

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—

正員 烏野慶一* 岡野誠司*
正員 前川和義* 三好潤*

A Component-type Mathematical Model of Hydrodynamic Forces
in Steering Motion Derived from a Simplified Vortex Model (5)
—Modification of midship part's vortex system due to turning motion—

by Keiichi Karasuno, *Member* Seiji Okano
Kazuyoshi Maekawa, *Member* Jun Miyoshi

Summary

The component-type mathematical model of ship hydrodynamic forces developed by us can describe precisely the oblique hydrodynamic forces over the range of drift angle $|\beta| = 0 \sim 90^\circ$ or $90 \sim 180^\circ$. It also can estimate satisfactorily the turning hydrodynamic forces X , Y and N in the simulation of steering motion through the oblique hydrodynamic forces. The mathematical model shows the quantitative discrepancies in the estimated Y hydrodynamic forces of pure ($\beta = 0^\circ$) and lateral ($|\beta| = 90^\circ$) turning motion. This paper offers a solution to these discrepancies by adding the horse-shoe vortex system and the additional effect of the cross-flow vertical vortex system, which are located at midship part and caused by turning motion, to the conventional vortex systems presented in the previous paper. The characteristics of the oblique hydrodynamic forces can estimate precisely the linear derivatives Y_r and the large effects of cross-flow drag in turning motion.

1. 緒言

1993年のIMOの操縦性暫定基準¹⁾に示されたような操舵による通常の操縦運動においては、それを記

* 北海道大学大学院水産科学研究科

述する運動方程式の流力モデルは、一般的には運動変数 u, v, r または u, β, r の多項式モデルである²⁾。また、それらの流力係数推定式の精度も近年段々と向上している³⁾。そうした中で、港湾内での操船のようにその航行環境の故に危険に遭遇する頻度が大きくなって操船者の緊張度が一段と増す状況下の操船で、将来設定されるであろう操縦性能(基準)の問題は、まだ十分に研究され

原稿受理 平成13年7月9日

秋季講演会において講演 平成13年11月15, 16日

ていない状態である。低速時の操船では横流れ角の大きさもその変化も大きく、そうした状況での流力モデルの問題も、前述と同様な状況にあると言える²⁾。

筆者らは、低速時の操縦性能基準の問題において基本となるであろう流力モデルに関して、主船体の分野についての研究を続けてきた⁴⁾。その流力モデルは、操縦運動の対象範囲を限定することなく、弱から強にいたる斜航と旋回運動を対象とし、Surge, Sway, Yawの3分力を運動変数 u, v, r の関数式で表現するものである。この関数式は渦モデルで構築された5つのもので成り立っており、それぞれは(1)環状束縛渦による理想流体力、(2),(3)船体後縁流れのKutta条件を満たすための馬蹄形束縛渦による粘性揚力および次に述べるクロスフロー伴流をも含めた後引き渦による誘導抗力、(4)クロスフローに伴う3次元剥離渦伴流によるクロスフロー流体力、および(5)前後流れにおける船体直進抵抗を表現するものである。このために、本モデルの特長として、少数の斜航流体力の特性係数でもって旋回流体力を表現できること、また通常の斜航角での斜航流体力から、その斜航角範囲を越えた大斜航角流体力を推定できること等が挙げられる。

数種の船型モデルにおけるこれまでの研究では、この数学モデルは運動シミュレーションの立場からは大差なく斜航流体力から旋回流体力の推定ができる状態にあったが、詳細な点では旋回流体力の中で旋回時の流力係数 Y_r と横行旋回 ($|\beta| = 90^\circ$) 時の流体力 Y が実験値を十分精度良く推定し得ないことが分かっていた。

本論文はこの旋回流体力を詳細に検討した結果、これまで主として船体の前後縁に集中配置していた渦の流体力影響の他に船体中央部に旋回によって生ずる鉛直渦の効果を配慮しなければならないことが分かった。これらの渦は、粘性揚力の馬蹄形渦と前後一対の環状クロスフロー伴流渦であって、これらの効果を従来のモデルに加え修正した結果を述べる。

2. 旋回流力係数 Y_r', N_r' での検討と粘性揚力渦の補正

筆者らの提唱する成分分離型モデル⁴⁾は、線形化の前提の下で流体力特性係数 C'_{L_f}, C'_{L_a} を介して斜航の線形流力係数 Y_v', N_v' ²⁾ と旋回の線形流力係数 Y_r', N_r' の間の強い相関を示すことができる。前報の論文⁴⁾では流力係数と流力特性係数の関係は

$$Y_v' = -(d_{fm}/d_m \cdot C'_{L_f} + d_{am}/d_m \cdot C'_{L_a}) \quad (1)$$

$$= (Y'_{vuu})$$

$$N_v' + (m'_y - m'_x)$$

$$= -(d_{fm}/d_m \cdot C'_{L_f} - d_{am}/d_m \cdot C'_{L_a}) \quad (2)$$

$$\cdot x'_f$$

$$= (N'_{vuu})$$

$$Y_r' = -(d_{fm}/d_m \cdot C'_{L_f} - d_{am}/d_m \cdot C'_{L_a})$$

$$\cdot x'_f \cdot C_{ev} \quad (3)$$

$$= (Y'_{ruu})$$

$$N_r' + m'_y \cdot x'_t$$

$$= -(d_{fm}/d_m \cdot C'_{L_f} + d_{am}/d_m \cdot C'_{L_a}) \quad (4)$$

$$\cdot x'^2_f \cdot C_{ev}$$

$$= (N'_{ruu})$$

である。ここに $x'_t = -1/6 \cdot t/d_m \cdot L_{pp}/L_{pp}$ 、 $C_{ev} (= 2/3)$ は旋回時の有効流速係数である。(1)~(4)式から流力係数間の相互関係は

$$(Y_r'/2)/\{N_v' + (m'_y - m'_x)\} = C_{ev}/2 \quad (5)$$

$$-(N_r' + m'_y \cdot x'_t)/(-Y_v'/4) = C_{ev} \quad (6)$$

となるが、この斜航流力係数と旋回流力係数との関係が妥当であるかを既存の発表データ等を用いて確かめてみる。

用いる流力係数のデータは、ESSO OSAKA⁶⁾⁷⁾、Gas Carrier⁶⁾、Training Ship⁸⁾、PCC⁹⁾、SR108¹⁰⁾、トリム付きの小型漁船としてトロール漁船¹¹⁾、研究調査漁船¹²⁾、鮭鱒流し網漁船¹²⁾の3隻および円弧翼型模型の4状態(等吃水、船尾トリム、深吃水、浅吃水)¹²⁾のものである。なお、ESSO OSAKAについては、複数の研究機関での計測結果を用いている。(5),(6)式の流力係数において、 $(Y_r'/2) \sim \{N_v' + (m'_y - m'_x)\}$ の関係図をFig.1に、 $-(N_r' + m'_y \cdot x'_t) \sim (-Y_v'/4)$ の関係図をFig.2に示す。図中、原点を通る傾斜直線は勾配が $C_{ev} (= 2/3)$ のもので、縦軸 ~ 横軸の実験値の関係を大略よく表している。この結果は、(5),(6)式の右辺の値が大略 $C_{ev} (= 2/3)$ である事実を示すので、(6)式の関係は良しとしても、(5)式の関係は実際には右辺の2倍であることを示している。このことから、流力係数が(1)~(4)式で表される成分分離型モデルは実際に即するよう補正を加える必要がある。すなわち(5)式の分子である(3)式において線形流力係数と流力特性係数の関係に補正を加え、(3)式の右辺が2倍すなわち

$$Y_r' = -(d_{fm}/d_m \cdot C'_{L_f} - d_{am}/d_m \cdot C'_{L_a}) \quad (3')$$

$$\cdot x'_f \cdot C_{ev} \cdot 2$$

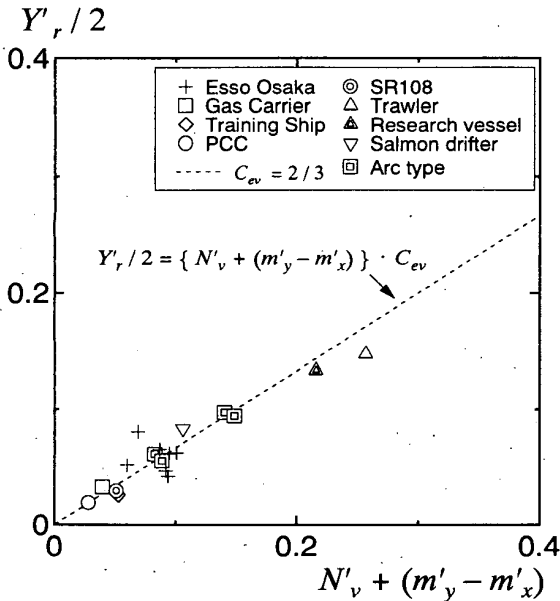


Fig. 1 Correlation of hydrodynamic coefficients
 $(\{Y'_r/2\} \sim \{N'_v + (m'_y - m'_x)\})$.

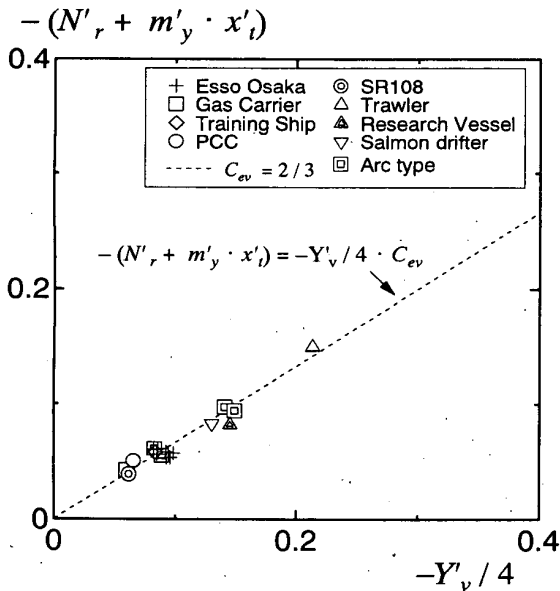


Fig. 2 Correlation of hydrodynamic coefficients
 $(\{-(N'_r + m'_y \cdot x'_t)\} \sim \{-Y'_v/4\})$.

なる下線部の補正を加える。すなわち、 Y'_r のみが倍増し、しかもそれが他の線形係数に影響を与えない補正であって、旋回の Y 力の増分は N モーメントを生じない形で補正される。つまり、船体中央部に旋回の Y 力の増分が生じるものとする。

以上の考察の結果、旋回時には従来のモデルに加えて更に粘性揚力渦 (馬蹄形渦) が船体中央部に存在することが想像される。

船体中央を中心に前後 $1/4 \cdot L_{pp}$ の位置にこの渦を分布させるのが適当と考えるが、記述を簡略化するため、船体中央に強さ $(d_{fm}/d_m \cdot C'_{Lf} \cdot \cos \beta_f \cdot C_{ev} \cdot x_f \cdot r +$

$d_{am}/d_m \cdot C'_{La} \cos \beta_a \cdot C_{ev} \cdot x_a \cdot r)$ に相当の粘性揚力渦を従来のモデルに加えると、粘性揚力成分は次のようになる。

$$X_{Lv} = 1/2 \cdot \rho \cdot L_{pp} \cdot d_m \cdot [d_{fm}/d_m \cdot C'_{Lf} \cdot \cos \beta_f \cdot (v + C_{ev} \cdot x_f \cdot r) \cdot (v + x_f \cdot r) + d_{am}/d_m \cdot C'_{La} \cdot \cos \beta_a \cdot (v + C_{ev} \cdot x_a \cdot r) \cdot (v + x_a \cdot r) + \{d_{fm}/d_m \cdot C'_{Lf} \cdot \cos \beta_f \cdot C_{ev} \cdot x_f \cdot r + d_{am}/d_m \cdot C'_{La} \cdot \cos \beta_a \cdot C_{ev} \cdot x_a \cdot r\} \cdot v]$$

$$Y_{Lv} = -1/2 \cdot \rho \cdot L_{pp} \cdot d_m \cdot [d_{fm}/d_m \cdot C'_{Lf} \cdot \cos \beta_f \cdot (v + C_{ev} \cdot x_f \cdot r) \cdot u + d_{am}/d_m \cdot C'_{La} \cdot \cos \beta_a \cdot (v + C_{ev} \cdot x_a \cdot r) \cdot u + \{d_{fm}/d_m \cdot C'_{Lf} \cdot \cos \beta_f \cdot C_{ev} \cdot x_f \cdot r + d_{am}/d_m \cdot C'_{La} \cdot \cos \beta_a \cdot C_{ev} \cdot x_a \cdot r\} \cdot u]$$

$$N_{Lv} = -1/2 \cdot \rho \cdot L_{pp}^2 \cdot d_m \cdot [x'_f \cdot d_{fm}/d_m \cdot C'_{Lf} \cdot \cos \beta_f \cdot (v + C_{ev} \cdot x_f \cdot r) \cdot u + x'_a \cdot d_{am}/d_m \cdot C'_{La} \cdot \cos \beta_a \cdot (v + C_{ev} \cdot x_a \cdot r) \cdot u]$$

この結果は、(1),(2),(3),(4) および

$$(Y'_r/2)/\{N'_v + (m'_y - m'_x)\} = C_{ev} \quad (5')$$

と (6) 式を満たすことは勿論のことであり、斜航流体力による純旋回の $Y \sim r$ の推定曲線は実験値と一致する傾向になる。なお、下線部は、今回の補正追加項である。

3. 横行旋回 ($|\beta| = 90^\circ$) 時の流体力での検討とクロスフロー流体力の補正

前節では、旋回によって船首尾端に生ずる従来の馬蹄形粘性揚力渦の他に、船体中央部にもそれと同等の馬蹄形粘性揚力渦の発生があることが実験事実から推測された。この旋回での馬蹄形渦は Y 力を発生しても、 N モーメントを生じないものである。本節の横行旋回の流体力においても実験結果と従来の推定モデルとの相違は

前節と同様 Y 力のみにおいて大きく異なる。本節においても旋回時に生ずるクロスフロー環状渦の一部を構成する鉛直渦 (特に船体中央部の渦) に注目し、前報では無視していたこの渦の効果を検討してみる。

この鉛直渦は旋回によって船体中央部に生ずる等分布の渦であることは以前から知られていた。この渦の直接的な効果は、クロスフロー伴流の剥離流出渦とその船体鏡像である船体束縛渦との干渉作用で生ずる抗力であろう。鉛直渦は船長方向に等分布であるから、この抗力分布も船長方向に等分布であると考えて良い。したがって、この鉛直渦同士の干渉力は Y 力を生じても N モーメントを生じないものになる。この考えの下で横行旋回時のクロスフロー流体力については参考文献 5) に述べた。その主要点を簡単にまとめると次のようになる。

1. クロスフロー束縛環状渦のヒルジ束縛渦の強さは $-1/2 \cdot C'_c \cdot (2d) \cdot (v + x \cdot r)$
 $= -C'_c \cdot d \cdot (v + x \cdot r)$
 である。従って、
2. クロスフロー鉛直渦の強さは δx の間で $-\delta\{1/2 \cdot C'_c \cdot 2d \cdot (v + x \cdot r)\} = -C'_c \cdot d \cdot r \cdot L_{pp} \cdot \delta x'$ となる。よって、
3. クロスフロー伴流の鉛直剥離渦による前後方向 (x 方向) の誘起速度は $-\alpha_C \cdot C_{DLc} \cdot (C'_c \cdot d \cdot r \cdot L_{pp}) / (2d)$
 $= -1/2 \cdot \alpha_C \cdot C_{DLc} \cdot C'_c \cdot r \cdot L_{pp} \cdot \text{sgn}(v + x \cdot r)$
 となる。これらより、
4. クロスフロー伴流と船体鏡像の鉛直渦同士の干渉力をクロスフロー抗力の増分として従来のクロスフロー抗力に加えると

$$\begin{aligned}
 Y_C &= -\rho \int |1/2 \cdot C_{DLc} \cdot C'_c \cdot (v + x \cdot r) \cdot C'_c \\
 &\quad \cdot d \cdot (v + x \cdot r)| \cdot \text{sgn}(v + x \cdot r) \cdot dx \\
 &\quad - \rho \int |1/2 \cdot \alpha_C \cdot C'_{DLc} \cdot C'_c \cdot r \cdot L_{pp}| \\
 &\quad \cdot d \cdot \text{sgn}(v + x \cdot r) \cdot dx \\
 &= -1/2 \cdot \rho \cdot L_{pp} \cdot d_m \cdot C_{DLc} \cdot C'^2_c \\
 &\quad \cdot \int (d/d_m) \cdot (v + x \cdot r)^2 \\
 &\quad \cdot \text{sgn}(v + x \cdot r) \cdot dx' \\
 &\quad - 1/2 \cdot \rho \cdot L_{pp} \cdot d_m \cdot \alpha_C \cdot C_{DLc} \cdot C'^2_c \\
 &\quad \cdot (2d_m/L_{pp})/2 \cdot \int (d/d_m)^2 \cdot (r \cdot L_{pp})^2 \\
 &\quad \cdot \text{sgn}(v + x \cdot r) \cdot dx'
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 &\cdot (2d_m/L_{pp})/2 \\
 &\cdot \int (d/d_m)^2 \cdot (r \cdot L_{pp})^2 \cdot \text{sgn}(v + x \cdot r) \\
 &\cdot x' \cdot dx'
 \end{aligned}$$

となり、今回の補正項である下線部は旋回によって Y 力は r^2 に比例して大きく増加するが、 N モーメントは余り変化しないことを示す。

以上の横行旋回は $|\beta| = 90^\circ$ であり、この時クロスフロー剥離渦は鉛直環状渦として流出すると前報で述べた。この運動状態に限れば、クロスフロー流体力は参考文献 5) に示されたものになるが、一般の旋回を考えると、クロスフロー流出渦は上下一対の水平環状渦と鉛直環状渦で構成され、その流出の割合は $|\cos \beta|$ と $(1 - |\cos \beta|)$ であるとして従来扱ってきた。この考えを引き継ぐと、クロスフロー環状渦系の鉛直渦への配慮と前節で新しく補正した馬蹄形粘性揚力渦の下で、クロスフロー抗力と揚力は次のように表される。

$$\begin{aligned}
 X_C &= -1/2 \cdot \rho \cdot L_{pp} \cdot d_m \cdot C_{DLm} \cdot C'_c \\
 &\quad \cdot [\{m'_y - 2d_m/L_{pp} \cdot C'_c \\
 &\quad \cdot (1 - |\cos \beta|)\} \cdot (r \cdot v + x_t \cdot r^2) \cdot L_{pp} \\
 &\quad + \{(d_{fm}/d_m) \cdot C'_{Lf} \cdot \cos \beta_f \\
 &\quad \cdot (v + C_{ev} \cdot x_f \cdot r) \cdot (v + x_f \cdot r) \\
 &\quad + (d_{am}/d_m) \cdot C'_{La} \cdot \cos \beta_a \\
 &\quad \cdot (v + C_{ev} \cdot x_a \cdot r) \cdot (v + x_a \cdot r)\} \\
 &\quad + \{(d_{fm}/d_m) \cdot C'_{Lf} \cdot \cos \beta_f \\
 &\quad \cdot C_{ev} \cdot x_f \cdot r \\
 &\quad + (d_{am}/d_m) \cdot C'_{La} \cdot \cos \beta_a \\
 &\quad \cdot C_{ev} \cdot x_a \cdot r\} \cdot v] \\
 &\quad - 1/2 \cdot \rho \cdot L_{pp}^2 \cdot d_m \cdot 2d_m/L_{pp} \\
 &\quad \cdot C'_c \cdot (1 - |\cos \beta|) \cdot (r \cdot v + x_t \cdot r^2)
 \end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
 Y_C &= -\rho \cdot \int |1/2 \cdot C_{DLc} \cdot C'_c \\
 &\quad \cdot (1 + p \cdot \cos^2 \beta_x) \cdot \sin \beta_x \\
 &\quad \cdot (v + x \cdot r) \cdot C'_c \cdot d \cdot (v + x \cdot r)| \\
 &\quad \cdot \text{sgn}(v + x \cdot r) \cdot dx \\
 &\quad - \rho \cdot \int |1/2 \cdot \alpha_C \cdot C_{DLc} \cdot C'_c \\
 &\quad \cdot (L_{pp} \cdot r) \cdot (1 - |\cos \beta_x|)^2 \cdot C'_c \cdot d \\
 &\quad \cdot (L_{pp} \cdot r) \cdot \text{sgn}(v + x \cdot r) \cdot dx \\
 &= -1/2 \cdot \rho \cdot L_{pp} \cdot d_m \cdot C_{DLc} \cdot C'^2_c \\
 &\quad \cdot \int (d/d_m) \cdot (v + x \cdot r)^2 \\
 &\quad \cdot (1 + p \cdot \cos^2 \beta_x) \cdot (-\sin \beta_x) \cdot dx' \\
 &\quad - 1/2 \cdot \rho \cdot L_{pp} \cdot d_m \cdot \alpha_C \cdot C_{DLc} \cdot C'^2_c \\
 &\quad \cdot (2d_m/L_{pp})/2 \cdot (L_{pp} \cdot r)^2 \cdot \int (d/d_m)^2 \\
 &\quad \cdot (1 - |\cos \beta_x|)^2 \cdot \text{sgn}(v + x \cdot r) \cdot dx'
 \end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
N_C = & -1/2 \cdot \rho \cdot L_{pp}^2 \cdot d_m \cdot C_{DLc} \cdot C_c'^2 \\
& \cdot \int (d/d_m) \cdot (v + x \cdot r)^2 \\
& \cdot (1 + p \cdot \cos^2 \beta_x) \cdot (-\sin \beta_x) \cdot x' \cdot dx' \\
& -1/2 \cdot \rho \cdot L_{pp}^2 \cdot d_m \cdot \alpha_C \cdot C_{DLc} \cdot C_c'^2 \\
& \cdot (2d_m/L_{pp})/2 \cdot (L_{pp} \cdot r)^2 \cdot \int (d/d_m)^2 \\
& \cdot (1 - |\cos \beta_x|)^2 \cdot \text{sgn}(v + x \cdot r) \cdot x' \cdot dx' \\
& + 1/2 \cdot \rho \cdot L_{pp}^2 \cdot d_m \cdot 2d_m/L_{pp} \\
& \cdot C_c' \cdot (1 - |\cos \beta|) \cdot (v \cdot u + x_t \cdot r \cdot u)
\end{aligned} \quad (12)$$

なお、下線部分は今回の補正項である。他は参考文献13)のものであり、その一部を省略したものが参考文献4)である。

以上の結果は、横行旋回においてY力では r^2 に比例する抵抗増加を付加することがわかる。

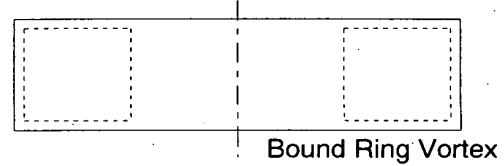
4. 数学モデルへの組み込みと誘導抗力成分の補正

新しく付加された馬蹄形粘性揚力渦と新しく配慮されたクロスフロー鉛直渦の効果を持った粘性揚力およびクロスフロー抗力・揚力の流体力成分は2および3節で述べた。それらは、それぞれ(7),(8),(9)および(10),(11),(12)式で表されて数学モデルの一部を構成するが、ここで付加された渦は後引き渦を伴うので、誘導抗力にも補正が必要となる。

今、簡単のために旋回による前後一対の環状渦系をそれぞれ一本の環状渦に置き換え、その船体中央部の渦位置は記述の簡略化のため船体中央部前後 $L_{pp}/4$ にあると考える(Fig.3)。この時、船首、船尾および船体中央における後引き渦による誘導速度が束縛鉛直渦に作用して発生する誘導抗力は近似的に次のように表せる。

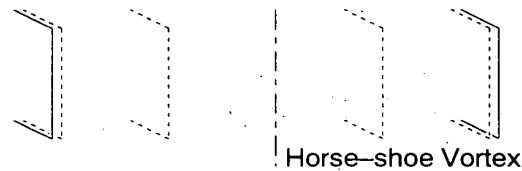
$$\begin{aligned}
X_{Di} = & -1/2 \cdot \rho \cdot L_{pp} \cdot d_m \\
& \cdot [d_{fm}/d_m \cdot \{m_y' \cdot (v + x_f \cdot r) \\
& + C_{Lf}' \cdot \cos \beta_f \cdot (v + C_{ev} \cdot x_f \cdot r) \\
& - 2d_m/L_{pp} \cdot C_c' \cdot (1 - |\cos \beta_f|) \\
& \cdot (v + x_f \cdot r)\} \\
& \cdot \cos \beta_{svf} \cdot \{C_{DLf} \cdot L_{pp}/2/d_m \\
& \cdot \{C_{sv} \cdot m_y' \cdot (v + C_{evc} \cdot x_f \cdot r) \\
& + C_{Lf}' \cdot \cos \beta_f \cdot (v + C_{ev} \cdot x_f \cdot r)\} \\
& + C_{DLfc} \cdot C_c' \cdot |\cos \beta_f| \\
& \cdot (v + C_{evc} \cdot x_f \cdot r)\} \\
& + d_{am}/d_m \cdot \{-m_y' \cdot (v + x_a \cdot r) \\
& + C_{La}' \cdot \cos \beta_a \cdot (v + C_{ev} \cdot x_a \cdot r) \\
& + 2d_m/L_{pp} \cdot C_c' \cdot (1 - |\cos \beta_a|) \\
& \cdot (v + x_a \cdot r)\} \\
& \cdot \cos \beta_{sva} \cdot \{C_{DLf} \cdot L_{pp}/2/d_m \\
& \cdot \{-C_{sv} \cdot m_y' \cdot (v + C_{evc} \cdot x_a \cdot r) \\
& + C_{La}' \cdot \cos \beta_a \cdot (v + C_{ev} \cdot x_a \cdot r)\} \\
& - C_{DLfc} \cdot C_c' \cdot |\cos \beta_a|
\end{aligned} \quad (13)$$

Ideal Fluid



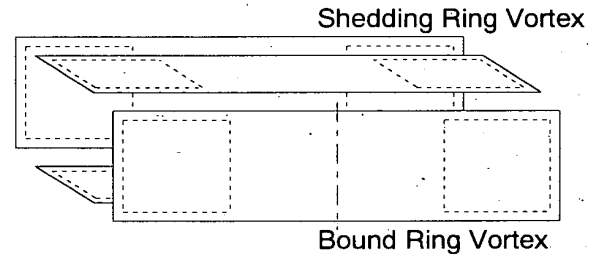
Bound Ring Vortex

Viscous Lift



Horse-shoe Vortex

Cross Flow



Bound Ring Vortex

Vortex System due to oblique motion
 due to turning motion

Fig. 3 Vortex system in turning motion with drift.

$$\begin{aligned}
& \cdot (v + C_{evc} \cdot x_a \cdot r) \\
& + d_m/d_m \cdot \{-2 \cdot m_y' \cdot x_f \cdot r \\
& + (d_{fm}/d_m \cdot C_{Lf}' \cdot \cos \beta_f \cdot C_{ev} \\
& \cdot x_f \cdot r + d_{am}/d_m \cdot C_{La}' \cdot \cos \beta_a \\
& \cdot C_{ev} \cdot x_a \cdot r) \\
& + 2d_m/L_{pp} \cdot 2 \cdot C_c' \cdot (1 - |\cos \beta_a|) \cdot x_f \cdot r\} \\
& \cdot \cos \beta_{sv} \cdot C_{evc} \cdot \{C_{DLf} \cdot L_{pp}/2/d_m \\
& \cdot \{-2 \cdot C_{sv} \cdot m_y' \cdot x_f \cdot r \\
& + (d_{fm}/d_m \cdot C_{Lf}' \cdot \cos \beta_f \cdot C_{ev} \\
& \cdot x_f \cdot r + d_{am}/d_m \cdot C_{La}' \cdot \cos \beta_a \\
& \cdot C_{ev} \cdot x_a \cdot r)\} - C_{DLfc} \cdot 2 \\
& \cdot C_c' \cdot |\cos \beta| \cdot x_f \cdot r\}]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Y_{Di} = & -1/2 \cdot \rho \cdot L_{pp} \cdot d_m \\
& \cdot [d_{fm}/d_m \cdot \{m_y' \cdot (v + x_f \cdot r) \\
& + C_{Lf}' \cdot \cos \beta_f \cdot (v + C_{ev} \cdot x_f \cdot r) \\
& - 2d_m/L_{pp} \cdot C_c' \cdot (1 - |\cos \beta_f|) \\
& \cdot (v + x_f \cdot r)\} \\
& \cdot (-\sin \beta_{svf}) \cdot \{C_{DLf} \cdot L_{pp}/2/d_m
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \cdot \{C_{sv} \cdot m'_y \cdot (v + C_{evc} \cdot x_f \cdot r) \\
& + C'_{Lf} \cdot \cos \beta_f \cdot (v + C_{ev} \cdot x_f \cdot r)\} \\
& + C_{DLfc} \cdot C'_c \cdot |\cos \beta_f| \\
& \cdot (v + C_{evc} \cdot x_f \cdot r)\} \\
& + d_{am}/d_m \cdot \{-m'_y \cdot (v + x_a \cdot r) \\
& + C'_{La} \cdot \cos \beta_a \cdot (v + C_{ev} \cdot x_a \cdot r) \\
& + 2d_m/L_{pp} \cdot C'_c \cdot (1 - |\cos \beta_a|) \\
& \cdot (v + x_a \cdot r)\} \\
& \cdot (-\sin \beta_{sva}) \cdot \{C_{DLf} \cdot L_{pp}/2/d_m \\
& \cdot \{-C_{sv} \cdot m'_y \cdot (v + C_{evc} \cdot x_a \cdot r) \\
& + C'_{La} \cdot \cos \beta_a \cdot (v + C_{ev} \cdot x_a \cdot r)\} \\
& - C_{DLfc} \cdot C'_c \cdot |\cos \beta_a| \\
& \cdot (v + C_{evc} \cdot x_a \cdot r)\} \\
& + d_m/d_m \cdot \{-2 \cdot m'_y \cdot x_f \cdot r \\
& + (d_{fm}/d_m \cdot C'_{Lf} \cdot \cos \beta_f \cdot C_{ev} \\
& \cdot x_f \cdot r + d_{am}/d_m \cdot C'_{La} \cdot \cos \beta_a \\
& \cdot C_{ev} \cdot x_a \cdot r) \\
& + 2d_m/L_{pp} \cdot 2 \cdot C'_c \cdot (1 - |\cos \beta|) \cdot x_f \cdot r\} \\
& \cdot (-\sin \beta_{sv}) \cdot C_{evc} \cdot \{C_{DLf} \cdot L_{pp}/2/d_m \\
& \cdot \{-2 \cdot C_{sv} \cdot m'_y \cdot x_f \cdot r \\
& + (d_{fm}/d_m \cdot C'_{Lf} \cdot \cos \beta_f \cdot C_{ev} \\
& \cdot x_f \cdot r + d_{am}/d_m \cdot C'_{La} \cdot \cos \beta_a \\
& \cdot C_{ev} \cdot x_a \cdot r)\} - C_{DLfc} \cdot 2 \cdot C'_c \cdot |\cos \beta| \\
& \cdot x_f \cdot r\}
\end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned}
N_{Di} = & -1/2 \cdot \rho \cdot L_{pp}^2 \cdot d_m \\
& \cdot [x'_f \cdot d_{fm}/d_m \cdot \{m'_y \cdot (v + x_f \cdot r) \\
& + C'_{Lf} \cdot \cos \beta_f \cdot (v + C_{ev} \cdot x_f \cdot r) \\
& - 2d_m/L_{pp} \cdot C'_c \cdot (1 - |\cos \beta_f|) \\
& \cdot (v + x_f \cdot r)\} \\
& \cdot (-\sin \beta_{svf}) \cdot \{C_{DLf} \cdot L_{pp}/2/d_m \\
& \cdot \{C_{sv} \cdot m'_y \cdot (v + C_{evc} \cdot x_f \cdot r) \\
& + C'_{Lf} \cdot \cos \beta_f \cdot (v + C_{ev} \cdot x_f \cdot r)\} \\
& + C_{DLfc} \cdot C'_c \cdot |\cos \beta_f| \\
& \cdot (v + C_{evc} \cdot x_f \cdot r)\} \\
& + x'_a \cdot d_{am}/d_m \cdot \{-m'_y \cdot (v + x_a \cdot r) \\
& + C'_{La} \cdot \cos \beta_a \cdot (v + C_{ev} \cdot x_a \cdot r) \\
& + 2d_m/L_{pp} \cdot C'_c \cdot (1 - |\cos \beta_a|) \\
& \cdot (v + x_a \cdot r)\} \\
& \cdot (-\sin \beta_{sva}) \cdot \{C_{DLf} \cdot L_{pp}/2/d_m \\
& \cdot \{-C_{sv} \cdot m'_y \cdot (v + C_{evc} \cdot x_a \cdot r) \\
& + C'_{La} \cdot \cos \beta_a \cdot (v + C_{ev} \cdot x_a \cdot r)\} \\
& - C_{DLfc} \cdot C'_c \cdot |\cos \beta_a| \\
& \cdot (v + C_{evc} \cdot x_a \cdot r)\} \\
& + 0]
\end{aligned} \tag{15}$$

ここに、旋回による後引き渦の誘導速度の有効係数を

C_{evc} ($0 \leq C_{evc} \leq 1$) とし、下線部は補正された部分である。

以上の誘導抗力は、他の流体力成分と比べると小さいものであるが、式は非常に複雑な様相を呈している。実際には、渦流出係数 C_{sv} および旋回による誘導速度有効係数 C_{evc} はほぼ零に近いものとして考えてもよいであろう。

2,3,4 節の旋回に関わる補正を施した数学モデルを Appendix に示す。

5. 補正モデルの適用による旋回流体力の推定

Appendix のモデルを用いて、斜航流体力の解析結果から旋回流体力の推定を次に行う。なお、式において $2d_m/L_{pp} \cdot C'_c \cdot (1 - |\cos \beta|)$ を含む項は β が小さいところでは小さな量であり、また解析の簡略化のためにも未知係数を増やさないう省略した¹³⁾。

PCC¹⁴⁾、Esso Osaka¹⁵⁾、SR108¹⁰⁾、トロール漁船(トリム付)¹¹⁾ および研究調査漁船(トリム付)¹²⁾ の5隻を対象として、斜航流体力の解析結果と、それに基づく純旋回 ($\beta = 0^\circ$)、横行旋回 ($\beta = 90^\circ$) の推定結果を Figs.4~8 に示す。斜航流体力の解析結果には、それを構成する流体力成分をあわせて示してある。Esso Osaka は X のデータが無いので、Y, N のみの結果を示す。旋回流体力の推定では、純旋回および横行旋回時の Y 力が前報と比べて大幅に改善されており、本論文の補正によって推定精度が向上していることが確認できる。なお旋回流体力の推定の際には、斜航流体力解析では得られない α_C ($\doteq 8$)、 C_{evc} ($\doteq 0.25$) および C_{Lasf} と C_{Lasa} の配分が既知である必要があるが、本論文ではこれまでの旋回流体力の解析で得られた経験からの値を使用した。また、 $\beta_{sv} = \beta$ とした。

6. まとめ

純旋回の Y 力および横行旋回の Y 力の推定精度向上を目指して、モデルの補正を行った。この補正モデルを模型船5隻の旋回流体力の推定に適用した結果、十分な精度で斜航流体力から推定できることが分かり、冒頭で述べた推定精度向上の目標を達成した。特に前報と異なるところを以下に示す。

1. 実験データに即した線形流体力係数の相互関係を用いて、特に $Y'_r \sim (N'_v + (m'_y - m'_x))$ の関係から粘性揚力モデルの補正を行った。
2. その補正は旋回に起因するもので、船体中央に馬蹄形粘性渦を置くことにより解決した。その結果、 Y'_r の推定値は実験値と良く一致するようになった。

3. また環状のクロスフロー伴流渦のうち、これまで無視していた旋回に起因する鉛直渦の効果を再考し、クロスフロー流体力モデルの補正を行った。
4. その補正は、船体鏡像である船体中央部に等分布するクロスフロー鉛直渦との干渉力を考えることにより解決した。その結果、その場旋回など旋回時のクロスフロー抗力の推定値は実験値とよく一致するようになった。

参考文献

- 1) IMO : INTERIM STANDARDS FOR SHIP MANOEUVRABILITY, RESOLUTION A.751 (18), 1993
- 2) 操縦性研究の設計への応用, 日本造船学会運動性能研究委員会第 12 回シンポジウム, 1995
- 3) 貴島勝郎, 名切恭昭 : 船尾形状を考慮した操縦流体力の近似的表現, 西部造船会会報 第 98 号, 1999
- 4) 烏野慶一, 前川和義, 斎藤泰夫, 池田 浩 : 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 4) —クロスフローモデルの修正—, 日本造船学会論文集 第 187 号, 2000
- 5) 烏野慶一, 岡野誠司, 前川和義, 池田 浩 : 旋回時のクロスフローモデルについて, 関西造船協会論文集 第 236 号, 2001
- 6) 日本造船学会運動性能研究委員会操縦性能推定専門委員会, 「船の操縦性能の推定」特集, 日本造船学会誌 第 668 号, 1985
- 7) 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研究, 西部造船会会報 第 69 号, 1985
- 8) 操縦性能の予測と評価, 日本造船学会運動性能研究委員会第 4 回シンポジウム, 1985
- 9) 芳村康男 : 浅水域の操縦運動数学モデルの検討 (第 1 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 200 号, 1986
- 10) 日本造船研究協会第 7 基準部会 : 国際規則と船舶設計等との関連に関する調査研究報告書 (別冊), 研究資料, NO.150R, p.62-65, 1986
- 11) 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, 1990
- 12) 三好潤 : 吃水、トリム変化が主船体流体力に及ぼす影響の成分分離モデルによる解析, 北海道大学修士論文, 2001
- 13) K.Karasuno and K.Maekawa : An Element-Type Mathematical Model Derived from Simplified 3D Vortex System on Ship-Hull Hydrodynamic Forces During Slow-Speed Maneuvering Motion, Proc. of MARSIM 2000, 2000
- 14) 芳村康男 : 浅水域の操縦運動数学モデルの検討 (第 2 報) —低速操船時, 主船体に働く流体力について—, 関西造船協会誌 第 210 号, 1988
- 15) 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, 1988

Appendix

成分分離型数学モデル

$$X_H = X_I + X_{Lv} + X_{Di} + X_C + X_C^* + X_F$$

$$Y_H = Y_I + Y_{Lv} + Y_{Di} + Y_C$$

$$N_H = N_I + N_{Lv} + N_{Di} + N_C$$

1) 理想流体力

$$X_I = 1/2 \cdot \rho \cdot L_{pp}^2 \cdot d_m \cdot m'_y \cdot (r \cdot v + x_t \cdot r^2)$$

$$Y_I = -1/2 \cdot \rho \cdot L_{pp}^2 \cdot d_m \cdot m'_x \cdot r \cdot u$$

$$N_I = -1/2 \cdot \rho \cdot L_{pp}^2 \cdot d_m \cdot \{(m'_y - m'_x) \cdot v \cdot u + m'_y \cdot x_t \cdot r \cdot u\}$$

2) 粘性揚力

$$X_{Lv} = (7) \text{ 式に同じ}$$

$$Y_{Lv} = (8) \text{ 式に同じ}$$

$$N_{Lv} = (9) \text{ 式に同じ}$$

3) 誘導抗力

$$X_{Di} = (13) \text{ 式に同じ}$$

$$Y_{Di} = (14) \text{ 式に同じ}$$

$$N_{Di} = (15) \text{ 式に同じ}$$

4) クロスフロー抗力・揚力

$$X_C = (10) \text{ 式に同じ}$$

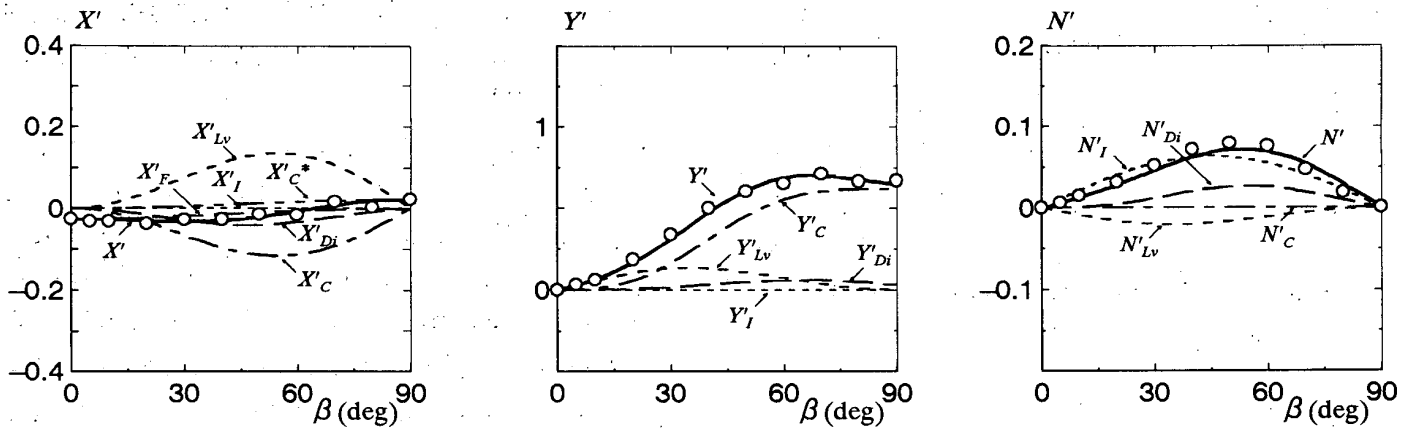
$$Y_C = (11) \text{ 式に同じ}$$

$$N_C = (12) \text{ 式に同じ}$$

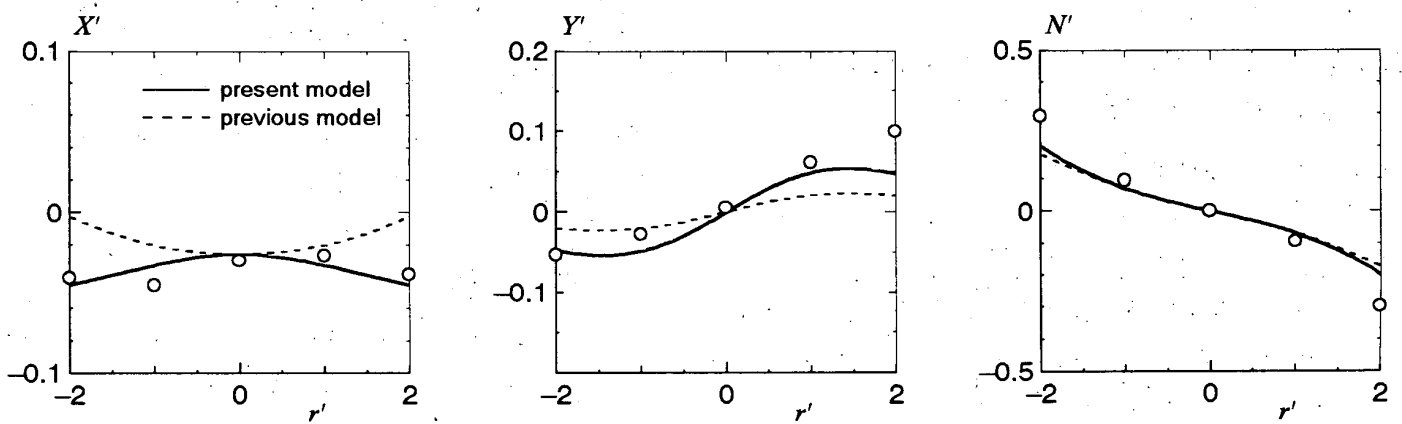
$$X_C^* = 1/2 \cdot \rho \cdot L_{pp} \cdot d_m \cdot \{d_{fm}/d_m \cdot C_{Lasf} \cdot (v + x_f \cdot r)^2 - d_{am}/d_m \cdot C_{Lasa} \cdot (v + x_a \cdot r)^2\}$$

5) 前後摩擦力

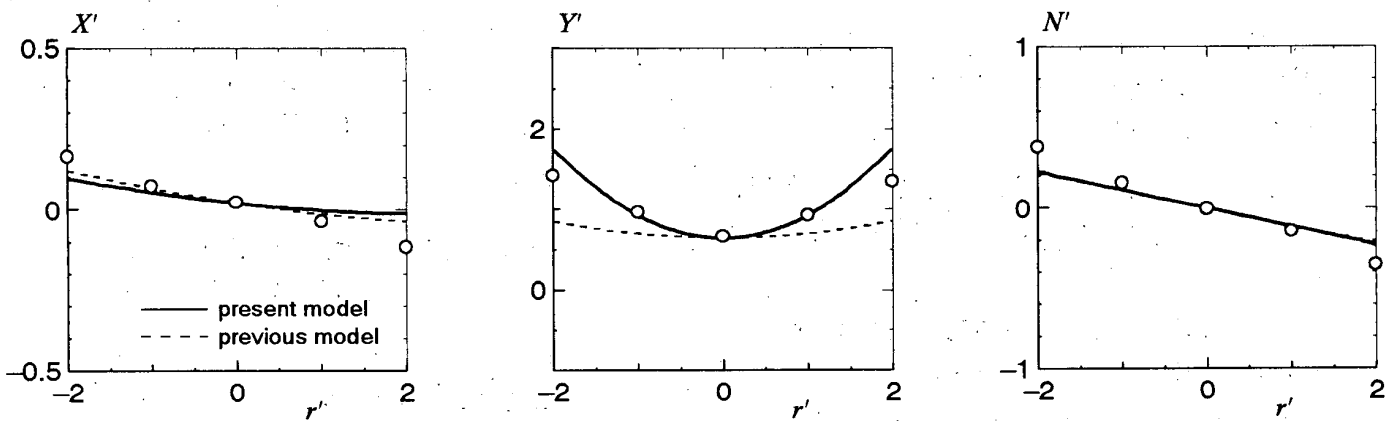
$$X_F = -1/2 \cdot \rho \cdot L_{pp} \cdot d_m \cdot C'_F \cdot |u| \cdot u$$



(a) Analyzed results of hydrodynamic forces in oblique motion

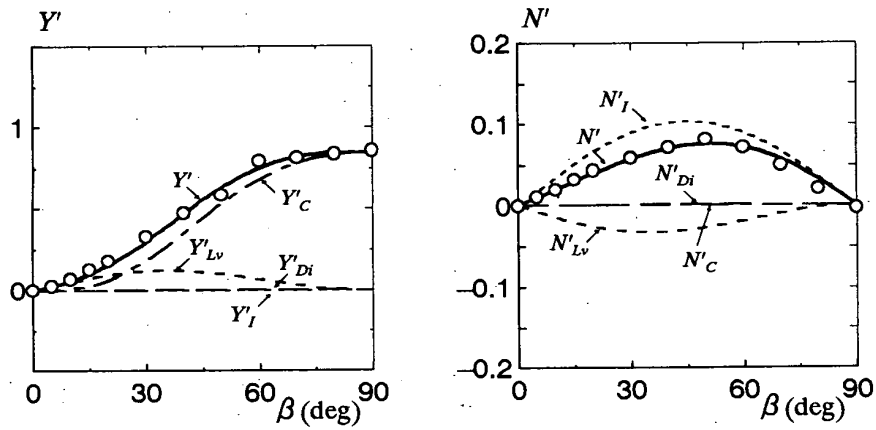


(b) Estimated results of hydrodynamic forces in pure-turning motion ($\beta=0$ deg)

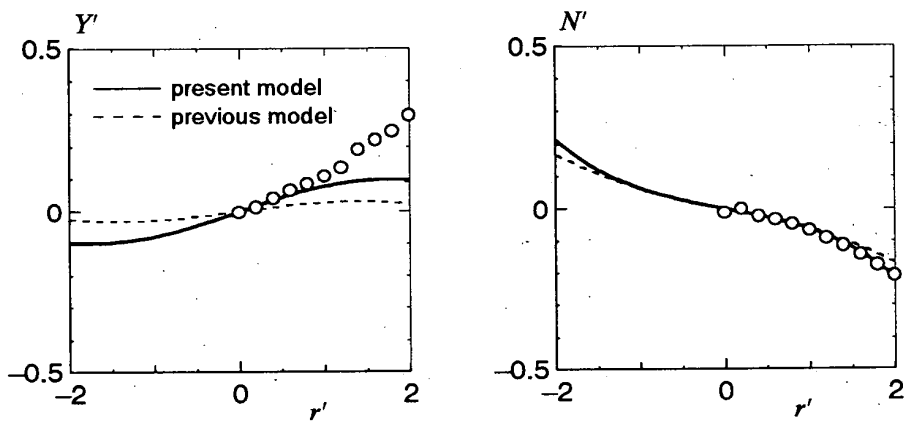


(c) Estimated results of hydrodynamic forces in lateral-turning motion ($\beta=90$ deg)

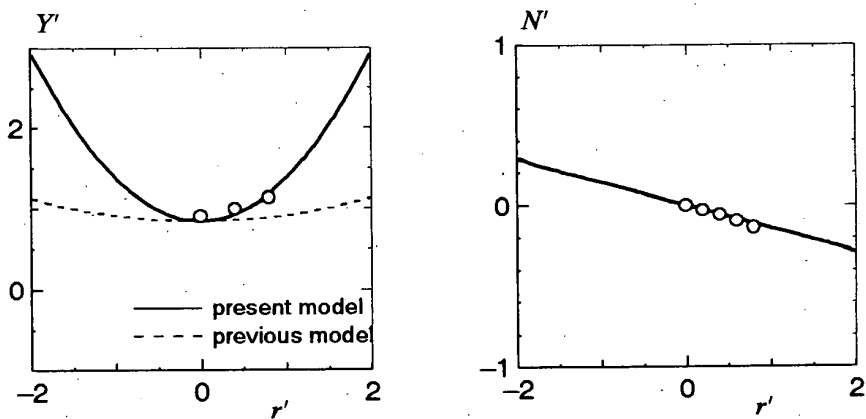
Fig. 4 Comparison of hydrodynamic forces between present model and previous model (PCC¹⁴).



(a) Analyzed results of hydrodynamic forces in oblique motion

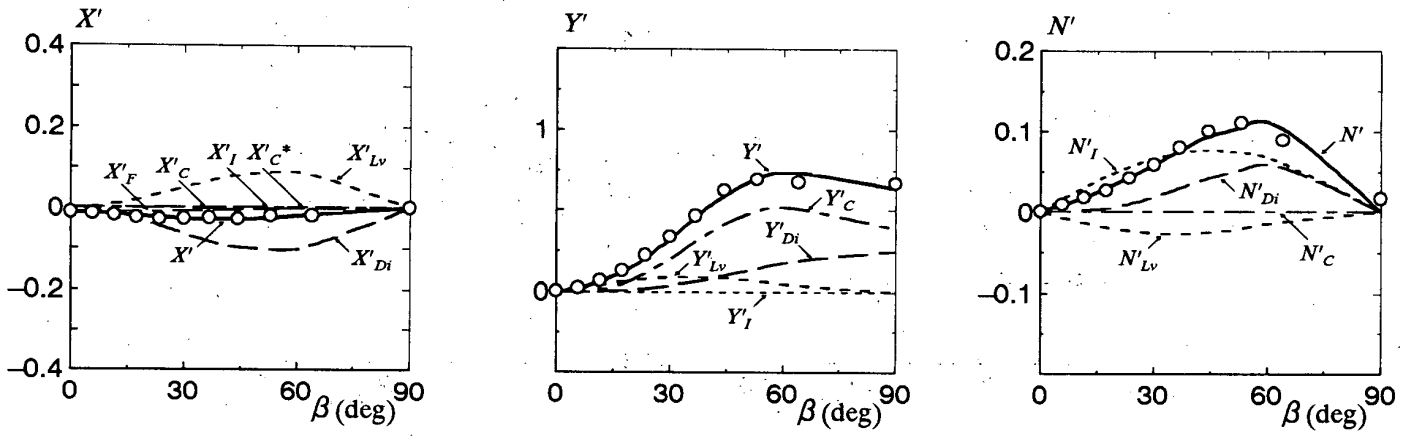


(b) Estimated results of hydrodynamic forces in pure-turning motion ($\beta=0$ deg)

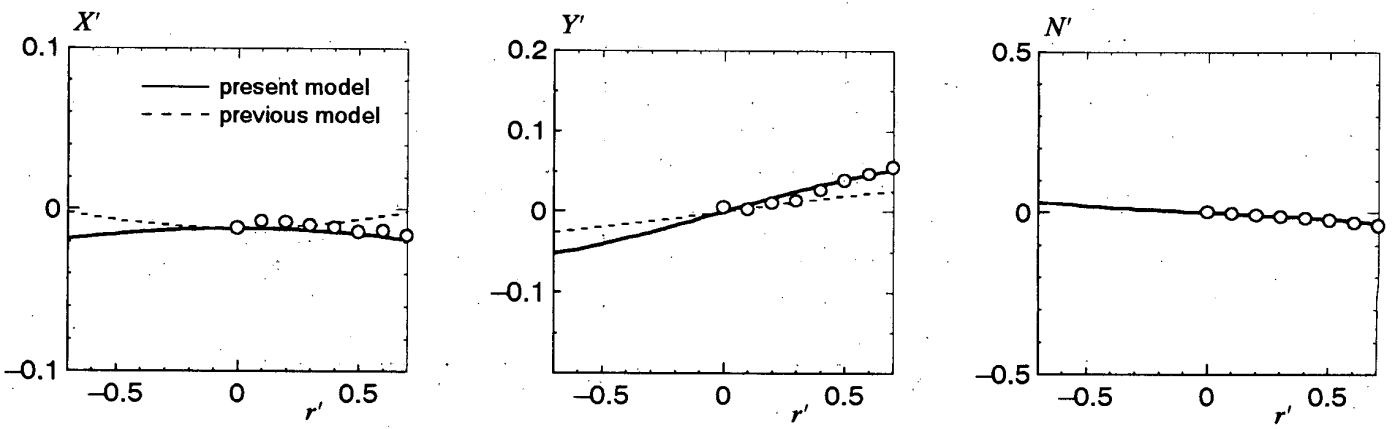


(c) Estimated results of hydrodynamic forces in lateral-turning motion ($\beta=90$ deg)

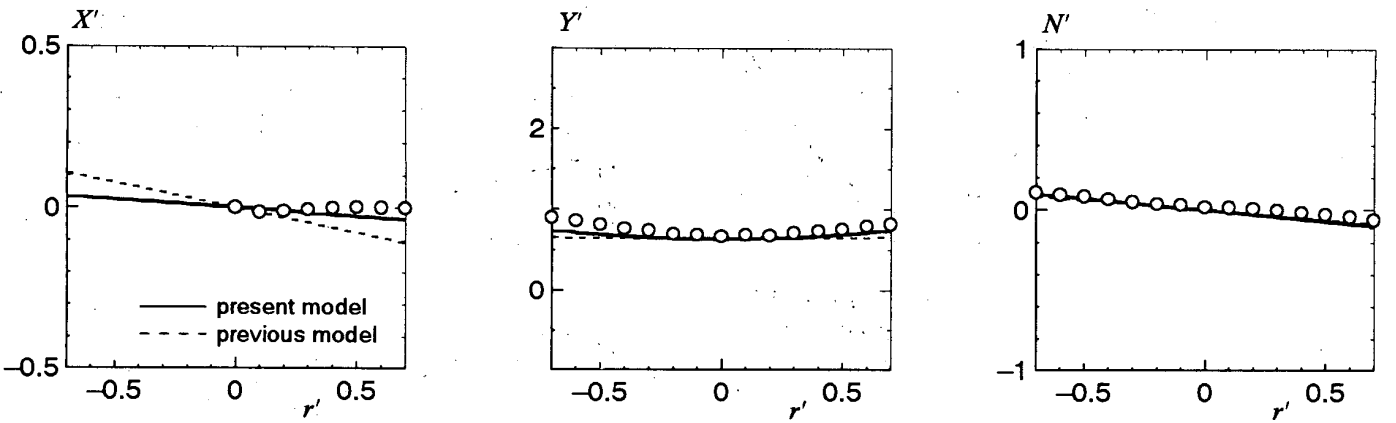
Fig. 5 Comparison of hydrodynamic forces between present model and previous model (Esso Osaka¹⁵⁾).



(a) Analyzed results of hydrodynamic forces in oblique motion

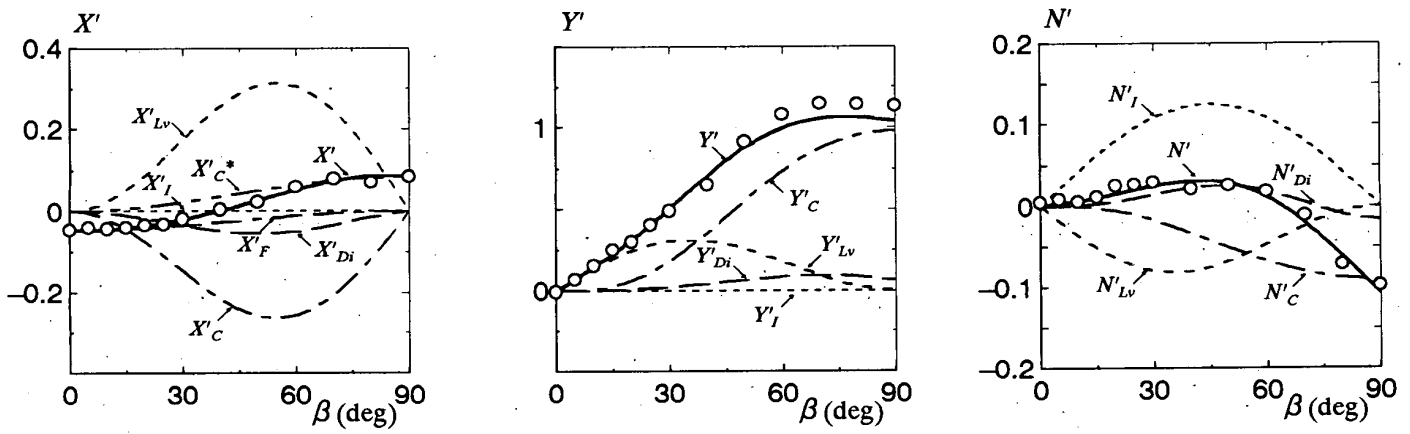


(b) Estimated results of hydrodynamic forces in pure-turning motion ($\beta=0$ deg)

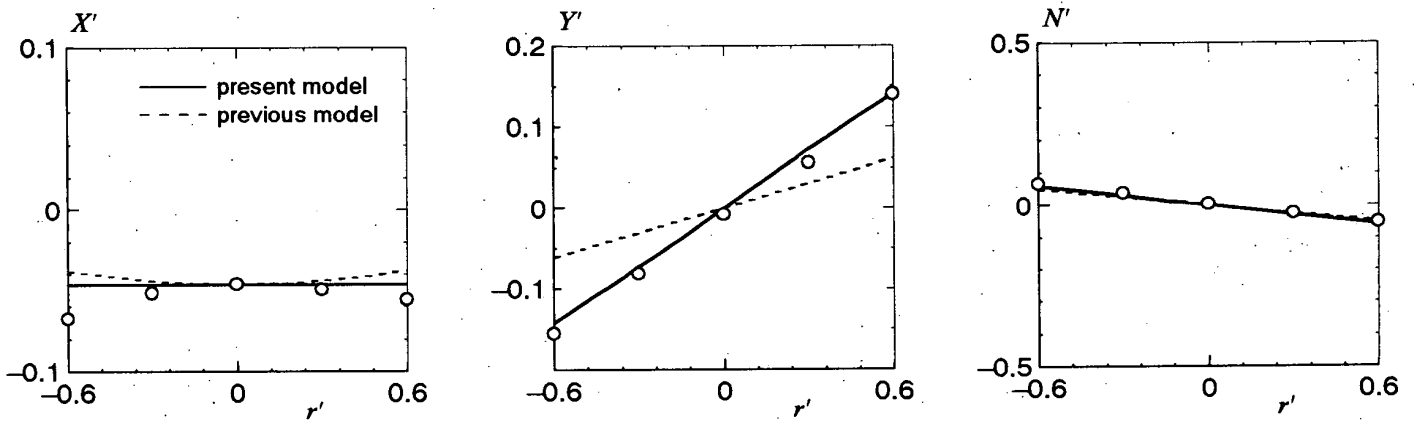


(c) Estimated results of hydrodynamic forces in lateral-turning motion ($\beta=90$ deg)

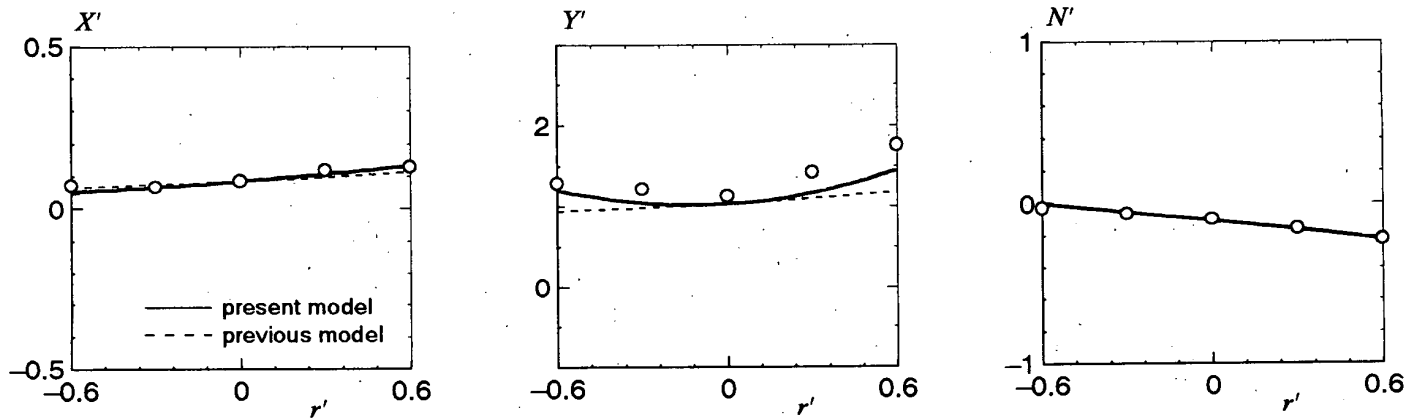
Fig. 6 Comparison of hydrodynamic forces between present model and previous model (SR108¹⁰).



(a) Analyzed results of hydrodynamic forces in oblique motion

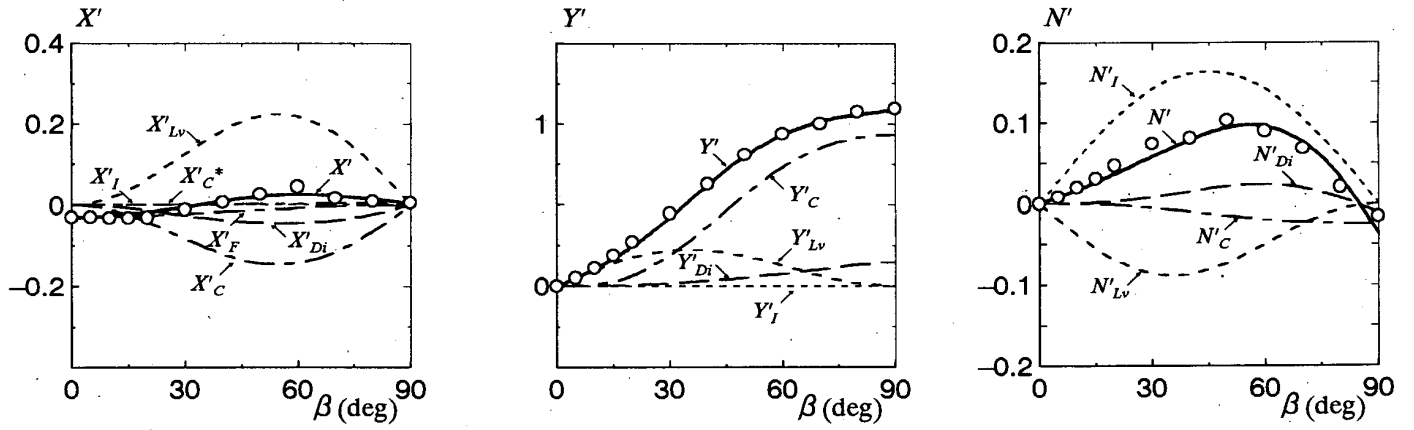


(b) Estimated results of hydrodynamic forces in pure-turning motion ($\beta=0$ deg)

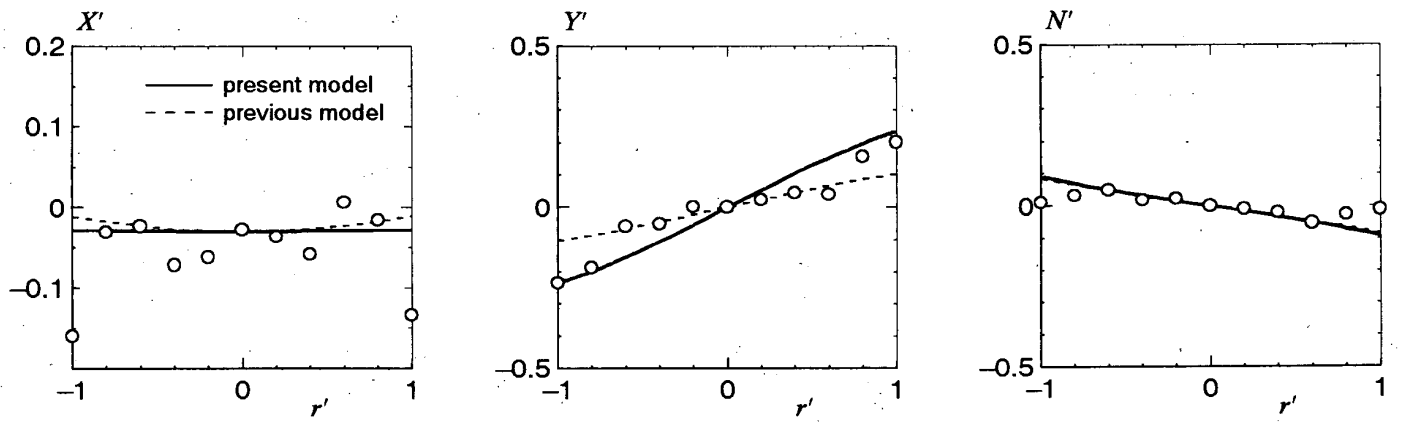


(c) Estimated results of hydrodynamic forces in lateral-turning motion ($\beta=90$ deg)

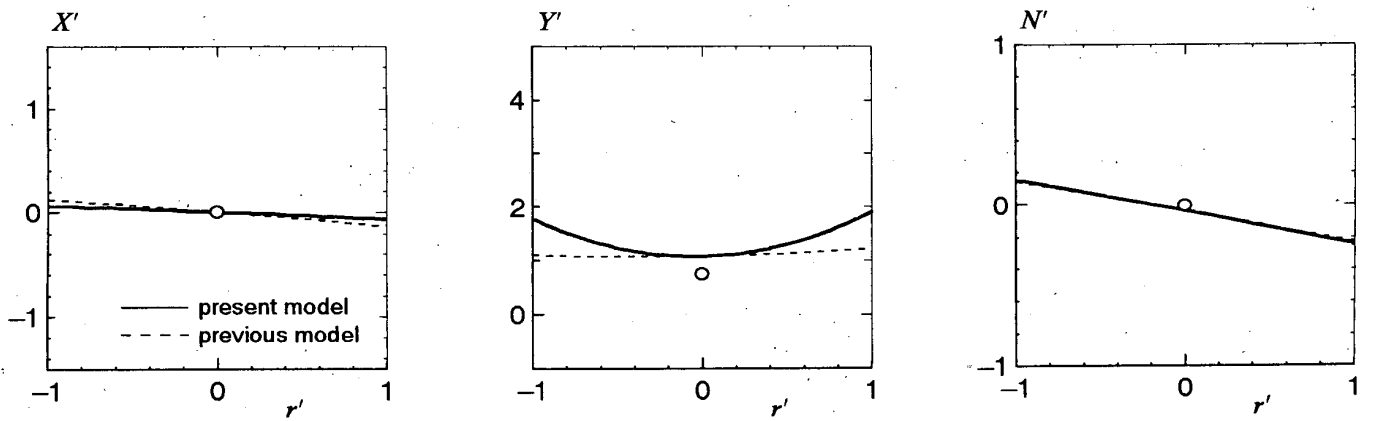
Fig. 7 Comparison of hydrodynamic forces between present model and previous model (Trawler¹¹⁾).



(a) Analyzed results of hydrodynamic forces in oblique motion



(b) Estimated results of hydrodynamic forces in pure-turning motion ($\beta=0$ deg)



(c) Estimated results of hydrodynamic forces in lateral-turning motion ($\beta=90$ deg)

Fig. 8 Comparison of hydrodynamic forces between present model and previous model (Research vessel ¹²).