



第22回 海上技術安全研究所研究発表会



港内操船再現のための操縦運動数学モデルと その簡易構築手法

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

流体性能評価系（併任 自動運航船プロジェクトチーム） *北川 泰士
知識データ・システム系（併任 自動運航船プロジェクトチーム） 澤田 涼平

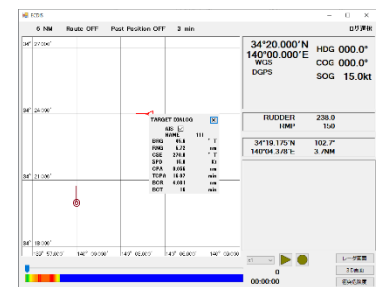
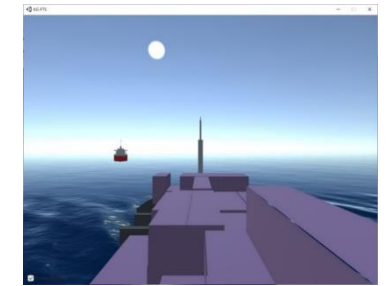
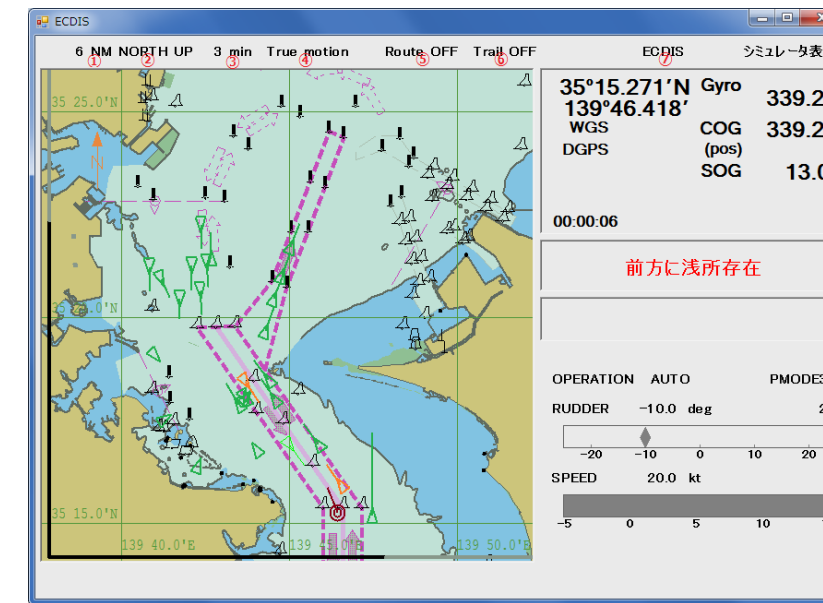
自動運航船の安全性評価のための総合シミュレーションシステム

● FTSS (Fast Time Ship Simulator)

- 実時間よりも十分に短い時間でシミュレーションを実施。
- 一定の条件下での網羅的な検証が可能。

対象とする操船モード

- 自動操船 (離着棧、避航)



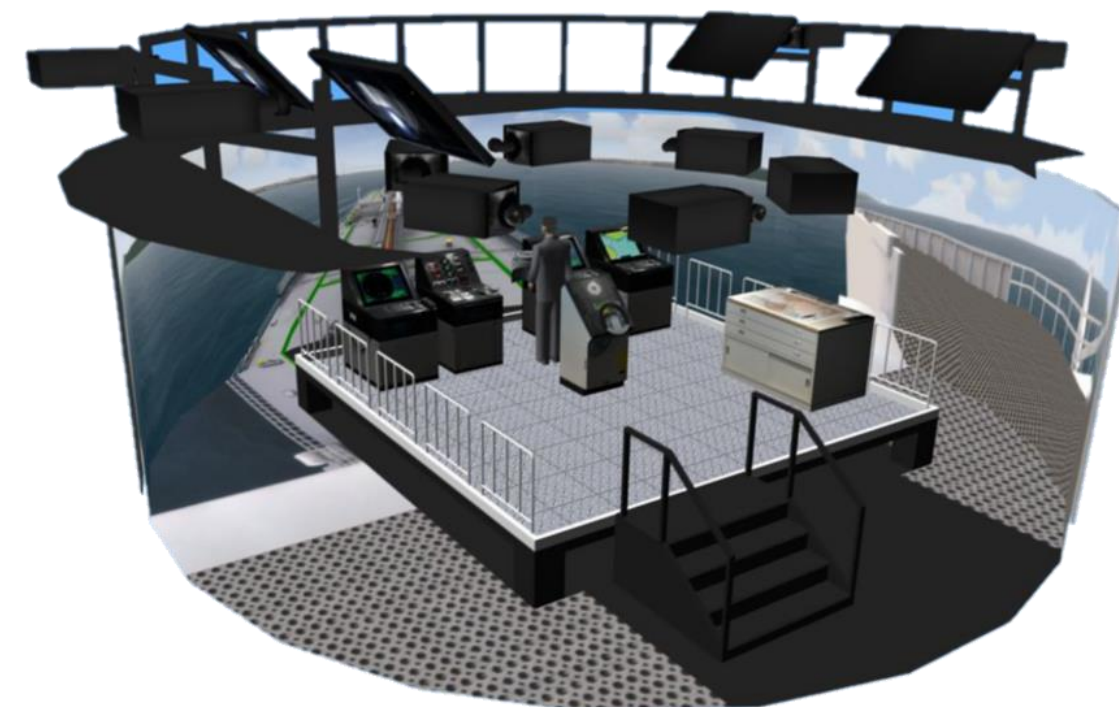
FTSS (実行イメージ)

● SHS (Ship Handling Simulator)

- フルミッション型操船シミュレータ
- HMIの評価, 緊急時の乗組員へ操船権の移譲のタイミングの評価, 既存船舶と併存する海域での操船行動評価など, 人の関与を考慮した評価が可能

対象とする操船モード

- 自動操船 (離着棧、避航、荒天下操船)
- 遠隔監視及び操船
- 緊急時操船



SHSイメージ図
(2021年3月作成)

モチベーション：離着棧操船を含めた幅広い操縦運動を再現する必要がある

～シミュレーションモデルに求められるもの

- 通常速力～離着棧時の低速状態、の広範な操縦運動を実用的な精度で再現できる
- 外乱下（風波など）影響を考慮できて、波浪中船体動揺も再現できる
- 網羅的なシナリオ検証に供するため、SHSでの利用のため（実時間以下の計算処理が必要）、計算処理数が少ないこと
- あらゆる対象船（船種、寸法）に対し、早急なモデル構築（モデル内係数の設定）ができること⇒水槽試験やCFDによるモデル構築は人的コスト+金額的成本が大

発表内容：操縦運動モデルの選定 + モデル中係数の簡易推定手法の整備・構築の進捗をご紹介

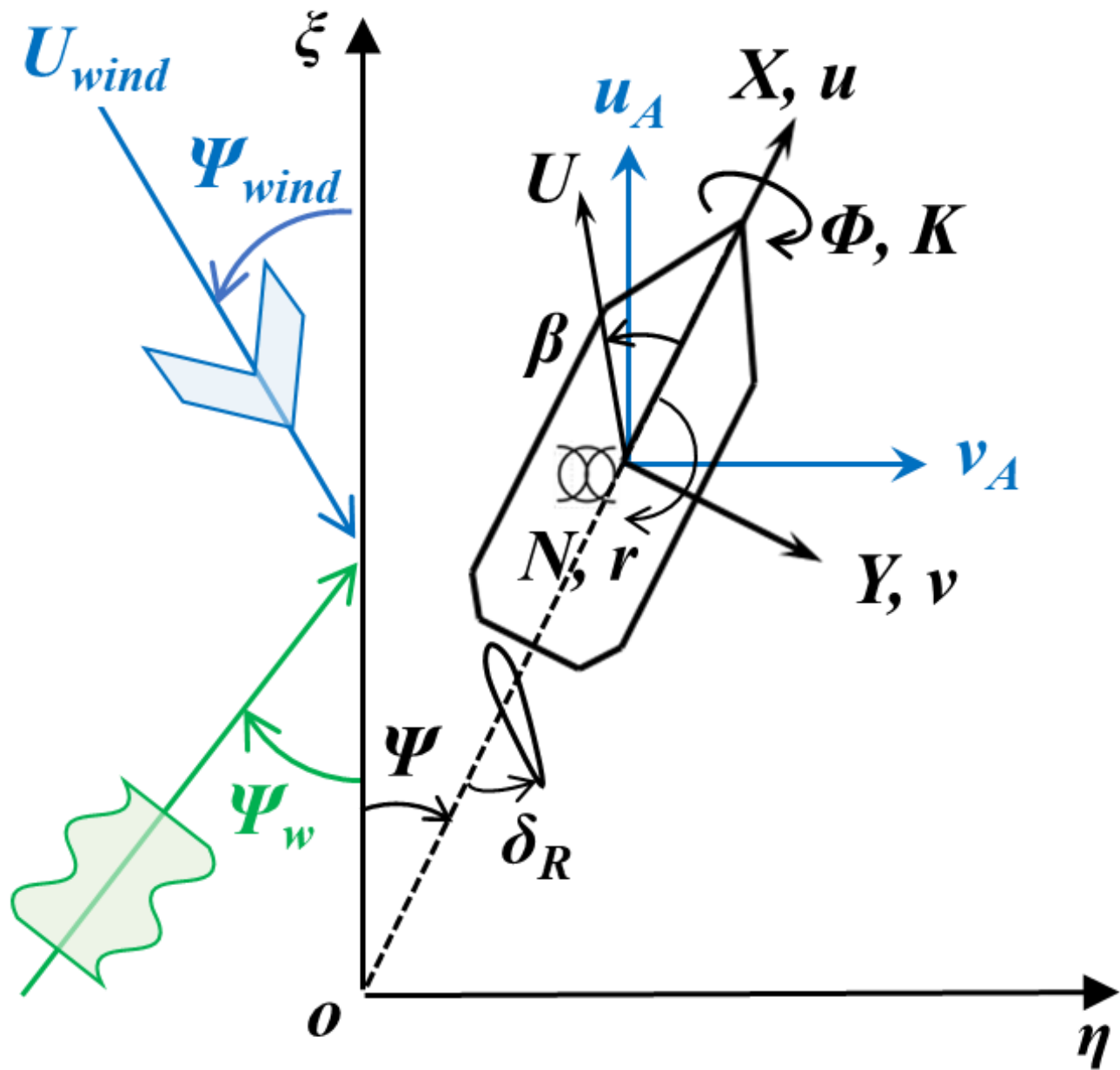
操縦運動モデルの選定

～最初に運動計算手法について方針検討

- 波浪中を想定すると波浪中操縦運動は6自由度（1:前後・Surge, 2: 左右・Sway, 3:上下揺れ・Heave, 4:横揺れ・Roll, 5:縦揺れ・Pitch, 6:回頭・Yaw）
- 一般的な操縦運動計算では3自由度（Surge, Sway, Yaw）、横傾斜しやすい船種では4自由度（+Roll）
- 波浪中シナリオ+SHSの映像投影を考慮すると6自由度評価が必要
- 自由度数が多くなるほど、モデル中係数の整備が大変
- 波浪中船体動揺時系列は運動方程式を解かなくとも算定可能。ただし、風による定傾斜を考慮するならRollは運動方程式対応が必要
- ✓ 方針決定～操縦運動時系列計算は4自由度(Surge, Sway, Roll, Yaw)、Heave・Pitchは波浪中船体動揺のみの評価



モデル選定 (座標系～運動方程式)



運動方程式

$$\begin{cases} (m + m_{11})\dot{u} - mvr = X \\ (m + m_{22})\dot{v} + mur + m_{26}\dot{r} = Y \\ (I_{xx} + m_{44})\ddot{\Phi} + B_{44}\dot{\Phi} - I_{zz}\dot{\Phi}r - m_{11}z_{m15}ur + mg\overline{GM} = K \\ (I_{zz} + m_{66})\dot{r} + (m_{22} - m_{11})uv + m_{26}ur + m_{62}\dot{v} = N \end{cases}$$

外力項

$$\begin{cases} X = X_0 + X_H + X_P + X_R + X_S + X_A + X_{f.d} + X_{f.k} + X_{dif} + X_{W.D} \\ Y = Y_H + Y_P + Y_R + Y_S + Y_A + Y_{f.d} + Y_{f.k} + Y_{dif} + Y_{W.D} \\ K = K_H + K_R + K_A + K_{f.d} + K_{f.k} + K_{dif} \\ N = N_H + N_P + N_R + N_S + N_A + N_{f.d} + N_{f.k} + N_{dif} + N_{W.D} \end{cases}$$

黒字：平水中成分 青字：風による外力 緑字：波による外力

Heave
Pitch
時系列

$$\begin{cases} z(\xi_G, \eta_G, t) = \sum_{i=1}^N \zeta_{wi} z_{ai}(\lambda_i, \chi_i, u, v) \cos\{2\pi f_i t - k_i(\xi_G \cos \Psi_{wi} + \eta_G \sin \Psi_{wi}) - \varepsilon_{zi} - \varepsilon_{oi}\} \\ \theta(\xi_G, \eta_G, t) = \sum_{i=1}^N \zeta_{wi} k_i \theta_{ai}(\lambda_i, \chi_i, u, v) \cos\{2\pi f_i t - k_i(\xi_G \cos \Psi_{wi} + \eta_G \sin \Psi_{wi}) - \varepsilon_{\theta i} - \varepsilon_{oi}\} \end{cases}$$

$$\chi = \Psi_w - \Psi$$

*基本的にSuzukiら¹⁾の定式化に従う

*規則波中応答の線形重ね合わせで表現

1) Suzuki Ryosuke, et al.: Numerical simulation of 6-degrees-of-freedom motions for a manoeuvring ship in regular waves, Applied Ocean Research, Vol.113, (2021).

モデル選定（船体抵抗・Hullモデル）



X_0 : 船体抵抗モデル

$$\begin{cases} X_0 = \frac{1}{2} \rho S_W u^2 C_T \cdot \text{sign}(u) C_{Tu} \\ C_T = (1 + k) C_{F0} + C_W + \Delta C_F \\ C_{F0} = \frac{0.463}{(\log_{10} |Re|)^{2.6}} \end{cases}$$

- ✓ 粘性抵抗は3次元外挿法にて表現、相当平板の摩擦抵抗係数 C_{F0} はシェーンヘルの簡易表現式
- ✓ 造波抵抗係数 C_W は $F_n > 0.1 \sim 0.15$ （船型に応じて）以上で与える
- ✓ C_{Tu} ：後進時の船体抵抗を考慮するために導入

X_H, Y_H, N_H, K_H : Hullモデル

$$\begin{cases} X_H = \frac{1}{2} \rho L d \cdot (m'_y + X'_{vr} + \Delta X'_{vr}) L v r \\ Y_H = \frac{1}{2} \rho L d \cdot [Y'_v v |u| + (Y'_r - m'_x) L r u - C_D [v|v| \\ - C_{rY}^2 L^2 \left\{ - \left(\frac{1}{12} r - \frac{\tau'}{32} |r| \right) r \frac{v}{U} + \frac{\tau'}{32} r |r| \right\}]] \\ N_H = \frac{1}{2} \rho L^2 d \cdot \left[\{N'_v u v + N'_r L r |u|\} + C_D \left[\frac{\tau'}{12} v |v| \right. \right. \\ \left. \left. - C_{rN} \left\{ \left(\frac{U}{6} - \frac{C_{rN} L}{32} |r| \right) L r \left(\frac{v}{U} \right)^2 \frac{v^2}{U} + L^2 \frac{C_{rN}}{32} r |r| \right\} \right] \right] \\ K_H = -z_{YH} Y_H \end{cases}$$

- ✓ 芳村ら⁴⁾の簡易Crossflow dragモデル←低速操船時（大斜航状態）の流体力特性を表現可能（赤字は芳村先生から連絡のあった訂正項）
- ✓ 係数は船型主要目から推定可能
- ✓ K_H は Y_H ×着力点のみから成る簡易表現

4) 芳村康男, 高瀬康一, 他: 風力下で漂流する船舶の簡易数学モデルによる運動シミュレーション, 日本船舶海洋工学会論文集, 第31号, (2020), pp.47-57.

モデル選定 (プロペラモデル・舵モデル)



X_P, Y_P, N_P : プロペラモデル

X_R, Y_R, N_R, K_R : 舵モデル

$$\begin{cases} X_P = (1 - t_P)\rho n^2 D^4 \cdot K_T [J] \\ J = \frac{u(1 - w_P)}{nD} \end{cases}$$

- ✓ プロペラ単独特性と自航要素で表現
- ✓ プロペラ単独特性は第1～第4象限まで整備する

$$\begin{cases} Y_P = \begin{cases} 0, \text{ where } n \geq 0 \\ \text{else, } \rho n^2 D^4 \cdot Y_P^* \end{cases} \\ N_P = \begin{cases} 0, \text{ where } n \geq 0 \\ \text{else, } \rho n^2 D^4 \cdot Y_P^* \cdot x_{PR}' L \end{cases} \end{cases}$$

- ✓ プロペラ逆転時にSway・Yaw方向に生じる不平衡流体力⁵⁾を考慮する

$$\begin{cases} X_R = -(1 - t_R)F_N \sin \delta_R \\ Y_R = -(1 + a_H)F_N \cos \delta_R \\ N_R = -(x_R + a_H x_H)F_N \cos \delta_R \\ K_R = -z_R Y_R \end{cases} \quad \begin{cases} F_N = \frac{1}{2} \rho A_R U_R^2 C_N(\alpha_R, \alpha_{Rstl}) \\ U_R = \sqrt{u_R^2 + v_R^2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} u_R = \text{sign}(u_{R.sqr}) \sqrt{|u_{R.sqr}|} \\ u_{R.sqr} = D/H_R \cdot u_{R1} |u_{R1}| + (1 - D/H_R) u_{R2} |u_{R2}| \\ u_{R1} = \begin{cases} u(1 - w_R) + k_x \cdot u(1 - w_P) \\ \times (\sqrt{1 + 8K_T/\pi J^2} - 1), \text{ for } n > 0 \\ k_x \cdot nD_P \sqrt{8|K_T|/\pi}, \text{ for } n < 0 \end{cases} \\ u_{R2} = u(1 - w_R) \end{cases}$$

$$v_R = -\gamma_R(v + l_R r) \leftarrow \text{文献によって表記が異なるため注意}$$

- ✓ プロペラ逆転時の舵力も考慮できるモデル⁸⁾

5) 藤野正隆, 切田篤: プロペラ逆転時による制動時の船の操縦性について (第一報), 関西造船協会誌, 第169号, (1978), pp.57-70.

8) 北川泰士, 塚田吉昭, 宮崎英樹: プロペラ逆転時のプロペラ・舵の数学モデルに関する検討, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第20号, (2015), pp.117-120.

X_A, Y_A, N_A, K_A : 風圧力モデル

$$\begin{cases} X_A = \frac{1}{2} \rho_A A_F U_A^2 C_{AX}(\Psi_A) \\ Y_A = \frac{1}{2} \rho_A A_L U_A^2 C_{AY}(\Psi_A) \\ N_A = \frac{1}{2} \rho_A A_L L_{oa} U_A^2 C_{AN}(\Psi_A) \\ K_A = \frac{1}{2} \rho_A A_L H_b U_A^2 C_{AK}(\Psi_A) \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_A = \sqrt{u_A^2 + v_A^2} \\ \begin{bmatrix} u_A \\ v_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -U_{wind} \cos \Psi_{wind} - u \cos \Psi + v \sin \Psi \\ U_{wind} \sin \Psi_{wind} - u \sin \Psi - v \cos \Psi \end{bmatrix} \end{cases}$$

$$\Psi_A = \tan^{-1}(v_A/u_A) - \Psi$$

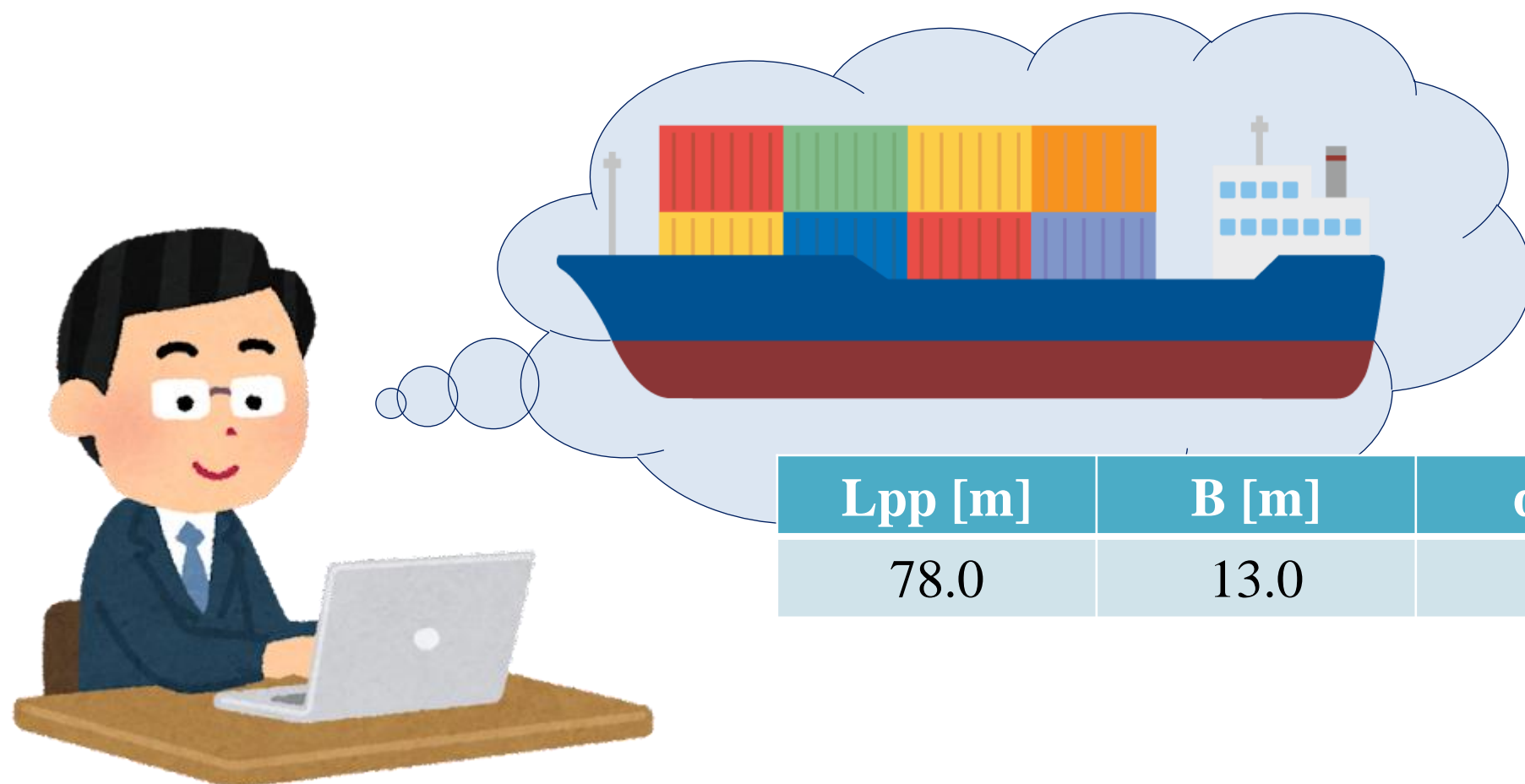
- ✓ 水面上の上部構造物に作用する風圧力を評価（4自由度）
- ✓ 真風速 U_{wind} と真風向 Ψ_{wind} から操縦運動する船の見掛けの風速 U_A 及び風向 Ψ_A を計算する

モデル係数の簡易推定手法

モデル係数推定手法（概要～テスト船）

- モデル選定の際、モデル内係数の簡易推定手法の有無も同時に考慮
- 現状の課題も同時に整理（適用できる船種やサイズの範囲、サイドスラストモデル等 そもそもの研究例不足）
- テスト船による適用例を交えながら調査した簡易推定手法を紹介

- テスト船：架空の内航コンテナ船、主要目+計画速力の情報のみからモデル構築をスタート



L_{pp} [m]	B [m]	d [m]	C_b	計画速力 [kt]
78.0	13.0	6.5	0.7	12.0

モデル係数推定手法 (HOPE Light利用)



HOPE Light 出力例

- HOPE Light³⁾ : 船型要目最適化プログラム
- 少ない入力パラメータ (船種、垂線間長、船幅、喫水、型深さ、排水量 (あるいはCb)、計画速力) で推進性能特性含む多くの情報を推定可能
- 対象船型 (6種) : Tanker, Bulk Carrier, Container Ship, PCC, Domestic Tanker, Domestic Cargo
- 本研究における利用 : モデル計算に必要な他の主要目の推定、平水中船体抵抗特性や自航要素の推定

POC

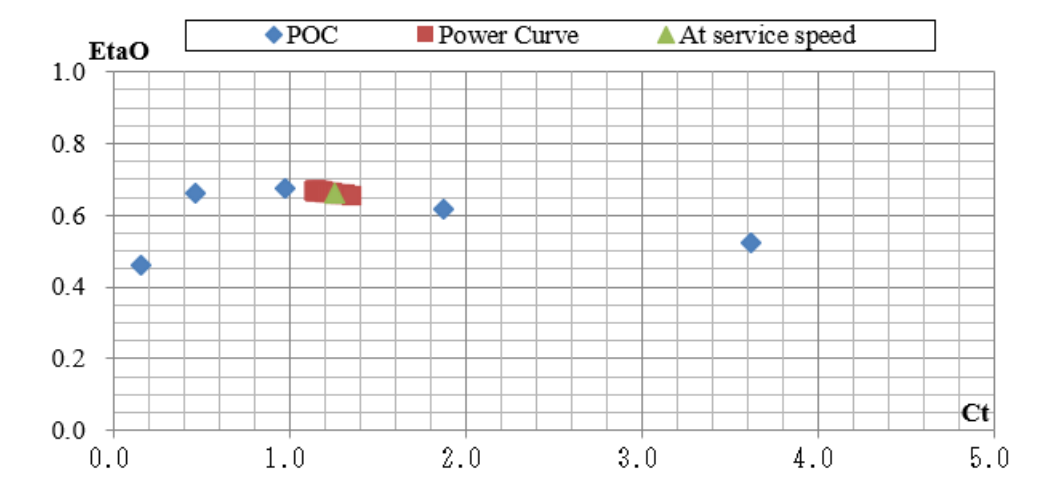
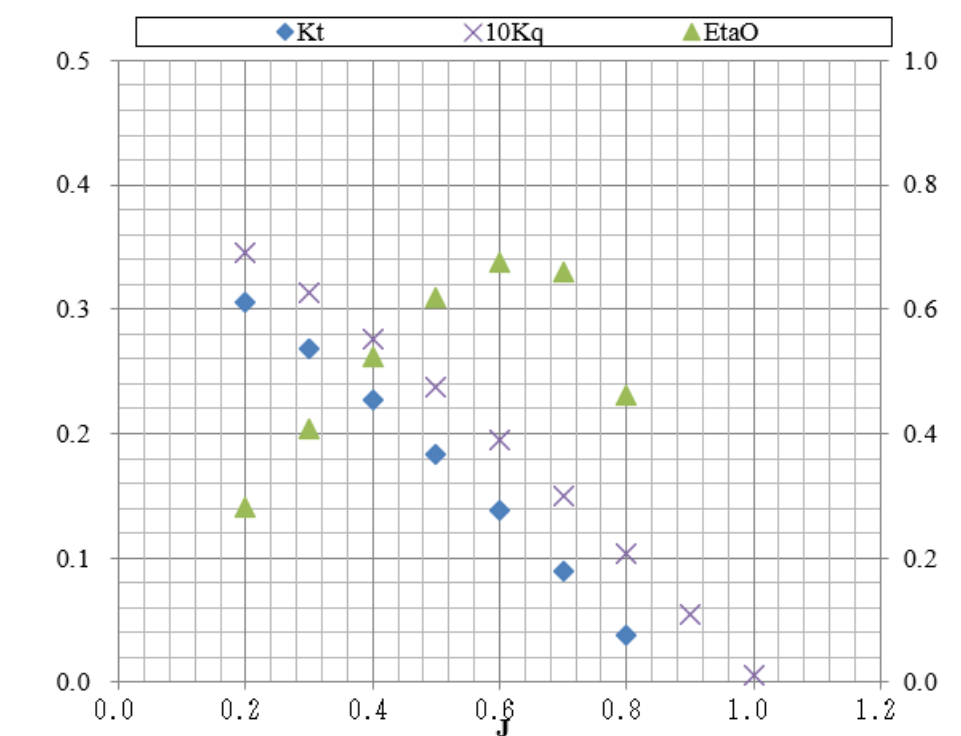
dimension	Kt c	Kq c
3	0.028	0.006
2	-0.182	-0.022
1	-0.287	-0.023
0	0.369	0.040

J	Kt	Kq	EtaO	10Kq	Ct
0.2	0.305	0.035	0.281	0.346	19.415
0.3	0.268	0.031	0.409	0.313	7.574
0.4	0.227	0.028	0.524	0.276	3.617
0.5	0.184	0.024	0.618	0.237	1.873
0.6	0.138	0.019	0.676	0.194	0.973
0.7	0.089	0.015	0.660	0.150	0.461
0.8	0.037	0.010	0.461	0.103	0.149
0.9	-0.016	0.006	-0.422	0.055	-0.051
1.0	-0.072	0.001	-20.123	0.006	-0.184
1.1	-0.130	-0.004	5.086	-0.045	-0.273

At service speed

Vs	14.5	[knot]
EHP	4967	[kW]
1-t	0.834	
1-wm	0.702	
1-ws	0.750	
etao	0.660	
Dp	7.100	[m]

R	665.9	[kN]
T	798.9	[kN]
Va	5.60	[m/s]
Ct	1.257	



3) 一ノ瀬康雄, 久米健一 : 船型要目最適化プログラム HOPE Light, 海上技術安全研究所報告, 第15巻 第4号, (2016), pp.407-419.

モデル係数推定手法 (HOPE Lightによるテスト船パラメータ推定)



入力情報

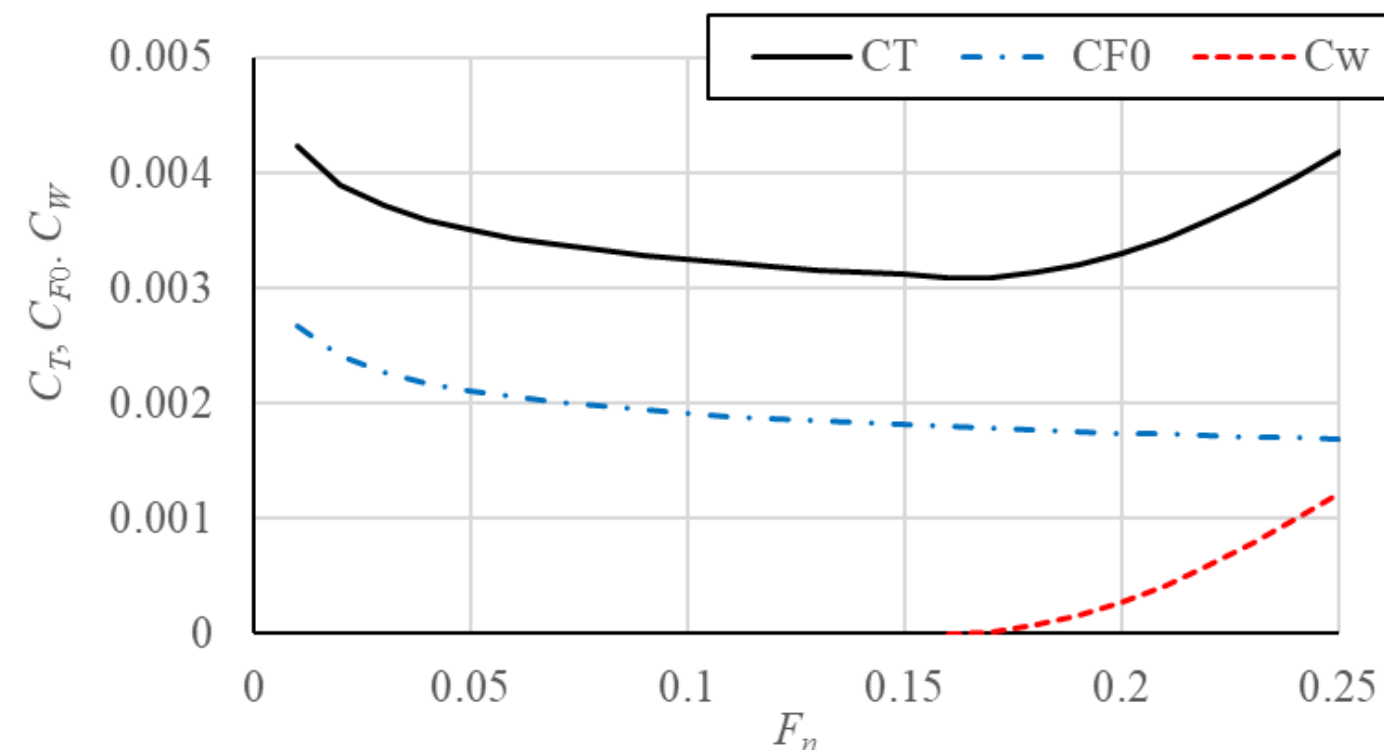
Lpp [m]	B [m]	d [m]	D* [m]	Cb	計画速度 [kt]
78.0	13.0	6.5	8.0	0.7	12.0

*造船設計便覧を参考に、型深さDはd+1.5mとした

主要目系パラメータ

プロペラ回転数@計画速度 [RPM]	118.3
Hull	
浸水表面積, S_W [m ²]	1692.7
前後方向重心位置, x_G [m]	0.276
Propeller	
プロペラ直径, D [m]	3.71
プロペラピッチ比, P/D@0.7R	0.766
展開面積比	0.5
翼数	5
ボス比	0.18
Rudder	
舵側面積, A_R [m ²]	9.90
舵高さ, H_R [m]	5.53

平水中船体 抵抗特性



自航要素

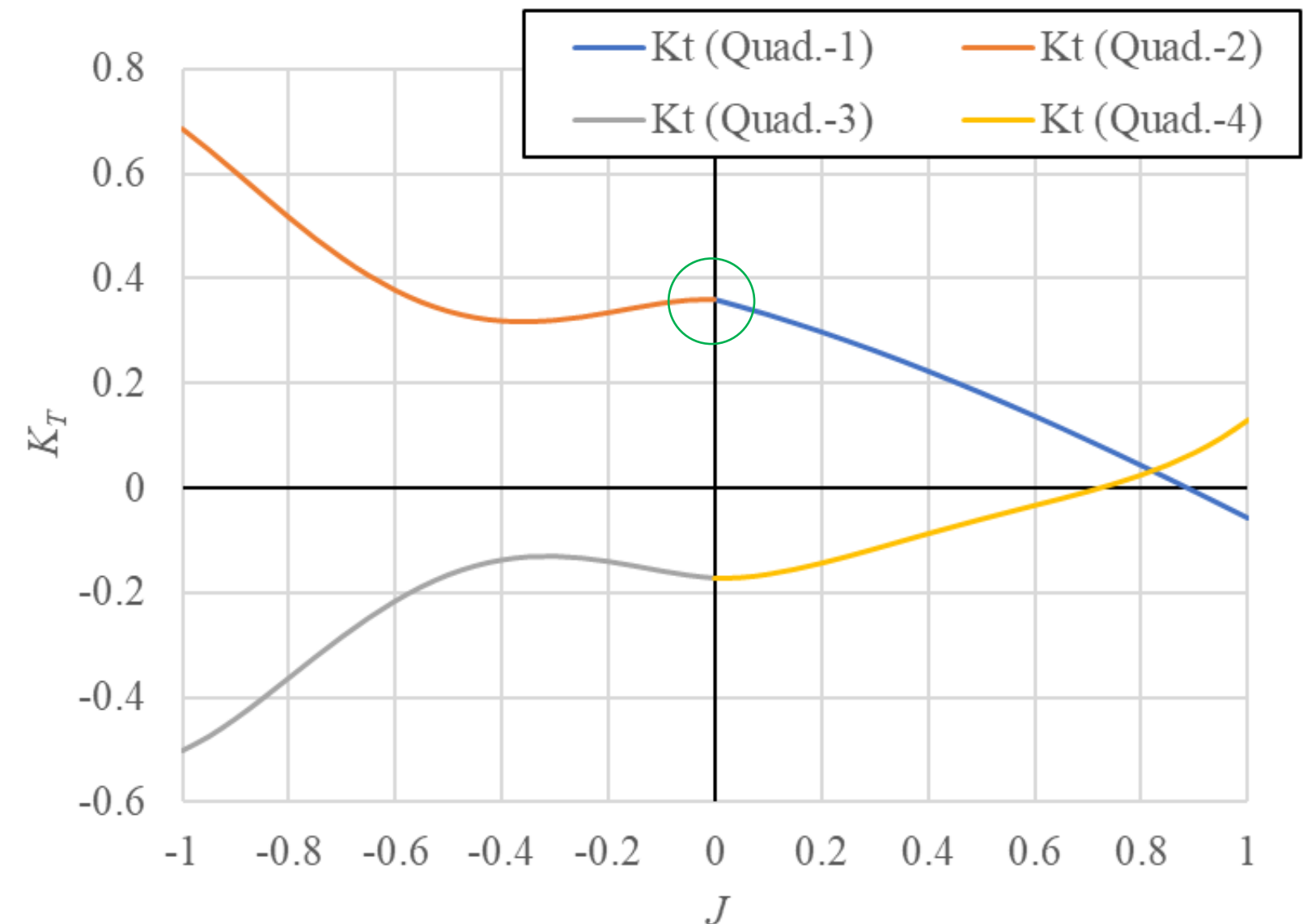
推力減少係数, $1 - t_P$	有効伴流係数, $1 - w_P$
0.814	0.619

モデル係数推定手法（プロペラ単独特性）



- 離着機操船ではプロペラ逆転や前進と後進を伴う ⇒ プロペラ単独特性は第1～第4象限の整備が必要
- 翼形状MAUの場合、簡単な要目からプロペラ単独特性を推定できる回帰式が公表されている⁶⁾←ただし、第1象限が対象
- HOPE Lightもプロペラ単独特性を出力できる←ただし、第1象限が対象
- 翼形状B-seriesの場合、簡単な要目から第1～第4象限全ての単独特性を推定できる回帰式が公表されている⁷⁾。海技研ではこの回帰式をプログラム化して利用（TROOST）
- 推定した第1象限に対して、B-series回帰式の第2象限 $J=0$ の値を一致させる工夫で滑らかな単独特性を得ることは可能
- 課題：任意の翼形状で第1～4象限特性の簡易推定は困難

推定されたテスト船の推力単独特性



6) 例えば、公益社団法人日本船舶海洋工学会：船舶海洋工学シリーズ～⑪船舶性能設計，(2013).

7) Lammeren Van., et al.: The Wageningen B-Screw Series, Transactions of SNAME, Vol.77, (1969), pp.269-317.

回帰式から推定したテスト船の流体力微係数

$$\left\{ \begin{array}{l} X_H = \frac{1}{2} \rho L d \cdot (m'_y + X'_{vr} + \Delta X'_{vr}) L v r \\ Y_H = \frac{1}{2} \rho L d \cdot [Y'_v v |u| + (Y'_r - m'_x) L r u - C_D [v|u| \\ - C_{rY}^2 L^2 \left\{ - \left(\frac{1}{12} r - \frac{\tau'}{32} r |r| \right) \frac{v}{U} + \frac{\tau'}{32} r |r| \right\}] \\ Y_H = \frac{1}{2} \rho L^2 d \cdot \left[\{ N'_v u v + N'_r L r |u| \} - C_D \left[\frac{\tau'}{12} v |v| \right. \right. \\ \left. \left. - C_{rN} \left\{ \left(\frac{U}{6} - \frac{C_{rN} L}{32} |r| \right) L r \left(\frac{v}{U} \right)^2 \frac{v^2}{U} + L^2 \frac{C_{rN}}{32} r |r| \right\} \right] \right] \\ K_H = -z_{YH} Y_H \end{array} \right.$$

$m'_y + X'_{vr}$	0.124
Y'_v	-0.425
$Y'_r - m'_x$	0.0583
N'_v	-0.167
N'_r	-0.0622
C_D	1.02
C_{rY}	1.91
C_{rN}	0.823
$\Delta X'_{vr}$	-0.0521
z_{YH}	4.45*

* Y_H 着力点を喫水量半分と見なし、 $KG = \frac{d}{2}$ と計算

- 係数は主要目を入力とした回帰式から推定可能⁴⁾, A)

4) 芳村康男, 高瀬康一, 他: 風力下で漂流する船舶の簡易数学モデルによる運動シミュレーション, 日本船舶海洋工学会論文集, 第31号, (2020), pp.47-57.

A) Yasuo Yoshimura, : UNIFIED MATHEMATICAL MODEL FOR OCEAN AND HARBOUR MANOEUVRING, Proc. of MARSIM 2009, (2009), pp.M116-M124.

- 舵モデルのパラメータ簡易推定手法（プロペラ正転時）は対象船やサイズによって分かれる
 - ✓ 大型船～中型船：青木ら⁹⁾の推定回帰式
 - ✓ 中型船～小型船・漁船：芳村ら¹⁰⁾の推定回帰式及びデータベース
- テスト船が内航コンテナ⇒芳村らの手法を採択
- 課題：特殊舵や2舵システムは簡易推定に関する研究例が不足している（個別例¹³⁾から引用することは可能）

パラメータ推定結果

t_R	a_H	x_H / L	C_{N0}	$ \alpha_{Rstl} / [\text{deg}]$	w_R	w_P	γ_R	l_R / L	k_x
0.39	0.42	-0.40	2.72*	37.5 ¹³⁾	0.428**	0.381	0.452	-0.931	0.6***

*藤井の式より

**海技研が有する実験データベースより

***標準値

9) 青木伊知郎, 他：実船の操縦性能推定法に関する研究, 日本船舶海洋工学会論文集, 第3号, (2006), pp.157-165.

10) 芳村康男, 増本友美子：中速商船・漁船船型の操縦流体力データベースと操縦運動の一推定法, 日本船舶海洋工学会論文集, 第14号, (2011), pp.63-73.

13) 例えば, Suzuki Ryosuke, Tsukada Yoshiaki, Tsujimoto Masaru, et al.: A study on high-lift rudder performance in adverse weather based on model tests under high propeller load, Ocean Engineering, Vol.136, (2017), pp.152-167.

モデル係数推定手法（プロペラ逆転時モデル）



- 課題：プロペラ逆転時の操縦運動計算手法に関する研究例は通常操船（旋回試験、Zigzag試験、等）より少ない
- 本研究では海技研の過去の研究⁸⁾や保有するデータベースに基づいてパラメータ決定

プロペラモデル関連

w_P		Y_P^*	x_{PR}/L
$u \geq 0$	$u < 0$		
0.381	0.0	-0.0496	-0.389

～備考

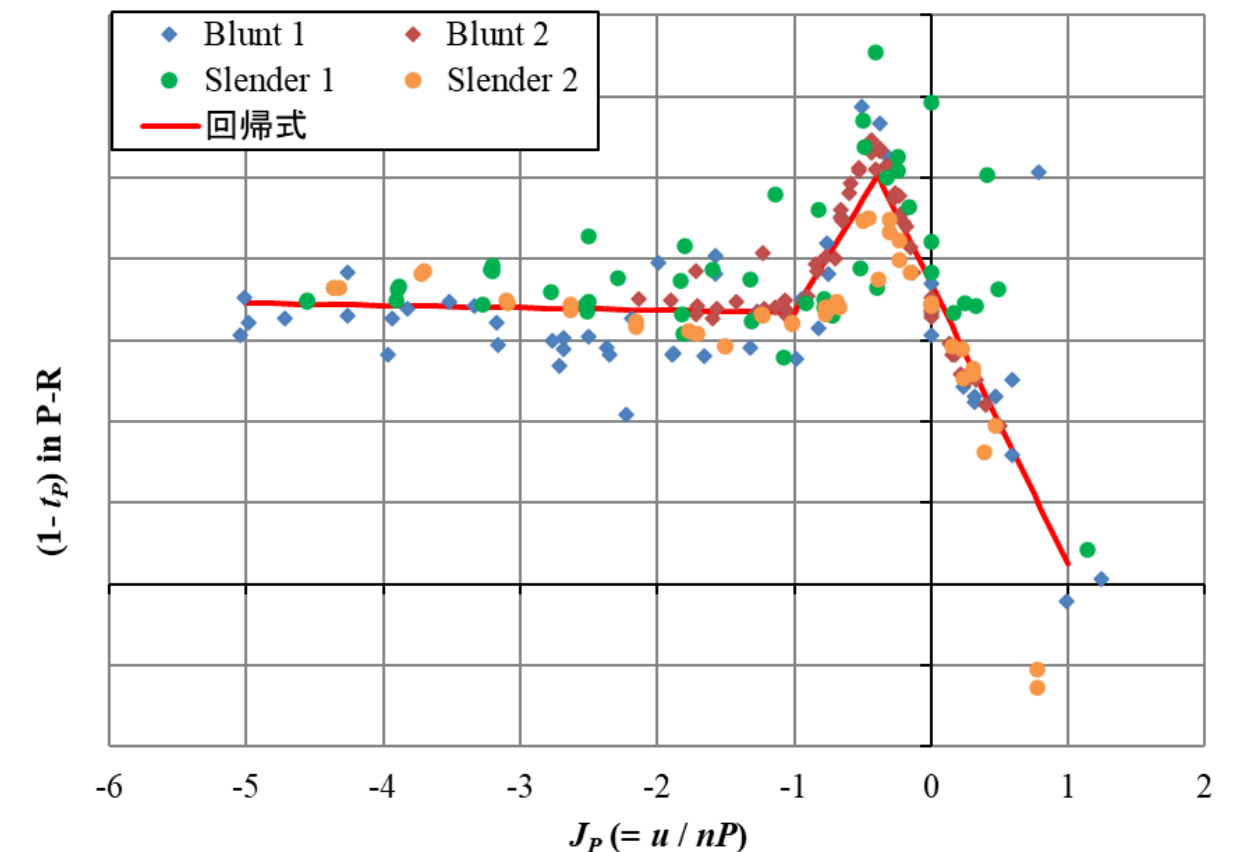
青字は保有データベースより

赤字は後進中前提の見なし値

舵モデル関連

t_R	a_H	$a_H x_H / L$	k_x	w_R		$(\gamma_R, l_R / L)$	
				$u \geq 0$	$u < 0$	$u \geq 0$	$u < 0$
0.153	-0.699	-0.689	0.144 ⁸⁾	0.428	0.0855	(0.452, -0.931)	(1.0, -0.5)

プロペラ逆転時推力減少係数の回帰式（赤線）



8) 北川泰士, 塚田吉昭, 宮崎英樹：プロペラ逆転時のプロペラ・舵の数学モデルに関する検討, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第20号, (2015), pp.117-120.

モデル係数推定手法（風圧力モデル）

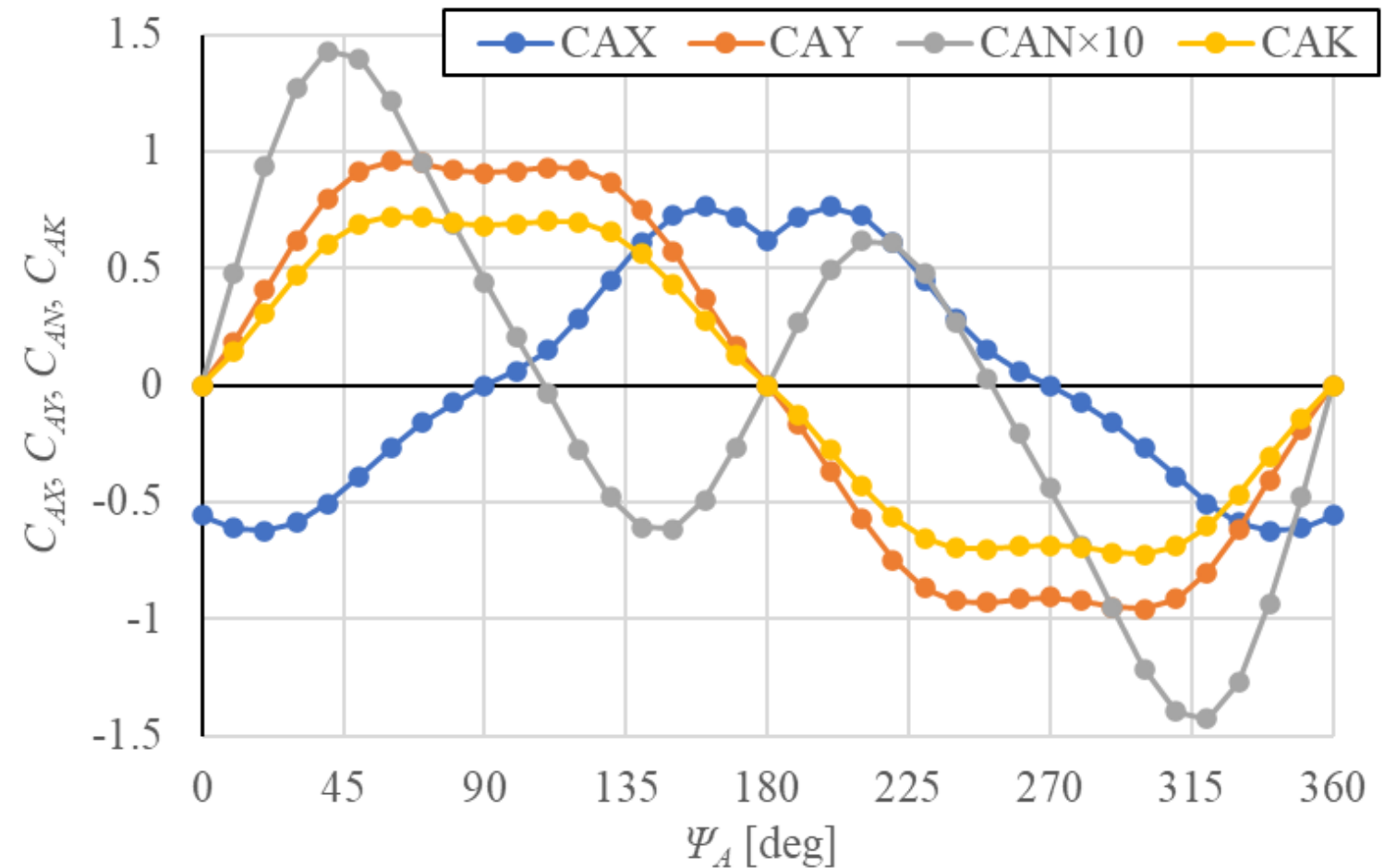


- 藤原の成分分離型推定手法をベースにした北村らの簡易推定手法¹⁵⁾を適用。船種と全長・船幅から船型パラメータと風圧力係数を推定可能。（プログラム化済⇒名称：LBWind）
- 課題：内航船の一部等、小型サイズの船舶は基となるデータベースの対象から外れることもある

LBWindによる推定結果

L_{oa} [m]*	A_F [m ²]	A_L [m ²]	H_b [m]
81.1	163.3	627.6	12.8

*HOPE Lightより

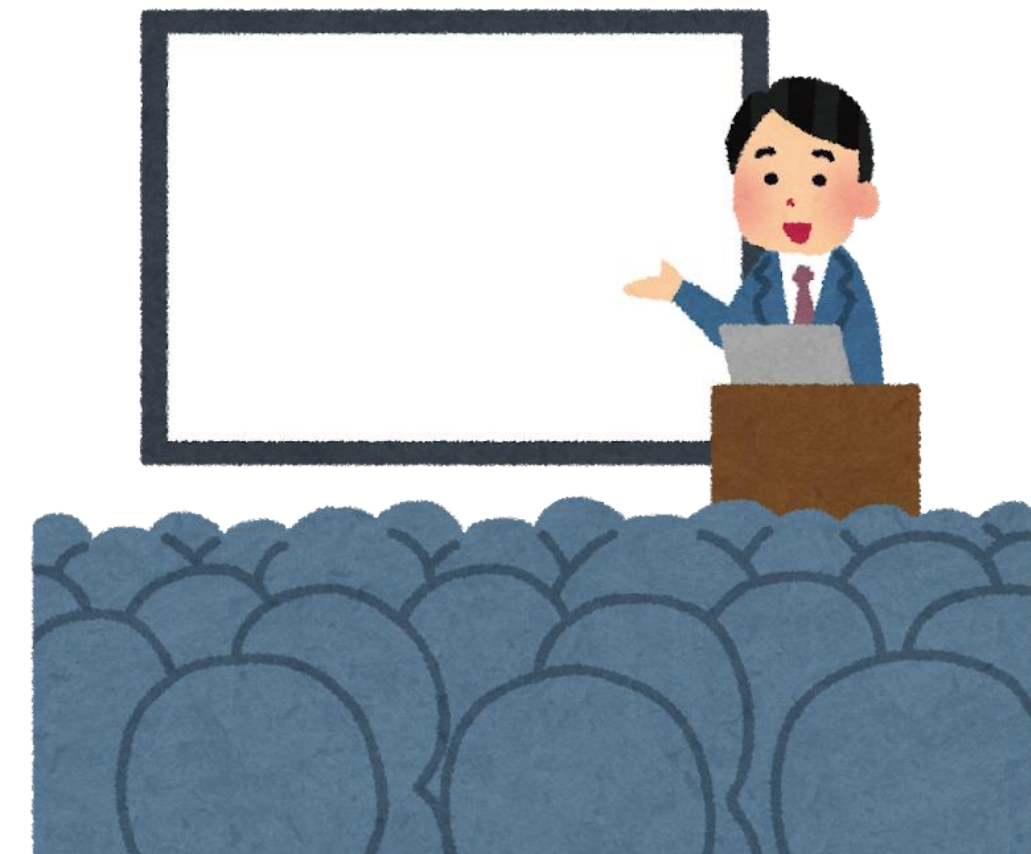


ψ_A [deg]~ 0: 向い風, 90: 左横風, 180: 追い風

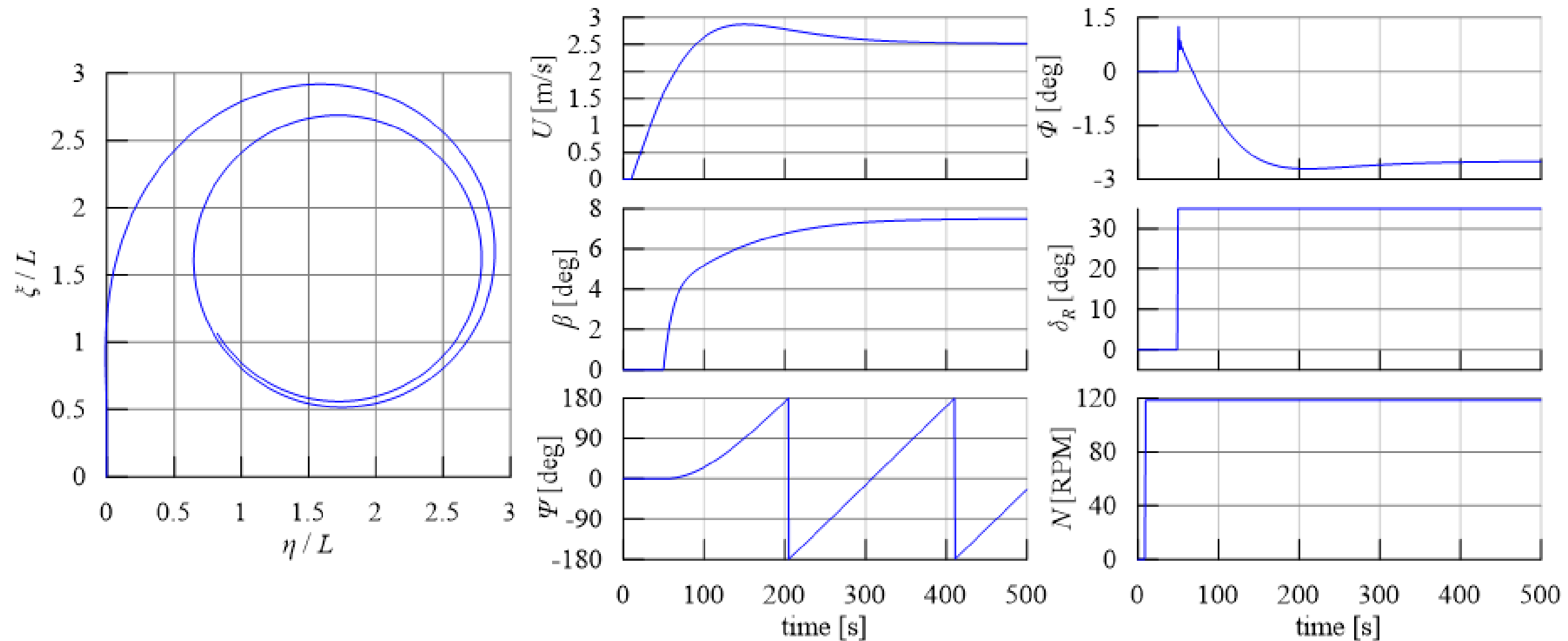
15) Kitamura Fumitoshi, Ueno Michio, et al.: Estimation of above water structural parameters and wind loads on ships, Ships and offshore structures, Vol.12 No.8, (2017), pp.1-9.

構築モデルによるデモンストレーション

- 選定した操縦運動モデル及びモデル係数簡推定手法の検証の一環として、テスト船の操縦運動計算を実行して挙動の確認
- 設定シナリオ
 - a. 平水中の旋回試験（風波影響は考慮せず）
 - b. 停止状態から10秒後にプロペラ回転数を118RPM、50秒後に舵角+35度に転舵⇒低速状態の挙動を確認する趣旨
 - c. 計算時間は500秒←旋回運動が定常状態になりしばらく経つまでを意図



デモンストレーション（計算結果＋分析）



- 定常状態になるまでに時間を要している⇒停止状態から＋慣性系が大きい、ことから過渡状態の時間は長くなる
- Roll角(ϕ)の挙動：右転舵後に舵によるRollモーメントから右傾斜（内向傾斜）が発生。その後は船体に作用する流体力によるRollモーメントが上回り、左傾斜（外向傾斜）となる。⇒旋回運動中のRoll挙動が定性的に再現されている

今後の課題

広範な操縦運動を再現するためのモデル選定 + モデル簡易構築手法の整備

クリア：モデル選定は終了。モデル構築法も前進 + プロペラ正転時は凡そ整備終了

課題：プロペラ逆転時・サイドスラスト等、モデル簡易構築法の更なる検討が必要

外乱下（風波中）シナリオ

操縦運動 + 船体動揺の精度検証

課題：未検証。実用的な精度に関する議論が必要。

計算のリアルタイム性確保

課題：未検証。簡易計算手法の検討

平水中シナリオ

～クリア

一般的な操縦運動の定性的な精度検証

～課題

離着岸操船に対する精度検証

- 自律運航船の自動操船システムの安全性評価に資することを念頭に置いて、総合シミュレーションシステムにおいて適用する船舶の操縦運動シミュレーションモデルの検討を行った
 - ✓ 4自由度操縦運動(Surge, Sway, Roll, Yaw)の運動方程式 + 2自由度(Heave, Pitch)波浪中動揺計算
 - ✓ 離着岸操船を再現できる各種モデルの選定
 - ✓ 選定モデルの係数の簡易推定のための手法調査（実験データベース整備を含む）
- 選定したモデル及びモデル係数の簡易推定手法により、内航コンテナ船をテスト船として、旋回試験シナリオのデモンストレーションを行い、定性的な挙動が再現できていることを示した
- 目的達成をゴールとして、実施した範囲と今後の課題を整理した



謝辞

本研究の一部は、公益財団法人日本財団の助成を受けて、一般財団法人日本船舶技術研究協会が行う「MEGURI2040に係る安全性評価」事業の委託研究として行われました。

一般財団法人日本海事協会よりサポートと有益な助言をいただきました。

資料中の図の一部は、“いらすとや”様、“イラストエイト”様のフリー素材を使用しました

