

不規則時系列データ解析による メモリー影響関数の直接同定に関する研究

大阪大学大学院 工学研究科

花木 孝明

箕浦 宗彦

高岡 美那

- 研究背景と目的
- 理論
 - 近似システムによる畳み込み積分の代用
 - 運動方程式の状態空間表現
- 実験 & 解析結果
 - 実験概要
 - メモリー影響関数の同定
 - 付加質量, 減衰力係数, 動揺特性について
- まとめ

- 波浪中における船体の運動特性を把握することは安全運航に役立つ。これは設計時に数値計算により求められる。
- 実海域では積付条件などによる運動特性の変動が考えられるため、計測データを用いた評価が効果的である。
- 実海域における運動特性の評価は、以下のように役立つ。
 - 設計へのフィードバック
 - 船主や荷主の信頼獲得
 - 海象に対する適切な積付条件
 - 経年影響による性能劣化
 - 危険運航の検知
 - 遭遇海象の逆解析・予測
など...



Source: <https://www.jstra.jp/a4b02/a3b04/>

大津・北川 (1988), 寺田・北川 (2009)

- 波浪強制力をARモデルにより定式化した.
- 船体運動の時系列データのみから 1 自由度運動方程式の定数係数を同定した.

Hanaki & Minoura (2021)

- 波浪強制力をARモデルにより定式化した.
- 2 自由度運動方程式を基に時系列モデルを構築し, 船体運動の時系列データのみから heave と pitch の連成運動を考慮した動揺特性を推定した.
- 問題点: 付加質量や減衰力係数などに分離して, 詳細に検討することができない (船舶工学理論に基づいた数学モデルを用いる必要がある) .

Cummins (1962), Kotik (1962), Ogilvie (1964) など

- 付加質量と減衰力係数を畳み込み積分によって時間の関数として表現した.

Yu & Falnes (1995), Krisitansen (2003, 2005), Perez (2006) など

- 上記のモデルの状態空間表現を導出した.
- 波から波浪強制力を推定し、停止する浮体の運動を予測した.

本研究の最終目的

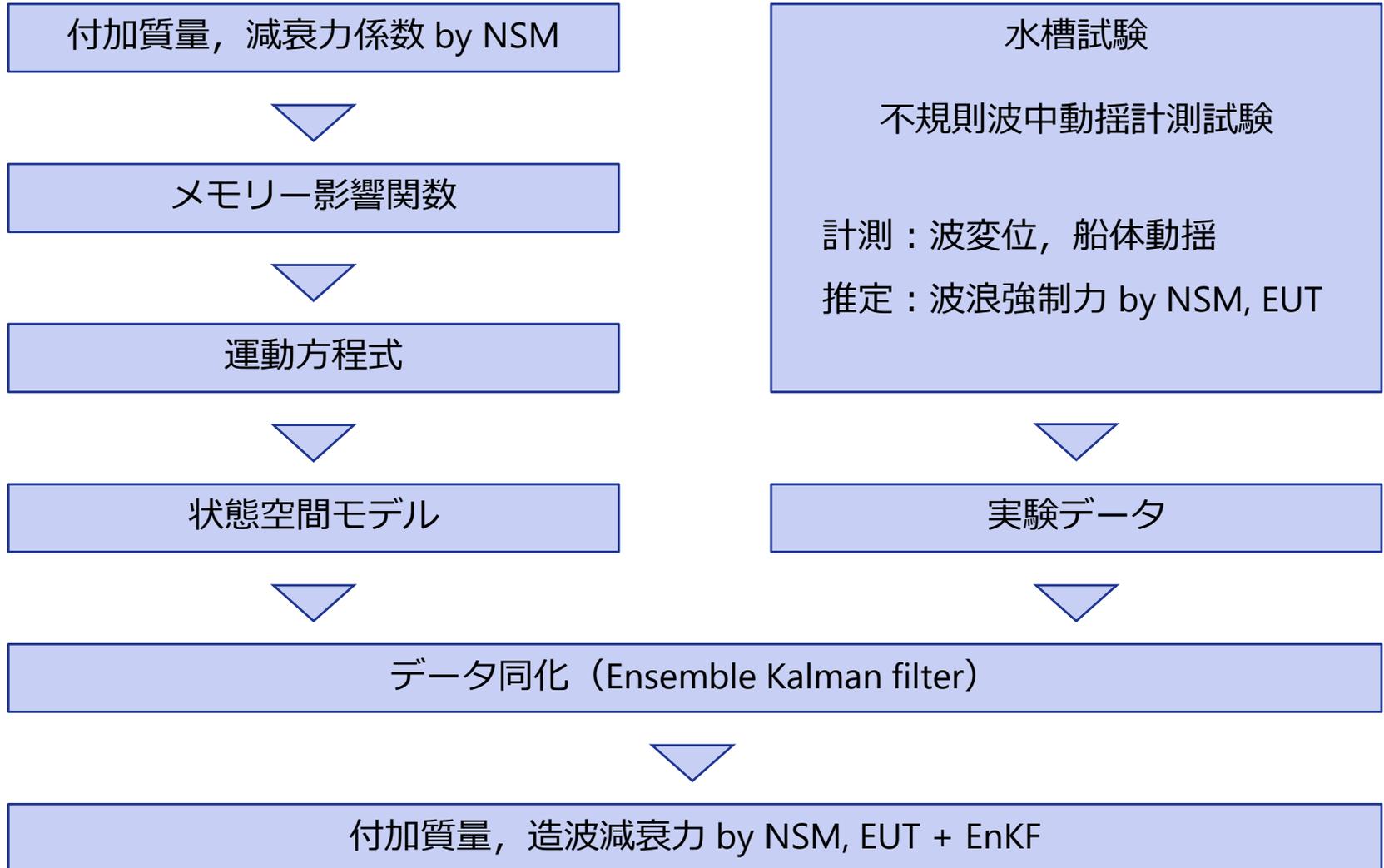
- 実船で計測可能な動揺時系列データのみから付加質量と減衰力係数を評価する。

本日の講演内容

- 付加質量と減衰力係数を推定するための数学モデルの定式化（安定かつ船舶工学理論ベース）。
- 波浪強制力と船体動揺の不規則時系列データから，メモリー影響関数，付加質量および減衰力係数，動揺特性を推定する手法の提案。
- 実験データを用いた提案モデルと手法の検証。

本手法のメリット

- 不規則波中の動揺計測試験のみで，船体の流体力係数を実験的に同定できれば，従来の強制動揺試験（周期ごとに複数回行う）結果の検証に用いることができる。もしくは実験時間を大幅に短縮できる。
- メモリー影響関数を直接同定するため，流体力係数を同定する過程で，時系列解析に適用できる数学モデルを得ることができる。

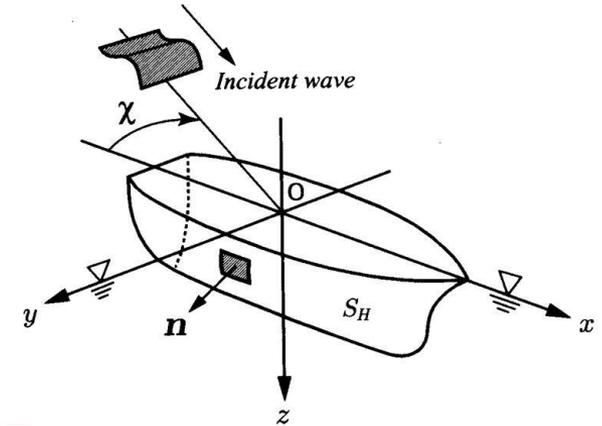


New strip method

船舶が波浪中を速度 U で前進しながら動揺する問題を考え、船速と同じ U で等速移動する慣性座標系を用いて解析する。

- 速度ポテンシャル

$$\Phi(\mathbf{x}, t) = -Ux + \operatorname{Re} \left[\frac{ig\zeta_a}{\omega} \{ \varphi_0(\mathbf{x}) + \varphi_7(\mathbf{x}) \} + \sum_{j=2}^6 i\omega_e X_j \varphi_j(\mathbf{x}) \right]$$



- 付加質量, 減衰力係数 (U に比例しない項 + 比例する項)

$$a_{33} = \int_L A_H dx,$$

$$b_{33} = \int_L B_H dx$$

$$a_{35} = - \int_L x A_H dx - \frac{U}{\omega_e^2} \int_L B_H dx,$$

$$b_{35} = - \int_L x B_H dx + U \int_L A_H dx$$

$$a_{53} = - \int_L x A_H dx + \frac{U}{\omega_e^2} \int_L B_H dx,$$

$$b_{53} = - \int_L x B_H dx - U \int_L A_H dx$$

$$a_{55} = \int_L x^2 A_H dx + \left(\frac{U}{\omega_e} \right)^2 \int_L A_H dx,$$

$$b_{55} = \int_L x^2 B_H dx + \left(\frac{U}{\omega_e} \right)^2 \int_L B_H dx$$

メモリー影響関数

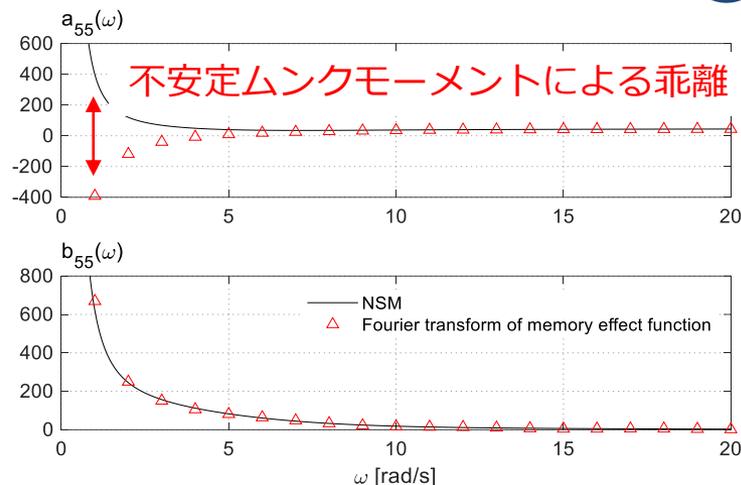
$$L_{jk}(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} b_{jk}(\omega) \cos \omega t d\omega$$

メモリー影響関数を，減衰力係数の逆フーリエ変換により計算する（Cummins 1962）．

前進速度を考慮する場合，ピッチモードの付加質量および減衰力係数は Kramers-Kronig の関係を満たさない（Ma et al. 2016など）．

$$L_{jk}^N(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} b_{jk}^N(\omega) \cos \omega t d\omega$$

メモリー影響関数を，減衰力係数のうち，船速 U [m/s] に比例しない項の逆フーリエ変換により計算する（斎藤 & 東 1992など）．



$$b_{jk}(\omega) = b_{jk}^N(\omega) + b_{jk}^U(\omega) \quad \begin{array}{l} b_{jk}^N : \text{Non-proportional term to } U \\ b_{jk}^U : \text{Proportional term to } U \end{array} \quad \epsilon_j = \begin{cases} 0 & \text{for } j = 3 \\ x & \text{for } j = 5 \end{cases}$$

$$b_{jk}^N(\omega) = \int_L \epsilon_j \epsilon_k B_H(\omega) dx \quad B_H : \text{2-dimensional damping coefficient}$$

二次元の係数は，前進速度を考慮した場合にも Kramers-Kronig の関係を満たす．

[heave]

$$\begin{aligned} & \{m + a_{33}^N(\infty)\} \ddot{\xi}_3(t) + \{\ell_x a_{33}^N(\infty) - a_{35}^N(\infty)\} \ddot{\xi}_5(t) \\ &= \int_{-\infty}^t L_{33}^N(t - \tau) u_1(\tau) d\tau + \int_{-\infty}^t L_{35}^N(t - \tau) u_2(\tau) d\tau - c_{33}^G \xi_3(t) - c_{35}^G \xi_5(t) - U a_{33}^N(\infty) \dot{\xi}_5(t) + f_3^G(t) \end{aligned}$$

[pitch]

$$\begin{aligned} & \{\ell_x a_{33}^N(\infty) - a_{53}^N(\infty)\} \ddot{\xi}_3(t) + \{I_{yy} + a_{55}^N(\infty) - 2\ell_x a_{53}^N(\infty) + \ell_x^2 a_{33}^N(\infty)\} \ddot{\xi}_5(t) \\ &= \int_{-\infty}^t L_{33}^N(t - \tau) u_3(\tau) d\tau + \int_{-\infty}^t L_{53}^N(t - \tau) u_4(\tau) d\tau + \int_{-\infty}^t L_{55}^N(t - \tau) u_5(\tau) d\tau \\ & \quad - c_{53}^G \xi_3(t) + U a_{33}^N(\infty) \dot{\xi}_3(t) - c_{55}^G \xi_5(t) + U^2 a_{33}^N(\infty) \xi_5(t) + f_5^G(t). \end{aligned}$$

変数の説明

m	: mass
I_{yy}	: moment of inertia
$a_{ij}^N(\infty)$: added-mass
$L_{ij}^N(t)$: memory effect function
c_{ij}	: restoring force coefficient
$\xi_3(t)$: heave motion
$\xi_5(t)$: pitch motion
$f_i(t)$: wave-exciting force

畳み込み積分の入力

$$\begin{aligned} u_1(t) &= -\dot{\xi}_3(t) - U \xi_5(t) - \ell_x \dot{\xi}_5(t), \\ u_2(t) &= \dot{\xi}_5(t), \\ u_3(t) &= U \xi_3(t) - \ell_x \dot{\xi}_3(t) - \ell_x^2 \dot{\xi}_5(t) + U^2 \int_{-\infty}^t \xi_5(\tau) d\tau, \\ u_4(t) &= \dot{\xi}_3(t) + 2\ell_x \dot{\xi}_5(t), \\ u_5(t) &= -\dot{\xi}_5(t). \end{aligned}$$

近似システムによる畳み込み積分の代用 (1/3)

入力とインパルス応答関数の畳み込み積分はリアルタイム推定に適しておらず、何らかの近似システムで代用することが一般的である (Yu & Falnes 1995など)。

近似システムを状態空間モデルによって定式化すれば、カルマンフィルタの等の現代制御とも相性が良く、非常に便利である。

$$\text{[状態方程式]} \quad \dot{\boldsymbol{\eta}}_p(t) = \mathbf{F}_{ij}\boldsymbol{\eta}_p(t) + \mathbf{G}_{ij}u_p(t),$$

$$\text{[観測方程式]} \quad \int_{-\infty}^t L_{ij}(t - \tau)u_p(\tau)d\tau = \mathbf{H}_{ij}^T\boldsymbol{\eta}_p(t)$$

$$\boldsymbol{\eta}_p(t) = \begin{Bmatrix} \eta_{p1} \\ \eta_{p2} \\ \vdots \\ \eta_{pn} \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{F}_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & -f_1 \\ 1 & & & -f_2 \\ & \ddots & & \vdots \\ & & 1 & -f_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}_{ij} = \begin{Bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_n \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{H}_{ij} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix}.$$

メモリー影響関数 $L_{ij}(t)$ に対して、システム行列 \mathbf{F}_{ij} 、入力行列 \mathbf{G}_{ij} 、出力行列 \mathbf{H}_{ij} は共通、状態ベクトル $\boldsymbol{\eta}_p(t)$ のみ異なる。

三つのメモリー影響関数 $L_{33}^N(t)$, $L_{35}^N(t)$, $L_{55}^N(t)$ を線形微分方程式による近似システムで代用することを考える。

近似システムによる畳み込み積分の代用 (2/3)

付加質量と減衰力係数の周波数依存性を表す連立微分方程式

$$[\text{近似システム}] \quad \dot{\eta}(t) = F_{\eta}\eta(t) + G_{\xi}\xi(t) + G_{\dot{\xi}}\dot{\xi}(t)$$

where

$$\eta(t) = \begin{Bmatrix} \eta_1(t) \\ \eta_2(t) \\ \eta_3(t) \\ \eta_4(t) \\ \eta_5(t) \\ \eta_6(t) \end{Bmatrix} \quad F_{\eta} = \begin{bmatrix} F_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & F_{35} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_{33} & 0 & 0 & G_{33} \\ 0 & 0 & 0 & F_{35} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & F_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$G_{\xi} = \begin{bmatrix} 0 & -G_{33} \\ 0 & 0 \\ UG_{33} & -l_x G_{33} \\ 0 & G_{35} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad G_{\dot{\xi}} = \begin{bmatrix} -UG_{33} & -l_x G_{33} \\ 0 & G_{35} \\ 0 & -l_x^2 G_{33} \\ 0 & 2l_x G_{35} \\ 0 & -G_{55} \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

近似システムの状態ベクトル $\eta(t)$ は、現時点での船体に働く流体力を意味している。システムの入力は船体動揺 $\xi(t)$ であり、流体力はずっと過去から現在までの運動の履歴が全て影響している。

近似システムによる畳み込み積分の代用 (3/3)

運動方程式に近似システムを代入する.

$$\text{[運動方程式]} \quad \ddot{\xi}(t) = M^{-1}K\dot{\xi}(t) + M^{-1}C\xi(t) + M^{-1}L\eta(t) + M^{-1}u(t)$$

where

$$M = \begin{bmatrix} m + a_{33}^N(\infty) & \ell_x a_{33}^N(\infty) - a_{35}^N(\infty) \\ \ell_x a_{33}^N(\infty) - a_{53}^N(\infty) & I_{yy} + a_{55}^N(\infty) - 2\ell_x a_{35}^N(\infty) + \ell_x^2 a_{33}^N(\infty) \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} 0 & Ua_{33}^N(\infty) \\ -Ua_{33}^N(\infty) & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} c_{33} & c_{35} + \ell_x c_{33} \\ c_{53} + \ell_x c_{33} & c_{55} + \ell_x(c_{35} + c_{53}) + \ell_x^2 c_{33} \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} H_{33}^T & H_{35}^T & \mathbf{0}^T & \mathbf{0}^T & \mathbf{0}^T \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{0}^T & H_{33}^T & H_{35}^T & H_{55}^T \end{bmatrix}$$

$$\xi(t) = \begin{Bmatrix} \xi_3(t) \\ \xi_5(t) \end{Bmatrix}, \quad u(t) = \begin{Bmatrix} f_3^W(t) \\ f_5^W(t) + \ell_x f_3^W(t) \end{Bmatrix}$$

運動方程式の右辺第三項 $M^{-1}L\eta(t)$ は近似システムにより計算される流体力であり、畳み込み積分項を置き換えたものである.

状態空間モデルの実現 (1/3)

[近似システム] $\dot{\eta}(t) = F_{\eta}\eta(t) + G_{\xi}\xi(t) + G_{\dot{\xi}}\dot{\xi}(t)$

[位置と速度] $\dot{\xi}(t) = \dot{\xi}(t)$

[運動方程式] $\ddot{\xi}(t) = M^{-1}L\eta(t) + M^{-1}C\xi(t) + M^{-1}K\dot{\xi}(t) + M^{-1}u(t)$

$$x(t) = \begin{Bmatrix} \eta(t) \\ \xi(t) \\ \dot{\xi}(t) \end{Bmatrix} \quad F = \begin{bmatrix} F_{\eta} & G_{\xi} & G_{\dot{\xi}} \\ 0 & 0 & I \\ M^{-1}L & M^{-1}C & M^{-1}K \end{bmatrix} \quad G = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ M^{-1} \end{bmatrix}$$

$$y(t) = \begin{Bmatrix} \xi(t) \\ \dot{\xi}(t) \\ \ddot{\xi}(t) \end{Bmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & I \\ M^{-1}L & M^{-1}C & M^{-1}K \end{bmatrix} \quad J = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ M^{-1} \end{bmatrix}$$

[状態方程式] $\dot{x}(t) = Fx(t) + Gu(t)$

[観測方程式] $y(t) = Hx(t) + Ju(t)$

状態空間モデルの実現 (2/3)

[状態方程式] $\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{F}\mathbf{x}(t) + \mathbf{G}\mathbf{u}(t)$

[観測方程式] $\mathbf{y}(t) = \mathbf{H}\mathbf{x}(t) + \mathbf{J}\mathbf{u}(t)$

未知ベクトル: $\boldsymbol{\theta}(t) = [a_1 \ \cdots \ a_{3n} \ b_1 \ \cdots \ b_{3n}]^T$

パラメータ推定のため、状態空間モデルを拡張する

システムが未知であるため、
持続予測によりモデル化。

[状態方程式]
$$\begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{x}}(t) \\ \dot{\boldsymbol{\theta}}(t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \boldsymbol{\theta}(t) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \mathbf{G} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \mathbf{u}(t) = f_c(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t))$$

[観測方程式]
$$\mathbf{y}(t) = [\mathbf{H} \ \mathbf{0}] \begin{Bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \boldsymbol{\theta}(t) \end{Bmatrix} + \mathbf{J}\mathbf{u}(t) = h_c(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t))$$

- ✓ 二自由度運動方程式は、複数の入力、出力、状態量を用いた一階連立微分方程式により記述できる。

- 連続時不変システム

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = f_c(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) + \sqrt{\mathbf{Q}}\mathbf{v}(t) \\ \mathbf{y}(t) = h_c(\mathbf{x}(t)) + \sqrt{\mathbf{R}}\mathbf{w}(t) \end{cases}$$

- 離散時変システム (非線形システム)

$$\begin{cases} \mathbf{x}(t) = f_c(\mathbf{x}(t - \Delta t), \mathbf{u}(t - \Delta t)) + \sqrt{\mathbf{Q}}\mathbf{v}(t) \\ \mathbf{y}(t) = h_d(\mathbf{x}(t)) + \sqrt{\mathbf{R}}\mathbf{w}(t) = h_c(\mathbf{x}(t)) + \sqrt{\mathbf{R}}\mathbf{w}(t) \end{cases}$$

- 状態空間モデルを4次のルンゲクッタ法により離散化する

$$f_d(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \mathbf{x} + \frac{6}{h}(\mathbf{k}_1 + 2\mathbf{k}_2 + 2\mathbf{k}_3 + \mathbf{k}_4)$$

where $\mathbf{k}_1 = f_c(\mathbf{x}, \mathbf{u}), \mathbf{k}_2 = f_c(\mathbf{x} + \frac{h}{2}\mathbf{k}_1, \mathbf{u})$

$$\mathbf{k}_3 = f_c(\mathbf{x} + \frac{h}{2}\mathbf{k}_2, \mathbf{u}), \mathbf{k}_4 = f_c(\mathbf{x} + h\mathbf{k}_3, \mathbf{u})$$

Ensemble Kalman filter: EnKF (Evensen 1994)

■ 予測ステップ

事前状態推定値：

$$\hat{\mathbf{x}}_t^{(i)-} = \mathbf{f}_d(\hat{\mathbf{x}}_{t-\Delta t}^{(i)}, \mathbf{u}_{t-\Delta t}) + \sqrt{\mathbf{Q}}\mathbf{v}_t^{(i)}$$

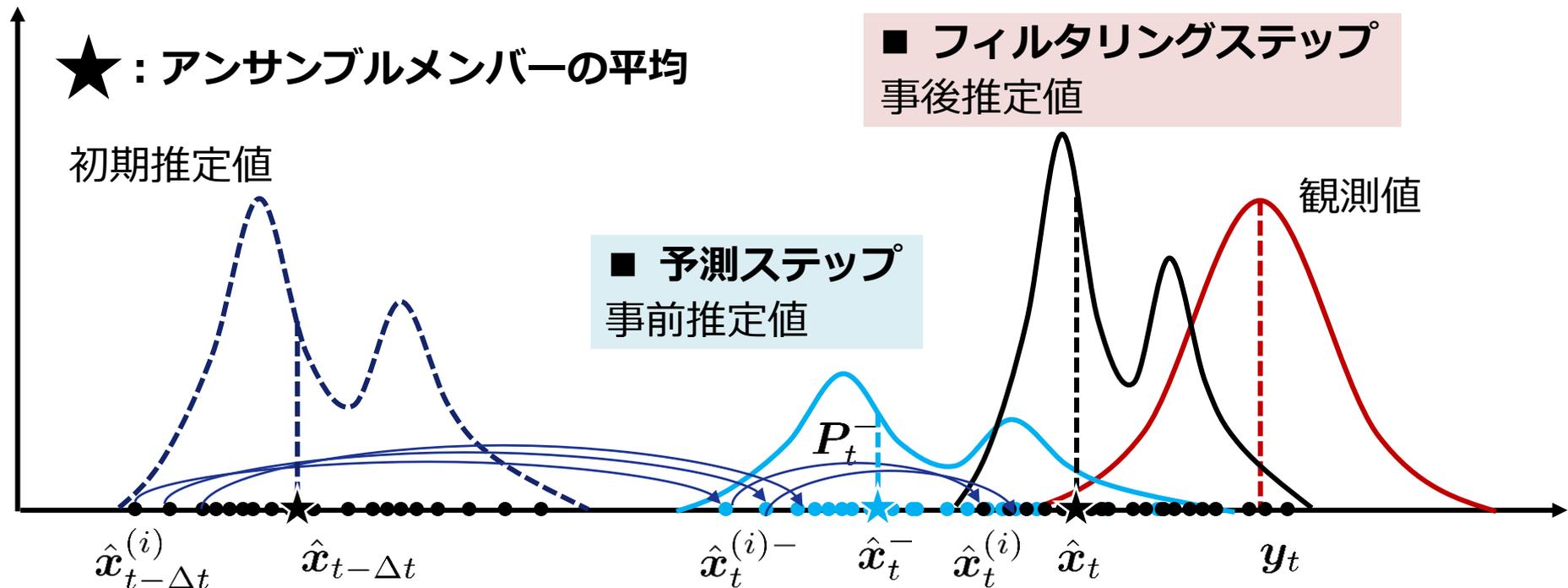
誤差共分散： $\mathbf{P}_t^- = \text{Cov} \left[\hat{\xi}_t^{(i)-}, \hat{\xi}_t^{(i)-} \right]$

■ フィルタリングステップ

カルマンゲイン： $\hat{\mathbf{G}}_t = \frac{\mathbf{P}_t^- \mathbf{H}^T}{\mathbf{H} \mathbf{P}_t^- \mathbf{H}^T + \sigma_w^2}$

事後状態推定値：

$$\hat{\mathbf{x}}_t^{(i)} = \hat{\mathbf{x}}_t^{(i)-} + \hat{\mathbf{G}}_t (y_t + \check{w}_t^{(i)} - \mathbf{H} \hat{\mathbf{x}}_t^-)$$



大阪大学の船舶海洋試験水槽にて2021年6月に実施した



船舶海洋試験水槽
(L=100m, B=7.8m, D=4.35m)

計測条件

$F_n = 0.18$, surge 固定

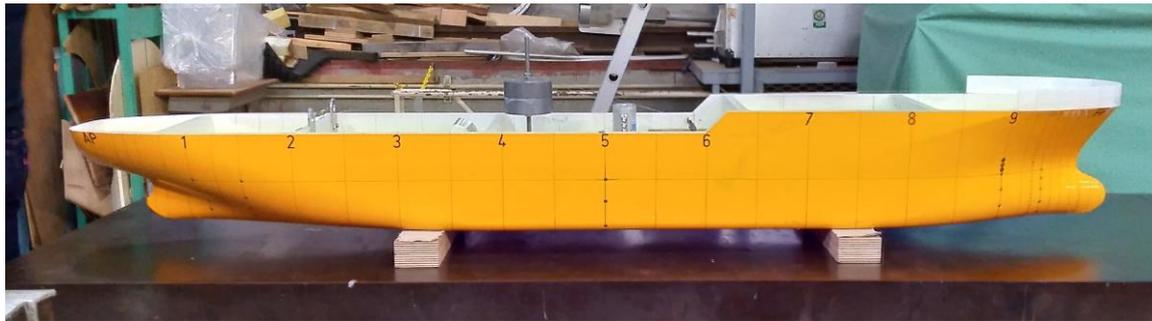
ITTC 波スペクトル $H_{1/3} = 0.02, 0.03, 0.04$ [m]

$T_{01} = 0.67, 1.20$ [s]

計測項目

船体重心位置における不規則波変位 $\zeta(t)$

船体重心位置における heave および pitch 運動



RIOS bulk carrier model

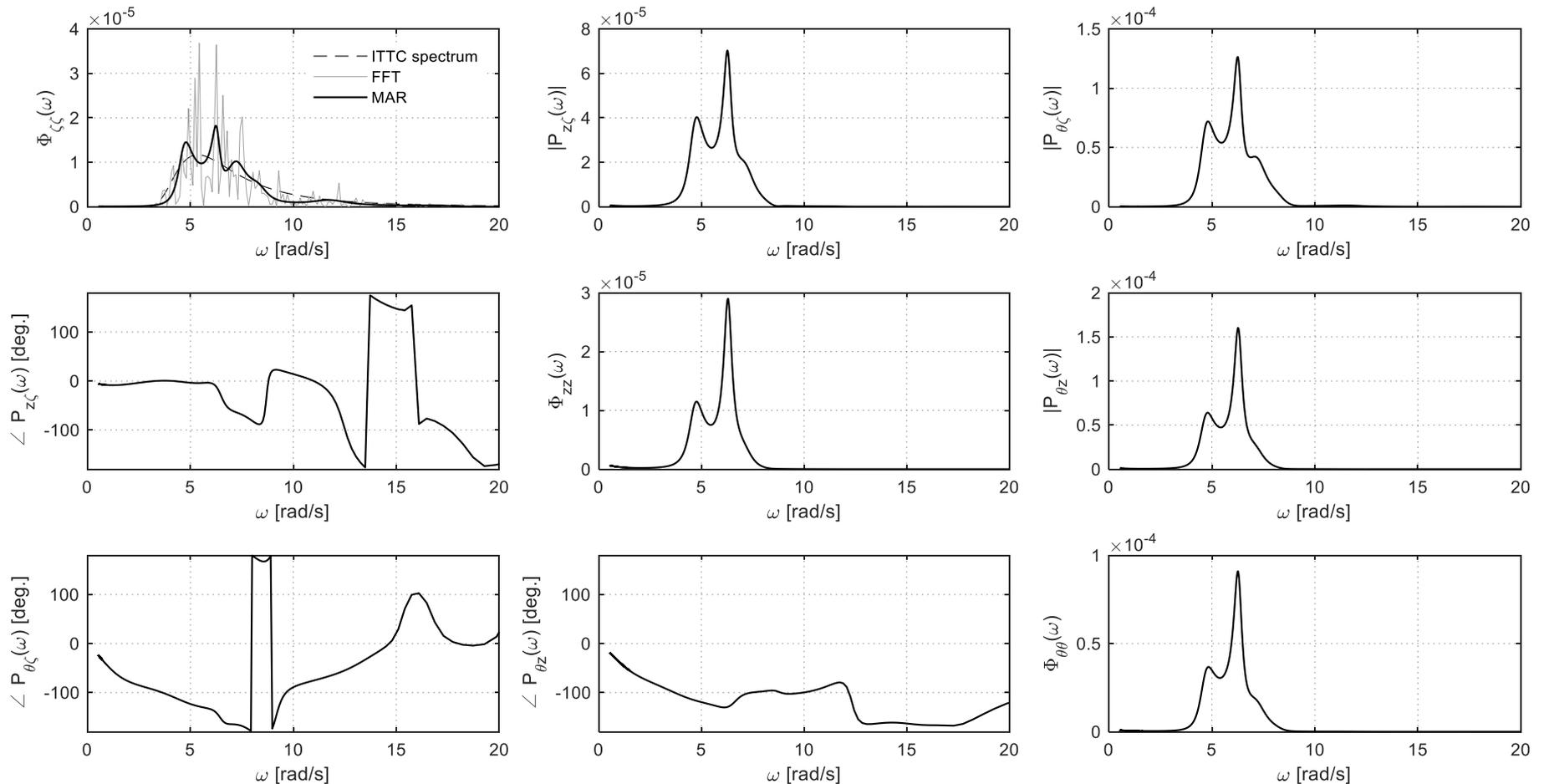
L_{pp} (m)	2.400
B (m)	0.400
d (m)	0.128
C_b	0.800
$\nabla = C_b L B d$ (m ³)	0.09830
C_m	0.9950
$\overline{A_w}$ (m ²)	0.8354
\overline{OG} (m)	0.0205
κ_{yy}/L	0.2500

計測データのスペクトル解析例（データ検証）

多次元自己回帰モデルによるスペクトル解析（大津 1994 など）

ITTC spectrum ($H_{1/3} = 0.03[\text{m}], T_{01} = 1.20[\text{s}]$)

$\Phi_{ij}(\omega)$: power spectrum, $P_{ij}(\omega)$: cross spectrum

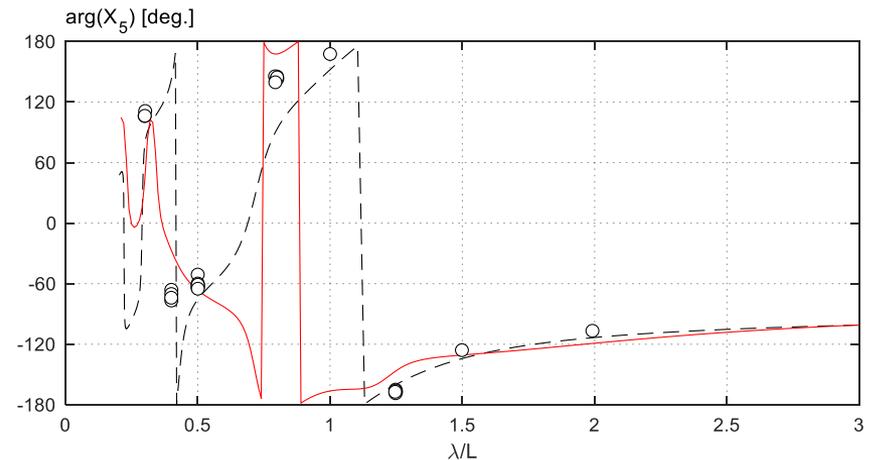
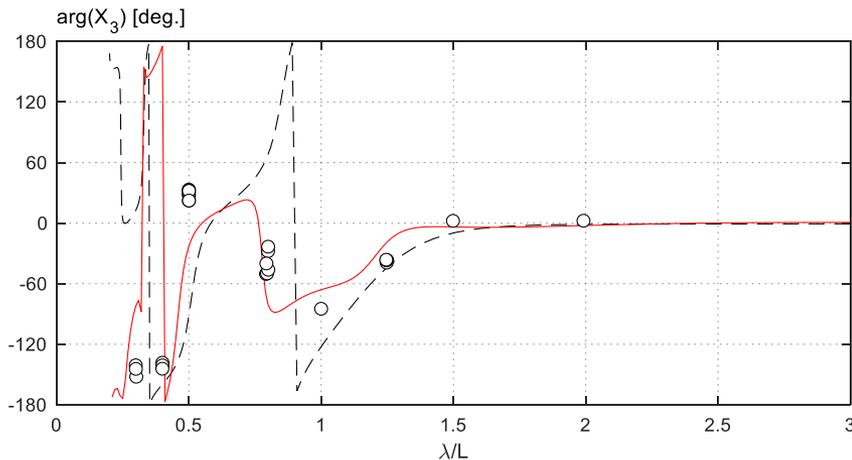
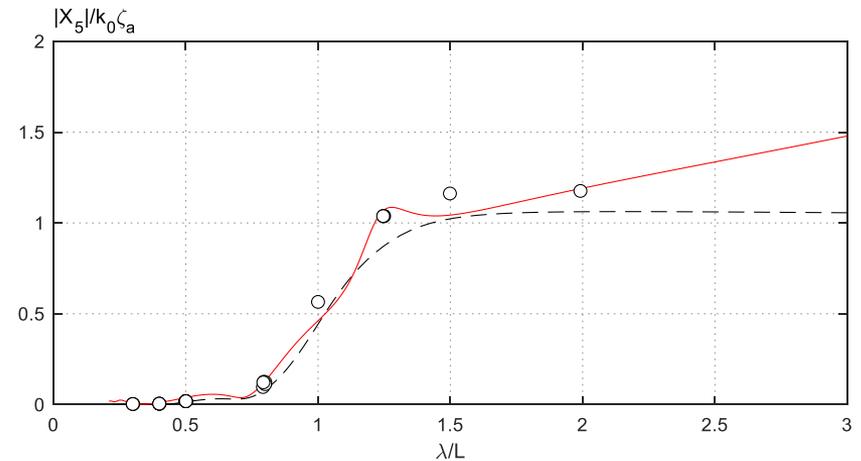
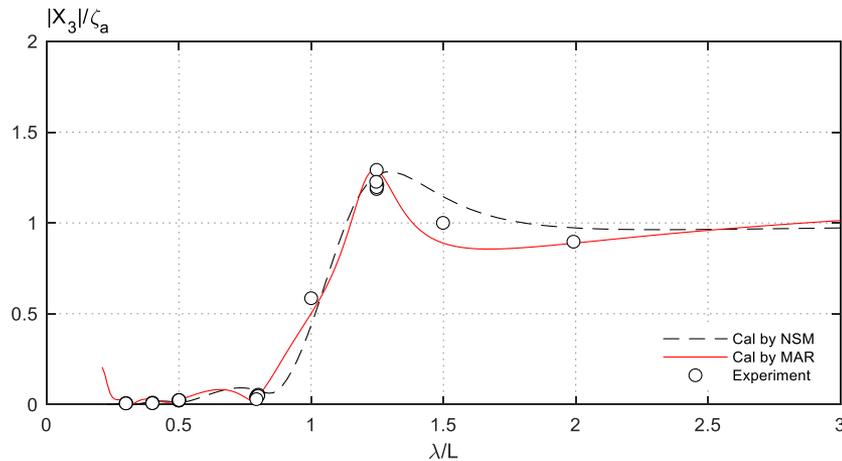


計測データのスペクトル解析例（データ検証）

多次元自己回帰モデルによるスペクトル解析（大津 1994 など）

ITTC spectrum ($H_{1/3} = 0.03[\text{m}], T_{01} = 1.20[\text{s}]$)

$\Phi_{ij}(\omega)$: power spectrum, $P_{ij}(\omega)$: cross spectrum



Wave condition

ITTC spectrum

$$H_{1/3} = 0.03[\text{m}], T_{01} = 1.20[\text{s}]$$

検証のフロー

1. 数学モデル中に含まれるメモリー影響関数 (NSM) の計算
2. 波変位および船体動揺の不規則時系列データの計測
3. 波変位から波浪強制力 (NSM) の推定
4. 提案の数学モデルによる船体動揺の推定

実験データを用いた数学モデルの検証 (2/4)

メモリー影響関数の計算 (Kashiwagi 2004)

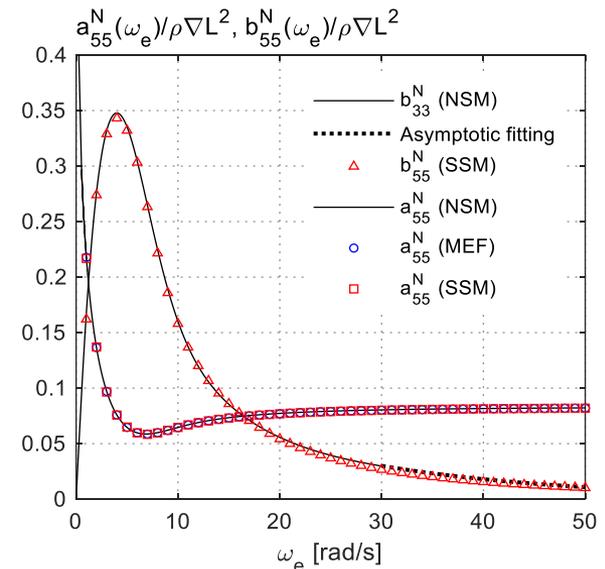
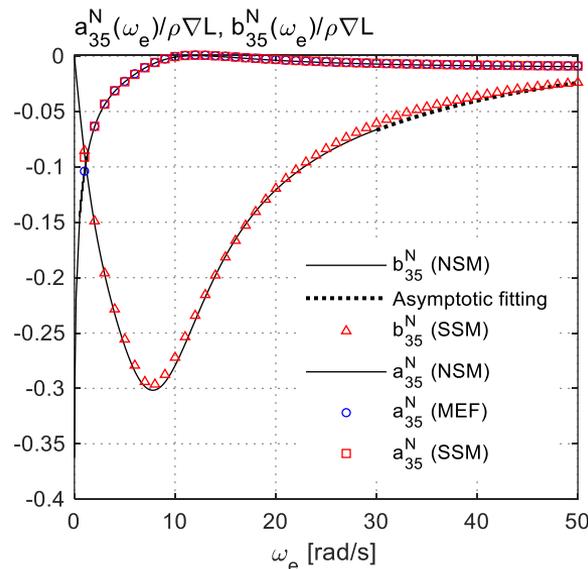
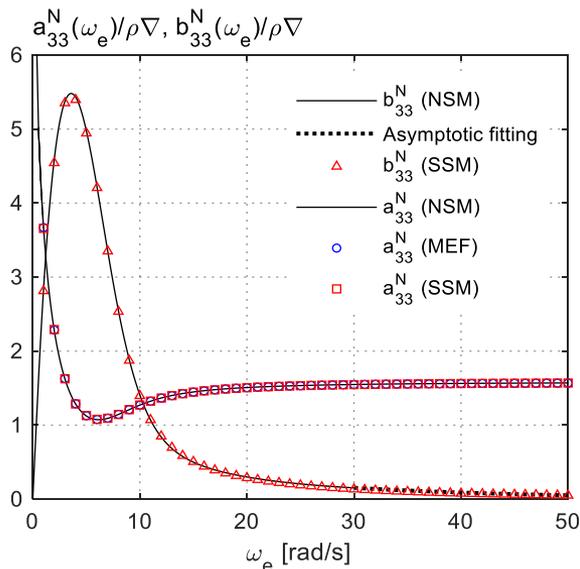
→ 漸近フィッティングを利用して高周波数帯の減衰力係数まで計算する

$$L_{jk}^N(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\omega_T} b_{jk}^N(\omega) \cos \omega t d\omega + \frac{2}{\pi} \frac{\alpha e^{-\beta \omega_T t}}{\beta^2 + t^2} (\beta \cos \omega_T t - t \sin \omega_T t)$$

近似システム的设计 (Yu & Falnes 1995)

→メモリー影響関数と状態空間モデルのインパルス応答関数の誤差を最小化する

$$Q = \sum_{m=1}^M \{L_{ij}(m\Delta t) - \underline{c_{ij}^T} e^{\mathbf{A}_{ij} m \Delta t} \underline{b_{ij}}\}^2$$

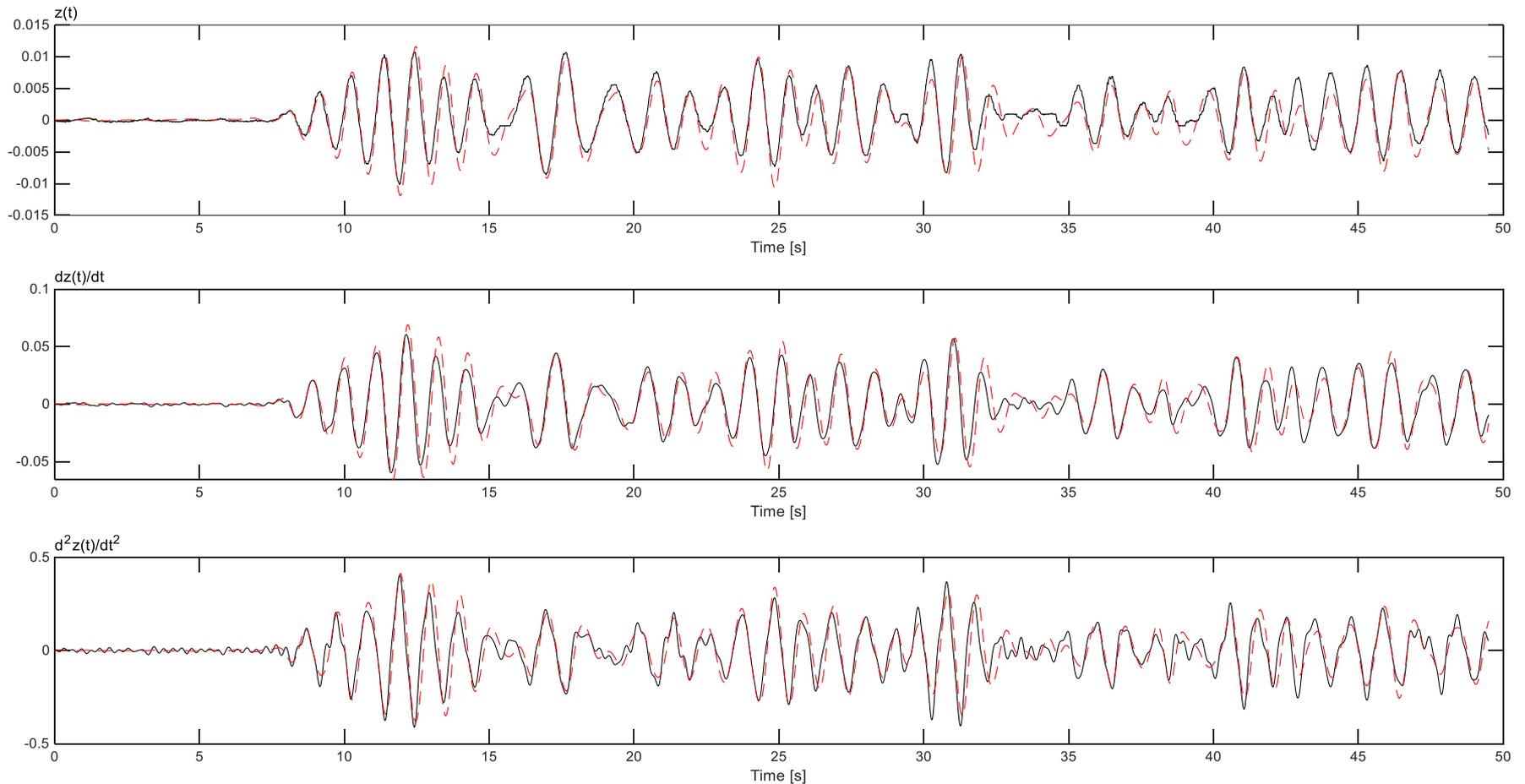


実験データを用いた数学モデルの検証 (3/4)

Wave condition

ITTC spectrum

$$H_{1/3} = 0.03[\text{m}], T_{01} = 1.20[\text{s}]$$

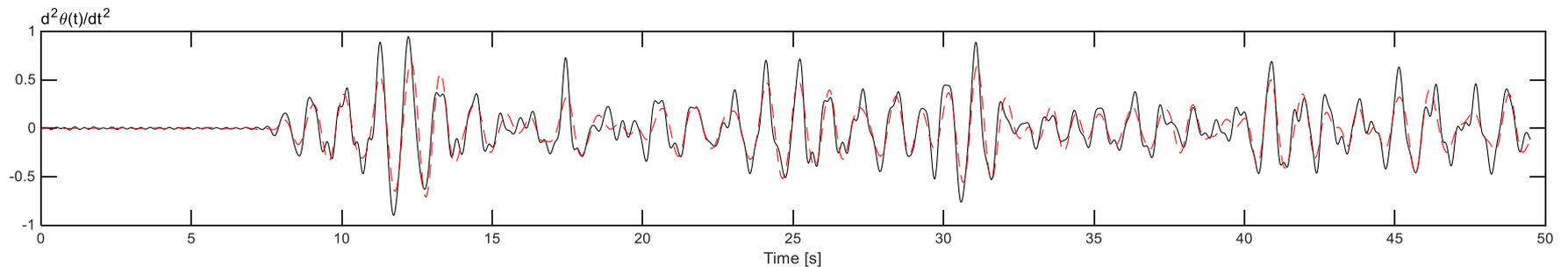
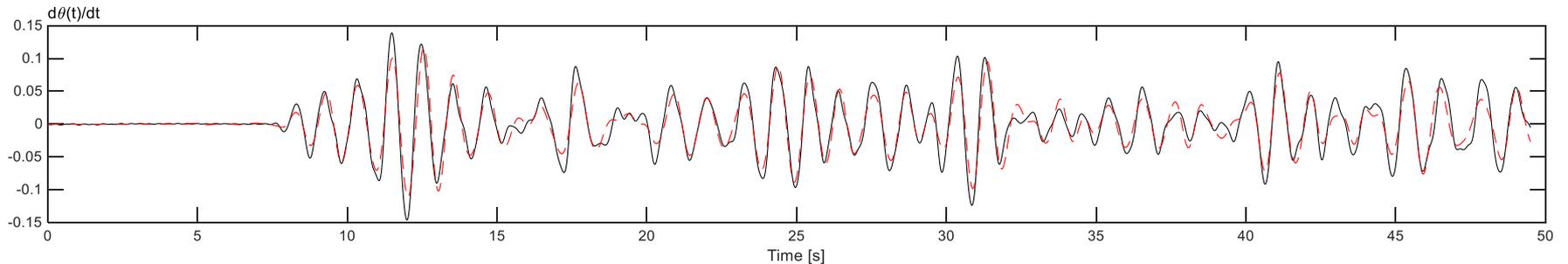
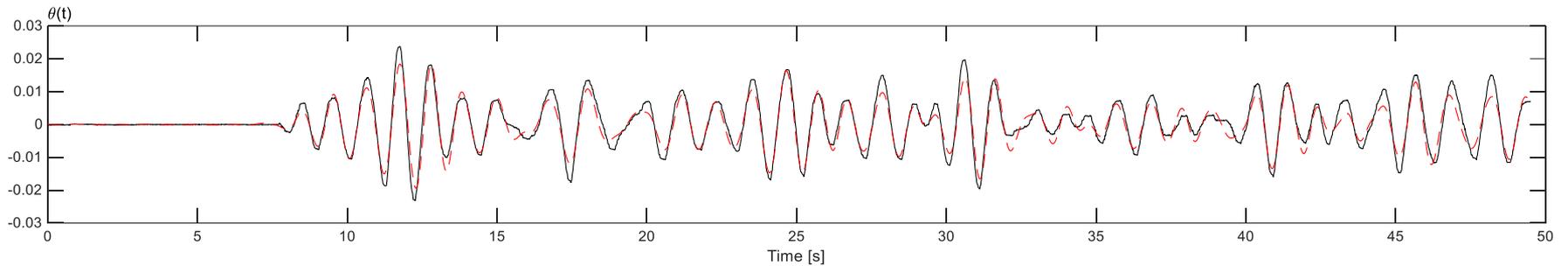


実験データを用いた数学モデルの検証 (4/4)

Wave condition

ITTC spectrum

$$H_{1/3} = 0.03[\text{m}], T_{01} = 1.20[\text{s}]$$



Wave condition

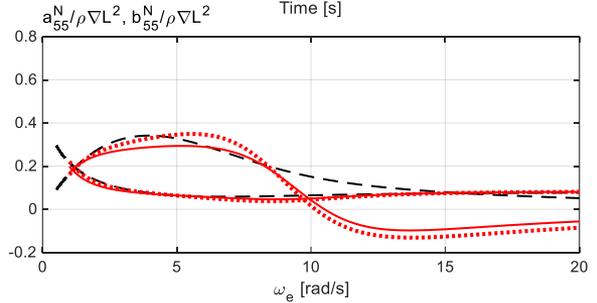
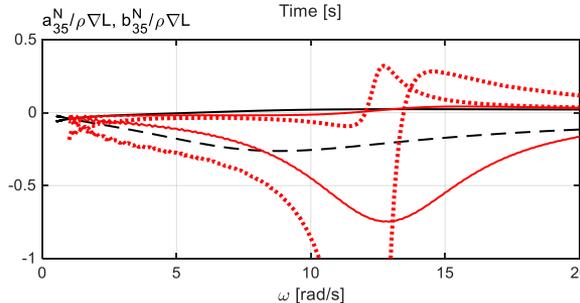
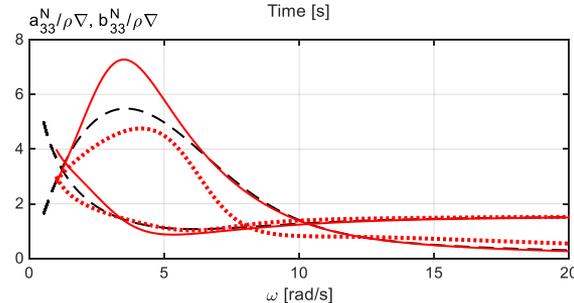
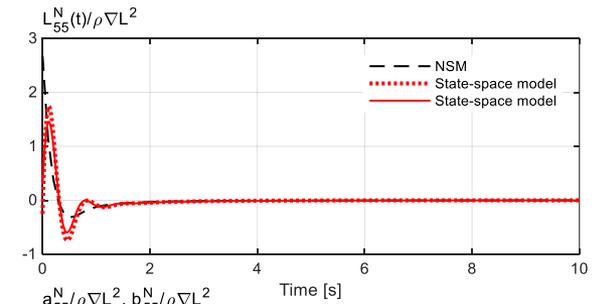
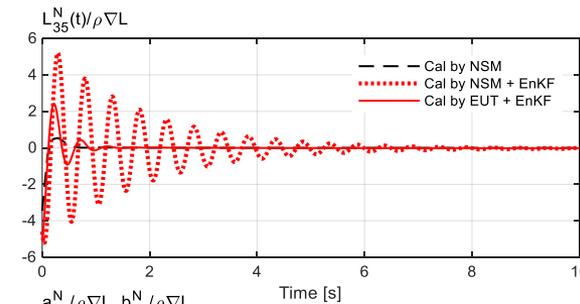
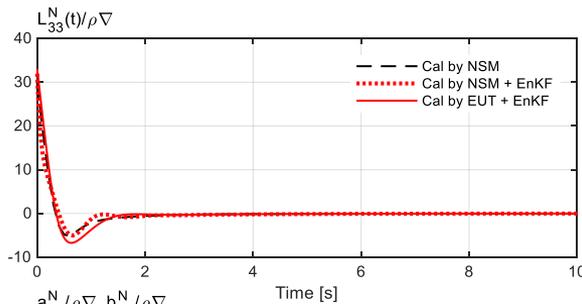
ITTC spectrum

$$H_{1/3} = 0.03[\text{m}], T_{01} = 1.20[\text{s}]$$

検証のフロー

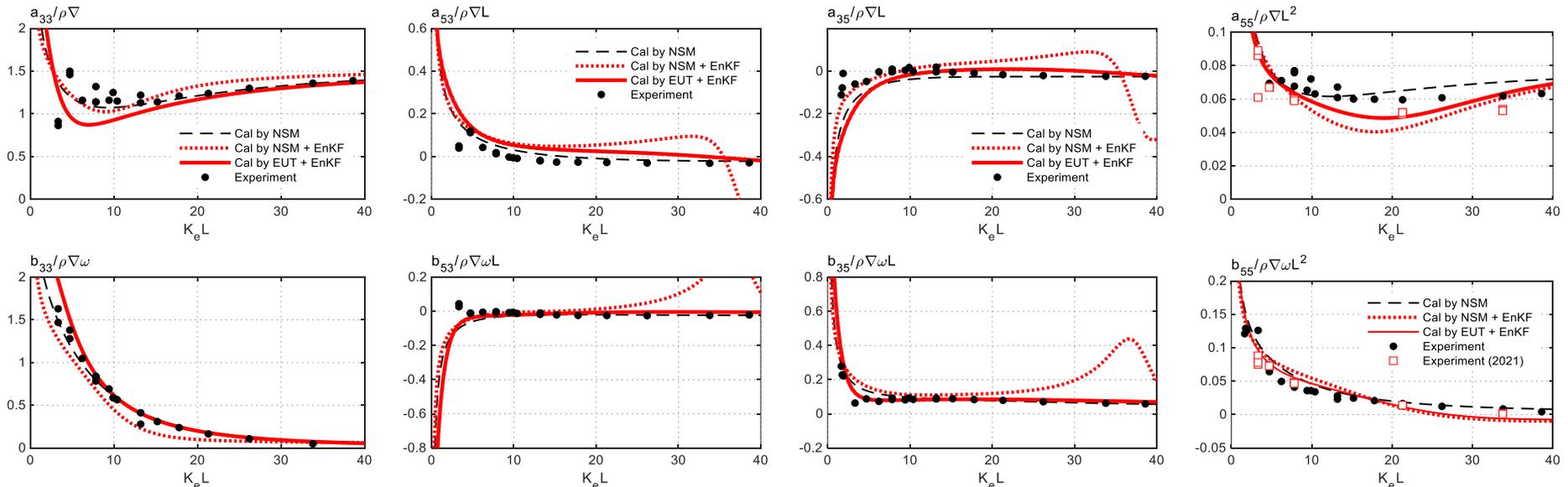
1. 波変位および船体動揺の不規則時系列データの計測
2. 波変位から波浪強制力 (NSM, EUT) の推定
3. アンサンブルカルマンフィルタにより, メモリー影響関数の同定
4. メモリー影響関数から, 付加質量と減衰力係数の計算
5. 数値計算 (NSM, EUT) により得られる波浪強制力と, 実験で得られた付加質量および減衰力係数から, 動揺特性の計算

- 不規則波から推定した波浪強制力，計測した船体動揺の時系列データを用いて，メモリー影響関数を推定した。
- メモリー影響関数は，付加質量と減衰力係数の前進速度に比例しない項の逆フーリエ変換であるため，Timman-Newman の関係から $L_{35}^N(t) = L_{53}^N(t)$ となる。
- NSM + EnKF と EUT + EnKF の推定結果を比較すれば，連成項のメモリー影響関数 $L_{35}^N(t)$ で顕著に違いが見られる。
- 周波数領域でのメモリー影響の実部は付加質量，虚部は減衰力係数を表す。
- カルマンフィルタによって時系列データから推定したメモリー影響関数は，減衰系となっており，安定なシステムである。



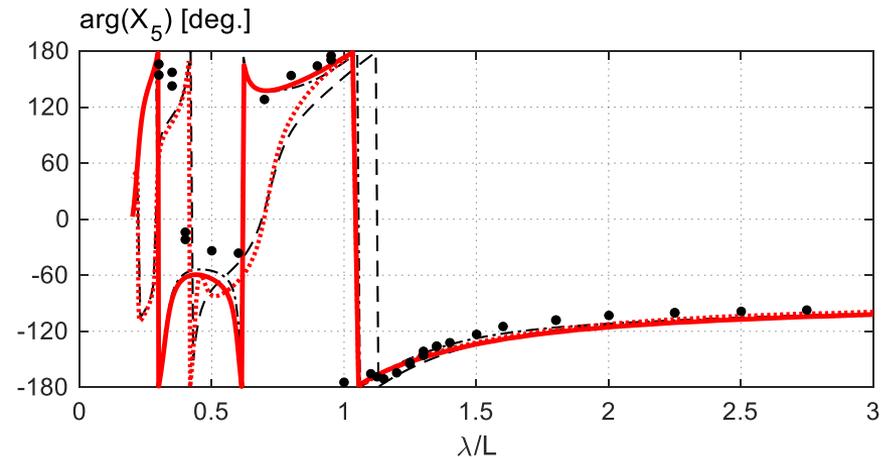
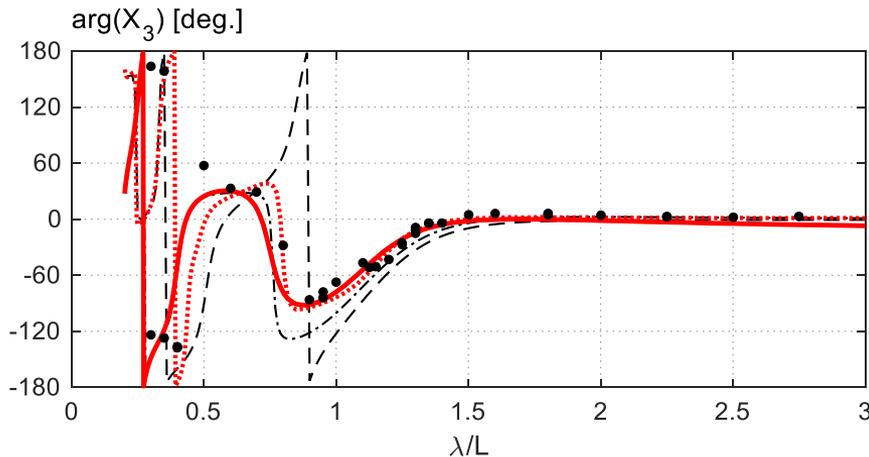
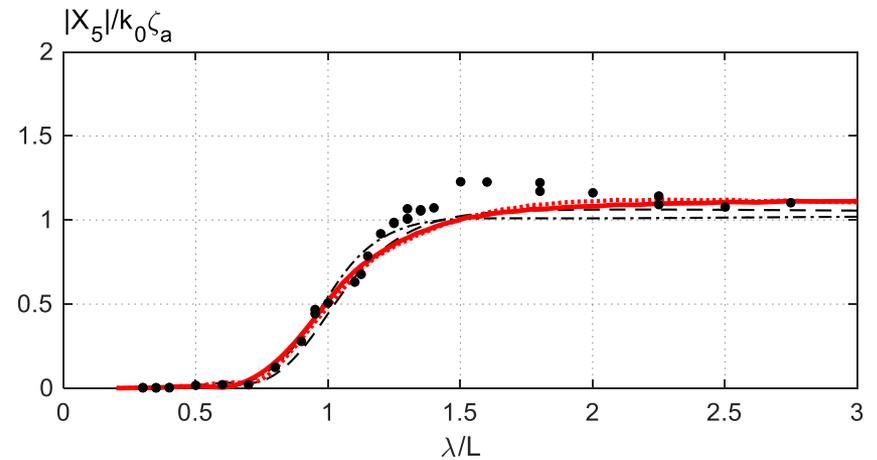
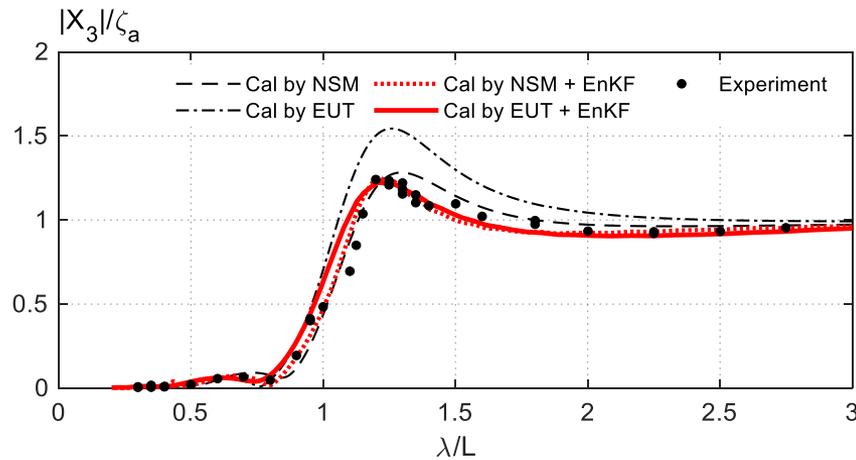
付加質量および減衰力係数

- 波変位から推定した波浪強制力，計測した船体動揺の時系列データを用いて推定したメモリー影響関数から，付加質量と減衰力係数を計算した。
- NSM + EnKF の場合には，短波長域で不可解な挙動を示しているが，これは推定した波浪強制力の位相が実現象と異なることに起因すると考えられる（NSMによる計算では，振幅特性はよく一致するが，位相特性が多少異なる）。
- EUT + EnKF の場合には，短波長域においても NSM + EnKF と比較して，実験値に沿うような値を推定できている。
- a_{55} , b_{55} について，どちらの結果も実験値とかなり乖離した値を推定している。提案の数学モデルでは，Surge運動を無視していることに起因していると考えている。



向い波中での動揺特性

- EnKF により時系列データから推定したパラメータ, NSM および EUT で計算した波浪強制力を用いて運動方程式を解き, 向い波中での動揺特性を計算した.
- 波浪強制力の計算手法に依らず, **EnKF により推定したパラメータを用いる方が, 実験値と一致していることが分かる.**



- 二自由度連成 (heave, pitch) を考慮した船体の運動方程式に基づき、波浪強制力を入力、船体動揺を出力とする数学モデルを定式化した。不規則波中での船体動揺を計測するための水槽試験を行い、提案の数学モデルを検証した。
- 船体動揺とモデルのパラメータを同時推定するため、状態空間モデルを拡張し、ベイズ統計理論に基づくアンサンブルカルマンフィルタを用いて、不規則時系列データからメモリー影響関数を直接同定することを試みた。
- 同定されたメモリー影響関数を用いて、付加質量および減衰力係数、船体動揺特性を明らかにしたが、付加質量と減衰力係数の推定精度は短波長領域で比較的低い。
- 波浪強制力の推定精度に問題があると考えられるため、Diffraction問題を3次元理論に基づき解く、もしくは数学モデルを定式化しなおす必要がある。

1. 大津皓平, & 北川源四郎. (1989). 実船データによる動揺パラメータの統計的推定. *日本造船学会論文集*, 1989(165), 181-191.
2. 寺田大介, & 北川源四郎. (2009). 時系列解析による動揺パラメータの直接推定法—自由度モデルによる検証. *日本船舶海洋工学会論文集*, 9, 127-137.
3. Hanaki, T., & Minoura, M. (2021, June). Identification of Ship Motion Parameters by Time-Series Analysis of Coupled Longitudinal Motion. In *The 31st International Ocean and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers.
4. Cummins, W. E., Liu, W., & Uinm, A. (1962). The impulse response function and ship motions.
5. Ma, S., Wang, R., Zhang, J., Duan, W. Y., Ertekin, R. C., & Chen, X. B. (2016). Consistent formulation of ship motions in time-domain simulations by use of the results of the strip theory. *Ship Technology Research*, 63(3), 146-158.
6. 斎藤公男, & 東秀行. (1992). 波浪中船体応答の時系列解析について. *日本造船学会論文集*, 1992(172), 9-16.
7. Yu, Z., & Falnes, J. (1995). State-space modelling of a vertical cylinder in heave. *Applied Ocean Research*, 17(5), 265-275.
8. Kashiwagi, M. (2004). Transient responses of a VLFS during landing and take-off of an airplane. *Journal of Marine Science and Technology*, 9(1), 14-23.
9. 大津皓平. (1994). 時系列解析の最近の動向. *運動性能研究委員会 第 11 回シンポジウムテキスト*, 1994.