

# 操縦運動時の船体に加わる力への自由表面影響

野中晃二\*

## Free Surface Effect on the Force and Moment Acting on a Ship in Maneuvering Motion

By  
Koji NONAKA

### Abstract

Free surface effect on the force and moment acting on a ship is usually neglected as little in maneuvering motion. But, in the case of a high speed ship, this effect cannot be neglected.

Free surface effect is composed of component due to attitude change and that due to wave making. This paper deals with the free surface effect in aspect of wave making.

Simplifying the usual linear theory, Michell integral, by slenderness approximation, formulas were obtained for the force and moment acting on a ship in oblique towing and a ship in turning, these formulas are very easy to calculate.

By comparison with experiment results, it was ascertained that this simple method was useful on the estimation of free surface effect.

### 1. 緒 言

操縦運動において、船体は揚力体としての流体力を受けるが、通常は、この流体力の速度による性質の変化は小さいとして、速度影響は無視される事が多い。しかし、高速船においては、速度による姿勢や造波現象の変化に起因する流体力の変化により、低速時と高速船行時とは操縦性にかなりの変化を生じるため、速度影響を考慮する事が必要になる。

造波による速度影響については、西山<sup>1)</sup>、花岡<sup>2)</sup>、Hu<sup>3)</sup> および Chapman<sup>4)</sup> の研究があるが、前3者については、計算結果は 図-1 に示すように、3者とも異なった様子を示している。Chapman の方法は、3次元定常問題を、細長体近似により非定常2次元問題に変換し、各断面毎に有限差分法で計算していくもので、有力な方法と思われるが、計算および実験との比較は、船長方向への流場の変動のゆるやかな、フルード数の非常に高い範囲のもので、通常の排水量型高速船の速度範囲での有効性の検討はなされていない。

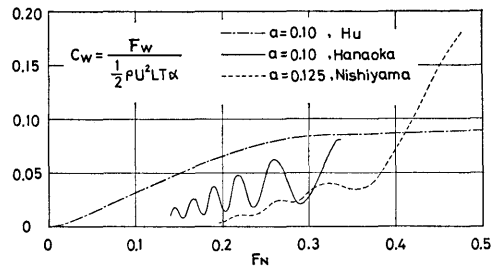


図-1 Side force 計算値の比較

また、通常的高速船の速度範囲において、速度影響に関する実験も非常に少なく、実験的にも造波による速度影響について、充分傾向がつかまえておられるとはいえない。

本報告の目的は、造波による速度影響の大小とその値と傾向をつかむ簡単な方法を示す事にあり、既に斜航の場合を文献(5)で示したが、その後、同文献で  $C_M$  の表示式および Munk Moment の扱い方に誤りがある事がわかり、また、斜航と旋回は操縦運動における基本的な運動であるが、旋回時の速度影響の計算の中に、斜航の場合も含まれる事がわかったので、あらた

\* 運動性能部

原稿受付: 昭和55年5月16日

めて、斜航と旋回とをまとめて報告する。

### 2. 定式化と摂動法

本節は文献(5)の第2,3節と同一であるが、定式化については、問題展開の出発点となる所なのでここに再録し、摂動法については結果だけを示す。

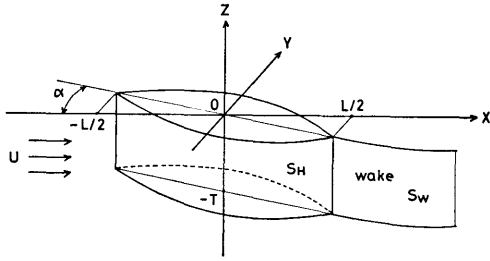


図-2 座標系

図-2 に示すように、速度  $U$  の一様流中に小さい迎角  $\alpha$  を持つておかれた薄い船を考える。船体表面  $S_H$  は、

$$F(x, y, z) = y \mp h(x, z) + \alpha x = 0 \quad (1)$$

迎角  $\alpha$  のため生じる自由渦層の作る wake  $S_w$  は、  

$$E(x, y, z) = y - w(x, z) = 0 \quad (2)$$
と表わせるとする。

流体は非粘性、非圧縮性とし、船体および wake を除いて非回転とすると、速度ポテンシャル  $\phi$  が存在し、次のような条件を満足しなければならない。

まず、流体内で Laplace の式を満足する。

$$[L] \quad \phi_{xx} + \phi_{yy} + \phi_{zz} = 0 \quad (3)$$

船体表面では、

$$[H] \quad \phi_y = \pm(\phi_x h_x + \phi_z h_z) - \alpha \phi_x \quad \text{on } y = \pm h - \alpha x \quad (4)$$

を満足しなければならない。自由表面を  $z = \zeta(x, y)$  とすると、自由表面における dynamic および kinematic condition は次式で与えられる。

$$[FD] \quad g\zeta + \frac{1}{2}(\phi_x^2 + \phi_y^2 + \phi_z^2) = \frac{U^2}{2} \quad \text{on } z = \zeta \quad (5)$$

$$[FK] \quad \phi_z - (\phi_x \zeta_x + \phi_y \zeta_y) = 0 \quad \text{on } z = \zeta \quad (6)$$

同様に、自由渦層に対する dynamic, kinematic condition は次のようになる。

$$[WD] \quad (\phi_x^2 + \phi_y^2 + \phi_z^2)_{y=w+0} = (\phi_x^2 + \phi_y^2 + \phi_z^2)_{y=w-0} \quad (7)$$

$$[WK] \quad \phi_y - (\phi_x w_x + \phi_z w_z) = 0 \quad \text{on } y = w \quad (8)$$

(414)

さらに  $\phi$  は次の条件を満足しなければならない。

$$[\infty] \quad \text{無限前方で攪乱は消える} \quad (9)$$

船の長さを基準にとり、 $L=O(1)$  とする。船幅/船長  $= B/L = \epsilon$  とおき、船は充分薄く  $\epsilon \ll 1$  とする。従って  $h(x, z) = O(\epsilon)$ 。迎角も充分小さく  $\alpha = O(\epsilon)$  とする。船体付近の流れに対しては、速方の wake は殆ど影響を与えないので、船体付近の wake だけについて考えると、その位置は迎角  $\alpha$  と同じ程度のオーダーなので、 $w(x, z) = O(\epsilon)$  となる。船速  $U$  については  $U^2/gL = O(1)$  と仮定する。

以上で、速度ポテンシャル  $\phi$  の満足すべき条件が与えられたので、次に  $\phi$  を摂動法で展開し、 $\epsilon$  について最低次の項をとる事により問題を簡単化すると、次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} [L] \quad & \phi_{xx} + \phi_{yy} + \phi_{zz} = 0 \\ [F] \quad & \phi_z + \frac{U^2}{g} \phi_{xz} = 0 \quad \text{on } z = 0 \\ [H] \quad & \phi_y(x, \pm 0, z) = \pm U h_x(x, z) - U \alpha \quad \text{on } A_H \\ [WD] \quad & \phi_y(x, 0, z) = U w(x, z) \quad \text{on } A_w \\ [WK] \quad & \phi_x(x, +0, z) = \phi_x(x, -0, z) \quad \text{on } A_w \\ [\infty] \quad & \text{無限前方で攪乱は消える} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

但し、 $A_H$  と  $A_w$  は船体と wake の  $y=0$  平面への投影面である。

ここで、 $\phi$  を次ように 2 つに分けて考える事にする。

$$\phi(x, y, z) = \varphi(x, y, z) + \psi(x, y, z) \quad (11)$$

条件 [H] [WD] を次のように満足させる。

$$\left. \begin{aligned} [H] \quad & \varphi_y(x, 0, z) = -U \alpha \\ & \psi_y(x, \pm 0, z) = \pm U h_x(x, z) \\ [WD] \quad & \varphi_y(x, 0, z) = U w(x, z) \\ & \psi_y(x, 0, z) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

条件 [L] [F] [WK] [ $\infty$ ] については、 $\varphi, \psi$  とも各個に満足するものとする。そうすると  $xz$  平面に関して、 $\varphi$  は反対称ポテンシャルに、 $\psi$  は対称ポテンシャルになる。

この時、side force 分布は次式で与えられる。

$$(p_+ - p_-) \Big/ \frac{1}{2} \rho U^2 = \frac{2}{U} \{ \phi_x(x, +0, z) - \phi_x(x, -0, z) \} = \frac{4}{U} \varphi_x(x, 0, z) \quad (13)$$

従って、以後は反対称ポテンシャル  $\varphi$  だけを考えればよい。

### 3. 近似解法

反対称ポテンシャル  $\varphi(x, y, z)$  を求めるには,  $A_H + A_W$  上に doublet を分布させ,  $[L][F][\infty]$  を満足するポテンシャルを作り,  $[H][WK]$  により doublet の強さを連立方程式から求めるとするのが最も一般的な方法で, doublet の強さがわかると  $\varphi(x, y, z)$  がきまり,  $[WD]$  より wake の形も求まる事になるが, 核関数が複雑な形をしている事, 及び,  $xz$  面での 2 重積分となる事から, 計算にはかなりの労力を必要とする。

別の方法として次のようなものがある。以下  $\varphi$  の反対称性を利用して  $y \geq 0$  について考える事にするが,  $y=0$  での  $y$  方向の速度分布が,

$$\varphi_y(x, 0, z) = V(x, z)$$

で与えられたとすると, 条件  $[L][F][\infty]$  を満足するポテンシャル  $\varphi$  は, Michell により次のように与えられている。

$$\begin{aligned} \varphi(x, y, z) &= -\frac{2}{\pi^2} \int_{-\infty}^0 \int_{-\infty}^{\infty} V(x', y') dx' dz' \\ &\quad \cdot \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{e^{-y\sqrt{m^2+n^2}}}{\sqrt{m^2+n^2}} \\ &\quad \cdot \cos m(x-x') \cos(nz+\varepsilon) \cos(nz'+\varepsilon) dm \\ &\quad - \frac{2}{\pi K} \int_{-\infty}^0 \int_{-\infty}^{\infty} V(x', z') dx' dz' \\ &\quad \cdot \int_0^{\kappa} \frac{m \cos m(x-x')}{\sqrt{1-m^2/K^2}} \\ &\quad \cdot e^{(z+z')m^2/K - ym\sqrt{1-m^2/K^2}} dm \\ &\quad - \frac{2}{\pi K} \int_{-\infty}^0 \int_{-\infty}^{\infty} V(x', z') dx' dz' \\ &\quad \cdot \int_{\kappa}^{\infty} \frac{m e^{(z+z')m^2/K}}{\sqrt{m^2/K^2-1}} \sin\{m(x-x') \\ &\quad - ym\sqrt{m^2/K^2-1}\} dm \end{aligned} \quad (14)$$

但し,  $K=g/U^2$ ,  $\tan \varepsilon = -m^2/Kn$

この場合,  $V(x, z)$  は (12) 式の  $[H]$  により  $A_H$  上でしか与えられていないので, 始めに  $A_H$  以外での  $V(x, z)$  を仮定して, 逐次近似的に  $\varphi$  と  $V$  を求めて行く事になる。

ここで新たに船は細長いという仮定を入れ,  $V(x, z)$  として無限流体中の細長翼の近似解を用いて, (14) 式から得られる第 1 近似解の  $\varphi$  を用いて side force を求めるというのが花岡の方法であって, その場合, 連立方程式を解く事もなく, 式も一重積分となり, 計算

は非常に簡単になる。但し, 条件  $[WK]$  は満足されなくなる。

大よその値をつかむための簡単で実用的な計算式を求めようとする本論文の目的からすると, 花岡の方法は, 計算の簡単さゆえに非常に魅力的となる。そこで, 以下に花岡の方法により, 斜航状態及び旋回状態における side force 分布 (揚力分布), side force, yaw moment を求めてみる。

無次元化した side force 分布は, (13) 式  $\frac{4}{U}\varphi_x(x, 0, z)$  で与えられる。そこで,  $\phi(x, z) \equiv \frac{4}{U}\varphi_x(x, 0, z)$  という関数  $\phi$  を新しく定義すると, (14) 式より  $\phi$  は次のようになる。

$$\begin{aligned} \phi(x, z) &= \frac{8}{\pi^2} \int_{-\infty}^0 \int_{-\infty}^{\infty} \frac{V(x', z')}{U} dx' dz' \\ &\quad \cdot \int_0^{\infty} dn \int_0^{\infty} \frac{m}{\sqrt{m^2+n^2}} \sin m(x-x') \\ &\quad \cdot \cos(nz+\varepsilon) \cos(nz'+\varepsilon) dm \\ &\quad + \frac{8}{\pi K} \int_{-\infty}^0 \int_{-\infty}^{\infty} \frac{V(x', z')}{U} dx' dz' \\ &\quad \cdot \int_0^{\kappa} \frac{m^2}{\sqrt{1-m^2/K^2}} \\ &\quad \cdot e^{(z+z')m^2/K} \sin m(x-x') dm \\ &\quad - \frac{8}{\pi K} \int_{-\infty}^0 \int_{-\infty}^{\infty} \frac{V(x', z')}{U} dx' dz' \\ &\quad \cdot \int_{\kappa}^{\infty} \frac{m^2}{\sqrt{m^2/K^2-1}} \\ &\quad \cdot e^{(z+z')m^2/K} \cos m(x-x') dm \end{aligned} \quad (15)$$

上式を,

$$\xi = \frac{2x}{L}, \quad \zeta = \frac{z}{T}, \quad a = \frac{2T}{L}, \quad \kappa = \frac{gL}{2U^2}$$

で無次元化し, 多少変形すると次のようになる。

$$\begin{aligned} \phi(\xi, \zeta) &= -\frac{2a}{\pi} \int_{-\infty}^0 \int_{-\infty}^{\infty} \frac{V(\xi', \zeta')}{U} \frac{\partial}{\partial \xi} \\ &\quad \cdot \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \Big|_{\eta=0} d\xi' d\zeta' \\ &\quad - \frac{4a}{\pi^2} \int_{-\infty}^0 \int_{-\infty}^{\infty} \frac{V(\xi', \zeta')}{U} d\xi' d\zeta' \\ &\quad \cdot \int_0^{\infty} d\tau \int_{-\infty}^{\infty} \frac{v^2 \tau^3 \sin v\tau(\xi-\xi')}{\sqrt{\tau^2+1}} \\ &\quad \cdot \frac{e^{-i\tau a(\zeta+\zeta')}}{v\tau^2+i\kappa} dv \\ &\quad + \frac{8a}{\pi \kappa} \int_{-\infty}^0 \int_{-\infty}^{\infty} \frac{V(\xi', \zeta')}{U} d\xi' d\zeta' \\ &\quad \cdot \int_0^{\kappa} \frac{u^2}{\sqrt{1-u^2/\kappa^2}} \\ &\quad \cdot e^{(\zeta+\zeta')au^2/\kappa} \sin u(\xi-\xi') du \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{8a}{\pi\kappa} \int_{-\infty}^0 \int_{-\infty}^{\infty} \frac{V(\xi', \zeta')}{V} d\xi' d\zeta' \\
& \cdot \int_{\kappa}^{\infty} \frac{u^2}{\sqrt{u^2/\kappa^2 - 1}} \\
& \cdot e^{(\zeta+\zeta')au^2/\kappa} \cos u(\xi-\xi') du \quad (16)
\end{aligned}$$

$$\text{但し, } \left. \begin{aligned} R_1 \\ R_2 \end{aligned} \right\} = \sqrt{(\xi-\xi')^2 + \eta^2 + (\zeta+\zeta')^2 a^2}$$

(16) 式右辺第 1 項が  $F_N=0$  のときの  $\phi$  で, 無限流体中の double model による成分を表わし, 残りの項が自由表面の造波による影響を表わしている。これより後, 無限流体中の double model による成分を  $\phi_0$ , 造波による影響の項を  $\phi_w$  と書く事にする。

#### 4. $V(x, z)$ の推定

無限流体中における double model の揚力面の式は次のように与えられる。

$$\begin{aligned}
V(x, z) = & -\frac{1}{4\pi} \frac{\partial}{\partial z} \int_{-T}^T \int_{-L/2}^{L/2} \frac{\gamma(x', z')}{z-z'} \\
& \cdot \left\{ 1 + \frac{\sqrt{(x-x')^2 + (z-z')^2}}{x-x'} \right\} dx' dz' \quad (17)
\end{aligned}$$

但し,  $V(x, z)$  は吹き上げを,  $\gamma(x, z)$  は束縛渦分布を表わす。船体が細長いという仮定 ( $|z-z'| \ll |x-x'|$ ) により, (17) 式は次のように簡単化される。

$$\begin{aligned}
V(x, z) \doteq & -\frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial z} \int_{-T}^T \frac{l(x, z')}{z-z'} dz' \\
= & -\frac{1}{2\pi} \int_{-T}^T \frac{1}{z-z'} \cdot \frac{\partial}{\partial z'} l(x, z') dz' \quad (18)
\end{aligned}$$

$$\text{但し, } l(x, z') = \int_{-L/2}^x \gamma(x', z') dx'$$

(18) 式より,

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial z} l(x, z) = & \frac{2}{\pi} \frac{1}{\sqrt{T^2 - z^2}} \\
& \cdot \int_{-T}^T \frac{\sqrt{T^2 - z'^2}}{z-z'} V(x', z') dz' \\
& + \frac{C}{\sqrt{T^2 - z^2}}
\end{aligned}$$

$C$  は定数で,  $V(x, z)$ ,  $l(x, z)$  は  $z$  の偶関数なので,  $\left. \frac{\partial l}{\partial z} \right|_{z=0} = 0$  より  $C=0$  となる。

斜航の場合は,  $A_H$  上で  $V(x, z) = -U\alpha$ 。定常旋回の場合は, 角速度  $\dot{\alpha}$  で充分ゆるやかな旋回をしているとして,  $A_H$  上で  $V(x, z) = -x\dot{\alpha}$  とする。従って,

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial z} l(x, z) = & \frac{2}{\pi} \frac{V(x)}{\sqrt{T^2 - z^2}} \int_{-T}^T \frac{\sqrt{T^2 - z'^2}}{z-z'} dz' \\
= & 2V(x) \frac{z}{\sqrt{T^2 - z^2}} \quad (19)
\end{aligned}$$

(416)

$$\text{但し, } V(x) = \begin{cases} -U\alpha & (\text{斜航}) \\ -x\dot{\alpha} & (\text{旋回}) \end{cases}$$

とする。これを (18) 式右辺に代入し, かつ, 定義から明らかのように,  $x \leq -L/2$  では,  $l(x, z) = 0$ ,  $x \geq L/2$  では  $l(x, z)$  は  $x$  方向に一定で  $z$  のみの関数, という性質から次式が得られる。

斜航の場合は,

$$\left. \begin{aligned} x < -\frac{L}{2} \text{ では} \\ V(x, z) = 0 \\ x \geq -\frac{L}{2} \text{ では} \\ V(x, z) = \begin{cases} -U\alpha & \text{for } z > -T \\ -U\alpha \left( 1 + \frac{z}{\sqrt{z^2 - T^2}} \right) & \text{for } z < -T \end{cases} \end{aligned} \right\} (20)$$

旋回の場合は,

$$\left. \begin{aligned} x < -\frac{L}{2} \text{ では} \\ V(x, z) = 0 \\ -\frac{L}{2} \leq x \leq \frac{L}{2} \text{ では} \\ V(x, z) = \begin{cases} -x\dot{\alpha} & \text{for } z > -T \\ -x\dot{\alpha} \left( 1 + \frac{z}{\sqrt{z^2 - T^2}} \right) & \text{for } z < -T \end{cases} \\ x > \frac{L}{2} \text{ では} \end{aligned} \right\} (21)$$

(20), (21) 式を (16) 式に代入する事により, 斜航及び旋回時の side force 分布が得られる。

#### 5. 斜航の場合

斜航時の  $V(x, z)$  ((20) 式) を (16) 式に代入し,  $\xi', \zeta'$  について積分すると次のようになる。

$$\begin{aligned}
\phi(\xi, \zeta) = & \phi_0 - \frac{4a\alpha}{\pi^2} \int_0^{\infty} d\tau \int_{-\infty}^{\infty} \frac{v\tau^2 \cos v\tau(1+\xi)}{\sqrt{\tau^2 + 1}(v\tau^2 + i\kappa)} \\
& \cdot e^{-i\alpha\zeta} \left\{ \frac{i}{av} + \frac{\pi}{2} H_1^{(1)}(av) \right\} dv \\
& + \frac{8a\alpha}{\pi\kappa} \int_0^{\kappa} \frac{u \cos u(1+\xi)}{\sqrt{1-u^2/\kappa^2}} e^{\zeta au^2/\kappa} \left\{ \frac{\kappa}{au^2} \right. \\
& \left. - K_1 \left( \frac{au^2}{\kappa} \right) \right\} du
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{8a\alpha}{\pi\kappa} \int_{\kappa}^{\infty} \frac{u \sin u(1+\xi)}{\sqrt{u^2/\kappa^2-1}} e^{\tau au^2/\kappa} \left\{ \frac{\kappa}{au^2} \right. \\
& \left. - K_1 \left( \frac{au^2}{\kappa} \right) \right\} du \quad (22)
\end{aligned}$$

但し,  $H_1^{(1)}$  は第1種 Hankel 関数,  $K_1$  は第2種変形 Bessel 関数を表わす。

(22) 式右辺第2項以下が, 造波の影響を表わす項  $\phi_w$  で,  $x$  断面における  $\phi_w$  による side force を  $f_w(x)$  とすると,  $x$  方向の無次元化した side force 分布  $C_{St}(\xi)$  は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
C_{St}(\xi) &= f_w(x) \left/ \frac{1}{2} \rho U^2 T \right. = \frac{1}{T} \int_{-T}^0 \phi_w dz \\
&= \int_{-1}^0 \phi_w(\xi, \zeta) d\zeta \\
&= -\frac{2\alpha}{\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} d\tau \int_{-\infty}^{\infty} \frac{i\tau^2 e^{i\tau r(1+\xi)} (1-e^{iav})}{\sqrt{\tau^2+1}(\nu\tau^2+i\kappa)} \left\{ \frac{i}{av} \right. \\
& \quad \left. + \frac{\pi}{2} H_1^{(1)}(av) \right\} dv \\
& \quad + \frac{8\alpha}{\pi} \int_0^{\kappa} \frac{\cos u(1+\xi)}{u\sqrt{1-u^2/\kappa^2}} (1-e^{-au^2/\kappa}) \left\{ \frac{\kappa}{au^2} \right. \\
& \quad \left. - K_1 \left( \frac{au^2}{\kappa} \right) \right\} du \\
& \quad + \frac{8\alpha}{\pi} \int_{\kappa}^{\infty} \frac{\sin u(1+\xi)}{u\sqrt{u^2/\kappa^2-1}} (1-e^{-au^2/\kappa}) \left\{ \frac{\kappa}{au^2} \right. \\
& \quad \left. - K_1 \left( \frac{au^2}{\kappa} \right) \right\} du \\
&= \frac{4\alpha}{\pi} \int_{2a/(1+\xi)}^{\infty} \frac{e^{-\kappa(1+\xi)/\tau} (1-e^{\kappa a/\tau^2})}{\kappa a} \left\{ \frac{\tau^2}{\kappa a} \right. \\
& \quad \left. - K_1 \left( \frac{\kappa a}{\tau^2} \right) \right\} \frac{d\tau}{\sqrt{\tau^2+1}} \\
& \quad + \frac{4\alpha}{\pi} \int_{a/(1+\xi)}^{2a/(1+\xi)} \left[ e^{-\kappa(1+\xi)/\tau} \left\{ \frac{\tau^2}{\kappa a} - K_1 \left( \frac{\kappa a}{\tau^2} \right) \right\} \right. \\
& \quad \left. - \frac{\tau^2}{\kappa a} \{ e^{-\kappa(1+\xi)/\tau + \kappa a/\tau^2} - 1 \} \right] \frac{d\tau}{\sqrt{\tau^2+1}} \\
& \quad + \frac{4\alpha}{\pi} \int_0^{a/(1+\xi)} \frac{\tau^2}{\kappa a} \{ e^{-\kappa(1+\xi)/\tau} - 1 \} \frac{d\tau}{\sqrt{\tau^2+1}} \\
& \quad + \frac{8\alpha}{\pi} \left\{ \int_0^1 \frac{\cos \kappa\lambda(1+\xi)}{\lambda\sqrt{1-\lambda^2}} P(a\kappa\lambda^2) d\lambda \right. \\
& \quad \left. + \int_1^{\infty} \frac{\sin \kappa\lambda(1+\xi)}{\lambda\sqrt{\lambda^2-1}} P(a\kappa\lambda^2) d\lambda \right\} \quad (23)
\end{aligned}$$

但し,  $P(x)$  は次のような関数である。

$$P(x) = (1-e^{-x}) \left\{ \frac{1}{x} - K_1(x) \right\} \quad (24)$$

船全体に働く,  $\phi_w$  による全 side force を  $F_w$  とすると, 無次元 side force  $C_{SLw}$  は次のようになる。

$$C_{SLw} = F_w \left/ \frac{1}{2} \rho U^2 L T \right.$$

$$\begin{aligned}
&= \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} f_w(x) dx \right\} \left/ \frac{1}{2} \rho U^2 L T \right. \\
&= \frac{1}{2} \int_{-1}^1 C_{St}(\xi) d\xi \\
&= -\frac{\alpha}{\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} d\tau \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\tau e^{i2\nu r} (1-e^{iav})}{\sqrt{\tau^2+1}(\nu\tau^2+i\kappa)} \left\{ \frac{i}{av} \right. \\
& \quad \left. + \frac{\pi}{2} H_1^{(1)}(av) \right\} dv \\
& \quad + \frac{4\alpha}{\pi} \int_0^{\kappa} \frac{\sin 2u}{u^2\sqrt{1-u^2/\kappa^2}} (1-e^{-au^2/\kappa}) \left\{ \frac{\kappa}{au^2} \right. \\
& \quad \left. - K_1 \left( \frac{au^2}{\kappa} \right) \right\} du \\
& \quad + \frac{4\alpha}{\pi} \int_{\kappa}^{\infty} \frac{1-\cos 2u}{u^2\sqrt{u^2/\kappa^2-1}} (1-e^{-au^2/\kappa}) \left\{ \frac{\kappa}{au^2} \right. \\
& \quad \left. - K_1 \left( \frac{au^2}{\kappa} \right) \right\} du \\
&= \frac{2\alpha}{\pi\kappa} \int_a^{\infty} \left\{ \frac{\tau^2}{\kappa a} \right. \\
& \quad \left. - K_1 \left( \frac{\kappa a}{\tau^2} \right) \right\} e^{-2\kappa/\tau} (e^{\kappa a/\tau^2} - 1) \frac{\tau d\tau}{\sqrt{\tau^2+1}} \\
& \quad + \frac{2\alpha}{\pi\kappa} \int_{a/2}^a \left[ \frac{\tau^2}{\kappa a} \right. \\
& \quad \left. - K_1 \left( \frac{\kappa a}{\tau^2} \right) \right] (e^{-\kappa a/\tau^2} - e^{-2\kappa/\tau}) \\
& \quad - \frac{\tau^2}{\kappa a} (e^{-\kappa a/\tau^2} - e^{-2\kappa/\tau + \kappa a/\tau^2}) \\
& \quad \left. + \frac{2\tau}{a} - 2 \right] \frac{\tau d\tau}{\sqrt{\tau^2+1}} \\
& \quad + \frac{2\alpha}{\pi\kappa} \int_0^{a/2} \left\{ \frac{\tau^2}{\kappa a} (1-e^{-2\kappa/\tau}) - \frac{2\tau}{a} \right\} \frac{\tau d\tau}{\sqrt{\tau^2+1}} \\
& \quad + \frac{4\alpha}{\pi\kappa} \int_1^{\infty} \frac{P(a\kappa\lambda^2)}{\lambda^2\sqrt{\lambda^2-1}} d\lambda \\
& \quad + \frac{4\alpha}{\pi\kappa} \left\{ \int_0^1 \frac{\sin 2\kappa\lambda}{\lambda^2\sqrt{1-\lambda^2}} P(a\kappa\lambda^2) d\lambda \right. \\
& \quad \left. - \int_1^{\infty} \frac{\cos 2\kappa\lambda}{\lambda^2\sqrt{\lambda^2-1}} P(a\kappa\lambda^2) d\lambda \right\} \quad (25)
\end{aligned}$$

同様に, 無次元 yaw moment  $C_{SMw}$  は,  $\phi_w$  による yaw moment を  $M_w$  とすると次のようになる。

$$\begin{aligned}
C_{SMw} &= M_w \left/ \frac{1}{2} \rho U^2 L^2 T \right. \\
&= \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} f_w(x) x dx \right\} \left/ \frac{1}{2} \rho U^2 L^2 T \right. \\
&= \frac{1}{4} \int_{-1}^1 C_{St}(\xi) \xi d\xi \\
&= -\frac{\alpha}{2\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} d\tau \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1-e^{iav}}{\sqrt{\tau^2+1}(\nu\tau^2+i\kappa)} \left\{ \tau e^{i2\nu r} \right. \\
& \quad \left. + \frac{i}{\nu} (1+e^{i2\nu r}) \right\} \left\{ \frac{i}{av} + \frac{\pi}{2} H_1^{(1)}(av) \right\} dv
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{2\alpha}{\pi} \int_0^{\kappa} \frac{1-e^{-au^2/\kappa}}{u^2\sqrt{1-u^2/\kappa^2}} \left( \sin 2u \right. \\
 & + \left. \frac{\cos 2u-1}{u} \right) \left\{ \frac{\kappa}{au^2} - K_1 \left( \frac{au^2}{\kappa} \right) \right\} du \\
 & + \frac{2\alpha}{\pi} \int_{\kappa}^{\infty} \frac{1-e^{-au^2/\kappa}}{u^2\sqrt{u^2/\kappa^2-1}} \left( -\cos 2u-1 \right. \\
 & + \left. \frac{\sin 2u}{u} \right) \left\{ \frac{\kappa}{au^2} - K_1 \left( \frac{au^2}{\kappa} \right) \right\} du \\
 = & \frac{\alpha}{\pi} \int_a^{\infty} \left[ \left\{ \frac{a}{\kappa} + \frac{\tau^2}{\kappa^2} (e^{-\kappa a/\tau^2}) - 1 \right\} \right. \\
 & - \left. \frac{\tau}{\kappa} \left\{ \frac{\tau^2}{\kappa a} - K_1 \left( \frac{\kappa a}{\tau^2} \right) \right\} \right] \left\{ (e^{-2\kappa/\tau} \right. \\
 & - \left. e^{-2\kappa/\tau + \kappa a/\tau^2}) \left( 1 + \frac{\tau}{\kappa} \right) \right. \\
 & + \left. \frac{a}{\tau} e^{-\kappa a/\tau^2} \right\} \frac{d\tau}{\sqrt{\tau^2+1}} \\
 & + \frac{\alpha}{\pi} \int_{a/2}^a \left[ \frac{\tau^3}{\kappa^2 a} \left\{ -e^{-\kappa a/\tau^2} \left( \frac{a}{\tau} + \frac{\tau}{\kappa} - 1 \right) \right. \right. \\
 & + \left. \left. e^{-2\kappa/\tau + \kappa a/\tau^2} \left( 1 + \frac{\tau}{\kappa} \right) \right. \right. \\
 & + \left. \left. \left( -\frac{a}{\tau} + \frac{2\kappa a}{\tau^2} - \frac{\kappa a^2}{\tau^3} \right) \right\} \right. \\
 & - \left. \frac{\tau}{\kappa} \left\{ \frac{\tau^2}{\kappa a} - K_1 \left( \frac{\kappa a}{\tau^2} \right) \right\} \right] \left\{ e^{-2\kappa/\tau} \left( 1 + \frac{\tau}{\kappa} \right) \right. \\
 & - \left. e^{-\kappa a/\tau^2} \left( \frac{a}{\tau} + \frac{\tau}{\kappa} - 1 \right) \right\} \frac{d\tau}{\sqrt{\tau^2+1}} \\
 & + \frac{\alpha}{\pi} \int_0^{a/2} \frac{\tau^3}{\kappa^2 a} \left\{ -e^{-2\kappa/\tau} \left( 1 + \frac{\tau}{\kappa} \right) \right. \\
 & + \left. \frac{\tau}{\kappa} - 1 \right\} \frac{d\tau}{\sqrt{\tau^2+1}} \\
 & - \frac{2\alpha}{\pi\kappa} \int_1^{\infty} \frac{P(a\kappa\lambda^2)}{\lambda^2\sqrt{\lambda^2-1}} d\lambda - \frac{2\alpha}{\pi\kappa^2} \int_0^1 \frac{P(a\kappa\lambda^2)}{\lambda^3\sqrt{1-\lambda^2}} d\lambda \\
 & + \frac{2\alpha}{\pi\kappa} \left\{ \int_0^1 \frac{\sin 2\kappa\lambda}{\lambda^2\sqrt{1-\lambda^2}} P(a\kappa\lambda^2) d\lambda \right. \\
 & - \left. \int_1^{\infty} \frac{\cos 2\kappa\lambda}{\lambda^2\sqrt{\lambda^2-1}} P(a\kappa\lambda^2) d\lambda \right\} \\
 & + \frac{2\alpha}{\pi\kappa^2} \left\{ \int_0^1 \frac{\cos 2\kappa\lambda}{\lambda^3\sqrt{1-\lambda^2}} P(a\kappa\lambda^2) d\lambda \right. \\
 & + \left. \int_1^{\infty} \frac{\sin 2\kappa\lambda}{\lambda^3\sqrt{\lambda^2-1}} P(a\kappa\lambda^2) d\lambda \right\} \quad (26)
 \end{aligned}$$

以上より、斜航時の船体に働く side force と yaw moment の無次元値は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned}
 C_{SL} &= F \left/ \frac{1}{2} \rho U^2 L T \right. = C_{SL0} + C_{SLw} \\
 C_{SM} &= M \left/ \frac{1}{2} \rho U^2 L T \right. = C_{SM0} + C_{SMw} \\
 F &= \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-T}^0 (p_+ - p_-) dz dx
 \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

(418)

$$M = \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-T}^0 (p_+ - p_-) x dz dx \quad \Bigg]$$

$C_{SLw}$ ,  $C_{SMw}$  は (25), (26) 式で与えられており、 $C_{SL0}$ ,  $C_{SM0}$  は無限流体中の double model  $\phi_0$  によるもので、細長翼の仮定により、

$$C_{SL0} = \frac{\pi}{2} a\alpha, C_{SM0} = -\frac{\pi}{4} a\alpha \quad (28)$$

とする。

図-3, 4, 5 に  $C_{Sl}(\xi)$ ,  $C_{SL}/C_{SL0}$ ,  $C_{SM}/C_{SM0}$  の計算結果を示す。

(25), (26) 式で、 $\kappa$  が大きいとして高次の項をおとし、被積分関数が激しく振動する項には stationary

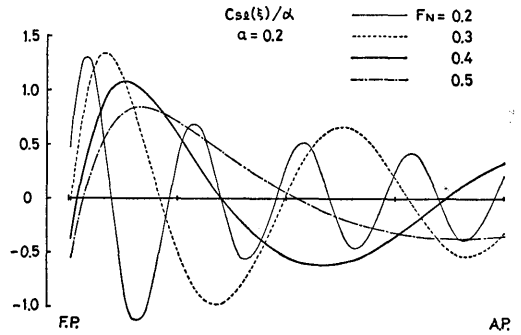


図-3 Side force 分布 (斜航)

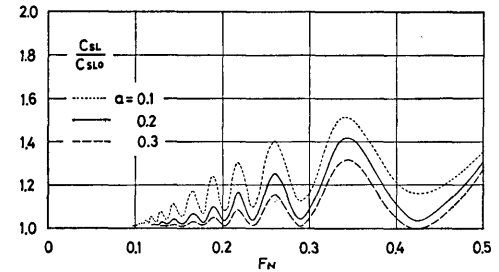


図-4 Side force (斜航)

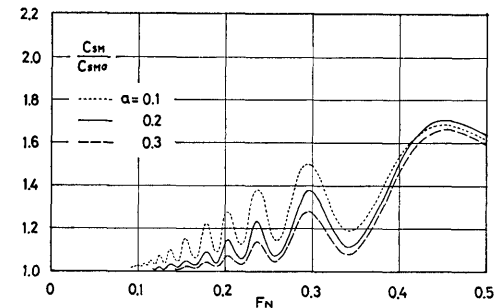


図-5 Yaw moment (斜航)

phase method を用いると，次式が得られる。

$$\begin{aligned}
C_{SLW} &\doteq \frac{2\alpha}{\pi\kappa} \int_a^\infty \left\{ \frac{\tau^2}{\kappa a} \right. \\
&\quad - K_1 \left( \frac{\kappa a}{\tau^2} \right) \left. \right\} e^{-2\kappa/\tau} (e^{\kappa a/\tau^2} - 1) \frac{\tau d\tau}{\sqrt{\tau^2 + 1}} \\
&\quad + \frac{2\alpha}{\pi\kappa} \left\{ -\sqrt{1+a^2} + \sqrt{1+\left(\frac{a}{2}\right)^2} \right. \\
&\quad - \frac{1}{a} \ln |a + \sqrt{1+a^2}| + \frac{2}{a} \ln \left| \frac{a}{2} \right. \\
&\quad + \left. \sqrt{1+\left(\frac{a}{2}\right)^2} \right\} + \frac{4\alpha}{\pi\kappa} \int_1^\infty \frac{P(a\kappa\lambda^2)}{\lambda^2\sqrt{\lambda^2-1}} d\lambda \\
&\quad + \frac{4\alpha}{\kappa\sqrt{\pi\kappa}} P(a\kappa) \sin\left(2\kappa - \frac{\pi}{4}\right) \quad (29) \\
C_{SMW} &\doteq \frac{\alpha}{\pi} \int_a^\infty \left[ \left\{ \frac{a}{\kappa} + \frac{\tau^2}{\kappa^2} (e^{-\kappa a/\tau^2} - 1) \right\} - \frac{\tau}{\kappa} \left\{ \frac{\tau^2}{\kappa a} \right. \right. \\
&\quad - K_1 \left( \frac{\kappa a}{\tau^2} \right) \left. \right\} \left\{ (e^{-2\kappa/\tau} - e^{-2\kappa/\tau + \kappa a/\tau^2}) \left( 1 + \frac{\tau}{\kappa} \right) \right. \\
&\quad + \left. \frac{a}{\tau} e^{-\kappa a/\tau^2} \right\} \frac{d\tau}{\sqrt{\tau^2 + 1}} + \frac{2\alpha}{\pi\kappa} \left\{ \sqrt{1+a^2} \right. \\
&\quad - \left. \sqrt{1+\left(\frac{a}{2}\right)^2} - \frac{a}{2} \ln |a + \sqrt{1+a^2}| \right. \\
&\quad + \left. \frac{a}{2} \ln \left| \frac{a}{2} + \sqrt{1+\left(\frac{a}{2}\right)^2} \right| \right\} \\
&\quad - \frac{2\alpha}{\pi\kappa} \int_1^\infty \frac{P(a\kappa\lambda^2)}{\lambda^2\sqrt{\lambda^2-1}} d\lambda - \frac{2\alpha}{\pi\kappa^2} \int_0^1 \frac{P(a\kappa\lambda^2)}{\lambda^3\sqrt{1-\lambda^2}} d\lambda \\
&\quad + \frac{2\alpha}{\kappa\sqrt{\pi\kappa}} P(a\kappa) \sin\left(2\kappa - \frac{\pi}{4}\right) \\
&\quad + \frac{2\alpha}{\kappa^2\sqrt{\pi\kappa}} P(a\kappa) \sin\left(2\kappa + \frac{\pi}{4}\right) \quad (30)
\end{aligned}$$

本方法程度の近似計算では， $F_N=0.4$  程度までは，(29)，(30) 式で充分であろう。

## 6. 定常旋回の場合

旋回の場合は，(21) 式の  $V(x, z)$  を (16) 式に代入し， $\xi'$ ， $\zeta'$  について斜航の場合と同様な方法で積分を行う。

$$\begin{aligned}
\phi(\xi, \zeta) &= \phi_0 \\
&\quad + \frac{2a\omega}{\pi^2} \int_0^\infty d\tau \int_{-\infty}^\infty \frac{v^2\tau^3 e^{-i\nu a\zeta}}{\sqrt{\tau^2+1}(\nu\tau^2+i\kappa)} \left\{ \frac{i}{av} \right. \\
&\quad + \left. \frac{\pi}{2} H_1^{(1)}(av) \right\} \left[ \frac{1}{v\tau} \cos v\tau(1+\xi) \right. \\
&\quad + \left. \frac{1}{v^2\tau^2} (\sin v\tau(\xi-1) - \sin v\tau(\xi+1)) \right] dv \\
&\quad - \frac{4a\omega}{\pi\kappa} \int_0^\kappa \frac{1}{\sqrt{1-u^2/\kappa^2}} \left\{ \frac{\kappa}{au^2} \right. \\
&\quad - \left. K_1 \left( \frac{au^2}{\kappa} \right) \right\} e^{\zeta au^2/\kappa} \{ u \cos u(\xi+1)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\quad + \sin u(\xi-1) - \sin u(\xi+1) \} du \\
&\quad + \frac{4a\omega}{\pi\kappa} \int_\kappa^\infty \frac{1}{\sqrt{u^2/\kappa^2-1}} \left\{ \frac{\kappa}{au^2} \right. \\
&\quad - \left. K_1 \left( \frac{au^2}{\kappa} \right) \right\} e^{\zeta au^2/\kappa} \{ -u \sin u(\xi+1) \\
&\quad + \cos u(\xi-1) - \cos u(\xi+1) \} du \\
&= \phi_0 - \frac{\omega}{2\alpha} \phi_{SW} \\
&\quad + \frac{2a\omega}{\pi^2} \int_0^\infty d\tau \int_{-\infty}^\infty \frac{\tau e^{-i\nu a\zeta}}{\sqrt{\tau^2+1}(\nu\tau^2+i\kappa)} \left\{ \frac{i}{av} \right. \\
&\quad + \left. \frac{\pi}{2} H_1^{(1)}(av) \right\} \{ \sin v\tau(\xi-1) \\
&\quad - \sin v\tau(\xi+1) \} dv \\
&\quad - \frac{4a\omega}{\pi\kappa} \int_0^\kappa \frac{1}{\sqrt{1-u^2/\kappa^2}} \{ \sin u(\xi-1) \\
&\quad - \sin u(\xi+1) \} \left\{ \frac{\kappa}{au^2} - K_1 \left( \frac{au^2}{\kappa} \right) \right\} e^{\zeta au^2/\kappa} du \\
&\quad + \frac{4a\omega}{\pi\kappa} \int_\kappa^\infty \frac{1}{\sqrt{u^2/\kappa^2-1}} \{ \cos u(\xi-1) \\
&\quad - \cos u(\xi+1) \} \left\{ \frac{\kappa}{au^2} - K_1 \left( \frac{au^2}{\kappa} \right) \right\} e^{\zeta au^2/\kappa} du \\
&= \phi_0 - \frac{\omega}{2\alpha} \phi_{SW} \\
&\quad - \frac{4\omega}{\pi\kappa} \int_0^{a/(1-\xi)} \left[ \frac{\tau^2}{\kappa a} \{ e^{-\kappa(1-\xi)/\tau} - 1 \} \right. \\
&\quad + \left. \frac{\tau}{a} (1-\xi) \right] \frac{\tau d\tau}{\sqrt{\tau^2+1}} \\
&\quad - \frac{4\omega}{\pi\kappa} \int_{a/(1-\xi)}^{2a/(1-\xi)} \left[ e^{-\kappa(1-\xi)/\tau} \left\{ \frac{\tau^2}{\kappa a} - K_1 \left( \frac{\kappa a}{\tau^2} \right) \right\} \right. \\
&\quad + \left. \frac{\tau^2}{\kappa a} \{ 1 - e^{-\kappa(1-\xi)/\tau + \kappa a/\tau^2} \} \right. \\
&\quad + \left. 1 - \frac{\tau}{a} (1-\xi) \right] \frac{\tau d\tau}{\sqrt{\tau^2+1}} \\
&\quad - \frac{4\omega}{\pi\kappa} \int_{2a/(1-\xi)}^\infty e^{-\kappa(1-\xi)/\tau} (1 - e^{\kappa a/\tau^2}) \left\{ \frac{\tau^2}{\kappa a} \right. \\
&\quad - \left. K_1 \left( \frac{\kappa a}{\tau^2} \right) \right\} \frac{\tau d\tau}{\sqrt{\tau^2+1}} \\
&\quad - \frac{4\omega}{\pi} \left\{ \int_0^1 \frac{\cos \kappa\lambda(1+\xi)}{\lambda\sqrt{1-\lambda^2}} P(a\kappa\lambda^2) d\lambda \right. \\
&\quad + \left. \int_1^\infty \frac{\sin \kappa\lambda(1+\xi)}{\lambda\sqrt{\lambda^2-1}} P(a\kappa\lambda^2) d\lambda \right\} \\
&\quad + \frac{4\omega}{\pi\kappa} \left\{ \int_0^1 \frac{P(a\kappa\lambda^2)}{\lambda^2\sqrt{1-\lambda^2}} \cos(\kappa\lambda\xi) \sin(\kappa\lambda) d\lambda \right. \\
&\quad + \left. \int_1^\infty \frac{P(a\kappa\lambda^2)}{\lambda^2\sqrt{\lambda^2-1}} \sin(\kappa\lambda\xi) \sin(\kappa\lambda) d\lambda \right\} \quad (31)
\end{aligned}$$

但し， $\omega = L\dot{\alpha}/U$

上式右辺第1項  $\phi_0$  は，無限流体中における double model による項，第2項  $\phi_{SW}$  は斜航時の  $\phi_w$  ((22) 式

の右辺第2項以下) に等しい。

船長方向の side force 内布  $C_{Ti}(\xi)$  は, 斜航の場合と同様にして, 次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
C_{Ti}(\xi) &= \int_{-1}^0 \phi_w(\xi, \zeta) d\zeta \\
&= -\frac{\omega}{2a} \int_{-1}^0 \phi_{sw}(\xi, \zeta) d\zeta \\
&\quad - \frac{2\omega}{\pi^2} \int_0^\infty \frac{\tau d\tau}{\sqrt{\tau^2+1}} \int_{-\infty}^\infty \frac{i(1-e^{i\tau a})}{v(\tau^2+i\kappa)} \left\{ \frac{i}{av} \right. \\
&\quad \left. + \frac{\pi}{2} H_1^{(1)}(av) \right\} \{ \sin v\tau(1-\xi) \\
&\quad + \sin v\tau(1+\xi) \} dv \\
&\quad + \frac{4\omega}{\pi} \int_0^\kappa \frac{1-e^{-au^2/\kappa}}{u^2\sqrt{1-u^2/\kappa^2}} \left\{ \frac{\kappa}{au^2} \right. \\
&\quad \left. - K_1\left(\frac{au^2}{\kappa}\right) \right\} \{ \sin u(1-\xi) + \sin u(1+\xi) \} du \\
&\quad + \frac{4\omega}{\pi} \int_\kappa^\infty \frac{1-e^{-au^2/\kappa}}{u^2\sqrt{u^2/\kappa^2-1}} \left\{ \frac{\kappa}{au^2} \right. \\
&\quad \left. - K_1\left(\frac{au^2}{\kappa}\right) \right\} \{ \cos u(1-\xi) - \cos u(1+\xi) \} du \\
&= -\frac{\omega}{2\alpha} C_{Si}(\xi) \\
&\quad - \frac{4\omega}{\pi\kappa} \int_0^{a/(1-\xi)} \left[ \frac{\tau^2}{\kappa a} \{ e^{-\kappa(1-\xi)/\tau} - 1 \} \right. \\
&\quad \left. + \frac{\tau}{a}(1-\xi) \right] \frac{\tau d\tau}{\sqrt{\tau^2+1}} \\
&\quad - \frac{4\omega}{\pi\kappa} \int_{a/(1-\xi)}^{2a/(1-\xi)} \left[ e^{-\kappa(1-\xi)/\tau} \left\{ \frac{\tau^2}{\kappa a} - K_1\left(\frac{\kappa a}{\tau^2}\right) \right\} \right. \\
&\quad \left. + \frac{\tau^2}{\kappa a} \{ 1 - e^{-\kappa(1-\xi)/\tau + \kappa a/\tau^2} \} \right. \\
&\quad \left. + 1 - \frac{\tau}{a}(1-\xi) \right] \frac{\tau d\tau}{\sqrt{\tau^2+1}} \\
&\quad - \frac{4\omega}{\pi\kappa} \int_{2a/(1-\xi)}^\infty e^{-\kappa(1-\xi)/\tau} (1 - e^{\kappa a/\tau^2}) \left\{ \frac{\tau^2}{\kappa a} \right. \\
&\quad \left. - K_1\left(\frac{\kappa a}{\tau^2}\right) \right\} \frac{\tau d\tau}{\sqrt{\tau^2+1}} \\
&\quad + \frac{4\omega}{\pi\kappa} \left\{ \int_0^1 \frac{P(a\kappa\lambda^2)}{\lambda^2\sqrt{1-\lambda^2}} \cos(\kappa\lambda\xi) \sin(\kappa\lambda) d\lambda \right. \\
&\quad \left. + \int_1^\infty \frac{P(a\kappa\lambda^2)}{\lambda^2\sqrt{\lambda^2-1}} \sin(\kappa\lambda\xi) \sin(\kappa\lambda) d\lambda \right\} \quad (32)
\end{aligned}$$

船全体に働く, 旋回時の  $\phi_w$  による全 side force を  $F_w$  とすると, 無次元 side force  $C_{TLw}$  は次のようになる。

$$\begin{aligned}
C_{TLw} &= F_w \left/ \frac{1}{2} \rho U^2 L T \right. = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 C_{Ti}(\xi) d\xi \\
&= -\frac{\omega}{2\alpha} C_{SLw}
\end{aligned}$$

(420)

$$\begin{aligned}
&+ \frac{2\omega}{\pi\kappa} \int_0^{a/2} \left[ \frac{\tau^2}{\kappa a} \left\{ 2 - \frac{\tau}{\kappa} (1 - e^{-2\kappa/\tau}) \right\} \right. \\
&- \frac{2\tau}{a} \left. \right] \frac{\tau d\tau}{\sqrt{\tau^2+1}} + \frac{2\omega}{\pi\kappa} \int_{a/2}^a \left[ \frac{\tau^2}{\kappa a} \right. \\
&- K_1\left(\frac{\kappa a}{\tau^2}\right) \left. \right] \frac{\tau}{\kappa} (e^{-2\kappa/\tau} - e^{-\kappa a/\tau^2}) \\
&+ \frac{\tau^2}{\kappa a} \left\{ \frac{\tau}{\kappa} e^{-\kappa a/\tau^2} - e^{\kappa a/\tau^2 - 2\kappa/\tau} \right\} + \frac{2a}{\tau} - 2 \left. \right\} \\
&+ \frac{2\tau}{a} - 2 \left. \right] \frac{\tau d\tau}{\sqrt{\tau^2+1}} + \frac{2\omega}{\pi\kappa} \int_a^\infty \left\{ \frac{\tau^2}{\kappa a} \right. \\
&- K_1\left(\frac{\kappa a}{\tau^2}\right) \left. \right\} \frac{\tau}{\kappa} e^{-2\kappa/\tau} (1 - e^{\kappa a/\tau^2}) \frac{\tau d\tau}{\sqrt{\tau^2+1}} \\
&+ \frac{4\omega}{\pi\kappa^2} \int_0^1 \frac{P(a\kappa\lambda^2)}{\lambda^3\sqrt{1-\lambda^2}} d\lambda \\
&- \frac{4\omega}{\pi\kappa^2} \int_0^1 \frac{\cos 2\kappa\lambda}{\lambda^3\sqrt{1-\lambda^2}} P(a\kappa\lambda^2) d\lambda \quad (33)
\end{aligned}$$

同様にして,  $\phi_w$  による yaw moment を  $M_w$  とすると, 無次元 yaw moment  $C_{TMw}$  は次のようになる。

$$\begin{aligned}
C_{TMw} &= M_w \left/ \frac{1}{2} \rho U^2 L^2 T \right. = \frac{1}{4} \int_{-1}^1 C_{Ti}(\xi) \xi d\xi \\
&= -\frac{\omega}{2\alpha} C_{SMw} + \frac{2\omega}{\pi\kappa^3} \int_1^\infty \frac{P(a\kappa\lambda^2)}{\lambda^4\sqrt{\lambda^2-1}} d\lambda \\
&\quad - \frac{2\omega}{\pi\kappa^2} \int_1^\infty \frac{\sin 2\kappa\lambda}{\lambda^3\sqrt{\lambda^2-1}} P(a\kappa\lambda^2) d\lambda \\
&\quad - \frac{2\omega}{\pi\kappa^3} \int_1^\infty \frac{\cos 2\kappa\lambda}{\lambda^4\sqrt{\lambda^2-1}} P(a\kappa\lambda^2) d\lambda \quad (34)
\end{aligned}$$

Double model  $\phi_0$  による無次元の side force  $C_{TL0}$  と yaw moment  $C_{TM0}$  は, 細長翼の仮定により次のように与えられる。

$$C_{TL0} = \frac{\pi}{4} a\omega, \quad C_{TM0} = \frac{\pi}{8} a\omega \quad (35)$$

以上により, 旋回中の船体に働く side force と yaw moment の無次元値は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned}
C_{TL} &= F \left/ \frac{1}{2} \rho U^2 L T \right. = C_{TL0} + C_{TLw} \\
C_{TM} &= M \left/ \frac{1}{2} \rho U^2 L^2 T \right. = C_{TM0} + C_{TMw} \\
F &= \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-T}^0 (p_+ - p_-) dz dx \\
M &= \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-T}^0 (p_+ - p_-) x dz dx
\end{aligned} \right\} \quad (36)$$

図-6, 7, 8 に  $C_{Ti}(\xi)$ ,  $C_{TL}/C_{TL0}$ ,  $C_{TM}/C_{TM0}$  の計算値を示す。 $F_N=0.4$  程度までの計算には,  $C_{TLw}$  と  $C_{TMw}$  としては次の簡略化した式で充分であろう。

$$C_{TLw} \doteq -\frac{\omega}{2\alpha} C_{SLw} + \frac{2\omega}{\pi\kappa} \int_a^\infty \left\{ \frac{\tau^2}{\kappa a} \right.$$



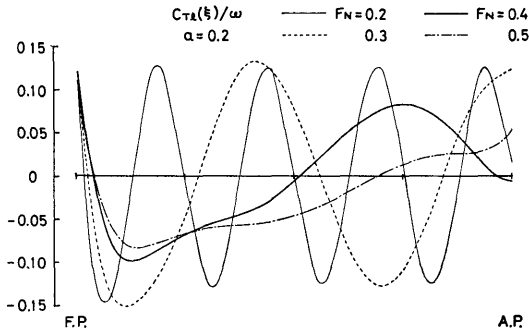


図-6 Side force 分布 (旋回)

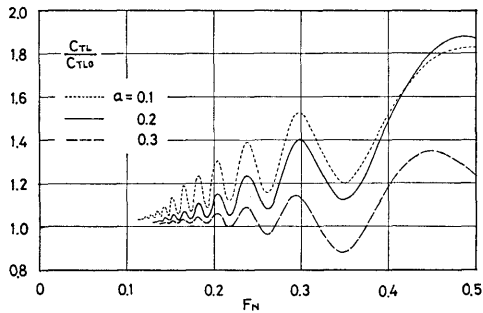


図-7 Side force (旋回)

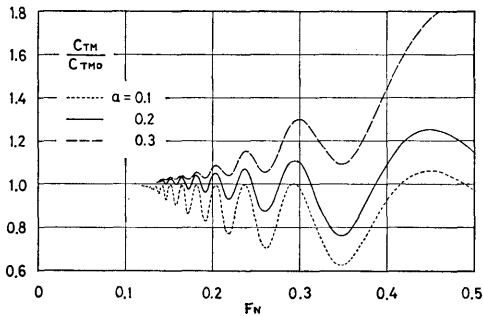


図-8 Yaw moment (旋回)

$$\begin{aligned}
 & -K_1 \left( \frac{\kappa a}{\tau^2} \right) \left\{ \frac{\tau}{\kappa} e^{-2\kappa/\tau} (1 - e^{\kappa a/\tau^2}) \frac{\tau d\tau}{\sqrt{\tau^2 + 1}} \right. \\
 & + \frac{2\omega}{\pi\kappa} \left\{ -\sqrt{1+a^2} + \sqrt{1 + \left(\frac{a}{2}\right)^2} \right. \\
 & - \frac{1}{a} \ln |a + \sqrt{1+a^2}| \\
 & + \left. \frac{2}{a} \ln \left| \frac{a}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{a}{2}\right)^2} \right| \right\} \\
 & + \frac{4\omega}{\pi\kappa^2} \int_0^1 \frac{P(a\kappa\lambda^2)}{\lambda^3\sqrt{1-\lambda^2}} d\lambda
 \end{aligned}$$

$$-\frac{2\omega}{\kappa^2\sqrt{\pi\kappa}} P(a\kappa) \cos\left(2\kappa - \frac{\pi}{4}\right) \quad (37)$$

$$\begin{aligned}
 C_{TM}\omega & \doteq -\frac{\omega}{2a} C_{SM}\omega + \frac{2\omega}{\pi\kappa^3} \int_1^\infty \frac{P(a\kappa\lambda^2)}{\lambda^4\sqrt{\lambda^2-1}} d\lambda \\
 & -\frac{\omega}{\kappa^2\sqrt{\pi\kappa}} P(a\kappa) \left\{ \sin\left(2\kappa + \frac{\pi}{4}\right) \right. \\
 & \left. + \frac{1}{\kappa} \cos\left(2\kappa + \frac{\pi}{4}\right) \right\} \quad (38)
 \end{aligned}$$

7. 模型実験と計算

船研動揺性能試験水槽において、表-1、図-9 に示す模型船を用いて斜航試験を行い、side force と yaw moment を測定した。模型船は2次式の水線と Lewis form 断面を持つ前後対称な船型で、実験は、roll, heave, pitch を固定して行った。図-10, 11 にその結果を示す。本模型船は製作後約 10 年たっており、幾分変形している事も考えられるので、前後に曳航して平均値をとったが、図-10, 11 に見る通り、side force  $F$  も yaw moment  $M$  も迎角  $\alpha$  に対してきれいな対称性を示しておらず、実験点もかなりばらついており、実験精度もあまり良くない事を示しているが、自由表面影響の傾向とそのオーダーをつかむには充分役に立つと思われる。

表-1 数式船型要目

$L_{pp}$	2.0000 m
$B$	0.2000 m
$d$	0.1333 m
$W$	32.0 kg
$C_b$	0.6000
$C_p$	0.6667
$C_{\infty}$	0.9000
$C_w$	0.6000

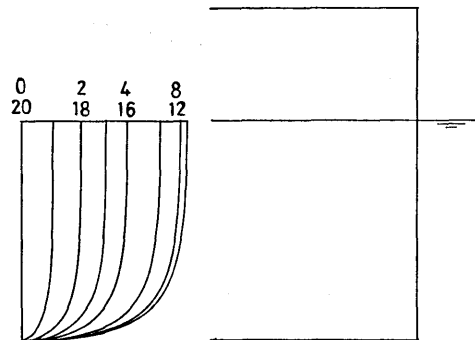


図-9 数式船型

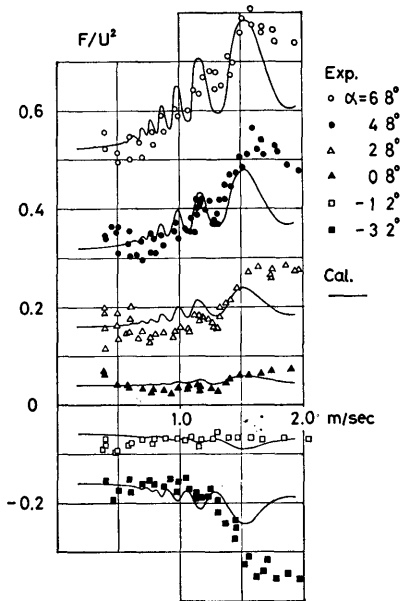


図-10 Side force (数式船型)

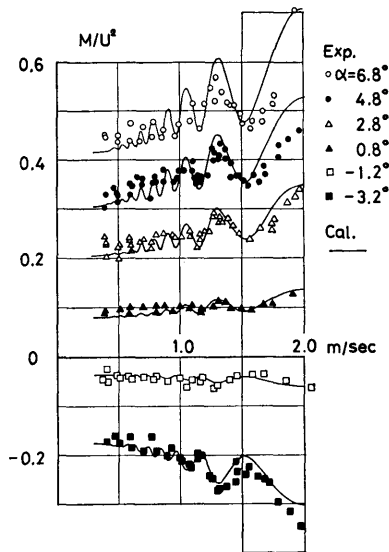


図-11 Yaw moment (数式船型)

表-2 貨物船型要目

$L_{pp}$	4.0000 m
$B$	0.5757 m
$d$	0.2046 m
$W$	288.6 kg
$C_b$	0.6125
$C_p$	0.6246
$C_{\Sigma}$	0.9807
$C_w$	0.7236

つづいて船研中水槽において、表-2、図-12 に示す舵つきプロペラなしの貨物船の模型を用いて斜航試験を行った。本実験では roll, heave, pitch は自由とした。図-13, 14 に side force と yaw moment を、図-15, 16, 17 に実験中の船の姿勢変化を示す。

計算結果は、図-10, 11, 13, 14 中に実線で示している。

数式船型については、 $F_N=0$  における side force  $F/U^2$ , yaw moment  $M/U^2$  の値として実験値から適当な値を取り、これに (27) 式から計算した  $C_{SL}/C_{SL0}$ ,  $C_{SM}/C_{SM0}$  の値をかけて出したもので、side force と moment の速度による増加のオーダー、及び、大きな hump, hollow の位置については大体合っているようである。

貨物船の場合は、姿勢変化を起しているのので、姿勢変化の修正を含めて、side force  $F$  と yaw moment  $M$  は次式のように表わされると仮定した。

$$\left. \begin{aligned} \frac{F}{F_0} &= \frac{C_{SL}}{C_{SL0}} + F_H \cdot h + F_P \cdot \theta + F_R \cdot \varphi \\ \frac{M}{M_0} &= \frac{C_{SM}}{C_{SM0}} + M_H \cdot h + M_P \cdot \theta + M_R \cdot \varphi \end{aligned} \right\} (39)$$

$h, \theta, \varphi$  は heave, pitch, roll の量で、 $F_H$  と  $M_H$  については、アスペクト比と側面積の変化を考慮して、 $F_H = M_H = -2/T$  とし、 $F_P, F_R, M_P, M_R$  は低速時の実験より求め、速度に関係なく一定と仮定した。

図-13, 14 中の破線が姿勢変化だけを考えた時の値、

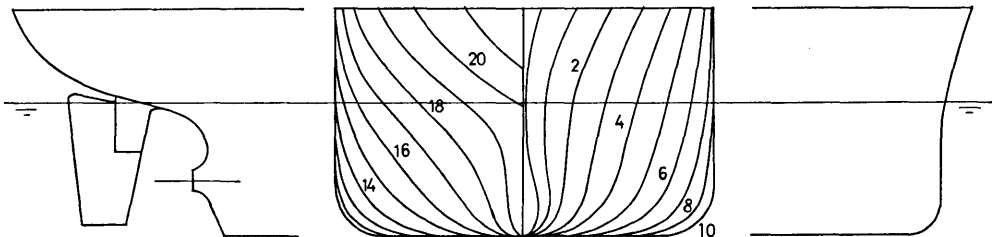


図-12 貨物船型

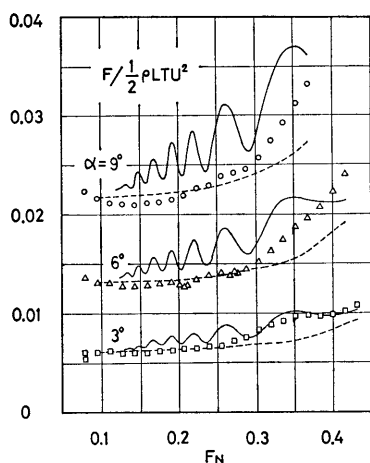


図-13 Side force (貨物船型)

(実線; 姿勢変化と造波の影響を含めた計算値)  
(破線; 姿勢変化だけ考えた時の計算値)

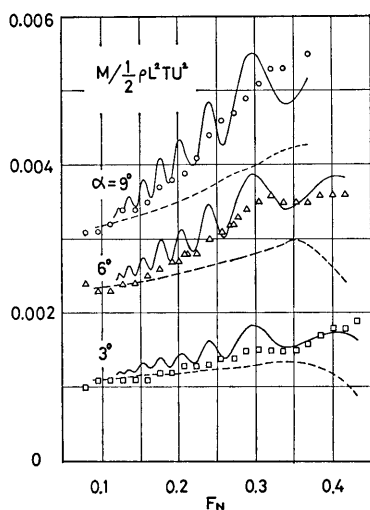


図-14 Yaw moment (貨物船型)

(実線; 姿勢変化と造波の影響を含めた計算値)  
(破線; 姿勢変化だけ考えた時の計算値)

実線が姿勢変化と造波の影響を含めたもので、 $F_0$ 、 $M_0$ の値としては  $V=0.6$  m/sec ( $F_N=0.95$ ) の実験値を用い、これに (39) 式をかけて出している。

実験値は数式船型に比べて殆ど hump-hollow がなくなっており、 $F_N$  の大きいところで僅かにそれらしきものが見える程度である。side force に関しては、 $\beta=3^\circ$  を除いては計算値はかなり大き目に出ている。yaw moment の方は、hump-hollow こそないが、増速

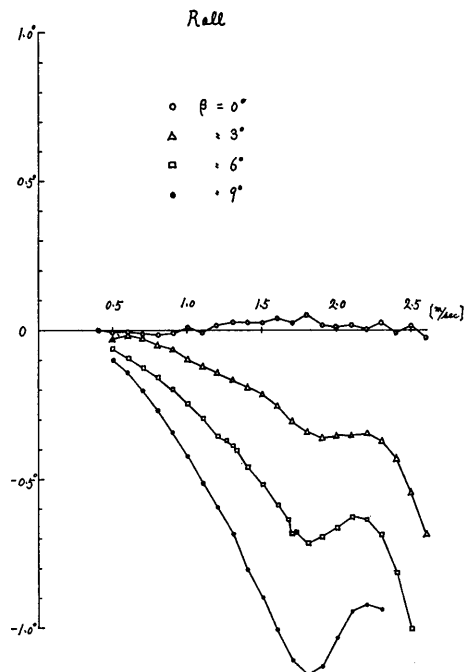


図-15 Roll (貨物船型)

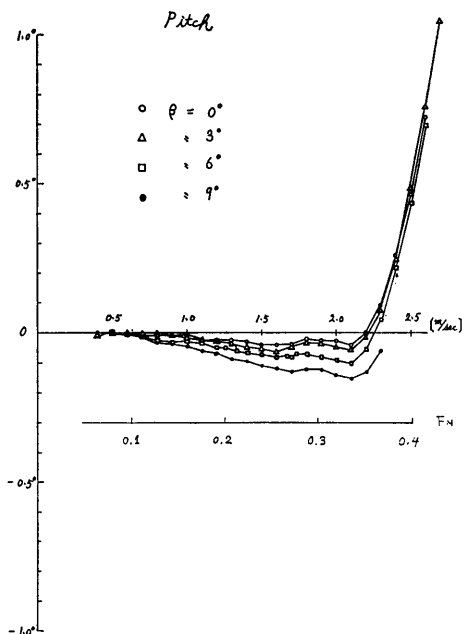


図-16 Pitch (貨物船型)

による増加の割合は大体合っているようである。

旋回に関しては実験は行っていないが、図-4、5、7、8 で見ると、斜航の場合は side force と yaw moment

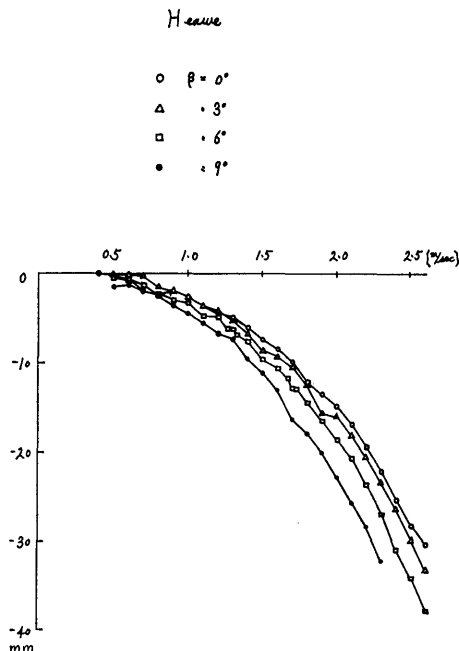


図-17 Heave (貨物船型)

では hump-hollow の位置が逆転しているのに対し、旋回の場合は一致している。これは無限流体中における細長翼の近似揚力分布が、斜航の場合は前縁への集中荷重、旋回の場合は前縁への集中荷重と、翼全長にわたっての反対方向への一様荷重となるからで、これに図-2, 6 の  $\phi_w$  による side force 分布をたし合わせて考えると、hump-hollow の位置の逆転や一致の関係は明らかである。

なお、貨物船の side force に関する実験値 (図-13) で、低速域において、 $\beta=3^\circ$  では殆ど認められず、 $\beta=6^\circ$  では僅かに、 $\beta=9^\circ$  では明らかに速度が増すにつれて side force が減少している。このような低速域では、速度による流体力の性質の変化は常識的には非常に小さいと考えられるし、また、本実験結果は (39) 式で推定される傾向とは逆の傾向を示している。これと似たような現象がタンカー船型についても報告された例<sup>9)</sup>がある。本実験に現われたような低速域における流体力の変化は、どういふ原因によるものなのか、および、このような現象は一般的に起きているものなのかどうかという事は、今後に残された問題の1つで

ある。

## 8. 結 言

自由表面を斜航及び旋回する船について、迎角や旋回角速度は小さく、船体は薄く、生じる波の高さも小さいとし、細長体近似により、造波現象による船長方向への side force 分布、および船全体に働く side force と yaw moment に対し、簡単な近似式を導き出した。

また、数式船型および貨物船型について斜航試験を行い、side force と yaw moment への速度影響を調べ、計算値と実験値の比較を行い、本方法が造波現象による流体力変化の大よその推定に役立つ事を示した。

本方法の特徴は、くり返し計算も連立方程式も必要とせず、積分も簡単な単積分でよいという計算の簡単さにあり、その反面、近似度の粗さのため hump-hollow が大きく出すぎる等の欠点も持つが、自由表面影響の大よそのオーダーと傾向をつかむには便利であろう。

終りに、本研究に対し御指導いただいた前運動性能部長花岡達郎博士 (現鹿児島大学教授)、実験に協力いただいた原口技官、二村技官に感謝いたします。なお、計算は船研中央計算機 TOSBAC 5600 を使用した。

## 参 考 文 献

- 1) 西山哲男; 斜行する没水回転楕円体並に水上船舶の横抵抗について, 造船協会論文集, 第 85 号 (1952)
- 2) T. Hanaoka; Non-Uniform Theory of Wave Making on Low Aspect Lifting Surface, Proceedings of the 10th Japan National Congress for Appl. Mech., (1960)  
花岡達郎; 反対称運動する船の流体力学, 第 20 回運研研究発表会講演概要, (1960)
- 3) P. N. Hu; Forward Speed Effect on Lateral Stability derivatives of a Ship, Davidson Laboratory, Report 829, (1961)
- 4) R. B. Chapman; Free-Surface Effects for Yawed Surface-Piercing Plates, Journal of Ship Research, Vol. 20, No. 3, (1926)
- 5) 野中晃二; 斜航する船体に働く横力への自由表面影響, 造船学会論文集, 第 138 号, (1975)
- 6) 第 175 研究部会; 加減速時における操船性能に関する研究報告書, 造船研究協会研究資料, No. 330 昭和 55 年