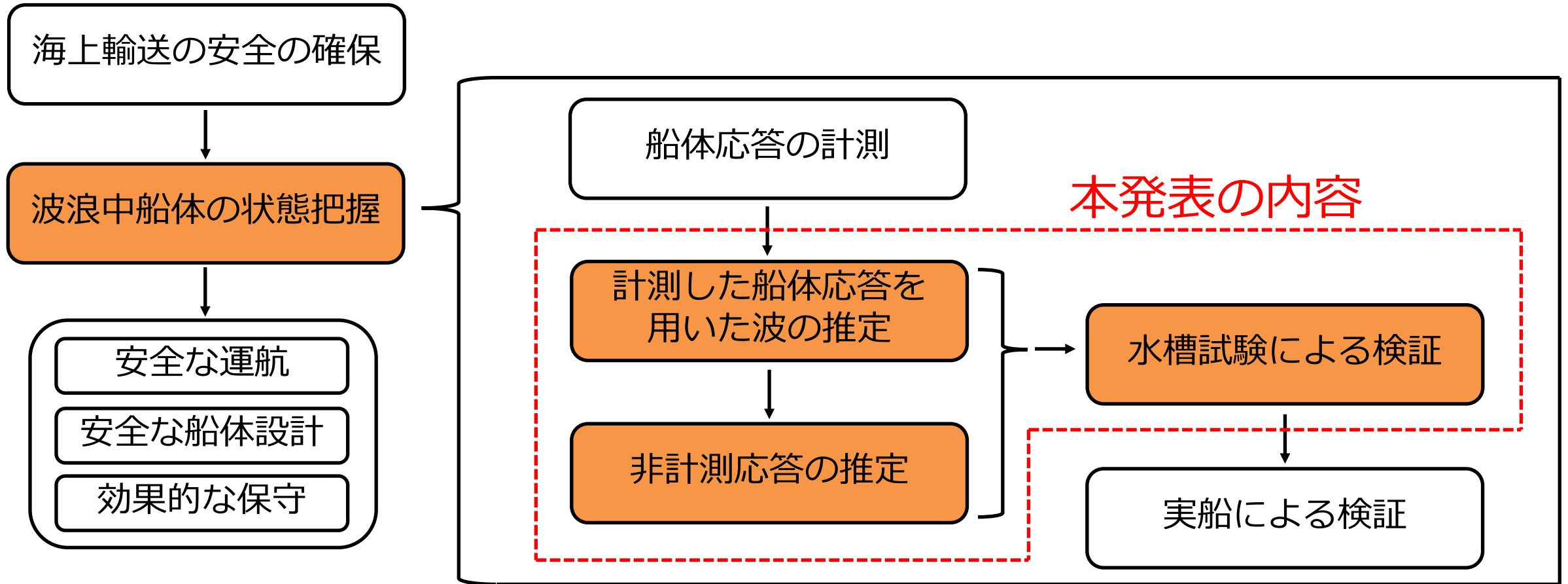
構造・産業システム系

小森山 祐輔

1. 背景と目的
2. 波と非計測応答の推定手法
3. 水槽試験
4. 手法の検証
5. まとめ

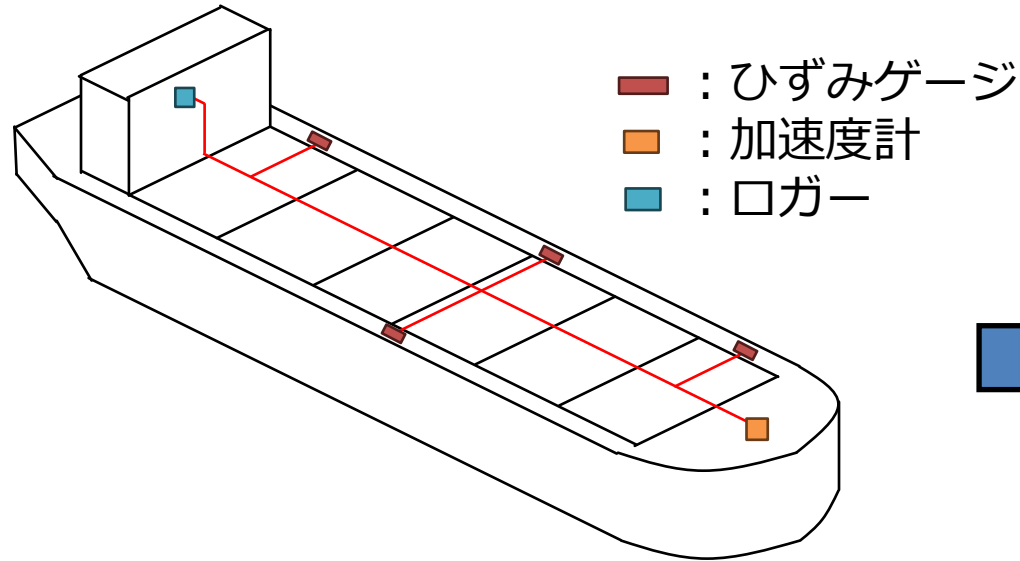
1. 背景と目的

1. 研究全体の概要と本研究の内容

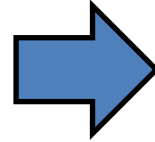


- 大目標：海上で運航する船体の安全を確保する。
- 本研究：運航中船体の状態を推定する。
- 今後の課題：実船での検証，安全な運航・設計・保守への展開。

1. 波浪中の船体の状態把握



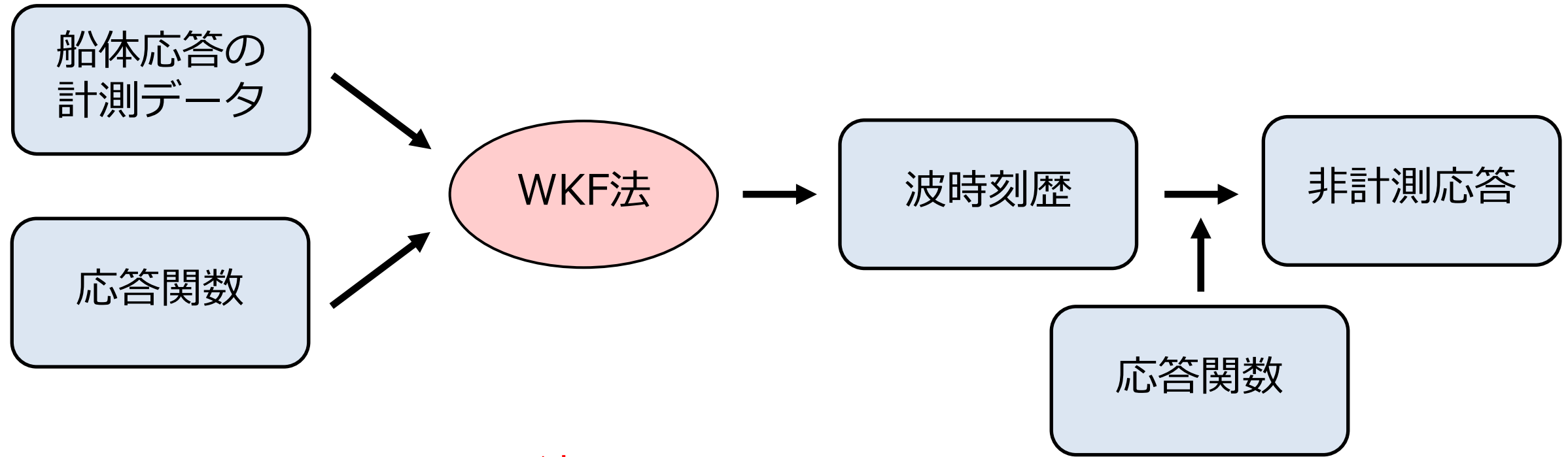
ハルモニタリングシステム (HMS)



計測した船体応答から波を推定し、波から他の応答も推定する。

- HMSにより、波浪中船体の状態(応力や加速度など)を直接計測することができる。
- 船体の状態把握により、安全な運航・安全な船体設計・効果的な保守への活用が期待できる。
- 設置等に掛かる費用や工数により計測点数が限られる。
→ 少ない計測点の情報から船体全体の状態把握が必要である。

1. WKF法による波時刻歴と非計測船体応答の推定

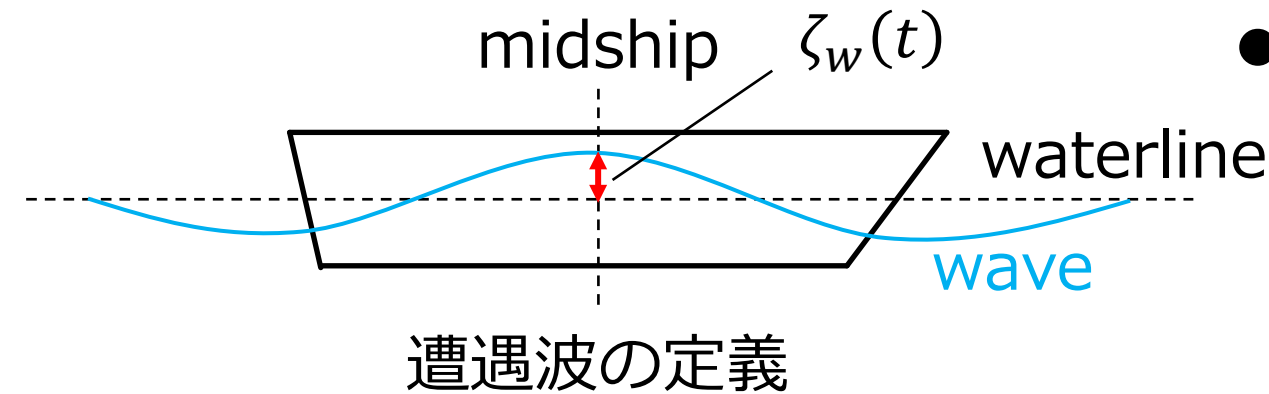


Wave Kalman Filter (WKF) 法：

- 船体応答の計測データを基に，カルマンフィルタを用いて，遭遇波と非計測応答を推定することができる。
- アルゴリズムの実装が容易，様々な応答を利用できる，時刻歴で推定できる。
- 本発表では，水槽試験によるWKF法の妥当性の検証について説明する。

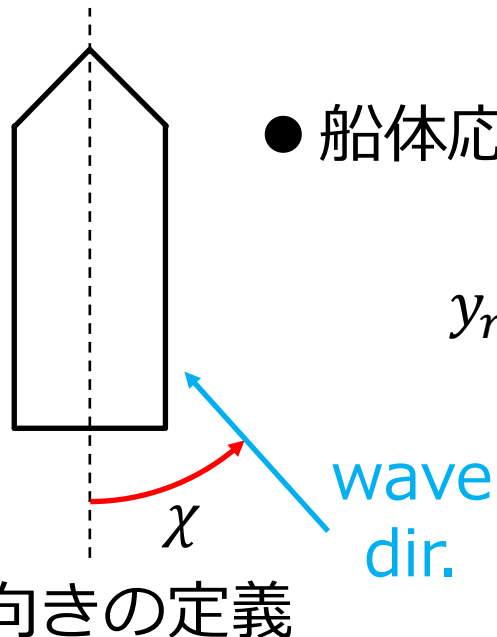
2. 波と非計測応答の推定手法

2. 波と船体応答の表現



- midshipでの遭遇波を, 成分波の重ね合わせで表現する. (仮定①: 線形重ね合わせ)

$$\zeta_w(t) = \sum_{p=1}^{N_p} \sum_{j=1}^{N_\omega} (a_{pj} \cos \omega_j t + b_{pj} \sin \omega_j t)$$



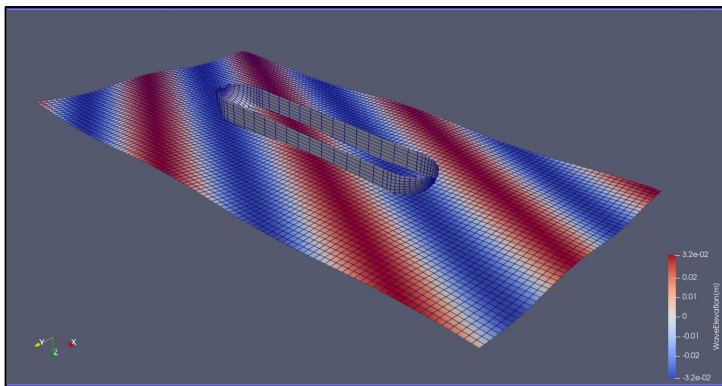
- 船体応答は, 応答関数を用いて表す. (仮定②: 波と応答は線形関係)

$$y_r(t) = \sum_{p=1}^{N_p} \sum_{j=1}^{N_\omega} \{H_{rpj} a_{pj} \cos(\omega_j t + \varepsilon_{rpj}) + H_{rpj} b_{pj} \sin(\omega_j t + \varepsilon_{rpj})\}$$

 : 応答関数の振幅

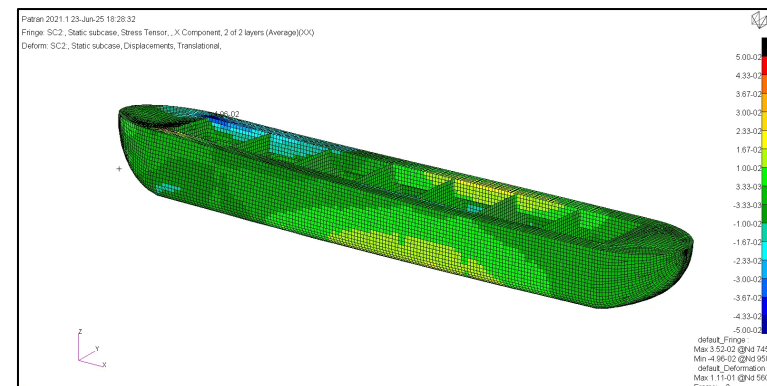
 : 応答関数の位相

2. 応答関数の計算



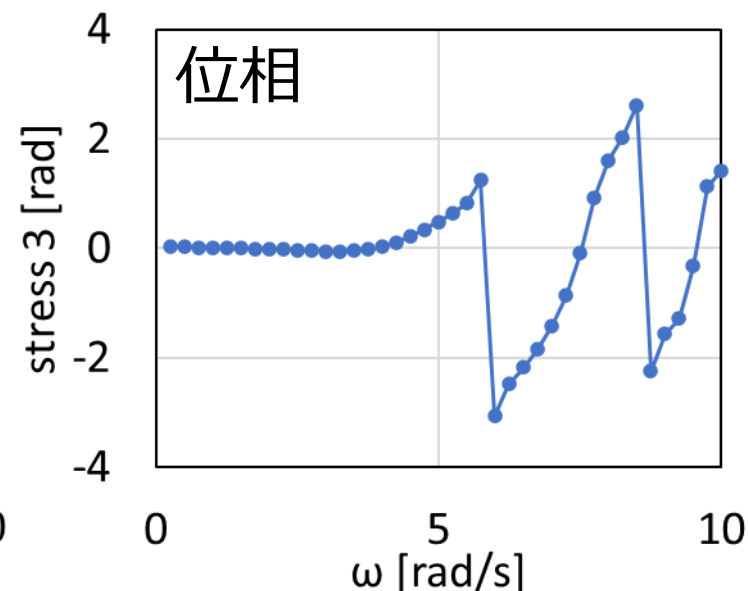
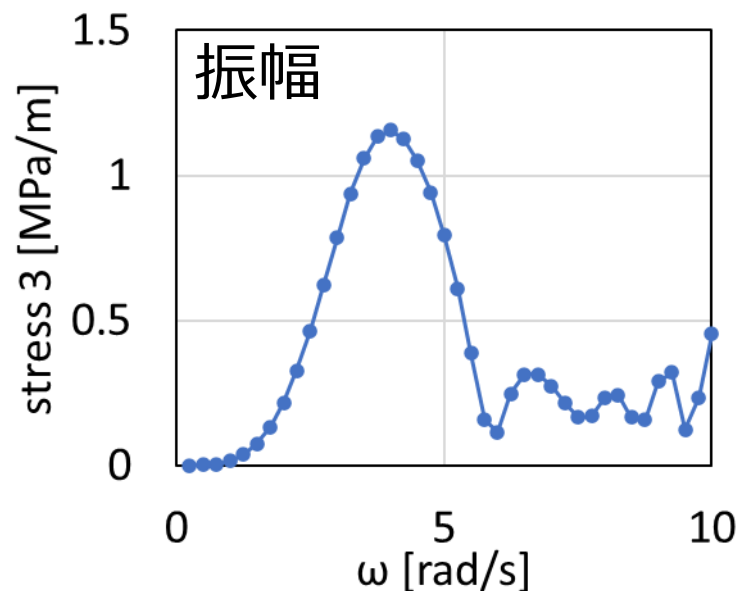
3次元線形パネル法(SPREME)

水圧・加速度



有限要素法(Nastran)

- 各波周波数, 各波向きで, 応答関数の振幅と位相を求める.
→ WKF法に使用する.
- 本研究では, 運動の応答関数はパネル法, 応力の応答関数は有限要素法で計算した.



応答関数の例 (応力, 向波条件)

2. 状態方程式と観測方程式



状態方程式 : $x(k+1) = \underline{x(k)} + \underline{v(k)}$

システムノイズベクトル
(正規性白色ノイズ)

状態ベクトル : 成分波の振幅

観測方程式 : $\underline{y(k)} = \underline{H} \underline{x(k)} + \underline{w(k)}$

観測ノイズベクトル
(正規性白色ノイズ)

観測ベクトル : 船体応答

応答関数で構成されるマトリックス
入力 : 波振幅, 出力 : 船体応答

$$x(k) = \begin{Bmatrix} \mathbf{a} \\ \mathbf{b} \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{a} = \begin{Bmatrix} a_{11} \\ \vdots \\ a_{N_p N_\omega} \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{Bmatrix} b_{11} \\ \vdots \\ b_{N_p N_\omega} \end{Bmatrix}$$

- 状態ベクトルである成分波の振幅をカルマンフィルタで推定する.

2. WKF法による波時刻歴と非計測応答の推定



【線形カルマンフィルタのアルゴリズム】

<推定ステップ>

事前推定値：

$$\hat{\mathbf{x}}^-(k) = \hat{\mathbf{x}}(k-1)$$

$$\mathbf{P}^-(k) = \mathbf{P}(k-1) + \mathbf{Q}$$

カルマンゲイン：

$$\mathbf{G}(k) = \mathbf{P}^-(k)\mathbf{H}^T(\mathbf{H}\mathbf{P}^-(k)\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}$$

<フィルタリングステップ>

事後推定値：

$$\hat{\mathbf{x}}(k) = \hat{\mathbf{x}}^-(k) + \mathbf{G}(k)(\mathbf{y}(k) - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}^-(k))$$

$$\mathbf{P}(k) = (\mathbf{I}_x - \mathbf{G}(k)\mathbf{H})\mathbf{P}^-(k)$$

- 成分波の振幅を用いて，波時刻歴を推定する.

$$\zeta_w(t) = \sum_{p=1}^{N_p} \sum_{j=1}^{N_\omega} (a_{pj} \cos \omega_j t + b_{pj} \sin \omega_j t)$$



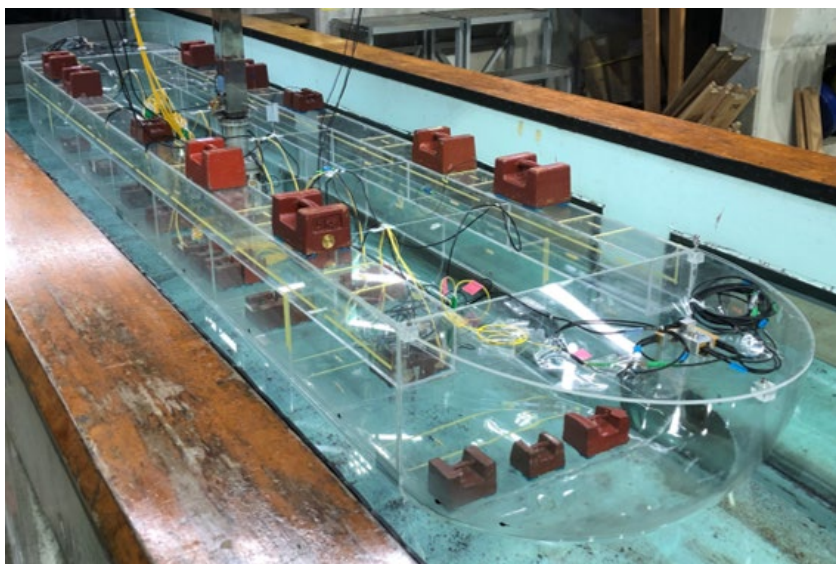
- 応答関数を用いて，非計測応答を推定する.

$$y_r(t) = \sum_{p=1}^{N_p} \sum_{j=1}^{N_\omega} \left\{ H_{rpj} a_{pj} \cos(\omega_j t + \varepsilon_{rpj}) + H_{rpj} b_{pj} \sin(\omega_j t + \varepsilon_{rpj}) \right\}$$

3. 水槽試験

3. 模型船

検証に用いた模型船：アクリル製弾性模型船（船殻のひずみ・応力を計測可能）

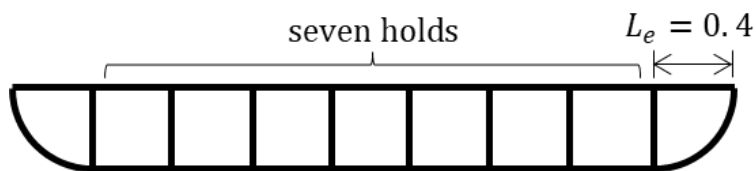


アクリル製弾性模型船

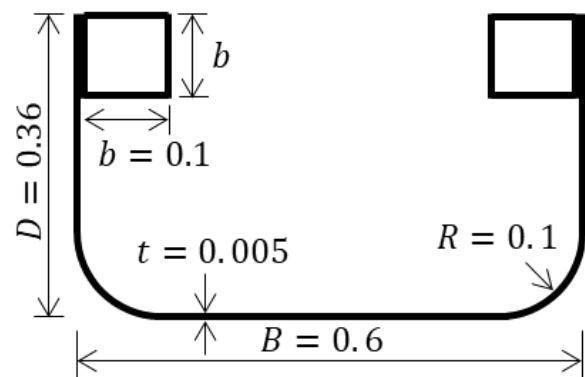
主要目

L[m]	B[m]	D[m]	d[m]
3.6	0.6	0.36	0.10

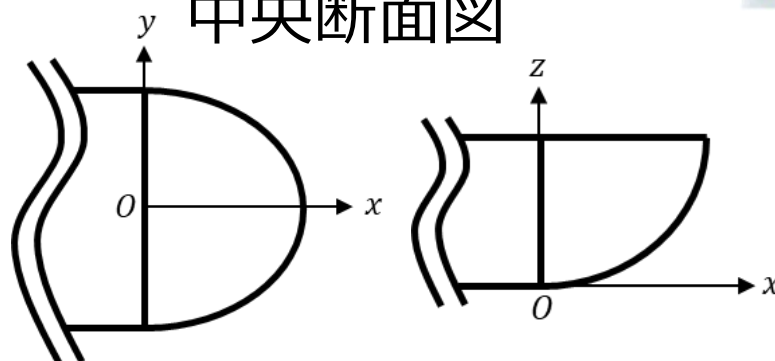
スケール比：1 / 79



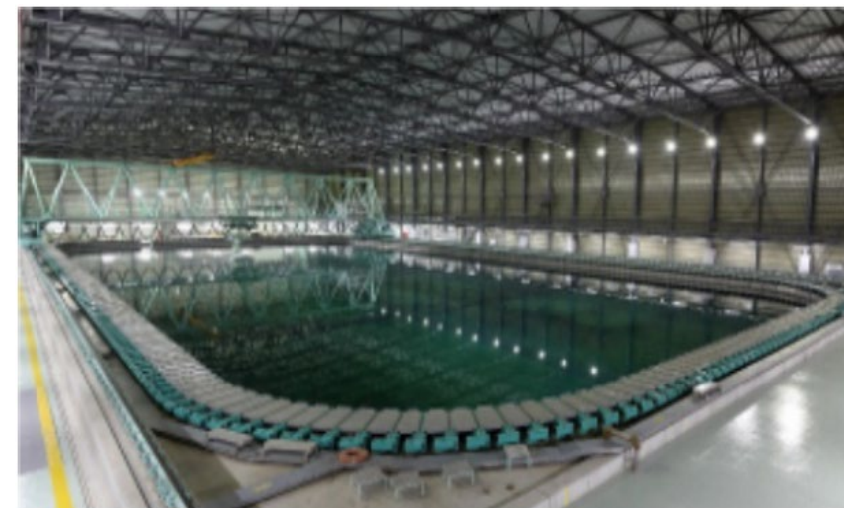
側面図



中央断面図

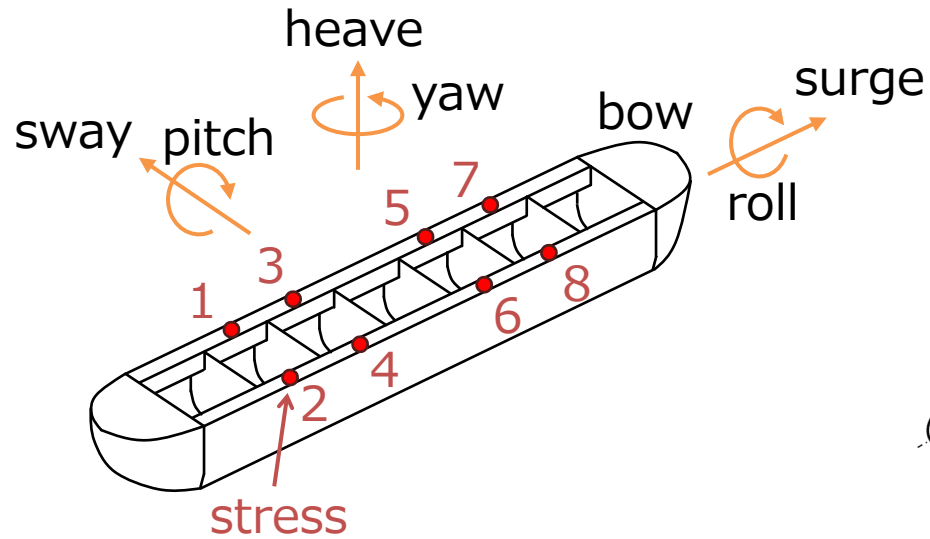


船首尾構造

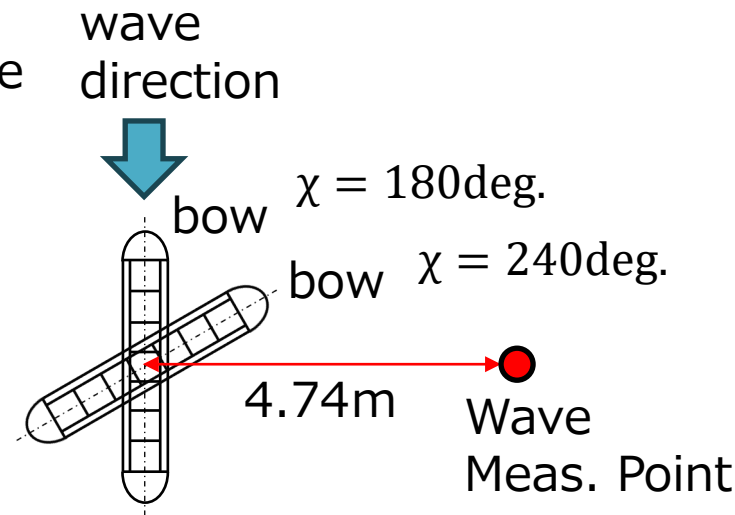


実海域再現水槽

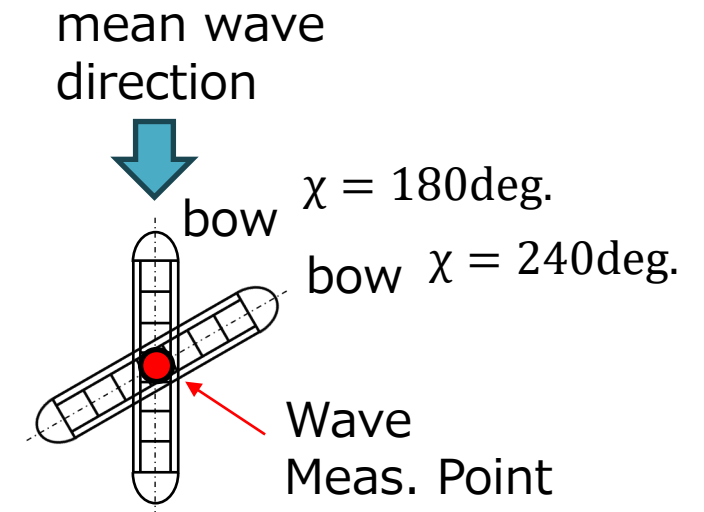
3. 計測項目



計測項目

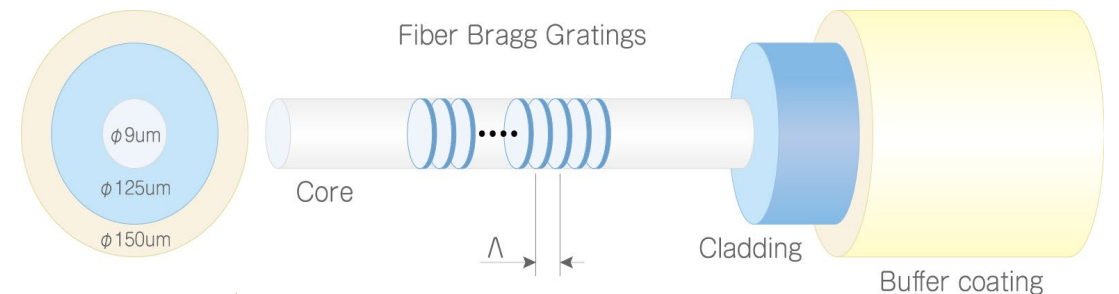


長波頂不規則波の場合



短波頂不規則波の場合

- 計測項目：6自由度の船体運動，船体ひずみ，波変位
- 長波頂の場合，4.74m離れた波変位を計測した。
- 短波頂の場合，模型船が無い状態で，midship位置の波変位を計測した。
(比較の際は，造波開始信号でデータを同期)
- 実海域再現水槽では高い再現性で造波実験可能。



FBGの構造

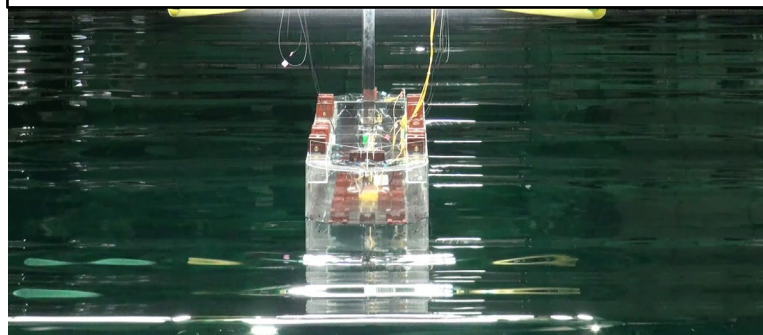
ひずみ計測用に設置したFBG

3. 試験条件

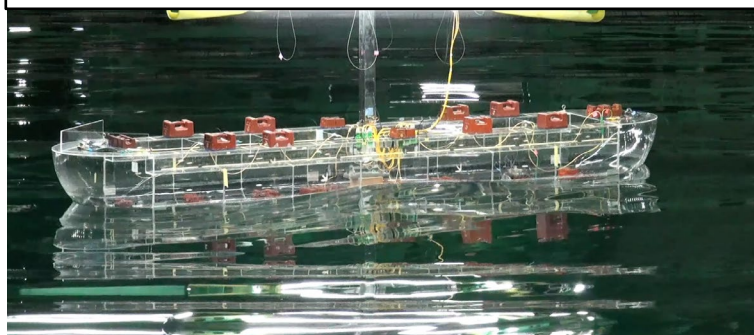


● 長波頂不規則波：ISSC波スペクトル

向波(出合い角180deg)

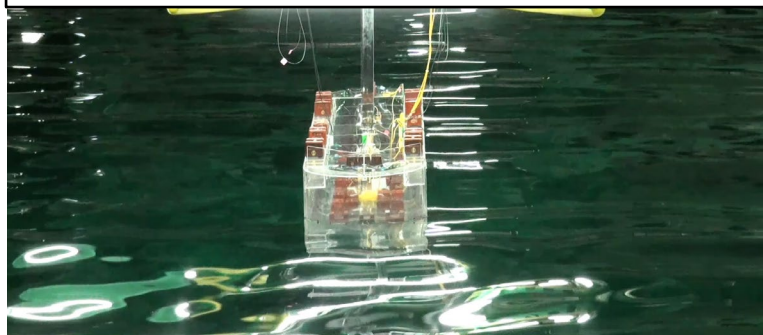


斜向波(出合い角240deg)

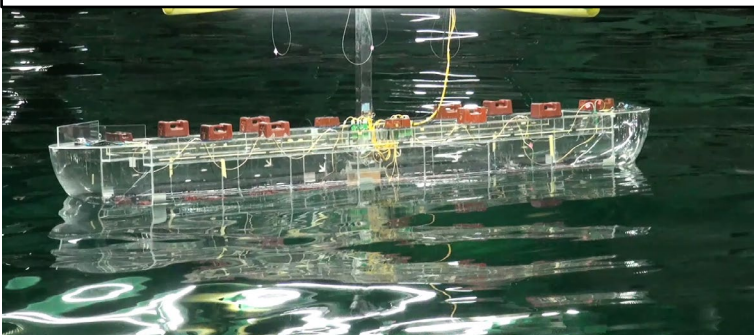


● 短波頂不規則波： ISSC波スペクトル & 方向分布関数 (COS2乗分布)

向波(出合い角180deg)

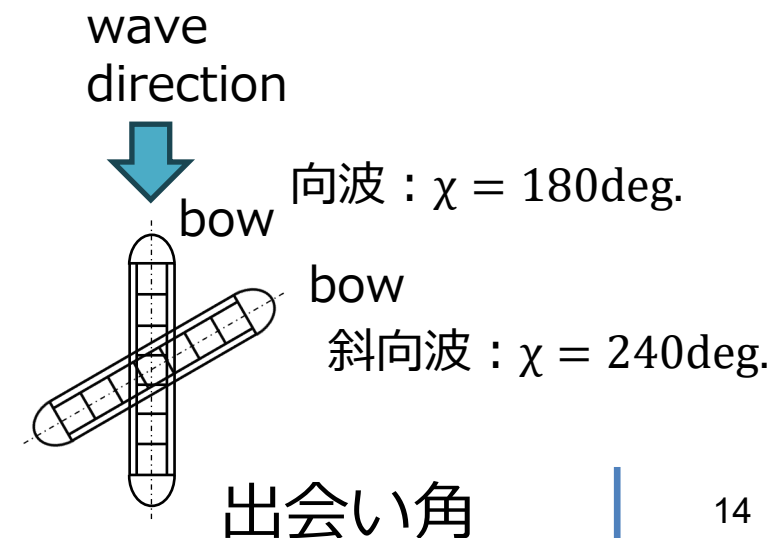


斜向波(出合い角240deg)



試験条件

項目	値
出合い角 [deg]	180 (向波) 240 (斜向波)
有義波高 [m]	0.0634
平均波周期 [s]	1.13
船速 [m/s]	0

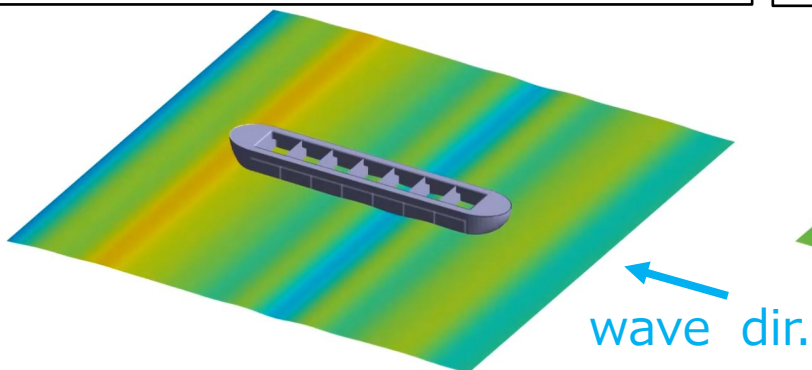


3. 試験条件

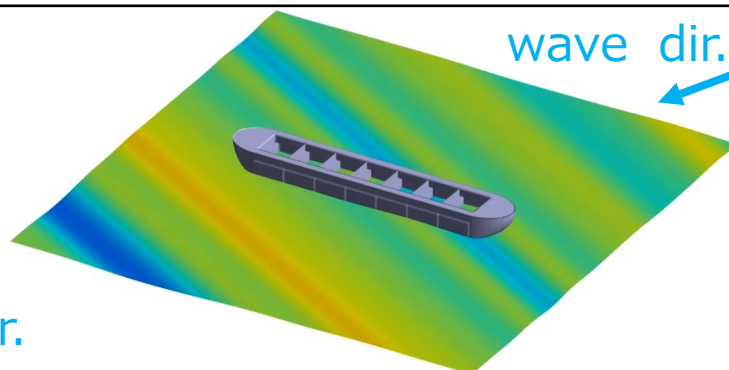


● 長波頂不規則波：ISSC波スペクトル

向波(出合い角180deg)



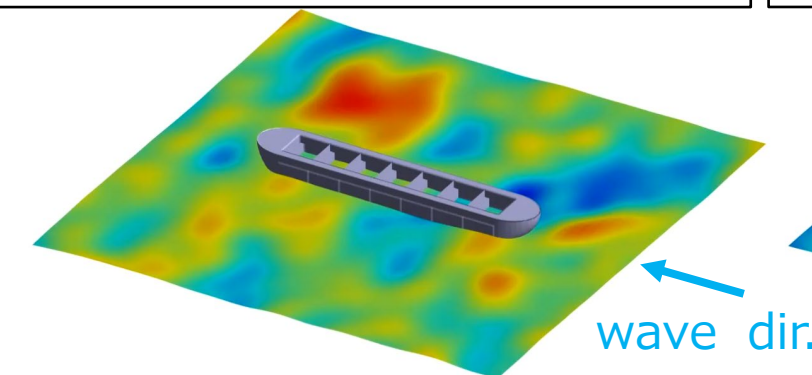
斜向波(出合い角240deg)



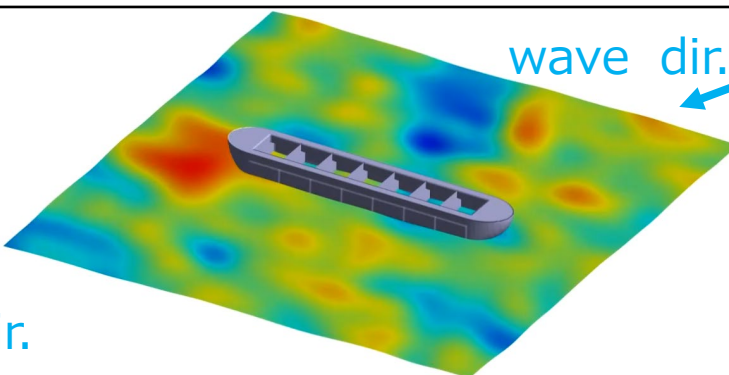
● 短波頂不規則波：

ISSC波スペクトル & 方向分布関数 (COS2乗分布)

向波(出合い角180deg)

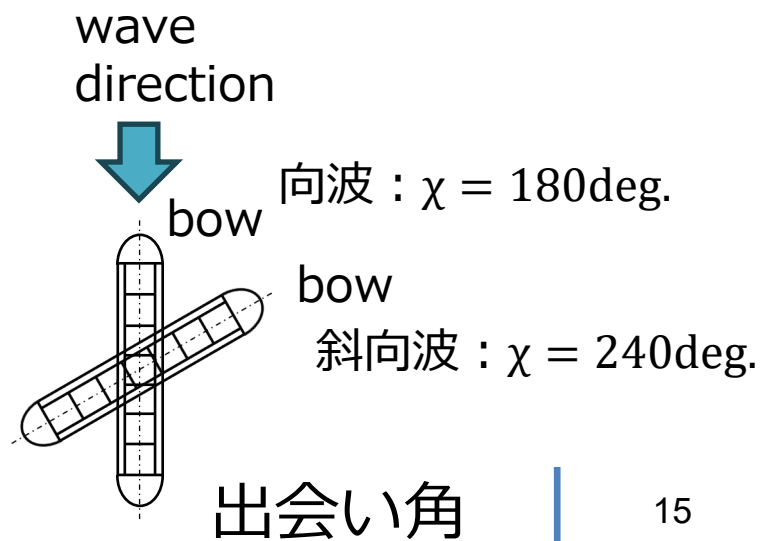
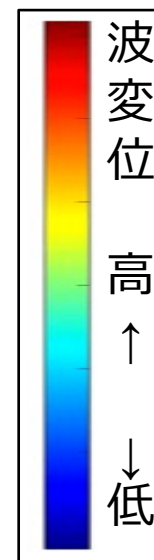


斜向波(出合い角240deg)



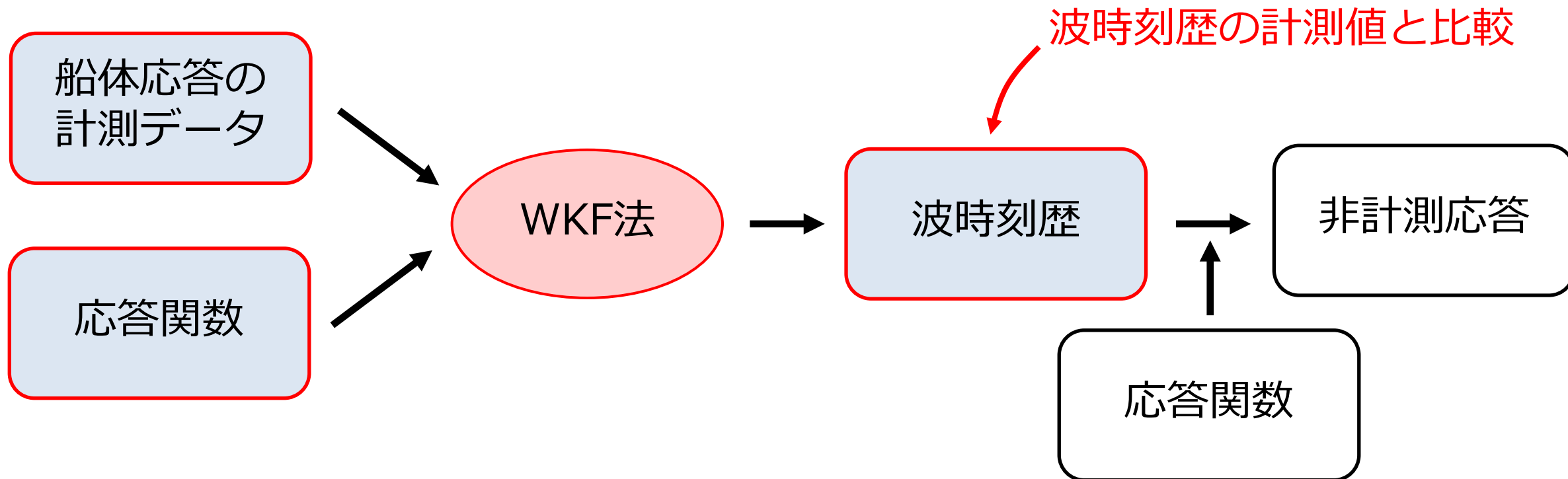
試験条件

項目	値
出合い角 [deg]	180 (向波) 240 (斜向波)
有義波高 [m]	0.0634
平均波周期 [s]	1.13
船速 [m/s]	0



4. 手法の検証

4. 検証方法



- ◆ 船体応答の計測データと応答関数を用いて，WKF法により波時刻歴を推定し，計測値との比較を行う．
- ◆ WKF法では複数の船体応答を使用できる．

4. 波時刻歴の推定の設定（長波頂不規則波）

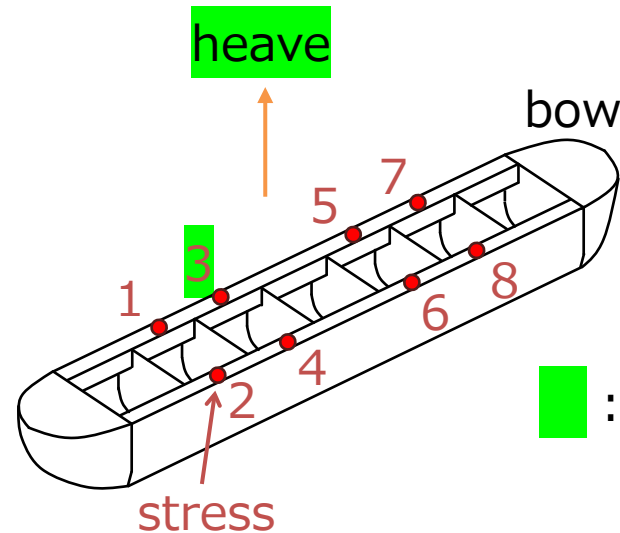
WKF法に用いた船体応答の
計測データ

Case	Meas. signals
1	Heave
2	Stress3
3	Heave, stress3

＜長波頂不規則波に用いた波時刻歴＞
※波向きは既知.

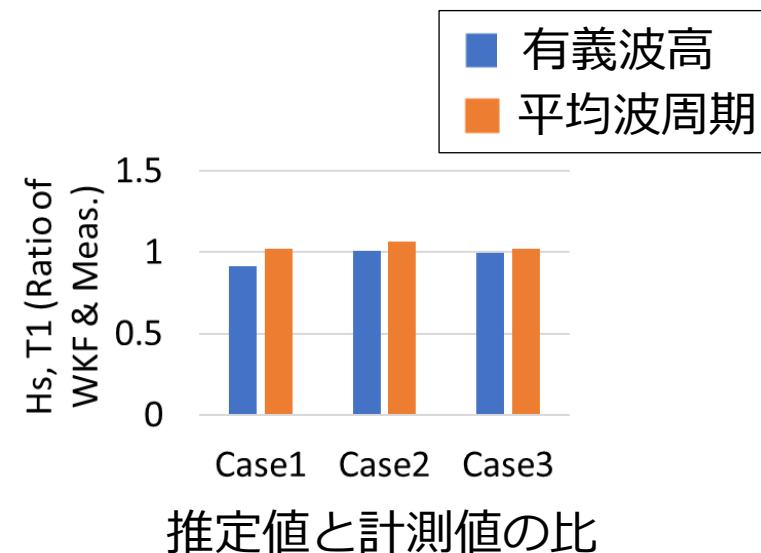
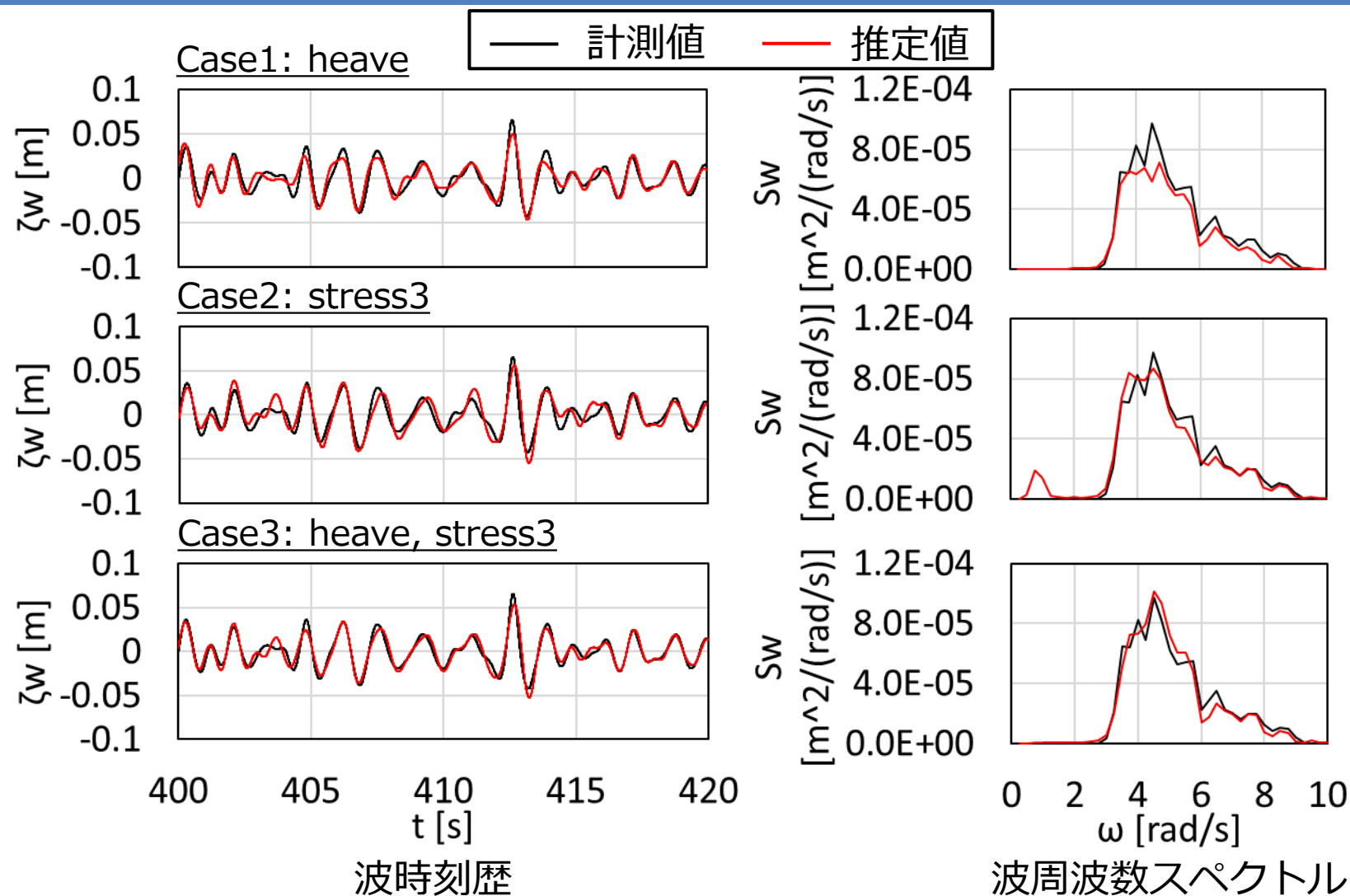
$$\zeta_w(k) = \sum_{j=1}^{N_\omega} (a_j(k) \cos \omega_j t(k) + b_j(k) \sin \omega_j t(k))$$

- $\omega_j = j \cdot \Delta\omega$
- $N_\omega = 40$
- $\Delta\omega = 0.25$ [rad/s]



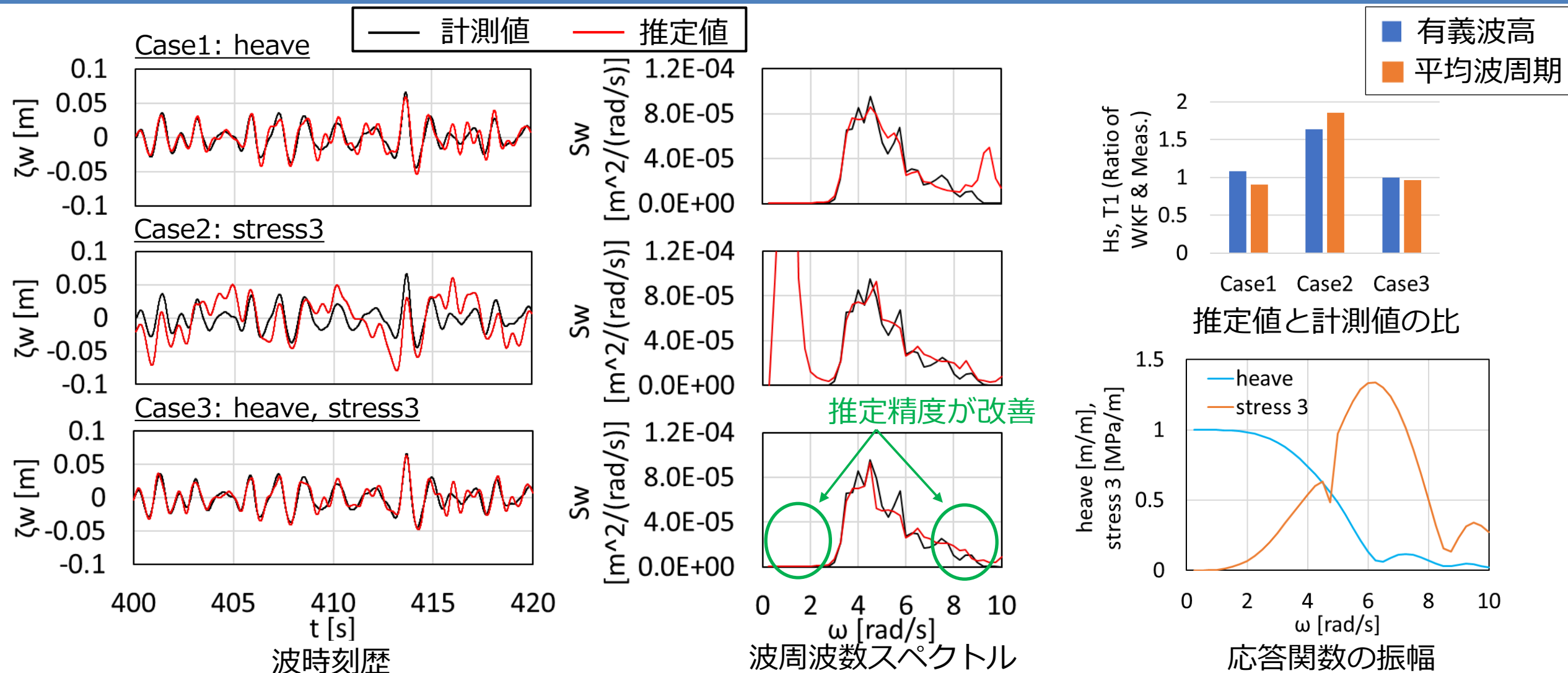
■ : WKF法で使用する応答.

4. 波時刻歴の推定（長波頂不規則波，波向き180deg）



- どのケースにおいても，推定値と計測値は良く一致している。

4. 波時刻歴の推定（長波頂不規則波，波向き240deg）



- 応答関数の振幅が小さい周波数領域をお互いに補完するように複数の応答を組み合わせることで、波時刻歴の推定精度を改善可能であることを確認できた。

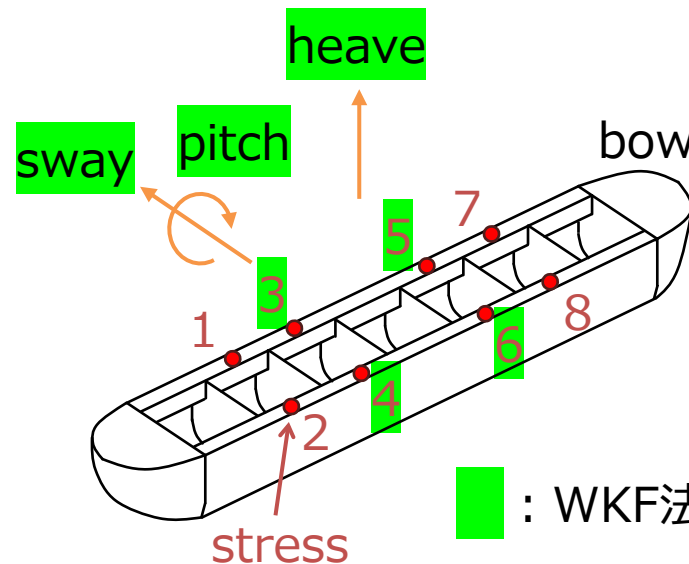
4. 波時刻歴の推定の設定（短波頂不規則波）

WKF法に用いる船体応答の
計測データ

Case	Meas. signals
1	heave, pitch, sway
2	stress 3,4,5,6
3	heave, pitch, sway, stress 3
4	heave, pitch, sway, stress 3,4,5,6

＜短波頂不規則波に用いた波時刻歴＞
※波向きは未知.

$$\zeta_w(k) = \sum_{p=1}^{N_p} \sum_{j=1}^{N_\omega} (a_{pj}(k) \cos \omega_j t(k) + b_{pj}(k) \sin \omega_j t(k))$$

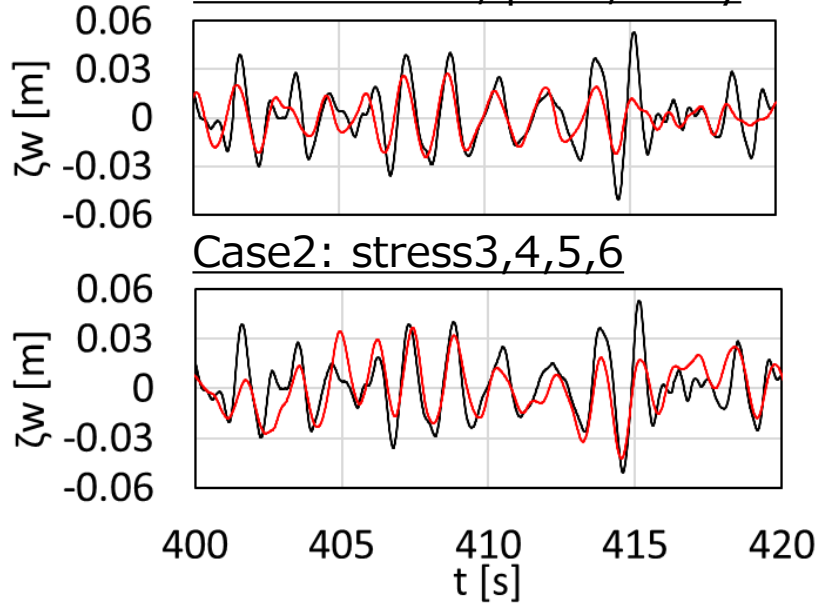


- $\omega_j = j \cdot \Delta\omega$
- $\chi_p = (p - 1) \cdot \Delta\chi$
- $N_p = 12$
- $N_\omega = 40$
- $\Delta\chi = 30$ [deg]
- $\Delta\omega = 0.25$ [rad/s]

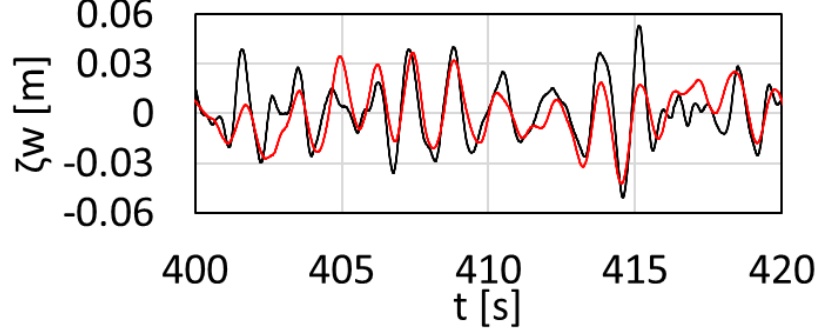
■ : WKF法で使用する応答.

4. 波時刻歴の推定（短波頂不規則波，主波向き240deg）

Case1: heave, pitch, sway

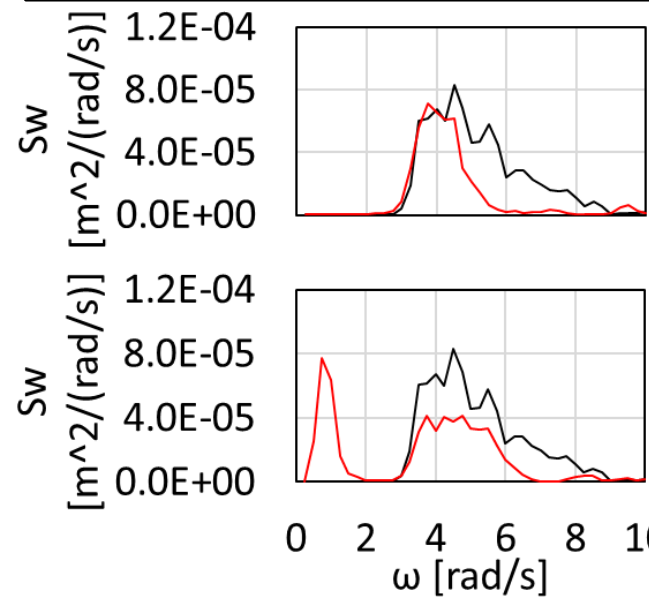


Case2: stress3,4,5,6

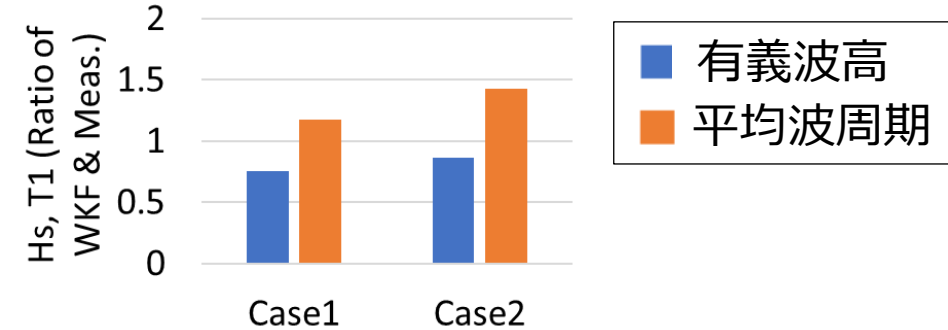


波時刻歴

— 計測値 — 推定値

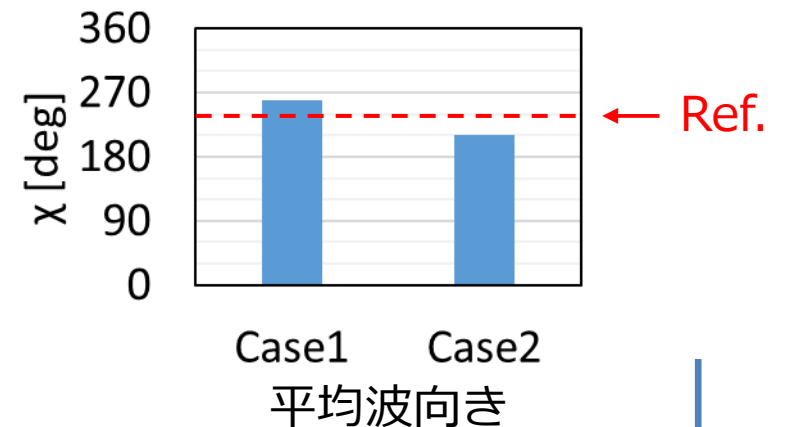
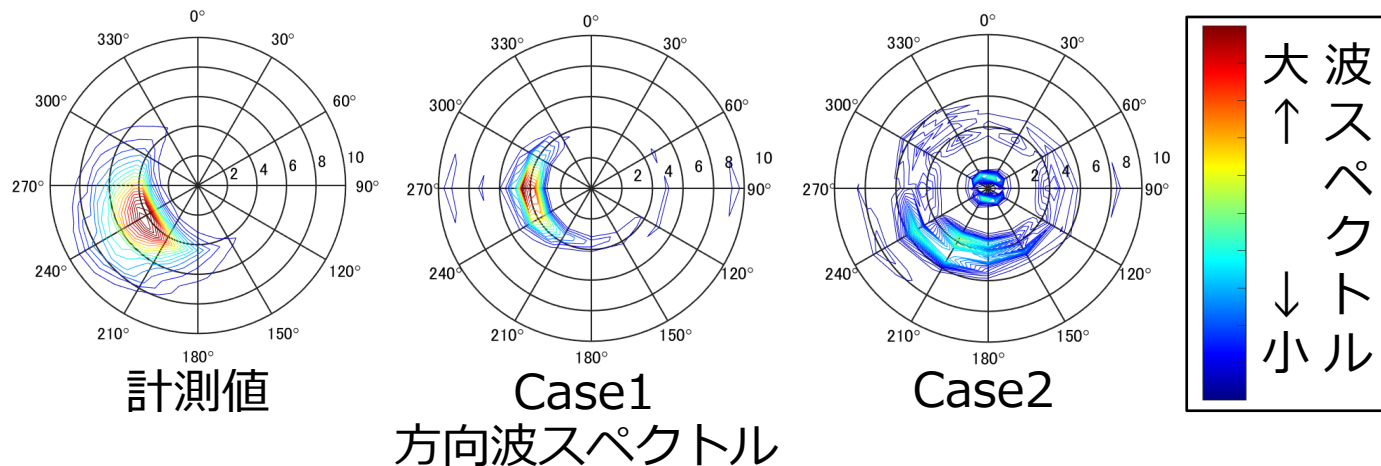


波周波数スペクトル



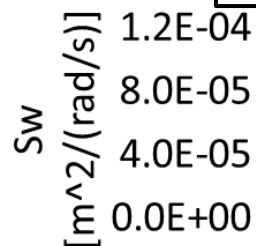
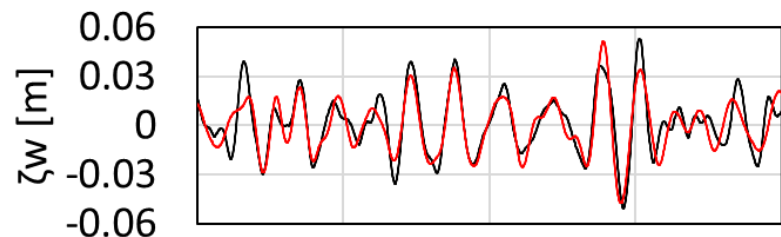
推定値と計測値の比

- 運動だけの場合，横波方向にスペクトルを推定している.
- 応力だけの場合，低周波数領域で過大評価が発生している.

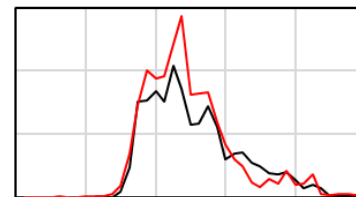


4. 波時刻歴の推定（短波頂不規則波，主波向き240deg）

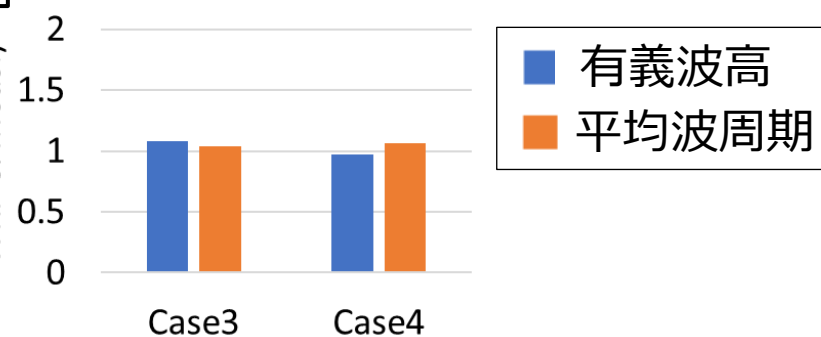
Case3: heave, pitch, sway, stress3



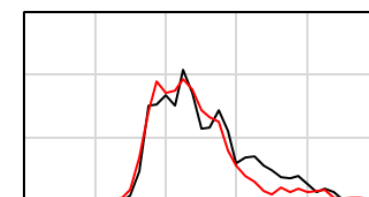
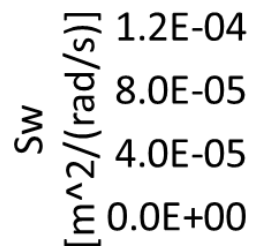
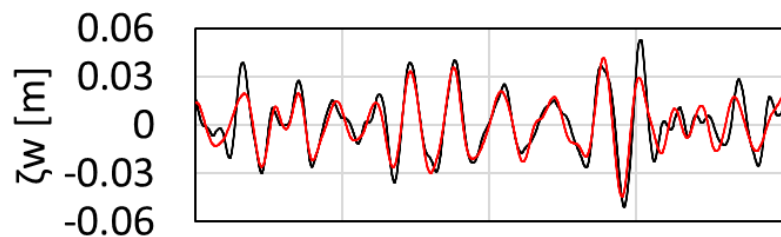
— 計測値 — 推定値



Hs, T1 (Ratio of WKF & Meas.)



Case4: heave, pitch, sway, stress3,4,5,6

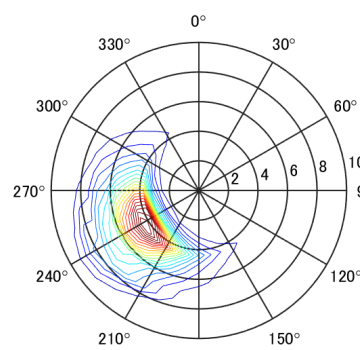


推定値と計測値の比

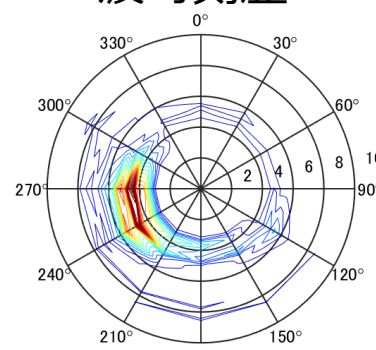
- 運動と応力を組合せた場合，時刻歴および平均波向きを良い精度で推定している。
- 短波頂不規則波でも波時刻歴の推定が可能であることを確認できた。

t [s] 波時刻歴

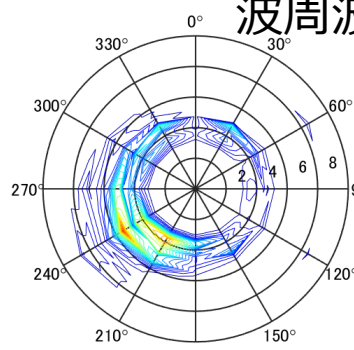
ω [rad/s] 波周波数スペクトル



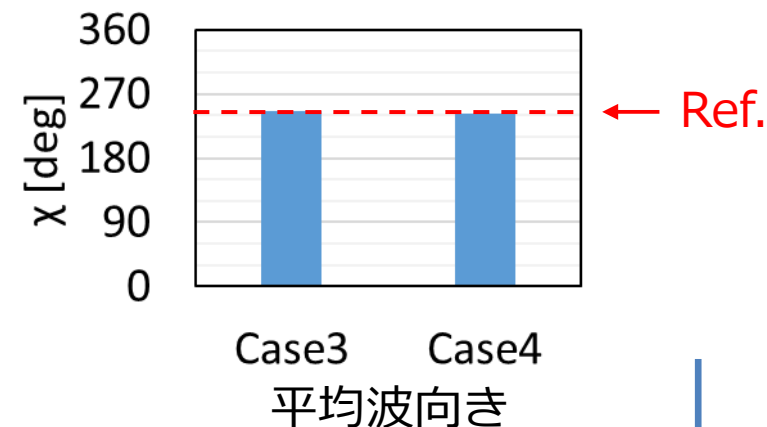
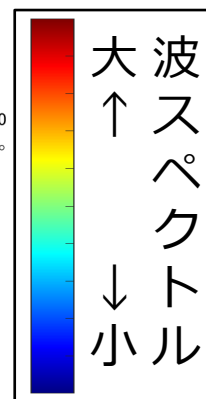
計測値



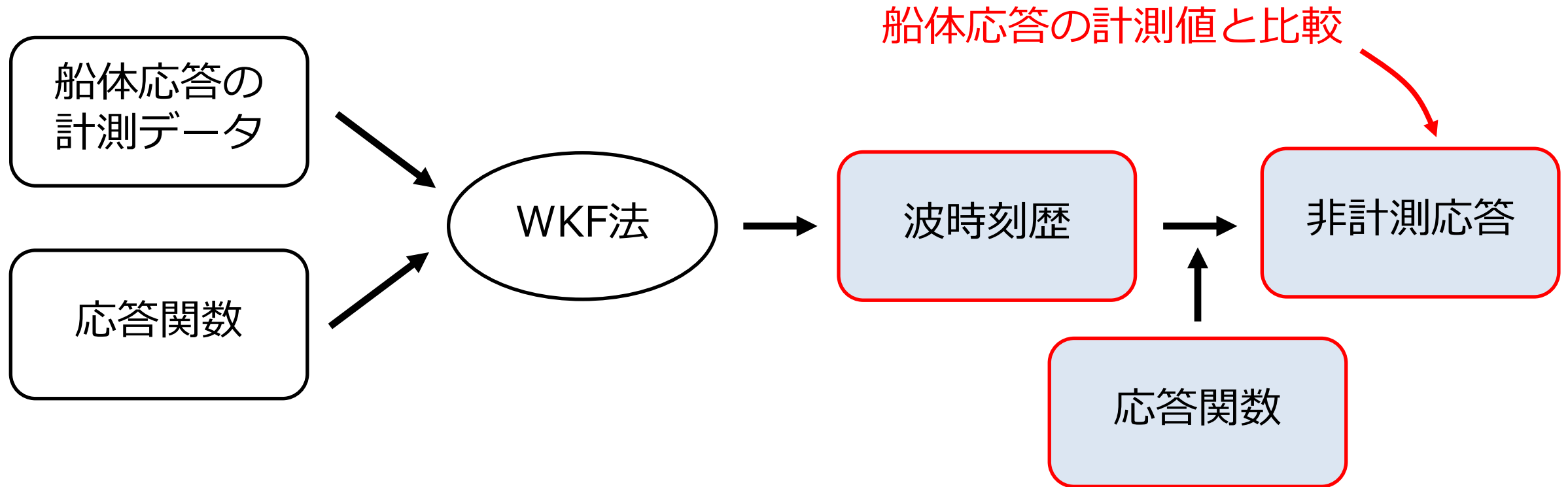
Case3
方向波スペクトル



Case4

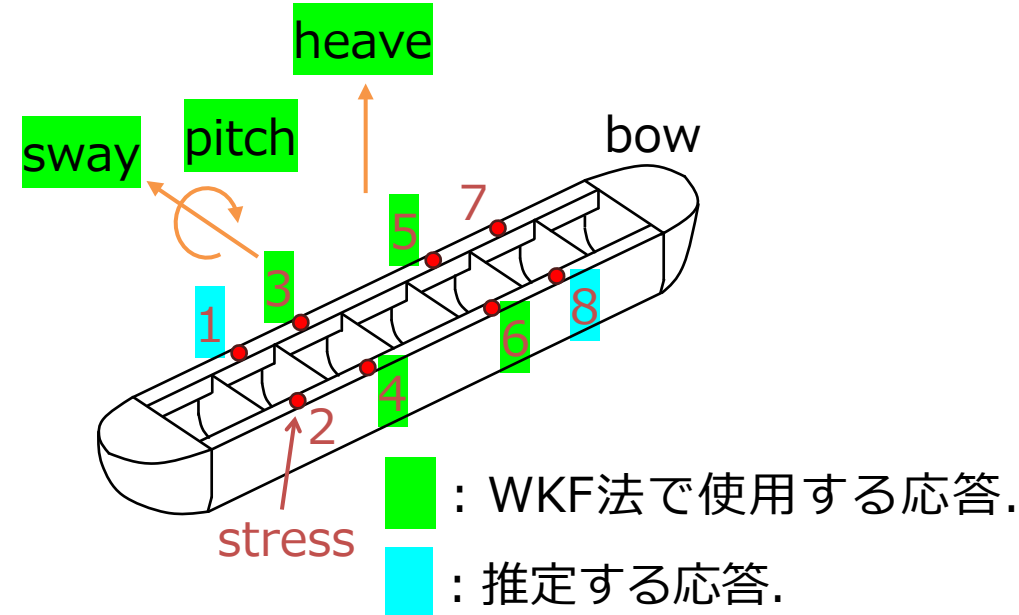
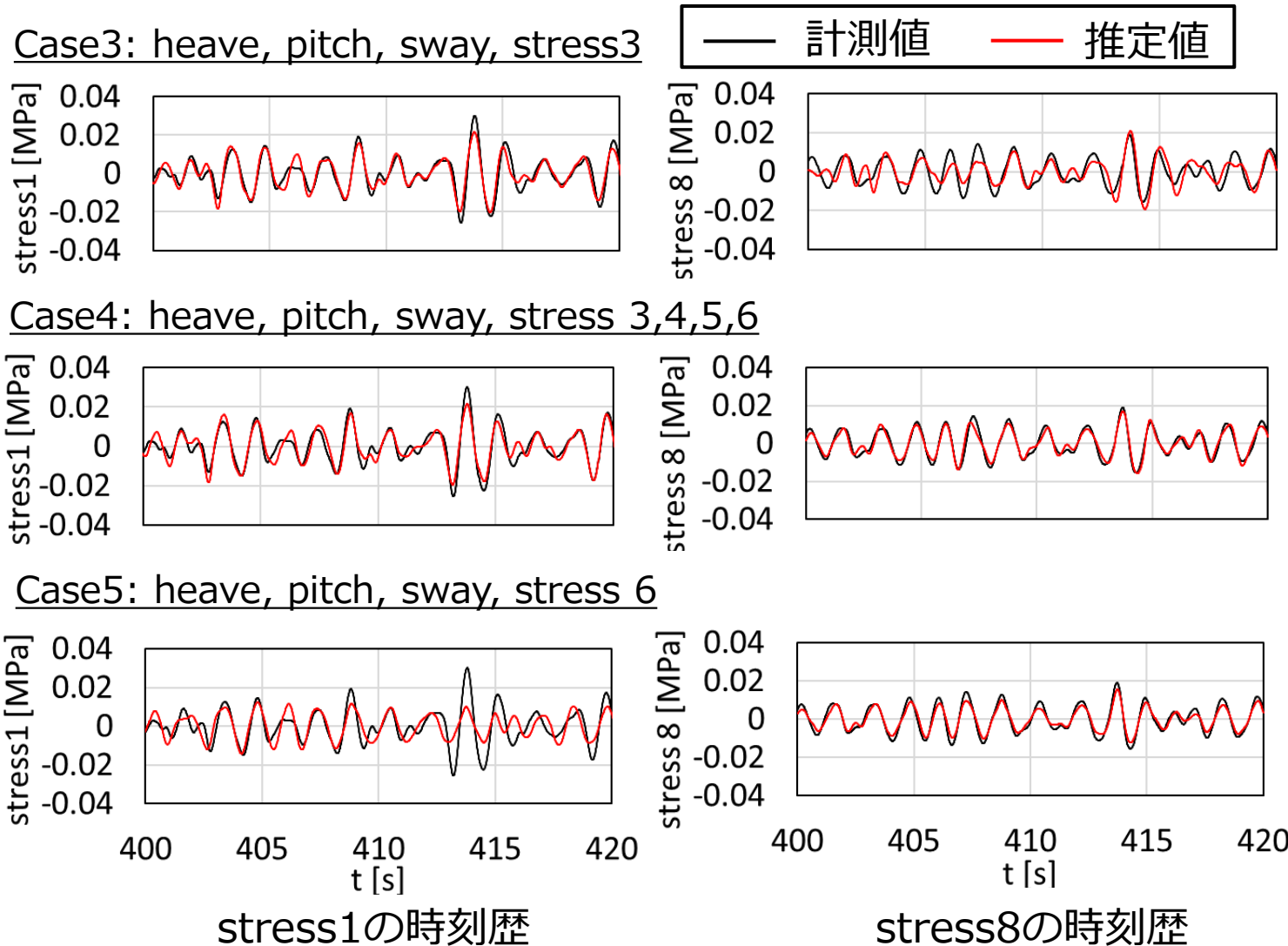


4. 検証方法



- ◆ 推定した波時刻歴と応答関数を用いて，非計測応答を推定し，計測値との比較を行う．

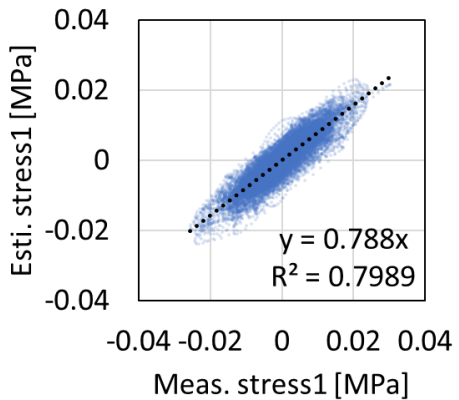
4. 非計測応答の推定（短波頂不規則波，主波向き240deg）



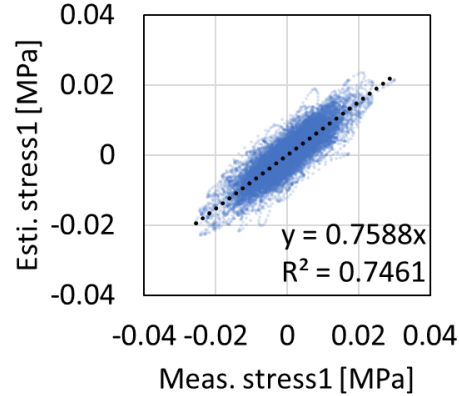
- ◆ 検証用にheave, pitch, sway, stress6でWKF法を実施したCase5を追加した.
- ◆ Case3-5で推定された波を用いて, stress1, 8を推定した.
- ◆ どのケースも概ね時刻歴を推定できている.

4. 非計測応答の推定（短波頂不規則波，主波向き240deg）

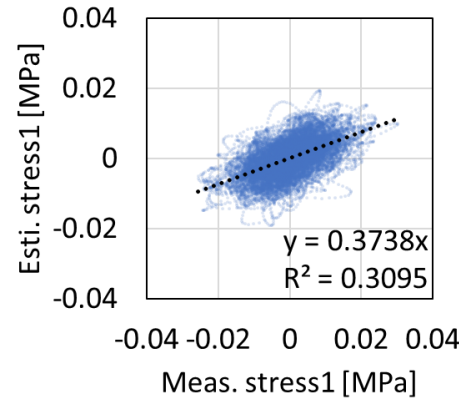
stress1 Case3



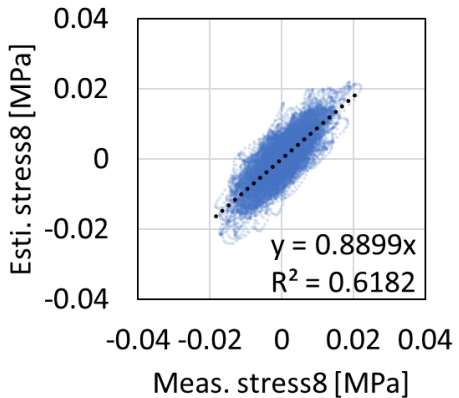
stress1 Case4



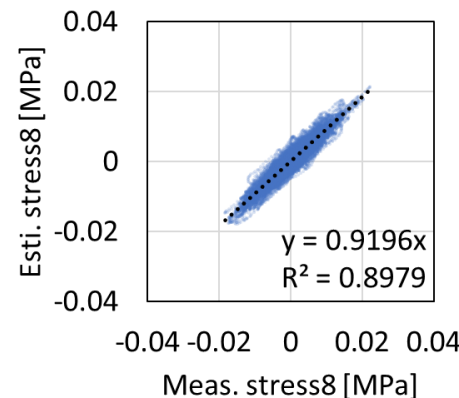
stress1 Case5



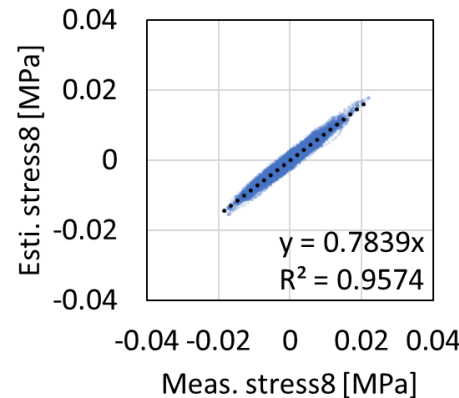
stress8 Case3



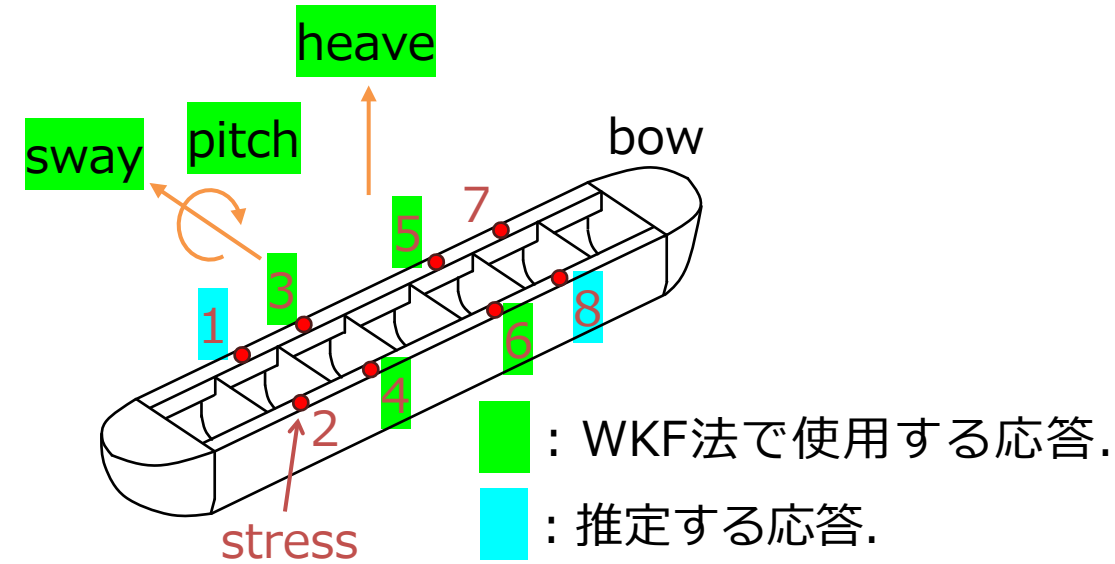
stress8 Case4



stress8 Case5



応力の推定値と計測値の相関曲線
（縦軸：推定値，横軸：計測値）



Case3: heave, pitch, sway, stress 3
Case4: heave, pitch, sway, stress 3,4,5,6
Case5: heave, pitch, sway, stress 6

- ◆ stress1はstress3を用いたCase3， stress8はstress6を用いたCase5で， 応力1点の使用であるが， 良い精度で推定している． → 相関が高い応答を使うことでより精度が上がる．
- ◆ 短波頂不規則波中においても非計測応答の時刻歴を推定可能であることを確認できた．

5. まとめ

本研究では、船体応答の計測データを基に、WKF法により波時刻歴と非計測応答を推定し、その有効性を水槽試験で検証した。

【検証により得られた知見】

- WKF法により、波と非計測応答を推定することができた。
- 長波頂不規則波／短波頂不規則波ともに複数応答を組み合わせることで、波時刻歴の推定精度が改善することを確認できた。
- 非計測応答と相関が高い応答をWKF法で用いることで、非計測応答の推定精度が向上することを確認できた。

ご清聴ありがとうございました



国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所
海上技術安全研究所
National Maritime Research Institute

