

## 分割模型試験による操縦流体力の非線形成分の検討 \*1

正会員 湯室彰規 \*2, 内田賢治 \*3

## A Consideration on Nonlinear Component of Maneuvering Hydrodynamic Force from Segmented Model Test Results

By Akinori YUMURO (*Member*) and Kenji UCHIDA

In order to clarify availability of the so-called cross-flow model, some model experiments on hull hydrodynamic derivatives due to drift angle have been carried out with segmented models. The lateral forces on each of the segments were measured for various ship hulls including a flat plate. Here, it is assumed that lateral force on each segment can be expressed by a formula consisting of linear and second order terms. The linear and nonlinear derivatives are determined from the curve-fitting by a least-squares method.

This report gives experimental results of the distribution of the nonlinear lateral force component over the ship's length. A comparison is made between local values of second order derivatives and cross-flow drag coefficients at a drift angle of  $90^\circ$ . As a result, it is indicated that a ratio of the two values is a function of the longitudinal location. Moreover, distribution of the ratio is greatly dependent on the ship's hull form. In predicting the nonlinear derivative with sufficient accuracy, the cross-flow drag coefficients for  $90^\circ$  drifting should be corrected when a ship moves obliquely. Development of prediction procedure of the correction factor is left as a future problem.

**Keywords :** *Maneuverability, Hydrodynamic Force, Nonlinear Component, Segmented Model*

## 1. 緒言

船体操縦流体力の非線形項 (非線形成分) の表現法の一つとして、船長方向の各断面の横抗力係数に基づいた、いわゆる cross flow<sup>1)</sup> モデルが便利に用いられている。このモデルは特に船の横方向の運動が前進運動に比べて大きい場合に効果的に用いられている<sup>2)~5)</sup>。ただし、この非線形項の表現法は、MMG (「操縦運動の数学モデル検討グループ」) では当初前進運動が支配的な通常の運動状態に対して提案されており、この基本的な場合に対しても、その妥当性や有効性について、さらなる検討が望まれる。

本報告は、通常の運動状態の場合に限定し、船長方向の流体力分布の実測値を基にして、この妥当性の問題などについて実験的に調査したものである。まず、

長さ・幅比の系統船型を含むいくつかの船型の分割模型試験の結果を示す。次いで、その結果を基にして本来の非線形成分と cross flow モデルによるそれとの対応度、およびこれに及ぼす船型の影響についての検討結果を示している。なお、ここでは基本的な場合として斜航状態を考え、主として横力を対象とする。

## 2. 分割模型試験の要領と実験条件

## 2.1 供試模型船

水線形状が放物線で表わされる数式船型とタンカー船型より成る。これらの主要目を Table 1 に示す。前者は、特に船幅の影響に注目し、長さ・幅比 ( $L/B$ ) を系統的に変化させた船型である。その一部として  $L/B = 100$  の模型を含ませている。以下ではこの模型を平板とも呼ぶ。この系統模型では側面は垂直であり、ビルジ部には断面積係数が 0.998 の丸みを付けてある。また、前後端には側面形状に対し半径 20mm の丸み、水線形状に対しては 3mm の丸みが付けてある。

\*1 平成12年11月16日 造船三学会秋季連合大会において講演、原稿受付平成12年12月1日

\*2 埼玉大学工学部

\*3 石川島播磨重工業 (株)

Table 1 Principal particulars of ship models.

	L/B series model			Tanker model
L(m)	3.000	3.000	3.000	3.000
B(m)	0.0300	0.300	0.600	0.5217
d(m)	0.180	0.180	0.180	0.1710
$C_b$	0.665	0.665	—	0.794
L/B	100	10	5	5.75
d/L	0.0600	0.0600	0.0600	0.0570

後者は中型タンカーの船型であり、要目上の特徴は従来の大型タンカーと多少異なり、船尾バルブが採用された船型である。

### 2.2 分割模型試験方法の概要

試験装置の構造は基本的には文献6)に従っている。分割された模型船の各要素を検力計を介して、模型船長さにはほぼ等しいビームに取り付ける。このビーム(下側ビーム)は曳引車の台車側に固定されたビーム(上側ビーム)にガイド装置によって結合される。ガイド装置の下端部は一つの軸まわりの回転のみが可能であり、従って横揺れは拘束されている。上下動を拘束する場合は2つのビーム間に金具を挿入して下側ビームを固定する。試験装置の概念図をFig. 1に示す。

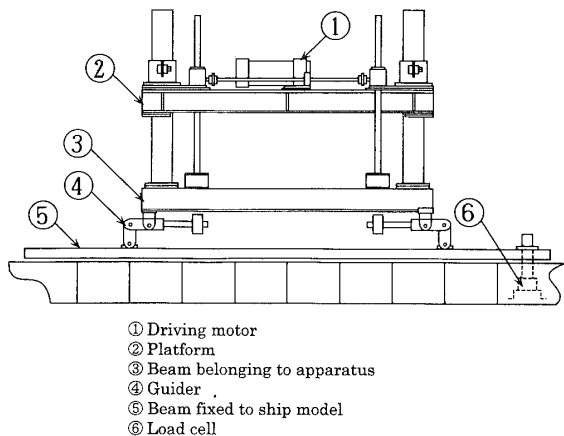


Fig. 1 Arrangement of ship model and apparatus for segmented model test.

検力計の上には垂直方向にロッドが取り付けられており、これらのロッドが下側ビームを貫通する。検力計に初期荷重が作用しないように留意しながら所定の状態にロッドがビームに固定される。Fig. 1では省略されているが、上側ビームと模型船は横方向に拘束を与えない曳航ロッドで接続される。

### 2.3 実験状態

模型船は10個の等分割とし、その要素間隔はL/B系統船型では2mm、タンカー船型では3mmとした。

模型船にはプロペラと舵は取り付けしていない。模型船の拘束状態としては、L/B系統船型では完全拘束とし、タンカー船型では縦運動を自由に行っている。斜航角は $\beta = 0^\circ \sim 20^\circ$  および  $\beta = 90^\circ$  である。試験船速は、横方向に曳航する場合を除いて、前者の船型では  $F_N = 0.100$ 、後者では  $F_N = 0.171$  である。

### 3. 実験の結果

斜航時の各要素の横力係数  $Y'_i$  ( $i = 1 \sim 10$ ) の実験結果をFig. 2に示す。図中、 $\beta$ は斜航角を表わす。また、各要素の横抗力係数  $(C_D)_i$  ( $i = 1 \sim 10$ ) をFig. 3に示す。ここで無次元化には要素の側面積を用いている。横曳航試験は横移動速度  $v = 0.1 \sim 0.55\text{m/sec}$  の範囲で行なっているが、 $v > 0.3\text{m/sec}$  では  $(C_D)_i$  の値は略々一定と見なせることから、Fig. 3では  $v = 0.3 \sim 0.55\text{m/sec}$  における平均値を示してある。こ

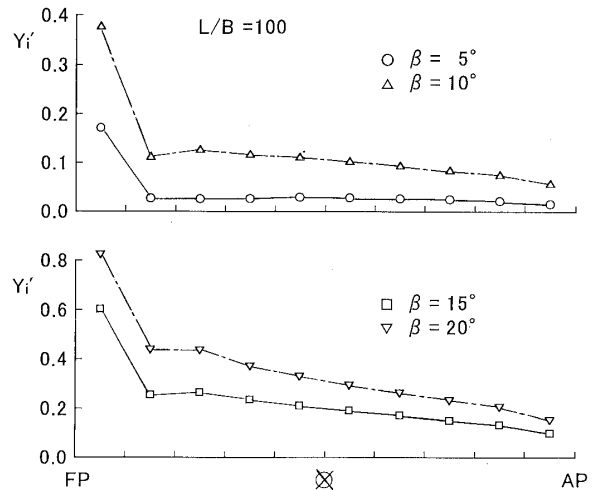


Fig. 2 (a) Measured lateral force on segmented model ( $L/B = 100$ ).

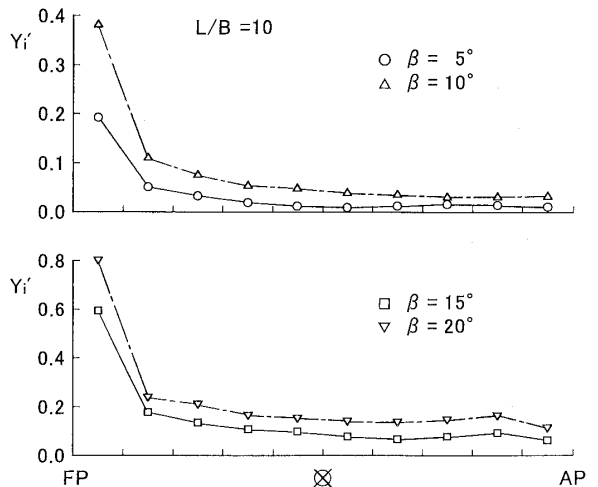


Fig. 2 (b) Measured lateral force on segmented model ( $L/B = 10$ ).

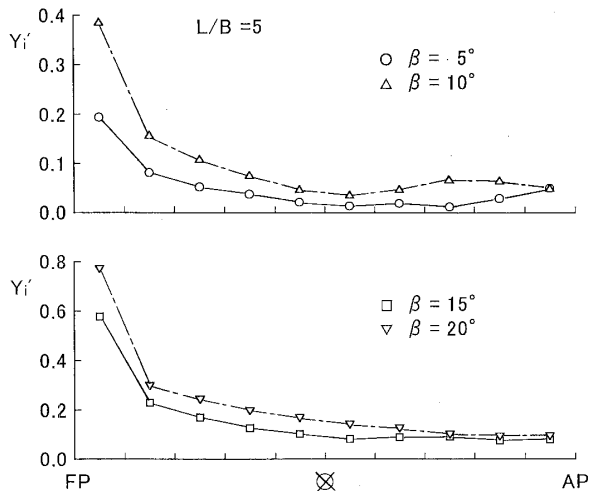


Fig. 2 (c) Measured lateral force on segmented model ( $L/B = 5$ ).

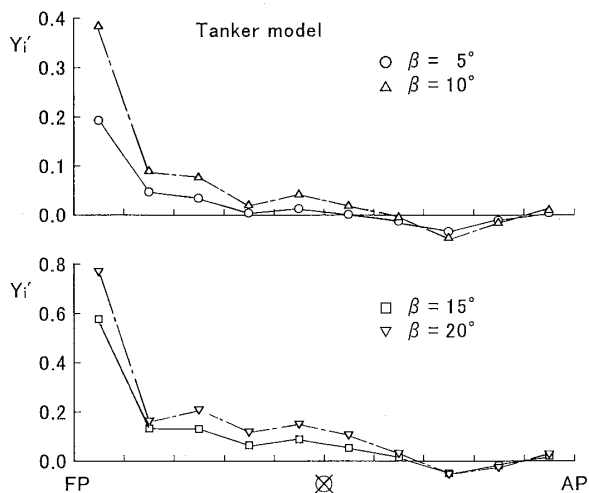


Fig. 2 (d) Measured lateral force on segmented model (Tanker model).

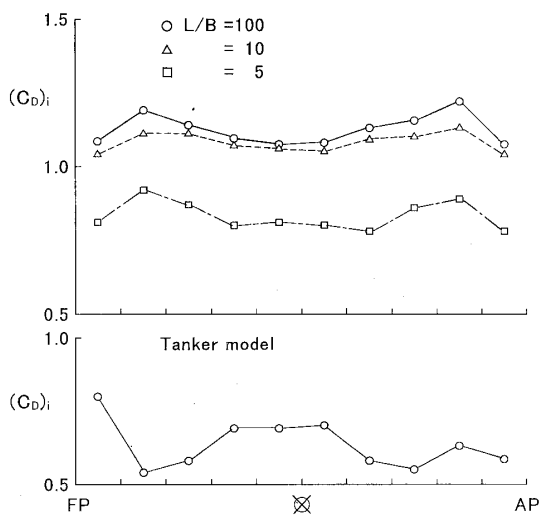


Fig. 3 Measured lateral drag on segmented models.

ここでレイノルズ数を  $Re = (2d)v/\nu$  のように定義すると、 $v = 0.3\text{m/sec}$  はほぼ  $Re = 1 \times 10^5$  に相当する。ここで  $d$  は吃水、 $\nu$  は動粘性係数である。たとえば、文献7)で同様な実験が  $Re = 1.2 \times 10^5 \sim 3.5 \times 10^5$  の範囲で行なわれており、 $Re > 2.3 \times 10^5$  になると造波影響が現われるとしている。

以下では分割模型全体を全体模型と呼ぶ。全体模型の横力係数、モーメント係数を  $Y'$ 、 $N'$  で表わし、横抗力係数を  $C_D$  で表わす。ここで全体模型の値は、各要素の値の総和として得られるものとする。 $Y'$  および  $N'$  を Fig. 4 に示す。 $L/B$  系統船型については船型が同じの一体模型の値<sup>8)</sup>を記入して比較している。傾向としては分割模型の方が小さい値を示しているが、概して同程度の値を示している。ただし、一体模型の長さは 1.2m であり、本報の供試模型船とは長さに相違がある。Fig. 3 の結果から  $L/B = 100$  の模型の  $C_D$  を求めると 1.13 となる。ここで、平板の横抗力係数について文献9)の実験結果と比較してみる。船体の縦横比 ( $L/B = 100$  の模型の縦横比にほぼ同じ)をもつ矩形平板の結果が示されており、大略  $C_D = 1.0$  となっている。

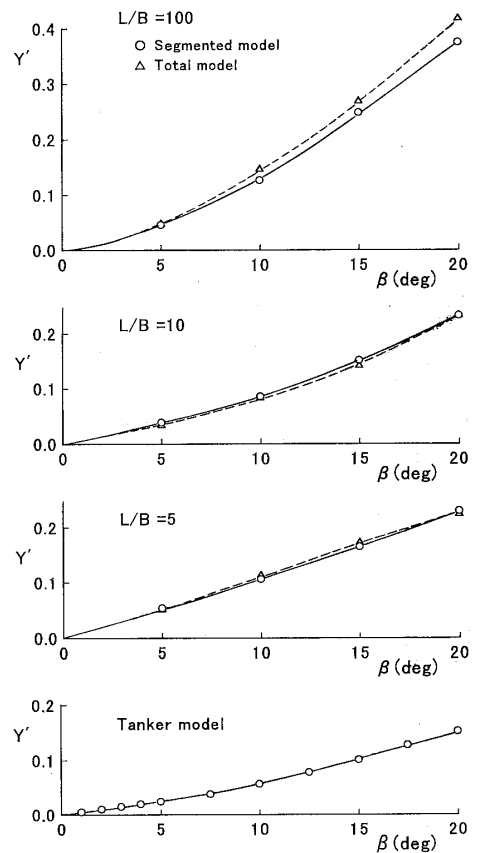


Fig. 4 (a) Comparison of lateral force coefficients obtained from segmented model and total model.

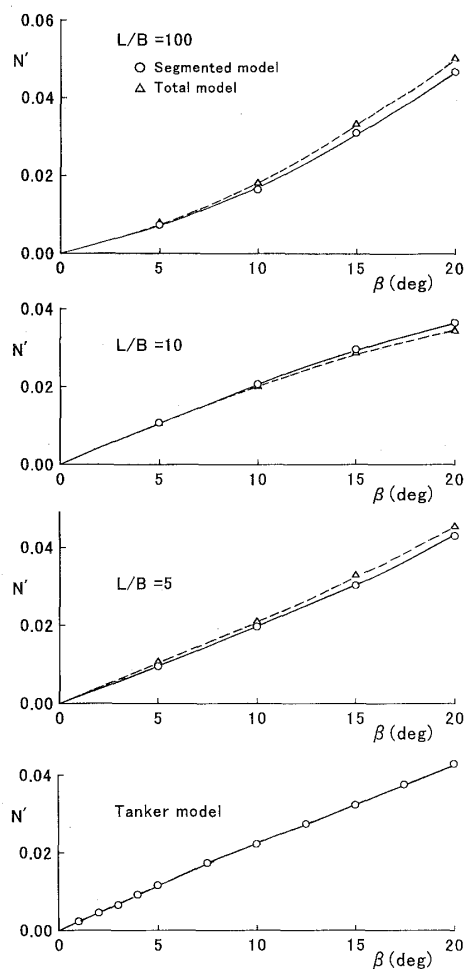


Fig. 4 (b) Comparison of yaw moment coefficients obtained from segmented model and total model.

厚さ比に差があるので厳密な比較ではないが、両結果は同程度の値を示していると言える。

#### 4. 平板の横力分布の実験・計算の比較

$L/B = 100$  の模型を平板（鏡像を考えた平面翼）と見なし、その長さ方向の横力分布の計算を行ない実測値と比較する。計算は Bollay の翼理論<sup>10)</sup> に基づくが、束縛渦強さと自由渦流出角の双方を未知数として積分方程式を解き、渦強さを求める<sup>11)</sup>。ここで後方に  $x$  軸の正を取り、無次元変数  $\xi = x/(L/2)$  を用いる。渦強さを  $\gamma(\xi)$  とすると、横力係数は近似的に次式のように表わされる。

$$Y' = \cos \beta \int_{-1}^1 \gamma(\xi) d\xi \quad (1)$$

ただし、 $\gamma(\xi)$  は一様流速度  $V$  で除した無次元量を表わす。 $\gamma(\xi)$  の表示については、 $a(\xi)$  を未知関数として

$$\gamma(\xi) = a(\xi) \sqrt{\frac{1-\xi}{1+\xi}} \quad (2)$$

の形を仮定している。(1) 式を便宜上、次式のように表わす。

$$Y' = \int_{-1}^1 \frac{dY'}{d\xi} d\xi \quad (3)$$

ここで  $dY'/d\xi$  は横力係数密度を表わすが、前述の分割要素の横力係数  $Y'_i$  とは  $dY'/d\xi = Y'_i/2$  の関係にある。

$\beta$  をパラメータとし、横力係数密度の計算と実験の比較を行なうと Fig. 5 が得られる。ここで対象としている  $\beta$  が  $20^\circ$  以下の範囲では、いずれの  $\beta$  の値に対しても、計算値は実験結果を比較的良好に説明している。

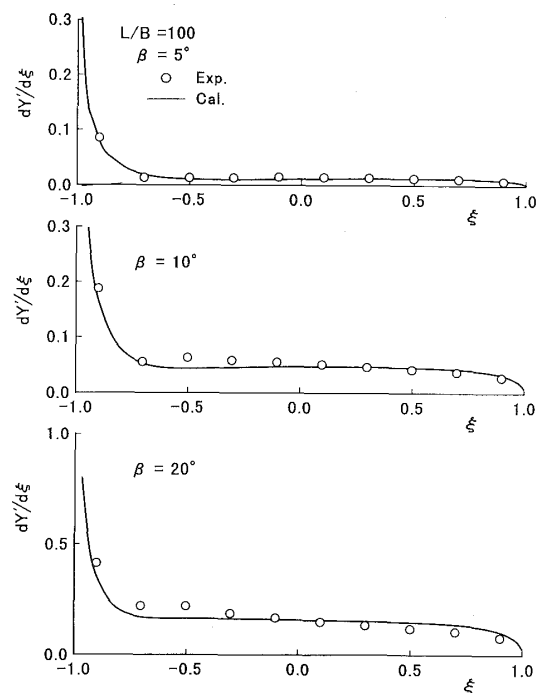


Fig. 5 Comparison of calculated and experimental lateral force distributions ( $L/B = 100$ ).

ここでは自由渦流出角  $\Theta$  を Bollay の第一近似の  $\Theta/\beta = 0.5$  とはせず繰返し計算の方法により求めているが、 $\Theta/\beta$  の計算結果は、たとえば  $\beta = 10^\circ$  で 0.648、 $\beta = 20^\circ$  で 0.589 となる。本報の要領による計算では、この値は 0.5 よりも大きく、 $\beta$  の増大に従って小さくなる。

#### 5. 横力の非線形成分の分布

斜航時の船体横力係数が  $\beta$  の 2 次多項式

$$Y' = Y'_{\beta} \beta + Y'_{\beta\beta} \beta^2 \quad (4)$$

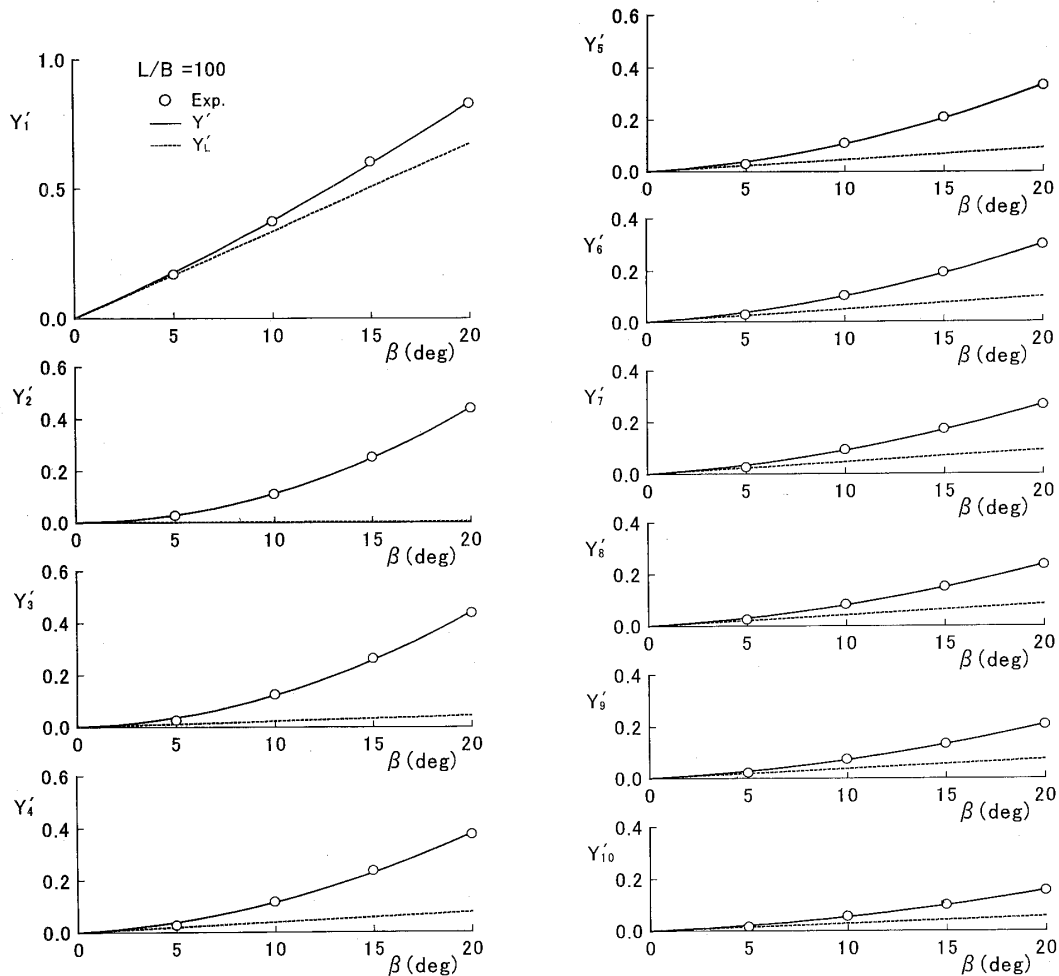


Fig. 6 (a) Linear and nonlinear component of lateral force on each segment ( $L/B = 100$ ).

の形で表わされると仮定する。これに伴い、各分割要素の横力係数も次式の形で表わされるとする。

$$Y'_i = (Y'_i)_{\beta} \beta + (Y'_i)_{\beta\beta} \beta^2 \quad (i = 1 \sim 10) \quad (5)$$

各要素の横力の実測値に対して (5) 式による当てはめを行なった結果を Fig. 6 に示す。ただし、当てはめ計算は最小 2 乗法による。図中、添字  $i$  については最前方の要素番号を 1 とし、 $Y'_L$  は線形項  $(Y'_i)_{\beta} \beta$  を意味する。

総じて各要素の実測値は 2 次多項式で大略近似できている。線形成分と非線形成分の長さ方向分布について、 $L/B = 100$  と 5 の船型間の比較を行なうと以下のようになる。 $L/B = 100$  では、 $i = 1$  の要素において非線形成分の割合が最も小さく、 $i = 2$  の要素では一転して非線形成分の割合が最も大きくなる。以後、この成分の割合は順次減少していく。ここで特徴的なことは、 $i = 2$  の要素では線形成分は極めて小さく、ほとんどが非線形成分で占められていることである。

一方、 $L/B = 5$  においては、 $i = 1, 2$  の前方部では非線形成分は十分に小さく、ほとんどは線形成分より成る。以後の前半部では非線形成分は増加していくが、後半部では減少に転じ、特に後端部付近 ( $i = 9, 10$ ) では負の値を示す。

タンカー船型における非線形成分の分布の傾向は基本的には  $L/B = 5$  の場合と同じである。ただしタンカー船型における特徴として次のことが挙げられる。従来、タンカー船型においては船体後半部で横力が負となる部分が現われることが知られているが<sup>12)</sup>、本報告のタンカー船型でも  $i = 8, 9$  の要素において負の横力となっている。さらに、この要素においては、符号を反転させて考えると、あたかも非線形成分が負 (線形成分と非線形成分の符号が逆の意味) である様子を示している。ただし、実際にはこの要素では線形成分が負であるため非線形成分そのものは正の値を示し、 $L/B = 5$  のように船体後半部において非線形成分が負となることはない。

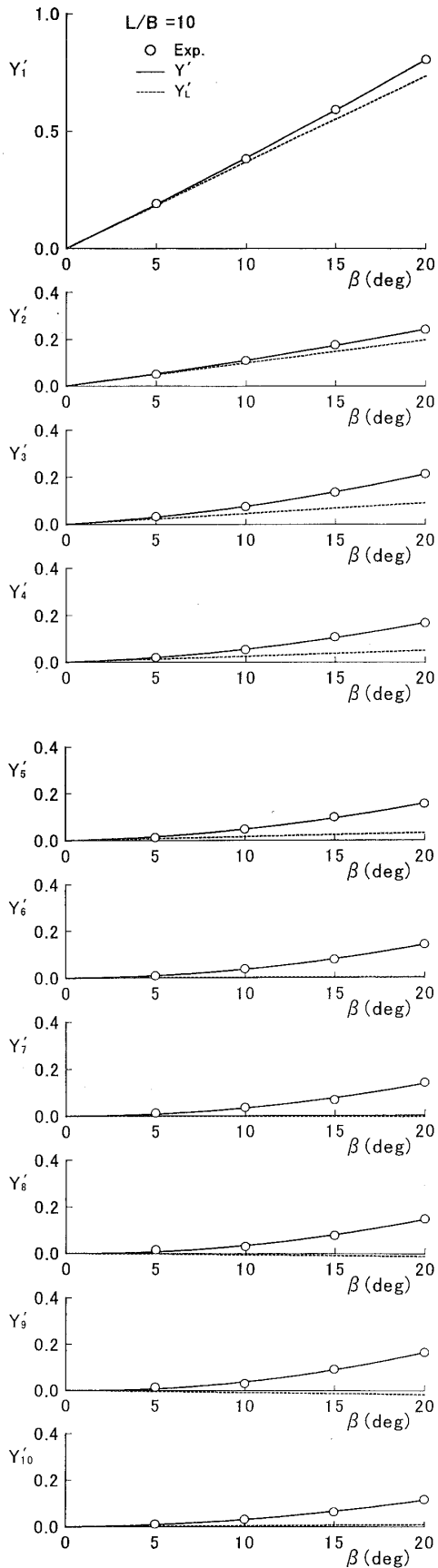


Fig. 6 (b) Linear and nonlinear component of lateral force on each segment ( $L/B = 10$ ).

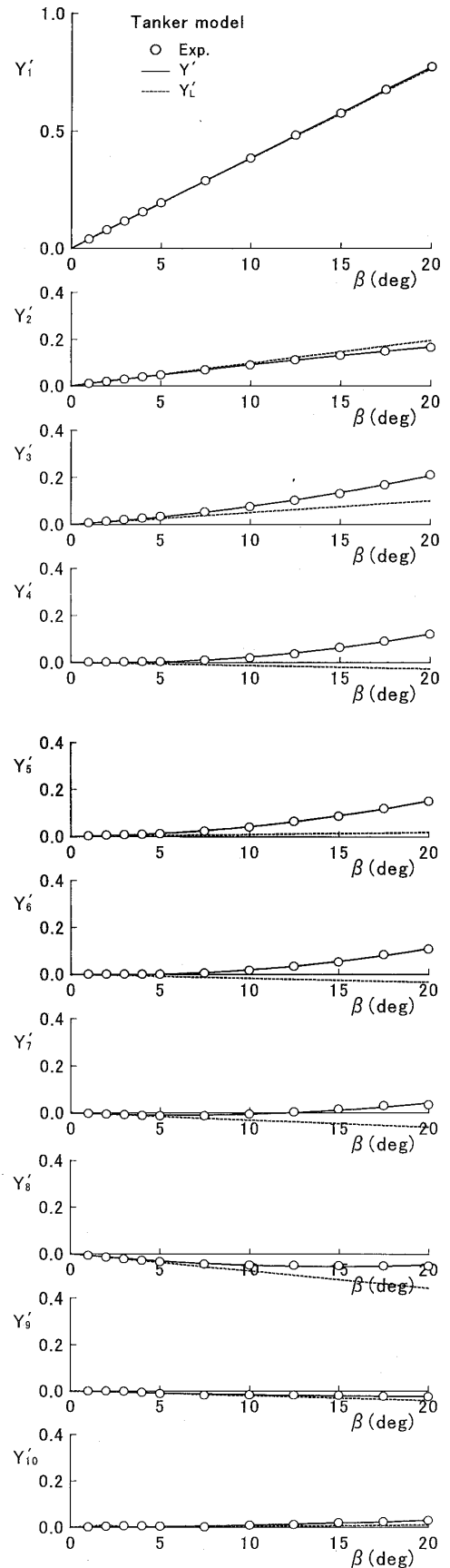


Fig. 6 (c) Linear and nonlinear component of lateral force on each segment ( $L/B = 5$ ).

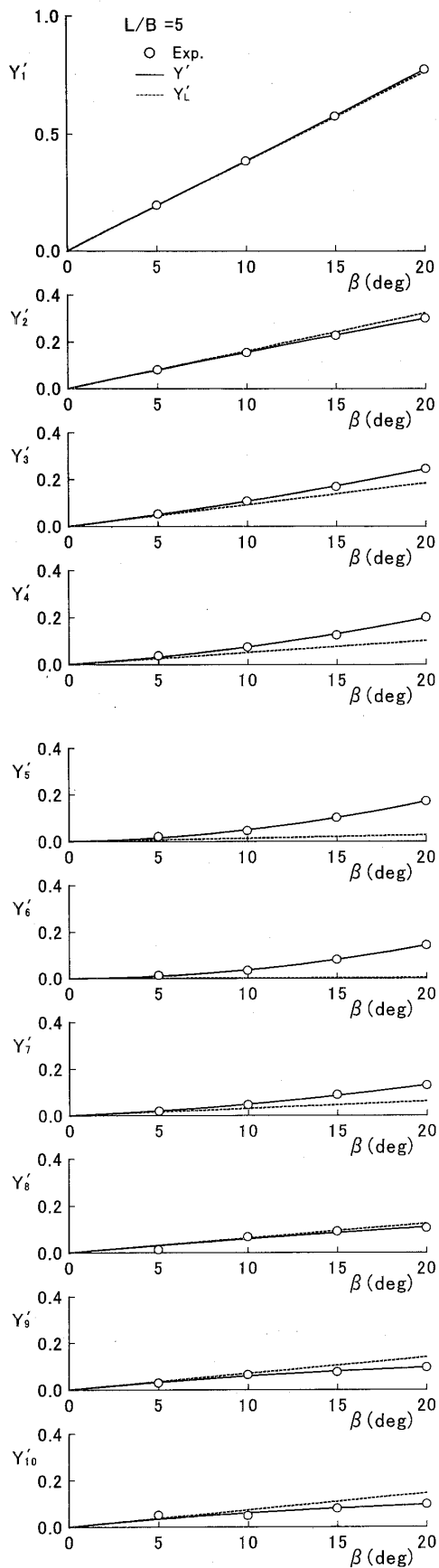


Fig. 6 (d) Linear and nonlinear component of lateral force on each segment (Tanker model).

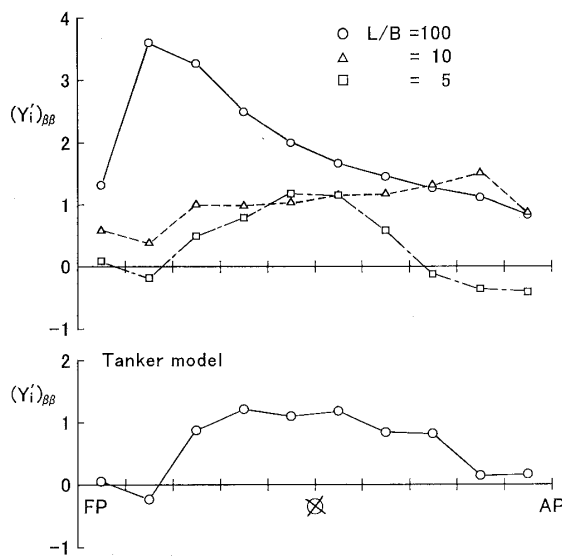


Fig. 7 Distribution of nonlinear derivative over ship's length.

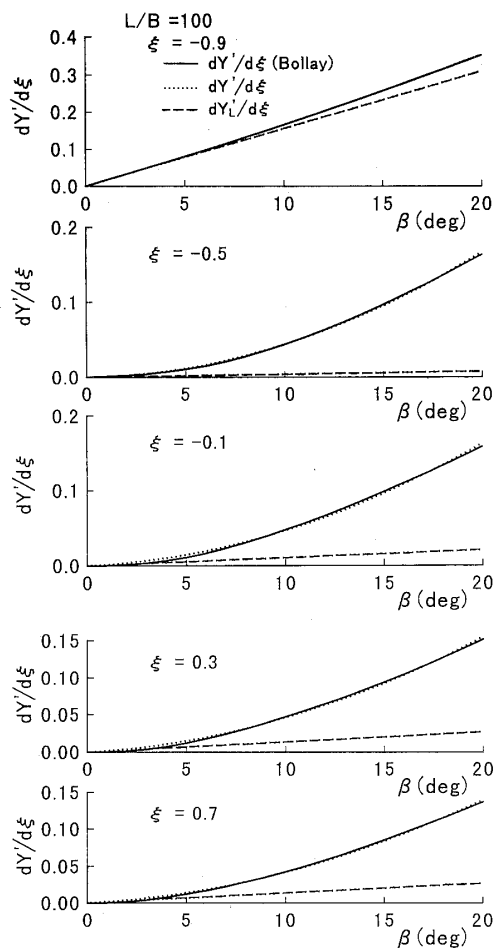


Fig. 8 Linear and nonlinear component of lateral force obtained from calculation ( $L/B = 100$ ).

Fig. 6 の結果から定められた各船型の非線形微係数の長さ方向の変化を Fig. 7 に示す。

$L/B = 100$  の模型においては、線形・非線形成分の分布についての計算を行なっている。その結果を Fig. 8 に示す。実験値の場合と同様に、計算結果に対しても 2 次多項式による当てはめを行なっている。図中、 $dY'/d\xi$  (Bollay) と記しているのは計算値そのものを意味する。非線形成分の割合は最前方部で最も小さく、その直後において逆に最も大きくなること、さらに後方に行くに従い、この割合は減少するという計算結果は、分布の特徴について実験結果をよく説明していると言える。

前述のごとく、 $L/B = 5$  の船型では船体後半部において非線形成分が負になる部分がある。この成分が負になることは、cross flow モデルの概念からは、一様流速の船体横方向成分が負に相当することを意味している。このあたりの事情を明確にするためには、局部的な流れ場の状況を詳細に検討する必要があるが、定性的な一つの推論としては次のように述べることができる。

cross flow モデルでは、一様流速が船体の縦方向と横方向の成分に分離できることが前提となっている。このことは船体の存在によって流れが乱されないことを意味するので、特に十分に薄い物体のような場合には近似的に成り立つと考えられるが、厚い物体の場合には一般にはこの前提を逸脱することになる。事実、 $L/B = 100, 10$  では負の部分は現われていない。また、このモデルは一種の準 2 次元的な取扱いであるため、船体の前後方向の相互の影響を十分に取り入れた取扱いでない。このことも上述の事情に関連していると考えられる。従って Fig. 6 の結果には、流速の分離と準 2 次元的な取扱いを前提としたときの等価的な横方向速度が対応していると考えられる。

なお、タンカー船型では船体後方部において負の非線形成分は現われていない。同じ幅広船型にあつて  $L/B = 5$  の方に現われているには、断面形状が実用船型のそれと大きくかけ離れていることが一因であると考えられる。

文献 13) においてシリーズ 60 ( $C_b = 0.7$ ) の船型の線形・非線形流体力の分布の一例が示されている。これによると、7 分割した最前方の要素では非線形成分の割合は小さく大部分は線形成分から成り、前方より 6 番目の要素では横力そのものが負となり、線形成分と非線形成分の符号が逆になる。このような傾向は本報告におけるタンカー船型のそれとよく似ている。

## 6. 非線形微係数と横抗力係数との対応度

cross flow モデルによる場合、分割要素に働く非線形流体力  $(Y_{NL})_i$  は

$$(Y_{NL})_i = \frac{1}{2} \rho v^2 (C_D)_i (\Delta x \cdot d) \quad (i = 1 \sim 10) \quad (6)$$

のように表わされる。 $v$  は前進速度の横方向成分、 $\Delta x$  は分割幅を表わす。一方、非線形微係数を用いて表わすと

$$(Y_{NL})_i = \frac{1}{2} \rho V^2 (Y'_i)_{\beta\beta} (\Delta x \cdot d) \beta^2 \quad (7)$$

となる。ここで  $V$  は船速を表わす。

$$v = V \sin \beta \simeq V \beta \quad (8)$$

の表示が近似的に許される範囲では、(6) 式と (7) 式より

$$(Y'_i)_{\beta\beta} = (C_D)_i \quad (9)$$

の関係式が得られる。

(9) 式によると、非線形微係数の長さ方向変化は横抗力係数の変化とそのまま対応することになるが、Fig. 3 および 7 に見られるごとく実際には大きさおよび分布の形において両係数の明確な対応性は認められない。特に簡単のため  $C_D(x)$  を一定とする取扱いを行なう場合は、 $(Y'_i)_{\beta\beta}$  の分布も一定と見なすことに相当するが、実状とは大きくかけ離れることになる。

この対応性を見るために、各要素における両係数の比

$$k_i = \frac{(Y'_i)_{\beta\beta}}{(C_D)_i} \quad (10)$$

を考える。 $k_i$  の分布を Fig. 9 に示す。 $k_i$  の値は船長方向に大きく変化する。この分布の形は船型によっても異なる。 $L/B = 5$  およびタンカーの幅広船型では、船体中央部近辺で最大値が現われ、前方あるいは後方に向うに従い概して減少している。このような結果は、文献 14) のシリーズ 60 船型 ( $C_b = 0.7$ ) による  $k_i$  に相当する結果と傾向としては類似している。 $L/B = 10$  の場合を除けば、傾向としては  $k_i$  は船体後半部で船尾に向いほぼ単調に減少している。この傾向は上述のシリーズ 60 船型の結果においても見られる。

船体による整流作用を考えると、実質的な横方向速度は後方に向かうに従い減少することになる。 $k_i$  の単調減少が特に  $L/B = 100$  において明瞭に見られることを考え併せると、この特性に船体の整流作用が何らかの影響を与えているものと想像される。

さらに船型間の特徴として次のことが挙げられる。 $L/B$  系統船型について言えば、 $L/B = 100$  では  $k_i$  の値は大部分の範囲において 1 以上となるが、 $L/B$  の減少に従い 1 以下となる部分が多くなる。このことから、船幅は一般に  $k_i$  の値を小さくする方向に作用すると見なすことができる。



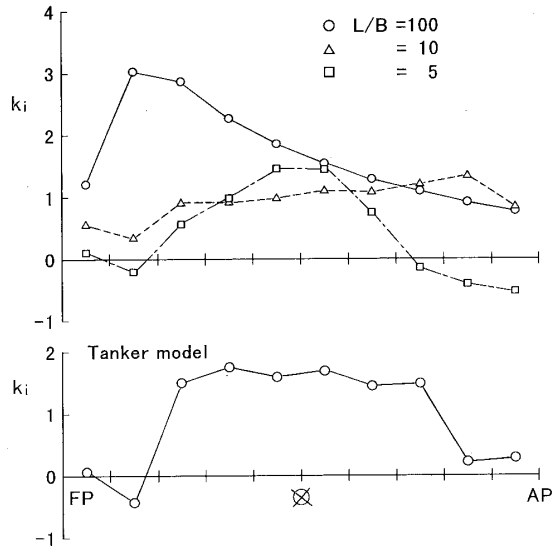


Fig. 9 Longitudinal distribution of ratio of nonlinear derivative to lateral drag coefficient.

Fig. 9 において  $k_i$  が負の値を示すことは、その位置において非線形成分が負であることを意味している。 $L/B=5$  とタンカー船型の非線形成分の比較では、前述のごとく船体後半部で異なる特性を示すが、共通点としては船首直後の位置 ( $i=2$  の要素) でほとんど零か若干の負の値を示すことである。このような傾向は文献 14) においても示されており、上述のシリーズ 60 船型の船体前部 (7 分割中の船首より 2 番目要素) において  $k_i$  相当値が負になり得る例が与えられている。

全体模型における  $Y'_{\beta\beta}$  と  $C_D$  の比  $k$  を Table 2 に示す。 $k$  は平均化された値であるので、 $k_i$  の分布に現われる極端な値は表面には出て来ない。たとえばタンカー船型では、Fig. 9 に見られるごとく  $k_i = -0.5 \sim 1.5$  にわたり大きく変化しているが、 $k$  は 1 に十分近い値を示している。 $L/B$  系統船型については、 $L/B$  の減少に従い  $k$  の値は小さくなる傾向が明確に現われている。これは、 $L/B$  の減少によって  $Y'_{\beta\beta}$  と  $C_D$  は共に小さくなるが、その程度が前者においてより大きいことによる。

Table 2 Ratio of nonlinear derivative to lateral drag coefficient for ship model hull.

L/B	Ship form	$Y'_{\beta\beta}$	$C_D$	$k = Y'_{\beta\beta}/C_D$
100	L/B series model	1.90	1.13	1.68
10		0.995	1.08	0.921
5		0.318	0.832	0.382
5.75	Tanker model	0.612	0.635	0.964

なお、非線形成分の算定法として文献 3) では、 $C_D(x)$  自体が  $\beta$  の影響を受けるとして  $\beta$  の関数の修正係数が乗じられている。ただし、 $C_D(x) = \text{一定}$  と仮定され、斜航時に関する限り非線形成分の長さ方向の分布については論じられていない。

ここで cross flow モデルの取扱いとモーメントの関連について、一つの検討例を述べておく。cross flow モデルが完全に成り立っているとすると、前後対称船型ではモーメントの非線形成分は生じないことになる。しかし、Fig. 4 (b) に見られるごとく  $L/B$  の系統船型には有意の大きさの非線形成分が現れているものがある。このような結果に対しては同モデルでは説明できないことになる。このことは、cross flow モデルの適用の際の問題点の一つとして、既に文献 15) において指摘されているが、ここではさらに多くの船型について確認を行なっている。また、前後対称船型におけるモーメントの非線形成分の大きさや特性が一般に船幅の影響を比較的大きく受けることを示した。

前後非対称であるタンカー船型について、 $N' \sim \beta$  曲線の実験値から定めた非線形成分と  $C_D(x)$  によるそれとの比較を行なう。その結果を示したのが Fig. 10 である。ただし、重心まわりのモーメントを表わす。図中、実線は横力の場合と同様に 2 次多項式で当てはめを行なったときの  $N'$  の値であり、点線はそのときの線形成分を表わしている。ここで 1 点鎖線が、この線形成分に cross flow モデルによる非線形成分を付加したものを示す。非線形微係数が負となるとは cross flow モデルによって説明できているが、その絶対値は本来の値より過小評価されたものになっている。

以上で見てきたごとく、cross flow モデルによる非線形成分と本来の非線形成分には、その分布に立ち入って対比すると概して大きな隔たりがある。船体横力の

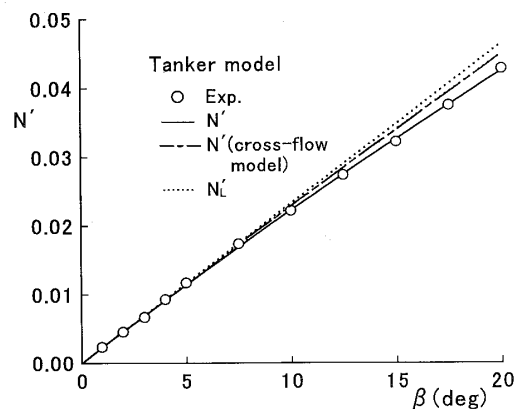


Fig. 10 Nonlinear yaw moment on total model predicted from cross-flow model (Tanker model).

非線形項のより合理的な算定方法を得るには、その分布にさかのぼって検討を行なうことが必要と考えられる。本報告では cross flow モデルの取扱いにおける問題点を指摘しているが、修正方法の具体的検討は今後の課題である。

## 7. 結言

分割模型試験の結果に基づき、cross flow モデルの妥当性について検討を行ない、一、二の問題点を指摘した。

以上で述べてきたことを要約すると大略次のようになる。

- (1) 長さ・幅比を系統的に変えた船型を含む 4 船型の分割模型試験の結果を示した。試験範囲は斜航角  $= 0^\circ \sim 20^\circ, 90^\circ$  である。
- (2) 分割要素に働く横力は斜航角の 2 次多項式ではほぼ近似できる。横力の非線形成分の船長方向分布を求め、その大きさおよび分布の特性が船型(船幅)の影響を大きく受けることを示した。
- (3) 各断面における非線形微係数と横抗力係数の比の船長方向の変化を示した。この値は cross flow モデルによるときの値 1 と概して大きく異なり、一般には非線形微係数の分布は横抗力係数のそれとはそのまま対応しない。全体模型の値がたとえ 1 に近い場合でも、その構成値は一般には船長方向に大きく変化する。
- (4) cross flow モデルによると前後対称型ではモーメントの非線形成分は零となるが、本報告における船型群には有意の大きさを示している船型がある。
- (5) 船体横力の非線形項の算定をより合理的に行なうためには、その分布において実測値に近い値を与えるような補正方法を見い出すことが必要であると考えられる。

終りに臨み、本稿の作成にご協力いただいた埼玉大学工学部二宮 俊技官に心より感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) たとえば、小川陽弘、小山健夫、貴島勝郎：操縦運動の数字モデルについて (MMG 報告 - I)、日本造船学会誌、第 575 号、1977、pp.22-28。
- 2) 藤野正隆、牧 岳彦：単錨泊時の潮流による船体振れまわり運動の実用的計算法、日本造船学会論文集、第 154 号、1983、pp.295-304。
- 3) 烏野慶一、米田国三郎、蛇沼俊二：低速時における主船体操縦性流体力の新しい数学モデル - 斜航の場合 -、関西造船協会誌、第 209 号、1988、pp.111-122。
- 4) 芳村康男：浅水域の操縦運動数学モデルの検討 (第 2 報)、関西造船協会誌、第 210 号、1988、pp.77-84。
- 5) 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、1989、pp.127-137。
- 6) D.Clark: A Two-Dimensional Strip Method for Surface Ship Hull Derivatives: Comparison of Theory with Experiments on a Segmented Tanker Model, International Symposium on Directional Stability and Control of Bodies Moving in Water, 1972, pp.43-51.
- 7) 松本憲洋、末光啓二：操縦運動時に船体に働く流体力、関西造船協会誌、第 190 号、1983、pp.35-44。
- 8) 湯室彰規：浅水時操縦係数に及ぼす船幅影響に関する一検討、関西造船協会誌、第 205 号、1987、pp.77-89。
- 9) 定兼広行、金沢正則：浅水域を横移動する船体に働く横力と水槽側壁影響、日本航海学会論文集、第 85 号、1991、pp.135-141。
- 10) W.Bollay: A Non-linear Wing Theory and its Application to Rectangular Wings of Small Aspect Ratio, Z.A.M.M., Vol.19, No.1, 1939, pp.21-35.
- 11) 湯室彰規：浅水時における船体操縦微係数の推定法に関する一検討、石川島播磨技報、第 24 巻、第 4 号、1984、pp.244-250。
- 12) たとえば、野中晃二、不破 健、二村 正：斜航船体まわりの流場と流体力の計測 (第 2 報、タンカー船型)、西部造船会会報、第 72 号、1986、pp.197-212。
- 13) J.P.Hooft & F.H.H.A.Quadvlieg: Non-linear hydrodynamic hull forces derived from segmented model tests, Marine Simulation and Ship Maneuverability, The 7th International Conference on Marine Simulation, 1996, pp.399-409.
- 14) J.P.Hooft: The Cross-Flow Drag on a Maneuvring Ship, Ocean Engng., Vol.21, No.3, 1994, pp.329-342.
- 15) 野中晃二、不破 健、二村 正：斜航船体まわりの流場と流体力の計測、西部造船会会報、第 66 号、1983、pp.37-47。