

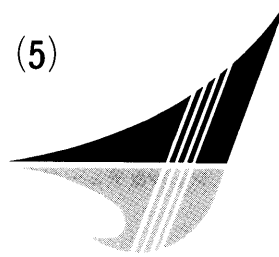
船型学 50年 (5)

— 漸近展開 —

乾 崇夫

東京大学名誉教授

日本造船技術センター顧問



4月号の訂正と補遺

本稿執筆中に4月号が届いたので、例によって校正ミスと、前回紙面の都合で省略した(註)を補足しておく。

p.49 左, 上から2行目: 少しは → 少しく

p.50 左, 下から14行目: X角 → 入角

同 右, 上から20行目: 年末の → 年来の

○表4・1の註: “Water-Line”の記号 $t^{(1)}$, $\theta^{(2)}$ の定義は次の通り

$$(1) \quad t = \left| \frac{\partial \eta}{\partial \xi} \right| \quad \xi = 1, \quad \zeta = 0,$$

$$(2) \quad \theta = \frac{1}{2} \text{Angle of Entrance on LWL, where } \theta = \epsilon \times B/L$$

○また同表中のRef. A-8 以下は

[A-8] Wigley, W.C.S.: TINA, Vol.68(1926), 124

[A-9] Wigley, W.C.S.: TINA, Vol.69(1927), 191

[A-11] Wigley, W.C.S.: Hydromechanische Probleme des Schiffsantriebs, (Hamburg, 1932), 132

[A-17] Weinblum, G.: Jahrb. S.B.T.G. Bd.33 (1932), 389

[A-24] Emerson, A.: TINA, Vol.96 (1954), 268

漸近展開とは

関数 $f(x)$ が漸近展開 (asymptotic expansion)

$$f(x) \sim a_0 \phi_0(x) + a_1 \phi_1(x) + \dots + a_n \phi_n(x) + \dots, \quad (5.1)$$

をもつ、あるいは上の形に漸近展開可能であるとは、任意の整数 $n \geq 0$ に対して

$$f(x) - a_0 \phi_0(x) - a_1 \phi_1(x) - \dots - a_n \phi_n(x) = O(\phi_{n+1}(x)), \quad (5.2)$$

が $x \rightarrow \infty$ のとき成り立つことをいう¹⁾。しかし、ここではそのうちの“積分によって定義されている関数の漸近展開”をもとめること、つまり積分記号(俗にいうワラビ)を外してしまう方法とそのメリットについて考える。そ

の目的は次節に述べる“船の波”や“造波抵抗”がいずれもある種の積分で与えられるのであるが、そのままでは計算も厄介だし、もっと重要なこととして、たとえば造波抵抗をフルード数 F_n の連続関数とみただけの場合、積分記号を外すことによってはじめて両者の関係が explicit に把握される、という大きな利点がある。メリットはそれだけではない。後述の例に示すように、粘性抵抗の形状因子 (form factor) を全抵抗係数曲線(実測)から推定する場合、バラツキの大きい低速域のみから求める従来の方法に比し、対象領域をバラツキの少ない中速域まで延ばし、そこで造波抵抗対 F_n 数の帰趨を勘案しながら求める方が精度が向上する²⁾。また“やよい丸”の例に見るように、造波抵抗に対する粗度影響を考慮することで、逆に粗度粘性を合理的な形で収約することも可能となる。

ところで“ワラビ”をほどこ具体的な方法にまで立入る余裕はないが、手法としては“Laplaceの方法”、“停留位相の方法(stationary phase method)”などがあり、特に後者は Hogner³⁾ による cusp 付近での“船の波”の解析に効果を挙げている。筆者自身の体験を記せば、Whittaker-Watson の“Modern Analysis”や故犬井鉄郎先生の「球函数・円壩函数・超幾何函数」(河出書房)には大変お世話になった。後者は戦後間もなく出たもので、残念ながらいまは手元がない。“漸近展開”に関する限り旧著の方が現在の「特殊函数」(岩波全書)よりは詳しく思ったように思う。なお森口繁一先生の近著⁴⁾の第8章「数表よさらば」と付録A「漸近展開の補正係数」は極めて有益。

素成波理論素描

“船の波”についてのわれわれの知見は、現在と、40年前とはずいぶんちがう。現在では、水線入角の大きいタンカーのような低速肥大船は勿論のこと、水線入角が

それほど大きくない船型でも、船首近傍には線形な波のほか非線形な波ができ、それは線形波のように後方へと伝播せず、波崩れのあと微小な渦としてエネルギー散逸に関与していることが知られている。しかし、以下は、そのような見解がまだえられていなかった昭和20年代の後半に話を戻し、もっぱら線形造波抵抗理論の立場に立ち、それをどのように水槽試験や船型計画の現場に役立てるべきかを考える。この立場では、3月号の拙稿(p. 51)でハブロックの業績に触れ、その最も重要なものは、後続波の漸近的な性質に着目した Elementary Wave (素成波)の理論であることを指摘した。以下その概要を述べる⁴⁾の²⁾。

いま静止水面 ($z = 0$) 上、船と共に動く動座標を考える。座標原点を船首に置き、船は x 軸の負の方向に定速 V で直進するものとし、 z 軸を鉛直上方にとる。自由表面上に任意点 (x, y) での水面変位は次式で与えられる。

$$\zeta(x, y) = \zeta_1(x, y) + \zeta_w(x, y), \quad (5 \cdot 3)$$

ここに

$\zeta_1(x, y)$ = 局部 (攪乱) 波 (local disturbance),

$\zeta_w(x, y)$ = 後続自由波 (free wave pattern),

さて、日常われわれが船の波を見ると、どのような視点で見ているだろうか? 大別すると2通りある。すなわち、船と併走するような形で、ほぼ真横から見る場合と、飛行機の窓、あるいは海岸に近い高所から、ほぼ垂直に真下を見る場合とである。前者は“船側波形”、後者は“波紋”をそれぞれ見ているわけで、“船の波”に関する情報としては前者よりも後者の方が重要である。その理由は、前者は“船の波”の情報のごく一部、つまり、後者の“波紋”のはぼ x 軸上の鉛直断面に過ぎない。そして、ここでは、船首(尾)端で(5・3)式右辺第1項の局部波の山が大きく、造波抵抗に直接関与する同第2項の後続自由波を正しく読みとるには局部波についての十分な知識が必要となるからである。たとえば、(5・3)～(5・3)式の予備知識がなく、 ζ 即 ζ_w と錯覚すると、しばしば大きな過誤をきたすことになる。事実、この“船側波形”は観測が容易であるため、昔から水槽試験でも多用されてきたものであるが、経験船型学的な解釈には誤りが多い。なかでも、「バルブをつけると船首波が前進する(註、 ζ を見る限りその通り。それはバルブによる ζ_1 が重なるから)、その結果船の“有効造波長さ”が延びるので造波抵抗が減るのである」とする説などはその典型例である。

ところで、もう一方の“波紋”観測のメリットは、“船の波”の全体を見ているという利点のほかに、2枚を重ね合わせてステレオ解析すれば、波高分布まで判る。す

なわち、これだけで“船の波”のすべての情報量がえられるわけである。特に船の近傍での局部波 ζ_1 の影響が及ばない十分後方で、純粋の ζ_w だけの挙動を観察できる利益が大きい。しかも、これは以下に述べる素成波理論と表裏一体となっているのである。なお、局部波 ζ_1 と自由波 ζ_w とは波動としての性質が全く異なり、前者は x, y 方向に対しては一律に減衰する非振動的な波であるが、後者は常識通り山・谷を繰返しながら次第に振幅が小さくなってゆく振動的な波であって、通常の船の場合の ζ_1 は船首(尾)端で cusp 状の peak (ただし粘性のため船尾のそれは船首に比し弱い)を示し、船中央で flat な浅い谷となる。また船の前進に伴い、 ζ_1 は形を変えず船と共に移動するだけでエネルギー散逸に無関係であるが、 ζ_w は一見 ζ_1 と同様、船と共に平行移動しているかに見えるが、ずっと無限後方まで自由波領域は広がっていて、船の前進した分だけ、あらたに自由波領域が増えることになる。この分だけエネルギー散逸に関わってくるのである。

いま船の十分後方では $\zeta_1 = 0$ であるから $\zeta = \zeta_w$ となり、しかもこの ζ_w はハブロックによると次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \zeta_w \sim & \int_{-\pi/2}^{\pi/2} S(\theta) \sin\{F(\theta)\} d\theta \\ & + \int_{-\pi/2}^{\pi/2} C(\theta) \cos\{F(\theta)\} d\theta, \end{aligned} \quad (5 \cdot 4)$$

ここに、 $K_0 = g/V^2$ (g = 重力加速度), $(5 \cdot 5)$

$$F(\theta) = K_0 \sec^2 \theta (x \cos \theta + y \sin \theta), \quad (5 \cdot 6)$$

で(5・4)式の記号 \sim は $x (> 0)$ の十分大きいときの漸近解であることを表わす。 $S(\theta)$, $C(\theta)$ はそれぞれ、素成波 S 波、 C 波 + 振幅関数、(5・6)式の $F(\theta)$ は素成波の位相関数である。いま、

$$x \cos \theta + y \sin \theta = p \quad (5 \cdot 7)$$

とおき、原点(船首)から x 軸と角 θ を成す線分(長さ p) を引き、これを垂線の足とするような、この線分に直交する直線 L を考えると、(5・7)式はこの L を表すことが判る。つまり直線 L 上の任意点 (x, y) での位相は等しくなり、 x 軸に対し θ だけ傾いた方向に進行する2次元波を表わすことになる。また、その進行速度は次式から $V \cos \theta$ となることも判る(定常条件)。それは、 L を crest line (波の山の線) と考え、その方向の波長 $\lambda(\theta)$ は(5・6)式から

$$\lambda(\theta) = \lambda_0 \cos^2 \theta = \frac{2\pi}{K_0} \cos^2 \theta = \frac{2\pi}{g} (V \cos \theta)^2, \quad (5 \cdot 8)$$

となるからである。これがハブロックの Elementary Wave の概念である。これを要するに“船の波”を十分後

船の科学

方で観察すれば、邪魔な局部波 ζ_1 に影響されず、造波抵抗に直接関与する自由波 ζ_w のみとなり、しかもそれは(5・4)式のように表わされる。その物理的な意味は上述の2次元的な波である素成波が、進行波軸に対し、 $-\pi/2$ から $+\pi/2$ までいろいろな方向に波速 $V \cos \theta$ で進行している、その合成波として理解できることになる。(5・4)式の積分記号を外し、その漸近展開を求めるには、直角座標系から極座標系に変換した方が便利で、これについては次節で述べる。

次に、造波抵抗(係数)曲線とフルード数 F_n との関係を考えてみる。今度は前とは逆に、静止水面に固定した座標をとり、かつ船はx軸の正方向に進むものとする。船の十分前方および後方に固定調査面A, Bを考える。A, B 2つの鉛直調査面に囲まれた内部流体のエネルギーの Δt 時間での増分 $\bar{E} \Delta x$ を計算すると、これは波の存在領域が船の進行に伴い $\Delta x = V \Delta t$ だけ増したことによる波動エネルギー(=運動エネルギー+位置エネルギー)の増分に等しい(\bar{E} はx軸上単位長さについての増分の時間平均)。途中を省略して結果だけ書くと

$$\bar{E} \Delta x = \pi \rho V^2 \Delta t \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \{A(\theta)\}^2 \frac{\cos^3 \theta}{1 + \sin^2 \theta} d\theta, \quad (5.9)$$

ここに、

$$\{A(\theta)\}^2 = \{S(\theta)\}^2 + \{C(\theta)\}^2, \quad (5.10)$$

$A(\theta)$ は素成波の合成振幅関数、 ρ は流体密度である。

一方、上述のようなエネルギー増分をもたらす原因は2つあり、その1は船が造波抵抗 R_w に抗して成した仕事

$$W_1 \Delta t = R_w \Delta x = R_w V \Delta t, \quad (5.11)$$

であり、その2は、後方調査面B(Bを横切って波紋全体がx軸正方向に進む)を介して、その後方外側(xの負の側)の流体が、(圧力)×(x方向の流体速度成分)という形で、調査面内部の流体に対して成す仕事

$$\bar{W}_2 \Delta t = \frac{\pi}{2} \rho V^3 \Delta t \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \{A(\theta)\}^2 \frac{\cos^5 \theta}{1 + \sin^2 \theta} d\theta, \quad (5.12)$$

である。よって

$$\bar{E} \Delta x = W_1 \Delta t + \bar{W}_2 \Delta t, \quad (5.13)$$

ここで、 \bar{E} 、 \bar{W}_2 は元来が時刻tの関数であるE、 W_2 の時間平均である(ただし、 $E - W_2/V$ はtを含まない)。

これより、造波抵抗 R_w は

$$R_w = \bar{E} - \bar{W}_2/V = \frac{\pi}{2} \rho V^2 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \{A(\theta)\}^2 \cos^3 \theta d\theta, \quad (5.14)$$

で与えられる。以上が素成波理論の素描であるが、ミッチェルの圧力積分の方法とは対照的で、その工学的応用面の広さからいって線形造波抵抗理論の頂点を示すもの

といっても過言ではない。

船の波の漸近表示

前掲の(5・4)式を極座標 $x = R \cos \theta$, $y = R \sin \theta$ に変換し、かつこれの漸近表示を求めると次式をうる。

$$\zeta(x, y) = \zeta(R, \theta) = \zeta_1(R, \theta) + \zeta_2(R, \theta), \quad (5.15)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} \zeta_1(R, \theta) &\sim \left(\frac{2\pi}{K_0 R}\right)^{V^2} K_1 A(\theta_1) \sin \left\{ [F_1 \cdot K_0 R + h(\theta_1) + \frac{\pi}{4}], \right. \\ \zeta_2(R, \theta) &\sim \left(\frac{2\pi}{K_0 R}\right)^{V^2} K_2 A(\theta_2) \sin \left\{ [F_2 \cdot K_0 R + h(\theta_2) - \frac{\pi}{4}], \right. \end{aligned} \right\} \quad (5.16)$$

上式中、添字1, 2はそれぞれ、ケルビン波の横波成分とタテ波成分を表わし、 θ_1, θ_2 は

$$F'(\theta) = 0, \quad (5.17)$$

の2つの実根として求められる。すなわち、与えられた偏角 θ に対し、

$$F(\theta) = \sec^2 \theta \cos(\theta - \theta), \quad (5.18)$$

と、これを(5・19)式に入れた2つの連立方程式の根として

$$\left. \begin{aligned} \tan \theta_1 \\ \tan \theta_2 \end{aligned} \right\} = -\frac{\cot \theta}{4} [1 \mp (1 - 8 \tan^2 \theta)^{V^2}], \quad (5.19)$$

がえられる。なお、 $\tan \theta = \frac{1}{2\sqrt{2}}$ 、すなわち θ がケル

ビン波の限界角 $18^\circ 29' = \tan^{-1}(\frac{1}{2\sqrt{2}})$ に達すると、 θ_1

$= \theta_2 = 35^\circ 16'$ となり、ここでは $F'(\theta) = 0$ と同時に $F''(\theta)$ もゼロとなり、より高次の漸近展開を必要とする(Hogner)。また(5・16)式中の係数 $F_1, F_2; K_1, K_2$ はいずれも θ の関数で漸近表示の計算(省略)のなかで容易に求められるものである。注意すべきことは、(5・16)式の ζ_1, ζ_2 ともに原点からの距離(無次元) $K_0 R$ の平方根に逆比例して減衰するが、*cusplike*近傍では上記の理由から $K_0 R$ の立方根に逆比例し、減衰の度合がはるかに緩慢になり、しばしば海難事故や環境擾乱の原因となる。なお、(5・16)式が適用できるのは大体において $K_0 R \gtrsim 8$ (波長 2π の約1.5倍以上)の範囲である。以下簡単な2, 3の例を示す。

(a) 点吹出し (Point Source)

位置(0, 0, -f)にある強さ mV の点吹出しの後方に行ける波はC波で、その振幅関数は次式で与えられる。

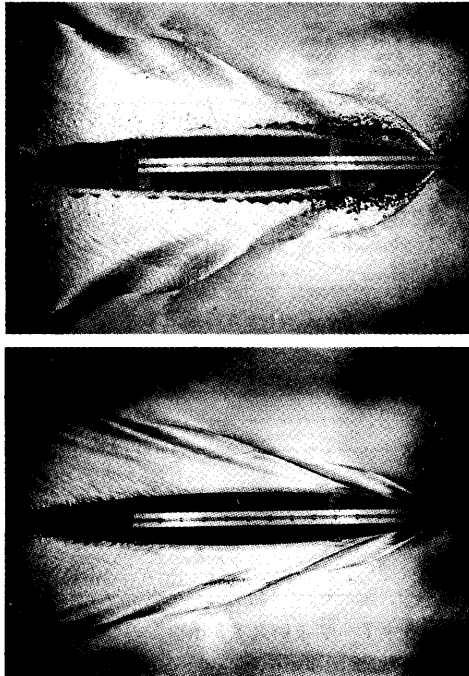


図 5・1 C-201 2.5 m 模型の波紋
(上)バルブなし (下)バルブつき

$$C(\theta) = \frac{mK_0}{\pi} \sec^3 \theta \exp(-K_0 f \sec^2 \theta), \quad (5 \cdot 20)$$

(b) 二重吹出し (Point Doublet)

モーメントがMV, 軸が進行方向 (x 軸の負方向) を向いている位置 (0, 0, -f) にある二重吹出しの後方の波は負のS波で, その振幅関数は,

$$S(\theta) = \frac{MK_0^2}{\pi} \sec^4 \theta \exp(-K_0 f \sec^2 \theta) \quad (5 \cdot 21)$$

なお球状船首がつくる波は, その形状や, 主船体とのつながりの部分 (フェアリング部) によって当然変化しますが, 基本的には (5・21) 式に近いことが波形解析で確かめられている⁴⁵⁾。

(c) 連続吹出し分布 (Continuous Source Distribution)

船体中心線面 (y = 0) に連続分布した吹出しを考える。簡単のため吹出し強さを表わす分布関数は水線方向 (ξ) と喫水方向 (ζ) との分離型であるとし, かつ m(ξ) およびその逐次導関数は ξ = 0 ~ L (L は船の長さ) で連続であると仮定する。いま吹出し要素の位置を ξ とし, 無次元変数 x' = x/L, ξ' = ξ/L を入れると, 船首から船尾に到る各吹出しから生ずる後続波を積分し, これに部分積分を適用すれば, x 軸上 (y = 0) では,

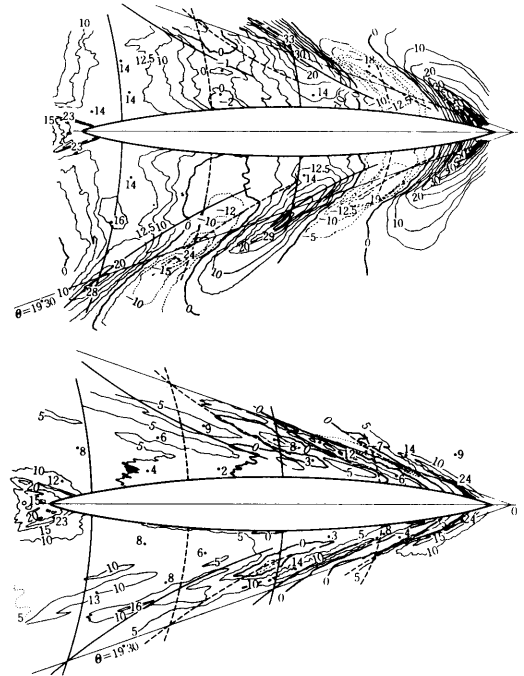


図 5・2 (左)のステレオ解析 (波の等高線)

$$\begin{aligned} & \int_0^1 m(\xi') \cos[K_0 L(x' - \xi') \sec \theta] d\xi' \\ &= -\frac{1}{K_0 L \sec \theta} [m(\xi') \sin\{K_0 L(x' - \xi') \sec \theta\}]_0^1 \\ &+ \frac{1}{K_0 L \sec \theta} \int_0^1 m'(\xi') \sin[K_0 L(x' - \xi') \sec \theta] d\xi' \\ &= \frac{1}{K_0 L \sec \theta} \{m_F \sin(K_0 x \sec \theta) \\ &\quad - m_A \sin[K_0(x - L) \sec \theta]\} \\ &+ \frac{1}{(K_0 L \sec \theta)^2} [m'(\xi') \cos[K_0 L(x' - \xi') \sec \theta]]_0^1 \\ &- \frac{1}{(K_0 L \sec \theta)^2} \int_0^1 m''(\xi') \cos[K_0 L(x' - \xi') \sec \theta] d\xi', \end{aligned} \quad (5 \cdot 22)$$

ここに, m_F = m(0), m_A = m(1) は船首 (尾) での吹出し強さを V で除したものを表わす。このうち, 特に船首波に関係する項だけを拾うと, m_F' = m'(0), m_F'' = m''(0), ……として

$$\begin{aligned} & \left\{ \frac{m_F}{K_0 L \sec \theta} - \frac{m_F''}{(K_0 L \sec \theta)^3} + \frac{m_F^{IV}}{(K_0 L \sec \theta)^5} - \dots \right\} \\ & \quad \times \sin(K_0 x \sec \theta) \\ & - \left\{ \frac{m_F''}{(K_0 L \sec \theta)^2} - \frac{m_F''''}{(K_0 L \sec \theta)^4} + \frac{m_F^V}{(K_0 L \sec \theta)^6} - \dots \right\} \\ & \quad \times \cos(K_0 x \sec \theta), \end{aligned} \quad (5 \cdot 23)$$

ところで商船の常用速度は通常 Fn ≤ 0.35, すなわち

船の科学

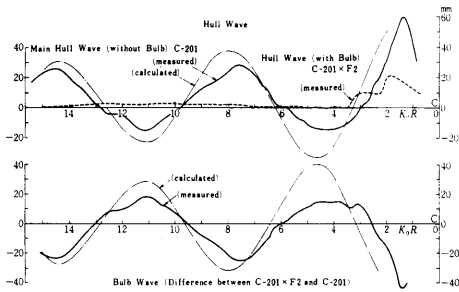


図5・3 図5・2のラジアルカット

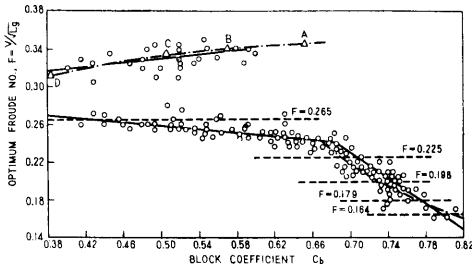


図5・4 Cb~Fn(optimum)

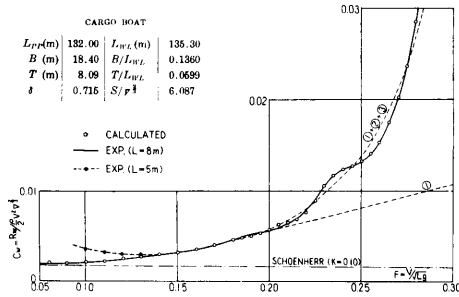


図5・5 Cw~Fnの漸近表示(1)

$K_0L \geq 8$ であるから、上式から \sin 波が優先し、 \cos 波は約1ヶタ小さいこと、および \cos 波の符号は船首端での $m_F \geq 0$ によって変わってきて、水線がホロー($m_F < 0$)になるほど船首自由波の山は後退することがわかる。

図5・1は最初の“波なし船型”C-201(詳しくは8月号に)2.5m模型の波紋写真、図5・2はそのステレオ解析による波高コンター(等高線)で、いずれも故高幣哲夫先生の学位論文^{43),47)}およびそれを紹介した報文⁵⁷⁾より拾ったものである。ともに(上)がバルブなし、(下)がバルブつきで、バルブによる波消し効果(特に $\theta \leq 70^\circ$)がわかる。また図5・3は図5・2をもとに $\theta = 19^\circ 30'$ のradial cut(実測)と上述の漸近表示による $\theta = 15^\circ$ に対する理論値を比較したものである。図の上半分の太い実線がバルブなし主船体、細い鎖線はそれに対する理論値、太い点線はバルブつきの場合である。また図の下半分は、バルブつきからバルブなしを差引いた実測波形差(実線)と二重吹出しで近似したバルブ単独の理論

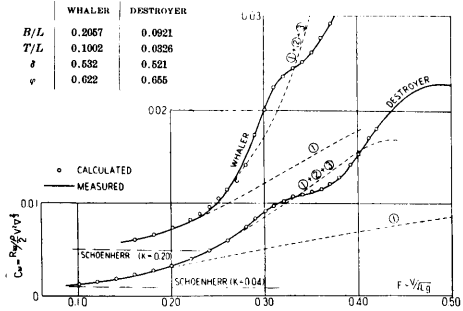


図5・6 Cw~Fnの漸近表示(2)

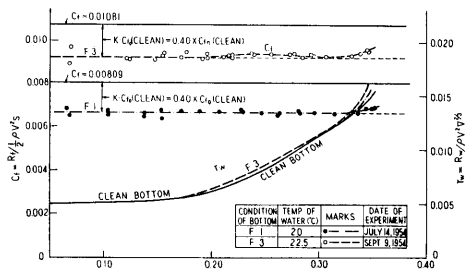


図5・7 やよい丸3.5m模型のCf解析 (フルード法)

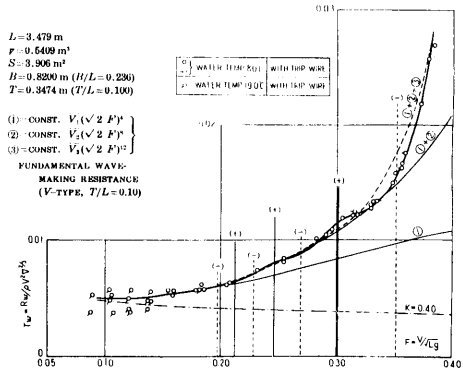


図5・8 Cw~Fnの漸近表示(3) (やよい丸3.5m滑面)

波形(細い鎖線)を比較したものである。ここで同一の θ 上のcutをとらず、実測波紋で $4\frac{1}{2}$ だけ外側に採った理由は非線形影響により実際の波は線形理論波よりも少し外側に押し出されていることを考慮したからで、これについては9月号(第9回)で説明する。上半分の図の太い点線を辿ると船首付近で少し山らしいものが見える(局部波)のを除けばほぼ完全に“波なし”となっていることが確認される。

造波抵抗積分の漸近表示

簡単のため二重模型近似の意味で船体に等価な船体中心線面内の吹出し分布を考え、分布形は喫水方向一様で、

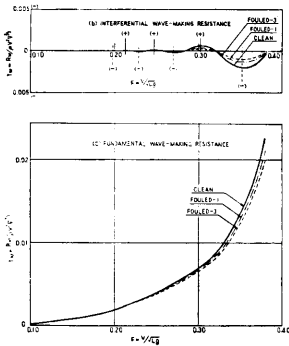


図 5・9 やよい丸 3.5 m 模型
C_wの基本項と干渉項

前後対称船型とする。このとき造波抵抗 R_wは次式で与えられる。

$$R_w = \frac{\rho V^2 L^2}{\pi} \int_0^{\pi/2} M \cdot U^2 \cos \theta \, d\theta, \quad (5 \cdot 24)$$

$$M = \int_0^1 m(\xi) \sin(K_0 \ell \sec \theta \cdot \xi) \, d\xi \quad (5 \cdot 25)$$

$$U(q) = 1 - \exp(-q), \quad (q = q_0 \sec^2 \theta = K_0 T \sec^2 \theta) \quad (5 \cdot 26)$$

ここに $\ell = L/2$ (L = 船長), T = 喫水, $m(\xi)$ は水線方向の吹出し分布関数で $\xi = 1$ が船首, $\xi = 0$ はmidship である。

“波”の場合と同様に (5・25) 式の M の積分に逐次部分積分を施し変形すれば,

$$M = -\frac{\cos(K_0 \ell \sec \theta)}{K_0 \ell \sec \theta} \left[m_0 - \frac{m_2}{(K_0 \ell \sec \theta)^2} + \frac{m_4}{(K_0 \ell \sec \theta)^4} - \dots + (-)^n \frac{m_{2n}}{(K_0 \ell \sec \theta)^{2n}} + \dots \right] + \frac{\sin(K_0 \ell \sec \theta)}{K_0 \ell \sec \theta} \left[\frac{m_1}{K_0 \ell \sec \theta} - \frac{m_3}{(K_0 \ell \sec \theta)^3} + \frac{m_5}{(K_0 \ell \sec \theta)^5} - \dots + (-)^n \frac{m_{2n+1}}{(K_0 \ell \sec \theta)^{2n+1}} + \dots \right], \quad (5 \cdot 27)$$

ここに, m_0, m_1, m_2, \dots は船首 $\xi = 1$ における $m(\xi)$ $m'(\xi), m''(\xi), \dots$ の値である。いま造波抵抗係数を

$$C_w = R_w / \left(\frac{1}{2} \rho V^2 L^2 \right), \quad (5 \cdot 28)$$

とおき, 三角関数の倍角公式を入れると, 最終的に次式をうる。

$$C_w = C_w(1) + C_w(2), \quad (5 \cdot 29)$$

ここに,

$$C_w(1) \sim \frac{4}{\pi} F^4 [m_0^2 A_1 \bar{U}_1 + (m_1^2 - 2m_0 m_2) \times A_2 \bar{U}_2 (\sqrt{2} F)^4 + \dots] \quad (5 \cdot 30)$$

$$C_w(2) \sim \frac{4}{\pi} (\pi/2)^2 U_0^2 F^5 [m_0^2 - (m_1^2 + 2m_0 m_2)$$

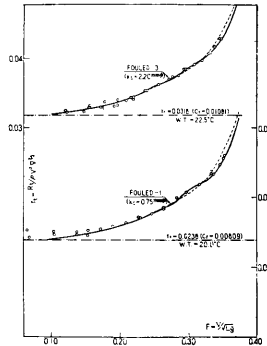


図 5・10 C_w ~ F_n の漸近表示 (4)
(やよい丸 3.5 m 粗面)

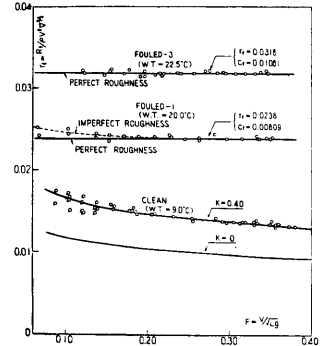


図 5・11 やよい丸 3.5 m 模型の
C_f 解析 (本法)

$$\times (\sqrt{2} F)^4 + \dots] \cos(K_0 L + \pi/4) - \frac{8}{\pi} \left(\frac{\pi}{2} \right)^2 U_0^2 F^5 [m_0 m_1 (\sqrt{2} F)^2 - (m_0 m_3 + m_1 m_2) (\sqrt{2} F)^6 + \dots] \sin(K_0 L + \frac{\pi}{4}), \quad (5 \cdot 31)$$

ただし F はフルード数 (V/\sqrt{Lg}) である。(5・29)

式で $C_w(1)$ は単調に増加 ($F \leq 0.5$) する基本項, $C_w(2)$ はハンブ, ホローの原因となる干渉項である。紙面の都合で A_1, A_2, U_0, U_1, U_2 の説明は省略する。^{24), 37)}

図 5・4 以下は上式の応用例を示す。図 5・4 は「船型学(抵抗篇)」p.32に出ている最適フルード数 $\sim C_b$ の関係(同書31図)と(5・31)式とを比較したものである。(ただし $C_b > 0.665$ では中央平行部の存在を仮定した)。図 5・5 は白馬山丸(JTTC 共同研究供試船), 図 5・6 は図 5・4 と同様に「船型学」に出ているものから抽出した。要は(5・29)式以下を当てはめることにより正確な $m(\xi)$ (つまり, その船の造波特性) が判らなくても, F 数の連続関数としての基本項 $C_w(1)$, および干渉項 $C_w(2)$ の大勢を知り, これを当てはめることで形状因子も求めれば, C_w 曲線の curve-fitting (曲線の当て嵌め) もできることを示した。また図 5・7 以下は造研 SR 2 の供試船“やよい丸”の滑面および粗面抵抗解析例で, 図 5・7 は C_w を不変とした従来のフルード式解析, 図 5・8 以下は筆者の方法によるそれである。

〔参 考 文 献〕

- 1) 岩波「数学辞典」(第3版), (昭61.3), 563
- 2) 同 上, 564
- 3) Hogner, E.: A contribution to the theory of ship waves, Arkiv for Matematik, Astronomi och Fysik, Bd.17, Na12(1922/23), 1 ~ 50
- 4) 森口繁一:「数値計算工学」, 岩波書店(平元4)

船の科学

- 1968), 27-35.
- 78) T. Inui, H. Kajitani, H. Narita and K. Mori: Wave analysis of simple hull forms—Effect of frameline forms (first report),
単純船型の波形解析——肋骨線形状の影響 (その1),
J. Soc. Nav. Archit. Jpn. 126 (Dec. 1969), 35-43.
- 79) T. Inui and H. Kajitani: Sheltering effect of complicated hull forms,
Proc. 12th International Towing Tank Conference, Rome (1969), 163-167.
- 80) T. Inui and H. Kajitani: Bow wave analysis of simple hull forms,
Proc. 12th International Towing Tank Conference, Rome (1969), 167-172.
- 81) T. Inui, H. Kajitani, H. Narita and K. Mori: Wave analysis of simple hull forms—Effect of frameline forms (second report),
単純船型の波形解析——肋骨線形状の影響 (その2),
J. Soc. Nav. Archit. Jpn. 128 (Dec. 1970), 11-18.
- 82) T. Inui, H. Kajitani, N. Fukutani and M. Yamaguchi: On wave-making mechanism of ship hull forms generated from undulatory source distributions, Selected Papers from the Soc. Nav. Archit. Jpn. Vol. 4 (1970), 63-75.
- 83) K. Mori, T. Inui, H. Kajitani and Y. Eguchi: The analysis of ship-side wave profiles and its application to hull form design,
船側波形による造波特性解析とその船型計画への応用,
J. Soc. Nav. Archit. Jpn. 132 (Dec. 1972), 11-28.
- 84) M. Yamaguchi, T. Inui and H. Kajitani: Flat bottom effects on wave-making resistance (first report),
高次船型の造波機構に対する平底影響 (第1報),
J. Soc. Nav. Archit. Jpn. 132 (Dec. 1972), 41-49.
- 85) K. Mori, T. Inui, H. Kajitani and Y. Eguchi: The analysis of ship-side wave profiles and its application to hull form design,
船側波形による造波特性解析とその船型計画への応用,
J. Faculty of Engineering, University of Tokyo (A) Vol. 10 (1972), 30-31.
- 86) T. Inui, H. Kajitani, H. Narita and K. Mori: Wave analysis of simple hull forms—Effect of frameline forms, Selected Papers from the Soc. Nav. Archit. Jpn. 9 (1972), 49-64.
- 87) T. Inui, H. Kajitani, S. Kuzumi and S. Ohkoshi: Flat bottom effects on wave-making resistance (second report),
高次船型の造波機構に対する平底影響 (第2報),
J. Soc. Nav. Archit. Jpn. 133 (June 1973), 1-6.
- 88) K. Mori, T. Inui and H. Kajitani: Analysis of ship-side wave profiles, with special reference to hull's sheltering effect, Proc. 9th Symposium on Naval Hydrodynamics, Vol. 1, Paris (1973), 687-758.
- 89) T. Kitazawa, T. Inui and H. Kajitani: Flow field measurement and analysis around an Inuid model with special reference to sheltering effect,
高次船型の流場解析,
J. Soc. Nav. Archit. Jpn. 135 (June 1974), 1-11.
- 90) T. Inui, S. Ohkoshi, H. Kajitani and S. Kuzumi: Measurements of flow velocity components around small models with mini five-hole pitot tube,
五孔管による小模型まわりの流場計測,
J. Kansai Soc. Nav. Archit. Jpn. 154 (Sept. 1974), 59-67.
- 91) T. Kitazawa, T. Inui and H. Kajitani: Velocity field measurements applied for analysis of ship's wave-making singularities,
Proc. 10th Symposium on Naval Hydrodynamics, Cambridge (1974), 549-564.
- 92) Y. Kusaka, T. Inui and H. Kajitani: On the hydrodynamical source singularities for surface ships with special reference to line integral,
自由表面条件を考慮した船型の等価特異点分布——とくに線積分効果について
J. Soc. Nav. Archit. Jpn. 138 (Dec. 1975), 12-22.
- 93) H. Okamura, T. Inui and H. Kajitani: Analysis of ship waves propagating on a non-uniform flow,
局部流を考慮した航走波の解析,
J. Soc. Nav. Archit. Jpn. 138 (Dec. 1975), 37-45.
- 94) T. Inui, H. Kajitani and N. Kato: Observation and analysis on the behaviour of stern vortices shed from wall-sided full forms, 肋骨線が垂直な肥大船の船尾渦に関する実験,
J. Soc. Nav. Archit. Jpn. 138 (Dec. 1975), 46-53.

- 95) T. Inui, H. Kajitani and H. Okamura: Propagation of ship wave on a non-uniform flow, Proc. 14th International Towing Tank Conference, Canada (1975)
- 96) T. Inui, H. Kajitani and Y. Kusaka: Analysis of hydrodynamical source singularities for surface ships, Proc. 14th International Towing Tank Conference, Canada (1975)
- 97) T. Inui: 波なし船型の研究について, 漁船 205号 (1976年10月), 1-10.
- 98) N. Kato, T. Inui and H. Kajitani: An approach to the stern flow of full hull form by vortex singularity distribution (part 1), 肥大船船尾流場の解析 (その1), J. Soc. Nav. Archit. Jpn. 140 (Dec. 1976), 38-44.
- 99) T. Inui, H. Kajitani, S. Kuzumi and S. Ohkoshi: Effects of local non-linear flow in ship waves, 船体造波における局所非線形影響, J. Faculty of Engineering, University of Tokyo (A) Vol. 14 (1976), 26-27.
- 100) T. Inui: Introductory remarks, Proc. International Seminar on Wave Resistance, Tokyo (1976), 7-18.
- 101) T. Inui and H. Kajitani: Hull form design, its practice and theoretical background, Proc. International Seminar on Wave Resistance, Tokyo (1976), 159-183.
- 102) T. Inui: 船の波はどこまで消えるか, 学士会会報 736号 (1977年7月), 37-43.
- 103) T. Inui and H. Kajitani: A study on local non-linear free surface effects in ship waves and wave resistance, A colloquium held on the occasion of the 25th anniversary of the Institut für Schiffbau, Hamburg, Schiffstechnik Bd. 24 (1977), 178-213.
- 104) M. Nagano, T. Inui and H. Kajitani: Coordinate straining theory for steady ship waves and wave resistance, International Joint Research Report 1977 (April 1978), 9-18.
- 105) A. Fujii, K. Nakatake, T. Inui and H. Kajitani: Evaluation of low speed theory by waves and wave resistance calculations of simple bodies, International Joint Research Report 1977 (April 1978), 19-50.
- 106) T. Inui and H. Kajitani: A study on local non-linear free surface effects in ship waves and wave resistance, International Joint Research Report 1977 (April 1978), 51-85.
- 107) H. Kadoi and H. Miyata: 最近における船用プロペラキャビテーションの試験法, 日本学術会議 キャビテーションに関するシンポジウム (第2回) テキスト (1978年4月), 1-19.
- 108) T. Inui and H. Miyata: On the optimization of overall performance of rudders (first report), 舵の総合性能の最適化に関する研究(第1報), J. Soc. Nav. Archit. Jpn. 144 (Dec. 1978), 30-39.
- 109) T. Inui: 船の波はどこまで消えるか, 日本の科学精神 3, 模型と実験 VI (工作舎) (1979年2月), 330-337.
- 110) Y. J. Lin, T. Inui, H. Kajitani, Y. Tsuchiya and M. Kanai: A hull form improvement by Guilloton's method, Guilloton 法による船型改良法, J. Kansai Soc. Nav. Archit. Jpn. 172 (March 1979), 65-74.
- 111) T. Inui and H. Kajitani: Local non-linear free surface effects acting upon elementary waves generated from bow through stern, International Joint Research Report 1978 (April 1979), 109-125.
- 112) H. Miyata, T. Inui and H. Kajitani: Experimental investigations on the wave making in the nearfield of ships, International Joint Research Report 1978 (April 1979), 147-174.
- 113) H. Miyata, T. Inui and H. Kajitani: Improvement of resistance property with modified rudders and stern bulbs, International Joint Research Report 1978 (April 1979), 175-189.
- 114) T. Inui and H. Miyata: On the optimization of overall performance of rudders (second report), 舵の総合性能の最適化に関する研究(第2報), J. Soc. Nav. Archit. Jpn. 145 (June 1979), 18-25.
- 115) S. Nakamura, T. Inui and H. Kajitani: Local non-linear free surface effects for hull generating elementary waves, 船体各部から発生する素成波の伝播特性に及ぼす局所流の影響, J. Soc. Nav. Archit. Jpn. 145 (June 1979), 37-45.
- 116) T. Inui, H. Kajitani and H. Miyata: Ex-