

# 低速運動する内航船の船体・舵・プロペラに作用する流体力

長谷川賢太\*, 石田 圭\*, 湯川 和浩\*

## Hydrodynamic Forces Acting on Hull, Rudder, and Propeller of Coasting Vessels in Low-speed Conditions

by

HASEGAWA Kenta\*, ISHIDA Kei\* and YUKAWA Kazuhiro\*

### Abstract

This paper presents model tests conducted to measure maneuvering hydrodynamic forces, propeller thrust, and rudder force at low speeds, including cases where lateral flow is dominant. The tests used two representative models of coastal vessels that are assumed to have a high risk of dragging anchors. The slewing motion of an anchored ship in harsh weather can be caused by wind pressure from strong winds, hydrodynamic reaction forces (maneuvering hydrodynamic forces) generated by hull motion, and wave drift forces due to wind waves and swells. In contrast to normal navigation, the slewing motion of an anchored ship is characterized by a large drift angle at low speeds, where the dominant current is lateral. To accurately estimate such slewing motion, it is necessary to thoroughly understand the maneuvering hydrodynamic forces, propeller thrust, and rudder force at low speeds. We introduce an equation for estimating low-speed maneuvering hydrodynamic forces on coastal vessels, which has not been covered by conventional equations. Our novel equation is based on data obtained from pivot-turning tests, oblique towing tests, and yaw-rotating tests conducted without a propeller. Self-propulsion tests and rudder force tests were conducted using the ship models with a propeller installed. The results showed changes in the self-propulsion factors and interference coefficients between the rudder and hull for ship speed, drift angle, and propeller speed in the low-speed range. These changes cannot be expressed by conventional estimation equations. For large drift angles and dimensionless angular velocities at low speeds, estimating hydrodynamic forces, propeller thrust, and rudder force by the presented method should improve the accuracy of estimating anchored ships' slewing motion and ship motion when the propeller and rudder are controlled to restrain the slewing motion. As this paper covers general coastal tanker and ferry hull forms, propellers, and rudders, it is hoped that the data presented will have a wide range of applications.

---

\* 海洋開発系

原稿受付 令和5年1月25日

審査日 令和5年2月17日

## 目 次

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 1. まえがき               | 2  |
| 2. 水槽試験方法             | 3  |
| 2.1 模型船の諸元及び座標系       | 3  |
| 2.2 設営                | 4  |
| 2.3 試験条件              | 5  |
| 3. 結果と考察              | 6  |
| 3.1 その場回頭試験           | 7  |
| 3.2 斜航試験              | 7  |
| 3.3 Yaw Rotating 試験   | 10 |
| 3.4 推進性能試験            | 15 |
| 3.5 ボラードプル及び斜航時推進性能試験 | 16 |
| 3.6 舵力試験              | 17 |
| 4. まとめ                | 20 |
| 謝辞                    | 21 |
| References            | 21 |

## 1. まえがき

荒天下で錨泊船が振れ回り運動する要因としては、強風による風圧力や船体運動により生じる流体反力（操縦流体力）、風浪やうねりによる波漂流力が考えられる。通常航行時とは異なり、錨泊中に船体が振れ回るので、横流れが支配的となる低速状態で斜航角が大きくなる特徴がある。そのような振れ回り運動を精度良く推定するために、低速時の操縦流体力を正確に把握しておく必要がある。低速時の操縦流体力を計測した研究はこれまでもいくつか報告<sup>1) 2)</sup>されているが供試船は外航船が多く、湾内での走錨が問題となる内航船の計測例は見受けられない。また、低速時の操縦流体力について既存の推定式<sup>3) 4)</sup>があるが、この推定式の元となる船型に内航船は含まれていない。したがって、錨泊船の振れ回り運動を精度良く推定するために、船体だけでなく舵やプロペラに作用する流体力も含む操縦流体力を従来の研究成果から援用して推定することが難しい状況にある。

走錨の回避においては、振れ回り運動中にプロペラを駆動させることが有効であると考えられており<sup>5) 7)</sup>、その有効性を数値計算で推定するためには、前進速度がほぼゼロまたは低速で前・後進している際のプロペラ推力を精度良く推定する必要がある。さらに、オートパイロットの保針制御によって振れ回り運動を抑制する場合の運動を推定するためには、プロペラ推力だけでなく舵力についても精度良く推定する必要がある。

本稿では、振れ回り運動の推定に用いる運動方程式として(1.1)式のように水平面内の3自由度の船体運動（前後・左右・回頭運動）を考え、外力成分を構成する船体に作用する流体力及びプロペラ推力、舵力をMMGモデル<sup>8)</sup>の表現に従い分離し、それぞれの推定精度向上のために低速時の内航船に対するデータ取得を行った。走錨リスクが高いと想定される2種類の代表的な内航船型のモデルを対象とし、低速時の操縦流体力やプロペラ推力、舵力を計測するために実施した拘束曳航試験とその結果について報告する。なお、ここに記載する値は全て模型スケールである。

$$\left. \begin{aligned} (m + m_x)\dot{u} - (m + m_y)vr &= X_H + (1 - t_p)T_p - (1 - t_R)F_N \sin \delta & + X_A + X_W + X_T \\ (m + m_y)\dot{v} - (m + m_x)ur &= Y_H & - (1 + a_H)F_N \cos \delta & + Y_A + Y_W + Y_T \\ (I_{zz} + J_{zz})\dot{r} &= N_H & - (x_R + a_H x_H)F_N \cos \delta & + N_A + N_W + N_T \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

ここで、 $u, v, r$ ：船速の $x, y$ 軸方向成分及び回頭角速度、 $m, m_x, m_y$ ：船の質量及び $x, y$ 軸方向の付加質量、 $I_{zz}, J_{zz}$ ：重心周りの回頭運動に関する慣性モーメント及び付加慣性モーメント、 $X, Y, N$ ：船体に作用する外力の $x, y$ 軸方向成分ならびに回頭モーメントである。添え字の $H, A, W, T$ はそれぞれ船体に作用する流体力、

風圧力、波漂流力及び錨鎖の張力を表している。また、 $T_p$ ：プロペラ推力、 $t_p$ ：推力減少率、 $F_N$ 、 $x_R$ ：舵直圧力ならびにその作用点の座標値、 $t_R$ ：操舵による船体抵抗の減少ならびにプロペラ推力の増加を表す係数、 $a_H$ 、 $x_H$ ：操舵によって船体に誘起される横力成分の増加率とその着力点の座標値、 $\delta$ ：舵角を示す。

## 2. 水槽試験方法

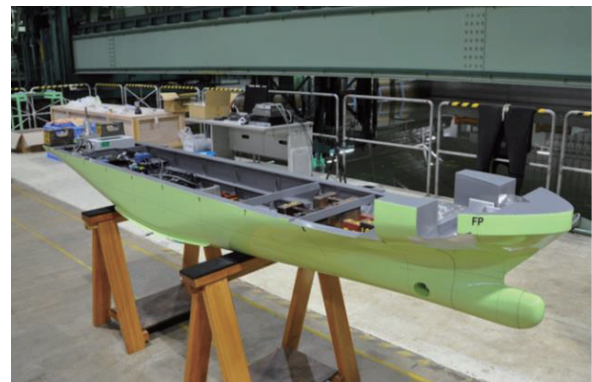
本稿で述べる模型試験は、当所が所有する海洋構造物試験水槽<sup>9)</sup>で実施した。海洋構造物試験水槽の水槽部は長さ44.5 m、幅27.1 m、深さ2.0 mで付帯設備として曳引台車、造波装置、潮流発生装置及び着脱式送風装置が装備されている。曳引主台車と走行副台車、走行副台車に装備されているターンテーブルを組み合わせて走行することで、斜航試験や旋回試験などの要素試験を行うことが可能である。本稿の計測ではプロペラ未装着の状態での場回頭試験、斜航試験、Yaw Rotating試験の3種類、プロペラを装着した状態で推進性能試験、ボラードプル及び斜航時推進性能試験、舵力試験の3種類の計6つの試験を実施した。これらの試験により計測された値を用いて、錨泊船の振れ回り運動を精度良く推定するために必要な操縦流体力やプロペラ及び舵と船体との干渉係数を算出した。

### 2.1 模型船の諸元及び座標系

低速時の操縦流体力及びプロペラ推力・舵力計測試験で対象とした内航船型の模型2隻（タンカー及びフェリー）とプロペラ、舵の外観図を図1と図2、各模型の諸元を表1にそれぞれ示す。船体は一般的な内航タンカー船型及び内航フェリー船型で、実船とのスケール比は内航タンカーが1/30、内航フェリーが1/36である。また、船首部には流体抵抗の低減を目的とした乱流促進用のスタッド、船底中央部の両側にはRoll運動（横揺れ）の低



(a) 内航タンカー



(b) 内航フェリー

図1 模型船本体



(a) 内航タンカー



(b) 内航フェリー

図2 プロペラ及び舵模型

表 1 模型船の諸元

| 項目        | 記号       | 単位             | 内航タンカー  | 内航フェリー  | 備考      |
|-----------|----------|----------------|---------|---------|---------|
| スケール比     | —        | —              | 1/30    | 1/36    |         |
| 垂線間長      | $L_{pp}$ | m              | 2.870   | 2.778   |         |
| 全幅        | $B$      | m              | 0.527   | 0.518   |         |
| 型深さ       | $D$      | m              | 0.237   | 0.236   |         |
| 平均喫水      | $d_m$    | m              | 0.153   | 0.139   |         |
| 方形係数      | $C_b$    | —              | 0.710   | 0.630   |         |
| 排水量 (重量)  | $m$      | kg             | 161.107 | 126.401 |         |
| 縦方向浮心     | $l_{cb}$ | m              | 0.025   | 0.048   | 船首側 (+) |
| プロペラ 直径   | $D_p$    | m              | 0.098   | 0.105   |         |
| プロペラ ピッチ比 | $P/D_p$  | —              | 0.665   | 1.000   | 0.7R 位置 |
| 舵 高さ      | $h_R$    | m              | 0.114   | 0.114   |         |
| 舵 面積      | $A_R$    | m <sup>2</sup> | 0.009   | 0.010   |         |
| 舵 縦横比     | $K_R$    | —              | 1.493   | 1.250   |         |

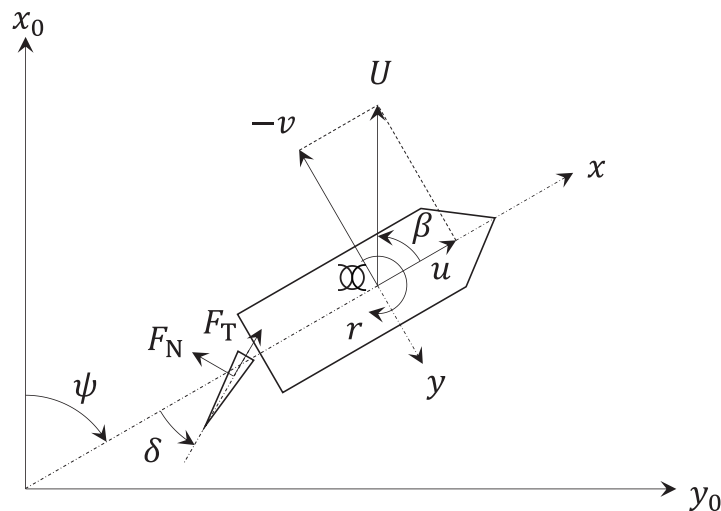


図 3 座標系の定義

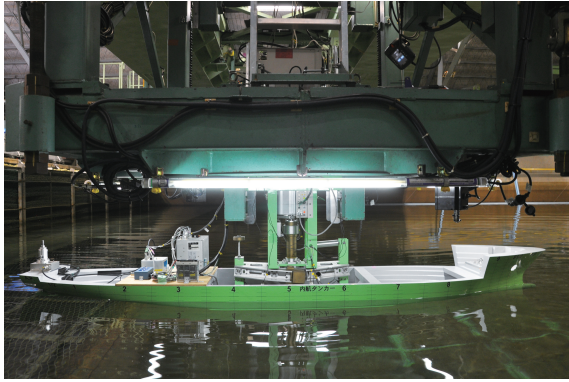
減を目的としたビルジキールを有している。舵は内航タンカーがシューピース付き逆 G 型舵，内航フェリーはマリナー型舵とし，プロペラは両船とも 1 軸固定ピッチプロペラである。いずれも当所独自のデザインである。なお，全ての試験においてサイドスラスタは使用せず，扇形平板形状の翼を有するダミープロペラを装着した。

座標系の定義を図 3 に示す。船体中央を原点とし，各軸の設定は MMG 標準<sup>10), 11)</sup>の座標系に従った。ここで， $x_0$  及び  $y_0$  は空間固定座標系の X 軸及び Y 軸とし， $U$ ：船速， $u$ ：前進速度， $v$ ：横流れ速度， $r$ ：回頭角速度， $\delta$ ：舵角， $\beta$ ：斜航角， $\psi$ ：回頭角， $F_T$ ：舵接線力， $F_N$ ：舵直圧力である。

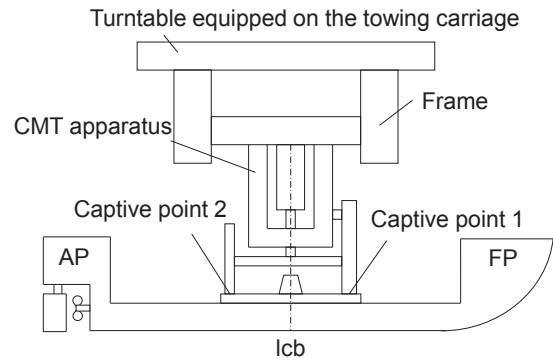
## 2.2 設営

曳引台車のターンテーブル架台に設置した旋回運動試験 (CMT : Circular Motion Test) 装置を介して，模型を取付けた様子を図 4 に示す。CMT 装置には拘束点が 2 ヶ所 (2 点間距離 0.6 m) 存在し，その中心が回転中心となる。実施した全ての試験において，2 つの拘束点が船体中心線上，かつ回転中心を模型の浮心前後位置  $l_{cb}$  に合わせた。各拘束点位置には検力計が内蔵されており，図 5 に示すように前後力は船首側の  $x$  軸成分の検力計から得られる。図中の記号は， $x_m$ ：前後方向の拘束治具回転中心， $\xi$ ：検力計の取付け位置， $X$ ：前後力， $Y$ ：横力， $N$ ：回頭モーメントである。下付き添字 1 と 2 は船首側と船尾側の検力計を意味し，下付き添字  $M$  及び  $C$ ， $m$  は計測





(a) 写真



(b) 模式図

図4 CMT装置と模型の設置状況

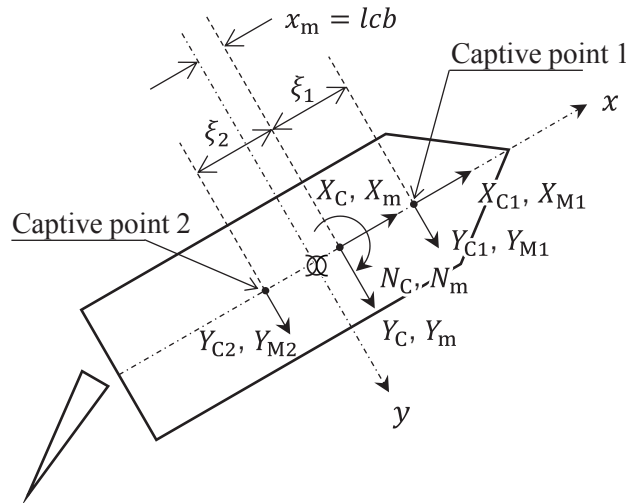


図5 拘束位置や回転中心、荷重・モーメントの概略図

値及び模型の拘束力，回転中心に作用する力を示す．横力と回頭モーメントは船首と船尾側の2台のy軸成分の検力計から換算される．また，CMT装置はロール，ピッチ，ヒープ運動が自由で，サージ，スウェイ，ヨー運動が拘束される機構を有し，機構部分に運動（ロール，ピッチ，ヒープ）を計測するためのポテンシオメータが装備されている．ただし，ロールとピッチはCMT装置の拘束機構により運動を拘束した状態で全ての試験を実施した．

曳航速度及び回頭速度は曳航台車に装備されている速度計で計測した．また，プロペラ有りの状態では自航装置によりプロペラ回転数，プロペラ推力，プロペラトルクを計測した．プロペラ推力の計測方式として，内航タンカーはプロペラシャフト上部に組み込まれた歪みゲージセンサにより荷重を検出する方式，内航フェリーはプロペラシャフト周りに組み込まれたスリップリング及び回転型歪みゲージセンサにより荷重を検出する方式をそれぞれ採用している．トルクについては機器の都合上，内航フェリーのみ計測を行った．舵角の計測は操舵装置により行われ，舵力（前後成分と左右成分）は操舵装置の舵シャフトに固定したロードセルにより計測される．なお，模型に作用する前後力と横力，プロペラ推力，プロペラトルク，舵力は，それぞれ歪みアンプにより電圧に変換した後，データロガーにて収録した．データロガーの収録サンプリングレートは20 Hzで，ローパスフィルタは10 Hzとした．

### 2.3 試験条件

低速時の操縦流体力の計測を行うにあたり，プロペラを未装着の状態（ただし，舵は舵角  $\delta = 0 \text{ deg}$  固定の状態）で以下の試験を実施した．

- その場回頭試験

船速  $U = 0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  での操縦微係数（操縦流体力を多項式近似した際の係数）を得るために、一定回頭角速度  $r = 2\text{-}5 \text{ deg}\cdot\text{s}^{-1}$  で回頭運動させ模型に作用する荷重を計測。

- 斜航試験

回頭角速度  $r = 0 \text{ deg}\cdot\text{s}^{-1}$  での操縦微係数を得るために、斜航角  $\beta = 0\text{-}180 \text{ deg}$  において一定速度  $Fn = 0.02$  で曳航し模型に作用する荷重を計測。

- Yaw Rotating 試験

船速  $U \neq 0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  及び回頭角速度  $r \neq 0 \text{ deg}\cdot\text{s}^{-1}$  の状態における操縦微係数を得るために、一定回頭角速度  $r = 2\text{-}5 \text{ deg}\cdot\text{s}^{-1}$  で回頭運動する模型を一定速度  $Fn = 0.02\text{-}0.06$  で曳航し模型に作用する荷重を計測。

また、プロペラ推力や舵力の計測ではプロペラを装着し、4種類のプロペラ回転数（DS : Dead Slow（前進最微速）、SA : Slow Ahead（前進微速）、HA : Half Ahead（前進半速）、HF : Harbor Full（港内最大速度））に対して以下の試験を実施した。

- 推進性能試験

別途実施した抵抗試験とプロペラ単独試験の結果を用いて、船体の後方でプロペラが作動する状況のプロペラ推力を推定するために必要な自航要素（プロペラと船体との干渉を表す有効伴流率及び推力減少係数）を得るために、舵角  $\delta = 0 \text{ deg}$  で一定のプロペラ回転数にある模型を斜航角  $\beta = 0 \text{ deg}$  の一定速度  $Fn = 0.02\text{-}0.06$  で曳航し、模型に作用する荷重とプロペラ推力を計測。

- ボラードプル及び斜航時推進性能試験

自航要素の斜航影響を把握するために、舵角  $\delta = 0 \text{ deg}$  で一定のプロペラ回転数にある模型の船速  $U = 0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  での荷重やプロペラ推力、加えて一定速度  $Fn = 0.04$  で斜航角  $\beta = -40\text{-}+40 \text{ deg}$  において曳航し、模型に作用する荷重やプロペラ推力を計測。

- 舵力試験

舵と船体との干渉を表す係数を得るために、ある一定の舵角  $\delta$  ( $F_N = 0$  となる角度及びその角度に対し  $\pm 9 \text{ deg}$ ) を持つ状態でボラードプル及び斜航時推進性能試験を実施し、模型に作用する荷重や舵力を計測。

### 3. 結果と考察

計測された荷重は検力計と模型船の慣性力を含むため、解析の段階で慣性力を除外<sup>12)</sup>し、重心まわりの前後力  $X_G$  や横力  $Y_G$ 、回頭モーメント  $N_G$  などを算出した。無次元化は  $U = 0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  の場合を除き、(3.1)式で行った。プロペラ単独性能曲線は(3.2)式及び(3.3)式で定義されるプロペラ推力係数  $K_T$  を前進常数  $J$  の関数として表したもので、当所の中水槽（三鷹第3船舶試験水槽）<sup>13)</sup>において別途実施したプロペラ単独試験（POT : Propeller Open water Test）で得られた結果を用いた。図6にその結果を示す。丸印のプロットが計測値を示し、青色と橙色の実線はそれぞれプロペラ推力係数  $K_T$  とトルク係数  $K_Q = Q_P / \rho n_p^2 D_p^5$  の近似曲線である。

$$\left. \begin{aligned} u', v' &= \frac{u, v}{U}, & r' &= \frac{r L_{pp}}{U} \\ X', Y' &= \frac{X, Y}{\frac{1}{2} \rho L_{pp} d_m U^2}, & N' &= \frac{N}{\frac{1}{2} \rho L_{pp}^2 d_m U^2}, & F'_N &= \frac{F_N}{\frac{1}{2} \rho L_{pp} d_m U^2}, & T'_P &= \frac{T_P}{\frac{1}{2} \rho L_{pp} d_m U^2} \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

$$K_T = \frac{T_P}{\rho n_p^2 D_p^4} \quad (3.2)$$

$$J = \frac{V_a}{n_p D_p} \quad (3.3)$$

ここに、 $\rho$  : 流体密度,  $n_p$  : プロペラ回転数,  $T_p$  : プロペラ推力,  $Q_p$  : プロペラトルクである. 上付き添字'は無次元値を意味する.

### 3.1 その場回頭試験

計測された回頭モーメント  $N_G$  に(3.4)式で表される無次元化を適用すれば, 船速  $U = 0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  での操縦微係数  $N'_{r|r}$  が求まる. 図7に(3.4)式で得られた  $N'_{r|r}$  について, 計測値を青点, その平均値を赤線として示す. 高品の論文<sup>2)</sup>では, 船体  $x$  断面の抵抗係数  $C_D(x)$  から成る Cross-Flow Drag モデルにより操縦微係数  $N'_{r|r}$  は(3.5)式で表現され, その場回頭試験で得られた  $N'_{r|r}$  を用いると, Cross-Flow によるタンカーとフェリーの抗力係数  $C_D$  はそれぞれ 1.15 及び 1.54 となる. ただし, その場回頭試験では船速  $U$  が 0 であるため, 船速を用いた無次元化ができず, 代わりに  $L_{pp} \times r$  を用いているため, 抗力  $D$  は(3.6)式から得られることに注意を要する.

$$N'_{r|r} = \frac{N_G}{\frac{1}{2} \rho L_{pp}^4 d_m r |r|} \tag{3.4}$$

$$N'_{r|r} = \frac{C_D}{32} \quad (C_D(x) = \text{constant}) \tag{3.5}$$

$$D = \frac{1}{2} \rho L_{pp}^3 d_m r |r| C_D \tag{3.6}$$

### 3.2 斜航試験

斜航試験で得られた結果を図8に示す. 計測値の妥当性を確認するため, タンカー模型に関して得られた重心まわりの無次元前後力  $X'_G$  及び横力  $Y'_G$ , 回頭モーメント  $N'_G$  を参考データ<sup>14)</sup>などと比較した結果を併せて示して

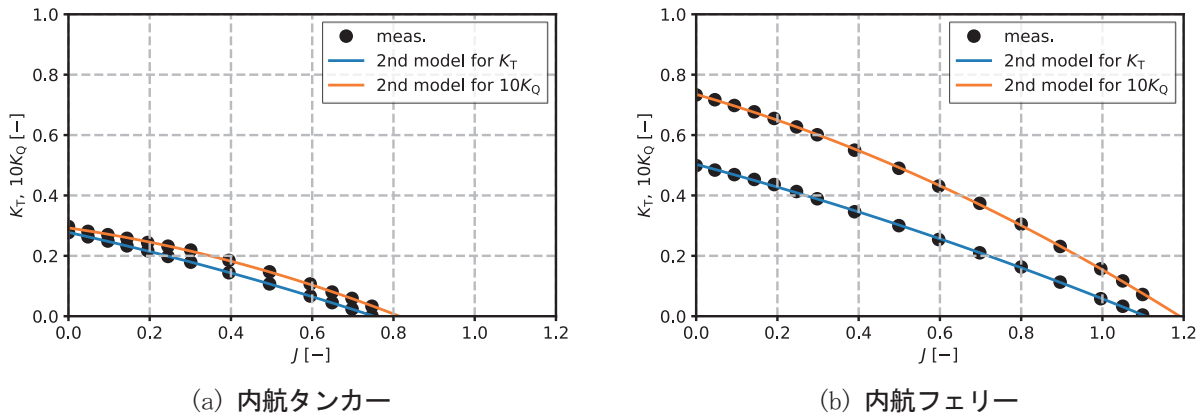


図6 POT から得られたプロペラ単独性能曲線

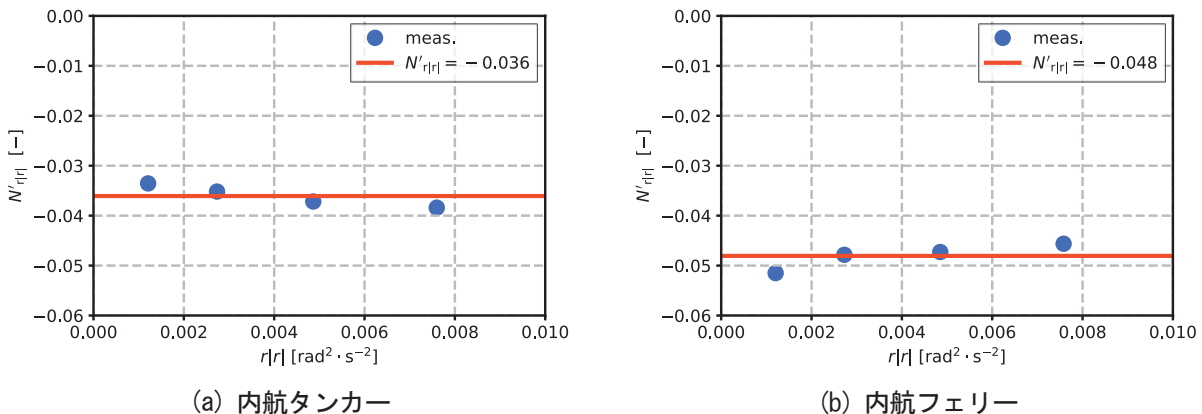


図7 回頭角速度の二乗  $r|r$  に対する船  $U = 0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  速での操縦微係数  $N'_{r|r}$

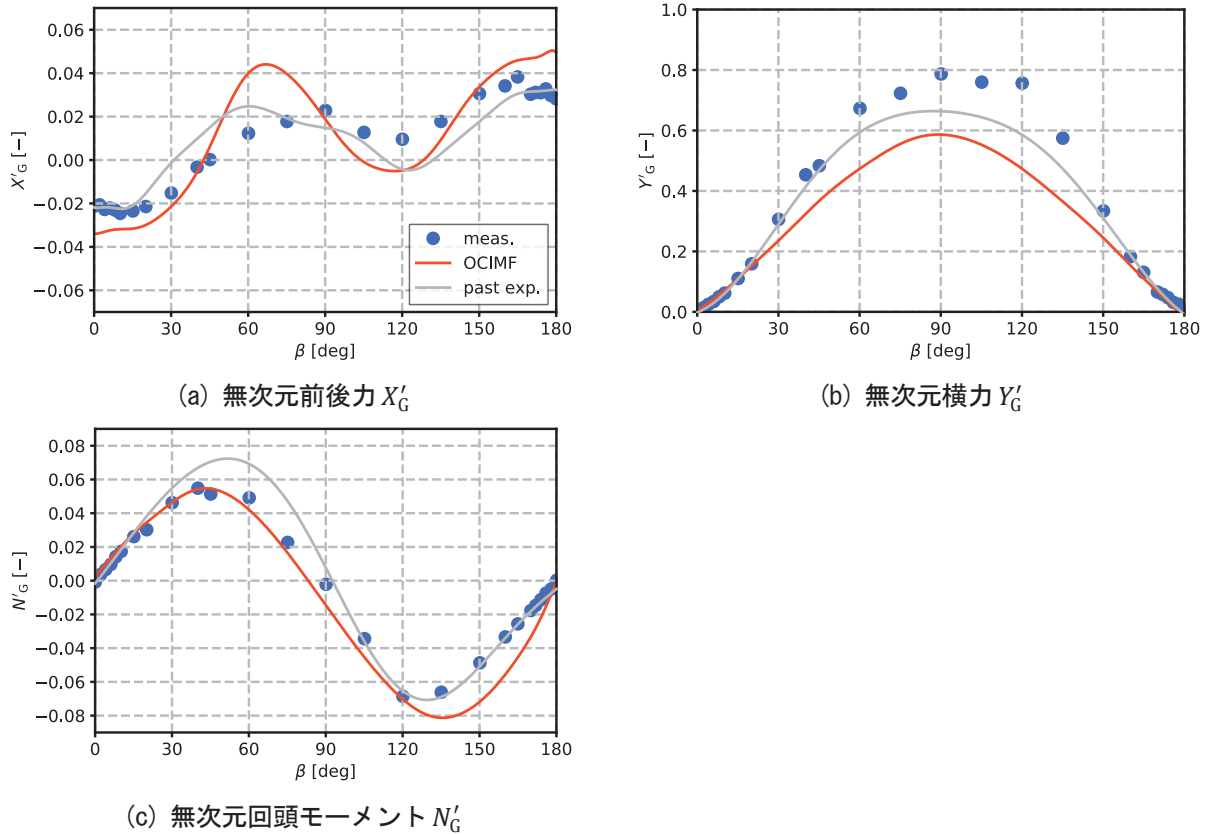


図8 計測された内航タンカーの重心まわりの各斜航流体力と参考データ<sup>14)</sup>などとの比較  
(参考データはMidshipまわりの値となっているため注意を要する)

いる。なお、各成分の無次元化は(3.1)式に従う。青点は計測値を表し、赤色の実線は OCIMF<sup>14)</sup> (Oil Companies International Marine Forum) による大型タンカー船 (従来型の球状船首を有し、 $L_{pp}/B = 6.4$  程度で満載喫水の 150,000-500,000 DWT を対象) のデータ、灰色の実線は当所で過去に実施した VLCC 模型 (従来型の球状船首を有し、 $L_{pp}/B = 5.5$ ,  $C_b = 0.804$  で満載喫水) のデータを滑らかな曲線で繋いだものである。これらの参考データは Midship まわりの斜航流体力となっているので注意が必要である。 $Y'_G$  や  $N'_G$  は、いずれのデータも斜航角  $\beta$  に対し正弦波のような変化となっている。一方で、 $X'_G$  は  $\beta$  に対して複雑に変化しているが、過去に当所で実施した VLCC 模型のデータ (灰色の実線) と同様の傾向を示している。以上から、本斜航試験により得られた斜航流体力が妥当であると判断できる。

次に、各斜航流体力を高品の論文<sup>2)</sup>と同様に次式のフーリエ級数で表現する。ここでは、 $C_{k0}^X$  や  $S_{k0}^Y$  などのフーリエ係数を線形最小二乗法により定めた。

$$\left. \begin{aligned} X'_G &= \sum_{k=0}^K C_{k0}^X \cos k\beta \\ Y'_G, N'_G &= \sum_{k=1}^K S_{k0}^{Y,N} \sin k\beta \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

図9に5次及び3次、1次の級数でそれぞれ近似した曲線を赤、灰、黄色で示す。 $Y'_G$  と  $N'_G$  は5次のフーリエ級数により良好に近似できていることが分かる。 $X'_G$  に関しては、斜航角  $\beta$  によって複雑に変化しているため、再現性が低くなっている。特にフェリーでは  $\beta$  が 90 deg で顕著な突出が現れているが、図9の黒色の三角プロットで示すように、2回目の計測でも同程度の値が得られているため、船型に起因する固有の傾向であると判断できる。フーリエ級数の次数を高くすると操縦微係数を算出する式が煩雑になり過ぎて実用性に乏しくなるため、 $X'_G$  の



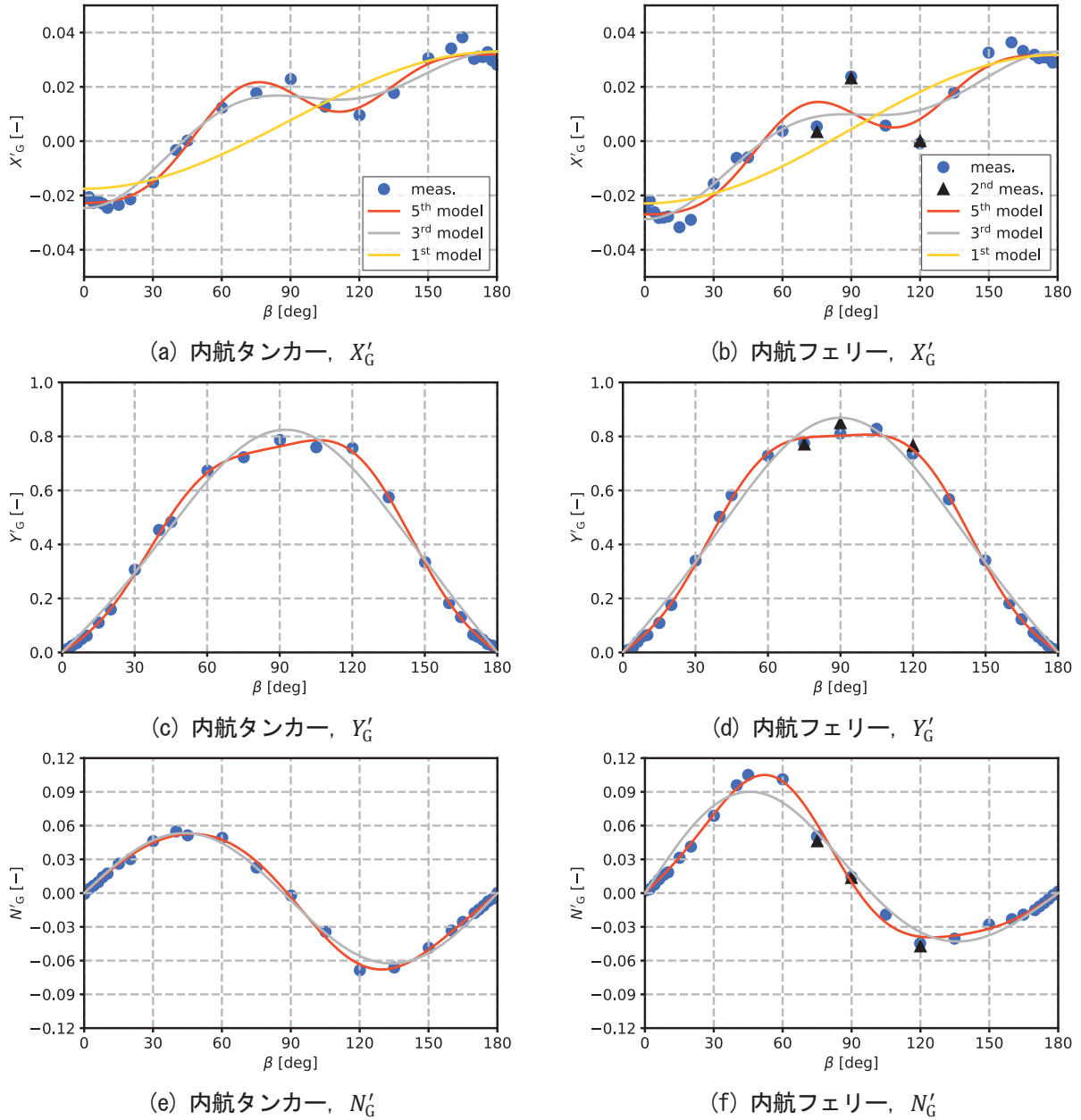


図9 斜航角  $\beta$  に対する無次元化された前後力  $X'_G$  及び横力  $Y'_G$ , 回頭モーメント  $N'_G$

オーダーが小さいことも加味し、5 次までの級数を用いた調和解析により各フーリエ係数を求め、流体力をモデル化した。

得られたフーリエ係数から操縦微係数の算出について、斜航試験における船体運動は、

$$\left. \begin{aligned} u &= U \cos \beta, & \dot{u} &= 0 \\ v &= -U \sin \beta, & \dot{v} &= 0 \\ r &= 0, & \dot{r} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

すなわち、

$$\left. \begin{aligned} \cos \beta &= u', & \sin \beta &= -v' \\ \cos 2\beta &= u'^2 - v'^2, & \sin 2\beta &= -2u'v' \\ \cos 3\beta &= 4u'^3 - 3u', & \sin 3\beta &= 4v'^3 - 3v' \\ \cos 4\beta &= 8u'^4 - 7u'^2 + v'^2, & \sin 4\beta &= 8u'v'^3 - 4u'v' \\ \cos 5\beta &= 16u'^5 - 20u'^3 + 5u', & \sin 5\beta &= -16v'^5 + 20v'^3 - 5v' \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

の関係が成り立っているので(3.9)式を(3.8)式に代入して展開すると、各斜航流体力が(3.10)式のように操縦微係数を用いた式にて表現することができる<sup>2)</sup>。ここに、上付きドット・は時間微分を意味する。

$$\left. \begin{aligned} X'_G &= (C_{10}^X - 3C_{30}^X + 5C_{50}^X)u' + (C_{00}^X + C_{20}^X - 7C_{40}^X)u'^2 + (4C_{30}^X - 20C_{50}^X)u'^3 + 8C_{40}^X u'^4 \\ &\quad + 16C_{50}^X u'^5 + (C_{00}^X - C_{20}^X + C_{40}^X)v'^2 \\ &= X'_{u'}u' + X'_{uu}u'^2 + X'_{uuu}u'^3 + X'_{uuuu}u'^4 + X'_{uuuuu}u'^5 + X'_{vv}v'^2 \\ Y'_G, N'_G &= (-S_{10}^{Y,N} - 3S_{30}^{Y,N} - 5S_{50}^{Y,N})v' + (-2S_{20}^{Y,N} - 4S_{40}^{Y,N})u'v' + (4S_{30}^{Y,N} + 20S_{50}^{Y,N})v'^3 \\ &\quad + 8S_{40}^{Y,N}u'v'^3 - 16S_{50}^{Y,N}v'^5 \\ &= Y', N'_v v' + Y', N'_{uv} u'v' + Y', N'_{vv} v'^3 + Y', N'_{uvv} u'v'^3 + Y', N'_{vvvv} v'^5 \end{aligned} \right\} \quad (3.10)$$

### 3.3 Yaw Rotating 試験

Yaw Rotating 試験で得られた結果を図 10 に示す。代表例として、フルード数  $F_n$  が 0.06 かつ回頭角速度  $r$  が  $5 \text{ deg}\cdot\text{s}^{-1}$  (無次元回頭角速度  $r'$  は(3.1)式より内航タンカーが 0.79, 内航フェリーが 0.77) で得られた重心まわりの無次元回頭モーメント  $N'_G$  の結果を示している。青点は計測値を表し、赤線は斜航試験での解析と同様、斜航角  $\beta$  に関する調和解析を行い(3.11)式に示す 5 次のフーリエ級数で表現したものである。 $S_k^N$  や  $C_k^N$  のフーリエ係数は線形最小二乗法により定めた。なお、青点の計測値は、10 Hz のローパスフィルタを掛けサンプリングレート 20 Hz で収録した値をそのままプロットしたものである。

$$N'_G = C_0^N + \sum_{k=1}^5 (S_k^N \sin k\beta + C_k^N \cos k\beta) \quad (3.11)$$

上記より得られた各試験条件でのフーリエ級数を図 11 にまとめて示す。 $r'$  が大きくなるにつれ  $N'_G$  は全体的にマイナス側へシフトする傾向が内航タンカーと内航フェリーの両船で見られる。図 12 に横軸を  $r'$  として、各次数  $k$  のフーリエ係数を示す。各点はそれぞれの試験条件で得られたフーリエ係数を表し、実線はそれらのフーリエ係数を  $r'$  の 2 次式として船型の左右対称性を考慮した(3.12)式により表現したものである<sup>2)</sup>。ただし、 $r' = 0$  におけるフーリエ係数は斜航試験で得られた結果を用いている。

$$\left. \begin{aligned} S_k^N &= S_{k0}^N + S_{k1}^N |r'| + S_{k2}^N r'^2 \quad (k = 1, 2 \dots 5) \\ C_k^N &= C_{k1}^N r' + C_{k2}^N r' |r'| \quad (k = 0, 1 \dots 5) \end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$

フーリエ係数をそれぞれ 2 次関数表示した際の各項の係数 ( $C_{k0}^N$  や  $S_{k2}^N$  など) は線形最小二乗法により定めた。

多くのフーリエ係数が  $r'$  に対して内航タンカーと内航フェリーで似た傾向を示したものの、内航フェリーの  $S_1^N$  (図 12(b)の青色の実線) は内航タンカーと異なり、 $r'$  とともに顕著に大きくなっている。これは  $r'$  の増加に伴い、内航フェリーの  $N'_G$  において半周期の変動振幅が増大することを意味し、図 11(b)の  $\beta = 270 \text{ deg}$  付近で大きく現れている傾向を表している。

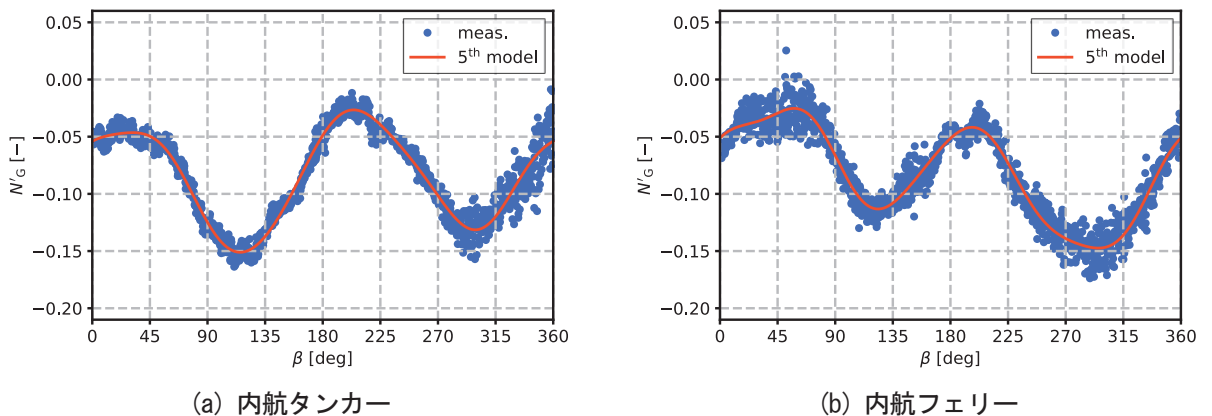
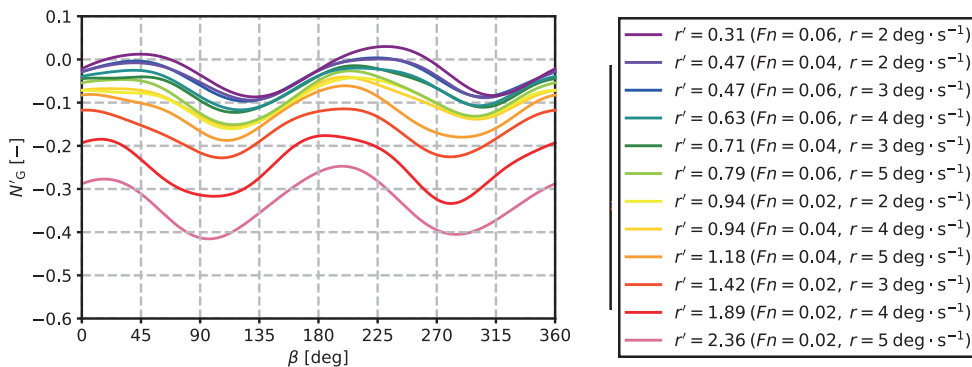
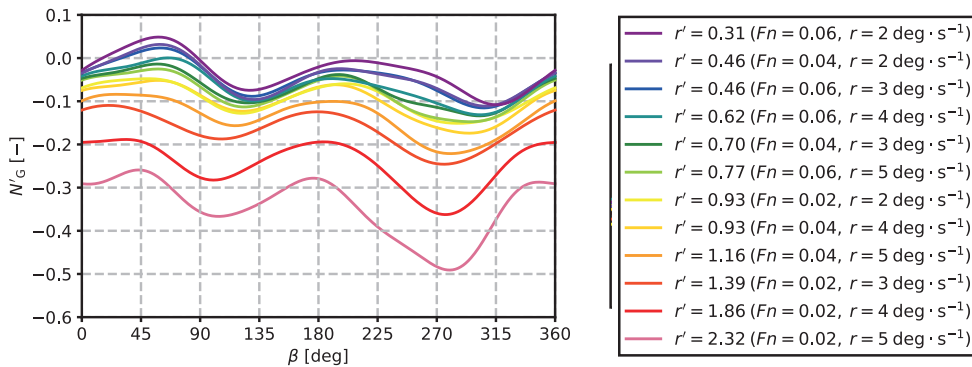


図 10  $F_n = 0.06$ ,  $r = 5 \text{ deg}\cdot\text{s}^{-1}$  (内航タンカー  $r' = 0.79$ , 内航フェリー  $r' = 0.77$ ) で得られた重心まわりの無次元化回頭モーメント  $N'_G$

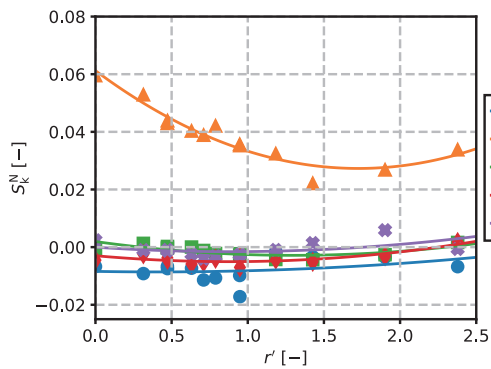


(a) 内航タンカー

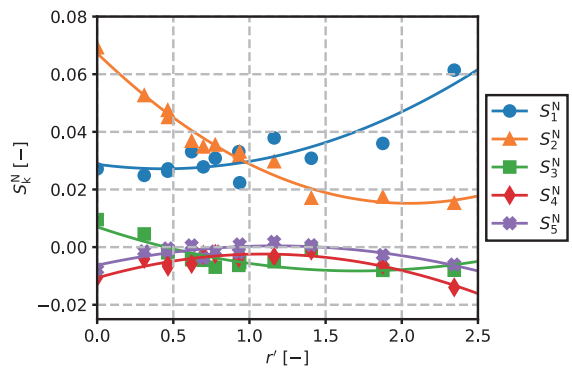


(b) 内航フェリー

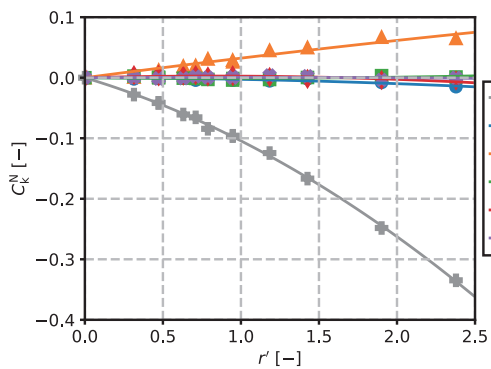
図11 斜航角  $\beta$  に対する各試験条件での近似された無次元化回頭モーメント  $N'_G$



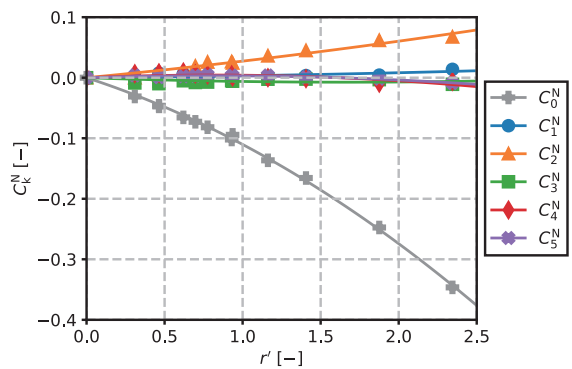
(a) 内航タンカー,  $S_k^N$



(b) 内航フェリー,  $S_k^N$



(c) 内航タンカー,  $C_k^N$



(d) 内航フェリー,  $C_k^N$

図12 無次元回頭角速度  $r'$  に対する無次元回頭モーメント  $N'_G$  のフーリエ係数

(3.12)式で $r'$ の2次式として表したフーリエ係数を(3.11)式に代入し、 $r \neq 0 \text{ deg}\cdot\text{s}^{-1}$ であっても $\beta$ と $u'$ 、 $v'$ の関係は変わらないため(3.9)式を用いれば、各流体力を斜航流体力と同様に微係数を用いた式にて表現することができる<sup>2)</sup>。 $N'_G$ の表現式を(3.13)式に示す。

$$\begin{aligned}
N'_G = & N'_v v' + N'_r r' + N'_{uv} u' v' + N'_{ur} u' r' + N'_{v|r'} v' |r'| + N'_{r|r'} r' |r'| \\
& + N'_{uv|r'} u' v' |r'| + N'_{ur|r'} u' r' |r'| + N'_{uur} u'^2 r' + N'_{vrr} v' r'^2 \\
& + N'_{vvv} v'^3 + N'_{uvrr} u' v' r'^2 + N'_{uvvv} u' v'^3 + N'_{uur|r'} u'^2 r' |r'| \\
& + N'_{uuur} u'^3 r' + N'_{vvv|r'} v'^3 |r'| + N'_{uvvv|r'} u' v'^3 |r'| + N'_{uuur|r'} u'^3 r' |r'| \\
& + N'_{uuuu} u'^4 r' + N'_{vvvv} v'^4 r' + N'_{vvvvv} v'^5 + N'_{uvvvrr} u' v'^3 r'^2 \\
& + N'_{uuuu|r'} u'^4 r' |r'| + N'_{uuuuur} u'^5 r' + N'_{vvvv|r'} v'^5 |r'| \\
& + N'_{uuuuur|r'} u'^5 r' |r'| + N'_{vvvvrr} v'^5 r'^2
\end{aligned} \tag{3.13}$$

Yaw Rotating 試験では、その場回頭試験や斜航試験とは異なり、並進運動と回転運動が同時に存在するため、連成運動により生じる流れの変化が微係数に影響を与えていると考えられる。よって、 $N'_{r|r'}$ や $N'_{uv}$ などのその場回頭試験や斜航試験で得られる操縦微係数はそれらを採用し、並進と回転運動を含んだ操縦微係数には Yaw Rotating 試験の結果を用いた。表 2 に(3.13)式の表現式で使われる操縦微係数を示す。無次元横力 $Y'_G$ についても(3.13)式と同様に表現でき、 $Y'_G$ で使用される操縦微係数を表 3 に示す。表中には、参考データとして $L_{pp}/B \cong 6.0$ 、 $C_b = 0.692$ の LNG 船型を対象とし、本稿と同様の模型試験を実施した文献<sup>2)</sup>のデータも併記している。参考データは 4 次程度まで展開した表現式を使っており、また船型も異なるため直接的な比較はできないが、値の正負や大小関係などは似た傾向となっている。

従来から船体に作用する操縦流体力を表現する方法はいくつか存在し、そこで用いられる操縦微係数を船体主要目から推定するモデル<sup>15)</sup>などがある。主に外航船を対象として、斜航角 $\beta$ は中速域以上の通常航行を想定し 30 deg 程度までの範囲で推定モデルが構築されるため、 $\beta$ に関しては 2 次の項までを使った表現式で十分に成り立つ。しかしながら、振れ回り運動では $\beta$ が 180 deg を超える場合も考えられ、その範囲までの適用を考えると 2 次や 3 次式では不十分であることが図 11 から分かる。また、低速域での運動であるため無次元回頭角速度 $r'$ が通常よりも大きくなることが考えられ、図 12 に示すように $r'$ が小さい範囲では線形で表現できるような項でも、 $r'$ の範囲を広げると非線形で近似が相応しい場合があることが分かる。

以上より、本稿で紹介したその場回頭試験や斜航試験、Yaw Rotating 試験で計測したデータを解析することで、従来の推定式では不十分な振れ回り運動時における操縦流体力を(3.13)式及び表 2、表 3 に示すような表現で適切に推定することができる。さらに、本稿は一般的な内航タンカー船型及び内航フェリー船型を対象としているので、示したデータの汎用的な利用が期待される。

表2 重心まわりの無次元回頭モーメント  $N'_G$  に関する操縦微係数

| 操縦微係数           | フーリエ係数                              | 内航タンカー  | 内航フェリー  | 使用データ           | 参考 <sup>2)</sup> |
|-----------------|-------------------------------------|---------|---------|-----------------|------------------|
| $N'_v$          | $-S_{10}^N - 3S_{30}^N - 5S_{50}^N$ | -0.0030 | -0.0169 | 斜航試験            | -0.0028          |
| $N'_r$          | $C_{01}^N - C_{21}^N + C_{41}^N$    | -0.1046 | -0.0973 | Yaw Rotating 試験 | -0.0300          |
| $N'_{uv}$       | $-2S_{20}^N - 4S_{40}^N$            | -0.1009 | -0.0963 | 斜航試験            | -0.0678          |
| $N'_{ur}$       | $C_{11}^N - 3C_{31}^N + 5C_{51}^N$  | 0.0149  | 0.0695  | Yaw Rotating 試験 |                  |
| $N'_{v r}$      | $-S_{11}^N - 3S_{31}^N - 5S_{51}^N$ | 0.0408  | 0.0034  | Yaw Rotating 試験 |                  |
| $N'_{r r}$      | $C_{02}^N - C_{22}^N + C_{42}^N$    | -0.0361 | -0.0481 | その場回頭試験         | -0.0340          |
| $N'_{uv r}$     | $-2S_{21}^N - 4S_{41}^N$            | 0.0974  | 0.0412  | Yaw Rotating 試験 | 0.0300           |
| $N'_{ur r}$     | $C_{12}^N - 3C_{32}^N + 5C_{52}^N$  | 0.0107  | -0.0321 | Yaw Rotating 試験 |                  |
| $N'_{uur}$      | $2C_{21}^N - 8C_{41}^N$             | 0.0153  | -0.0372 | Yaw Rotating 試験 |                  |
| $N'_{vrr}$      | $-S_{12}^N - 3S_{32}^N - 5S_{52}^N$ | -0.0197 | 0.0007  | Yaw Rotating 試験 |                  |
| $N'_{vvv}$      | $4S_{30}^N + 20S_{50}^N$            | 0.0448  | -0.1173 | 斜航試験            | -0.0093          |
| $N'_{uvrr}$     | $-2S_{22}^N - 4S_{42}^N$            | -0.0335 | 0.0028  | Yaw Rotating 試験 |                  |
| $N'_{uvvv}$     | $8S_{40}^N$                         | -0.0361 | -0.0841 | 斜航試験            | -0.0759          |
| $N'_{uur r}$    | $2C_{22}^N - 8C_{42}^N$             | 0.0286  | 0.0589  | Yaw Rotating 試験 |                  |
| $N'_{uuur}$     | $4C_{31}^N - 20C_{51}^N$            | -0.0401 | -0.1983 | Yaw Rotating 試験 |                  |
| $N'_{vvv r}$    | $4S_{31}^N + 20S_{51}^N$            | -0.1004 | 0.1581  | Yaw Rotating 試験 |                  |
| $N'_{uvvv r}$   | $8S_{41}^N$                         | -0.0376 | 0.1211  | Yaw Rotating 試験 |                  |
| $N'_{uuur r}$   | $4C_{32}^N - 20C_{52}^N$            | 0.0215  | 0.1109  | Yaw Rotating 試験 |                  |
| $N'_{uuuur}$    | $8C_{41}^N$                         | 0.0525  | 0.0865  | Yaw Rotating 試験 |                  |
| $N'_{vvvrr}$    | $4S_{32}^N + 20S_{52}^N$            | 0.0517  | -0.0773 | Yaw Rotating 試験 |                  |
| $N'_{vvvvv}$    | $-16S_{50}^N$                       | -0.0381 | 0.1244  | 斜航試験            |                  |
| $N'_{uvvvrr}$   | $8S_{42}^N$                         | 0.0214  | -0.0554 | Yaw Rotating 試験 |                  |
| $N'_{uuur r}$   | $8C_{42}^N$                         | -0.0317 | -0.0534 | Yaw Rotating 試験 |                  |
| $N'_{uuuuur}$   | $16C_{51}^N$                        | 0.0235  | 0.1303  | Yaw Rotating 試験 |                  |
| $N'_{vvvvv r}$  | $-16S_{51}^N$                       | 0.0568  | -0.1838 | Yaw Rotating 試験 |                  |
| $N'_{uuuuur r}$ | $16C_{52}^N$                        | -0.0122 | -0.0802 | Yaw Rotating 試験 |                  |
| $N'_{vvvvrr}$   | $-16S_{52}^N$                       | -0.0323 | 0.0786  | Yaw Rotating 試験 |                  |



表3 重心まわりの無次元横力  $Y'_G$  に関する操縦微係数

| 操縦微係数           | フーリエ係数                              | 内航タンカー  | 内航フェリー  | 使用データ           | 参考 <sup>2)</sup> |
|-----------------|-------------------------------------|---------|---------|-----------------|------------------|
| $Y'_v$          | $-S_{10}^Y - 3S_{30}^Y - 5S_{50}^Y$ | -0.3829 | -0.3899 | 斜航試験            | -0.285           |
| $Y'_r$          | $C_{01}^Y - C_{21}^Y + C_{41}^Y$    | -0.0543 | -0.0645 | Yaw Rotating 試験 |                  |
| $Y'_{uv}$       | $-2S_{20}^Y - 4S_{40}^Y$            | 0.0286  | -0.0085 | 斜航試験            |                  |
| $Y'_{ur}$       | $C_{11}^Y - 3C_{31}^Y + 5C_{51}^Y$  | 0.3731  | 0.4988  | Yaw Rotating 試験 | 0.060            |
| $Y'_{v r}$      | $-S_{11}^Y - 3S_{31}^Y - 5S_{51}^Y$ | -0.3011 | -0.3836 | Yaw Rotating 試験 | -0.230           |
| $Y'_{r r}$      | $C_{02}^Y - C_{22}^Y + C_{42}^Y$    | 0.0702  | 0.0357  | その場回頭試験         |                  |
| $Y'_{uv r}$     | $-2S_{21}^Y - 4S_{41}^Y$            | -0.1678 | -0.2369 | Yaw Rotating 試験 |                  |
| $Y'_{ur r}$     | $C_{12}^Y - 3C_{32}^Y + 5C_{52}^Y$  | -0.1861 | -0.2520 | Yaw Rotating 試験 | -0.035           |
| $Y'_{uur}$      | $2C_{21}^Y - 8C_{41}^Y$             | 0.3169  | 0.1777  | Yaw Rotating 試験 |                  |
| $Y'_{vrr}$      | $-S_{12}^Y - 3S_{32}^Y - 5S_{52}^Y$ | -0.1134 | -0.0482 | Yaw Rotating 試験 |                  |
| $Y'_{vvv}$      | $4S_{30}^Y + 20S_{50}^Y$            | -1.1561 | -1.2667 | 斜航試験            | -0.894           |
| $Y'_{uvrr}$     | $-2S_{22}^Y - 4S_{42}^Y$            | 0.0327  | 0.00904 | Yaw Rotating 試験 |                  |
| $Y'_{uvvv}$     | $8S_{40}^Y$                         | 0.0833  | 0.0319  | 斜航試験            |                  |
| $Y'_{uur r}$    | $2C_{22}^Y - 8C_{42}^Y$             | -0.1684 | -0.0617 | Yaw Rotating 試験 |                  |
| $Y'_{uuur}$     | $4C_{31}^Y - 20C_{51}^Y$            | -0.7600 | -1.1476 | Yaw Rotating 試験 |                  |
| $Y'_{vvv r}$    | $4S_{31}^Y + 20S_{51}^Y$            | 1.2436  | 1.5483  | Yaw Rotating 試験 |                  |
| $Y'_{uvvv r}$   | $8S_{41}^Y$                         | 0.1218  | 0.2143  | Yaw Rotating 試験 |                  |
| $Y'_{uuur r}$   | $4C_{32}^Y - 20C_{52}^Y$            | 0.4187  | 0.6223  | Yaw Rotating 試験 |                  |
| $Y'_{uuuur}$    | $8C_{41}^Y$                         | -0.2431 | -0.1142 | Yaw Rotating 試験 |                  |
| $Y'_{vvvrr}$    | $4S_{32}^Y + 20S_{52}^Y$            | -0.2067 | -0.3798 | Yaw Rotating 試験 |                  |
| $Y'_{vvvvv}$    | $-16S_{50}^Y$                       | 0.7757  | 0.8540  | 斜航試験            | 0.650            |
| $Y'_{uvvvrr}$   | $8S_{42}^Y$                         | -0.0565 | -0.1152 | Yaw Rotating 試験 |                  |
| $Y'_{uuur r}$   | $8C_{42}^Y$                         | 0.1166  | 0.0187  | Yaw Rotating 試験 |                  |
| $Y'_{uuuuur}$   | $16C_{51}^Y$                        | 0.4318  | 0.6916  | Yaw Rotating 試験 |                  |
| $Y'_{vvvvv r}$  | $-16S_{51}^Y$                       | -1.1969 | -1.3371 | Yaw Rotating 試験 |                  |
| $Y'_{uuuuur r}$ | $16C_{52}^Y$                        | -0.2353 | -0.3785 | Yaw Rotating 試験 |                  |
| $Y'_{vvvvrr}$   | $-16S_{52}^Y$                       | 0.3071  | 0.3880  | Yaw Rotating 試験 |                  |

### 3.4 推進性能試験

図13に(3.1)式で無次元化した重心まわりの前後力 $X'_G$ とプロペラ推力 $T'_p$ 、プロペラ推力係数 $K_T$ を示す。これらの結果と別途実施した抵抗試験の結果を用いて、プロペラと船体との干渉を表す自航要素の推力減少係数 $(1 - t_p)$ 及び有効伴流係数 $(1 - w_p)$ を求めることができる。 $(1 - t_p)$ は抵抗試験で得られた無次元船体抵抗を $R'_0$ とおくと、(3.14)式により定義される。なお、抵抗試験はプロペラ未装着かつ舵角 $0\text{ deg}$ の舵が有る状態で実施されたものである。また、 $(1 - w_p)$ は $K_T$ とプロペラ単独性能曲線(図6)から推力一致法により与えられるプロペラ流入速度 $V_a$ と船速 $U$ の比として、(3.15)式のように定義される。

$$1 - t_p = \frac{X'_G - R'_0}{T'_p} \tag{3.14}$$

$$1 - w_p = \frac{V_a}{U} \tag{3.15}$$

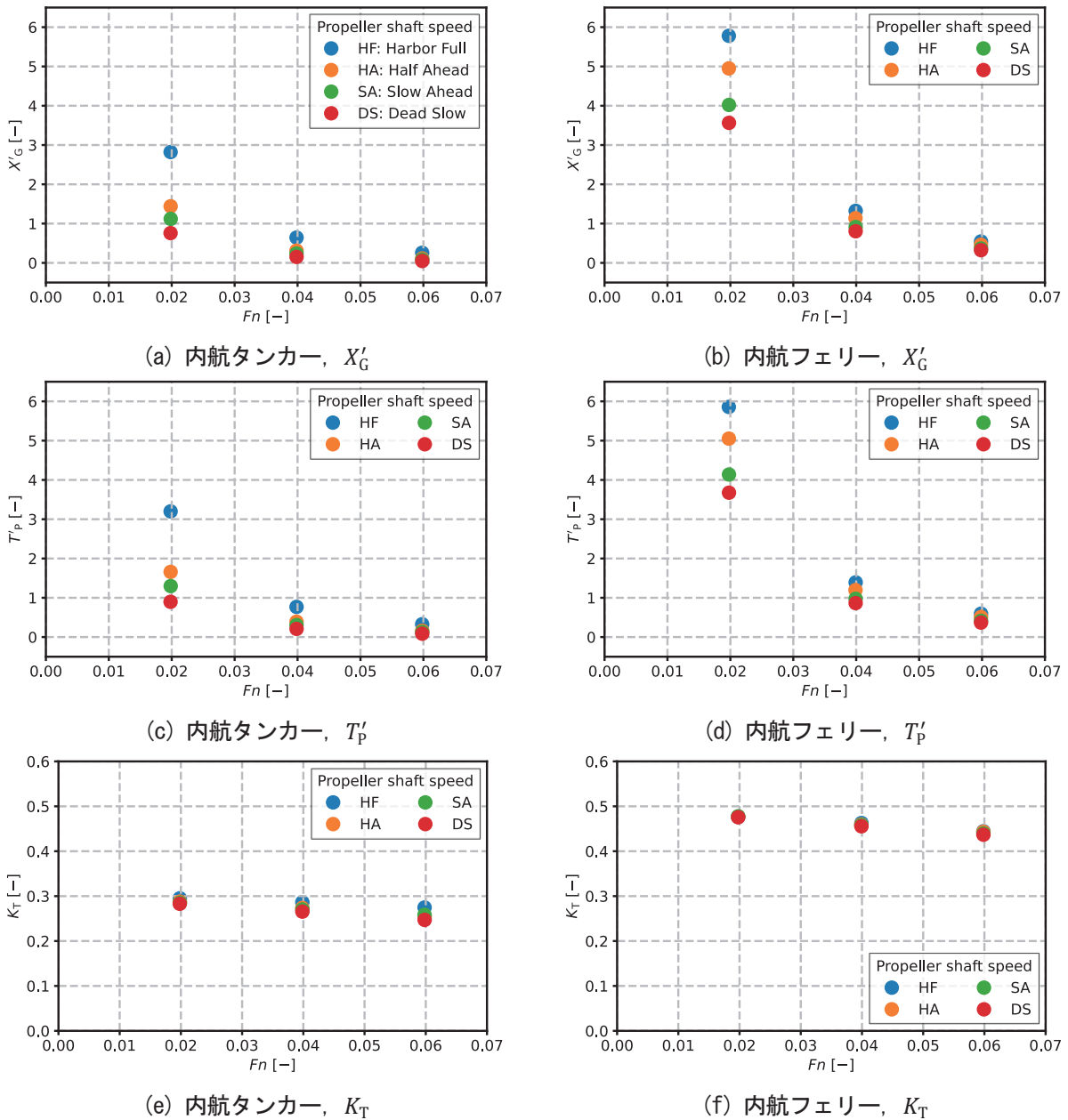


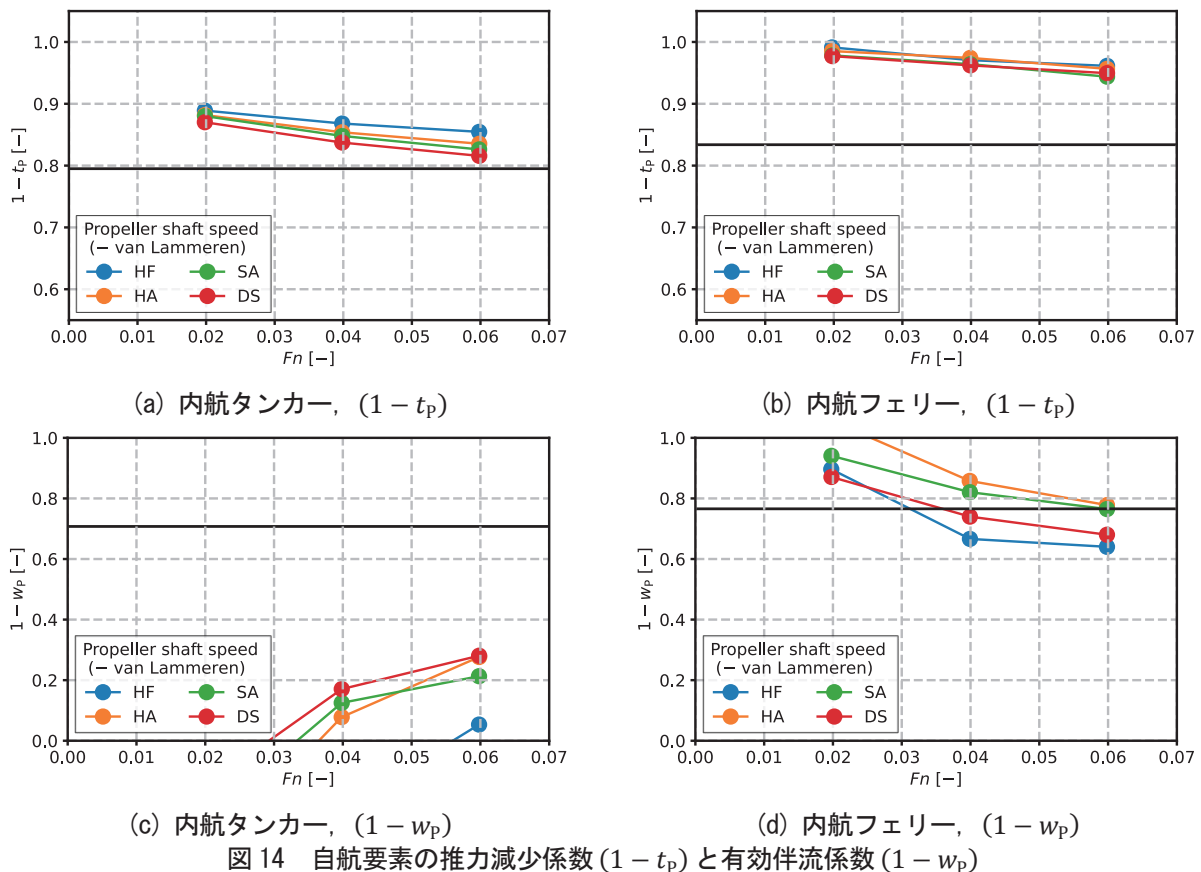
図13 推進性能試験で計測された無次元前後力 $X'_G$ 及び無次元プロペラ推力 $T'_p$ 、プロペラ推力係数 $K_T$

上式により求められた  $(1 - t_p)$  と  $(1 - w_p)$  を図 14 に示す．図中には，自航要素と船型との関係について大まかな傾向を表した van Lammeren の式<sup>16)</sup> ( $t_p = 0.5C_b - 0.15$ ,  $w_p = 0.75C_b - 0.24$ ) による近似値も黒色の実線でプロットしている．内航タンカーと内航フェリーの両船ともにフルード数  $Fn$  が大きくなるにつれて値が収束していく傾向にあることが分かる．これは池畑の論文<sup>17)</sup>にも見られる傾向で，船体が停止状態に近づくにつれ  $(1 - t_p)$  は 1 に漸近し， $Fn$  が 0.1 より小さい極低速域ではこの影響が残るため， $Fn$  が大きくなると一定の値に収束すると考えられる． $Fn \geq 0.04$  における内航タンカーの  $(1 - t_p)$  や内航フェリーの  $(1 - w_p)$  は van Lammeren の式による近似値と比較的に近い値となっているが，その他については大きく外れ，内航タンカーの  $(1 - w_p)$  に関してはマイナスを示すデータや内航フェリーの  $(1 - w_p)$  では 1 を超えるデータも存在している．これらの要因として，使用した模型船が 1948 年に示された van Lammeren の式を構築した際に対象とされた船型から外れている可能性等が考えられる．また，低速域での計測誤差については，計測器の精度やレイノルズ数影響について指摘している文献<sup>18)</sup>もあり，推力一致法では極低速域（前進常数  $J$  が 0 付近）において，その計測誤差が解析結果に大きく反映される．低速域の解析には検討の余地があるかもしれないが，全体の傾向は捉えることができた．

図 14 の黒色実線で示したように，従来の船体主要目から推定されるような自航要素<sup>16)</sup>は，中速域以上の領域で船速やプロペラ回転数によらず一定の値として使われる．本稿で注目するような，プロペラの制御により振れ回りを抑制した際の運動における低速域での自航要素は，船速を変数とするように 1 次式や 2 次式などで近似，もしくは計測点における解析データを補間するような方法で推定することにより，推定精度の向上が見込まれる．また，有効伴流係数  $(1 - w_p)$  については，プロペラ回転数によるばらつきが大きいいため，プロペラ回転数毎に推定式を立てることで，より高精度な推定とすることができる．

### 3.5 ボラードプル及び斜航時推進性能試験

推進性能試験と同様に，ボラードプル及び斜航時推進性能試験と斜航試験の計測結果から各斜航角  $\beta$  に対する自航要素の推力減少係数  $(1 - t_p)$  及び有効伴流係数  $(1 - w_p)$  を求めた．ここでは， $(1 - t_p)$  を定義する(3.14)式に含まれる  $R'_0$  として，同じ斜航角  $\beta$  に対する斜航試験の  $X'_G$  (図 9(a), (b)) を用いて解析し， $(1 - w_p)$  は(3.15)式の



分母に前進速度  $U \cos \beta$  を用いて解析した結果を図15に示す。なお、斜航試験は  $\beta \geq 0 \text{ deg}$  範囲で実施しているため、 $\beta < 0 \text{ deg}$  における  $X'_G$  は偶関数として与えた。また、ここで述べるデータの舵角  $\delta$  は全て  $0 \text{ deg}$  の場合である。 $(1 - t_p)$  は  $\beta$  に対する変化が小さいが、 $(1 - w_p)$  はばらつきが大きく内航タンカーではマイナスを示す結果や内航フェリーでは  $1.0$  を超える結果が現れる。これらの要因として推進性能試験と同様に、推力一致法では極低速域（前進常数  $J$  が  $0$  付近）においてその計測誤差が解析結果に大きく反映されるため、低速域の解析には検討の余地があるかもしれないが、全体の傾向は捉えることができた。

以上より、通常航行では無視されるような低速域での大きな斜航角  $\beta$  における自航要素の変化傾向が得られた。推力減少係数  $(1 - t_p)$  は  $\beta$  による変化が小さく、推進性能試験で得られた直進時の特性をそのまま適用できると考えられる。一方で有効伴流係数  $(1 - w_p)$  については、 $\beta$  の影響が大きく、各プロペラ回転数において計測データを補間した値を用いることで、プロペラの制御により振れ回りを抑制した際の運動特性を反映した推定が期待される。

### 3.6 舵力試験

各試験条件で計測された舵角  $\delta$  に対する無次元舵直圧力  $F'_N$  を線形近似することで、各斜航角  $\beta$  において舵直圧力が  $F'_N = 0$  となる舵角  $\delta|_{F'_N=0}$  と舵角に対する舵直圧力の変化率  $dF'_N/d\delta$  を算出した結果を図16と図17にそれぞれ示す。絶対値が同じ偏角  $\beta$  であってもプロペラの旋回流の影響により、 $\beta > 0 \text{ deg}$  では  $\beta$  に対する変化率が大きく、 $\beta < 0 \text{ deg}$  では小さくなるという傾向の違いが現れている。

舵により船体に作用する前後方向の無次元力  $X'_R$  や横方向の無次元力  $Y'_R$ 、船体重心まわりの無次元回頭モーメント  $N'_R$  は舵直圧力が  $F'_N = 0$  となる各力・モーメント  $(X'_G|_{F'_N=0}, Y'_G|_{F'_N=0}, N'_G|_{F'_N=0})$  に対する変化分となり、(3.16) 式のように表現できる。 $X'_G|_{F'_N=0}$  は、ある舵角  $\delta$  に対し計測された  $X'_G$  を  $\delta$  の2次関数で近似し、そこに  $\delta|_{F'_N=0}$  を代入することで求めた。 $Y'_G|_{F'_N=0}, N'_G|_{F'_N=0}$  も同様である。

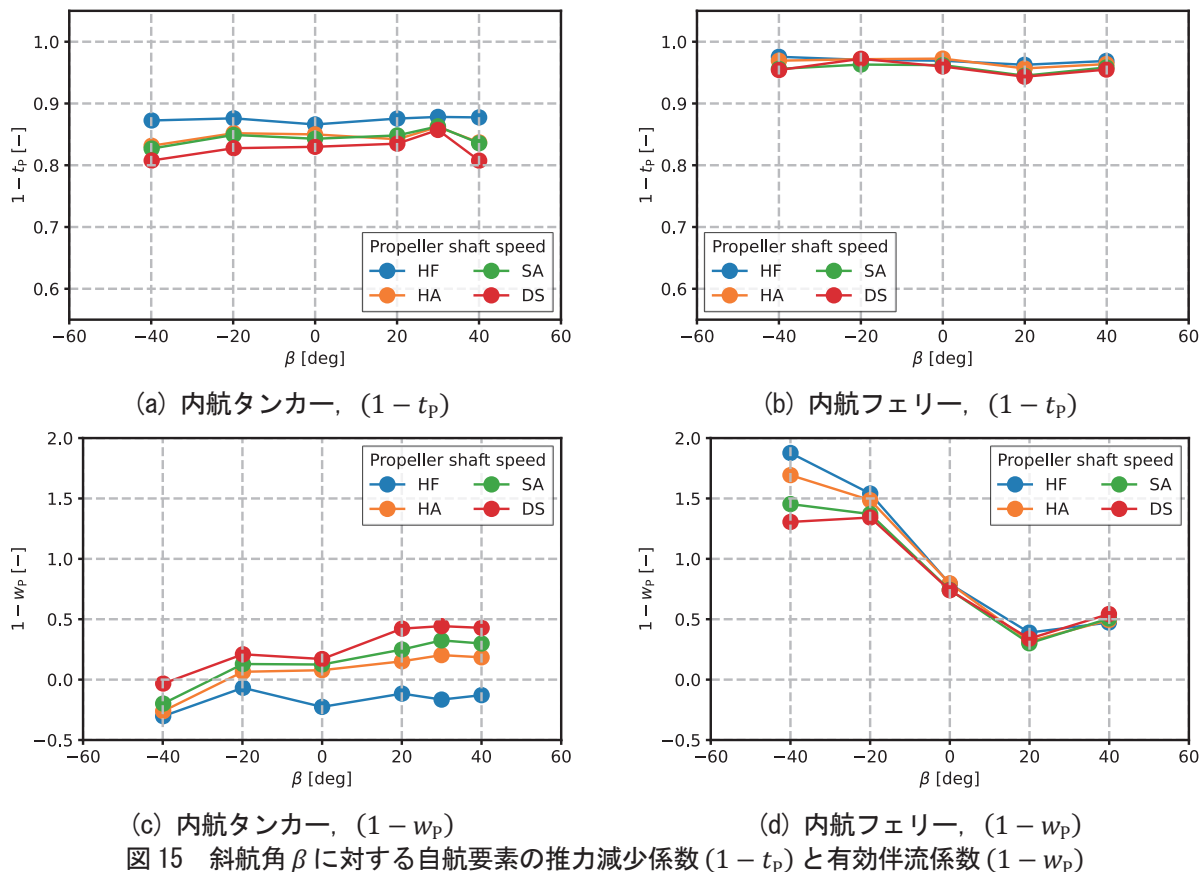
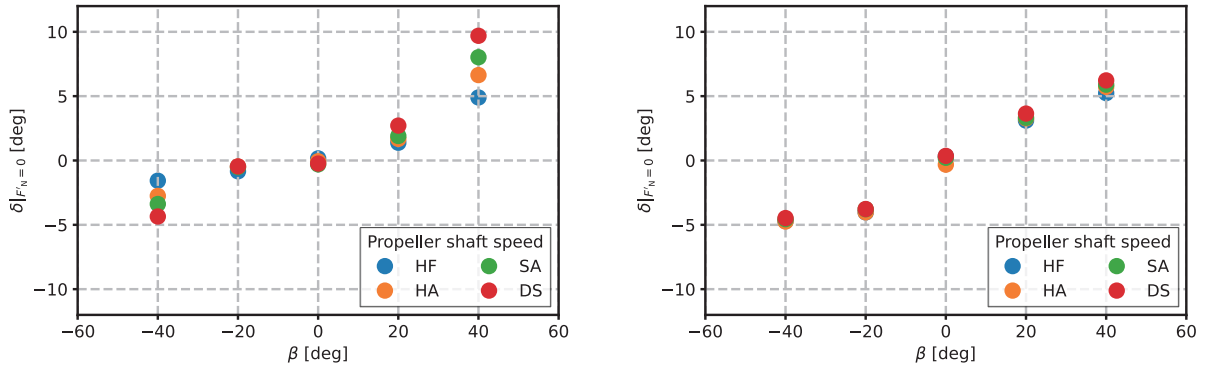
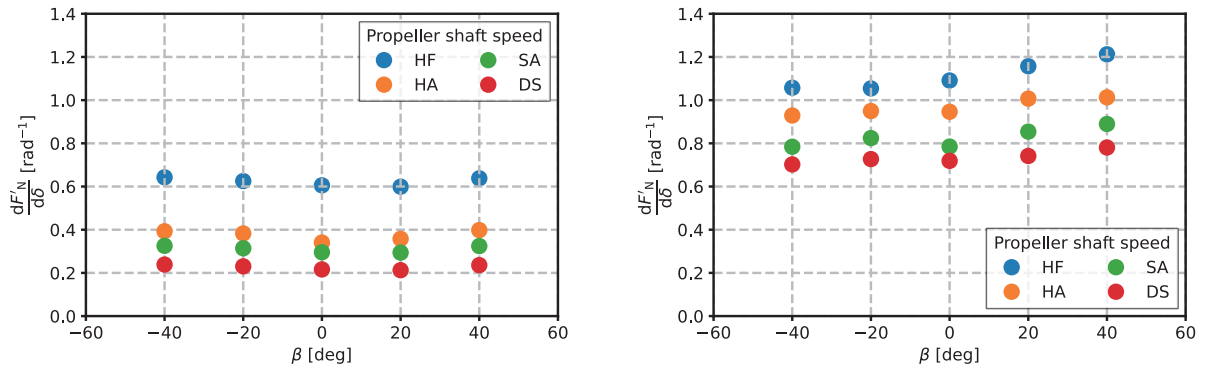


図15 斜航角  $\beta$  に対する自航要素の推力減少係数  $(1 - t_p)$  と有効伴流係数  $(1 - w_p)$



(a) 内航タンカー (b) 内航フェリー  
 図 16  $Fn = 0.04$  での各  $\beta$  における舵直圧力が  $F'_N = 0$  となる舵角  $\delta|_{F'_N=0}$



(a) 内航タンカー (b) 内航フェリー  
 図 17  $Fn = 0.04$  での各  $\beta$  における舵角に対する舵直圧力の変化率  $dF'_N/d\delta$

$$\left. \begin{aligned} X'_R &= X'_G - X'_G|_{F'_N=0} = -(1 - t_R)F'_N \sin \delta \\ Y'_R &= Y'_G - Y'_G|_{F'_N=0} = -(1 + a_H)F'_N \cos \delta \\ N'_R &= N'_G - N'_G|_{F'_N=0} = -(x'_R + a_H x'_H)F'_N \cos \delta \end{aligned} \right\} \quad (3.16)$$

$t_R$  や  $a_H$ ,  $x'_H$  は舵が船体に及ぼす干渉係数であり、それぞれ操舵による抵抗増加係数、船体横力の付加率、船体横力の作用点と船体重心位置との無次元距離 ( $x'_H = x_H/L_{PP}$ ) である。 $x'_R$  は舵直圧力の作用点に関する無次元座標値 ( $x'_R = x_R/L_{PP}$ ) であり、本稿では船体重心まわりのモーメントを考えているため  $x'_R \cong -0.5 + l_{cb}/L_{PP}$  となる。 $t_R$  は操舵によって船体に誘起される前後力成分  $X'_R$  の  $F'_N \sin \delta$  (舵直圧力の船体前後方向成分) に対する増加率であり、例として図 18(a), (b) に示すように各斜航角  $\beta$  及びプロペラ回転数  $n_p$  における解析結果 (回帰直線の傾き) から求めることができる。 $a_H$  と  $x'_H$  についても、 $t_R$  と同様に図 18(c), (d) に示す回帰直線の傾きから(3.16) 式より算出できる。ここで、また、値が小さく一般的に無視されることから舵接線力  $F'_t$  は考慮していない。各試験条件において  $X'_R$  のばらつきが顕著であるが、オーダーが小さい範囲での変化量となるため、計測誤差が強調されていると考えられる。

図 19 に上記で求めた  $Fn = 0.04$  での  $\beta$  に対する舵と船体との干渉係数を示す。また、各干渉係数について船型との関係を簡潔に表現した貴島モデル<sup>15)</sup> ( $1 - t_R = 0.28C_b + 0.55$ ,  $a_H = 2.32C_b^2 - 0.904C_b + 0.0276$ ,  $x'_H = 9.64C_b^2 - 8.22C_b + 0.0077$ ) による近似値も黒色の実線でプロットしている。 $(1 - t_R)$  及び  $a_H$  は、 $\beta$  や  $n_p$  に対し不規則な増減が見られる。 $x'_H$  については、図 18 (e), (f) で示した操舵によって船体に誘起される回頭モーメント成分  $N'_R$  が小さいと考えられるために貴島モデル<sup>15)</sup> による近似値と大きく外れた結果となっている。

以上より、通常航行では想定されないような低速かつ大斜航時における舵が船体に及ぼす干渉係数の傾向を得ることができた。従来の推定式<sup>15)</sup> では表現できないプロペラ回転数や斜航角に対する変化を、図 19 に示すよう



に計測点における解析データを補間して干渉係数の推定に使用することで、操舵により振れ回りを抑制した際の運動の推定精度向上に繋がるものと考えられる。

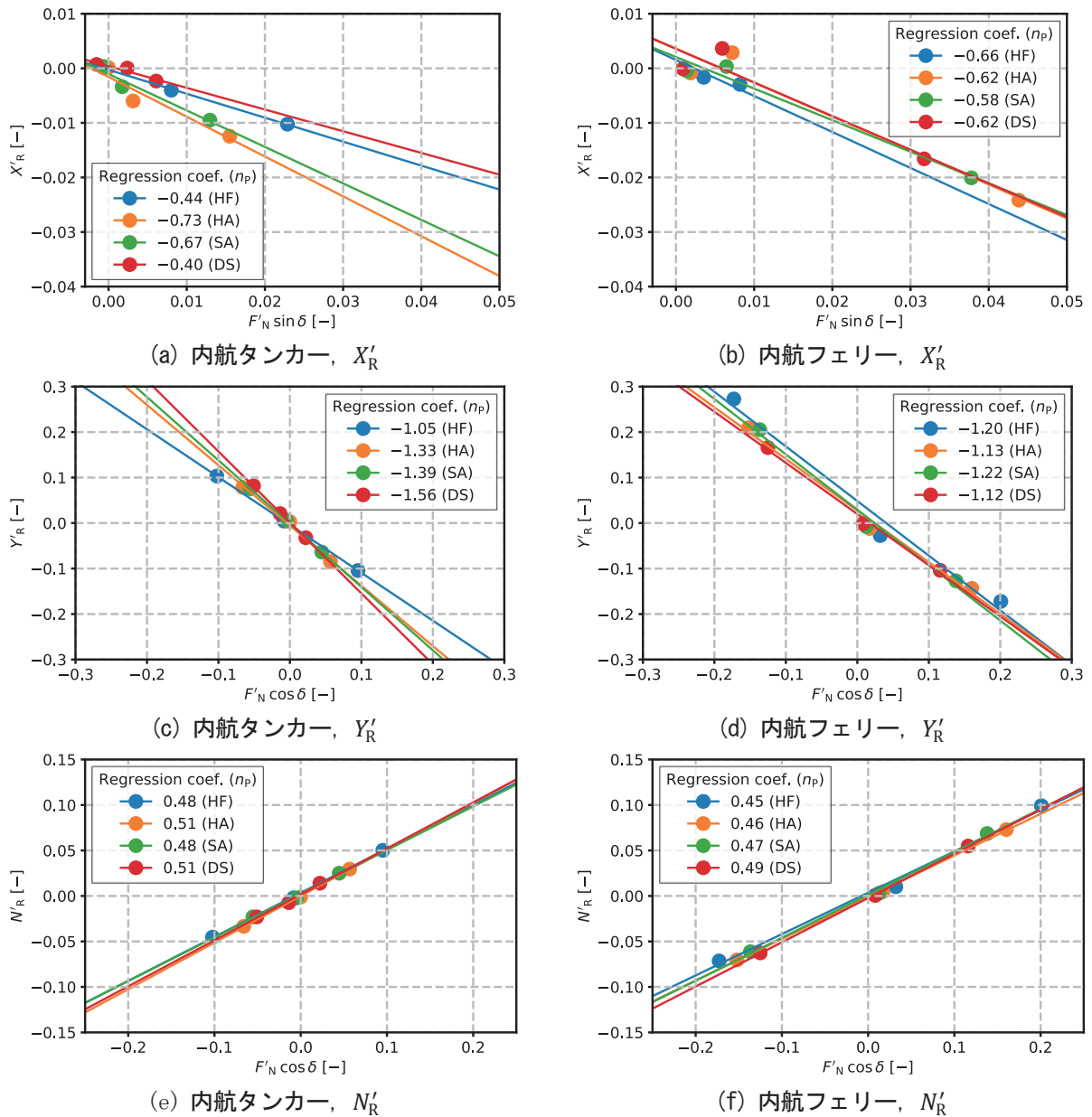


図18  $F_n = 0.04$ ,  $\beta = 40\text{deg}$  での操舵による各方向の力・モーメントと舵力圧力成分の相関

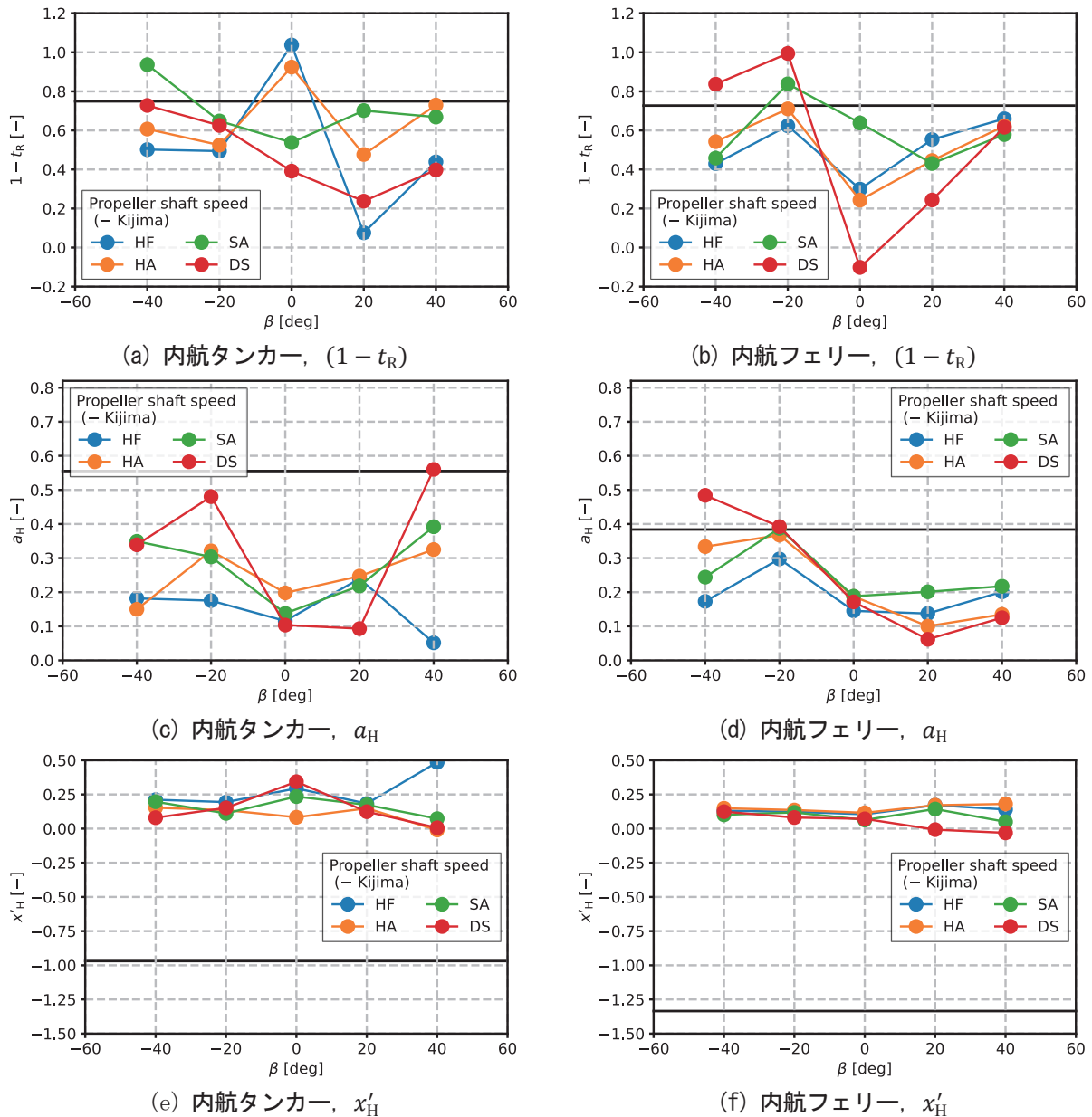


図 19  $Fn = 0.04$  での  $\beta$  に対する舵と船体との干渉係数

#### 4. まとめ

低速時の操縦流体力や振り回り運動時のプロペラ推力、舵力の推定式を再構築するため、走錨リスクが高いと想定される 2 種類の代表的な内航船型であるタンカー及びフェリーに対し、当所の海洋構造物試験水槽において低速時の操縦流体力ならびに舵の偏角を伴う斜航運動を与えた際のプロペラ推力と舵力の計測を実施した。

プロペラ無しの状態を実施したその場回頭試験、斜航試験、Yaw Rotating 試験により得られたデータを解析することで、通常船速向けの従来の推定式ではあまり対象とされてこなかった内航船型に対する低速時の操縦流体力を新しい推定式で示した。また、従来の推定式では中速域以上の通常航行を想定しているため、無次元回頭角速度が比較的小さく、斜航角が  $30 \text{ deg}$  程度までの範囲で推定モデルが構築されている。よって、振り回り運動で考えられる無次元回頭角速度が比較的大きく、斜航角が  $180 \text{ deg}$  を超えるような範囲まで従来の推定式は援用できないが、本稿で示した新しい推定式では適切な表現が可能となっている。

プロペラを装着した状態においては、推進性能試験とボラードブル及び斜航時推進性能試験により低速域における船速や斜航角、プロペラ回転数に対する自航要素の変化を示した。また、舵力試験によって低速域における斜航角に対する舵と船体との干渉係数を示した。ただし、低速域の解析には検討の余地があるかもしれないが、全体の傾向は捉えることができた。船体主要目から推定される通常船速向けの従来の推定方法では、船速やプロペラ回転数、斜航角に依存しない中速域以上の自航要素や干渉係数が得られるが、本稿で示されたような船速や斜航角、プロペラ回転数による変化は表現できない。振れ回り運動で代表されるような低速域では、各種試験により得られたデータを補間して自航要素や干渉係数を推定する方法が考えられる。

以上より、通常船速向けの従来の推定方法を適用できない低速域での大きな斜航角や無次元回頭角速度において、本稿で示した方法によって船体に作用する流体力及びプロペラ推力、舵力を推定することで、錨泊船の振れ回り運動やプロペラと舵の保針制御により振れ回りを抑制した際の船体運動の推定精度の向上が期待できる。また、本稿は一般的な内航タンカー船型及び内航フェリー船型、プロペラ、舵を対象としているので、示したデータの汎用的な利用が望まれる。

## 謝 辞

本研究は国土交通省海事局から受託した「走錨リスク判定システムの確立のための調査事業」の一環として実施した。関係各位に謝意を表す。

## References

- 1) Akinori Yumuro: Some Experiments on Maneuvering Hydrodynamic Forces in Low Speed Condition, Journal of the Kansai Society of Naval Architects, Vol. 209 (1988), 209, pp.91-101, (In Japanese).
- 2) Junshi Takashina: Ship Maneuvering Motion due to Tugboats and Its Mathematical Model, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 160 (1986), pp.93-102, (In Japanese).
- 3) Keiichi Karasuno, Kunisaburo Yoneta and Syunji Januma: A New Mathematical Model of Hydrodynamic Force and 'Moment Acting on a Hull in Maneuvering Motion at Slow speed and Oblique Direction, Journal of the Kansai Society of Naval Architects, Vol. 209 (1988), pp.111-122, (In Japanese).
- 4) Yasuo Yoshimura: Mathematical Model for the Manoeuvring Ship Motion in Shallow Water (2nd Report) Mathematical Model at Slow Forward Speed, Journal of the Kansai Society of Naval Architects, Vol. 210 (1988), pp.77-84, (In Japanese).
- 5) Keinosuke Honda: Ship Handling (Revised Edition) Chapter 4: Port Entry Maneuvering and Anchoring Method (1989), pp.95-135, Seizando-Shoten Publishing, (In Japanese).
- 6) The Japan Association of Marine Safety: Preventive measures for dragging anchor marine accidents, Sea and Safety, No. 579 (2018), 58pp, (In Japanese).
- 7) The Japan Ship Owners' Mutual Protection & Indemnity Association: Preventing an Anchor from Dragging, P&I Loss Prevention Bulletin, Vol. 25 (2013), 32pp.
- 8) Hironori Yasukawa and Yasuo Yoshimura: Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions, Journal of Marine Science and Technology, Vol. 20 (2015), pp.37-52.
- 9) Kazuhiro Yukawa: Ocean Engineering Basin at NMRI - Basis of and Model Test for Safety Evaluation, Marine Engineering, Vol. 49 No. 3 (2014), pp.57-62, (In Japanese).
- 10) Kyoungso Son and Kensaku Nomoto: On the Coupled Motion of Steering and Rolling of a High Speed Container Ship, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 150 (1981), pp.232-244, (In Japanese).
- 11) Hironori Yasukawa and Yasuo Yoshimura: Naval Architecture and Ocean Engineering Series 3: Ship Maneuverability (2012), 170pp, the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, (In Japanese).

- 12) Research Committee P29: Report for Standardization of Ship Maneuverability Prediction Model (2012), 104pp, the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, (In Japanese).
- 13) Koichi Yokoo, Hajime Takahashi, Hiraku Tanaka, Hiroyuki Kadoi, Hiromitsu Kitagawa, Yukio Takei, Takayasu Ueda, Yoshiro Kawakami and Chikara Arai: On the Mitaka No. 3 Ship Model Experiment Tank of the Ship Research Institute, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 132 (1972), pp.117-127, (In Japanese).
- 14) OCIMF (Oil Companies International Marine Forum): Mooring Equipment Guidelines 3rd Edition (2008), pp.175-204, Witherby Seamanship International.
- 15) Katsuro Kijima, Toshiyuki Katsuno, Yasuaki Nakiri and Yoshitaka Furukawa: On the manoeuvring performance of a ship with the parameter of loading condition, Journal of The Society of Naval Architects of Japan, Vol. 168 (1990), pp.141-148.
- 16) Seiko Ogiwara, Saburo Yamasaki, Yasuo Yoshimura and Hiroyuki Adachi: Naval Architecture and Ocean Engineering Series 11: Ship Performance Design (2013), 274pp, the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, (In Japanese).
- 17) Mitsuhsa Ikehata: Some Results of Self-Propulsion Test of a Ship Model Supplied with Skin Friction Correction by Thrust of Water Jet, Journal of the Kansai Society of Naval Architects, 1981, Vol. 182 (1981), pp.29-37, (In Japanese).
- 18) Junichi Fujisawa, Daisuke Wako and Chiharu Kawakita: Propulsion Performance of a Slow Blunt Ship in Oblique Motion, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol. 33 (2021), pp.1-11, (In Japanese).