

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— *1

正会員 湯室彰規 *2

A Consideration on Nonlinear Component of Maneuvering Hydrodynamic Force from Segmented Model Test Results - Effect of Shallow Water -

By Akinori YUMURO (Member)

This report presents some experimental results of maneuvering hydrodynamic forces obtained from segmented model tests at finite water depth. The experiments were carried out in order to make clear the shallow water effect on distribution of the nonlinear lateral force component over ship's length. Here, it is assumed that the lateral force on each segment can be expressed by a formula consisting of linear and second order terms. From the experimental results, it was examined that to what degree the second order derivatives correspond to the cross-flow drag coefficients in condition of finite water depth. A ratio of the nonlinear derivative to the cross-flow drag coefficient is introduced for each segment of the ship hull. As a result, it is pointed that difference in the ratio distribution due to water depth is large in neighborhood of the ship model bow. Furthermore, it is indicated that the value of the ratio for the total model increases with decrement of the water depth.

Keywords : Maneuverability, Hydrodynamic Force, Nonlinear Component, Segmented Model, Shallow Water

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難い。さきの報告²⁾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深水状態を対象としたものであるが、本報告では浅水状態について同様の検討を行なった結果を示す。本来の非線形成分とcross flow モデルによる推定値との対応度に対する水

深影響の特性などについて述べている。なお、さきの報告と同様に、基本的な場合として斜航状態に限る。

2. 供試模型船と実験条件

前報²⁾では4種の船型の分割模型試験を示しているが、このうちのタンカーボード型について水深を変化させた場合の実験を行なっている。その要目をTable 1に示す。模型船にはプロペラと舵は取り付けていない。拘束状態については、試験装置の構成上、横揺れは拘束されている²⁾。前報では縦運動を自由にしているが、ここではそれを拘束した完全拘束の状態とした。これは、特に水深が十分に浅い場合の船体沈下の影響を除き、純粋に水深・吃水比の影響を見るためである。

模型船は10個の等分割とし、その要素間隔は3mmである。水深は、水深・吃水比 $H/d = 1.20, 1.88, \infty$ (実際には17.5) の3種類であり、斜航角の範囲は $\beta = 0^\circ \sim 20^\circ$ 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、 $H/d = 1.20$ と 1.88 に対しては

*1 平成13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13年11月30日

*2埼玉大学工学部

Table 1 Principal particulars of ship model.

$L (=L_{pp})$ (m)	3.000
B (m)	0.5217
d (m)	0.1710
C_b	0.794
L/B	5.75
d/L	0.0570

$F_N = 0.100$, $H/d = \infty$ では $F_N = 0.171$ した。

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), 3)に譲る。

3. 実験の結果

斜航時の各分割要素の横力係数 Y'_i ($i = 1 \sim 10$) の実験結果を Fig. 1 に示す。また、各要素の横抗力係数 $(C_D)_i$ ($i = 1 \sim 10$) を Fig. 2 に示す。ここで無次元化には要素の中央縦断面積を用いている。前報と同様に、横曳航試験はすべての水深について横移動速度 $v = 0.1 \sim 0.55$ m/sec の範囲で行なっているが、 $v > 0.3$ m/sec では $(C_D)_i$ の値は略々一定と見なせるので、Fig. 2 ではすべての水深について $v = 0.3 \sim 0.55$ m/sec における平均値を示してある。

Fig. 1 より横力分布に対する水深影響の特徴として次のことが挙げられる。一般に深水状態では前縁付近で大きな横力が発生し、その後方で急激に減少する。さらに、ある程度後方には平坦な分布をする部分がある。一方、水深が浅くなると、前縁付近における立ち上がりの勾配が小さくなり、前縁部における集中度が緩和される方向に行く。このような傾向は、たとえば文献4)の実験結果によても確認することができる。

また、Fig. 2 より横抗力分布については次のような特徴が認められる。本報の船型に限れば、深水状態では最前方の要素において最も大きな値を取る。この部分を除けば船体中央部にわずかに最大値が見られるが、概して船長方向の変化は大きくない。この傾向は水深が $H/d = 1.88$ になっても保たれる。しかし $H/d = 1.20$ の水深になると、この傾向は大きく変わる。船首尾部の値が著しく減少し、明確に上に凸の形をした分布となる。

拘束状態の相違の影響の程度を確認しておくために、前報で示した縦運動を自由にした拘束状態での $(C_D)_i$ の値と、本報のそれとの比較を行なったのが Fig. 3 で

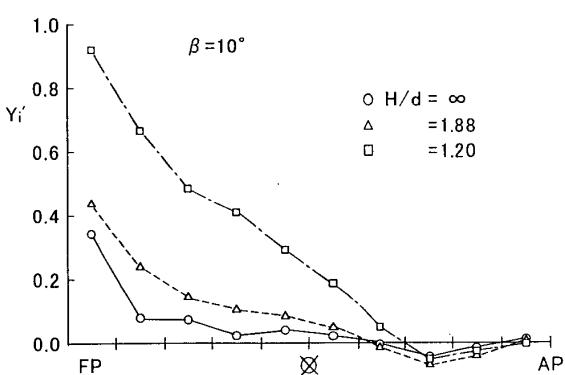
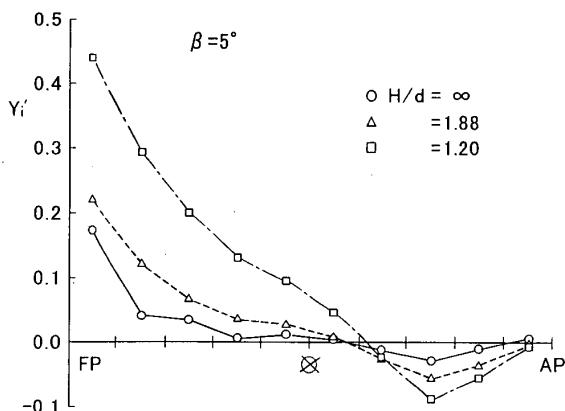


Fig. 1 (a) Measured lateral force on segmented model ($\beta = 5^\circ, 10^\circ$).

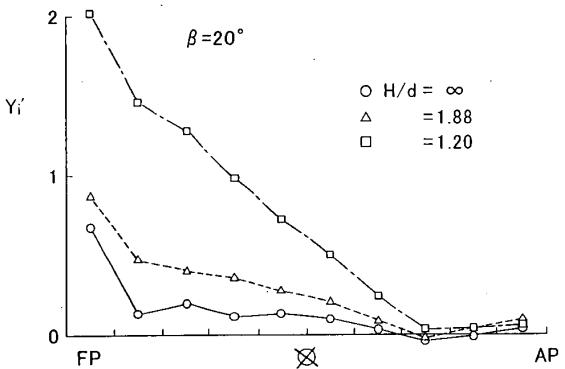
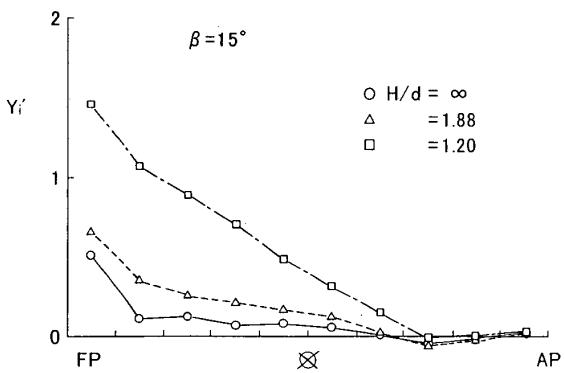


Fig. 1 (b) Measured lateral force on segmented model ($\beta = 15^\circ, 20^\circ$).

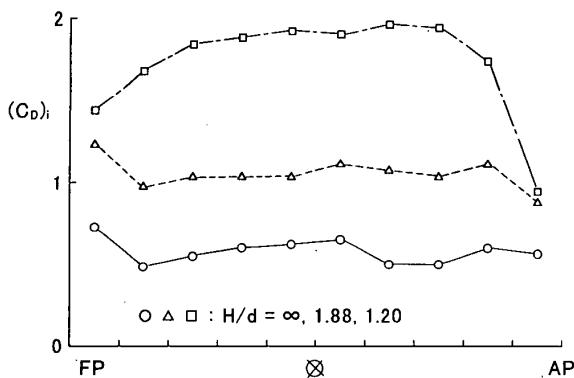


Fig. 2 Measured lateral drag on segmented model.

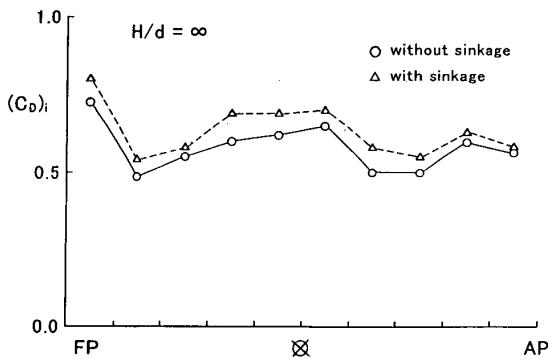


Fig. 3 Influence of ship body sinkage on lateral drag distribution.

ある。本報の結果の方がほぼ一様に小さい値を示しているが、分布の形としては類似している。

深水状態の $(C_D)_i$ の分布について文献 5) の結果との比較を行なうと、船首部において比較的大きな差が見られる。いずれもタンカーボートであるが C_b において大きな差があり、船体前方部の肥大度が影響していると考えられる。また、 $H/d = 1.20$ の浅水時の $(C_D)_i$ の値が船首尾部で減少することについては、現象としてはこの部分の流れは船首尾端を迂回することが要因の一つと考えることができる。

以下では分割模型全体を全体模型、分割しない模型を一体模型と呼ぶことにする。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。全体模型（一体模型）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。全体模型の Y' および N' を Fig. 4 に示す。ここで N' は重心まわりの値を表わす。また C_D の値を Fig. 5 に示す。Fig. 5 では例として文献 6) の実験結果を併記して比較してある。船型は類似しており、 L/d および C_b は十分近い値である。模型船の拘束状態などの条件の相違はある。

るが、 C_D の大きさおよび水深影響について大略同程度の結果が得られている。なお、代表長さを $2d$ としたレイノルズ数 $R_e = v(2d)/\nu$ をとると、本報における $v = 0.3 \text{ m/sec}$ はほぼ $R_e = 1.0 \times 10^5$ に相当する²⁾。また文献 6) の実験は $R_e = 2 \times 10^4$ 程度で行なわれたものと考えられる。

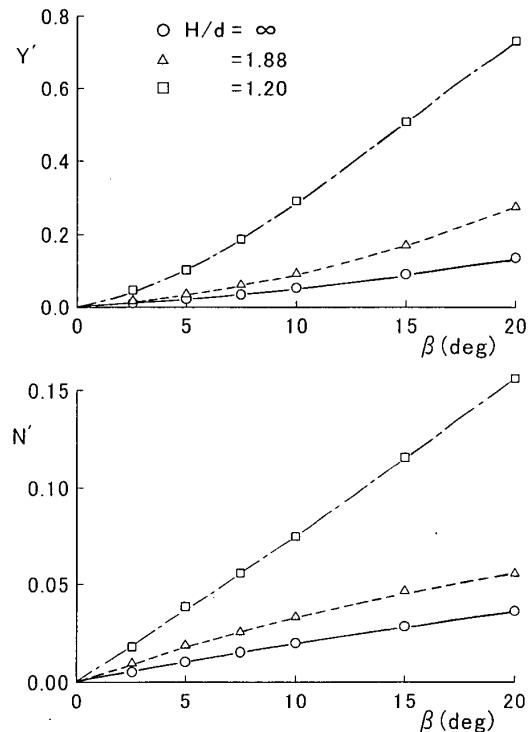


Fig. 4 Lateral force and yaw moment on total ship model.

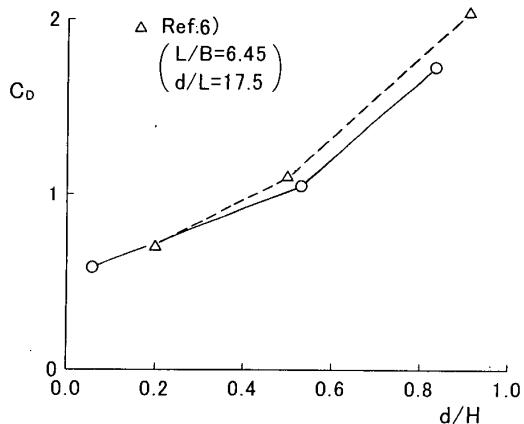


Fig. 5 Lateral drag on total ship model.

深水状態の全体模型と一体模型の流体力係数の比較を Fig. 6 に示す。ただし、一体模型の長さは 4m であり、全体模型とは長さに相違がある。両者とも、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。傾向としては全体模型の方が小さい値を示す。 β の大きい部分の Y' において多少の差が見られる。

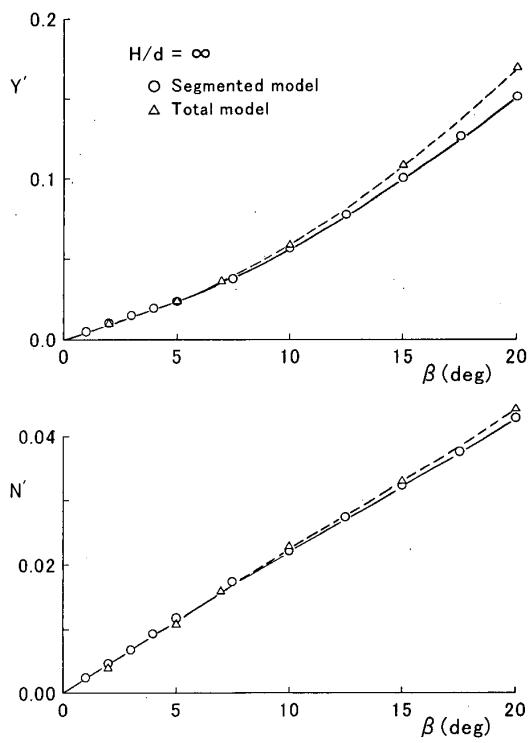


Fig. 6 Comparison of hydrodynamic force coefficients obtained from segmented model and non-segmented model.

4. 浅水の影響

4.1 横力の非線形成分の分布

斜航時の船体横力係数が斜航角 β の 2 次多項式

$$Y' = Y'_\beta \beta + Y'_{\beta\beta} \beta^2 \quad (1)$$

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。

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

ただし、この表示は水深に依存しないとする。各要素の横力の実測値に対して(2)式による当てはめを行なった結果を Fig. 7 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。

まず $H/d = \infty$ の場合について考える。前報の縦運動を自由にした実験では、前方部の 2 つの要素 ($i = 1, 2$) では非線形成分は十分に小さく、多くの部分は線形成分より成ること、それ以後では非線形成分は増加していくが、ある位置からは減少に転じるという結果が得られている²⁾。完全拘束の状態で行なった本報の結果は、値には相違はあるが、分布の傾向については基本的には類似していると考えることができる。

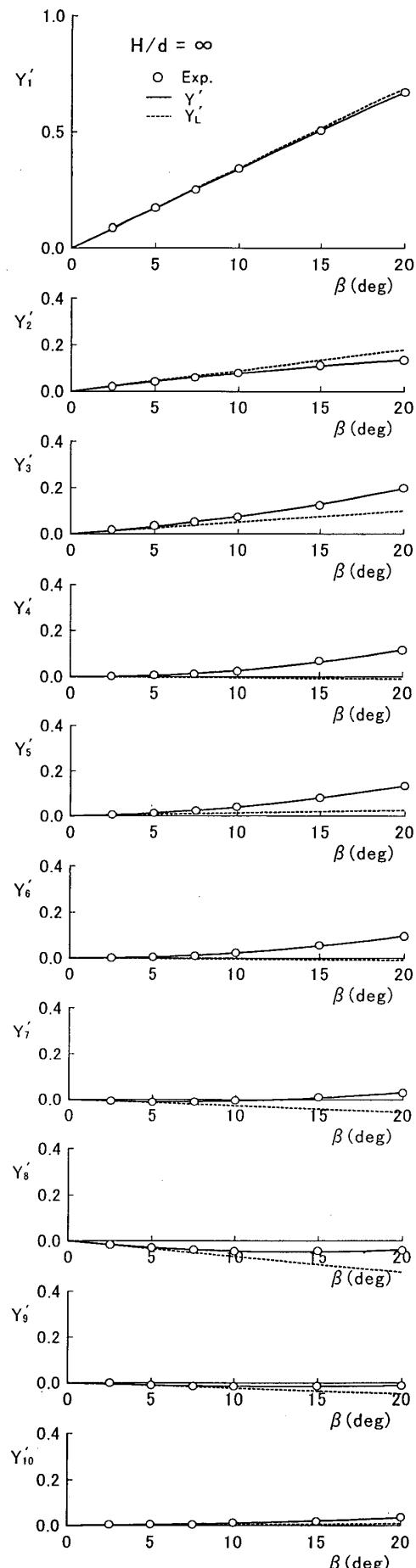


Fig. 7 (a) Linear and nonlinear component of lateral force on each segment ($H/d = \infty$).

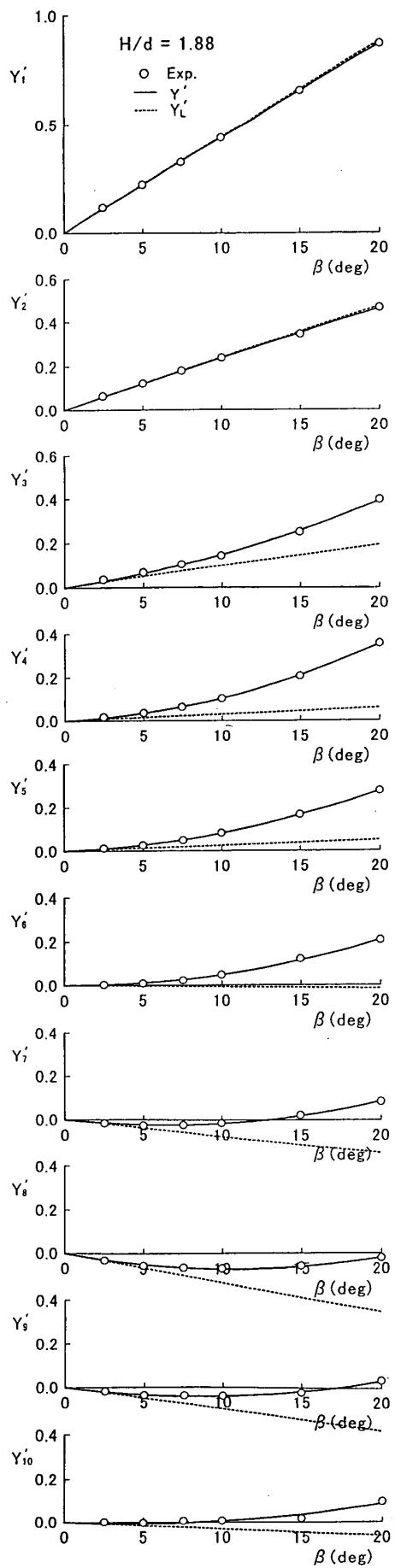


Fig. 7 (b) Linear and nonlinear component of lateral force on each segment ($H/d = 1.88$).

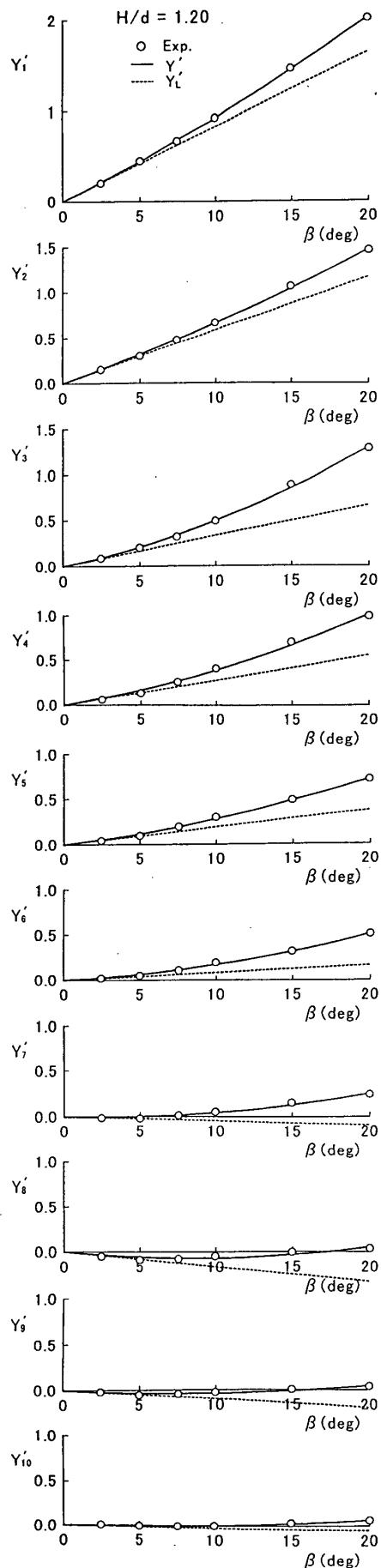


Fig. 7 (c) Linear and nonlinear component of lateral force on each segment ($H/d = 1.20$).

$H/d = 1.88$ の水深では、深水の場合と比べて傾向としての変化は見られない。この程度の水深の減少は、非線形成分の大きさを総じて増加させるが、傾向に対しては大きな影響は与えない。一方、 $H/d = 1.20$ の水深になると、傾向においても大きな変化が見られるようになる。前方部の 2 つの要素 ($i = 1, 2$) にも比較的大きな非線形成分が現われる。

4.2 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、斜航角 β に対し $\sin \beta \approx \beta$ の近似が許される範囲では

$$(Y'_i)_{\beta\beta} = (C_D)_i \quad (3)$$

の関係式が成り立つ²⁾。(3)式によると、非線形微係数の船長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。いま、両係数の比

$$k_i = \frac{(Y'_i)_{\beta\beta}}{(C_D)_i} \quad (i = 1 \sim 10) \quad (4)$$

を考えると $k_i = 1$ ということになる。前報の深水状態の結果では、一般に k_i の値は船長方向に大きく変化すること、タンカーボートについては中央部分ではほぼ平らな分布をして 1 以上の値を示すが、船首尾部で小さい値を取ることが示されている。

以下には k_i の分布が水深によってどのように変化するかについて述べる。Fig. 7 より得られた $(Y'_i)_{\beta\beta}$ の分布を Fig. 8 に示す。また k_i の分布を Fig. 9 に示す。なお、 $(Y'_i)_{\beta\beta}$ と $(C_D)_i$ の分布においては、それぞれの大きさは水深に対してほぼ単調に変化するが、両者の比を考えると必ずしも単調に変化していない。ただし、船首部分においては k_i は水深が浅いほど大きな値を示し、明確に一様な変化をしている。 k_i の分布に対する水深影響については、次のような特性を指摘することができる。中央部の要素 ($i = 4 \sim 8$) においては 3 者に極端に大きな差は現われない。いま、これを略々一定値と見なすと、 $k_i = 1.5$ 程度となる。顕著な差が現われるのは前方部の要素 ($i = 1 \sim 3$) においてである。ただし、 $H/d = \infty$ と 1.88 では差は小さく、 $H/d = 1.20$ の水深になると急激に大きくなる。

全体模型の非線形微係数 $Y'_{\beta\beta}$ と横抗力係数 C_D の比を k で表わし、この値を Table 2 に示す。 k の値は H/d の減少に従い増加している。 $H/d = \infty$ の場合、前報の縦運動を自由にした結果より小さめの値を示しているが、0.9 程度の値となる。このように k は深水状態では 1 より小さい値を取るが、 $H/d = 1.20$ 程度の浅水状態になると 1 を大きく超える。 k の 1 よりの相違量が cross flow モデルの誤差の大きさを表わすという見方をすれば、水深が十分に浅い状態において精

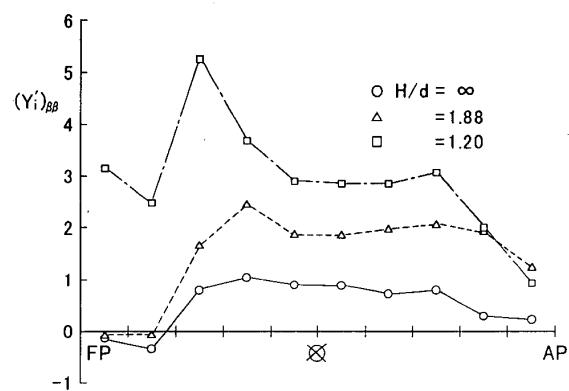


Fig. 8 Distribution of nonlinear derivative over ship's length.

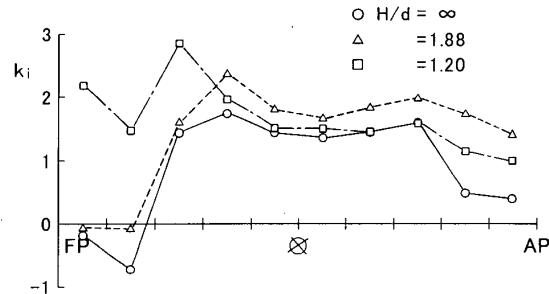


Fig. 9 Longitudinal distribution of ratio of nonlinear derivative to lateral drag coefficient.

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

H/d	$Y'_{\beta\beta}$	C_D	$k = Y'_{\beta\beta}/C_D$
∞	0.513	0.580	0.885
1.88	1.46	1.05	1.39
1.20	2.91	1.72	1.69

度が大きく低下することになる。このことは、概して水深が浅いほど cross flow モデルに対してより大きな修正が必要になることを意味している。

4.3 モーメントの非線形微係数

船体に働くモーメントの非線形成分を cross flow モデルに基づいて求め、本来の値と比較する。すなわち、 $(C_D)_i$ の分布から求めた非線形微係数 $(N'_{\beta\beta})_{cf}$ と $N' \sim \beta$ 曲線の実験値から当てはめにより定められた $N'_{\beta\beta}$ との比較を行なう。その結果を Table 3 に示す。ここでモーメントは重心まわりの値を表わす。

Fig. 4 に見られるごとく、 $N' \sim \beta$ 曲線は水深が比較的大きい場合は非線形成分が負になる形を示している。また、水深が十分に浅くなると非線形成分は正に転ず

Table 3 Nonlinear yaw moment derivatives evaluated from cross-flow model.

H/d	$N'_{\beta\beta}$	$(N'_{\beta\beta})_{cf}$
∞	-0.0514	-0.0140
1.88	-0.181	-0.0269
1.20	0.0847	-0.0419

る傾向が見られる。前者の特性は同じくタンカー船型について、たとえば文献7)に見られ、後者に類似の傾向についてはたとえば文献8)に見られる。

Table 3 の結果より次のことが知られる。cross flow モデルから求めた非線形微係数は、各水深に対して負の値を示している。これは重心が船体中央部より前方にあることが大きく関係している。実際に中央部まわりの値を求めるとき正の値となる。一方、本来の非線形微係数は $H/d = \infty$ および 1.88 の水深では負となるが、 $H/d = 1.20$ ではわずかな正の値となっている。ここで負の値を示す場合も、その絶対値は cross flow モデルに基づくものの方がかなり小さい。

以上のように、cross flow モデルによる非線形成分は、水深が比較的浅い状態ではその符号については説明できているが、大きさについて隔たりがある。また本来の非線形微係数との対応度は、概して浅水状態の方が低いと言える。

一般にモーメントの非線形成分は横力のそれと比べて小さいので、上述のような検討には実験誤差の影響が入り易い。さらに、この成分は $(C_D)_i$ の分布から差の演算により求められるので、このことも精度を低下させる要因となる。従って、モーメント特性についてより明確な結果を得るために今後さらに多くの船型についての実験、検討が必要であると考えられる。

5. 結言

前報²⁾に引き続き、cross flow モデルの取扱いの問題に対する浅水影響を実験的に調査した。結果を要約すると、おおよそ以下のようになる。

- (1) タンカー船型について水深を系統的に変化させた場合の分割模型試験の結果を示した。試験範囲は斜航角 = $0^\circ \sim 20^\circ$ および 90° 、水深・吃水比 = $\infty, 1.88, 1.20$ である。
- (2) 横力の非線形成分の船長方向分布に対する浅水影響は主として船首部分に大きく現われる。水深が大きい場合は、この部分の非線形成分は概して十分に小さいが、 $H/d = 1.20$ 程度の水深になると比較的大きな非線形成分が現われる。

(3) 各断面の非線形微係数と横抗力係数の比の分布においても、船体前方部において大きな差が現われる。ただし、中央部では水深によらず略々一定値となる。

(4) 全体模型の非線形微係数と横抗力係数の比は、水深の減少とともに増加する。深水状態では 1 以下の値を取るが、 $H/d = 1.20$ 程度の浅水状態では 1 を大きく超える。

以上は実験面での結果を示したものであるが、その説明や cross flow モデルによる取扱いに対する修正方法を明確にすることは今後の課題である。

本報告を終えるに当たり、実験に多大のご助力をいただいた石川島播磨重工業(株)内田賢治氏ならびに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：浅水域における船の操縦流体力に関する模型実験、石川島播磨技報, 第 25 卷, 第 4 号, 1985, pp.203-209.
- 4) D.Kleinau : Querkraft und Giermoment infolge Schiebewinkel und Bahnkrümmung an Schiffen bei beschränkter Wassertiefe, Schiffbau-forschung, 22-3, 1983, pp.155-160.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 貴島勝郎、浅井滋、山上順雄：深水域における操縦性能の推定、「船の操縦性能の推定」特集, 日本造船学会誌, 第 668 号, 1985, pp.27-45.
- 8) 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、西部造船会会報, 第 69 号, 1985, pp.111-122.