

分割模型試験による操縦流体力の非線形成分の検討*1

—回頭運動の場合—

正会員 湯室彰規 *2

A Consideration on Nonlinear Component of Maneuvering Hydrodynamic Force from Segmented Model Test Results —Hydrodynamic Force on Ship Hull in Turning Motion—

By Akinori YUMURO (*Member*)

In order to clarify availability of the so-called cross-flow model, some model experiments on longitudinal distribution of lateral force on a ship hull were carried out with the segmented model. Lateral forces on each of the segments were measured for the hull in turning motion. Here, it is assumed that lateral force on each segment can be expressed by a formula consisting of linear and second order terms. Nonlinear derivatives due to yaw angular velocity for each segment are determined through the procedure described above.

A comparison is made between the nonlinear derivatives and those predicted using the cross-flow model. In this report, a correction factor is introduced to modify the nonlinear derivatives obtained from the cross-flow model. As a result, it is indicated that the correction factor largely depends on ship's longitudinal position. Moreover, it is found that generally speaking the value of the correction factor increases where the segmented element is closer to midship. Development of prediction procedure of the correction factor is left as a future problem.

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

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 モデル¹⁾が広く便利に用いられている。しかし、その取扱いの妥当性や精度については、これまで十分な検討が行なわれてきたとは言いがたい。さきの報告²⁾³⁾では、分割模型試験の結果を基にして、その妥当性や精度について実験的な調査を行ない、いくつかの問題点を指摘した。

さきの報告は基本的な場合として斜航状態を対象としたものであるが、本報告では引続き回頭運動の場合について同様の検討を行なった結果を示す。ここでは

通常の大きさの操縦運動の範囲を対象とする。また、純粋に回頭運動の影響を見るために、横流れを伴わない回頭運動の場合を考える。

まず、回頭運動の場合の船体横力の船長方向の分布の実験結果を示す。次いで横力の非線形成分の分布について、実験値と cross flow モデルに基づく推定値との比較を行なう。この結果の特性から、回頭角速度に関する船体の非線形微係数の実験値と同モデルによる算定値の差異の要因について考察する。ここで、同モデルにおける横抗力分布は実測値を用いているが、従来、実測値を用いたこの種の検討例は極めて乏しいように思われる。本報告における結果は、今後 cross flow モデルに対する合理的な修正方法を考える上で基礎的のデータを与えるものと考えられる。

*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 埼玉大学工学部

2. 供試模型船と実験条件

供試模型船として数式船型とタンカー船型を用いており、前報²⁾における船型群の一部から成る。要目を Table 1 に示す。前者は水線形状が放物線で表わされる側面垂直な船型である。ここで長さ・幅比 (L/B) を変えた模型の一つとして平板 ($L/B = 100$) を含ませている。後者は船尾バルブをもつ中型タンカーの船型である。

模型船にはプロペラと舵は取り付けていない。拘束状態としては横揺れおよび縦運動を拘束した完全拘束の状態とした。模型船は 10 個の等分割とし、その要素間隔は数式船型では 2 mm、タンカー船型では 3 mm である。

タンカー船型においては浅水状態の試験を行っており、水深・吃水比 $H/d = 1.2, 1.88, \infty (= 17.5)$ の 3 種類である。無次元回頭角速度の範囲は $r' = 0 \sim 0.6$ (または 0.7) である。試験船速は、タンカー船型の深水状態で $F_N = 0.171$ 、それ以外では $F_N = 0.100$ である。

実験は石川島播磨重工業 (株)・運動性能水槽において行なわれたものであり、試験要領については文献²⁾に同じである。

Table 1 Principal particulars of ship models.

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

3. 実験の結果

回頭運動時の各分割要素の横力係数 $Y'_i (i = 1 \sim 10)$ の実験結果の例を Fig.1 に示す。図中、 r' は無次元回頭角速度を表わす。横軸の x は船長方向の位置を表わし、船体中央を原点とする。また、 $x > 0$ は船体後方に対応する。横力の無次元化には要素の中央縦断面積を用いている。ここで Y'_i は縦方向付加質量に基づく成分を含めた値を表わす。なお、ここで cross flow モデルによる船体横力分布を求めるときに用いられる各分割要素の横抗力係数 (C_D) _{i} ($i = 1 \sim 10$) を Fig.2 に示す²⁾³⁾。

以下では分割模型全体を全体模型と呼ぶことにし、全体模型の横力係数、モーメント係数を一般に Y', N' で表わす。ただし、全体模型の流体力は各要素の値の総和を意味するものとする。 N' については、後述の Fig.4 の座標系において左回頭の方向を正としており、数式船型では船体中央まわり、タンカー船型では重心まわりの値を示す。

分割模型試験の実験精度を確認しておく意味で、Table 1 のタンカー船型について全体模型と一体模型 (分割しない模型) の流体力係数の比較を行なっている。その結果を Fig.3 に示す。実用上問題にならない程度に近い値を示していると言える。両模型ともに縦運動を自由にした場合の結果であり、拘束条件は同一である。ただし一体模型の長さは 4 m であり、全体模型とは長さにおいて多少の相違はある。

4. 平板の横力分布の実験・計算の比較

実験結果の妥当性を確認しておく意味で、 $L/B = 100$ の模型について横力分布の計算を行ない実測値と比較する。ここで $L/B = 100$ においては縦方向付加質量は十分に小さく無視できると考えられるので、この付加質量の影響分を除くという意味でより直接的な比較が行なえる。

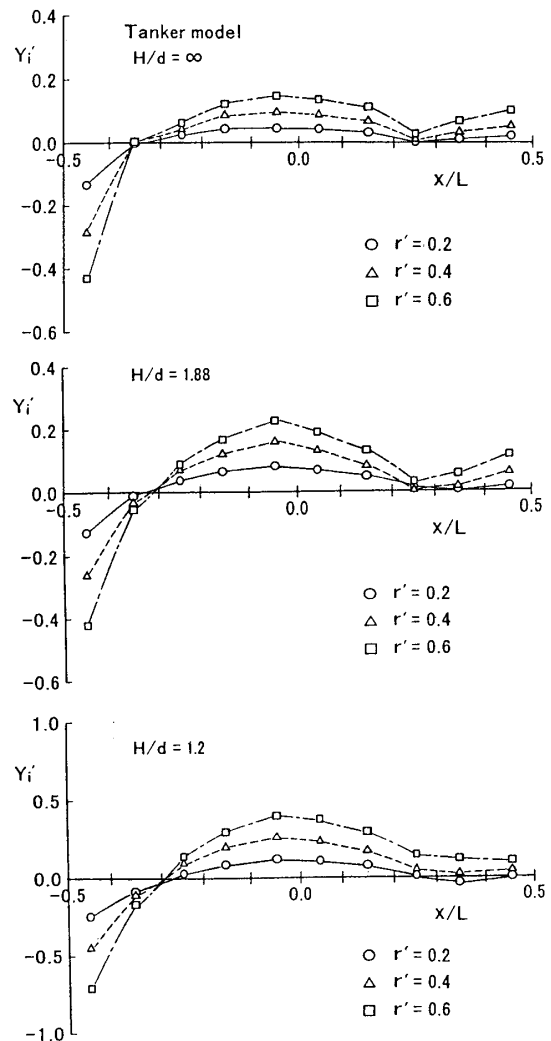


Fig.1(a) Measured lateral force on segmented model (Tanker model).

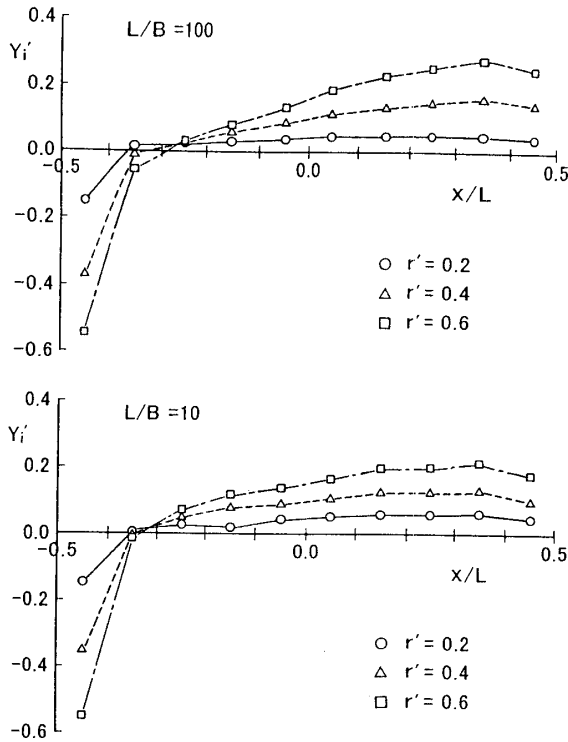


Fig.1(b) Measured lateral force on segmented model (L/B series model).

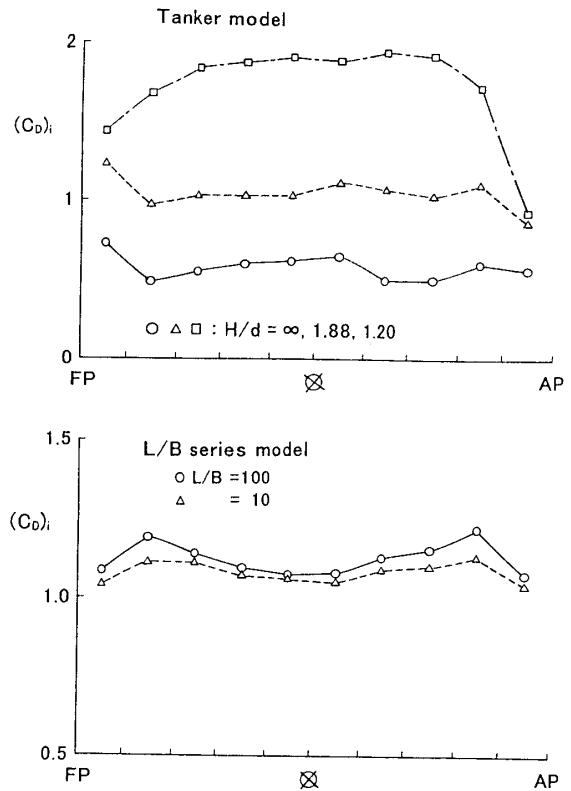


Fig.2 Measured lateral drag on segmented model.

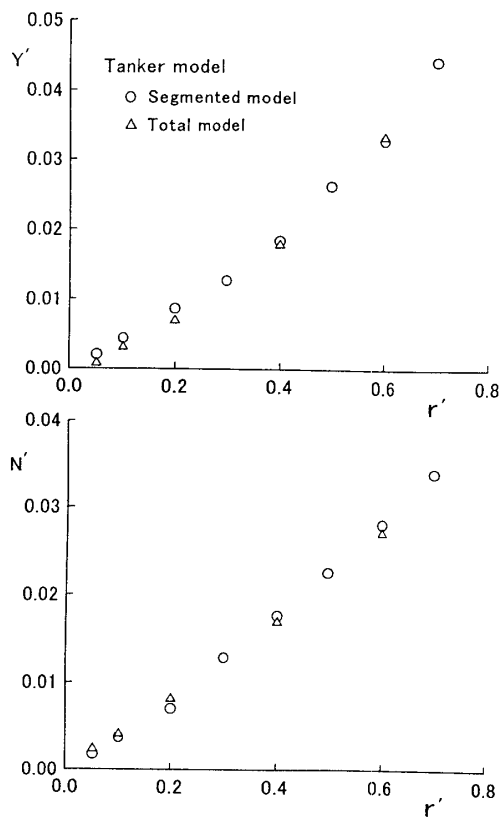


Fig.3 Comparison of hydrodynamic force coefficients obtained from segmented model and non-segmented model.

4.1 計算要領

回頭運動時の船体流体力の理論計算法については、従来、文献4),5)などで与えられているが、ここでは以下のようにさらに簡単化された取扱いを行なう。 $L/B = 100$ の模型を平面翼(鏡像を含めた平面翼)と見なす。模型の長さ L を翼弦長 c に、吃水 d の2倍を翼幅 b に対応させる。

Fig.4に示すような平面翼の中心に原点を置いた座標系を定める。弦長方向に x 軸を取り、その正が後方に対応するものとする。図中、 V は前進速度、 r は回頭角速度、 R は旋回半径を表わす。

Fig.4のごとく自由渦形状については、発出位置から後端部までは翼面に沿い、後端部から後方では旋回軌跡と同心円の円周方向に流れ去るとする。ただし、近似的にこの同心円の後端位置における接線(角度 α)で代用とする。ここで、船体による整流効果のために、一般的には実質的な回頭角速度は幾何的航跡に対するものよりも減少するとし、その係数を k で表わす。これに伴い、自由渦の流出角 Θ を

$$\Theta = k\alpha \quad (k \leq 1) \quad (1)$$

のように表わす。たとえば文献5)では $k = 0.75$ が取られている。

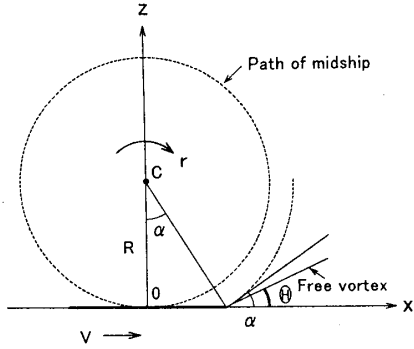


Fig.4 Simplified model for free vortex shape.

実際の計算では翼面を弦方向に N 等分割し、各分割要素に翼幅方向に強さ一定の離散渦を置く。それらの渦強さを $\Gamma_j (j = 1 \sim N)$ とする。渦を置く位置を $x = \xi_j (j = 1 \sim N)$ 、境界条件を満足させる位置を $x = x_i (i = 1 \sim N)$ で表わす。このとき、翼幅中心線上の x_i の位置に誘起される z 方向の速度 w_i は次式のように表わされる。

$$w_i = (w_1)_i + (w_2)_i + (w_3)_i \quad (i = 1 \sim N) \quad (2)$$

ここに

$$(w_1)_i = -\frac{1}{2\pi} \sum_{j=1}^N \Gamma_j \frac{1}{x_i - \xi_j} \frac{b/2}{\sqrt{(x_i - \xi_j)^2 + (b/2)^2}}$$

$$(w_2)_i = -\frac{1}{2\pi} \sum_{j=1}^N \Gamma_j \frac{1}{b/2} \left\{ \frac{x_i - \xi_j}{\sqrt{(x_i - \xi_j)^2 + (b/2)^2}} + \frac{c/2 - x_i}{\sqrt{(c/2 - x_i)^2 + (b/2)^2}} \right\}$$

$$(w_3)_i = -\frac{\Gamma}{2\pi} \frac{b/2 \cdot \cos \Theta}{(b/2)^2 + (x_i - c/2)^2 \sin^2 \Theta} (f_1 + f_2)$$

ただし

$$\Gamma = \sum_{j=1}^N \Gamma_j$$

$$f_1 = \frac{(x_i - c/2) \cos \Theta}{\sqrt{(x_i - c/2)^2 + (b/2)^2}}$$

$$f_2 = \frac{-(x_i - \xi_E) \cos \Theta + \xi_E \sin \Theta}{\sqrt{(x_i - \xi_E)^2 + (b/2)^2 + \zeta_E^2}}$$

(2) 式中、 ξ_E および ζ_E は計算に用いる後流渦の範囲の打ち切り位置の x, z 座標の値を示す。従って、両者には

$$\zeta_E = (\xi_E - c/2) \tan \Theta \quad (3)$$

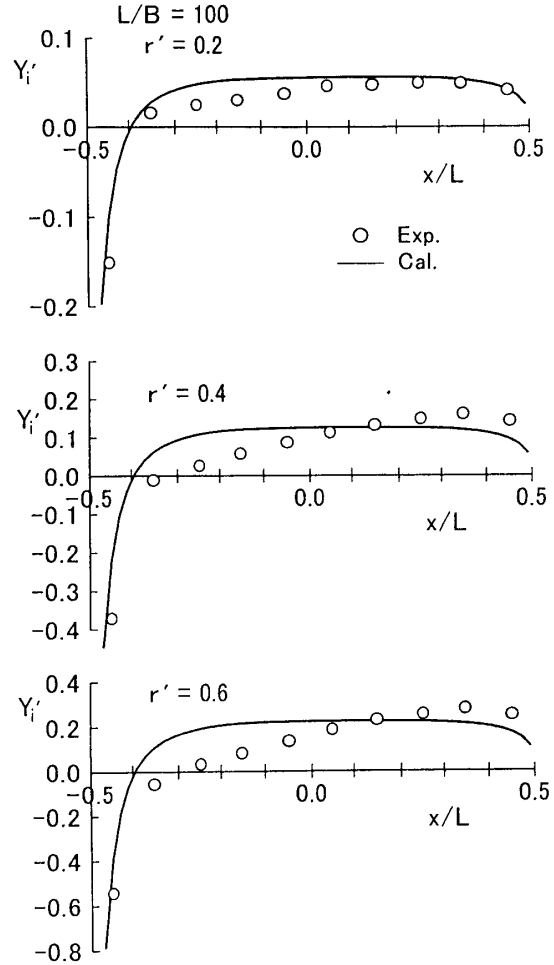


Fig.5 Comparison of calculated and experimental lateral force distributions ($L/B = 100$).

の関係式が成り立つ。

以上の条件の下で、 Γ_j を決定するための境界条件式は

$$w_i + (kr_i)x_i = 0 \quad (4)$$

により与えられるとする。ここで r_i は $x = x_i$ における r の値である。各分割要素における渦および標点の配置については $1/4 \sim 3/4$ 弦長法を用いている。

以上の要領による計算結果と実測値の比較を Fig.5 に示す。翼弦の分割個数は十分大きく取って 50 としており、また後流渦の長さは弦長の 3 倍とした。 k の値については原則として $k = 1$ としているが、 r' の小さい場合は $k = 0.75 \sim 1.0$ としている。 Fig.5 によると、実測値と比べ略々同程度の値が得られている。

5. 非線形成分の分布および cross flow モデルとの対応度

回頭運動時の各分割要素の横力係数が r' の 2 次多項式

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

の形で表わされると仮定する。(5)式による当てはめを行なった結果の例を Fig.6 に示す。ただし、当てはめは最小 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 ($Y'_i)_{r \cdot r'}$ を意味する。線形項は縦方向付加質量に基づく成分を含んだものを表わす。Fig.6 では、概して船体後半部では正の方向の非線形成分が、前半部では負の方向の成分が付け加わることが明確に示されている。また、同図によると傾向としては、非線形成分の割合は船体前半部よりも後半部において大きな値を示すことが分かる。

一方、cross flow モデルによると、各要素における横力は

$$Y_i = \frac{1}{2} \rho \cdot x_i |x_i| r^2 (C_D)_i \cdot (\Delta x \cdot d) \quad (6)$$

によって与えられる。ここで Δx は分割模型要素の幅、 x_i は i 番目の要素の中心の x 座標を示す。これより横力係数は

$$Y'_i = \frac{x_i |x_i|}{L^2} (C_D)_i \cdot r'^2 \quad (7)$$

のように表わされる。(7)式より r'^2 に関する微係数は

$$(Y'_i)_{rr} = \frac{x_i |x_i|}{L^2} (C_D)_i \quad (7')$$

で与えられる。以下では、Fig.6 の結果から得られる非線形微係数を $(Y'_i)_{rr}$ で表わし、(7') 式のそれを $(\tilde{Y}'_i)_{rr}$ で表わす。いま、両微係数の比

$$k_i = \frac{(Y'_i)_{rr}}{(\tilde{Y}'_i)_{rr}} \quad (i = 1 \sim 10) \quad (8)$$

を考え、これによって cross flow モデルとの対応性について評価する。Fig.7 に $(\tilde{Y}'_i)_{rr}$ の分布を、Fig.8 に k_i の分布の例を示す。Fig.8 におけるタンカー船型については、確認のために縦運動を自由にしたときの値も記入している²⁾。

cross flow モデルが完全に成立しているならば、すべての i に対して $k_i = 1$ となるが、Fig.8 に見られるごとく船長方向に比較的大きく変化している。概して船体中央に近いほど大きな値を示す。また、船体前半部よりも後半部において大きな値を示す傾向が見られる。これらの傾向は船型および水深の変化に対してもほぼ共通して見られる。なお、Fig.8 では船体中央付近での k_i の値は除かれている。これは絶対値の小さい量の商の精度が低下し、必ずしも意味ある値を示さないことを考慮したためである。

6. 全体模型の非線形微係数

次に全体模型のモーメントについて考える。分割要素に働く流体力の総和から求めた全体模型の Y', N' の

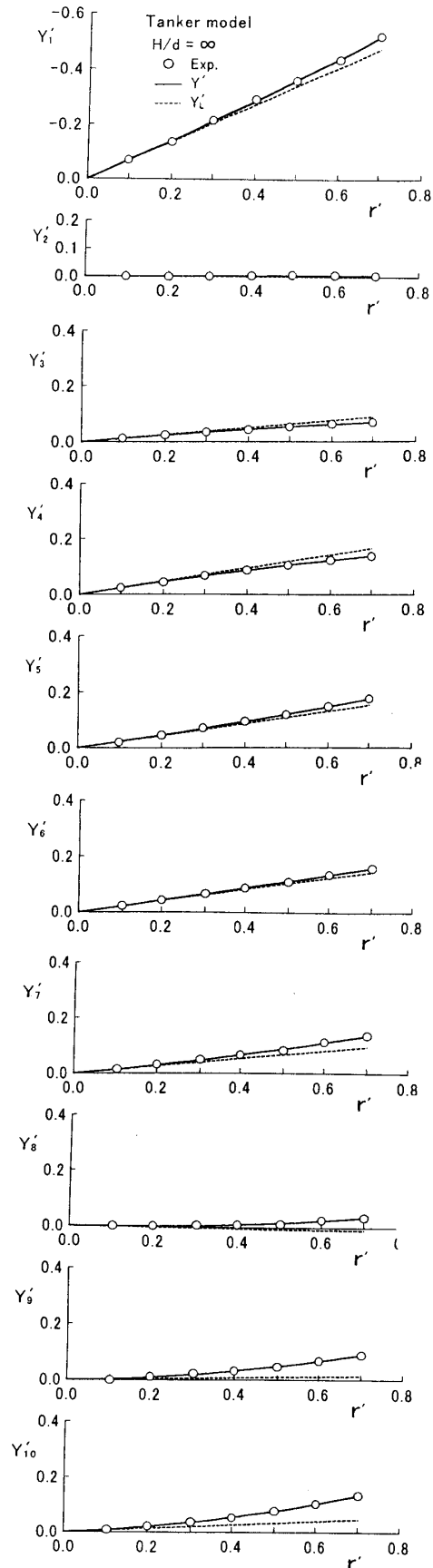


Fig.6(a) Linear and nonlinear component of lateral force on each segment (Taker model, $H/d = \infty$).

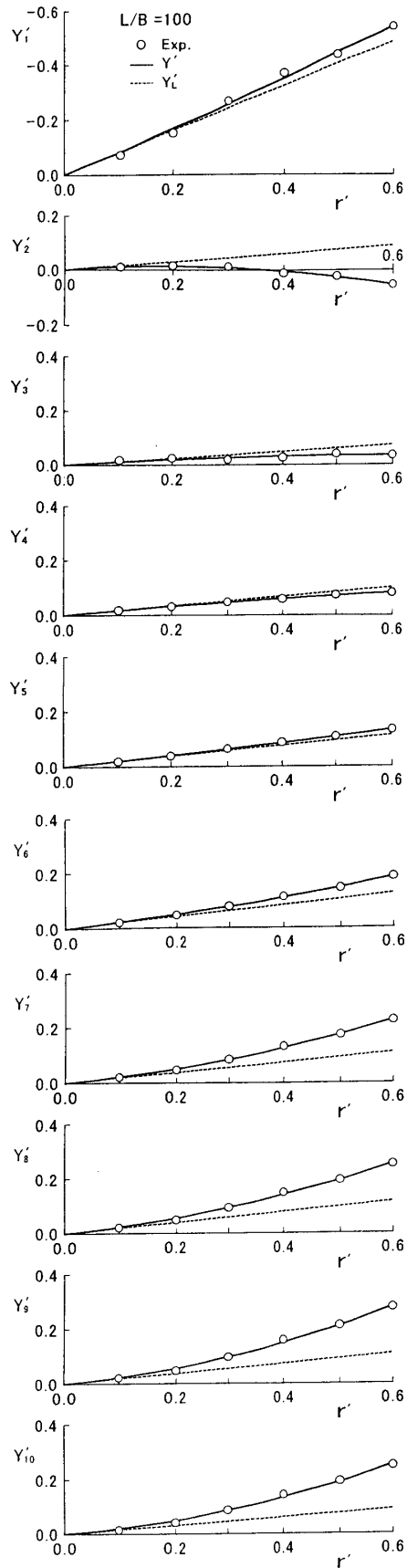


Fig.6(b) Linear and nonlinear component of lateral force on each segment ($L/B = 100$).

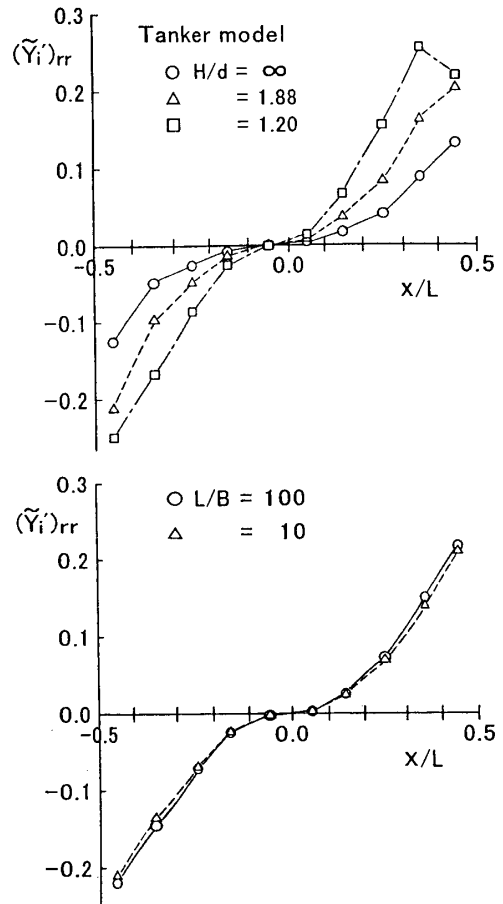


Fig.7 Lateral force on segment evaluated from cross flow model.

結果を Fig.9 に示す。図中の平均線は r' の 2 次多項式を仮定して定めたものである。cross flow モデルによる場合、船体に作用するモーメントは

$$N = \frac{1}{2} \rho (\Delta x \cdot d) \sum_i x_i^2 |x_i| r^2 (C_D)_i \quad (9)$$

によって与えられるので、非線形微係数は

$$N'_{rr} = \left(\frac{\Delta x}{L} \right) \sum_i \frac{x_i^2 |x_i|}{L^3} (C_D)_i \quad (10)$$

のように表わされる。(10) 式による微係数を $(N'_{rr})_{CF}$ で表わし、これと $r' \sim N'$ 曲線の実験結果から得られる非線形微係数 N'_{rr} と比較する。その結果を Table 2 に示す。

同表によると、 N'_{rr} は $(N'_{rr})_{CF}$ よりも大きな値を示す。この結果は、前章で示された各分割要素における両非線形微係数の比が概して 1 より大きいという特性によって説明できる。 N'_{rr} と $(N'_{rr})_{CF}$ の比は本報の船型および水深の範囲では 1.2~2.0 程度の値となっている。 N'_{rr} が $(N'_{rr})_{CF}$ よりも大きくなることは、既にた

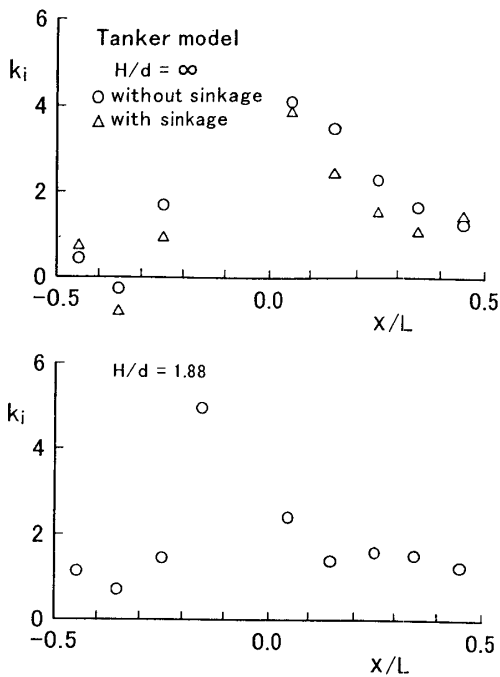


Fig.8(a) Distribution of ratio k_i over ship's length (Taker model).

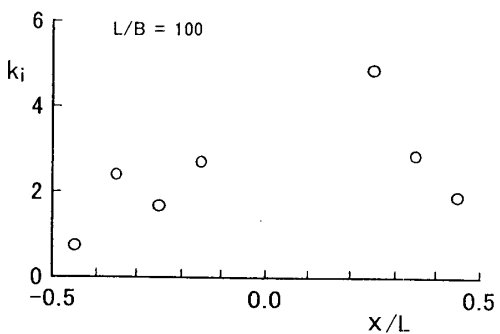


Fig.8(b) Distribution of ratio k_i over ship's length ($L/B = 100$).

Table 2(a) Ratio of derivatives N'_{rr} and $(N'_{rr})_{CF}$ (Tanker model).

	$H/d = \infty$	$H/d = 1.88$	$H/d = 1.20$
N'_{rr}	0.0214	0.0413	0.0645
$(N'_{rr})_{CF}$	0.0185	0.0320	0.0437
$N'_{rr}/(N'_{rr})_{CF}$	1.16	1.29	1.48

Table 2(b) Ratio of derivatives N'_{rr} and $(N'_{rr})_{CF}$ (L/B series model).

	$L/B = 100$	$L/B = 10$
N'_{rr}	0.0670	0.0391
$(N'_{rr})_{CF}$	0.0342	0.0326
$N'_{rr}/(N'_{rr})_{CF}$	1.96	1.20

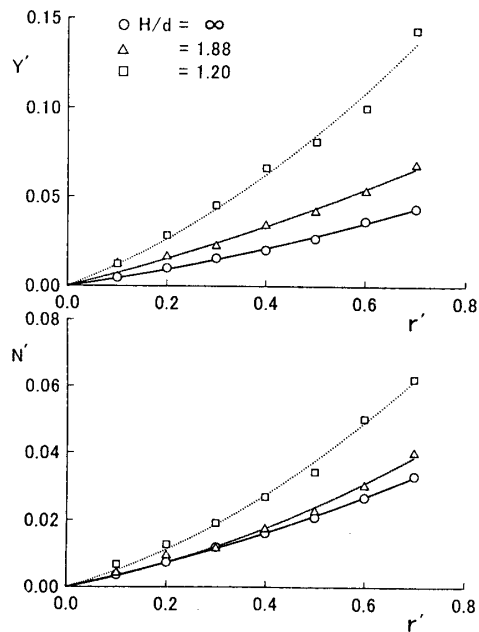


Fig.9(a) Lateral force and yaw moment on total ship model (Tanker model).

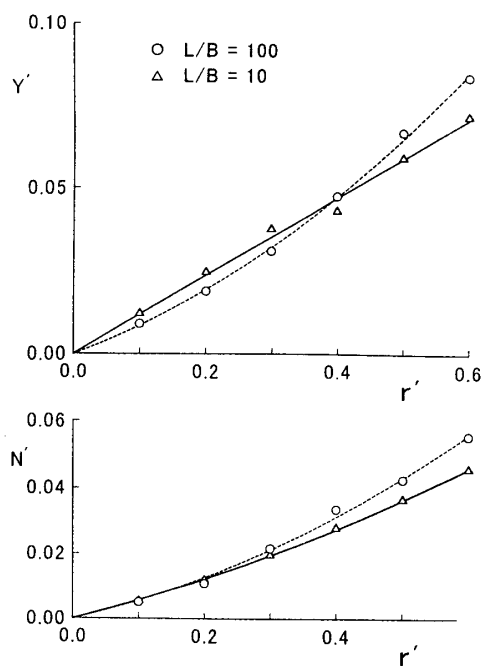


Fig.9(b) Lateral force and yaw moment on total ship model (L/B series model).

たとえば文献 6), 7) において示されているが, 横抗力係数 $C_D(x)$ が船長方向に一定とする取扱いが前提となっている。一方, 本報では $C_D(x)$ の分布を忠実に考慮しており, N'_{rr} と $(N'_{rr})_{CF}$ の差異に対してはこの影響が除かれたものが表わされていることになる。このことから, 両者の不一致については, $C_D(x)$ を一定とする取

扱いが必ずしも主要な原因ではないことが窺われる。

$N'_{rr}/(N'_{rr})_{CF}$ の値は船型および水深によって比較的大きく変化する。水深の影響については、浅くなると増加する傾向が見られる。この結果は、前報³⁾で得られている斜航時の $Y'_{\beta\beta}/C_D$ の比における傾向と一致している。ここで C_D は全体模型の横抗力係数である。

7. 結言

分割模型試験の結果に基づき、cross flow モデルの妥当性を回頭運動の場合について検討した。結果を要約すると大略以下ようになる。

- (1) 基本的形状として平板について横力分布の簡略計算を行ない、実測値と略々同程度の値が得られることを確めた。
- (2) 分割要素に働く横力は回頭角速度の2次多項式でほぼ近似できる。横力の非線形成分の船長方向分布については、cross flow モデルの取扱いは概して船体中央に近い位置ほど過小評価された値を与える。また、実測値と同モデルによる値との比は、概して船体後半部における方が大きい。
- (3) 船体モーメントの非線形微係数については、cross flow モデルによる算定は実測値と比べて過小評価された値を与える。この比は船型および水深によって比較的大きく変化する。

cross flow モデルの取扱いに対して、明確な物理的意味を備えた実用的修正法を見出すことは今後の課題であると考えられる。

終わりに臨み、実験にご助力をいただいた石川島播磨重工業(株)内田賢治氏ほか関係各位に厚くお礼を申し上げます。また、本稿の作成にご協力をいただいた埼玉大学工学部二宮 俊枝官に心より感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 小川陽弘, 小山健夫, 貴島勝郎: 操縦運動の数学モデルについて (MMG 報告-I), 日本造船学会誌, 第 575 号, 1977, pp.22-28.
- 2) 湯室彰規, 内田賢治: 分割模型試験による操縦流体力の非線形成分の検討, 関西造船協会論文集, 第 235 号, 2001, pp.97-106.
- 3) 湯室彰規: 分割模型試験による操縦流体力の非線形成分の検討—浅水状態の場合—, 関西造船協会論文集, 第 237 号, 2002, pp.173-179.
- 4) 安川宏紀: Hydrodynamic Interactions among Hull, Rudder and Propeller of a Turning Thin Ship, 西部造船会会報, 第 84 号, 1992, pp.59-83.
- 5) 松井志郎, 楊 建民, 玉島正裕, 山崎隆介: 旋回する船体まわりの流場と流体力の計算, 西部造船会会報, 第 88 号, 1994, pp.57-71.
- 6) 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.
- 7) 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, pp.145-150.