

# 操縦流体力における2船間干渉に関する近似計算<sup>\*1</sup>

## —渦減衰を考慮した場合—

正会員 湯室 彰規 <sup>\*2</sup>

### An Approximate Calculation of Maneuvering Interaction Forces between Two Ships — Effect of Decay of Trailing Vortices —

By Akinori YUMURO (*Member*)

This report deals with an approximate calculation of hydrodynamic forces generated by interactions between two ships which are moving along parallel courses at the same velocity. With the assumption of the rigid free-surface and infinite water depth, the calculation method is based on the linearized thin-wing theory, using sources distributed over the center plane to represent thickness effects of two ship bodies.

In the previous report, it was assumed that trailing vortices having uniform strength extend along the infinite down stream. In this report, the author improved the vortex shedding model described above, considering decay of the trailing vortices. In general, the magnitude of the decay coefficient has a significant effect on the interaction hydrodynamic force. There is good agreement between the present calculations and experimental results for the lateral force acting on the after body of the two ships. In addition, it is clarified that influence of the vortex decay on the lateral force is remarkable compared with that on the yaw moment.

**Keywords :** *Maneuverability, Hydrodynamic Force, Two Ships, Interaction Force, Trailing Vortex, Decay*

## 1. 緒言

操船シミュレータを構成する主要素の一つとして、操縦運動の数学モデルは重要な役割を有している。シミュレータはその目的に応じて種々の規模のものが考えられるが、比較的簡単な形式を対象とする場合は、計算容量あるいは所要時間上の制約から、流体力特性の部分の計算の簡略化が望まれることがある。

ここでは流体力推定の問題の一つとして、操縦流体力における2船間干渉を取り上げる。干渉流体力の計算法については、従来多くの方法が示されているが<sup>1),2)</sup>、近似計算法は大別して細長体理論による方法と小縦横比翼理論による方法に分けられる<sup>1)</sup>。著者はさきに、計算の簡潔さおよび翼特性との対応による理解

の容易さから、後者の方法に基づいた一つの近似計算法の検討結果を示している<sup>3)</sup>。ここで2船が相対位置を一定に保ちながら、同一速度で平行航走する定常状態を仮定している。

ただし、さきの報告<sup>3)</sup>では特に前方船体が斜航角をもつ場合、後方船体に生ずる干渉流体力に実験と計算で比較的大きな差が見られるという問題点が残されていた。本報告では、船体から流出する自由渦の減衰効果を考慮することにより、計算精度がどの程度改善されるかについて検討している。

## 2. 計算の方法<sup>3)</sup>

### 2.1 計算上の仮定

Fig.1 に示すように、船体中心に固定された座標系を定め、船体は一般に斜航角 $\beta$ をもった状態で一様流れ $V$ の中に縦方向間隔 $x_s$ 、横方向間隔 $z_s$ で置かれて

\*1 平成15年5月23日 関西造船協会春季講演会において講演、原稿受付平成15年6月10日

\*2 埼玉大学工学部

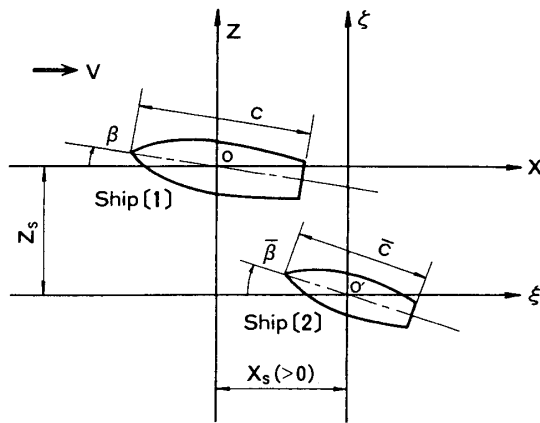


Fig.1 Coordinate system and notation.

いるとする。ここでは船体を矩形翼で置き換えて考える。自由表面を剛体壁と見なし、船の長さ  $L$  を翼弦長  $c$  に、吃水  $d$  の 2 倍を翼幅  $b$  に対応させる。

線形的取扱いを前提とした上で、翼を束縛渦と吹出しで置き換える。ただし、吹出し強さは翼厚勾配に比例させて定めた既知の値とする。翼に作用する直圧力は平板翼として求める。束縛渦強さ  $\gamma$  および吹出し強さ  $m$  は翼幅方向に一定とし、境界条件は翼中心面の中央位置で満足させる。なお、簡単のため自由渦の流出方向は相手船からの誘導速度によって変形を受けず一様流方向とする。

以下では Fig.1 中の船体 [1] および船体 [2] をそれぞれ自船、相手船とも呼び、相手船の諸量には bar を付ける。

2.2 渦減衰の影響の取扱い

前報<sup>3)</sup>では平板翼の端部から放出される自由渦は、その強さを変えずに無限後方まで流れ去るとしているが、本報では時間経過に対する渦の減衰を考慮する。その減衰特性については、文献4)、5)などに従い、渦強さの時間変化として次式を用いる。

$$\gamma(t) = \gamma_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (1)$$

ここで、 $\gamma_0$  は放出時の渦強さとする。また、 $t$  は放出されてからの時間、 $\tau$  は減衰の大きさを示すパラメータとする。前進速度を  $V$ 、経過距離を  $s$  とすると、 $s = Vt$  の関係から (1) 式は次式のようにも表わせる。

$$\gamma(s) = \gamma_0 \cdot \exp\left(-\frac{s}{\tau V}\right) \quad (2)$$

なお、これらの式は  $\tau$  の値が小さいほど減衰が大きいことを意味している。

ここでは、渦の減衰は後流域から始まるとする取扱いを行ない<sup>6)</sup>、(2) 式における  $s = 0$  は翼後端に対応させる。この取扱いは、後流中では乱流などによって渦度

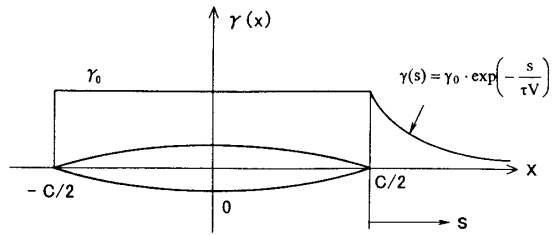


Fig.2 Schematic drawing of vortex decay model.

が減衰すると見なすことに相当している。このように減衰がある一定の時間経過の後に始まるという取扱いは、例えば文献7)においても見られる。Fig.2 は時間経過による自由渦の減衰の様子を模倣的に示したものである。例として前端部から放出された自由渦を考えると、その強さは翼弦にわたっては一定値を保ち、後端部から (2) 式に従って減衰が始まることを示している。

(1) 式中の  $\tau$  は経験により定められる係数である。 $\tau$  の大きさの表示については、以後、無次元量  $\tau' = V\tau/(2d)$  で表わすことにする。ここで  $d$  は吃水である。

2.3 干渉流体力

誘導速度において、渦および吹出しに基づく成分をそれぞれ添字  $l$  および  $t$  で表わし、また速度が誘起される側を前方添字に、誘起する側を後方添字に対応させる。渦減衰を考慮したときの翼幅中央における  $z$  軸方向の誘導速度は次式のように表わされる。ここで、時計方向を  $\gamma$  の正とする。

$$w_{11}^{(t)}(x) = -\frac{1}{2\pi} \int_{-c/2}^{c/2} \gamma(x_1) \left[ \frac{1}{x-x_1} \times \frac{b/2}{\sqrt{(x-x_1)^2 + (b/2)^2}} + \frac{1}{b/2} \left( \frac{x-x_1}{\sqrt{(x-x_1)^2 + (b/2)^2}} + \frac{c/2-x}{\sqrt{(c/2-x)^2 + (b/2)^2}} \right) + \int_0^\infty \frac{b/2}{\sqrt{(\bar{x}-s)^2 + (b/2)^2}}^3 \times \exp\left(-\frac{s}{\tau V}\right) ds \right] dx_1 \quad (3)$$

ただし、 $\bar{x} = -(c/2 - x)$

$$w_{12}^{(t)}(x) = -\frac{1}{2\pi} \int_{-\bar{c}/2}^{\bar{c}/2} \bar{\gamma}(\xi_1) \left[ \frac{x' - \xi_1}{(x' - \xi_1)^2 + z_s^2} \times \frac{\bar{b}/2}{\sqrt{(x' - \xi_1)^2 + (\bar{b}/2)^2 + z_s^2}} \right]$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{\bar{b}/2}{(\bar{b}/2)^2 + z_s^2} \\
 & \times \left( \frac{x' - \xi_1}{\sqrt{(x' - \xi_1)^2 + (\bar{b}/2)^2 + z_s^2}} \right. \\
 & \left. + \frac{\bar{c}/2 - x'}{\sqrt{(\bar{c}/2 - x')^2 + (\bar{b}/2)^2 + z_s^2}} \right) \\
 & + \int_0^\infty \frac{\bar{b}/2}{\sqrt{(\bar{x} - s)^2 + (\bar{b}/2)^2 + z_s^2}} \\
 & \times \exp\left(-\frac{s}{\tau V}\right) ds \Big] d\xi_1 \tag{4}
 \end{aligned}$$

ただし,  $x' = -(x_s - x)$ ,  $\bar{x} = -[(x_s - x) + \bar{c}/2]$

$$\begin{aligned}
 w_{21}^{(t)}(\xi) = & -\frac{1}{2\pi} \int_{-c/2}^{c/2} \gamma(x_1) \left[ \frac{\xi' - x_1}{(\xi' - x_1)^2 + z_s^2} \right. \\
 & \times \frac{b/2}{\sqrt{(\xi' - x_1)^2 + (b/2)^2 + z_s^2}} \\
 & + \frac{b/2}{(b/2)^2 + z_s^2} \\
 & \times \left( \frac{\xi' - x_1}{\sqrt{(\xi' - x_1)^2 + (b/2)^2 + z_s^2}} \right. \\
 & \left. + \frac{c/2 - \xi'}{\sqrt{(c/2 - \xi')^2 + (b/2)^2 + z_s^2}} \right) \\
 & + \int_0^\infty \frac{b/2}{\sqrt{(\bar{\xi} - s)^2 + (b/2)^2 + z_s^2}} \\
 & \times \exp\left(-\frac{s}{\tau V}\right) ds \Big] dx_1 \tag{5}
 \end{aligned}$$

ただし,  $\xi' = \xi + x_s$ ,  $\bar{\xi} = \xi + x_s - c/2$

$$\begin{aligned}
 w_{22}^{(t)}(\xi) = & -\frac{1}{2\pi} \int_{-\bar{c}/2}^{\bar{c}/2} \bar{\gamma}(\xi_1) \left[ \frac{1}{\xi - \xi_1} \right. \\
 & \times \frac{\bar{b}/2}{\sqrt{(\xi - \xi_1)^2 + (\bar{b}/2)^2}} \\
 & + \frac{1}{\bar{b}/2} \left( \frac{\xi - \xi_1}{\sqrt{(\xi - \xi_1)^2 + (\bar{b}/2)^2}} \right. \\
 & \left. + \frac{\bar{c}/2 - \xi}{\sqrt{(\bar{c}/2 - \xi)^2 + (\bar{b}/2)^2}} \right) \\
 & + \int_0^\infty \frac{\bar{b}/2}{\sqrt{(\bar{\xi} - s)^2 + (\bar{b}/2)^2}} \\
 & \times \exp\left(-\frac{s}{\tau V}\right) ds \Big] d\xi_1 \tag{6}
 \end{aligned}$$

ただし,  $\bar{\xi} = -(\bar{c}/2 - \xi)$

$x$  軸方向の誘導速度については自由渦からの寄与はないので,  $u_{12}^{(t)}(x)$ ,  $u_{21}^{(t)}(\xi)$  の表示式は前報<sup>3)</sup>と同じ

となる。

吹出しの強さは

$$m(x) = 2V \frac{\partial f}{\partial x} \tag{7}$$

によって求める。 $f$  は横切面積曲線を同一とした側面垂直な船型の半幅を示す。吹出しによる  $z$  軸方向の誘導速度  $w_{12}^{(t)}(x)$ ,  $w_{21}^{(t)}(\xi)$  および  $x$  軸方向のそれ  $u_{12}^{(t)}(x)$ ,  $u_{21}^{(t)}(\xi)$  の表示式も前報<sup>3)</sup>のものと同じであるので省略する。なお, 前報で考慮した伴流影響を表わすための船体後半部の吹出し強さの修正については, その影響は小さいので本報告では行っていない。

以上の誘導速度の表示を用いると, 自船および相手船における境界条件は次式のようにになる。

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{w_{11}^{(t)} + w_{12}^{(t)} + w_{12}^{(t)}}{V + u_{12}^{(t)} + u_{12}^{(t)}} &= -\tan \beta \\
 \frac{w_{21}^{(t)} + w_{22}^{(t)} + w_{21}^{(t)}}{V + u_{21}^{(t)} + u_{21}^{(t)}} &= -\tan \bar{\beta}
 \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

この積分方程式から  $\gamma(x_1)$ ,  $\bar{\gamma}(\xi_1)$  が得られると, 横方向力  $Y, \bar{Y}$  およびモーメント  $N, \bar{N}$  (重心位置  $x_0, \bar{x}_0$  まわりの値) は, 2 次の影響を無視して次式のように求められる。

$$\left. \begin{aligned}
 Y &= \frac{1}{2} \rho b \cdot \cos \beta \int_{-c/2}^{c/2} \gamma(x) \\
 &\quad \times \{V + u_{12}^{(t)}(x) + u_{12}^{(t)}(x)\} dx \\
 \bar{Y} &= \frac{1}{2} \rho \bar{b} \cdot \cos \bar{\beta} \int_{-\bar{c}/2}^{\bar{c}/2} \bar{\gamma}(x) \\
 &\quad \times \{V + u_{21}^{(t)}(x) + u_{21}^{(t)}(x)\} dx \\
 N &= \frac{1}{2} \rho b \cdot \cos \beta \int_{-c/2}^{c/2} \gamma(x) \\
 &\quad \times \{V + u_{12}^{(t)}(x) + u_{12}^{(t)}(x)\} (x - x_0) dx \\
 \bar{N} &= \frac{1}{2} \rho \bar{b} \cdot \cos \bar{\beta} \int_{-\bar{c}/2}^{\bar{c}/2} \bar{\gamma}(x) \\
 &\quad \times \{V + u_{21}^{(t)}(x) + u_{21}^{(t)}(x)\} (x - \bar{x}_0) dx
 \end{aligned} \right\} \tag{9}$$

これらの無次元係数を

$$Y' = \frac{Y}{1/2\rho V^2 bc}, \quad N' = \frac{N}{1/2\rho V^2 bc^2} \tag{10}$$

などのように定める。

束縛渦強さの分布については

$$\gamma(x) = a(x) \sqrt{\frac{c/2 - x}{c/2 + x}} \tag{11}$$

の形を仮定する。ここで  $a(x)$  を未知関数とする。 $a(x)$  を定める積分方程式の数値解法は前報<sup>3)</sup>に譲る。

### 3. 実験と計算との対比

例としてタンカー模型の場合の干渉流体力の実験結果<sup>3)</sup>を Fig.3,4 に示す。2 船は長さが等しい同型船である。要目を Table 1 に示す。模型船にはプロペラ、舵は取り付けられていない。同図は相手船 (船体 [2]) のみが斜航角  $\bar{\beta} = 10^\circ$  を有する場合の結果である。図中、縦方向間隔  $x_s$  は自船 (船体 [1]) が前方にある状態が正である。また、横力係数  $Y'$  については Fig.1 の座標系における  $z$  方向を正とし、モーメント係数  $N'$  については時計方向を正とする。

Fig.3,4 では減衰パラメータを  $\tau' = 3 \sim 10$  の範囲で変化させたときの計算値を記入し、実験値と対比させている。図における  $\tau' = \infty$  は  $\tau'$  の値を十分大きくした場合を意味し、減衰を考慮しない場合に相当する。前報における取扱い<sup>3)</sup>と同様に、2 船間の有効的横方向距離 (船体中心線間隔) を

$$z'_s = z_s - kB \quad (12)$$

のように表わし、 $k = 0.7$  としている。

自船が後方にある状態、すなわち  $x_s < 0$  の領域では、減衰影響を考慮しないときは特に  $Y'$  において実験と計算に大きな差がある。ここで減衰影響を考慮し、 $\tau'$  の値を減少させると計算値は実験値に近づいていく。ここで対象としたタンカー船型に限れば、 $\tau' = 3$  程度とすれば実験値にかなり近い値となる。

$N'$  については次のことが言える。一般に減衰を考慮することによる影響は、 $Y'$  の場合と比べ大幅に小さい。 $\tau'$  を変化させたときの実験値との対応度は、 $z_s/L$  の大きさにより異なるが、 $x_s/L < -1$  の範囲では  $\tau'$  を減少させると確実に実験値に近づく。

一方、斜航角をもつ相手船については次のような結果が得られている。相手船が後方にある状態 ( $x_s > 0$ ) においても、自船の自由渦からの誘導速度は元々小さいので、減衰影響はさらに小さく現われることになる。従って、 $x_s/L$  の全範囲にわたり、 $\tau'$  の変化による流体力係数の変化は小さい。

Table 1 Principal particulars of ship model.

$L (=L_{pp})$ (m)	2.000
$B$ (m)	0.333
$d$ (m)	0.127
$C_b$	0.830
$2d/L$	0.127
Ship speed, $F_N$	0.152

Fig.5 は翼弦方向の束縛渦強さ  $\gamma$  の分布の例を示したものである。渦減衰の影響が大きく現われる  $x_s/L = -1.0$  の状態の船体 [1] の渦分布について考える。 $\tau'$  の値が小さくなるに従い  $\gamma$  は大きくなるが、その増加の仕方は翼弦中央に対してほぼ対称となっている。このことは、

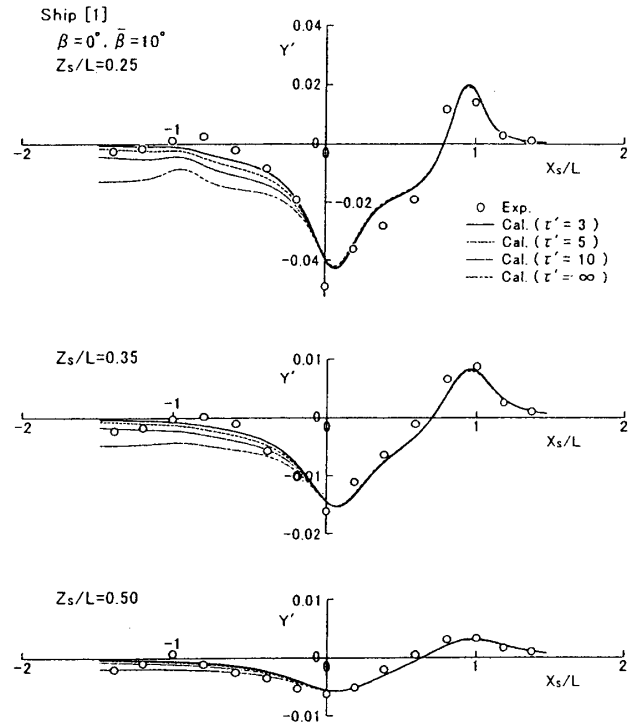


Fig.3(a) Lateral force caused by interaction between two ships with drift angle (Ship[1]).

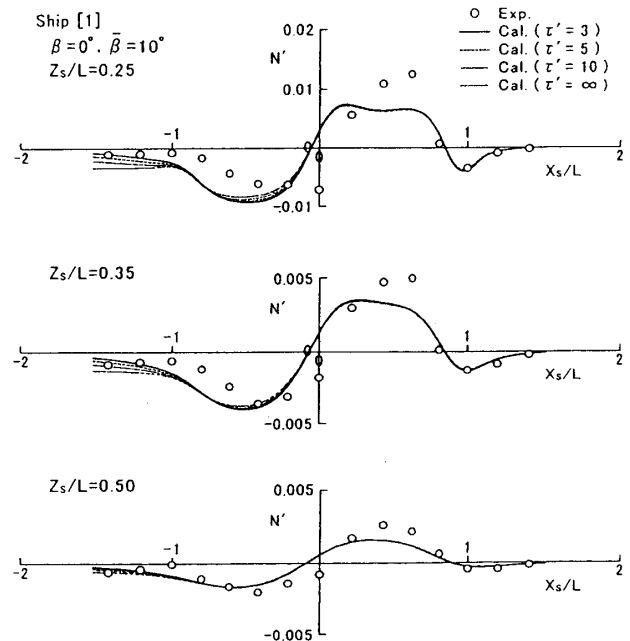


Fig.3(b) Yaw moment caused by interaction between two ships with drift angle (Ship[1]).

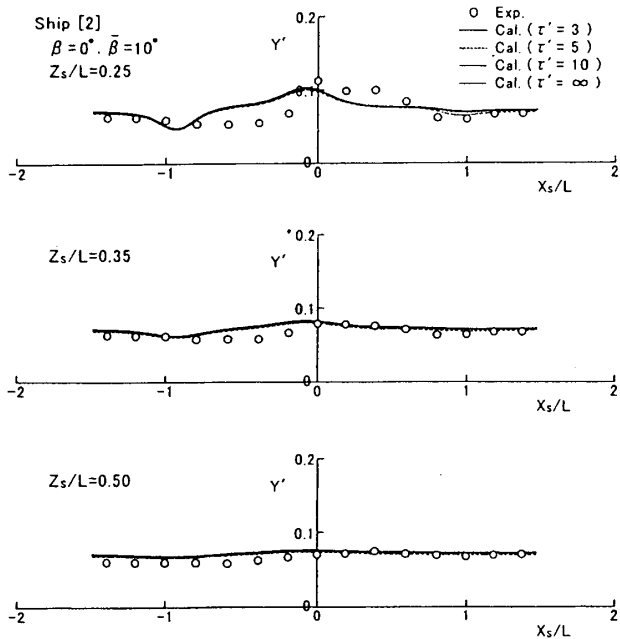


Fig.4(a) Lateral force caused by interaction between two ships with drift angle (Ship[2]).

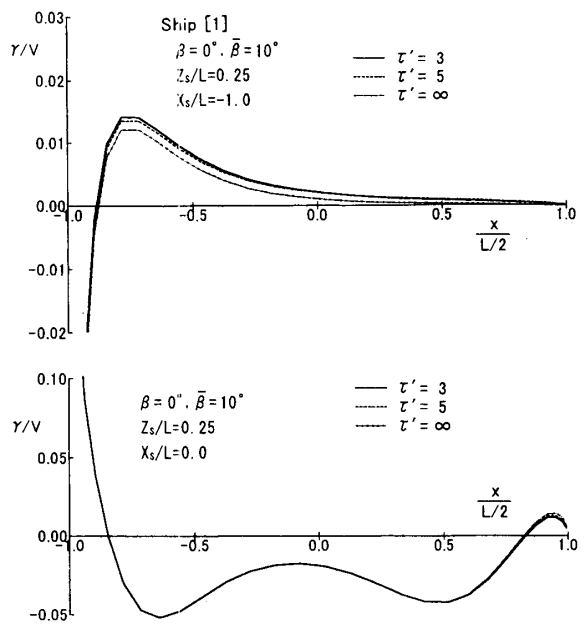


Fig.5(a) Chordwise distributions of vorticity when  $\tau'$  is changed (Ship[1]).

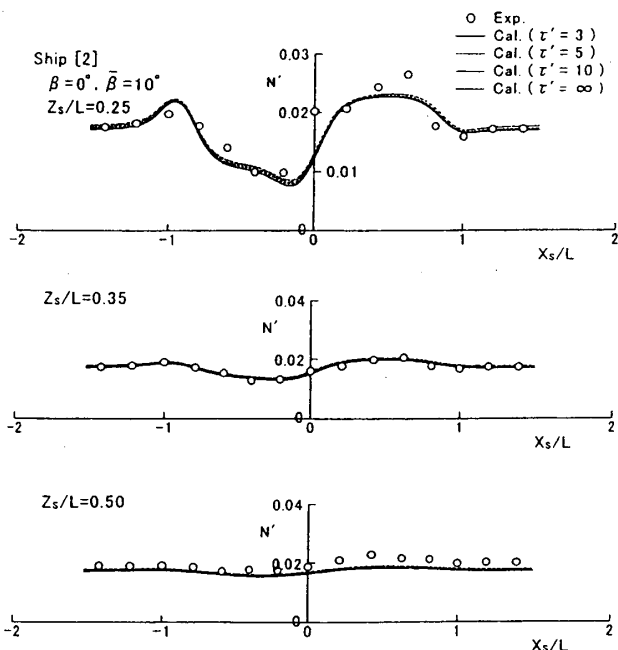


Fig.4(b) Yaw moment caused by interaction between two ships with drift angle (Ship[2]).

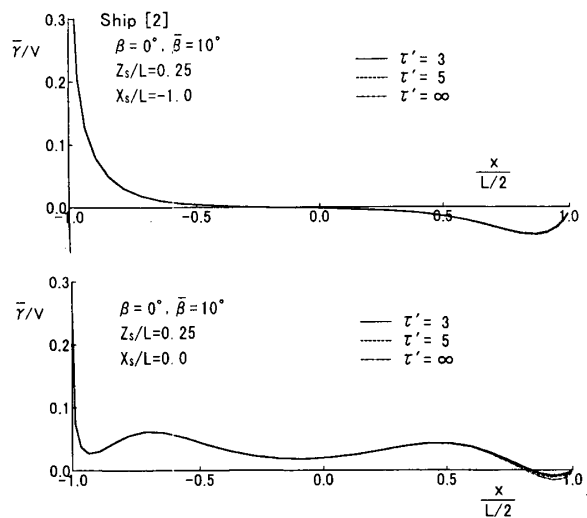


Fig.5(b) Chordwise distributions of vorticity when  $\tau'$  is changed (Ship[2]).

$\tau'$  の変化は  $Y'$  に対してはある大きさの影響を及ぼすが、 $N'$  (重心まわり) への影響は小さいことを意味している。前述した渦減衰の効果が  $Y'$  と  $N'$  で異なる結果は、翼弦方向の渦分布の特性からもある程度の説明はできる。

従来、採用されている減衰パラメータの値については、例えば文献 5) では  $\tau'$  の形で表わすと 4.7 程度の

値が用いられている。ただし、横運動時の船体流体力の離散渦放出モデルによる計算に用いられたものである。対象とする船型および計算条件が異なるが、本報告で適切と考えられる  $\tau' = 3$  とはオーダとしては同程度の値となっている。

本計算法では単独状態の平板翼の特性が基本となっているので、干渉力の計算精度もこれに依存する。実験値が与えられている 2, 3 の単独平板翼<sup>8), 9), 10)</sup> について、線形微係数  $Y'_\beta$  の計算精度を確認したのが Table 2 である。表中、 $\Lambda$  は縦横比を表わす。同表は、 $\tau'$  の

Table 2 Linear derivatives of flat plate wings.

	$\Lambda$	Cal.	Exp.	Ref.
$Y'_\beta$	0.12	0.377	0.367	8)
	0.20	0.626	0.645	9)
	0.50	1.51	1.53	10)

Note:  $\tau' = \infty$  (1000).

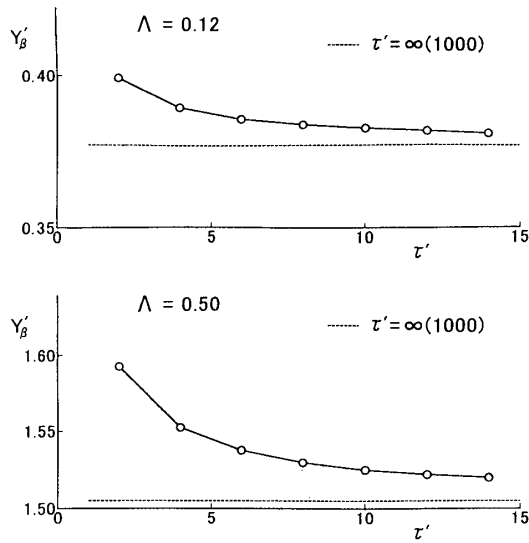


Fig.6 Influence of value of  $\tau'$  on linear derivatives of flat plate wings.

値を十分に大きくし、渦減衰を考慮しない場合の値を示す。なお、 $\Lambda=0.12$  の場合の計算値は、Bollay の理論に基づく線形微係数  $Y'_\beta = \pi\Lambda$  による値と一致する。

単独翼に対する渦減衰の影響は小さいことを確認している。Fig.6 は Table 2 の単独平板翼について、 $\tau'$  を変化させたときの  $Y'_\beta$  への影響を示したものである。 $\tau' = 3$  と  $\infty$  における  $Y'_\beta$  の比は 1.04 程度となり、渦減衰を考慮すると高々数%の増加となる。

#### 4. 結 言

以上で述べたことを要約すると、おおよそ次のようになる。

- (1) 前報<sup>3)</sup>において、2船が平行航走するときの後方船体の干渉流体力の推定計算の精度について問題点が残されていた。これの改良策として、自由渦の減衰を考慮する方法について検討した。

- (2) 本報告で用いた渦減衰モデルの式 ((2) 式) において減衰パラメータをある値に設定すると、特に横力係数については実験値に近い値が得られる。
- (3) 干渉流体力に対する渦減衰の取扱いの影響は、モーメント係数よりも横力係数における方が大幅に大きい。
- (4) 一般に単独状態の小縦横比平板翼の線形微係数においては、渦減衰の影響は小さい。

終りに臨み、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) 貴島勝郎, 野中晃二: 制限水域における船の操縦性, 第3回操縦性シンポジウム, 日本造船学会, 1981, pp.137-175.
- 2) 貴島勝郎, 安川宏紀: 狭水路中を航行する船の操縦性能, 日本造船学会論文集, 第156号, 1984, pp.171-179.
- 3) 湯室彰規: 操縦流体力における2船間干渉に関する近似計算, 関西造船協会誌, 第212号, 1989, pp.113-121.
- 4) 稲室隆二, 足立武司: うず放出モデルを用いたはく離を伴う非定常流れの一解法(第2報, 単独円柱まわりの流れ), 日本機械学会論文集, 52巻, 476号, 1986, pp.1600-1607.
- 5) 古川芳孝, 貴島勝郎: 横運動時の船体に作用する流体力の推定法に関する研究(続報), 日本造船学会論文集, 第180号, 1996, pp.235-240.
- 6) D.S.Dosanjh, E.P.Gasperek and S.Eskinazi: Decay of a Viscous Trailing Vortex, The Aeronautical Quarterly, 1962, pp.167-188.
- 7) B.Cantwell and N.Rott: The decay of a viscous vortex pair, Phys. Fluids, Vol.31, No.11, 1988, pp.3213-3224.
- 8) 湯室彰規: 浅水時操縦微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) 浜本剛実: 小縦横比揚力面の積分方程式とその近似解法, 日本造船学会論文集, 第124号, 1968, pp.1-7.
- 10) 菅井和夫: 小縦横比揚力面に対する新しい線型近似法, 日本造船学会論文集, 第117号, 1965, pp.31-38.