

横傾斜時の操縦流体力微係数の近似計算に関する一検討*1

正会員 湯室 彰規*2

An Approximate Calculation Method for Maneuvering Hydrodynamic Forces on a Ship Hull with Heel Angle

By Akinori YUMURO (Member)

Some numerical calculations of maneuvering hydrodynamic forces on a ship hull with heel angle are carried out by using Bolland's lifting surface theory. With the assumption of rigid free-surface, the ship body is replaced by a rectangular wing with dihedral angle. Here, the dihedral angle corresponds to heel angle of the ship body. Sources are distributed over the lifting surface to represent thickness effect of ship breadth. The source strength is determined to be proportional to slope of a distribution of ship breadth.

Numerical calculation is made by changing heel angle and drift angle systematically. Calculated values are compared with the experimental results presented by Son and Nomoto. It seems that the approximate calculation method proposed here is useful for understanding a tendency showing variation of the hydrodynamic forces with heel angle.

Keywords : Maneuverability, Hydrodynamic Force, Heel Angle, Numerical Calculation

1. 緒言

高速貨物船のように比較的やせた船型が高速で航行するときは、操縦性能に及ぼす横傾斜の影響は無視できない程度の大きさになると言われている¹⁾。横傾斜によって生じる操縦流体力の変化の要因として、船型の非対称性による影響と斜航との干渉影響が挙げられている²⁾⁻⁴⁾。本報告では、これらの影響のうちで、より基本的な要素と考えられる傾斜そのものに起因する流体力変化について近似的な計算を行なう。この取扱いは、非対称影響がほとんど無視できる程度に十分に薄い船型を考えることに相当している。

ここでは、このような要素の特性について考察を行なうと共に、一般の船型における横傾斜影響の特性にどの程度関与しているかについて検討している。なお、基本的な場合として斜航状態について考える。

2. 計算上の仮定

船体を矩形平板翼で置き換え、自由表面は剛体壁と

*1 平成9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9年6月10日

*2 埼玉大学工学部

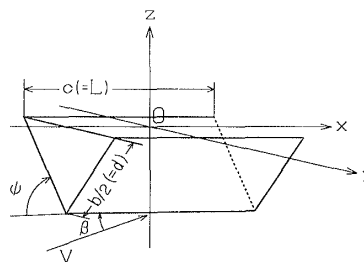


Fig.1(a) Coordinate system (1)

して取り扱う。Fig.1(a)に示すごとく、船体が横傾斜しながら斜航する状態は、上反角を持つ低縦横比翼がある迎角で一様流中に置かれている状態に相当する。図中、実在翼および鏡像翼が、それぞれ右側翼 ($y > 0$) 左側翼 ($y < 0$) に対応しているものとする。

揚力面を表わすための渦の取扱いについては、基本的にはBollandの理論に従うものとする。従って、束縛渦の強さは翼幅方向に一定とし、Fig.1(b)のように自由渦は翼端における垂直平面内にあるものとする。また、自由渦は翼弦に対し迎角の1/2の角度で直線状に流れ去るとする。翼の厚みは揚力面上に置かれた既知

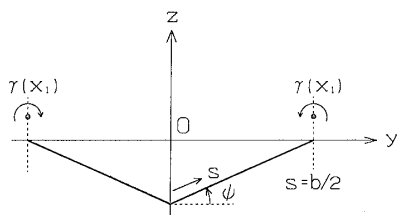


Fig.1(b) Coordinate system (2)

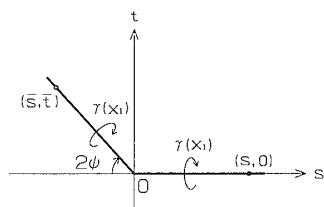


Fig.1(c) Coordinate system (3)

の吹出しによって表わす。吹出し強さは近似的に、流入速度の翼弦方向成分に翼厚勾配を乗じて得られる値を用いる。

翼厚は左右翼の一方が他方に法線方向速度を誘起する意味で考慮したものであり、流体力そのものは平板翼として算定する。一般に翼のモーメントは厚み分布の影響を強く受ける。従って、本報告では第一段階の取扱いとして、直圧力のみを検討の対象とする。

3. 計算の要領

Fig.1 に示す座標系に従う。船の長さ L を翼弦長 c に、吃水 d を片側翼幅 $b/2$ に対応させ、一様流速度(船速)を V 、迎角(斜航角)を β 、上反角を ψ とする。また束縛渦強さを γ 、自由渦の流出角を Θ 、吹出し強さを m で表わす。Fig.1(b) に示すごとく、変数 s は左右翼の交叉点から測った翼幅方向の位置を表わす。

以下では、変数 x は $c/2$ により、 y および s は $b/2$ により無次元化を行ない、それらを改めて同一の記号で表わす。また、渦強さ、吹出し強さおよび誘導速度は V で無次元化した値を意味するものとする。

束縛渦による実在翼面上の点 (x, s) における翼面と直角方向の誘導速度は次式のように表わされる。ただし、Fig.1(c) の座標系による。

$$w_b = (w_b)_1 + (w_b)_2 \quad (1)$$

ここに

$$(w_b)_1 = -\frac{\Lambda}{4\pi} \int_{-1}^1 \frac{\gamma(x_1)}{x-x_1} \times \left[\frac{1-s}{\sqrt{(x-x_1)^2 + \Lambda^2(1-s)^2}} + \frac{s}{\sqrt{(x-x_1)^2 + \Lambda^2 s^2}} \right] dx_1$$

$$(w_b)_2 = -\frac{\Lambda \cos 2\psi}{4\pi} \int_{-1}^1 \gamma(x_1) \frac{x-x_1}{(x-x_1)^2 + \bar{t}^2} \times \left[\frac{1-\bar{s}}{\sqrt{(x-x_1)^2 + \Lambda^2(1-\bar{s})^2 + \bar{t}^2}} + \frac{\bar{s}}{\sqrt{(x-x_1)^2 + \Lambda^2 \bar{s}^2 + \bar{t}^2}} \right] dx_1$$

ただし

$$\bar{s} = -s \cdot \cos 2\psi, \quad \bar{t} = \Lambda \cdot s \cdot \sin 2\psi \quad (0 < s < 1)$$

式中、 $\Lambda = b/c$ であり、添字 1 は実在翼からの寄与、添字 2 は鏡像翼からのそれを表わす。また、自由渦による実在翼の $s = s$ の位置における誘導速度は次式のように表わされる。ただし、Fig.1(b) の座標系による。

$$w_f = (w_f)_1 + (w_f)_2 \quad (2)$$

ここに

$$(w_f)_1 = -\frac{1}{4\pi} \int_{-1}^1 \gamma(x_1) \times \frac{\{(x-x_1) \sin \Theta - z \cos \Theta\} \sin \psi + \{\Lambda(\cos \psi - y) \cos \Theta\} \cos \psi}{\{(x-x_1) \sin \Theta - z \cos \Theta\}^2 + \Lambda^2(\cos \psi - y)^2} \times \left[\frac{(x-x_1) \cos \Theta + z \sin \Theta}{\sqrt{(x-x_1)^2 + \Lambda^2(\cos \psi - y)^2 + z^2}} + 1 \right] dx_1$$

$$(w_f)_2 = -\frac{1}{4\pi} \int_{-1}^1 \gamma(x_1) \times \frac{\{\Lambda(\cos \psi - \bar{y}) \cos \Theta\} \cos \psi - \{(x-x_1) \sin \Theta - \bar{z} \cos \Theta\} \sin \psi}{\{(x-x_1) \sin \Theta - \bar{z} \cos \Theta\}^2 + \Lambda^2(\cos \psi - \bar{y})^2} \times \left[\frac{(x-x_1) \cos \Theta + \bar{z} \sin \Theta}{\sqrt{(x-x_1)^2 + \Lambda^2(\cos \psi - \bar{y})^2 + \bar{z}^2}} + 1 \right] dx_1$$

ただし

$$y = \Lambda \cdot s \cdot \cos \psi, \quad z = -\Lambda(1-s) \sin \psi$$

$$\bar{y} = -\Lambda \cdot s \cdot \cos \psi, \quad \bar{z} = -\Lambda(1-s) \sin \psi$$

一方、吹出しによる実在翼上の点 (x, s) における誘導速度は次式のように表わされる。ただし、Fig.1(c) の座標系による。

$$w_t = \frac{\Lambda}{4\pi} \int_{-1}^1 \int_0^1 m(x_1) \times \frac{\Lambda(\bar{s}-s_1) \sin 2\psi + \bar{t} \cos 2\psi}{\{(x-x_1)^2 + \Lambda^2(\bar{s}-s_1)^2 + \bar{t}^2\}^{\frac{3}{2}}} ds_1 dx_1 \quad (3)$$

ここに

$$m(x) = 2 \cos \beta \cdot \frac{\partial f}{\partial x}$$

ただし

$$\bar{s} = -s \cdot \cos 2\psi, \quad \bar{t} = \Lambda \cdot s \cdot \sin 2\psi$$

簡単のため、原船型と横切面積曲線および吃水の等しい側面垂直な船型を考え、吹出し強さは吃水方向に一

定とする取扱いを行なう。式中の f は、このように簡単化した船型の半幅分布を表わす。

以上の誘導速度の表示を用いると、翼面上の $s = s$ における境界条件は

$$w_l + w_t + \sin \beta \cdot \cos \psi = 0 \quad (4)$$

あるいは

$$w_l = -\sin \beta \cdot \cos \psi - w_t \quad (4')$$

のように表わせる。ここで、 w_l は w_b と w_f の和を示すものとする。(4') 式より得られる積分方程式における渦強さ $\gamma(x)$ の表示については、 $a(x)$ を未知関数として

$$\gamma(x) = a(x) \sqrt{\frac{1-x}{1+x}} \quad (5)$$

の形を仮定する。積分方程式の数値解法については文献 5) に譲る。

翼に働く直圧力およびモーメント (翼弦中心まわり) の各係数は、流入速度における微小量成分を無視すると、近似的に次式のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} Y' &= \cos \beta \int_{-1}^1 \gamma(x) dx \\ N' &= \frac{1}{2} \cos \beta \int_{-1}^1 \gamma(x) x dx \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

無次元化は次式によるものとする。

$$Y' = \frac{Y}{1/2\rho V^2 L d}, \quad N' = \frac{N}{1/2\rho V^2 L^2 d} \quad (7)$$

ただし、前述したように以下では Y' の値のみを対象とする。

4. 計算結果および考察

4.1 計算に用いた船型

実測データについては文献 4) の結果を引用する。計算はその供試船型について行なっている。船型はコンテナ船型であり、その模型船の要目は Table 1 のとおりである。実験はプロペラ、舵を取り付けた状態で行なわれているが、その結果は舵に基づく影響を取り除いた形で示されている。

Table 1 Principal particulars of ship model employed in calculation of hydrodynamic forces (ref.4)

L pp (m)	3.000
B (m)	0.435
d (Mean) (m)	0.1457
C b	0.559
L. C. B. from F. P.	0.518L pp
L/B	6.90
2d/L	0.0971

4.2 境界条件の取扱いの影響

上反角を持たない平面状の翼では、境界条件は通常翼幅中心線上で満足させる取扱いが行なわれる。一方、上反角のある場合は、左右の各翼面上に適当な位置を選ぶことが必要となる。

基本的な場合として上反角を持たない場合について、境界条件の位置の影響の例を述べる。Table 1 の船型に対応する平板翼の線形微係数 Y'_β を示したのが Table 2(a) である。表中、 s_0 は境界条件位置の s の値を表わし、例えば $s_0 = 0.3$ は翼幅中央から翼半幅の 0.3 倍の位置を表わす。境界条件を満足させる位置が翼幅中央から遠ざかるに従い Y'_β は減少するが、その差は比較的小さい。同表の微係数は $\beta = 2^\circ$ の値によって定めたものである。十分小さい β に基づいて定めた値は、Bollay の解析解 $\pi\Lambda = 0.305$ にほとんど一致することを確認してある。

Bollay の理論は平板翼では良い近似法となるが、厚みのある船体に対しては実測値よりも大きい値を与えることが知られている^{6),7)}。Table 2(a) に見られるごとく、本報告の計算においても計算の方が大きい値を示している。

Table 2(b) は境界条件位置の影響を β が比較的大きい場合の直圧力係数 Y' について示したものである。 β が大きくなると、その差は十分に小さくなることが分かる。

Table 2(a) Influence of changing control points on hydrodynamic derivative ($\psi = 0$)

		$Y'_\beta (\beta = 2^\circ)$
Cal.	$S_0 = 0.0$	0.336
	$S_0 = 0.3$	0.318
	$S_0 = 0.5$	0.289
Exp.	ref.4)	0.236

Table 2(b) Influence of changing control points on hydrodynamic force coefficient ($\psi = 0$)

S_0	Y'	
	$\beta = 10^\circ$	$\beta = 20^\circ$
0.0	0.1096	0.3269
0.3	0.1089	0.3258
0.5	0.1069	0.3239

4.3 計算値と実測結果との対比

文献4)の直圧力係数 Y' の実測結果をFig.2に示す。図中、 ϕ は横傾斜角、 β は斜航角を表わす。同文献に従い、 ϕ は右舷側傾斜の場合を正、 β は右旋回状態を正としている。従って前章の計算式中の上反角 ψ とは、 $\phi = -\psi$ の関係にある。なお、原論文では Y' については $1/2\rho V^2 L^2$ を用いた係数が示されているが、Fig.2では便宜上、(7)式による係数に直して示してある。

ϕ および β を系統的に変化させた場合の Y' の計算結果をFig.3に示す。図中の s_0 は、前述のごとく境界条件を満足させる位置を表わす。 $s_0 = 0.3$ は $0.3d$ の深さに相当し、ほぼ直圧力中心で境界条件を満足させることを意味する。 $s_0 = 0.5$ は一つの代表的位置として吃水の $1/2$ の深さで満足させることを意味する。また、 w : mean と表わしているのは、要求される誘導速度 w として、翼幅にわたる平均値を用いることを意味する。換言すれば、境界条件を翼幅にわたって平均的に満足させることを意味している。計算は、 β の変化の影響をより明確に把握すること、また β の非線形影響も併せて知ることができることから、 $\beta = 20^\circ$ までの広い範囲で行なっている。

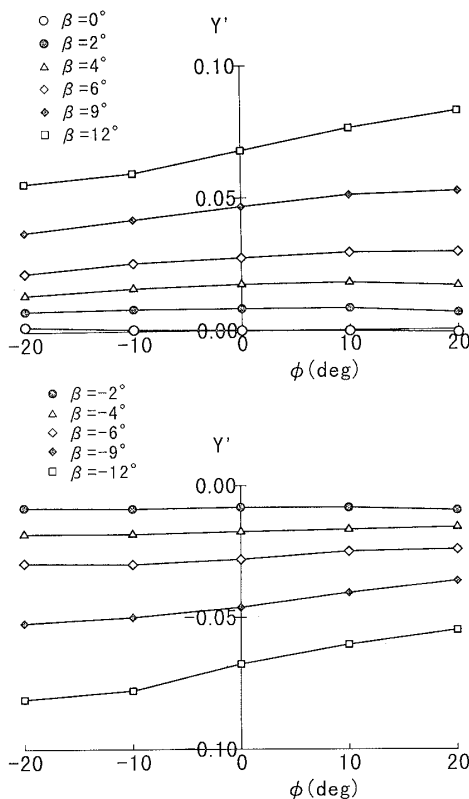


Fig.2 Experimental values of lateral force coefficient due to heel angle (ref.4)

例えば $\beta > 0$ の範囲を見ると、 Y' の値は ϕ が大きくなるに従い概して増加すること、増加の程度は β が大きいほど著しいという傾向については、計算値と実測結果は対応している。ただし前述のごとく、 Y' の値そのものについては計算の方が大きい値を与えるので、定量的には問題が残る。

そこで、浅水時の操縦流体力の取扱いにおける井上の方法⁸⁾に従い、横傾斜がある場合とない場合の流体力の比を考える。Fig.4は実測データを $\phi = \phi$ における値と $\phi = 0$ における値との比 $Y'/(Y')_0$ の形で表示したものである。Fig.5には、その計算値を示している。このような比の形で表示すると、定量的にもある程度の対応が得られることが分かる。従って、例えば横傾斜角が零のときの流体力係数の実測値が知られている場合、この比の計算値を乗ずることにより、傾斜のある場合の値が推定できることになる。

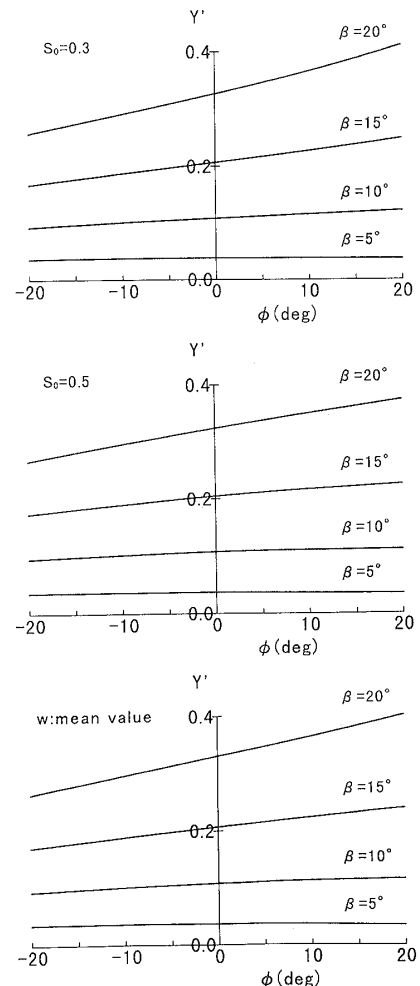


Fig.3(a) Calculated values of lateral force coefficient due to heel angle ($\beta > 0$)

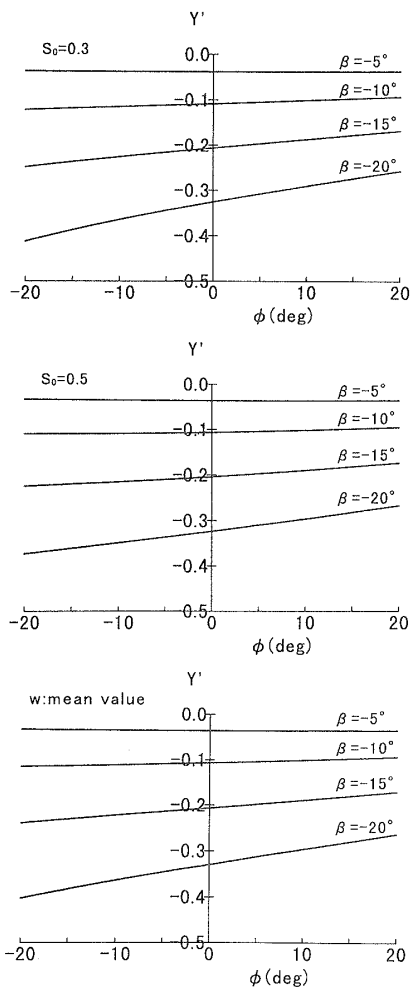


Fig.3(b) Calculated values of lateral force coefficient due to heel angle ($\beta < 0$)

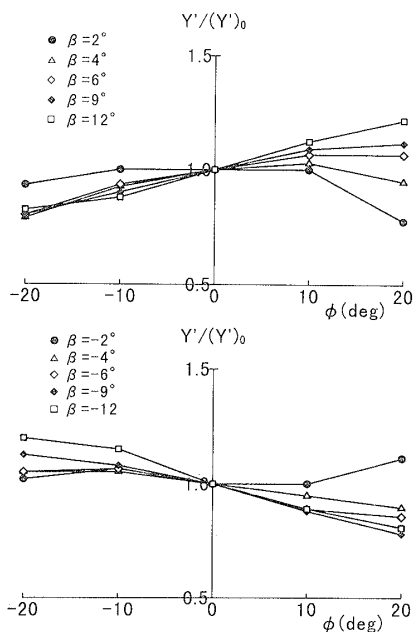


Fig.4 Experimental values of $Y'/(Y')_0$ as function of heel angle (ref.4))

Fig.3 および Fig.5 に見られるごとく、上反角があり、さらに翼厚影響を考慮した場合においても、境界条件の取扱いの影響は比較的小さいと言える。ここで、境界条件位置として $s_0 = 0.3$ とした場合が概して実測値により近い結果を与えている。このことから、この種の計算においては、 $s_0 = 0.3$ とする取扱いが一つの適切な計算方法であると考えられる。

Fig.6 は、一様速度の翼面垂直方向成分 w_0 と吹出しによる誘導速度 w_t の割合の一例を示している。同図における γ は、 $w_0 + w_t$ を打ち消す速度を誘起するときの束縛渦分布を示している。

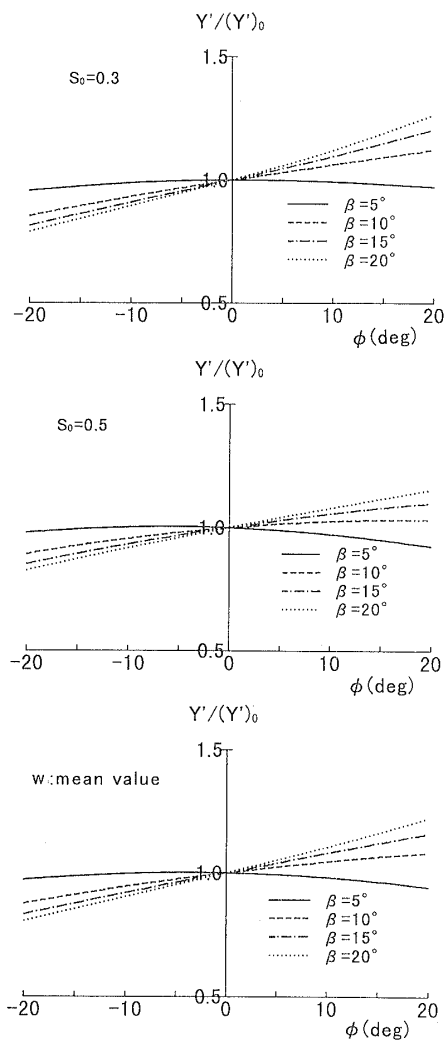


Fig.5(a) Calculated values of $Y'/(Y')_0$ as function of heel angle ($\beta > 0$)

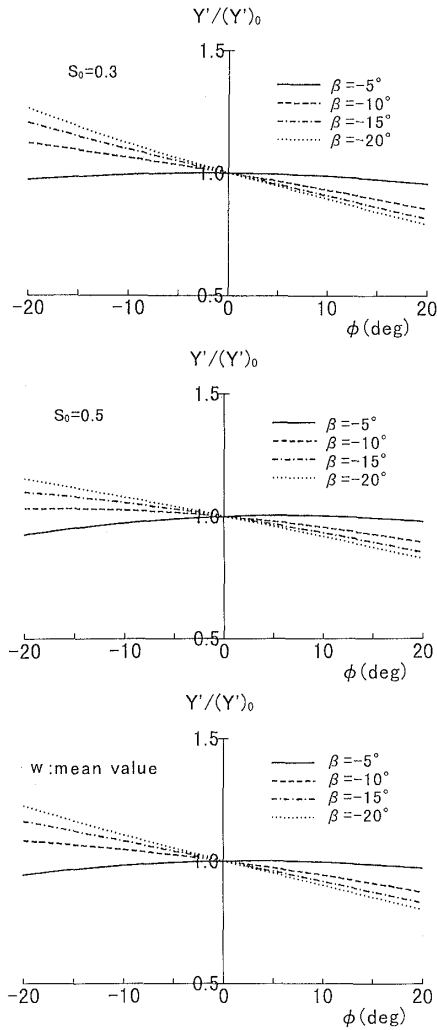


Fig.5(b) Calculated values of $Y'/(Y')_0$ as function of heel angle ($\beta < 0$)

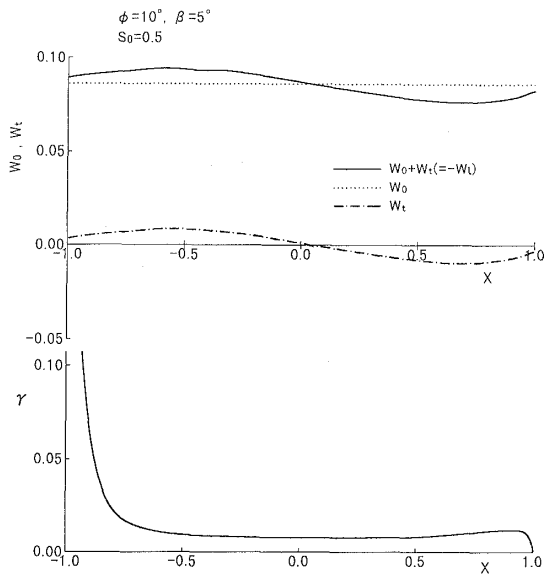


Fig.6 Chordwise distribution of vorticity and velocity induced by sources

5. 結言

横傾斜による操縦流体力変化の要因のうち、傾斜そのものに基づく影響について、船型が十分に薄いという条件の下で近似的計算を行なった。さらに、厚みをもつ一般の船型の直圧力係数について実測結果と対比した。本報告で述べた要領の計算によっても、傾斜角の影響の定性的傾向が説明できることを示した。ここで対象とした成分が傾斜影響の比較的大きな要因となり得ることがうかがえる。

参考文献

- 1) M.Hirano and J.Takashina: A Calculation of Ship Turning Motion Taking Effect Due to Heel into Consideration, 西部造船会会報, 第59号, 1980
- 2) H.Eda: Maneuvering Performance of High-Speed Ships with Effect of Roll Motion, Ocean Engng., Vol.7, 1980
- 3) H.Eda: Rolling and Steering Performance of High Speed Ships — Simulation Studies of Yaw -Roll-Rudder Coupled Instability —, 13th O.N.R.Symposium, 1980
- 4) 孫景浩, 野本謙作: 高速コンテナ船の操縦運動と横揺れとの連成挙動について, 日本造船学会論文集, 第150号, 1981
- 5) 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
- 6) 井上正祐: 船の旋回運動方程式とその微係数, 第1回操縦性シンポジウム, 日本造船学会, 1964
- 7) 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
- 8) 井上正祐, 村山紘二: 浅水中を旋回する船の微係数の計算について, 西部造船会会報, 第37号, 1969