

(昭和 36 年 11 月造船協会秋季講演会において講演)

水中翼船の静的横復元力を求める方法

正員 西山 哲 男*

Method for Estimating the Lateral Statical Stability of
Hydrofoil Craft of Surface Piercing Type

By Tetsuo Nishiyama, *Member*

Summary

This paper is aimed to refine the former theory of the lateral statical stability in foil borne condition and, at the same time, establish a estimating method for the metacentric height of hydrofoil craft of surface piercing type.

Present theoretical method takes into account the following points

- (1) the effect of the geometrical form of span of the hydrofoil
- (2) the effect of the free water surface
- (3) the effect of the angular velocity of roll and side slip velocity

which have been unduly neglected in the former theory.

1 緒 言

水中翼船の静的横復元力は Horn¹⁾ により始めて取扱われて以来, Witt²⁾, Presia³⁾ もそれぞれ異なつた立場よりこの問題を攻究し, この分野では可なりの成果が収められている。

元来, 水中翼船は翼に働く揚力によつて浮揚離水するのであるから, その静的復元力の取扱いの正確さは, 専ら水中翼に働く揚力自体の算定いかに, その精度が支配されると言つても過言ではないであらう。かような立場に立つて既存研究を検討した結果, 総合的に次の点

- (i) 特定の循環分布を予め想定するに止り, 実際の水中翼の翼幅形状と循環分布との対応性には, なんら言及していない。
- (ii) 水面の存在を全く無視するかまたは単に実験的係数を導入するかの程度で止っているために, 水面の影響による循環分布の局所的修正ができない。
- (iii) 横動揺角速度および横迂りによる有効迎角の変動に伴う揚力の変化を全く無視している。

において, なお改善ないし再考の余地を残しており, ここに静的安定論の精密化の必要性が痛感されるゆえんである。

本研究では, 上反角の大なる水中翼の特性を求めるのに Glauert の解法⁴⁾ を拡張し, 水面の影響による循環修正に対しては著者の方法⁵⁾ を採用することにより (i)(ii) を解決して, 任意翼幅形状の水中翼の循環分布を正しく求めることに意を払つた。さらに航空力字で採用される “Strip method”⁷⁾ を適用することにより (iii) を考慮し, 同時に全体としては数値計算の簡易化による実用性を持たせることを意図した。

2 上反角を持つ水中翼の無限遠流体中での特性

上反角が大であることが水中翼の特長の一つであるが, この場合の特性計算法は未だ公表されておらぬ。以下では Glauert の平面翼の解法⁴⁾ を拡張することを試みてある。

まず, 水中翼が水面を貫通する点の取扱いが問題となる。Weinig⁴⁾, Presia³⁾ 等は水面貫通点で水中翼の循環が有限であるとしている。水面の貫通点が厳密には翼端ではないので, 有限であることは首肯できるが, その

原稿受付 昭和 36 年 6 月 20 日

* 東北大学工学部

量的算定に関しては有効縦横比が予め知れない限り、できないものと思われる。

本方法では、計算の簡易化と水面の貫通点での有限循環を無視することは、安定計算上安全側になることでもあるので、水面の貫通点を翼端とみなし、ここで循環は零となると考えることにした。従つて、水中翼の縦横比は必然的に決まってくる。

翼幅形状を次式

$$\mu = \mu_0(1 \pm \lambda' \cos \varphi); \quad +\cdots 0 \leq \varphi \leq \pi/2 \quad (1)$$

$$-\cdots \pi/2 \leq \varphi \leq \pi$$

ただし

$$\mu_0 = mc_0/8b, \quad \mu = mc/8b \quad (2)$$

$$\lambda' = \text{Taper 比}, \quad 2b = \text{翼幅}, \quad c = \text{弦長} \quad (3)$$

且つ

$$\eta = -\cos \varphi \quad (4)$$

と置くとき縦横比は

$$\lambda = 4b/(2 + \lambda')c_0 \quad (5)$$

となる。

無限遠流体中の循環分布を

$$\Gamma_\infty = 4Vb\alpha(A_1 \sin \varphi + A_3 \sin 3\varphi + A_5 \sin 5\varphi + A_7 \sin 7\varphi) \quad (6)$$

と置くとき、循環を決める積分方程式から次の関係を得る。

$$\sum A_n \sin n\varphi = \mu \left[1 - \frac{1}{\sin \varphi} \sum n A_n \sin n\varphi - \frac{2}{\pi} \cot \beta \cdot \cos \beta \cdot \frac{A_1 - A_3 + A_5 - A_7}{\cos \varphi} + \frac{1}{\pi} \cot^2 \beta \sum n A_n (P_n - Q_n) \right] \quad (7)$$

$$\text{ただし} \quad \begin{pmatrix} P_0 \\ Q_0 \end{pmatrix} = \mp \frac{1}{\sin \varphi} \log e \left| \frac{1 + \tan \frac{\varphi}{2}}{1 - \tan \frac{\varphi}{2}} \right|$$

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ Q_1 \end{pmatrix} = \frac{\pi}{2} + \begin{pmatrix} P_0 \\ Q_0 \end{pmatrix} \cos \varphi$$

$$\begin{pmatrix} P_{n+1} \\ Q_{n+1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} P_{n-1} \\ Q_{n-1} \end{pmatrix} - 2 \begin{pmatrix} P_n \\ Q_n \end{pmatrix} \cos \varphi \pm 2 \frac{\sin \frac{n\pi}{2}}{n} = 0 \quad (8)$$

且つ 上反角 $= \pi/2 - \beta$

β が $\pi/2$ のときは Glauert の解法⁵⁾ と一致するが、 β のこれ以外の角度では上反角頂点が特異点になっていることに留意する必要がある。すなわち、翼幅中央では上反角が付き、左右両翼の連結部でもあるため、いわゆる翼型としての機能が正常には発揮できないものと考えられるから、選点位置の一つに $\varphi = \pi/2$ を取ることは物理的に余り意味がないように思われる。数値的検討の結果 $\varphi = 105^\circ, 112.5^\circ, 135^\circ, 157.5^\circ$ がほぼ適当と思われる。従つて、これら四選点位置より求めた(7)の四元連立一次方程式から A_n を決定すればよい。

なお、 P_n, Q_n の数値を第一表に括めてある

第1表 P_n, Q_n の値

φ n	105°		112.5°		135°		157.5°	
	P_n	Q_n	P_n	Q_n	P_n	Q_n	P_n	Q_n
1	2.11409	1.02750	2.23970	0.90188	2.45217	0.68942	2.54324	0.59835
3	-1.59892	-0.70088	-0.73480	-0.56649	3.51785	-0.37626	7.89056	-0.30608
5	0.31024	0.53155	-1.71078	0.40949	-3.39457	0.25338	7.38389	0.20062
7	1.26863	-0.42684	3.46036	-0.31877	-2.95217	-0.18942	3.29096	-0.14930

かくして、大なる上反角と任意翼幅形状を持つ水中翼の循環分布を決定できるから、無限遠流体中における水中翼の局所的および全体的揚力係数はそれぞれ次のごとくなる。

$$C_{l\infty} = 2\lambda\alpha \sin \varphi (A_1 \sin \varphi + A_3 \sin 3\varphi + A_5 \sin 5\varphi + A_7 \sin 7\varphi) \quad (9)$$

$$C_{L\infty} = \pi A_1 \lambda \alpha \quad (10)$$

3 水面の存在による局所的循環修正

水中翼船の離水浮揚時は極めて高速 ($V/\sqrt{gc_0} \doteq 6$) であつて、最早や水面は自由境界として働き、実用上重力は全く無視して差し支えない。従つて、既誘導の緒式⁶⁾における $K_0 f \rightarrow 0$ の極限值だけを取扱えばよい。水面の存在による影響を受けた循環分布を

$$\Gamma = 4 V b \alpha (B_1 \sin \varphi + B_3 \sin 3 \varphi + B_5 \sin 5 \varphi + B_7 \sin 7 \varphi) \quad (11)$$

と置くと、次の関係が成立する。

$$\begin{aligned} \Gamma(\eta) = & -\frac{\mu_0}{\pi} (1 + \lambda' \eta) \left[\sin^2 \beta \int_{-1}^1 \Gamma(\eta') k_H(\eta') d\eta' - 2 \sin \beta \cdot \cos \beta \int_{-1}^0 \Gamma(\eta') k_{HV}(\eta') d\eta' \right. \\ & \left. \pm \cos^2 \beta \left(\int_0^1 \Gamma(\eta') k_V(\eta') d\eta' \right) \right] + \Gamma_\infty(\eta) \end{aligned} \quad (12)$$

ただし

$$\begin{aligned} k_H &= \lim_{K_0 f \rightarrow 0} K_H = \frac{4(\cos \beta - |\eta'| \cos \beta)^2 - (y - \eta' \sin \beta)^2}{\{4(\cos \beta - |\eta'| \cos \beta)^2 + (y - \eta' \sin \beta)^2\}^2} \\ k_{HV} &= \lim_{K_0 f \rightarrow 0} K_{HV} = -2 \frac{4(\cos \beta - |\eta'| \cos \beta)(y - \eta' \sin \beta)}{\{4(\cos \beta - |\eta'| \cos \beta)^2 + (y - \eta' \sin \beta)^2\}^2} \\ k_V &= \lim_{K_0 f \rightarrow 0} K_V = \frac{4(\cos \beta - |\eta'| \cos \beta)^2 - (y - \eta' \sin \beta)^2}{\{4(\cos \beta - |\eta'| \cos \beta)^2 - (y - \eta' \sin \beta)^2\}^2} \end{aligned}$$

この積分方程式は Nyström 法により数値的に解くことができる⁶⁾。すなわち、 B_n を決定することにより、 Γ_∞ に対応する Γ を作動条件下で求めることができることになる。従つて水面の影響を受けた状態での局所のおよび全体的揚力係数はそれぞれ次のごとくなる。

$$\begin{aligned} C_L &= 2 \lambda \alpha \sin \varphi (B_1 \sin \varphi + B_3 \sin 3 \varphi + B_5 \sin 5 \varphi + B_7 \sin 7 \varphi) \\ C_L &= \pi B_1 \lambda \alpha \end{aligned} \quad (13)$$

4 横傾斜に基づく迎角変化

船体の横傾斜に伴う水中翼の揚力変化の原因としては、水中翼の浸水面積の変化と有効迎角の変動の二つが挙げられる。これらは水中翼船に特有なものであつて安定計算に際してはいずれも無視することは妥当でない。

有効迎角の変動の原因は、船体の横動揺角速度と横よりの二つに帰せられるので、これらの大きさと方向とがあらかじめ与えられたとき、これらの影響が安定計算に含まれるようにするには “Strip method”⁷⁾ を適用すればよい。

このような見地から、第一図に示すごとく、次の二つの基本的な場合

A. 浮揚進行中、船体自体が θ だけ横傾斜する場合

B. 浮揚進行中、水面が θ だけ傾斜する場合

の静的復元力は別箇に取扱うことにしてある。従つて水面も傾き同時に船体も傾斜するという任意の状態は、こ

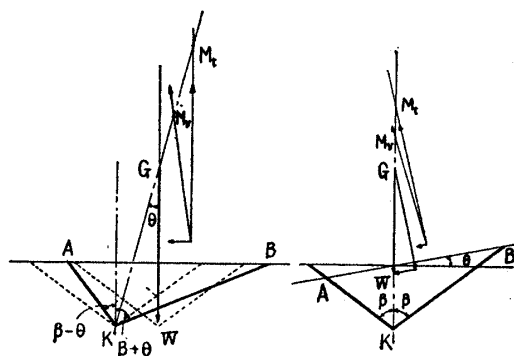


図1 水中翼船が傾斜する場合 (左)
水面が傾く場合 (右)

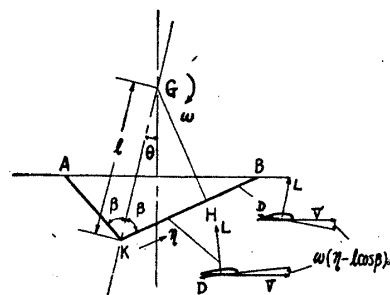


図2 横動揺による迎角変化

れら二者を適宜組合わせればよい。

4.1 横動揺角速度

第2図に示すごとく、重心Gより没水側の翼へ下した垂線の足をHとするとき、Hより翼端側と翼中央側ではそれぞれ翼幅に直角下方および上方に角速度が生ずるために、それぞれ有効迎角が増加および減少することになる。

したがって strip の発生する揚力、抗力はそれぞれ次式で与えられる。

$$\bar{C}_l' = C_l' + \frac{dC_l'}{d\alpha} \frac{\omega}{V} (\eta - l \cos \beta) \quad (15)$$

$$\bar{C}_a' = C_a' + \frac{dC_a'}{d\alpha} \frac{\omega}{V} (\eta - l \cos \beta) \quad (16)$$

したがって、進行方向Vに直角な力としては、次式で与えることができる。

$$\bar{C}_l' \cos \frac{\omega(\eta - l \cos \beta)}{V} + \bar{C}_a' \sin \frac{\omega(\eta - l \cos \beta)}{V} \quad (17)$$

(15), (16) を (17) へ代入し、二次の微小量を見捨てる時次式を得る。

$$C_l' + \frac{dC_l'}{d\alpha} \frac{\omega}{V} (\eta - l \cos \beta) \quad (18)$$

露出側の翼に対しても、同様に、次式を得る。

$$C_l'' + \frac{dC_l''}{d\alpha} \frac{\omega}{V} (\eta + l \cos \beta) \quad (19)$$

なお、角速度 ω は傾斜する方向を正にとるものとする

4.2 横 迂 り

傾斜直後、没水側の浸水面積が増すため、揚力が増加し、露出側では減少する結果、傾斜側と反対側の方向へ横迂りしようとする。横迂りの発生後は、横迂りによる有効迎角が露出側で増加するため揚力が増し、その結果逆に傾斜側の方向へ横迂りの傾向が生ずるであろう。いずれにしても、斯様な横迂りは、水中翼船の横傾斜には必ず付随するものであつて、静的安定の計算にも取入れる必要がある。

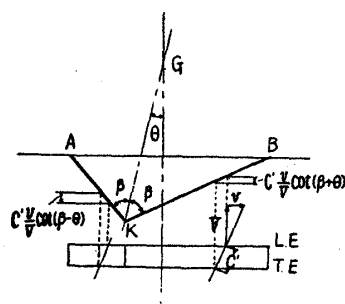


図3 横迂りによる迎角変化

Aの場合、第3図に示すごとく、没水側での strip の前縁と後縁の高さの差は $C' \frac{v}{V} \cot(\beta + \theta)$ である。従つて、迎角変化としては $\frac{v}{V} \cot(\beta + \theta)$ となり、これだけ増加することになる。同様に、露出側では $-\frac{v}{V} \cot(\beta - \theta)$ となり、これだけ減少することになる。これに対応して揚力の変動としては

$$\pm \frac{dC_l}{d\alpha} \times \frac{v}{V} \cot(\beta \pm \theta) \quad (20)$$

ただし 正は没水側、負は露出側

となる。

Bの場合も全く同様にして揚力の変動として

$$\pm \frac{dC_l}{d\alpha} \times \frac{v}{V} \cot \beta \cdot \cos \theta \quad (21)$$

ただし 正は没水側、負は露出側

で与えられる。

なお、横迂り速度 v は傾斜側の方向を正にしてある。

5 横傾斜による水中翼特性の変化

横傾斜したことにより没水側、露出側ではそれぞれ翼幅が次式

$$A \text{ の場合 ; } b \{ \cos \theta + \sin \theta \cdot \tan(\beta + \theta) \}, b \{ \cos \theta - \sin \theta \cdot \tan(\beta - \theta) \} \quad (22)$$

$$B \text{ の場合 ; } b \left\{ 1 + \frac{\sin \beta \cdot \sin \theta}{\cos(\beta + \theta)} \right\}, b \left\{ 1 - \frac{\sin \beta \cdot \sin \theta}{\cos(\beta - \theta)} \right\} \quad (23)$$

のごとく増減する。

したがって、(18), (19), (20), (22) を併慮することにより、例えばAの場合の没水側、露出側の水中翼の揚力はそれぞれ次式で与えることができる。

$$C_L' = \int_0^1 \left[C_L' + \frac{dC_L'}{d\alpha} \left\{ \frac{\omega b}{V} (\cos \theta + \sin \theta \cdot \tan(\beta + \theta)) \eta - \frac{\omega l}{V} \cos \beta + \frac{v}{V} \cot(\beta + \theta) \right\} \right] d\eta \quad (24)$$

$$C_L'' = \int_{-1}^0 \left[C_L'' + \frac{dC_L''}{d\alpha} \left\{ \frac{\omega b}{V} (\cos \theta - \sin \theta \cdot \tan(\beta - \theta)) \eta + \frac{\omega l}{V} \cos \beta - \frac{v}{V} \cot(\beta - \theta) \right\} \right] d\eta \quad (25)$$

(9), (13) を代入することにより、最終的に次式を得る

$$\begin{aligned} \left(\frac{C_L'}{C_L^0} \right) &= \left[1 \pm \frac{4}{\pi A_1 \alpha} \frac{\omega b}{V} \{ \cos \theta \pm \sin \theta \cdot \tan(\beta \pm \theta) \} \left(\frac{A_1}{3} + \frac{A_3}{5} - \frac{A_5}{21} + \frac{A_7}{45} \right) \right. \\ &\quad \left. \pm \frac{1}{\alpha} \left\{ -\frac{\omega l}{V} \cos \beta + \frac{v}{V} \cot(\beta \pm \theta) \right\} \right] \{ \cos \theta \pm \sin \theta \cdot \tan(\beta \pm \theta) \} \end{aligned} \quad (26)$$

Bの場合も、全く同様にして次式のごとくなる。

$$\begin{aligned} \left(\frac{C_L'}{C_L^0} \right) &= \left[1 \pm \frac{4}{\pi A_1 \alpha} \frac{\omega b}{V} \left\{ 1 \pm \frac{\sin \beta \cdot \sin \theta}{\cos(\beta \pm \theta)} \right\} \left(\frac{A_1}{3} + \frac{A_3}{5} - \frac{A_5}{21} + \frac{A_7}{45} \right) \right. \\ &\quad \left. \pm \frac{1}{\alpha} \left\{ -\frac{\omega l}{V} \cos \beta + \frac{v}{V} \cot \beta \cdot \cos \theta \right\} \right] \left\{ 1 \pm \frac{\sin \beta \cdot \sin \theta}{\cos(\beta \pm \theta)} \right\} \\ \text{ただし } C_L^0 &= \frac{1}{2} C_L = \frac{\pi}{2} A_1 \lambda \alpha \end{aligned} \quad (27)$$

同様にして、上反角頂点の周りのモーメントをそれぞれ没水側、露出側について取るとき、次式を得る。

Aの場合

$$\begin{aligned} \left(\frac{C_m'}{C_m^0} \right) &= \left[1 \mp \frac{1}{\alpha} \left\{ \frac{\omega l}{V} \cos \beta - \frac{v}{V} \cot(\beta \pm \theta) \right\} \pm \frac{\pi}{16 \alpha} \frac{\omega b}{V} \{ \cos \theta \pm \sin \theta \cdot \tan(\beta \pm \theta) \} \frac{A_1 + A_3}{\frac{A_1}{3} + \frac{A_3}{5} - \frac{A_5}{21} + \frac{A_7}{45}} \right] \\ &\quad \times \{ \cos \theta \pm \sin \theta \cdot \tan(\beta \pm \theta) \}^2 \end{aligned} \quad (28)$$

Bの場合

$$\begin{aligned} \left(\frac{C_m'}{C_m^0} \right) &= \left[1 \mp \frac{1}{\alpha} \left\{ \frac{\omega l}{V} \cos \beta - \frac{v}{V} \cot \beta \cdot \cos \theta \right\} \pm \frac{\pi}{16 \alpha} \frac{\omega b}{V} \left\{ 1 \pm \frac{\sin \theta \cdot \sin \beta}{\cos(\beta \pm \theta)} \right\} \frac{A_1 + A_3}{\frac{A_1}{3} + \frac{A_3}{5} - \frac{A_5}{21} + \frac{A_7}{45}} \right] \\ &\quad \times \left\{ 1 \pm \frac{\sin \theta \cdot \sin \beta}{\cos(\beta \pm \theta)} \right\}^2 \\ \text{ただし } C_m^0 &= \pm 2 \lambda \alpha \left(\frac{A_1}{3} + \frac{A_3}{5} - \frac{A_5}{21} + \frac{A_7}{45} \right) \end{aligned} \quad (29)$$

したがって、上反角頂点より着力点までの距離を没水側、露出側でそれぞれ l' , l'' とするとき、次式で与えられる。

$$\frac{l'}{l_0} = \frac{C_m'}{C_m^0} \bigg/ \frac{C_L'}{C_L^0}, \quad \frac{l''}{l_0} = \frac{C_m''}{C_m^0} \bigg/ \frac{C_L''}{C_L^0} \quad (30)$$

$$\text{ただし } \frac{l_0}{b} = \frac{4}{\pi A_1} \left(\frac{A_1}{3} + \frac{A_3}{5} - \frac{A_5}{21} + \frac{A_7}{45} \right)$$

かくして、傾斜時における没水部、露出部の発生する揚力の合力と船体中心線とのなす角はそれぞれ次式で与えられる。

$$\frac{C_r}{C_r^0} = \left\{ \left(\frac{C_L'}{C_L^0} \right)^2 + \left(\frac{C_L''}{C_L^0} \right)^2 - 2 \left(\frac{C_L'}{C_L^0} \right) \left(\frac{C_L''}{C_L^0} \right) \cos 2\beta \right\}^{1/2} \frac{1}{\sqrt{2(1 - \cos 2\beta)}} \quad (31)$$

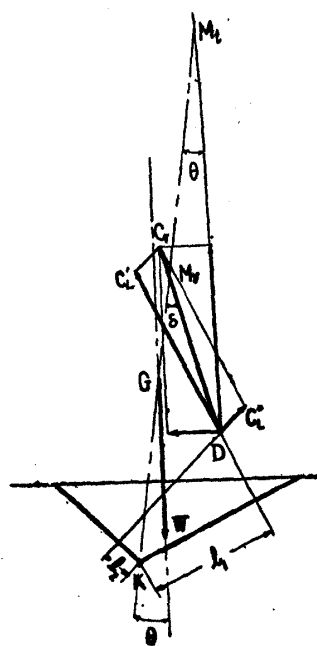


図4 水中翼の発生する
合力とその着力点

$$\delta = \cos^{-1} \left\{ \frac{\frac{C_L'}{C_L^0} + \frac{C_L''}{C_L^0}}{\sqrt{\left(\frac{C_L'}{C_L^0}\right)^2 + \left(\frac{C_L''}{C_L^0}\right)^2 - 2\left(\frac{C_L'}{C_L^0}\right)\left(\frac{C_L''}{C_L^0}\right)\cos 2\beta}} \sqrt{\frac{1 - \cos 2\beta}{2}} \right\}$$

ただし $C_r^0 = C_L^0 / \sqrt{2(1 - \cos 2\beta)}$

(32)

以上の諸式では、すべて A_n を用い、無限遠流体中の特性を示してあるが、水面の影響下にある諸特性を求めるには、 A_n の代りに B_n を入れ代えればよい。

第4図に示すごとく、没水側、露出側の揚力の交点Dおよびこれを通る合力 C_r はそれぞれ排水量型船の浮心、浮力に対応するものである。

6 メタセンター高さおよび復元挺

第4図に示すごとく、合力 C_r と船体中心線との交点 M_0 は見掛け上のメタセンターであつて、実際に船体重量と平衡する方向の分力との交点 M_t は真のメタセンターである。それぞれのメタセンター高さは次式で与えることができる。

$$\frac{GM_t}{l_0} = \frac{l' + l''}{2 \cos \beta} + \frac{l' - l''}{2 \tan \theta \cdot \sin \beta} - \frac{l}{l_0}$$
(33)

$$\frac{GM_0}{l_0} = \frac{l' + l''}{2 \cos \beta} + \frac{l' - l''}{2 \tan \delta \cdot \sin \beta} - \frac{l}{l_0}$$
(34)

ただし $l = KG$

これよりメタセンター高さを大にするには

- (i) 揚力の着力点を上反角頂点より遠ざけること。
- (ii) 没水、露出両側の着力点までの差を大ならしめること。
- (iii) 上反角を小ならしめること。

が必要であつて、翼幅形状と上反角が決定的影響を持つことが分る。(i), (ii)を満足せしめるには、翼幅中央の循環を小にして、翼端部へそれだけ循環を集中させればよい。換言すれば、翼弦長を水面付近の翼端で大になるように設計すればよいであろう。このことは従来の実例⁸⁾に対する理論的根拠を与えるものと見てよい。

したがつて、復元挺としては

$$\frac{GZ}{l_0} = \frac{GM_t}{l_0} \sin \theta$$
(35)

初期メタセンター GM_t^0 を求めるには、 $\theta \rightarrow 0$ の極限值を取れば得られる。すなわち

$$\lim_{\theta \rightarrow 0} \frac{GM_t}{l_0} = \frac{GM_t^0}{l_0} = \frac{2}{\cos \beta} - \frac{l}{l_0}$$
(36)

したがつて、初期メタセンターは第5図に示すごとく、図式的に簡単に求めることができる。すなわち、循環分布に基づき(30)より l_0 を求め、上反角頂点Kより翼幅上に $2l_0$ (bより僅か小)なる点Nを取り、翼幅に垂線 NM_t^0 を立て船体中心線との交点を M_t^0 とすれば、これが初期メタセンターとなる。

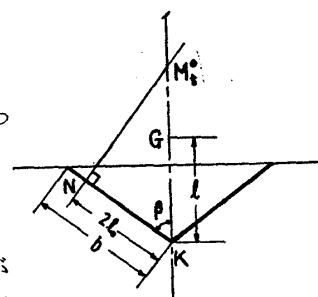


図5 初期メタセン
ターの図式決定

7 水中翼船のメタセンター

水中翼船では、縦安定を確保するために、前部および後部に水中翼を配置して全揚力を二配分するものが通例である。従つて船体重量と平衡する全揚力は

$$A \text{ の場合 ; } W = \frac{1}{2} \rho V^2 \{ (S_0 C_L')_{\text{fore}} + (S_0 C_L')_{\text{aft}} \} \sin(\beta + \theta) \{ \cos \theta + \sin \theta \tan(\beta + \theta) \}$$

$$+ \frac{1}{2} \rho V^2 \{ (S_0 C_L'')_{\text{fore}} + (S_0 C_L'')_{\text{aft}} \} \sin(\beta - \theta) \{ \cos \theta - \sin \theta \tan(\beta - \theta) \}$$
(37)

$$B \text{ の場合 ; } W \cos \theta = \frac{1}{2} \rho V^2 \{ (S_0 C_L')_{\text{fore}} + (S_0 C_L')_{\text{aft}} \} \sin(\beta + \theta) \left\{ 1 + \frac{\sin \beta \cdot \sin \theta}{\cos(\beta + \theta)} \right\} \\ + \frac{1}{2} \rho V^2 \{ (S_0 C_L'')_{\text{fore}} + (S_0 C_L'')_{\text{aft}} \} \sin(\beta - \theta) \left\{ 1 - \frac{\sin \beta \cdot \sin \theta}{\cos(\beta - \theta)} \right\} \quad (38)$$

$$\text{但し } S_0 = b c_0 (\lambda' + 2)$$

で与えられる。 C_L', C_L'' は作動条件と傾斜角により (26), (27) からあらかじめ知れる量であるが、これらは何れも水面の影響を受けた状態での値であることに注意しなければならない。

水中翼船全体のメタセンターの計算は次のような手順で行なえばよい

- (i) 水中翼の幾何学的形状(縦横比, 上反角および翼幅形状)に基づいて, (7) により無限遠流体中の循環 (6) を決定する。
- (ii) 循環 (6) に基づいて, (12) により水面の影響による循環修正を行ない, (11) を決める。
- (iii) この結果, (14) を算出して, これが規定揚力値になるように幾何学的迎角を決定する。
- (iv) 循環 (11) の係数 B_n を用い A, B のそれぞれの場合に応じて諸特性 (26), (27), (30) ないし (28), (29), (30) を算出する。
- (v) 以上の結果を利用して (30) より GM を決定する。

ここまでは前部, 後部水中翼に関してそれぞれ計算し, それぞれの $GM_{\text{fore}}, GM_{\text{aft}}$ を求めて置くのである。しかるとき, 水中翼船全体の GM は次式

$$A \text{ の場合 ; } GM \cdot W = GM_{\text{fore}} \times \frac{1}{2} \rho V^2 [C_L' \sin(\beta + \theta) \{ \cos \theta + \sin \theta \cdot \tan(\beta + \theta) \} \\ + C_L'' \sin(\beta - \theta) \{ \cos \theta - \sin \theta \tan(\beta - \theta) \}]_{\text{fore}} S_{0\text{fore}} \\ + GM_{\text{aft}} \times \frac{1}{2} \rho V^2 [C_L' \sin(\beta + \theta) \{ \cos \theta + \sin \theta \cdot \tan(\beta + \theta) \} \\ + C_L'' \sin(\beta - \theta) \{ \cos \theta - \sin \theta \cdot \tan(\beta - \theta) \}]_{\text{aft}} S_{0\text{aft}} \quad (39)$$

$$B \text{ の場合 ; } GM \cdot W \cos \theta = GM_{\text{fore}} \times \frac{1}{2} \rho V^2 \left[C_L' \sin(\beta + \theta) \left\{ 1 + \frac{\sin \beta \cdot \sin \theta}{\cos(\beta + \theta)} \right\} \right. \\ \left. + C_L'' \sin(\beta - \theta) \left\{ 1 - \frac{\sin \beta \cdot \sin \theta}{\cos(\beta - \theta)} \right\} \right]_{\text{fore}} S_{0\text{fore}} \\ + GM_{\text{aft}} \times \frac{1}{2} \rho V^2 \left[C_L' \sin(\beta + \theta) \left\{ 1 + \frac{\sin \beta \cdot \sin \theta}{\cos(\beta + \theta)} \right\} \right. \\ \left. + C_L'' \sin(\beta - \theta) \left\{ 1 - \frac{\sin \beta \cdot \sin \theta}{\cos(\beta - \theta)} \right\} \right]_{\text{aft}} S_{0\text{aft}} \quad (40)$$

により, 最終的に決定することができる。

8 数 値 計 算 例

実状に接近した一例として, 次の場合

縦横比 $\lambda = 8$

上反角 $30^\circ (\beta = 60)$

揚力係数 $C_{L\infty} \sin \beta = 0.15$

翼幅形状

矩形 (迎角 $\alpha = 2^\circ 2'$, Taper 比 $\lambda' = 0$)

梯形 (迎角 $\alpha = 2^\circ 7'$, Taper 比 $\lambda' = 1.0$)

重心高さ $l/b = 0.72168$

を採用し, A の場合について数値的検討をした。

8.1 循環分布

(7) より求めた無限遠流体中の循環分布, (12) より求めた水面の影響下の循環分布をそれぞれ点線, 実線にて第6図に示してある。翼端近傍では水面の影響を受けて循環が可なり低下しており, 特に翼端への循環の集中を意図した梯形翼では, 水面の影響による減少量も顕

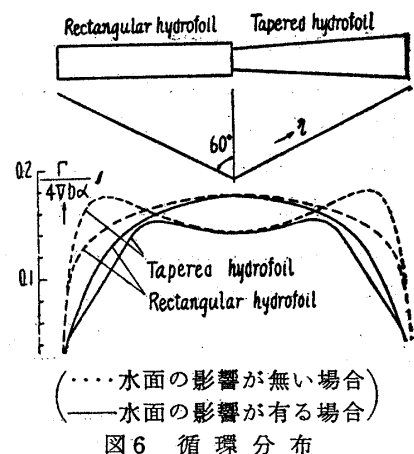


図6 循環分布

著で、折角の意図が可なり減殺されてしまうことが注目されよう。

8.2 横傾斜による特性変化

横傾斜時の角速度および横り速度を一応傾斜角に無関係に

$$\frac{\omega l}{V} = 0.01 \quad \frac{v}{V} = 0.01$$

と置いた。この場合の揚力、モーメントおよび着力点が傾斜角によりいかに変わるかを第7図に示してある。すな

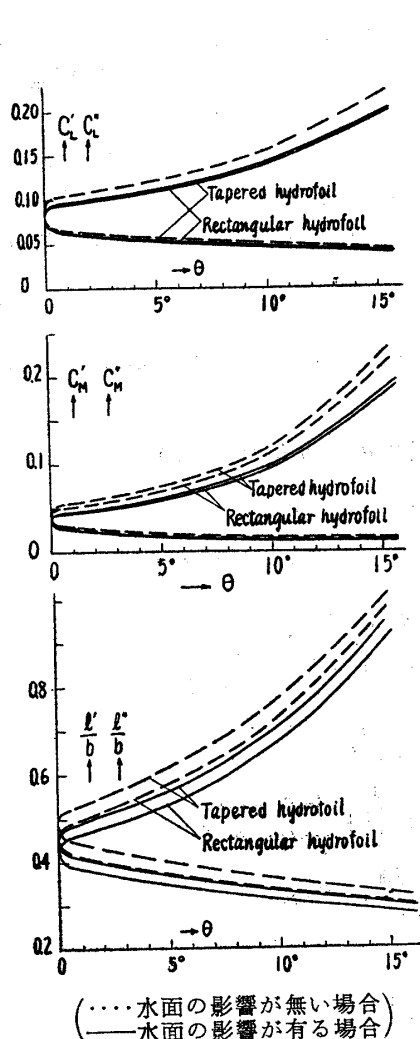
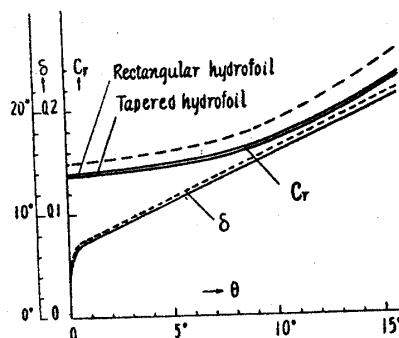
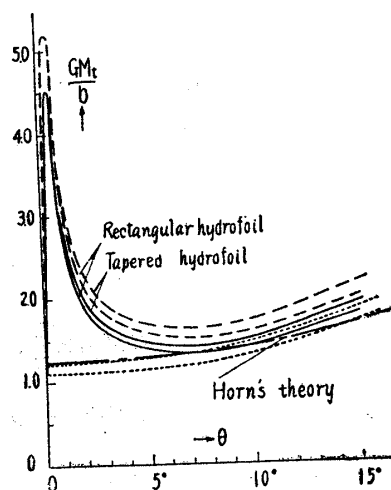


図7 横傾斜による揚力(上), モーメント(中), および着力点位置(下)の変動



(..... 水面の影響が無い場合)
(—— 水面の影響が有る場合)

図8 合力とその方向



水面の影響 有効迎角の変化

——	考慮	考慮
——	無視	考慮
.....	無視	無視

図9 メタセンター高さ

わち傾斜角による変化は、無限遠流体中では同一揚力であるにも拘わらず、翼幅形状により顕著な相違があることおよび水面の影響により諸特性は可なり低下し、特に没水部で著しいことが分る。着力点までの距離は、梯形翼の方が大きいことが注目されよう。第8図には合力とその方向が示してある。一般に δ は傾斜角 θ より大であつて、翼幅形状による相異はほとんど認められなかつた。

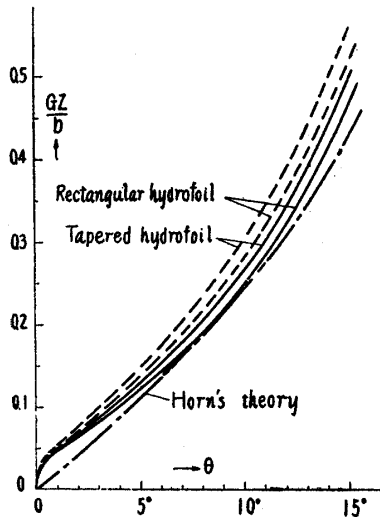
8.3 メタセンターおよび復元挺

第9図には矩形、梯形両翼の GM_t について、水面の影響と有効迎角の変化の両者を考慮した場合を実線、前者を無視した場合を点線および両者を無視した場合を点線で示してある。水面の影響を無視すると GM_t を過大評価し、危険側になること、一方、有効迎角の変化を無視すると GM_t を過小評価し安全側となることが分る。前者が傾斜角にほぼ無関係に一樣に影響するのに反し、後者は 1° 付近の小角度ではかなりの影響を持つが、傾斜角が大になるに伴ない、その影響が小さくなる。これは水中翼特性の変化が、傾斜角小なる所では主に有効迎角の変化に由来し、大なる所では主に浸水表面積の変化に由来するためである。

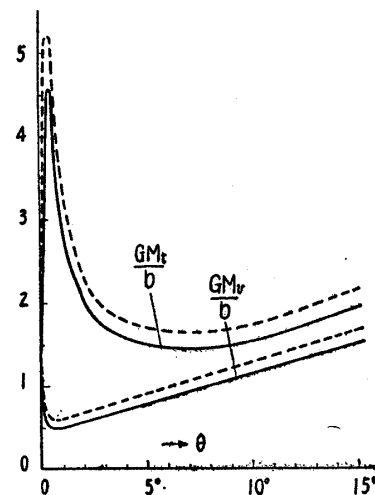
また、梯形翼が矩形翼に比し、 GM_t は大ではあるが、水面の影響による減小量は矩形翼より大である。これは第 6 図に明らかなごとく、水面の影響により翼端集中の循環が可なり減殺されるためである。なお、比較参考のため、Horn の理論によるものを鎖線で示してある。

第 10 図には復元挺を示してある。同一揚力であるにもかかわらず、梯形翼が矩形翼よりも安定がよいことが分る。なお、Horn の結果は全傾斜角範囲で過小値を与えている。

第 11 図には、梯形翼の真および見掛けの GM を示してある。一般に前者が大で、 1° 以下の傾斜角で相異の



(.....水面の影響を無視)
(——水面の影響を考慮)
図 10 復元挺



(.....水面の影響を無視)
(——水面の影響を考慮)
図 11 真のメタセンターと見掛けのメ
タセンター

第 2 表 GM_t/b

	水面の影響を無視	水面の影響を考慮
Horn	1.278	
Witt	1.112	
Presia		1.031
本 解 法	1.163	1.083

著しいのは第 8 図に示した角度 δ の変動が激しいことに由来しているが、傾斜角大となるにつれてその差は小さくなる。

8.4 初期メタセンター

初期メタセンターを求める公式が諸家により発表されているので、これらにより本数値例の矩形翼の場合について計算した結果を第 2 表に括めてある。

数値的には、本解法による結果に比し、Horn が多小過大値を与えている外は、Witt, Presia 共にほぼ一致した結果を与えていると見てよいであろう。

8.5 水中翼船の復元挺

水中翼船の一例として

船 体 ; 排水量 80 ton, $L=32$ m

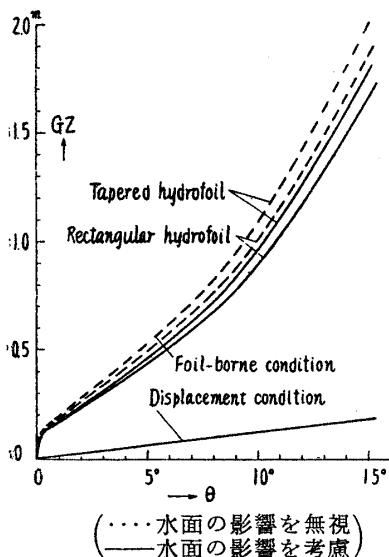
水中翼 ; $(C_L \sin \beta)_{\text{fore}} = (C_L \sin \beta)_{\text{aft}} = 0.15$, $S_{\text{fore}} = S_{\text{aft}}$

$\beta_{\text{fore}} = \beta_{\text{aft}} = 60^\circ$, $\lambda_{\text{fore}} = \lambda_{\text{aft}} = 8$

を採用した。

既述の手順で求めた復元挺を第 12 図に示してある。なお、水中翼を取付けない船体のみの復元挺は今井の方法⁹⁾により算定した。

これより水中翼船は、その水中翼の形状いかんを問わず、排水量型船よりも遙かに横の静安定が大であることが歴然とする。また、水中翼形状としては矩形翼よりは、梯形翼を採用した水中翼船体の静安定がよく、また水面の影響により静安定は減少することが分る。



(.....水面の影響を無視)
(——水面の影響を考慮)
図 12 水中翼船の復元挺

9 結 言

以上は、水中翼船の横の静安定論の精密化と復元力算定法の確立を意図して書かれたものであつて、提出せる方法は一応実用に供されるものと思われる

参 考 文 献

- 1) Horn "Zur Theorie der Querstabilitat von Tragflächenbooten" Schiffstechnik, 1952, Heft 1
 - 2) de Witt "Theorie der Anfangsquerstabilitat von geraden austauchenden Wassertragflugeln in Abhangigkeitr der Auftriebsverteilung langs Spanweite" Schiffstechnik, Bd 4, 1957
 - 3) Presia "Zur Querstabilitat der Tragfläche eines Tragflugelbootes" Schiffbautechnik 10, 1960
 - 4) Weinig "Theorie der Unterwassertragflugels und der Gleitfläche" Luftfahrtforschung Bd 14, 1937
 - 5) Glauert "The elements of airfoils and airscrew theory" Camb. Univ. 1930
 - 6) 西山哲男 "有限幅を持つ水中翼の特性を求める方法—第二報" 造船協会論文集 120 号, 昭和 33 年
 - 7) Glauert "Aerodynamic theory" Vol. 5, 1934
 - 8) Buller "Das Tragflugelboot" Jahrb. der Schiffb. Gesellsch. Bd 46, 1952
 - 9) 今井信男 "横復元力の近似計算式について" 造船協会論文集 60 号, 昭和 12 年
-