

1-16 分割模型試験による操縦流体力の非線形成分の検討

—回頭運動の場合—

正会員 湯室彰規 (埼玉大学工学部)

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。横力の非線形成分の船長方向の分布の特性、およびこれの cross flow モデルとの対応度について考察している。

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)を含ませてある。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していない。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。

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。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。

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.2 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。

4. 平板の横力分布の実験・計算の比較

L/B=100 の模型を平面翼(鏡像を含めた平面翼)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。旋回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。

Fig.2 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。

束縛渦の強さは翼幅方向に一定とする。Fig.2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、実際の計算では近似的にこの同心円の後端位置における接線の方向(角度 α) とする。ここで、一般には流出角 Θ は α より小さいとして

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

と置く。たとえば文献4)では $k=0.75$ が取られている。全渦系による翼面に垂直の誘導速度を $w(x)$ とするとき、境界条件式は

$$w(x) + (kr)x = 0 \quad (2)$$

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

により与えられるとする。数値計算は離散渦法によって、各分割要素における渦位置および標点については1/4～3/4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の一例をFig.3に示す。ここで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、図中の $r' = 0.2$ の場合はk=0.75としている。Fig.3によると、実測値と比べ略々同程度の値が得られている。なお、L/B=100においては縦方向付加質量は十分に小さいと考えられるので、この実験・計算の比較は付加質量の影響分を除くという意味では同一条件の下で行なわれていることになる。

5. 非線形微係数の分布および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

$$Y'_i = (Y'_i)_r \cdot r' + (Y'_i)_{rr} \cdot r'^2 \quad (i=1 \sim 10) \quad (3)$$

の形で表わされると仮定する。(3)式による当てはめを行なった結果の例をFig.4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'_i 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.4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。

一方、cross flowモデルによると、各要素における横力係数は

$$Y'_i = \frac{x_i |x_i|}{L^2} (C_D)_i \cdot r'^2 \quad (4)$$

のように表わされる。ここで x_i はi番目の要素の中心のx座標、 $(C_D)_i$ は横曳航によって得られた横抗力係数の分布^{2), 3)}を示す。(4)式より r'^2 に関する微係数は

$$(Y'_i)_{rr} = \frac{x_i |x_i|}{L^2} (C_D)_i \quad (4')$$

で与えられる。以下では、Fig.4の結果から得られる非線形微係数を $(Y'_i)_{rr}$ で表わし、(4')式のそれを $(\tilde{Y}'_i)_{rr}$ で表わす。いま、両微係数の比

$$k_i = \frac{(Y'_i)_{rr}}{(\tilde{Y}'_i)_{rr}} \quad (i=1 \sim 10) \quad (5)$$

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.5に $(\tilde{Y}'_i)_{rr}$ の分布の例を、Fig.6に k_i の分布の例を示す。Fig.6には確認のために、縦運動を

自由にしたときの値も記入している²⁾。

この例では k_i は船長方向に比較的大きく変化し、概して船体中央に近いほど大きな値を示す。また、 k_i は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。この特性は、特にL/B=100の模型において明瞭である。なお、Fig.6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することを考慮したためである。

次に全体模型のモーメントについて考える。cross flowモデルによる場合、非線形微係数は

$$N'_{rr} = \left(\frac{\Delta x}{L} \right) \sum_i \frac{x_i^2 |x_i|}{L^3} (C_D)_i \quad (6)$$

のように表わされる。ここで Δx は分割要素の幅である。(6)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 $(N'_{rr})_{CF}$ の不一致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。

6. 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、概して船体前半部では実測結果と比

べて大きな値, 後端部では小さな値を与える。

- (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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.

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

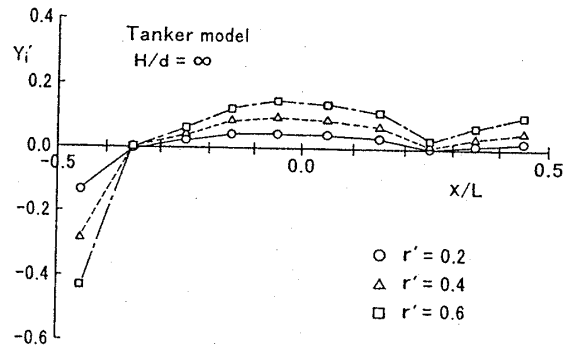


Fig.1 Measured lateral force on segmented model (Tanker model, $H/d = \infty$)

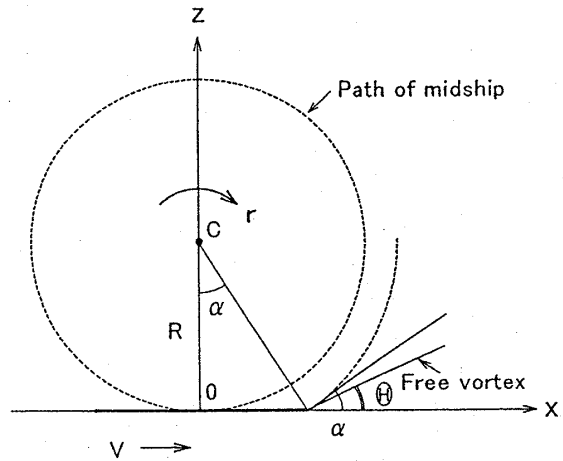


Fig.2 Simplified model for free vortex shape

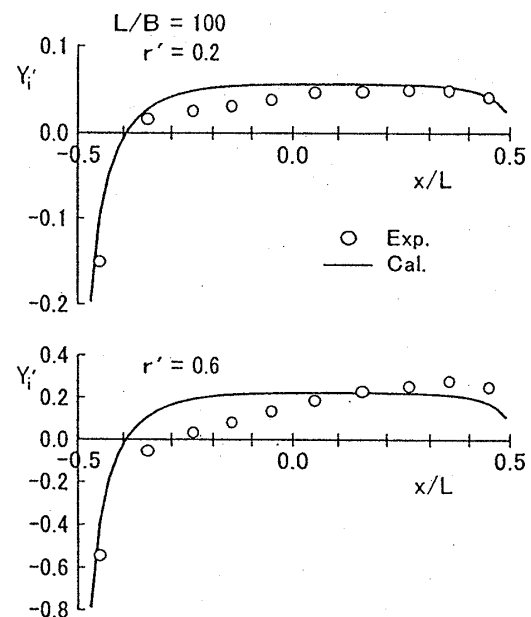


Fig.3 Comparison of calculated and experimental lateral force distributions ($L/B=100$)

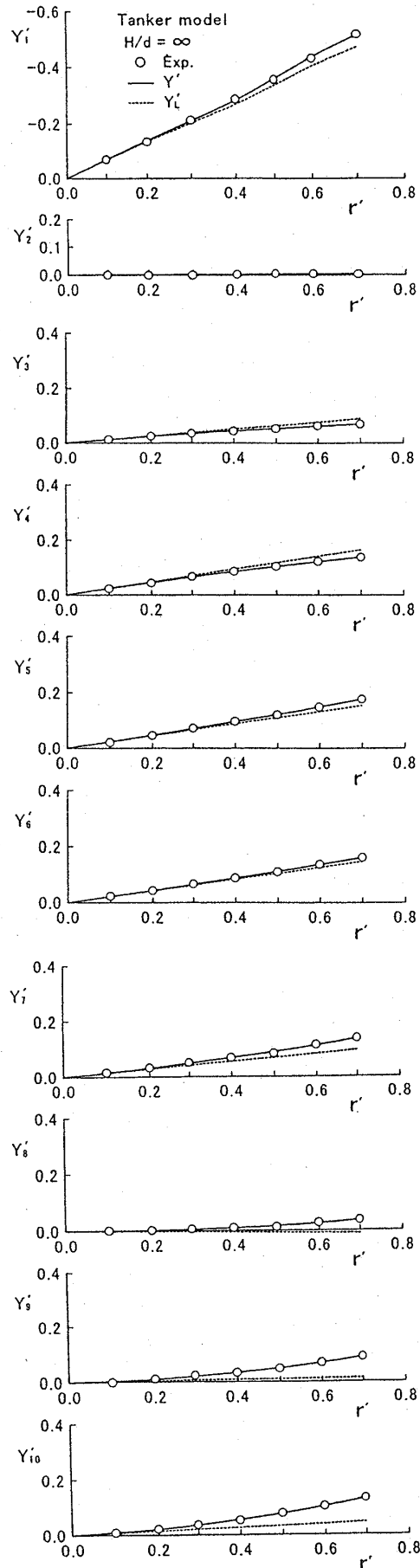


Fig.4 Linear and nonlinear component of lateral force on each segment (Tanker model, $H/d=\infty$)

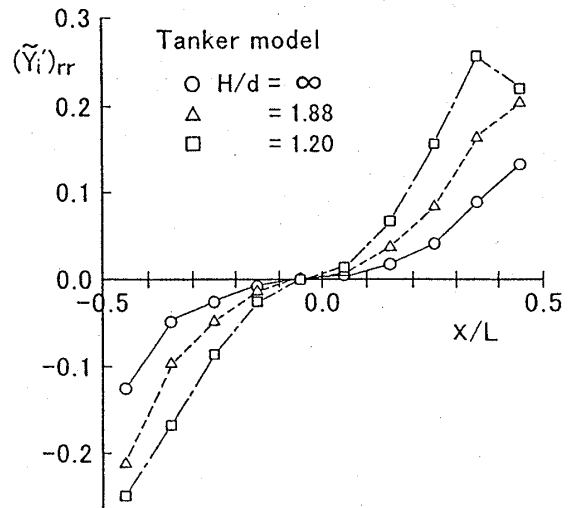


Fig.5 Lateral force on segment evaluated from cross flow model (Tanker model)

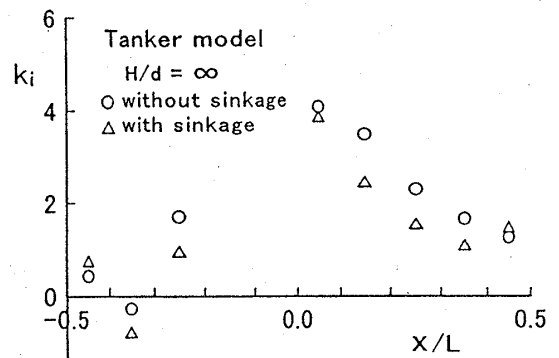


Fig.6 Distribution of ratio k_i over ship's length (Tanker model, $H/d=\infty$)

Table 2(a) 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

Table 2(b) 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