

斜航流体力に基づいた主船体流体力の推定とその操縦運動への影響*1

学生会員 三好 潤 *2, 正会員 烏野 慶一 *2;
学生会員 岡野 誠司 *2, 正会員 前川 和義 *2

Prediction of Maneuvering Hydrodynamic Forces and the Steering Motions Based on the Oblique Hydrodynamic Forces

By Jun MIYOSHI (*Student Member*), Keiichi KARASUNO (*Member*),
Seiji OKANO (*Student Member*) and Kazuyoshi MAEKAWA (*Member*)

The authors had developed a component-type mathematical model of hydrodynamic forces acting on a ship hull in steering motion that is deduced from the simplified vortex model. This mathematical model describes the hydrodynamic forces X , Y and N with small to large drift angles, and it is also applicable to changing trim and loaded condition of a ship.

This paper describes a prediction method of ship maneuvering hydrodynamic forces with small to large drift angles by oblique hydrodynamic forces and the estimated results of the steering motion using the hydrodynamic forces expressed by the component-type mathematical model. On this estimation, the expressions proposed in this paper to estimate some hydrodynamic characteristic constants are used.

Through these investigation, it has been found that the component-type mathematical model can predict hydrodynamic forces with small to large drift angles and the steering motion only through oblique hydrodynamic forces. This method will be useful to predict maneuvering behavior at initial design stage or in the case of few of sea trial data available.

Keywords : *Oblique Hydrodynamic Forces, a Component-type Mathematical Model, Hydrodynamic Characteristics, Estimation of Hydrodynamic Forces, Maneuvering Motion*

1. 緒言

船舶の操縦性研究においては、港湾内の安全確保が問題となることが多い。港湾内においては低速で航行し風や潮流といった外乱の影響を受けやすく、殊に離着棧といった状況下では横流れの大きな操縦運動を行う。このような横流れの大きな操縦運動をする際に船体に働く操縦流体力を表現するモデルとして、著者らはこれまで成分分離型数学モデル¹⁾の研究を行ってきた。成分分離型数学モデルは大斜航範囲の操縦流体力を表現でき、また大斜航範囲の流体力を解析することによって、旋回流体力を推定できるという特長をもっている。

これまでは広い斜航角範囲 ($\beta \leq 90^\circ$) の斜航流体力解析から、純旋回 ($\beta = 0^\circ$) および横行旋回 ($\beta = 90^\circ$) の流体力をある程度精度よく推定できることを示してきた¹⁾。しかし、従来から一般に行われる操縦流体力の計測はCMTやPMM試験などでも限られた斜航角範囲のデータを得るものが多く、必ずしも $\beta \leq 90^\circ$ といった広範囲の斜航流体力が得られるわけではない。したがって本数学モデルをこれらの実験データに使用する場合、限られた斜航角範囲の流体力データからどの程度の精度で操縦流体力の推定結果が得られるのかを検討しておくことは重要であると思われる。また近年操縦流体力の推定にも使用され始めているCFD手法による狭い斜航角範囲の計算結果を利用する状況も予想される。

そこで本研究では、斜航角範囲が異なる数種類の斜航流体力データを成分分離型数学モデルで解析して、

*1 平成14年11月15日 造船三学会秋季連合大会において講演, 原稿受付 平成14年11月29日

*2 北海道大学大学院水産科学研究科

旋回を含む操縦運動時の主船体操縦流体力を推定し、解析に用いる斜航角範囲の違いがその推定精度に及ぼす影響について検討した。また、船舶の初期計画段階のことを考えて、斜航流体力の計測結果を用いずに船体主要目やこれまでさまざまな船型を対象に蓄積してきた解析結果のデータベースを用いて操縦流体力推定を試みた結果についても示す。

更にこれらの結果を用いて、成分分離型数学モデルではこれまで多くは扱ってこなかった操縦運動シミュレーションを行い、斜航流体力の解析範囲に伴う操縦流体力の推定精度が操縦運動のシミュレーション結果に及ぼす影響を検討した。

2. 供試船

本研究では、供試船としてVLCC (Esso Osaka)²⁾³⁾⁴⁾、PCC⁵⁾⁶⁾及びTrawler⁷⁾⁸⁾の3種類の船型を対象とした。これらの主要目をTable 1に示す。なおTrawlerは小さいL/Bと大きなトリムを有する北欧型漁船である。

Table 1 Principal particulars of ship models.

	VLCC	PCC	Trawler
L_{pp} (m)	4.0	3.0	1.6
B (m)	0.652	0.536	0.617
d_m (m)	0.285	0.137	0.300
C_b	0.830	0.547	0.622
t/d_m	0.000	0.000	0.263

3. 運動方程式と流体力モデル

操縦運動の運動方程式はFig.1の座標系を用いて以下のように船体中央周りで表現する。

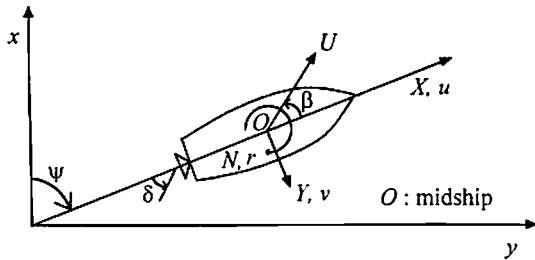


Fig. 1 Co-ordinate system fixed in ship.

$$\begin{aligned}
 \text{Surge: } & (m + m_x) \cdot du/dt \\
 & - m \cdot (v \cdot r + x_G \cdot r^2) \\
 & = X_H + X_P + X_R \\
 \text{Sway: } & (\dot{m} + m_y) \cdot dv/dt \\
 & + (m \cdot x_G + m_y \cdot x_t) \cdot dr/dt \\
 & + m \cdot u \cdot r \\
 & = Y_H + Y_R \\
 \text{Yaw: } & (I_{zz} + m \cdot x_G^2 + J_{zz} + m_y \cdot x_t^2) \cdot dr/dt \\
 & + (m \cdot x_G + m_y \cdot x_t) \cdot dv/dt \\
 & + m \cdot x_G \cdot u \cdot r \\
 & = N_H + N_R
 \end{aligned} \tag{1}$$

ここで

- m_x, m_y, J_{zz} : 付加質量および付加慣性モーメント
- x_G, x_t : 船体重心および m_y 付加質量中心の前後位置
- X_H, Y_H, N_H : 定常運動時の主船体流体力
- X_R, Y_R, N_R : 舵力
- X_P : プロペラ力

(1)式右辺の定常運動時の主船体流体力はこれまで著者らが扱ってきた成分分離型数学モデル¹⁾を用いて次のように表現する。

$$\begin{aligned}
 X_H &= X_I + X_{L_v} + X_{D_i} + X_C + X_C^* + X_F \\
 Y_H &= Y_I + Y_{L_v} + Y_{D_i} + Y_C \\
 N_H &= N_I + N_{L_v} + N_{D_i} + N_C
 \end{aligned} \tag{2}$$

ここで

- X_I, Y_I, N_I : 理想流体力
- $X_{L_v}, Y_{L_v}, N_{L_v}$: 粘性揚力
- $X_{D_i}, Y_{D_i}, N_{D_i}$: 誘導抗力
- X_C, Y_C, N_C, X_C^* : クロスフロー流体力
- X_F : 船体前後摩擦力

なお本論文で述べる流体力等の無次元化は以下のように行った。

$$\begin{aligned}
 m'_x, m'_y &= m_x, m_y / (1/2 \cdot \rho \cdot L_{pp}^2 \cdot d_m) \\
 J'_{zz} &= J_{zz} / (1/2 \cdot \rho \cdot L_{pp}^4 \cdot d_m) \\
 X', Y' &= X, Y / (1/2 \cdot \rho \cdot L_{pp} \cdot d_m \cdot U^2) \\
 N' &= N / (1/2 \cdot \rho \cdot L_{pp}^2 \cdot d_m \cdot U^2)
 \end{aligned}$$

また、プロペラ、舵力⁹⁾は以下のように表現する。

$$\begin{aligned}
 X_P &= -(1-t) \cdot \rho \cdot K_T \cdot n_P^2 \cdot D_P^4 \\
 X_R &= -(1-t_R) \cdot F_N \cdot \sin \delta \\
 Y_R &= -(1+a_H) \cdot F_N \cdot \cos \delta \\
 N_R &= -(x_R + a_H \cdot x_H) \cdot F_N \cdot \cos \delta
 \end{aligned} \tag{3}$$

ここで

$$K_T = C_1 + C_2 \cdot J_P + C_3 \cdot J_P^2$$

J_P	: 前進常数
C_1, C_2, C_3	: 定数
t	: 推力減少率
n_P	: プロペラ回転数
D_P	: プロペラ直径
t_R	: 舵付加抵抗係数
a_H	: 舵横付加力の舵直圧力に対する付加率
x_R	: 舵直圧力の作用点の前後位置
x_H	: 舵横付加力の作用点の前後位置
δ	: 舵角

(3) 式の中で舵直圧力 F_N は VLCC, PCC については通常舵であるので以下のように表現する。

$$F_N = 1/2 \cdot \rho \cdot f_a \cdot A_R \cdot U_R^2 \cdot \sin \alpha_R \quad (4)$$

一方, Trawler についてはフラップ舵を装備しているため以下のように表現する¹⁰⁾。

$$F_N = 1/2 \cdot \rho \cdot f_a \cdot A_R \cdot U_R^2 \cdot \sin\{\alpha_R + (k_f(\delta) - 1) \cdot \delta\} \quad (5)$$

ここで

f_a	=	$\frac{6.13 \cdot A_R}{A_R + 2.25}$
A_R	:	舵のアスペクト比
A_R	:	舵面積
U_R	:	舵における流入速度
α_R	:	舵への流入角
$k_f(\delta)$:	フラップ舵利得

4. 主船体操縦流体力の推定

成分分離型数学モデルは前後力 X_H , 横力 Y_H , 回頭モーメント N_H をそれぞれ独立して扱っておらず, これまでの研究から大斜航角を持った流体力をも表現できて, 更に斜航流体力解析を用いて旋回流体力を推定できるという特長を持っている。第1および第3番目の特長は成分分離型数学モデルに含まれている旋回時の流力特性係数を $C_{c_v} = 2/3$, また $\alpha_L = 1$ 等とすることにより¹¹⁾, 斜航角 $\beta \leq 90$ deg の斜航流体力解析から純旋回 ($\beta = 0^\circ$) および横行旋回 ($\beta = 90^\circ$) の流体力を精度よく推定してきた。また本モデルはトリム時の流体力も流力特性係数を変えずに前後吃水だけで推定可能であり, 更に Ballast Trim から Full Even の主船体流体力の推定やその逆の推定を行うことができる特長を持つ¹¹⁾。

本節では, 成分分離型数学モデルを用いて解析範囲の異なる数種の斜航流体力解析結果から旋回を含む大斜航操縦流体力の推定を行い, その推定精度について

検討する。また, これに加えて斜航流体力の実験データが無い場合であっても操縦流体力の推定が行えるよう, 船体主要目およびデータベースに基づいて本モデルの流力特性係数ならびに操縦流体力を推定し同様の検討を行う。なお, 本論文の成分分離型数学モデルでは基本的な流力特性係数の m'_x, m'_y, C_F を除くと斜航流体力を表現する際は7個の流力特性係数 ($C'_{Lj}, C'_{La}, C'_{DLc}, C'^2_{c'}, p, C'_{DLf}, C'_{DLfc}, C'_c, C'_{DLm}, C'_c$) が用いられ, これに旋回が加わるとさらに6個の流力特性係数 ($C_{c_v}, \alpha_L, C_{c_v}, \alpha_C, C_{LASf}, C_{LASa}$) が表現に加わる。ここでは, これらのうち斜航に関する7個の流力特性係数を斜航流体力データ等から定め, 残りの旋回に関する6個の流力特性係数は後述するデータベースを用いて推定している。

まず斜航流体力の解析範囲による操縦流体力推定精度の影響について以下に示す4種類の状態 (a)~(d) を設定し, 斜航流体力の解析結果と旋回流体力の推定結果を実験値と比較した図をそれぞれ Fig.2(a)~(d) に示す。なお, 計算対象にはすべて VLCC を用いている。

(a) 大斜航角 ($\beta \leq 90^\circ$) の斜航流体力

成分分離型数学モデルに含まれる斜航に関する7個の流力特性係数を実験値から精度よく求めるためには $\beta \leq 90^\circ$ の斜航流体力が必要である。

(b) 中斜航角 ($\beta \leq 30^\circ$ と $\beta = 90^\circ$) の斜航流体力

$\beta \leq 30^\circ$ の斜航流体力は PMM 試験の場合, 大振幅 PMM を行うことによって得られるものである。これに成分分離型数学モデルにおけるクロスフロー抗力の係数 $C_{DLc} \cdot C'^2_{c'}$ を精度よく求めるために, $\beta = 90^\circ$ の斜航流体力を加える。

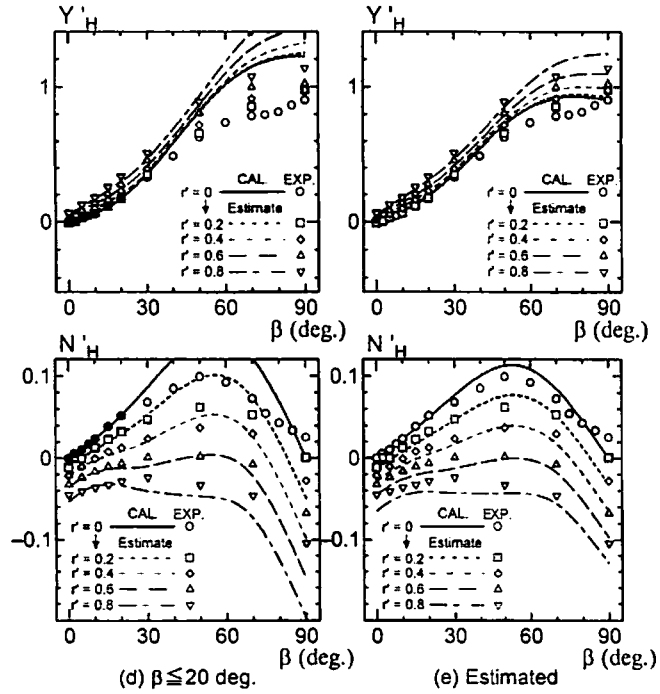
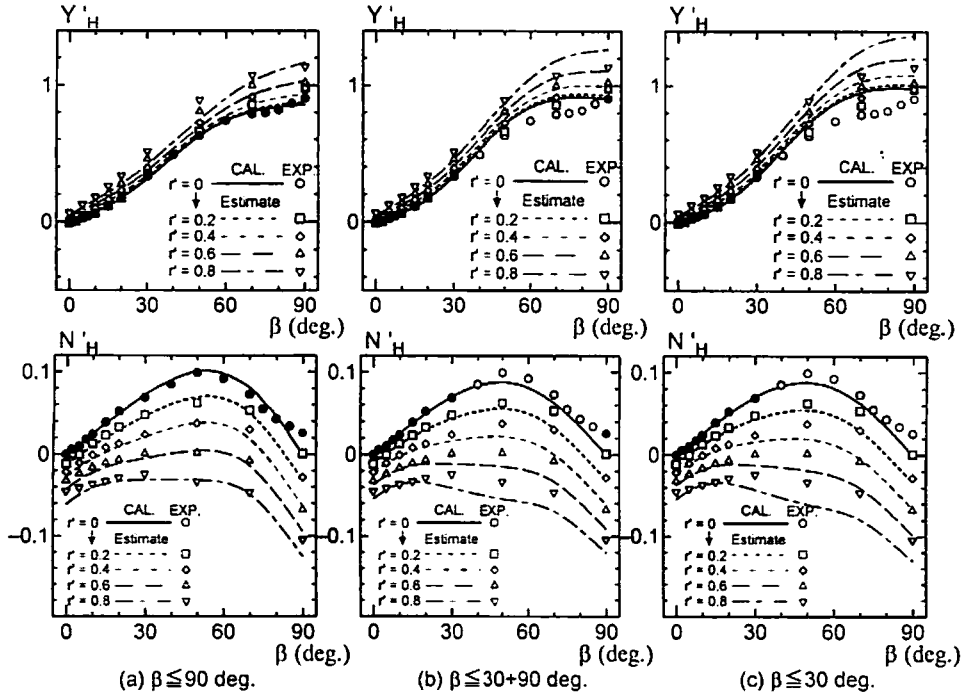
(c) 中斜航角 ($\beta \leq 30^\circ$) の斜航流体力

$\beta = 90^\circ$ といった大斜航のデータが無く, どの程度の範囲の斜航流体力があれば旋回を含む大斜航操縦流体力を推定できるかを検討する。

(d) 通常航行時の斜航角 ($\beta \leq 20^\circ$) の斜航流体力

$\beta \leq 20^\circ$ における斜航流体力は通常航行時の前進速度の大きな操縦運動を推定する際に必要となる。

ここで (a) から (d) の場合について斜航流体力の解析範囲の違いによる大斜航操縦流体力の推定精度をみると, Fig.2 (a), (b) および (c) では, 実験値と比べ旋回を含む大斜航操縦流体力を大略推定できているが, (d) の $\beta \leq 20^\circ$ の場合では Y'_H, N'_H とともに実験値から大きくはずれ, 特に β が 30° を超える大斜航角範囲では過大な評価をしてしまうことがわかった。この原因を調べるため, 斜航流体力解析結果における流体力成分の内訳を比較した。その図を Fig.3 に示す。



● data used for analysis ○ □ △ ▽ data not used for analysis

Fig. 2 Analyzed and estimated hydrodynamic forces of VLCC with changing analysis ranges of drift angle.

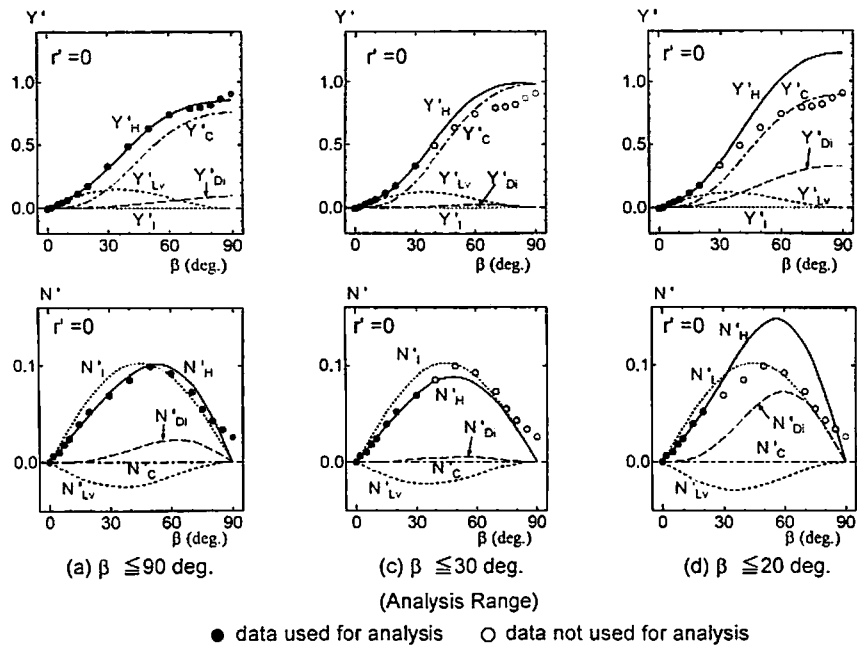


Fig. 3 The influence on accuracy of estimation in the components of hydrodynamic forces of VLCC with changing analysis ranges of drift angle.

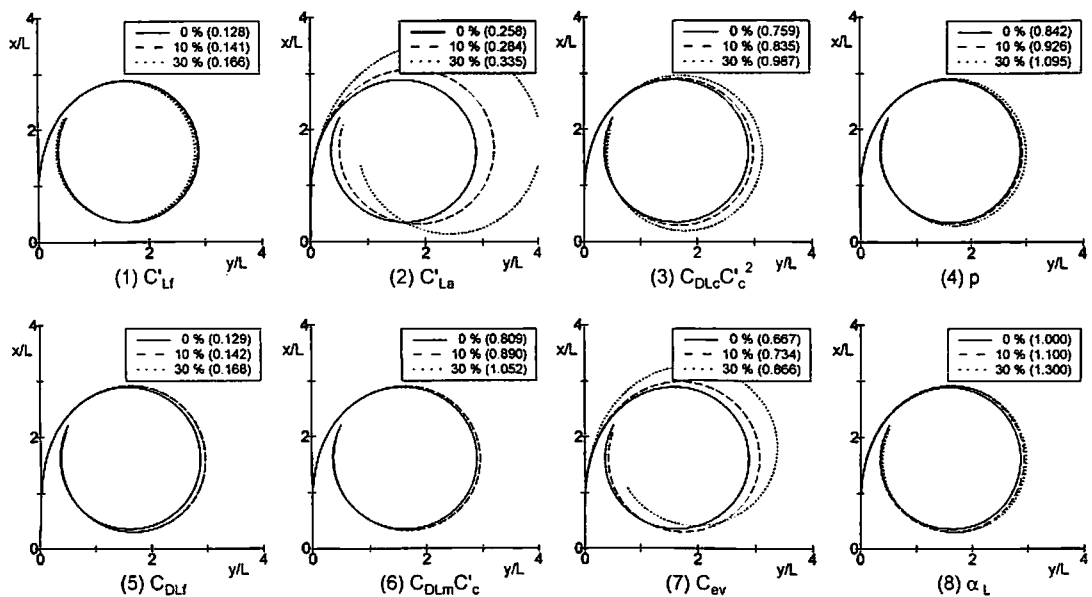


Fig. 4 Turning trajectories of VLCC due to rudder angle 35 degree with changing numerical value of hydrodynamic characteristics.

なお Fig.2, Fig.3 の図中の白抜きの丸印は実験値を表し、そのうち解析に用いたデータを黒い丸印で区別している。Fig.3 (a), (c), (d) はそれぞれ $\beta \leq 90^\circ$, $\beta \leq 30^\circ$, $\beta \leq 20^\circ$ の範囲による斜航流体力の解析結果を示したもので、Fig.2 (a), (c), (d) の $r' = 0$ の場合と対応している。これらの各成分を比較すると、最もフィッティングの精度が良い (a) に比べて、(d) では誘導抗力成分の推定精度が不十分であることがわかる。これは本来、大斜航角で大きく働く誘導抗力を小斜航角範囲 ($\beta \leq 20^\circ$) の斜航流体力から推定したことが原因であると思われる。しかし、通常航行時に相当する斜航角範囲 ($\beta \leq 30^\circ$) までであればいずれの場合も旋回時も含めて大略推定できている。

以上のことから、大斜航角範囲の流体力推定には、 $\beta \leq 30^\circ$ 程度の流体力データと旋回時の流力特性係数のデータベースを用いることで、精度良く推定できることがわかった。

これまでは斜航実験データを用いて操縦流体力の推定を行ったが、次に実験データが無い場合についての操縦流体力の推定を検討する。

(e) 船体主要目とデータベースからの推定

小型船舶など流体力データのない船舶に於いて、海難事故原因調査などの目的で海上公試で得られたある種の操縦運動データから別種の運動を推定しようとする際、船体主要目等から操縦流体力を推定し別種の操縦運動をシミュレートする場合がある。この時、主船体操縦流体力が問題でそれを成分分離型数学モデルを用いて推定するには、前述したように数学モデルに含まれる斜航に関する7個の流力特性係数と旋回に関する6個の流力特性係数の推定が必要である。ここで、これらの流力特性係数のうちの係数が操縦運動に大きな影響を与えるか感度調査した上でそれぞれの推定法を述べていくことにする。

VLCCの斜航試験とCMTの流体力解析によって得られた流力特性係数を10~30%変化させ、それぞれの流力特性係数の変化が舵角 35° の定常旋回運動に及ぼす影響を調べた結果をFig.4に示す。()内はシミュレーションに用いた値である。ただし X_H 力の実験値がないため $C_{DLm} \cdot C'_c$ についてはデータベースによる推定値を用いている。Fig.4に示すシミュレーション結果等から13個の流力特性係数のうち粘性揚力の C'_{La} 、クロスフロー抗力の $C_{DLc} \cdot C'_c{}^2$ 、旋回時の有効速度係数 C_{ev} が運動に大きな影響を与えることがわかった。なお、Fig.4には掲載していないが、その他の流力特性係数 $C_{DLfc} \cdot C'_c$ 等は大きな影響を与えなかった。このことから運動に大きな影響を与える3つの流力特性係数 C'_{La} , $C_{DLc} \cdot C'_c{}^2$, C_{ev} については、船体要目やデー

タベースを用いて推定する際、精度の良い推定法が求められる。これを踏まえて、すべての流力特性係数についてそれぞれ次のように推定すれば良いと考える。

1) 線形流力特性係数 C'_{Lj} , C'_{La} , C_{ev} , α_L

線形斜航流力係数 Y'_β , N'_β と深く関わる粘性揚力に関する流力特性係数 C'_{Lj} , C'_{La} はこれまでの研究から以下の関係式を用いることで推定することができる¹¹⁾。

$$\begin{aligned} C'_{Lj} &= \frac{x'_j \cdot Y'_\beta + N'_\beta - m'_y + m'_x}{2 \cdot x'_j \cdot d_j / d_m} \\ C'_{La} &= \frac{x'_j \cdot Y'_\beta - N'_\beta + m'_y - m'_x}{2 \cdot x'_j \cdot d_a / d_m} \end{aligned} \quad (6)$$

ただし Y'_β , N'_β は次に示す貴島ら⁹⁾による等吃水時の推定式を用いて推定することができる。

$$\begin{aligned} Y'_\beta &= \frac{1}{2} \pi k + 1.4 C_b B / L \\ N'_\beta &= k \end{aligned} \quad (7)$$

ただし、 $k = 2 \cdot d_m / L_{pp}$, $x'_j = 0.5$ である。

ここで先に述べたように、 C'_{La} は操縦運動に大きな影響を及ぼす流力特性係数であるため精度よく求める必要があるが、 Y'_β , N'_β および m'_x , m'_y が貴島らの推定式および元良チャート等により精度よく求めることができるため、上式によって精度よく求めることができる。

次に、線形旋回流力係数 Y'_β , N'_β と深く関わる粘性揚力に関する流力特性係数 C_{ev} , α_L は Fig.5 に示すデータベースから $C_{ev} = 2/3$, $\alpha_L = 1$ ¹⁾ とする。

2) 非線形流力特性係数

その他の流力特性係数は非線形範囲の流体力に関する係数である。本論文ではこれらを Fig.6 に示すデータベースから導いた次に示す (8) 式を推定式の一例として用いた。

$$\begin{aligned} C_{DLc} \cdot C'_c{}^2 &= -0.027 \cdot (C_b L / d) + 1.166 \\ p &= 0.027 \cdot (C_b L / d) + 0.571 \\ C_{DLm} \cdot C'_c &= 0.016 \cdot (C_b L / d) + 0.610 \\ C_{DLj} &= -0.003 \cdot (C_b L / d) + 0.106 \\ C_{DLfc} \cdot C'_c &= 0.021 \cdot (C_b L / d) + 0.051 \\ C_{evc} &= -0.001 \cdot (C_b L / d) + 0.172 \\ \alpha_c &= 8.0 \end{aligned} \quad (8)$$

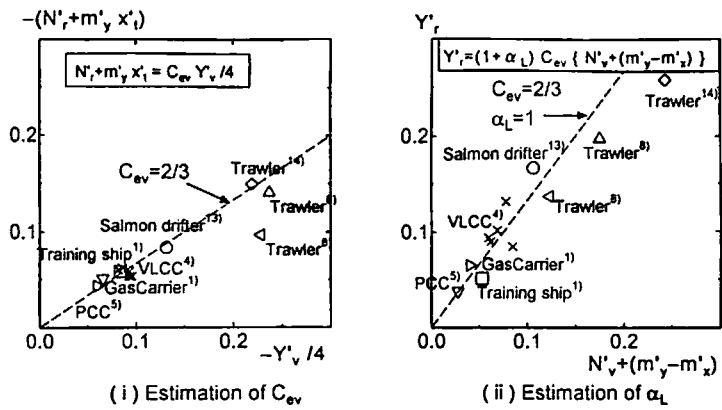


Fig. 5 Estimation of linear turning hydrodynamic characteristics C_{ev} and α_L .

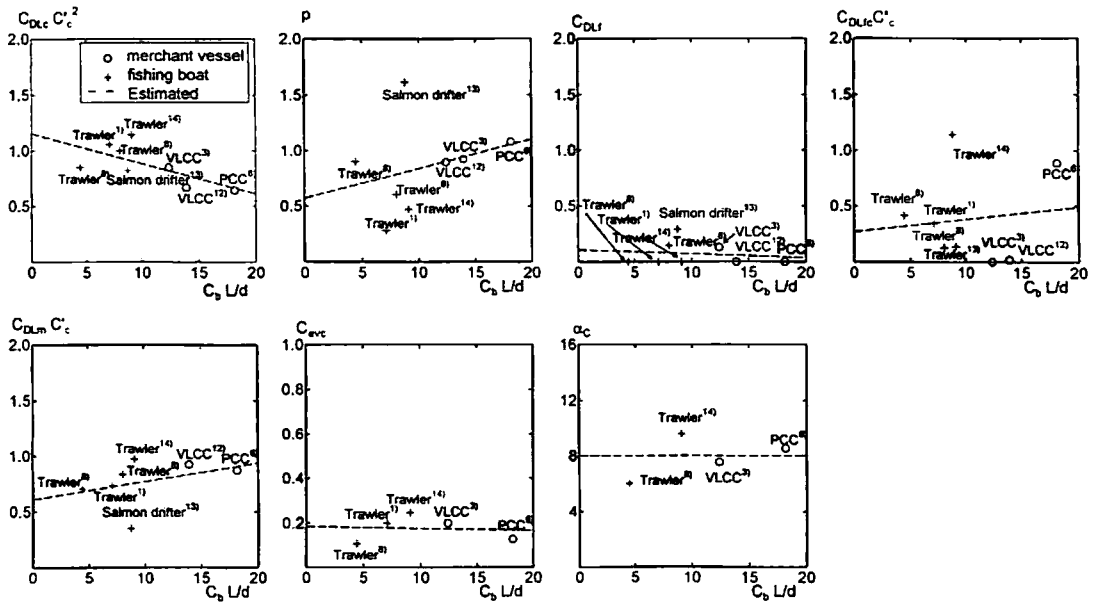


Fig. 6 Estimation of nonlinear hydrodynamic characteristics.

なお前後非対称クロスフロー揚力係数 $C_{L_{asf}}, C_{L_{asa}}$ については船型によってかなりのばらつきがあり、また舵角 35° の定常旋回運動には大きな影響を与えないことから、ここでは近似的に船首尾端の形状から痩せた先端側の揚力係数を零、肥った先端側の揚力係数を 0.01 とした。

ここで、 C_{c_v} およびクロスフロー抗力係数に相当する $C_{DLc} \cdot C_c'^2$ は Fig.4 より操縦運動に大きな影響を与える係数であり精度よい推定が必要であるが、本論文では Fig.5 および Fig.6 に示すようなデータベースから簡便に推定を行った。これらについては船型を考慮したより精度の良い推定法の開発が今後の課題である。

以上の方法により推定した操縦流体力を Fig.2(e) に示す。先に述べた斜航実験値を用いたものと比べても遜色のない推定結果が得られ、特に $\beta \leq 30^\circ$ においては特に良い精度で推定できることがわかった。したがって、実験結果が無くとも船体主要目および流力特性係数のデータベースを用いることで操縦流体力を推定することが可能である。なお、(a) から (e) の解析および推定によって得られた流力特性係数を Table 2 に示す。

5. 操縦シミュレーション

斜航流体力の解析範囲とその推定精度が操縦運動のシミュレーション結果に及ぼす影響を検討するため、前節における (a) から (e) の解析または推定によって得られた操縦流体力を用いて操縦運動シミュレーションを行ない、自由航走模型試験結果と比較した。付加質量、付加慣性モーメント係数については元良チャートによる推定値 (VLCC) または定加速度試験等による実験値 (PCC, Trawler) を用いた。用いた付加質量、付加慣性モーメント係数を Table 3 に示す。なお、シミュレーションを行う際、主船体流体力以外の干渉係数を含む舵、プロペラカの数学モデルに含まれる係数は公表されている実験値^{2)~8)}を用いており、ここでは主船体流体力が及ぼす影響のみを比較する。

Fig.7(i)~(iii) に VLCC, PCC, Trawler の舵角 35° の定常旋回に於ける軌跡と運動時系列をそれぞれ示す。シミュレーションには Fig.2(a)~(e) に示した成分分離型数学モデルによって得られた操縦流体力のうち、以下の3通りの方法によって得られた操縦流体力を用いてシミュレーションを行った場合について示す。

- (a) $\beta \leq 90^\circ$ の斜航流体力により解析した斜航に関する流力特性係数とデータベース等により推定した旋回に関する流力特性係数を用いた場合
- (c) $\beta \leq 30^\circ$ の斜航流体力により解析した斜航に関する流力特性係数とデータベース等により推定した旋回に関する流力特性係数を用いた場合

Table 2 Oblique hydrodynamic characteristics analyzed and estimated by a component-type mathematical model.

(i)VLCC					
	$\beta \leq 90^\circ$	$\beta \leq 30^\circ$	$\beta \leq 30^\circ$	$\beta \leq 20^\circ$	Estimated
	+90°				
C'_{L_f}	0.128	0.100	0.101	0.077	0.128
C'_{L_a}	0.258	0.217	0.219	0.224	0.272
$C_{DLc}C_c'^2$	0.759	0.905	0.982	0.895	0.831
p	0.842	1.088	0.796	0.950	0.906
$C_{DLm}C_c'$	0.809	0.809	0.809	0.809	0.809
C_{DLf}	0.129	0.000	0.000	0.426	0.069
$C_{DLfc}C_c'$	0.000	0.181	0.180	0.563	0.316
(ii)PCC					
	$\beta \leq 90^\circ$	$\beta \leq 30^\circ$	$\beta \leq 30^\circ$	$\beta \leq 20^\circ$	Estimated
	+90°				
C'_{L_f}	0.162	0.145	0.121	0.102	0.076
C'_{L_a}	0.267	0.237	0.213	0.224	0.203
$C_{DLc}C_c'^2$	0.641	0.668	0.864	0.770	0.675
p	1.071	1.508	1.015	0.888	1.062
$C_{DLm}C_c'$	0.876	0.831	0.599	0.000	0.901
C_{DLf}	0.000	0.000	0.092	0.791	0.051
$C_{DLfc}C_c'$	0.888	0.812	0.700	0.493	0.437
(iii)Trawler					
	$\beta \leq 90^\circ$	$\beta \leq 30^\circ$	$\beta \leq 30^\circ$	$\beta \leq 20^\circ$	Estimated
	+90°				
C'_{L_f}	0.257	0.219	0.235	0.292	0.520
C'_{L_a}	0.502	0.412	0.425	0.482	0.432
$C_{DLc}C_c'^2$	0.834	0.904	1.304	0.459	1.046
p	0.745	1.961	0.863	0.756	0.691
$C_{DLm}C_c'$	0.638	0.996	1.073	0.649	0.681
C_{DLf}	0.000	0.000	0.000	0.116	0.093
$C_{DLfc}C_c'$	0.020	0.000	0.000	0.420	0.148

- (e) 船体主要目とデータベースから推定した流力特性係数を用いた場合

なお VLCC については X_H 力に関する大斜航角範囲の実験値がないため X_H 力に関する流力特性係数 $C_{DLm} \cdot C_c'$ はデータベースからの推定値を用いている。また VLCC の大斜航操縦流体力解析に用いた供試船は $L_{pp} = 4.0m$ のものであるが、自由航走模型試験結果が入手できなかったため実験データのそろっている $L_{pp} = 2.5m$ のものと比較している。

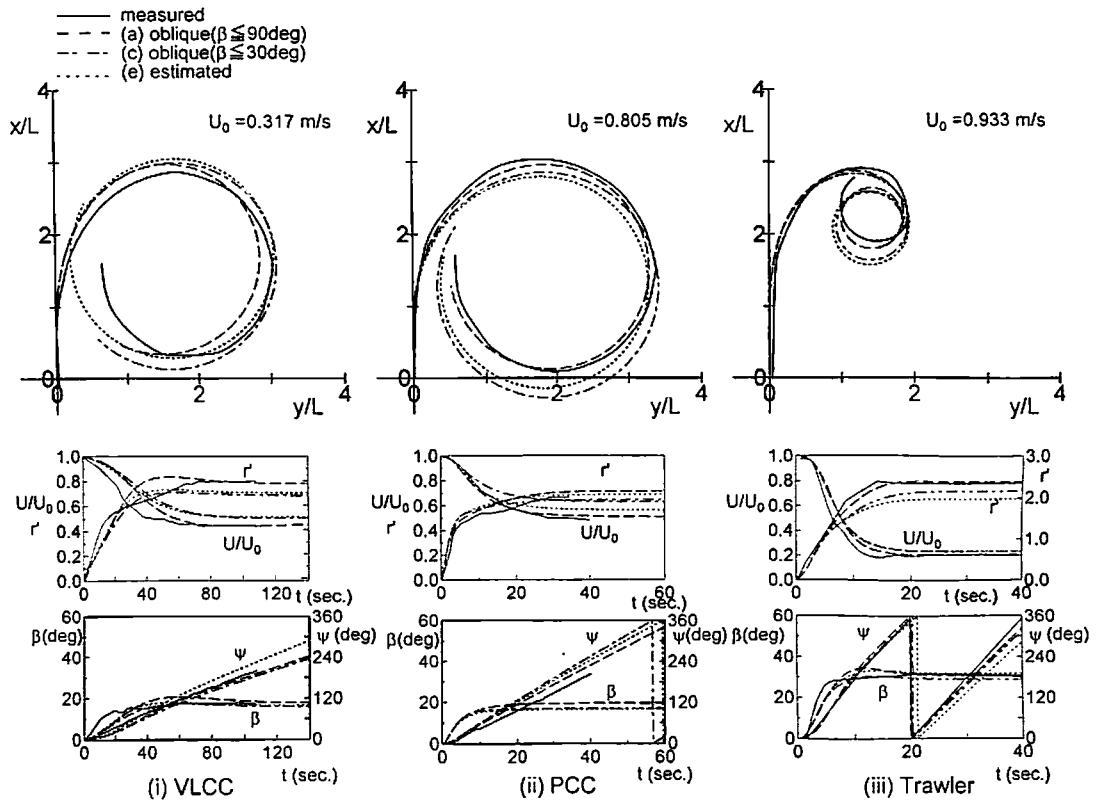


Fig. 7 Trajectories and time histories of turning motion due to rudder angle 35 degree by means of estimation and analyses of oblique hydrodynamic forces.

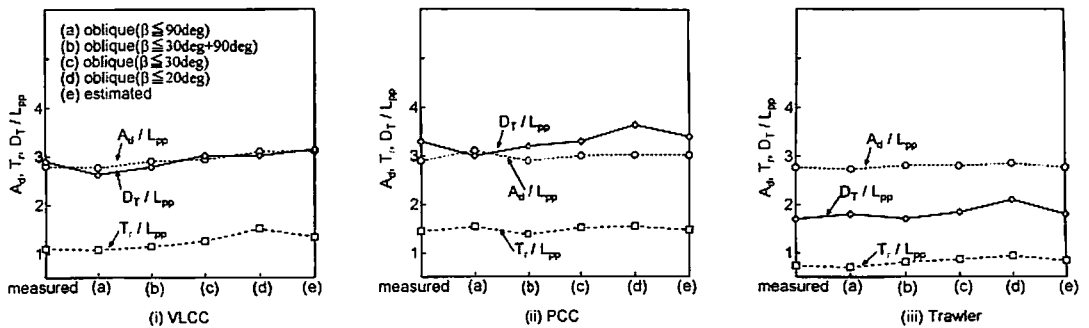


Fig. 8 Changes of turning ability indices of 35° steady turning motions simulated due to estimation and analyses of oblique hydrodynamic forces.

これらから VLCC, PCC および Trawler について舵角 35° の定常旋回軌跡および運動時系列についていずれの場合も実験値と比べると若干の差違は見られるものの、概ね旋回運動を推定可能であるといえる。

Table 3 Added masses and moments of inertia about z-axis.

	VLCC	PCC	Trawler
m'_x	0.021	0.009	0.056
m'_y	0.227	0.135	0.384
J'_{zz}	0.011	0.010	0.016

Fig.8(i)~(iii) に (a)~(e) 5 ケースすべての場合のシミュレーションについての旋回縦距 A_d 、旋回横距 T_r 、旋回圏 D_T とそれぞれの実験値を比較したものを示す。これらから舵角 35° の定常旋回においては、旋回中の斜航角は VLCC, PCC で $\beta < 20^\circ$ 、Trawler で $\beta < 30^\circ$ であるため、運動範囲内での斜航流体力を用いて成分分離型数学モデルにより概ね旋回運動を推定できているといえる。

Fig.9 に $10^\circ/10^\circ$ Z 試験時の時刻歴の一例として VLCC の結果を示す。なお、シミュレーションは Fig.7 と同様 (a), (c), (e) 3 ケースについて模型試験結果と比較している。また操舵速度は考慮していないため瞬時に操舵を行っている。図から、いずれの推定値も IMO 操縦性基準に定められている 1st オーバースhoot 角および 2nd オーバースhoot 角について実験値と大略一致した運動特性が得られ、Z 試験についても概ね運動を推定できているといえる。

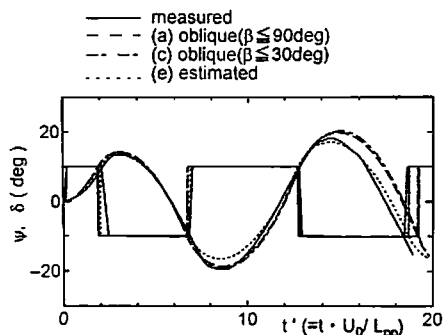


Fig. 9 Time histories of $10^\circ/10^\circ$ Z maneuver tests of VLCC.

6. 結言

成分分離型数学モデルを用いて数種の斜航角範囲の斜航実験データから、また主船体主要目とデータベースから操縦流体力を推定し、その結果を利用して操縦シミュレーションを行った結果以下のことがわかった。

- 成分分離型数学モデルによって斜航角 $|\beta| \leq 30^\circ$ の斜航流体力と旋回に関わる流力特性係数 $C_{cc} = 2/3$, $\alpha_L = 1$ 等のデータベースを用いることで大斜航角範囲の操縦流体力を精度よく推定することができる。
- 成分分離型数学モデルによって斜航角 $|\beta| \leq 20^\circ$ の斜航流体力と旋回に関わる流力特性係数 $C_{cc} = 2/3$, $\alpha_L = 1$ 等を用いることでは大斜航角の流体力推定精度は不十分であったが、通常航行時 ($|\beta| \leq 30^\circ$) の操縦流体力は精度よく推定できる。
- 成分分離型数学モデルの流力特性係数のうち操縦運動に大きな影響を及ぼす係数は、粘性揚力における C'_{La} 、クロスフロー抗力係数 $C_{DLc} \cdot C_c'^2$ 、旋回時の有効速度係数 C_{ω} である。
- 成分分離型数学モデルの流力特性係数は船体主要目とデータベースから推定することができ、 $|\beta| \leq 30^\circ$ での精度よい操縦流体力と $|\beta| > 30^\circ$ の大斜航角範囲の大略の操縦流体力を推定することができる。
- 成分分離型数学モデルにより推定された操縦流体力を用いて精度よい操縦運動シミュレーションを行うことができる。

参考文献

- 鳥野慶一, 岡野誠司, 前川和義, 三好潤: 簡易渦モデルを用いた操縦運動中の主船体流体力の成分分離型数学モデル (その 5) - 旋回で生ずる船体中央部渦による補正 -, 日本造船学会論文集, 第 190 号, pp.169-180, 2001.
- 貴島勝郎, 村上正義, 勝野敏之, 名切恭昭: 浅水域における船の操縦運動特性に関する一考察, 西部造船会々報, 第 69 号, pp.111-122, 1985.
- 湯室彰規: 低速運動時の操縦流体力に関する実験結果について, 関西造船協会誌, 第 209 号, pp.91-101, 1988.
- 日本造船学会: 船の操縦性能の推定特集, 日本造船学会誌, 第 668 号, 1985.
- 芳村康男: 浅水域の操縦運動モデルの検討-MMG モデルの浅水域への適用について -, 関西造船協会誌, 第 200 号, pp.41-50, 1986.
- 芳村康男: 浅水域の操縦運動モデルの検討 (第 2 報) -MMG モデルの浅水域への適用について -, 関西造船協会誌, 第 210 号, pp.77-84, 1988.

- 7) J. Miyoshi, K. Karasuno, T. Oba, K. Maekawa : Simulations of Ship Steering Motion with Roll by a Component-Type Mathematical Model for European and Japanese Fishing Vessels with Trim Change. Journal of the Kansai Society of Naval Architects, Japan, 238, pp.85-95, 2002.
- 8) 水産工学研究所：一そうびき掛廻し漁船のモデル設計図作成に関する研究報告書，2002
- 9) Kijima, K., Katsuno, T., Nakiri, Y. and Furukawa, Y. : On the Manoeuvring Performance of a Ship with the Parameter of Loading Condition. Journal of The Society of Naval Architects of Japan, 168, pp.141-148. 1990.
- 10) 芳村康男：フラップ舵を装備する船舶の操縦性能とその推定，日本造船学会論文集，第181号，pp.191-196, 1997.
- 11) 前川和義，三好潤，烏野慶一，池田浩：吃水およびトリムの変化が主船体流体力に及ぼす影響について-成分分離型数学モデルによる検討-，関西造船協会論文集，第237号，pp.133-140, 2001.
- 12) 高品純志：タグによる操縦運動とその計算法について，日本造船学会論文集，第160号，pp.93-102, 1986.
- 13) 烏野慶一，稲葉恭一：漁船の船舶操縦性流体力に関する実験的研究(1)，北海道大学水産学部研究彙報，第35号，pp.117-131, 1984.
- 14) 梅田直哉，山越康行：低速操船時の前後非対称な船体に働く流体力について，関西造船協会誌，第211号，pp.127-137, 1988.

Appendix

成分分離型数学モデルを用いた定常運動時の主船体流体力 (X_H, Y_H, N_H) は以下のように表現する。

$$\begin{aligned} X_H &= X_I + X_{Lv} + X_{D_i} + X_C + X_C^* + X_F \\ Y_H &= Y_I + Y_{Lv} + Y_{D_i} + Y_C \\ N_H &= N_I + N_{Lv} + N_{D_i} + N_C \\ K_H &= K_I + K_{Lv} + K_{D_i} + K_C \end{aligned} \quad (A1)$$

ここで

$$\begin{aligned} x'_f &= -x'_a = x_f/L_{pp} = -x_a/L_{pp} = 0.5 \\ d_m &= (d_f + d_a)/2, \quad t = d_a - d_f \\ x_t &= -1/6 \cdot t/d_m \cdot L_{pp} \\ \cos \beta_f &= u/\sqrt{u^2 + (v + x_f \cdot r)^2} \\ -\sin \beta_f &= (v + x_f \cdot r)/\sqrt{u^2 + (v + x_f \cdot r)^2} \\ \cos \beta_a &= u/\sqrt{u^2 + (v + x_a \cdot r)^2} \\ -\sin \beta_a &= (v + x_a \cdot r)/\sqrt{u^2 + (v + x_a \cdot r)^2} \end{aligned}$$

$$C_{sv} = 1$$

1) 理想流体力

$$\begin{aligned} X_I &= 1/2 \cdot \rho \cdot L_{pp}^2 \cdot d_m \cdot m'_y \cdot (v \cdot r + x \cdot r^2) \\ Y_I &= -1/2 \cdot \rho \cdot L_{pp}^2 \cdot d_m \cdot m'_x \cdot r \cdot u \\ N_I &= -1/2 \cdot \rho \cdot L_{pp}^2 \cdot d_m \cdot m'_y \cdot x_t \cdot r \cdot u \\ &\quad -1/2 \cdot \rho \cdot L_{pp}^2 \cdot d_m \cdot (m'_y - m'_x) \cdot v \cdot u \end{aligned} \quad (A2)$$

2) 粘性揚力

$$\begin{aligned} X_{Lv} &= 1/2 \cdot \rho \cdot L_{pp} \cdot d_m \\ &\quad \cdot [d_f/d_m \cdot C'_{L_f} \cdot \cos \beta \\ &\quad \cdot (v + C_{ev} \cdot x_f \cdot r) \cdot (v + x_f \cdot r) \\ &\quad + d_a/d_m \cdot C'_{L_a} \cdot \cos \beta \\ &\quad \cdot (v + C_{ev} \cdot x_a \cdot r) \cdot (v + x_a \cdot r) \\ &\quad + \alpha_L \cdot \{d_f/d_m \cdot C'_{L_f} \cdot \cos \beta \\ &\quad \cdot C_{ev} \cdot x_f \cdot r \\ &\quad + d_a/d_m \cdot C'_{L_a} \cdot \cos \beta \\ &\quad \cdot C_{ev} \cdot x_a \cdot r\} \cdot v] \\ Y_{Lv} &= -1/2 \cdot \rho \cdot L_{pp} \cdot d_m \\ &\quad \cdot [d_f/d_m \cdot C'_{L_f} \cdot \cos \beta \\ &\quad \cdot (v + C_{ev} \cdot x_f \cdot r) \cdot u \\ &\quad + d_a/d_m \cdot C'_{L_a} \cdot \cos \beta \\ &\quad \cdot (v + C_{ev} \cdot x_a \cdot r) \cdot u \\ &\quad + \alpha_L \cdot \{d_f/d_m \cdot C'_{L_f} \cdot \cos \beta \\ &\quad \cdot C_{ev} \cdot x_f \cdot r \\ &\quad + d_a/d_m \cdot C'_{L_a} \cdot \cos \beta \\ &\quad \cdot C_{ev} \cdot x_a \cdot r\} \cdot u] \\ N_{Lv} &= -1/2 \cdot \rho \cdot L_{pp}^2 \cdot d_m \\ &\quad \cdot [x'_f \cdot d_f/d_m \cdot C'_{L_f} \cdot \cos \beta \\ &\quad \cdot (v + C_{ev} \cdot x_f \cdot r) \cdot u \\ &\quad + x'_a \cdot d_a/d_m \cdot C'_{L_a} \cdot \cos \beta \\ &\quad \cdot (v + C_{ev} \cdot x_a \cdot r) \cdot u] \end{aligned} \quad (A3)$$

3) 誘導抗力

$$\begin{aligned} X_{D_i} &= -1/2 \cdot \rho \cdot L_{pp} \cdot d_m \\ &\quad \cdot [d_f/d_m \cdot \{m'_y \cdot (v + x_f \cdot r) \\ &\quad + C'_{L_f} \cdot \cos \beta \cdot (v + C_{ev} \cdot x_f \cdot r)\} \\ &\quad \cdot \cos \beta_f \\ &\quad \cdot \{C_{DL_f} \cdot (L_{pp}/2/d_m) \cdot \{C_{sv} \cdot m'_y \\ &\quad \cdot (v + C_{evc} \cdot x_f \cdot r) \\ &\quad + C'_{L_f} \cdot \cos \beta \cdot (v + C_{ev} \cdot x_f \cdot r)\} \\ &\quad + C_{DL_f c} \cdot C'_c \cdot |\cos \beta_f|\} \\ &\quad \cdot (v + C_{evc} \cdot x_f \cdot r) \\ &\quad + d_a/d_m \cdot \{-m'_y \cdot (v + x_a \cdot r) \\ &\quad + C'_{L_a} \cdot \cos \beta \cdot (v + C_{ev} \cdot x_a \cdot r)\} \\ &\quad \cdot \cos \beta_a \\ &\quad \cdot \{C_{DL_f} \cdot (L_{pp}/2/d_m) \cdot \{-C_{sv} \cdot m'_y \\ &\quad \cdot (v + C_{evc} \cdot x_a \cdot r) \\ &\quad + C'_{L_a} \cdot \cos \beta \cdot (v + C_{ev} \cdot x_a \cdot r)\} \\ &\quad - C_{DL_f c} \cdot C'_c \cdot |\cos \beta_a|\} \\ &\quad \cdot (v + C_{evc} \cdot x_a \cdot r)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +d_m/d_m \cdot \{-2 \cdot m'_y \cdot x_f \cdot r \\
& +\alpha_L \cdot (d_f/d_m \cdot C'_{L_f} \cdot \cos \beta \\
& \cdot C_{e_v} \cdot x_f \cdot r \\
& +d_a/d_m \cdot C'_{L_a} \cdot \cos \beta \\
& \cdot C_{e_v} \cdot x_a \cdot r)\} \\
& \cdot \cos \beta \cdot C_{e_{vc}} \\
& \cdot \{C_{DL_f} \cdot (L_{pp}/2/d_m) \\
& \cdot \{-2 \cdot C_{s_v} \cdot m'_y \cdot x_f \cdot r \\
& +\alpha_L \cdot (d_f/d_m \cdot C'_{L_f} \cdot \cos \beta \\
& \cdot C_{e_v} \cdot x_f \cdot r \\
& +d_a/d_m \cdot C'_{L_a} \cdot \cos \beta \\
& \cdot C_{e_v} \cdot x_a \cdot r)\} \\
& -C_{DL_{fc}} \cdot 2 \cdot C'_c \cdot |\cos \beta| \cdot x_f \cdot r]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Y_{Di} = & -1/2 \cdot \rho \cdot L_{pp} \cdot d_m \\
& \cdot [d_f/d_m \cdot \{m'_y \cdot (v + x_f \cdot r) \\
& +C'_{L_f} \cdot \cos \beta \cdot (v + C_{e_v} \cdot x_f \cdot r)\} \\
& \cdot (-\sin \beta_f) \\
& \cdot \{C_{DL_f} \cdot (L_{pp}/2/d_m) \cdot \{C_{s_v} \cdot m'_y \\
& \cdot (v + C_{e_{vc}} \cdot x_f \cdot r) \\
& +C'_{L_f} \cdot \cos \beta \cdot (v + C_{e_v} \cdot x_f \cdot r)\} \\
& +C_{DL_{fc}} \cdot C'_c \cdot |\cos \beta_f| \\
& \cdot (v + C_{e_{vc}} \cdot x_f \cdot r)\} \\
& +d_a/d_m \cdot \{-m'_y \cdot (v + x_a \cdot r) \\
& +C'_{L_a} \cdot \cos \beta \cdot (v + C_{e_v} \cdot x_a \cdot r)\} \\
& \cdot (-\sin \beta_a) \\
& \cdot \{C_{DL_f} \cdot (L_{pp}/2/d_m) \cdot \{-C_{s_v} \cdot m'_y \\
& \cdot (v + C_{e_{vc}} \cdot x_a \cdot r) \\
& +C'_{L_a} \cdot \cos \beta \cdot (v + C_{e_v} \cdot x_a \cdot r)\} \\
& -C_{DL_{fc}} \cdot C'_c \cdot |\cos \beta_a| \\
& \cdot (v + C_{e_{vc}} \cdot x_a \cdot r)\} \\
& +d_m/d_m \cdot \{-2 \cdot m'_y \cdot x_f \cdot r \\
& +\alpha_L \cdot (d_f/d_m \cdot C'_{L_f} \cdot \cos \beta \\
& \cdot C_{e_v} \cdot x_f \cdot r \\
& +d_a/d_m \cdot C'_{L_a} \cdot \cos \beta \cdot C_{e_v} \cdot x_a \cdot r)\} \\
& \cdot (-\sin \beta) \cdot C_{r_{vc}} \\
& \cdot \{C_{DL_f} \cdot (L_{pp}/2/d_m) \\
& \cdot \{-2 \cdot C_{s_v} \cdot m'_y \cdot x_f \cdot r \\
& +\alpha_L \cdot (d_f/d_m \cdot C'_{L_f} \cdot \cos \beta \\
& \cdot C_{e_v} \cdot x_f \cdot r \\
& +d_a/d_m \cdot C'_{L_a} \cdot \cos \beta \\
& \cdot C_{e_v} \cdot x_a \cdot r)\} \\
& -C_{DL_{fc}} \cdot 2 \cdot C'_c \cdot |\cos \beta| \cdot x_f \cdot r]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
N_{Di} = & -1/2 \cdot \rho \cdot L_{pp}^2 \cdot d_m \\
& \cdot [x'_f \cdot d_f/d_m \cdot \{m'_y \cdot (v + x_f \cdot r) \\
& +C'_{L_f} \cdot \cos \beta \cdot (v + C_{e_v} \cdot x_f \cdot r)\} \\
& \cdot (-\sin \beta_f) \\
& \cdot \{C_{DL_f} \cdot (L_{pp}/2/d_m) \cdot \{C_{s_v} \cdot m'_y \\
& \cdot (v + C_{e_{vc}} \cdot x_f \cdot r) \\
& +C'_{L_f} \cdot \cos \beta \cdot (v + C_{e_v} \cdot x_f \cdot r)\} \\
& +C_{DL_{fc}} \cdot C'_c \cdot |\cos \beta_f| \\
& \cdot (v + C_{e_{vc}} \cdot x_f \cdot r)\} \\
& \cdot x'_a \cdot d_a/d_m \cdot \{-m'_y \cdot (v + x_a \cdot r) \\
& +C'_{L_a} \cdot \cos \beta \cdot (v + C_{e_v} \cdot x_a \cdot r)\} \\
& \cdot (-\sin \beta_a)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \cdot \{C_{DL_f} \cdot (L_{pp}/2/d_m) \cdot \{-C_{s_v} \cdot m'_y \\
& \cdot (v + C_{r_{vc}} \cdot x_a \cdot r) \\
& +C'_{L_a} \cdot \cos \beta \\
& \cdot (v + C_{e_v} \cdot x_a \cdot r)\} \\
& -C_{DL_{fc}} \cdot C'_c \cdot |\cos \beta| \\
& \cdot (v + C_{e_{vc}} \cdot x_a \cdot r)\}]
\end{aligned}$$

4) クロスフロー流体力

$$\begin{aligned}
X_C = & -1/2 \cdot \rho \cdot L_{pp} \cdot d_m \cdot C_{DL_m} \cdot C'_c \\
& \cdot [m'_y \cdot (v \cdot r + x_t \cdot r^2) \cdot L_{pp} \\
& \cdot (1 - |\cos \beta|) \\
& +d_f/d_m \cdot C'_{L_f} \cdot \cos \beta \\
& \cdot (v + C_{r_v} \cdot x_f \cdot r) \cdot (v + x_f \cdot r) \\
& +d_a/d_m \cdot C'_{L_a} \cdot \cos \beta \\
& \cdot (v + C_{e_v} \cdot x_a \cdot r) \cdot (v + x_a \cdot r) \\
& +\alpha_L \cdot \{d_f/d_m \cdot C'_{L_f} \cdot \cos \beta \cdot C_{e_v} \cdot x_f \cdot r \\
& +d_a/d_m \cdot C'_{L_a} \cdot \cos \beta \\
& \cdot C_{e_v} \cdot x_a \cdot r\} \cdot v]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Y_C = & -1/2 \cdot \rho \cdot L_{pp} \cdot d_m \cdot C_{DL_c} \cdot C'^2_c \\
& \cdot \int d/d_m \cdot (v + x \cdot r)^2 \\
& \cdot (1 + p \cdot \cos^2 \beta_x) \\
& \cdot (-\sin \beta_x) \cdot dx' \\
& -1/2 \cdot \rho \cdot L_{pp} \cdot d_m \cdot \alpha_C \cdot C_{DL_c} \cdot C'^2_c \\
& \cdot 2 \cdot d_m/L_{pp} / 2 \cdot (L_{pp} \cdot r)^2 \\
& \cdot \int (d/d_m)^2 \cdot (1 - |\cos \beta_x|)^2 \\
& \cdot \text{sgn}(v + x \cdot r) \cdot dx'
\end{aligned} \tag{A5}$$

$$\begin{aligned}
N_C = & -1/2 \cdot \rho \cdot L_{pp}^2 \cdot d_m \cdot C_{DL_c} \cdot C'^2_c \\
& \cdot \int d/d_m \cdot (v + x \cdot r)^2 \\
& \cdot (1 + p \cdot \cos^2 \beta_x) \\
& \cdot (-\sin \beta_x) \cdot x' \cdot dx' \\
& -1/2 \cdot \rho \cdot L_{pp}^2 \cdot d_m \cdot \alpha_C \cdot C_{DL_c} \cdot C'^2_c \\
& \cdot 2 \cdot d_m/L_{pp} / 2 \cdot (L_{pp} \cdot r)^2 \\
& \cdot \int (d/d_m)^2 \cdot (1 - |\cos \beta_x|)^2 \\
& \cdot \text{sgn}(v + x \cdot r) \cdot x' \cdot dx'
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
X_C^* = & 1/2 \cdot \rho \cdot L_{pp} \cdot d_m \\
& \cdot \{d_f/d_m \cdot C_{LAS_f} \cdot (1 - |\cos \beta_f|) \\
& \cdot (v + x_f \cdot r)^2 \\
& -d_a/d_m \cdot C_{LAS_a} \cdot (1 - |\cos \beta_a|) \\
& \cdot (v + x_a \cdot r)^2\}
\end{aligned}$$

5) 船体前後摩擦力

$$X_F = -1/2 \cdot \rho \cdot L_{pp} \cdot d_m \cdot C'_F \cdot |u| \cdot u \tag{A6}$$