



大斜航角を伴う船の操縦運動 モデルとシミュレーション

Maneuvering Model and Simulations of Ship with Large Drift Angle

- 奥田 隆輔 (広島大学 博士課程)
- 安川 宏紀 (広島大学)
- 山下 智大 (JMU, 研究当時: 広島大学)
- 松田 秋彦 (水産技術研究所)



- ▶ 研究背景と研究目的
- ▶ 対象船
- ▶ 大斜航角を伴う船の操縦運動モデル
 - 低速運動時における船体・プロペラ・舵・バウスラスタによる流体力
 - 大斜航時の流体力パラメータの取り扱い
- ▶ 操縦運動シミュレーション計算
 - 停止からの操縦運動
 - 後進を含む操縦運動
- ▶ まとめ



※本発表は、Okuda R. et al. (2023): Maneuvering simulations at large drift angles of a ship with a flapped rudder, Applied Ocean Research 135. の一部を抜粋しています。



研究背景

- ▶ 船舶の無人化に向けた研究開発課題の一つとして、
「**自動離着棧技術**」が挙げられる。
→自動化のためには、その運動予測や制御を高精度で実施できる計算手法が必要。
- ▶ 船の運動予測には、「**MMGモデル**」が広く用いられる。
→ただし、十分な前進速度を有し、斜航角や回頭角速度があまり大きくないことを前提としている。
港湾内操船のような低速運動には一般的に使用できない...

通常運動と低速運動の両方を網羅する計算法を提案しよう！



研究背景

▶ 先行研究（低速運動時の主船体流体力モデル）

1. **微係数表示法**：小瀬等 (1984), 高品 (1986) など

→MMGモデルで使用されている微係数表示に対して、より高次な項を追加した手法。

2. **cross-flow dragモデル**：Oltmann・Sharma (1984), 芳村 (1988, 2009) など

→船体の2次元断面の横移動時の流体力特性を元に船体流体力を計算する手法。

➡ **これらはいくまで近似的手法であることに留意する必要あり。**

3. **テーブルモデル**：Sutulo・Soares (2015), Delefortrie等 (2017), 安川等 (2021) など

→拘束模型試験により求めた主船体流体力を、数式表示を用いずに直接シミュレーション計算に使用する手法。

➡ **水槽試験結果を直接用いることで、幅広い操縦運動を予測可能！**



研究背景

5

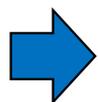
▶ 先行研究（低速運動時の舵力モデル）

1. 湯室 (1988) : 関西造船協会誌 209, 91-101.

→大斜航時を含めた伴流や整流係数に関する流体力を調査。
ただし、**前進かつプロペラ正転時**の状態に限られ、逆転時や後進時は不明。

2. 安川等 (2021) : J. Marine Science and Technology 26, 1078-1095.

→斜航角が $-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$ の範囲で、プロペラや舵に関する流体力を実験により把握。
ただし、**操縦運動シミュレーションモデルに関する言及**はほとんどない。



低速運動時の舵力モデルに関する検討例は少ない。

～本研究の目的～

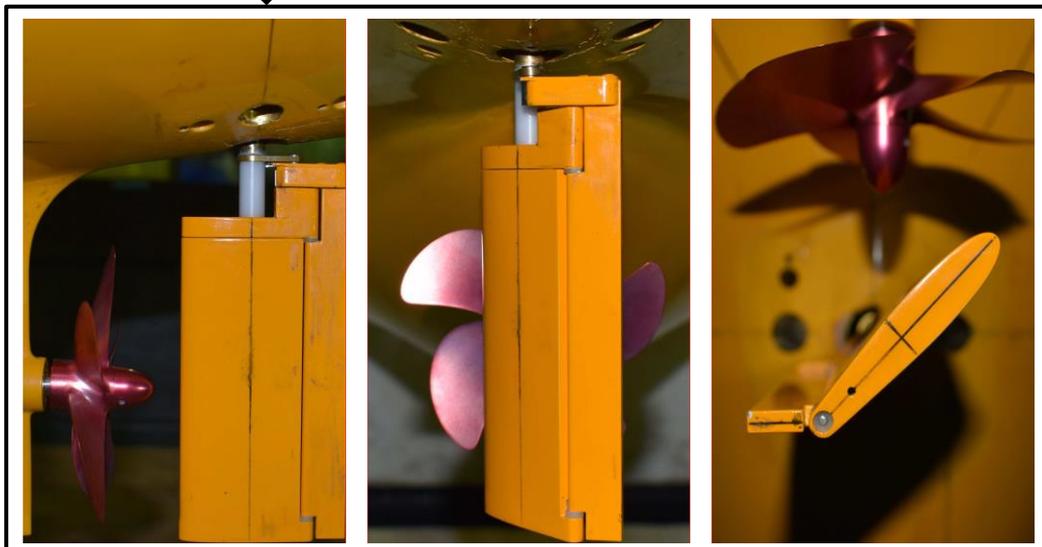
先行研究の水槽試験結果を参考に**低速運動時の舵力モデルを策定する**。
さらに、**テーブルモデルを用いた低速運動時の運動予測**を行い、自由航走
模型試験と比較することで本計算手法の妥当性を検証する。



対象船

6

- ▶ 「すざく」と呼ばれる内航型コンテナ船 (縮尺比1/27.667)。
- ▶ S.S.9.43 の位置に55.0 mmのバウスラストが1基付いている。
- ▶ 対象船には写真のようなフラップ舵が付く。



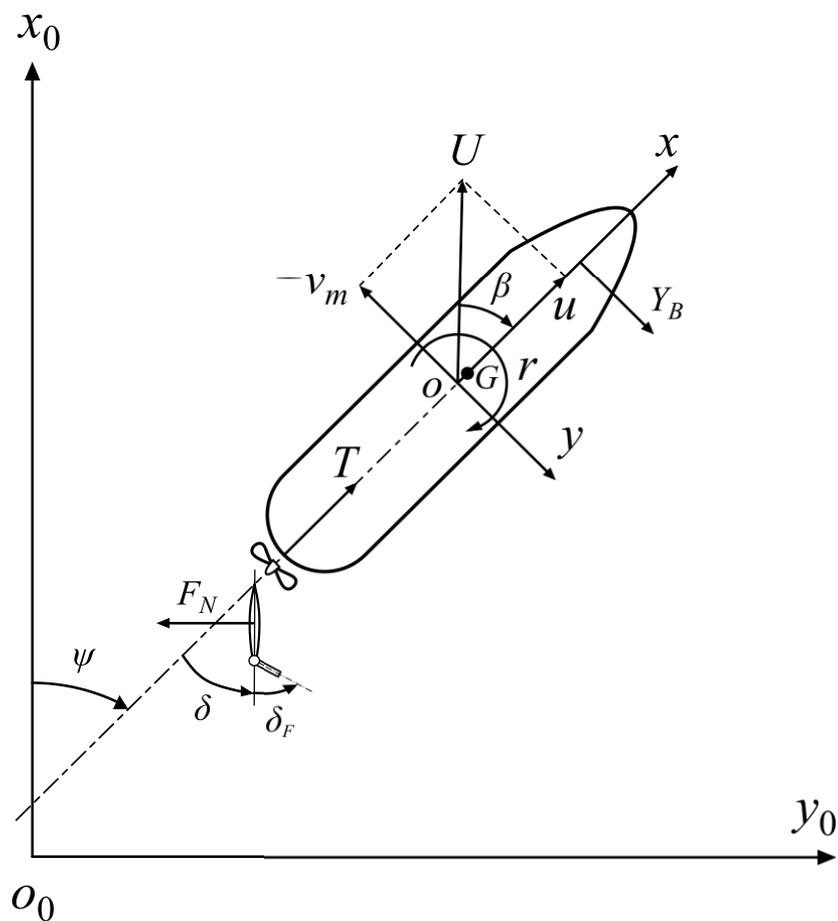
	Model	Full-scale
L [m]	3.000	83.00
B [m]	0.488	13.5
d [m]	0.1376	3.8
∇ [m ³]	0.1486	3146
\overline{GM} [m]	0.0329	0.91
C_b	0.7369	
Dp [m]	0.101	2.80
Z	5	



大斜航角を伴う船の操縦運動モデル

7

▶ 本研究で使用する座標系



u, v_m	x, y 方向速度 [m/s]
U	合速度 ($\sqrt{u^2 + v_m^2}$) [m/s]
β	斜航角($\tan^{-1}(-v_m/u)$) [deg]
ψ	方位角[deg]
r	回頭角速度($d\psi/dt$)[deg/s]
δ	舵角[deg]
δ_F	フラップ角[deg]
F_N	舵直圧力[N]
T	プロペラ推力[N]
Y_B	バウスラスト推力 [N]

Y_B は、船体が時計回りに回頭するような推力を発生させる方向を正とする。



大斜航角を伴う船の操縦運動モデル

8

▶ 運動方程式と流体力の表示

低速運動時には発生するヒールは小さいと考えられる為, surge, sway, yawの運動方程式を考える (安川・芳村, 2015)。

$$\left. \begin{aligned} (m + m_x)\dot{u} - (m + m_y)v_m r - m x_G r^2 &= X \\ (m + m_y)\dot{v}_m + (m + m_x)ur + x_G m \dot{r} &= Y \\ (I_{zz} + J_{zz} + m x_G^2)\dot{r} + m x_G (\dot{v}_m + ur) &= N \end{aligned} \right\}$$

m : 船の質量
 m_x, m_y : x, y 方向の付加質量
 I_{zz} : yawの慣性モーメント
 J_{zz} : yawの付加慣性モーメント

また, 右辺の X, Y, N は次の形で表す。

$$\left. \begin{aligned} X &= X_H + X_P + X_R + X_B \\ Y &= Y_H + Y_P + Y_R + Y_B \\ N &= N_H + N_P + N_R + N_B \end{aligned} \right\}$$

H : Hull (船体)
 P : Propeller (プロペラ)
 R : Rudder (舵)
 B : Bow thruster (バウスラスト)



大斜航角を伴う船の操縦運動モデル

9

▶ 船体に働く流体力

主船体流体力は, Sutulo・Soares (2015)に倣い, 次の形で表す。

$$\left. \begin{aligned} X_H &= (\rho/2)Ld[U^2 + (Lr)^2]C_{HX}(\beta, \alpha_r) \\ &\quad - (\rho/2)LdU^2R'_0 \cos \beta \\ Y_H &= (\rho/2)Ld[U^2 + (Lr)^2]C_{HY}(\beta, \alpha_r) \\ N_H &= (\rho/2)L^2d[U^2 + (Lr)^2]C_{HN}(\beta, \alpha_r) \end{aligned} \right\}$$

R'_0 : 直進時の抵抗係数
(前進時と後進時で異なる)

C_{HX}, C_{HY}, C_{HN} : X, Y, N の流体力係数

C_{HX}, C_{HY}, C_{HN} は, 斜航角 β と次式で定義される α_r の関数で表す。

$$\alpha_r = \tan^{-1}(rL/U)$$

- これは \tan^{-1} 関数を用いているので, $U = 0$ の時でも発散せず計算できる。
- ただし, $r = U = 0$ の時は計算が破綻するため, $[U^2 + (Lr)^2]$ の値に閾値を設けそれよりも小さくなったら $\alpha_r = 0$ として取り扱う。



大斜航角を伴う船の操縦運動モデル

10

▶ プロペラによる流体力

プロペラによる流体力は、次の形で表す。

$$\left. \begin{aligned} X_P &= (\rho/2)S_P V_r^2 [(1 - t_P)K_T(\theta_P)C_T(\theta_P)] \\ Y_P &= (\rho/2)S_P V_r^2 C_{PY}(\theta_P) \\ N_P &= (\rho/2)S_P L V_P^2 C_{PN}(\theta_P) \end{aligned} \right\}$$

K_T, C_T, C_{PY}, C_{PN} は、流体力学的ピッチ角 θ_P の関数として表される。

$$\left. \begin{aligned} \theta_P &= \tan^{-1} \left(\frac{u_P}{0.7\pi n_P D_P} \right) \\ V_r &= \sqrt{u_P^2 + (0.7\pi n_P D_P)^2} \end{aligned} \right\}$$

t_P : 推力減少率

K_T : プロペラ推力単独特性

S_P : プロペラディスク面積
($S_P = \pi D_P^2/4$)

V_r : 見かけのプロペラ流入速度

C_T : プロペラ逆転時の推力変化
(第一象限では $C_T = 1$)

C_{PY}, C_{PN} : プロペラ逆転時の付加横力
と付加慣性モーメント

θ_P の関数とすることで、 $n_P = 0$ の時に発散するのを防ぐことができる！



大斜航角を伴う船の操縦運動モデル

11

▶ 操舵による流体力

操舵による流体力は、次の形で表す。

$$\left. \begin{aligned} X_R &= -(1 - t_R)F_N \sin \delta \\ Y_R &= -(1 + \alpha_H)F_N \cos \delta \\ N_R &= -(x_R + \alpha_H x_H)F_N \cos \delta \end{aligned} \right\}$$

F_N : 舵直圧力
 x_R : 舵直圧力の作用点
 t_R, α_H, x_H : 舵干渉流体力微係数

ここで、フラップ舵の舵直圧力は次式で表す(芳村等, 1997)。

$$F_N = (\rho/2)A_R U_R^2 [f_\alpha(\delta_F) \sin \alpha_R + C_{L0}(\delta_F)]$$

$$U_R = \sqrt{u_R^2 + v_R^2}, \quad \alpha_R = \delta - \frac{v_R}{u_R}$$

u_R は舵に流入する速度成分, v_R は横方向速度成分である。

- 本研究では, u_R, v_R についてはMMGモデルで一般的に用いられている方法とは異なる取り扱いをする。
- プロペラ逆転時には, プロペラ後流が舵に当たらず, 直圧力は小さいと考えられる為, $F_N = 0$ と仮定して取り扱う。



大斜航角を伴う船の操縦運動モデル

12

▶ 舵への長さ方向流入速度： u_R

u_R は、安川等のモデル(2021)を用いる。 $u \neq 0$ の時は次のように表す。

$$u_R^* = \varepsilon u_P \left[\eta \kappa \left\{ \operatorname{sgn}(u) \sqrt{1 + \frac{8K_T}{J_P}} - 1 \right\} + 1 \right]$$

ε : 舵位置とプロペラ位置での伴流係数の比
 κ : 実験定数
 η : プロペラ直径と舵高さの比

$n_P = 0$ の時, $J_P = \infty$ となることから, $u_R^* = \varepsilon u_P$ となる。

$u = 0$ の時は, 流入速度は次式で表す。

$$\tilde{u}_R = 0.7 C_{UR} \pi n_P D_P$$

C_{UR} は停止時でプロペラ荷重度を変化させた際における u_R の解析結果の無次元値。安川等(2021)と同じ $C_{UR} = 0.14$ を採用する。これらを纏めると,

$$u_R = \begin{cases} \tilde{u}_R & (u = 0) \\ u_R^* & (u \neq 0 \text{ and } (\tilde{u}_R - u_R^*) \operatorname{sgn}(u) < 0) \\ \tilde{u}_R & (u \neq 0 \text{ and } (\tilde{u}_R - u_R^*) \operatorname{sgn}(u) > 0) \end{cases}$$



大斜航角を伴う船の操縦運動モデル

13

▶ 舵への横方向流入速度： v_R

一般的なMMGモデルでは、 v_R は整流係数 γ_R を導入した次式で表す。

$$v_R = \gamma_R(U\beta - l_R r)$$

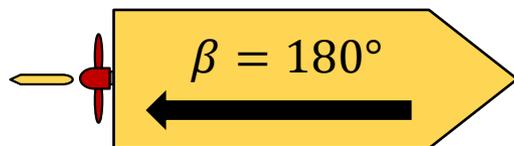
$\beta = 20^\circ$ 程度の通常の操縦運動では、この式で問題なく計算できる。

しかしながら、**大斜航時には β に比例して v_R も増大してしまう。**

→ β の代わりに" $\sin\beta$ "を用いた次式を用いる。

$$v_R = \gamma_R(U \sin \beta - l_R r)$$

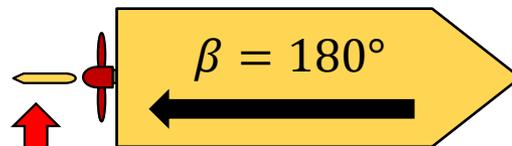
MMGモデル



$$v_R = \gamma_R(U\beta - l_R r)$$

大きな横流れ速度が生じる

提案モデル



$$v_R = \text{理論上ゼロ}$$



大斜航角を伴う船の操縦運動モデル

14

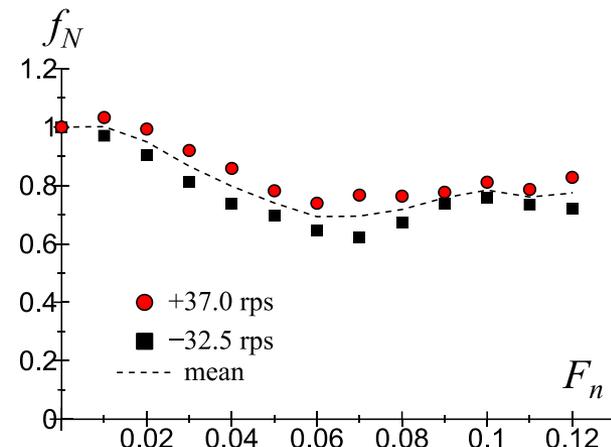
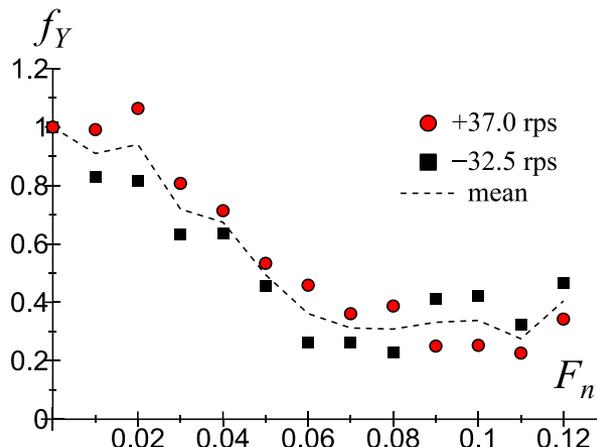
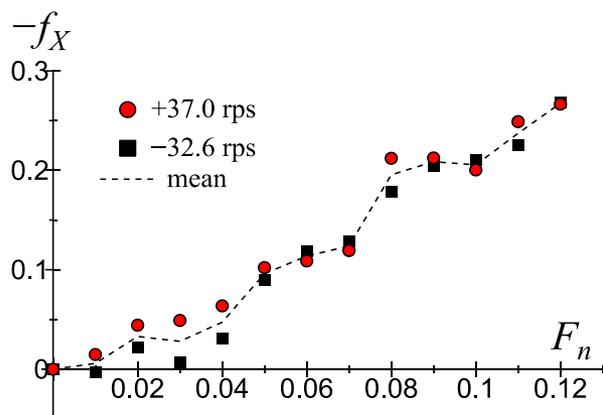
▶ バウスラスタによる流体力

バウスラスタによる流体力は，次の形で表す (安川等, 2011)。

$$\left. \begin{aligned} X_B &= Y_{B0} f_X(u) \\ Y_B &= Y_{B0} f_Y(u) \\ N_B &= N_{B0} f_N(u) \end{aligned} \right\}$$

Y_{B0}, N_{B0} : 停止時のバウスラスタ横力, 回頭モーメント
 f_X, f_Y, f_N : バウスラスタの流体力に及ぼす前進速度影響

本船におけるバウスラスタの前進速度影響は，次の通り。



- 本船の停止時における最大推力は，実船6.5 ton相当に設定した。
- その時のインペラ回転数は，右舷側推力で37.0 rps，左舷側で32.6 rps。



大斜航角を伴う船の操縦運動モデル

15

▶ 大斜航時の流体カパラメータの取り扱い

安川等の水槽試験結果 (2021) を参考に策定する。

大斜航時の水槽試験結果 (2021)

1. 推力減少率 : t_p

斜航角やプロペラ荷重度が変化しても、 t_p の値はほとんど一定。

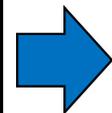
2. 有効伴流率 : w_p

斜航角の絶対値が 60° よりも大きい時、船体の伴流を受けないとされている。

3. 船体・舵干渉係数 : t_R, a_H, x'_H

t_R, x'_H : 斜航角が変化してもそれらの値はほとんど変化しない。

a_H : 概ね $|\beta| < 60^\circ$ までは変化しない。それ以上では a_H は小さくなる。



本研究での取り扱い

1. 推力減少率 : t_p

斜航角によらず、一定値とする。

2. 有効伴流率 : w_p

$|\beta| > 90^\circ$: $w_p = 0$

$|\beta| \leq 90^\circ$: $w_p = w_{p0} \exp(C_0 \beta_P^2)$

3. 船体・舵干渉係数 : t_R, a_H, x'_H

t_R, x'_H : 一定値 (MMGと同じ)。

a_H : $|\beta| \leq 60^\circ$ までは一定。

$|\beta| \geq 90^\circ$ はゼロとする。

$60^\circ < \beta < 90^\circ$ は線形補間。



操縦運動シミュレーション計算

16

- ▶ シミュレーション計算に用いる係数一覧 (詳細は山下等 (2022) を参照)

係数	数値	算出方法	係数	数値	算出方法
m'_x	0.010	境界要素法	$a_H (\beta = 0)$	0.158	拘束模型試験
m'_x	0.168	境界要素法	x'_H	-0.605	拘束模型試験
J'_{zz}	0.010	境界要素法	ε	1.27	拘束模型試験
t_p	0.080	拘束模型試験	κ	0.50	拘束模型試験
w_{P0}	0.422	拘束模型試験	$\gamma_R (\beta_R > 0)$	0.483	拘束模型試験
C_0	-2.0	拘束模型試験	$\gamma_R (\beta_R < 0)$	0.308	拘束模型試験
t_R	-0.058	拘束模型試験	l'_R	-0.888	推定値

- 大斜航角を伴う自由航走模型試験：計算結果との比較に用いる。
- プロペラを用いる運動は、**芳村モデル (SCD, 1988) の計算結果**とも比較。

停止からの操縦運動

- $\delta = \pm 35^\circ$ その場旋回
- バウスラストによるその場旋回

後進を含む操縦運動

- **プロペラ逆転停止運動**

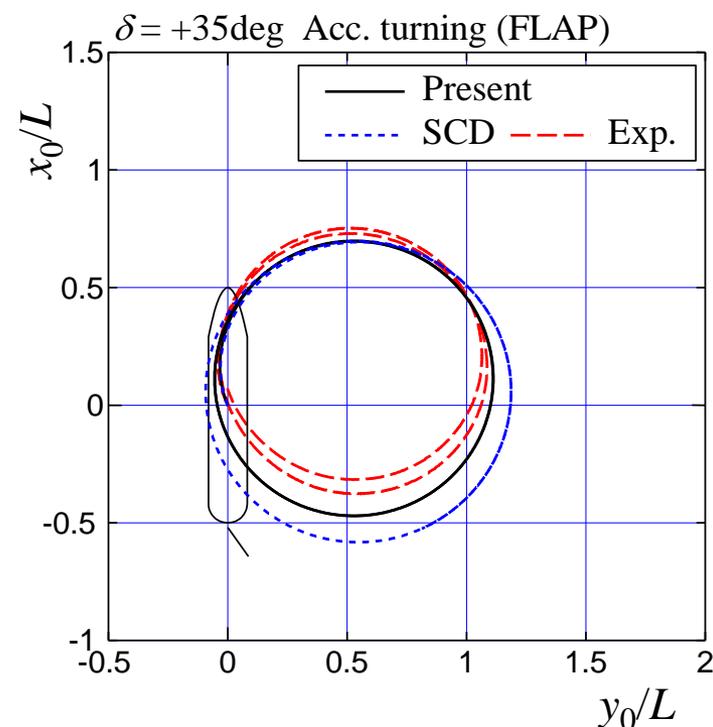
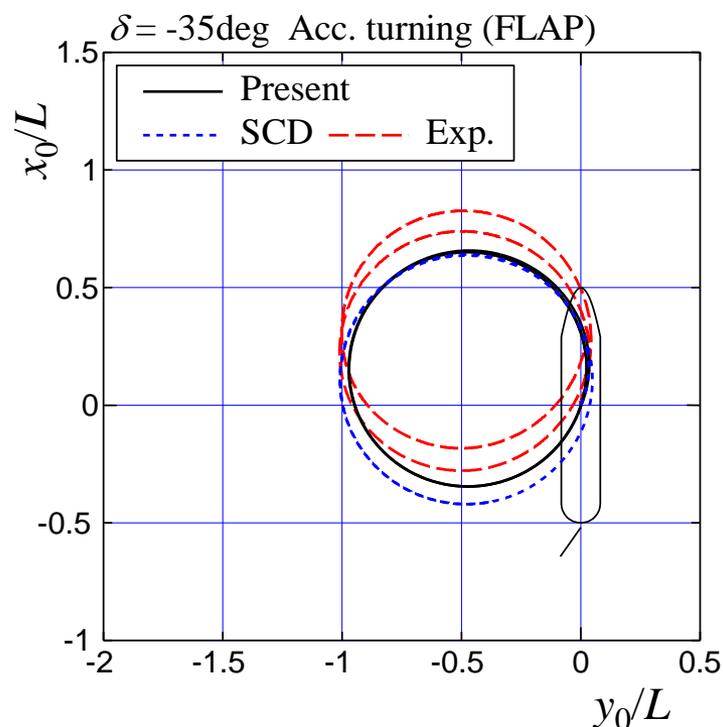


操縦運動シミュレーション計算

17

▶ 停止からの操縦運動： $\delta = \pm 35^\circ$ その場旋回

プロペラ回転数は9.3 rps (直進時に実船6 kn相当のプロペラ推力)。



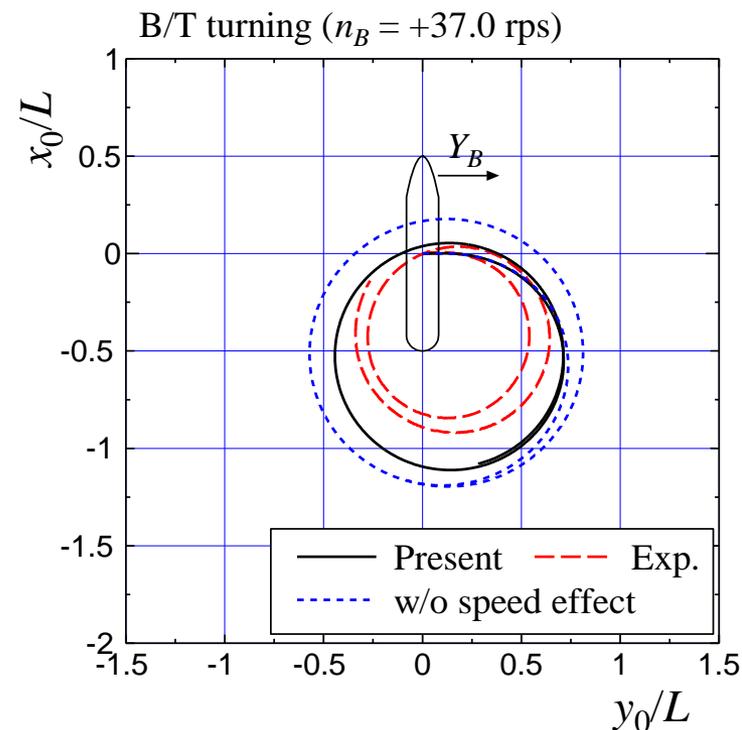
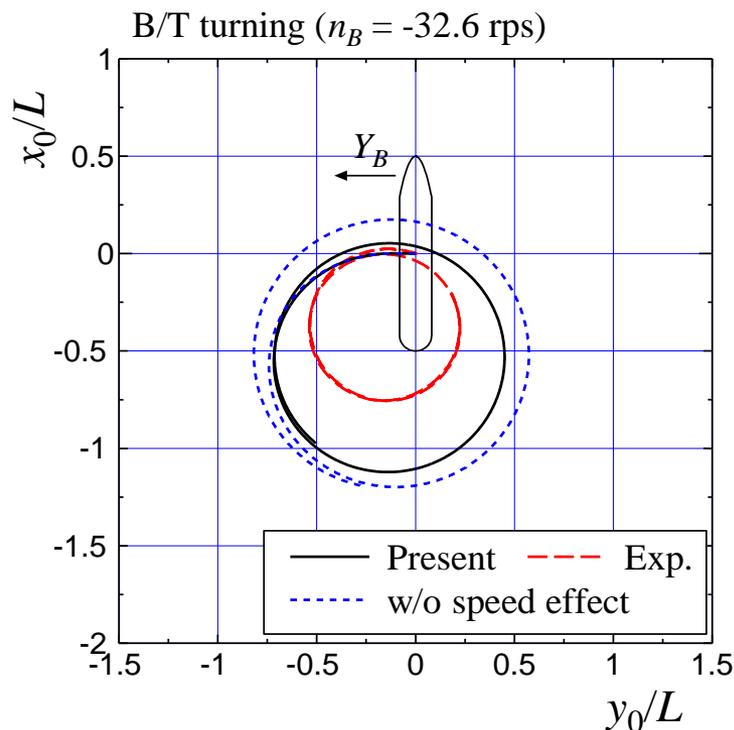
- 右旋回の方が旋回半径が大きくなる傾向を捉えている。
- 本研究で用いたモデルは，SCDよりも計算精度が良かった。



操縦運動シミュレーション計算

18

- ▶ 停止からの操縦運動：バウスラスタによるその場旋回
インペラ回転数は，実船6.5 ton相当の推力を発生できる回転数。
比較のため，前進速度影響を考慮しない場合の結果も記載。



・ バウスラスタによる操縦運動を把握する際，前進速度影響の考慮は必要！

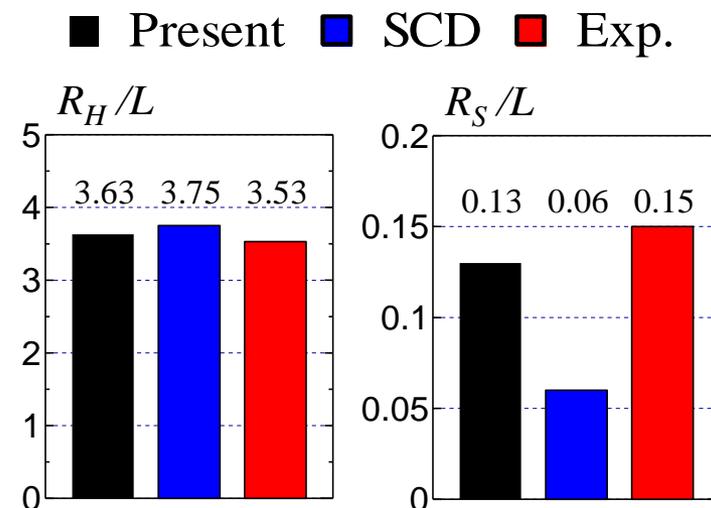
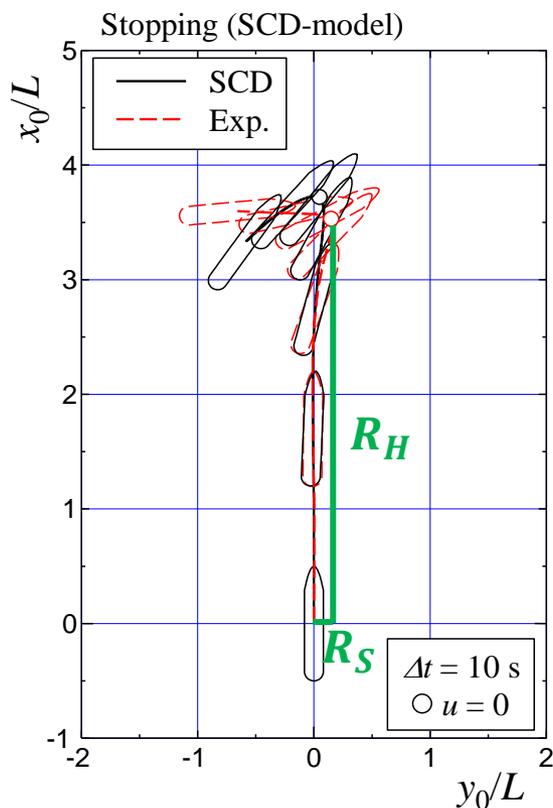
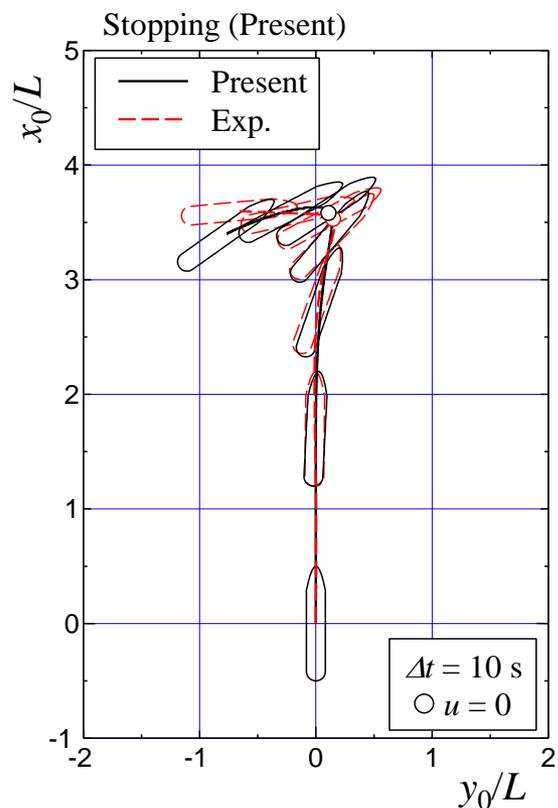


操縦運動シミュレーション計算

▶ 後進を含む操縦運動：プロペラ逆転停止運動

アプローチ船速は実船6 kn相当 (模型船で0.587 m/s)。

プロペラ回転数は9.3 rps → -9.3 rpsまで4.23 rps/sで変化させた。



・本計算は、SCDと同等以上の計算精度を有している！



まとめ

▶ 本研究の総括

1. 主船体流体力モデルとしてテーブルモデルを採用し、低速運動時の舵力モデルとして安川等の研究例 (2021) を参考に **大斜航角を伴う船の操縦運動シミュレーション計算法を提案した。**
2. 提案したシミュレーション計算法を用いて、運動予測を実施した。
 - ・ 停止時や後進時を含む運動を実用上の精度で推定できることを確認した。
 - ・ 広く使われている芳村モデル (1988) と同等以上の精度を有している。



本研究で提示したモデルは、大斜航角を伴う船の運動予測に有効である！

▶ 今後の展望

- ・ 低速運動時は港湾や運河のような水域で行われることが多い。
- ・ **浅水影響、岸壁影響等を考慮した操縦運動が可能**になるように、本計算モデルを拡張させていきたい。



謝辞

21

- ▶ 本研究は，日本財団無人運航船プロジェクト「MEGURI2040」の一部として実施されたものである。
- ▶ 本研究の実施に際して，株式会社MTIから種々の御助言をいただいた。関係各位に御礼申し上げます。

～ご清聴ありがとうございました～

無人運航船プロジェクト

**MEGURI
2040**

**日本
財団**
THE NIPPON
FOUNDATION

