

船のまわりの境界層と造波の干渉問題について

正員 劉 浩* 正員 池 畑 光 尚**

On Interaction Problem between Boundary Layer and Wave around Ship

by Hao Liu, *Member* Mitsuhisa Ikehata, *Member*

Summary

In this paper an iterative method is proposed, combining an integral method based on 3-D boundary layer theory with Rankine-source method and considering the head loss due to viscosity in the equation of boundary condition on the free surface. The numerical calculation is carried out by using the Wigley models. The results of pressure distributions on the hull surface, wave profiles along the hull side, velocity distributions in the boundary layer and resistance components have been shown in comparison with measurements. They display good results to some extent. And the method has also been applied to the practical ship model Series 60 ($C_d=0.6$).

1. 緒 言

一様な速度で進行する船による船体周りの流場は自由表面を有する粘性流問題に属するものである。そして船体に働く抵抗は粘性と造波の混じった複雑な問題である。この問題は高度の非線形性が重なって解くことが困難なので通常その船に働く抵抗は非粘性抵抗としての造波抵抗と流体の粘性に起因する粘性抵抗に大別される。これらの二つの抵抗について歴史的には別々に議論され、各々かなり高いレベルに達するまで研究されてきた。造波抵抗理論はおよそ百年前の Michell の一貫性のある線形造波理論から今の非線形造波数値計算理論まで達成された成果がきわめて多く、かなりの精度まで実験値と合うまでになった。一方、後者の粘性抵抗理論は古典的な問題であった造波理論よりはるかに遅れて境界層理論の貢献により計算されてきた。近年、電子計算機の発達に伴って飛躍的に研究され、複雑な船体周りの粘性流場の挙動を解明することができるようになった。しかし二つの抵抗成分の間には複雑な相互干渉が存在する。そこでより現実の現象に近い精度の高い実用的な計算を行なうためにぜひともこの相互干渉を考慮しなければならない。

粘性影響（境界層影響）と造波との相互干渉問題はこれまでに多くの研究者によって扱われてきたが、その研究は大きく二つの観点に分類できる。その一つは造波抵抗に及ぼす粘性影響を考慮したものである¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾。もう一つは自由表面条件式を導く過程で粘性影響を考慮したものである⁷⁾⁸⁾⁹⁾。著者の一人らは前論文¹⁰⁾において後者の視点に立ち、境界層及び伴流流場とポテンシャル自由表面流（造波）流場とのつながりとして茂里¹¹⁾が提案した head loss を考慮した自由表面条件式を参考にして、伴流まで連続した計算が可能な池畑ら¹²⁾が提案した境界層及び伴流の反復計算法と荻原ら¹³⁾によりその有用性が立証された Rankine-source 法によるポテンシャル自由表面流の計算法とをベースにして、境界層と伴流の自由表面流に及ぼす影響を計算する方法を開発した。さらに一歩進んで境界層と造波の相互干渉問題を考えるとき、反復的解法は非常に有効である。本論文においては境界層が波に与える影響を求めめるのを第一近似 (step one) として、粘性による head loss を考慮した線形自由表面条件式を Rankine-source 法の逐次近似解法を応用して解き、それによる波の境界層に及ぼす影響の計算を第二近似 (step two) として境界層及び伴流の計算を積分的解法を用いて行う方法を開発した。そして step one と step two を収束まで繰り返していく反復法を用いた。

* 横浜国立大学大学院工学研究科博士課程

** 横浜国立大学工学部

2. 境界層と造波の干渉影響を考慮した自由表面流の計算法

2.1 基礎式

まず座標系を Fig.1 に示すように定義し、船体に固定された座標を (x, y, z) とする。船体周囲の境界層及び伴流流場の流速ベクトルを \vec{q}_0 と、自由表面の波動影響を表わす波動ポテンシャルを ϕ_w と置けば、境界層と造波の干渉を考慮した船体周囲流場の流速ベクトル \vec{q} は次のように表わされる。

$$\vec{q} = \nabla \phi_w + \vec{q}_0 \quad (1)$$

自由表面形状を

$$z = \zeta(x, y) \quad (2)$$

とすると、自由表面上で満足されるべき運動学的条件式は

$$\vec{q} \cdot \nabla(z - \zeta) = 0 \quad (z = \zeta) \quad (3)$$

また動学的条件式は

$$g\zeta + \frac{1}{2}(|\nabla \phi_w + \vec{q}_0|^2 - U_\infty^2) + g\delta H = 0 \quad (z = \zeta) \quad (4)$$

ここで $g\delta H$ は粘性による head loss を表わし、本計算では次の式で与えられる。

$$g\delta H = \frac{1}{2}U_\infty^2 - \left\{ \frac{1}{2}|\vec{q}|^2 + P/\rho \right\} \quad (5)$$

(3), (4) より ζ を消去すると

$$\vec{q} \cdot \nabla \left\{ gz + \frac{1}{2}(|\vec{q}|^2 - U_\infty^2) + g\delta H \right\} = 0 \quad (z = \zeta) \quad (6)$$

が得られる。更に $z=0$ 面に於ける \vec{q}_0 の x 方向, y 方向, z 方向の速度成分を u_0, v_0, w_0 とし, $z=0$ で $w_0=0$ とすれば, また波動影響を微小と仮定し, ϕ_w の二乗の項を無視し, 且つ $z=0$ で成立するとすると, (6)式は

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \left\{ u_0(u_0^2 + v_0^2 + 2g\delta H)_x + v_0(u_0^2 + v_0^2 + 2g\delta H)_y \right\} \\ & + \left\{ u_0(u_0\phi_{wx} + v_0\phi_{wy})_x + v_0(u_0\phi_{wx} + v_0\phi_{wy})_y \right\} \\ & + \frac{1}{2} \left\{ \phi_{wx}(u_0^2 + v_0^2 + 2g\delta H)_x + \phi_{wy}(u_0^2 + v_0^2 + 2g\delta H)_y \right\} \\ & + g\phi_{wz} = 0 \quad (z=0) \end{aligned} \quad (7)$$

ここで $z=0$ に於ける流れに沿う座標を l として座標変換を行なう時, 以下の関係がある。

$$u_0 F_x + v_0 F_y = q_0 F_l \quad \text{ただし} \quad q_0 = |\vec{q}_0| \quad (8)$$

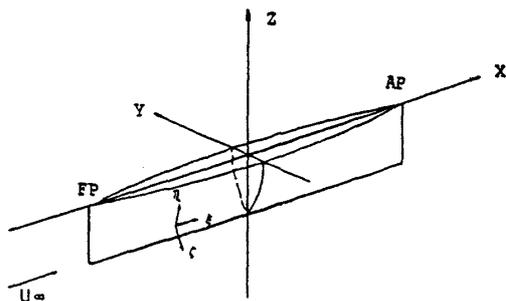


Fig. 1 Coordinate system

(8)式を用いて(7)式を \vec{q}_0 による流線 (l) 座標系に変換すると, 次式の自由表面条件式を得る。

$$\begin{aligned} & q_0(q_0\phi_{wl})_l + \phi_{wx}(q_0q_{0x} + g\delta H_x) + \phi_{wy}(q_0q_{0y} + g\delta H_y) \\ & + q_0g\delta H_l + g\phi_{wz} = -q_0^2q_{0l} \quad (z=0) \end{aligned} \quad (9)$$

一方, 船体表面で船体表面の外向き法線を n とすれば, ϕ_w が満たす境界条件は

$$\partial\phi_w/\partial n = 0 \quad (10)$$

2.2 境界層及び伴流流場 \vec{q}_0 の計算

自由表面を平面壁と見なし, 鏡像を考えた二重模型近似の場合の船体周囲の境界層及び伴流の計算は文献¹²⁾の方法に従った積分的解法である。二次流を微小と仮定し, 高次の項及び η に関する微係数を省略した運動量の積分条件式は, Fig. 1 に示す (ξ, η, ζ) 直交曲線座標を用いると以下のようなになる。

$$\partial(U^2\theta_{11})/h_1\partial\xi + \delta_1 U \partial U / h_1 \partial \xi - K_1 U^2 \theta_{11} = \tau_\epsilon / \rho \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \partial(U^2\theta_{21})/h_1\partial\xi - 2K_1 U^2 \theta_{21} + K_2 U(\theta_{11} + \delta_1) \\ & = \tau_\epsilon \tan \beta / \rho \end{aligned} \quad (12)$$

このとき ξ は船体表面のポテンシャル流線, η は等ポテンシャル線, ζ は船体表面の外向き法線を表わし, (u, v, w) を各々の方向成分とする流速ベクトルとする。また U は境界層外端速度, K_1 は流線の拡大縮小率, K_2 は流線の測地的曲率, h_1, h_2 はそれぞれ ξ, η 軸の尺度係数, τ_ϵ は壁面せん断応力の ξ 方向成分, β は壁面に於ける二次流角であり, θ_{11}, θ_{21} は運動量厚さ, δ_1 は排除厚さである。(11)(12)に Ludwig-Tillmann の局所摩擦則, Head 及び奥野の Entrainment 式, 二次流運動量モーメント式を加え, 文献¹²⁾の反復的解法を用いて, 粘性流場を解く。 \vec{q}_0 が境界層もしくは伴流中の流れである場合, 以下の流速モデルを用いて u, v を求める。

主流

$$\begin{cases} u/U = (\zeta/\delta)^m, & m = (H-1)/2, \quad H = \delta_1/\theta_{11} \quad (\text{境界層}) \\ u/U = 1 - (1 - u_c/U) \cos^4(\pi\zeta/2\delta) & (\text{伴流}) \end{cases} \quad (13)$$

$$\text{二次流} \quad v/u = \tan \beta (1 - \zeta/\delta)^2 + C(\zeta/\delta)(1 - \zeta/\delta)^2 \quad (14)$$

また η 方向の微係数を省略した連続の式を積分することにより w を求める。

$$w(\zeta) = \int_0^\zeta (K_1 u - \partial u / h_1 \partial \xi) d\xi + \int_0^\zeta K_2 v d\xi \quad (15)$$

境界層, 伴流の外部はポテンシャル流場と見なすことができ, 境界層及び伴流の排除影響を考慮した速度ポテンシャルは以下のようなになる。

$$\phi = U_\infty x - \iint_{A_H} (m_H + m_V) / r dS_H - \iint_{A_w} m_w / r dS_w \quad (16)$$

ここで U_∞ は一様流速, m_H は Hess & Smith 法で求まる船体表面上吹き出し分布密度, m_V は境界層の排除影響を表わす吹き出し分布密度, m_w は伴流の排除影響を表わす

吹き出し密度, A_H は船体表面, dS_H はその面素, A_w は船尾端から後方の中心線面, dS_w はその面素である。 r は各面素の位置から流場内の点までの距離を表わす。

2.3 波動ポテンシャル ϕ_w の計算

本論文では ϕ_w を Rankine-Source を用いて表現する。

$$\phi_w = - \iint_{A_1} \sigma_1 / r_1 dS_1 - \iint_{A_0} \sigma_0 / r_0 dS_0 \quad (17)$$

A_0 は船体表面, dS_0 はその面素, A_1 は自由表面, dS_1 はその面素を表わす。 r_0, r_1 はそれぞれの面素の位置から流場の点までの距離を表わす。

さて, ここで荻原の方法¹⁴⁾にならぬ, 方程式(9)と(10)の離散化を試みる。まず, 船体表面を M_0 個, 船体を囲む静水面の有限な領域を M_1 個の微小面素に分割する。各面素内の吹き出しを一定として(17)式を離散化し, (9)式に代入すると, 自由表面の境界条件に基づく次の連立方程式を得る。

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{M_1} \sigma_1(j) A_1(ij) + \sum_{j=1}^{M_0} \sigma_0(j) A_0(ij) - 2\pi g \sigma_1(i) &= B(i) \\ A_0(ij) &= q_0^2(i) CL_0(ij) + q_0(i) q_{0i}(i) L_0(ij) \\ &\quad + H_0(ij) \\ A_1(ij) &= q_0^2(i) CL_1(ij) + q_0(i) q_{0i}(i) L_1(ij) \\ &\quad + H_1(ij) \\ B(i) &= -q_0^2(i) q_{0i}(i) \quad (i=1, 2, \dots, M_1 \text{ on } A_1) \end{aligned} \quad (18)$$

一方, 船体表面の境界条件に基づく連立方程式は(17)式に(10)を代入することにより求められ, 以下のようなになる。

$$\sum_{j=1}^{M_1} \sigma_1(j) N_1(ij) + \sum_{j=1}^{M_0} \sigma_0(j) N_0(ij) = 0 \quad (19)$$

ここで $CL_0(ij), CL_1(ij), L_0(ij), L_1(ij), H_0(ij), H_1(ij), N_0(ij), N_1(ij)$ といった係数は文献¹⁰⁾を参照されたい。

(18)と(19)式は σ_1, σ_0 についての full matrix の連立方程式であり, 消去法を用いれば解くことができるが, 本計算では荻原の方法¹³⁾にならぬ, 効率的な近似計算法を採用する。

2.4 head loss の計算法

(5)式で与える $g\delta H$ を求めるためには, 流場内の流速及び圧力を計算しておく必要がある。境界層外流域はポテンシャル流と見なせるのでそこにおける head loss は零となる。境界層内部の流速分布, 及び圧力分布は, 境界層計算で求めた各境界層パラメータを用いて計算する。(5)式は次のようになる。

$$g\delta H = U_\infty^2 / 2 - \left\{ q^2 + Pe / \rho - \int_0^\delta \partial(P/\rho) / \partial \zeta d\zeta \right\} \quad (20)$$

ここで Pe は境界層外端における圧力, δ は境界層厚さであり, ζ は物体法線方向に取られている。積分式中の圧力勾配は通常薄い境界層理論では無視されるが, 永松にならって流体の遠心力影響を考慮した形式で(参考文献¹⁰⁾)と与えられる。

2.5 相互干渉の反復解法

Fig. 2 に計算手順を表わすプログラムの流れ図を示す。

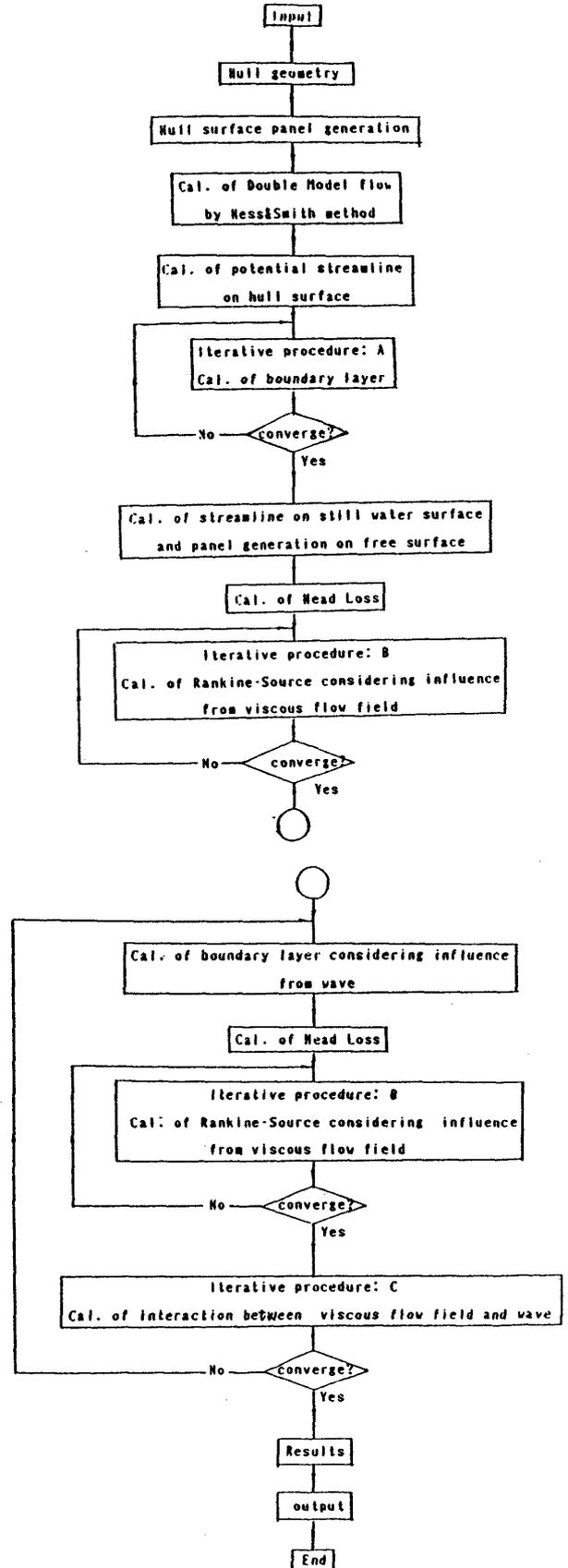


Fig. 2 Flow chart of numerical computation

以下では具体的な内容を説明する。

1) Hess & Smith 法を用い, Double Model による速度ポテンシャルを求め, 船体表面上及び後流中央面上でポテンシャル流線を計算する。つづいて修正 Hess & Smith 法と境界層計算法により, iterative procedure: A を行い, 粘性流場の各パラメータを計算する。

2) Double Model の下で, 静水面の流線を計算し, パネル分割を行なう。つづいて Rankine-source 法を用い, head loss による粘性影響の入った自由表面条件式を考慮して iterative procedure: B を行なう。

3) 造波の粘性流場に及ぼす影響を境界層外端速度だけへの寄与を考慮した境界層及び伴流計算を行なう。

4) 波の影響の入った粘性流場の造波に与える影響を head loss による粘性影響を考慮した上で iterative procedure: B を利用して計算する。

5) 反復計算 (iterative procedure: C) を収束まで繰り返す。実際に反復三回で収束したと見なし, 計算を打ち切る。

6) 最終反復回の計算結果を用いて, 文献¹⁰⁾と同じ計算式を採用して波高, 船体表面圧力, 圧力抵抗, 摩擦抵抗をそれぞれ計算する。

3. 計算結果と考察

計算対象として長さ 6 m と 2 m の Wigley 数学模型と 3 m の Series 60 ($C_d=0.6$) 船型を選んだ。各主要目は Table 1 に示し, Body plan は Fig. 3, 4 の通りである。

まず, 船体表面及び伴流中央面の要素分割を行なう。Wigley 模型は薄い船型の部類に入るので水線と横断面における肋骨線とを用いたメッシュでほど良くパネルに分割できる。Fig. 5 にそのパネル分割の様子を示す。Series 60 船型は境界層計算用のポテンシャル流線の K_1, K_2 の急変を避けるために船尾付近に於て Fig. 4 に示すように実線から点線に変形した。Fig. 6 にそのパネル分割の様子を示す。パネルの数は両船型とも船体表面片側で 260, 伴流中央

面で 90, 合計 350 個である。また, 境界層計算のために Fig. 3, 4 に示すような 10 本の流線を計算で求めた。一方, Fig. 7 に示すように Wigley model と Series 60 船型の自由表面のパネル分割は静水面において縦方向に最初の第一近似段階で求めた \bar{q}_0 により計算された流線と横方向に船体の幅方向に平行な直線とを用いて行った。 \bar{q}_0 による流線は船体の後半部で境界層と伴流の排除効果により外側に押し出されているが, 流線の間隔はさほど大きな差もなく比較的均等に近いのでこの流線をそのままパネル分割に用いても支障はないと判断した。

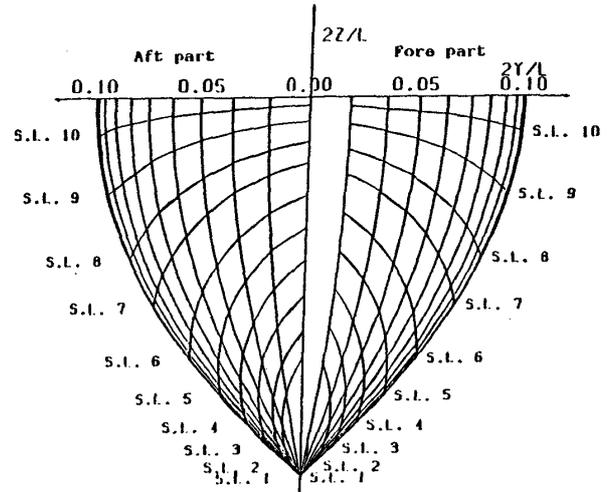


Fig. 3 Body plan and potential streamlines of Wigley model

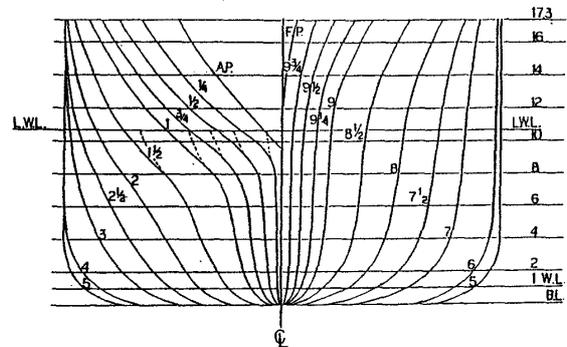


Fig. 4 Body plan and potential streamlines of Series 60 ($C_b=0.6$)

Table 1 Principal particular of models

| Ship form | Wigley | | Series 60 |
|--------------|--------|--------|-----------|
| Condition | Full | | Full |
| L_{pp} (m) | 6.000 | 2.000 | 3.000 |
| B | 0.600 | 0.200 | 0.400 |
| d | 0.375 | 0.125 | 0.160 |
| L/B | 10.000 | 10.000 | 7.500 |
| d/B | 0.625 | 0.625 | 0.400 |
| C_b | 0.444 | 0.444 | 0.600 |

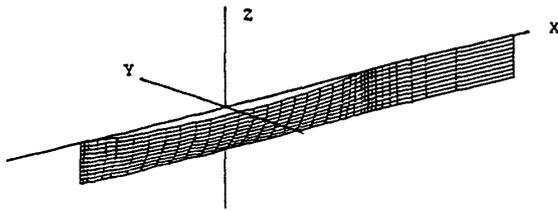


Fig. 5 Panel division on hull surface and center plane in wake of Wigley model

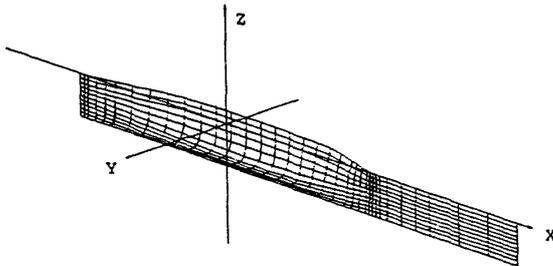


Fig. 6 Panel division on hull surface and center plane in wake of Series 60 ($C_b=0.6$)

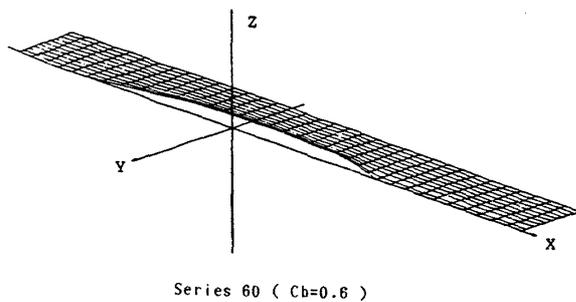
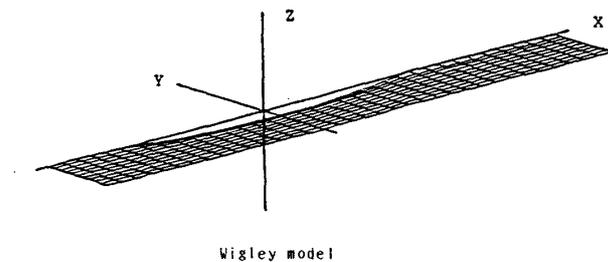


Fig. 7 Panel division on free surface around Wigley and Series 60 models

3.1 境界層と伴流

まず、造波の境界層に及ぼす影響を調査するために2.5で述べた3)によりWigley模型のポテンシャル流線1, 4, 7, 10に沿っての境界層厚さ及び外端速度を計算した。もっとも自由表面に影響される流線10について波の影響が入っていない結果との比較をFig. 8に示す。外端速度が造波の影響を受けて大体波の山谷付近で低くなったり高くなったりするのに対して境界層厚さがそれに応じて逆の傾向になっていることが分かる。また、自由表面に近づくにつれてその変化が大きくなる。

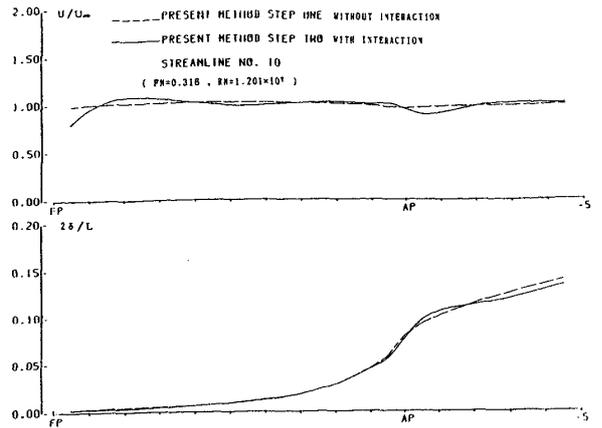


Fig. 8 Comparison of boundary layer thickness and external speed between present method step one and step two (streamline 10)

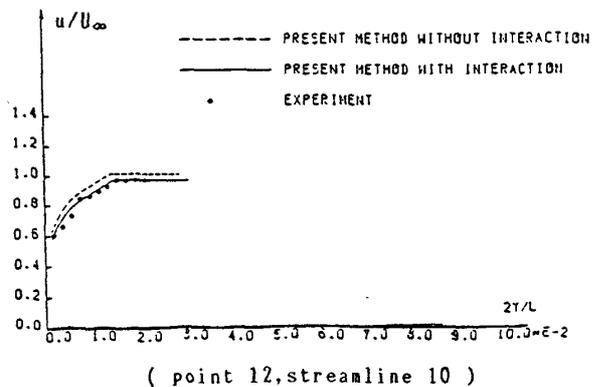
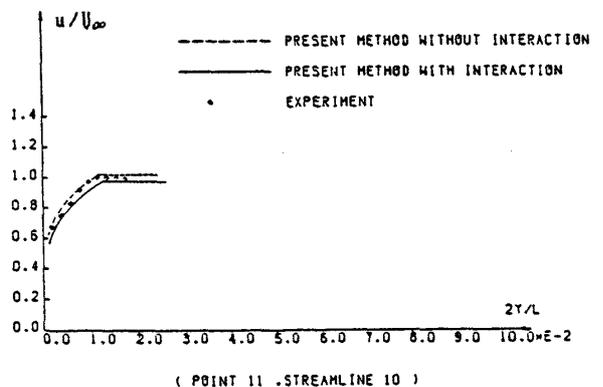
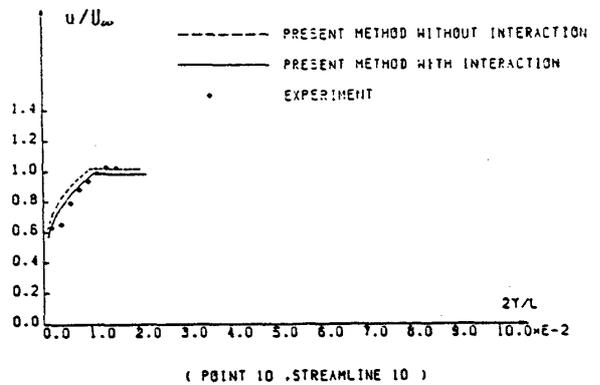


Fig. 9 Velocity profiles of x-component in boundary layer (streamline 10, point 10, 11, 12)

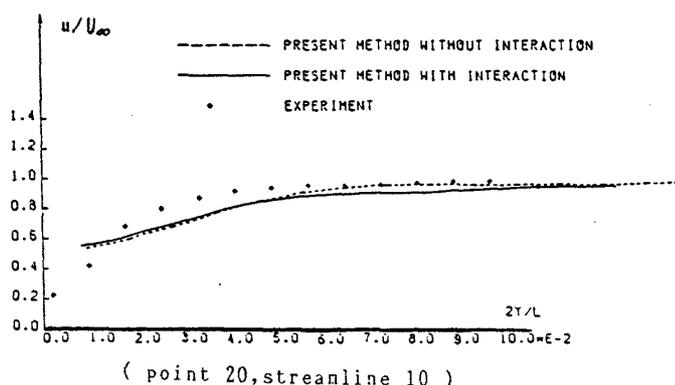
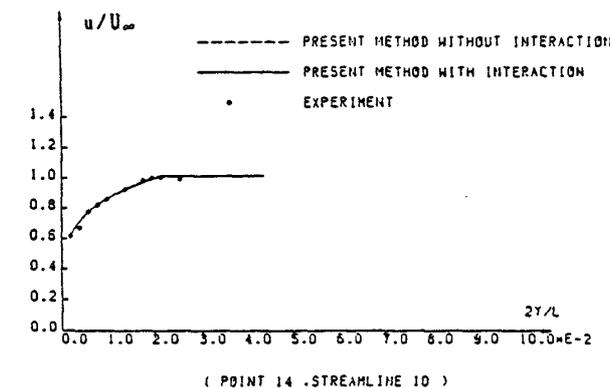
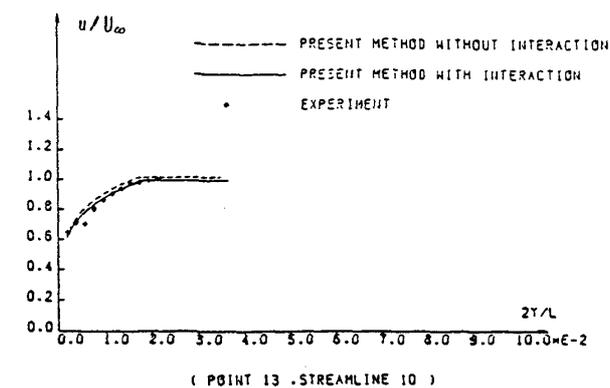


Fig. 10 Velocity profiles of x-component in boundary layer (streamline 10, point 13, 14, 20)

一方、現計算法の第二近似の段階で求めた Wigley 模型の流線 10 に沿っての境界層内部の速度分布を Fig. 9, 10 に示す。本計算では実験値と比較するために長さ 2 m の Wigley 模型を供試船型として、計算点は自由表面に近い流線 9, 10 を選んで境界層が充分発達したと見なせる後半部に於て Fig. 11 のように配置されている。結果は主流成分が波に影響されて、波の山のあるところでより小さく、谷のところで大きくなったりして、相互干渉を考慮した計算値は実験値とよく一致している。

3.2 head loss

Wigley model について、Fig. 12 に干渉無しと干渉有りの head loss の比較を示す。head loss の影響は船体表面の極近傍 (Line. 1) だけで大きい。Line. 1 の head loss に比べて Line. 2, Line. 3 の head loss は急減している。Line. 1 の head loss が船尾付近ではピークを取るのに対してそれ

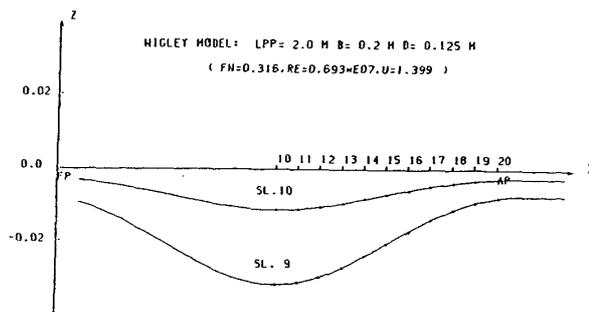


Fig. 11 Distribution of calculation points for the comparison of velocity profiles in boundary layer

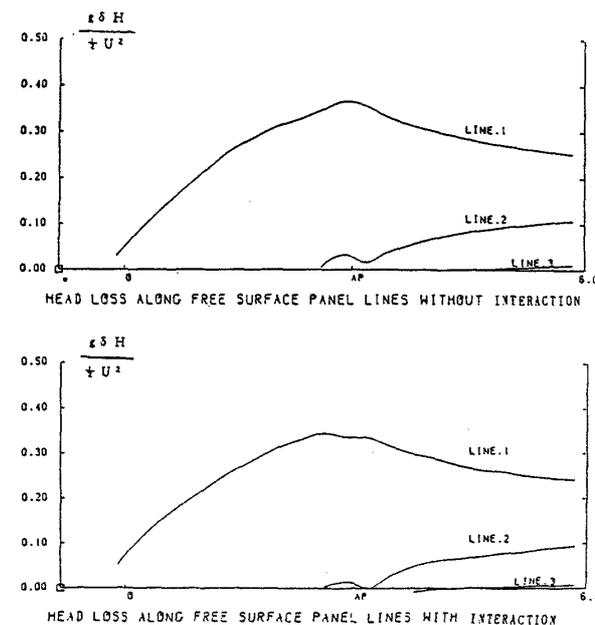


Fig. 12 Comparison of head loss along free surface panel lines ($F_n=0.316$, $R_n=1.201 \times 10^7$)

以外の head loss が船体後方に向かうにつれて徐々に増加している。一方、干渉を考慮した head loss のカーブは波状の起伏が現れている。これは明かに波の山谷の head loss に及ぼす影響のためである。二回反復計算を行なった時点で head loss の変動は殆ど収まる。

3.3 船側波形, 圧力分布, 抵抗成分

Fig. 13 に Wigley model の船側波形の結果を示す。今回の計算は step one と step two では大部分の範囲で殆ど差がないが、船尾付近で若干差が出ている。実験値はどちらかと言うと step two に近いように見える。又、Fig. 14 に Series 60 船型の船側波形を示す。同じく、船尾付近だけに於て step one と step two に相違がみられる。但、Wigley model の結果と比べて step one の船尾波が滑らかに落ち下がっていない様であるが、これはおそらく Series 60 の船尾の水線が AP. でかなり大きな run angle をもつ為であろうと思われる。干渉計算の結果 (step two) は波の立ち上がりをもっと急になり、落ち下がりをもっと穏やかになっている。又、計算値は船首尾に於てよく実験値と一致しているが、船側の大部分では位相が船首の方にずれている。

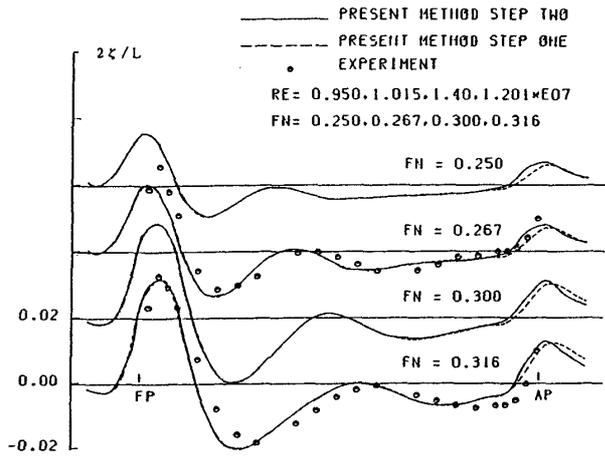


Fig. 13 Comparison of wave profiles of Wigley model

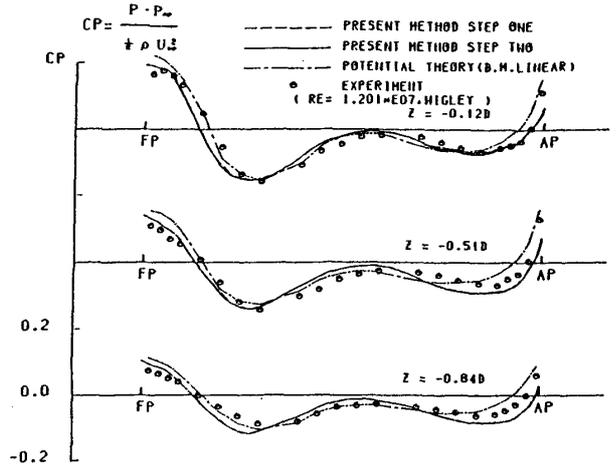


Fig. 15 Comparison of pressure distributions of Wigley model

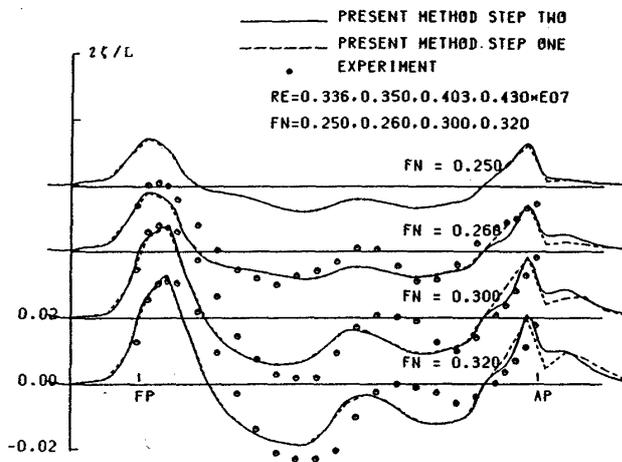


Fig. 14 Comparison of wave profiles of Series 60 (Cb = 0.6)

これは本計算では等間隔の直線の自由表面パネル分割を採用しているせいだと思われる。幅方向に後方に曲がったメッシュの取り方を用いれば、二番目の波頂が後方に移っていく可能性がある¹⁶⁾。

一方、Wigley model の船体表面の圧力分布を Fig.15 に示す。今回の計算では船尾に近づくにつれ増加する圧力損失によりポテンシャル計算との差が開き、実験値に近づいていると言えるが、相互干渉計算による step one と step two の差は自由表面に近い $z = -0.12D$ でほんのわずかにみられるだけである。

以上、境界層と造波の干渉影響を船側波形と圧力分布で見えてきたわけだが、境界層の造波に与える影響に比べて、造波の境界層に及ぼす影響があまり大きくないようである。船体表面圧力を船体表面に亘って積分すれば圧力抵抗が求まる。船体表面の摩擦応力を積分すれば摩擦抵抗が求まり、両者の合計から全抵抗が計算できる。Wigley model の各抵抗成分の計算結果及び実験値との比較は Fig. 16 に示す。圧力抵抗の計算値は波形造波抵抗曲線に近い傾向を示すが、ただ低速では曳航造波抵抗を上回ったり、高速で

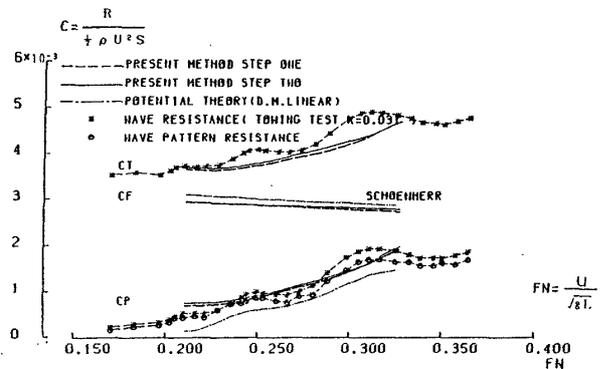


Fig. 16 Comparison of resistance components in coefficient of Wigley model

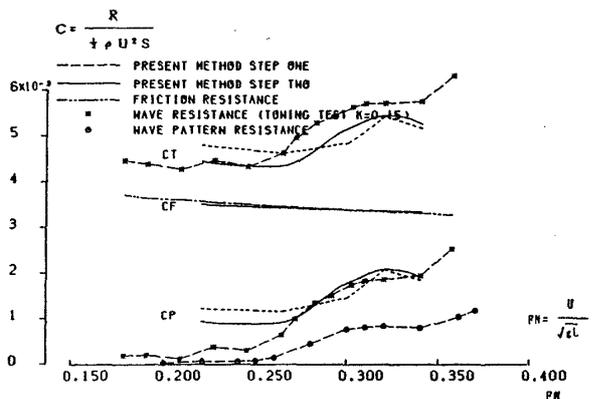


Fig. 17 Comparison of resistance components in coefficient of Series 60 (Cb = 0.6)

は下回ったりするという交差した結果が現われた。また、圧力抵抗及び全抵抗はそのハンブ、ホロー現象があまり明確に現われていない。step two の干渉計算でも同じ傾向を持つ。しかも、step one との差はわずかである。一方、摩擦抵抗は Schoenherr の平板公式より少し下回るが、ほぼ平行な曲線が得られた。step two の相互干渉計算の結果は高速でやや差が見られるだけである。Series 60 についての計算結果は Fig.17 に示す。高速では曳航抵抗成分と良くあ

っているのに対して低速では実験値を上回っている。しかし、Wigley modelの結果と比べると反復計算の結果はstep oneとstep twoの差がかなり現われてきて、step twoのほうがより実験値に近づく傾向を得た。摩擦抵抗は殆ど実験値と重なっている。

4. 結 言

本論文で得られたことを以下にまとめて示す。

1) ポテンシャル造波理論と積分型境界層理論とを組み合わせて、船体まわりの境界層と造波の相互干渉を考慮した自由表面流の反復計算法を開発し、船型まわりの自由表面流への数値的計算を行なった。

2) 自由表面条件式に粘性によるhead lossを取り入れることにより、境界層及び伴流の造波に及ぼす影響を求める方法を導いた。

3) Wigley 模型と Series 60 船型を用いた計算結果では境界層と造波の相互干渉効果を取り入れることによって、船側波形や圧力分布や抵抗成分などについて、より実験値に近づく傾向を得た。又、境界層内部の速度分布についても造波の影響を受けてよく実測の結果と一致している。

終りに当たり、有益な助言と討論を賜った鈴木和夫助教授に深く謝意を表わします。又、横浜国大試験水槽の田草川善助、岡田功の両氏ならびに実験を担当した学生の芦谷泰彦、鳥羽康介、村元啓介、吉原直光の四君にも感謝致します。なお、本研究の一部には文部省科学研究補助金の助成を受けたことと、計算には東大大型計算機センターと横浜国立大学情報処理センターのシステムを利用したことを付記し、関係者各位に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) Havelock, T. H.: Ship waves: The Relative Efficiency of Bow and Stern, Proceeding of Royal Society, (A) 149, (1935)
- 2) Milgram, J. H.: The Effect of a Wake on the Wave Resistance of a Ship, Journal of Ship Research., Vol. 13, No. 1 (1969)
- 3) Hinatsu, M. and Adachi, H.: On Evaluation of Wave Resistance Including the Effect of Boundary Layer, Journal of Kansai Society of Naval Architects, Japan, No. 185 (1982)
- 4) Hinatsu, M. and Takeshi, H.: A Calculation Method for Resistance Prediction Including Viscid-Inviscid Interaction, 2nd International Symposium on Ship Viscous Resistance, 1985 March, Goteborg, Sweden
- 5) Lasso, L. And Chang, M. S.: Numerical Viscous and Wave Resistance Calculations Including Interaction, 13th Symposium on Naval Hydrodynamics, Tokyo (1980)
- 6) 土井康明, 梶谷尚, 北村徹: 船尾造波特性に及ぼす境界層, 伴流の影響, 日本造船学会論文集, 第159号 (1986)
- 7) 姫野洋司, 高木又男: 粘性流体における造波抵抗, 日本造船学会論文集, 第130号 (1971)
- 8) 丸尾孟, 松村純一: 粘性流体における船の波及び造波抵抗, 日本造船学会論文集, 第134号 (1973)
- 9) Mori, K.: Prediction of Viscous Effects on Wave Resistance of Ship in Framwork of Low Speed Wave Resistance Theory, Mem. of the Faculty of Eng. of Hiroshima Univ., Vol. 7, No. (1979)
- 10) 池畑光尚, 田原裕介: 船体周りの自由表面流に及ぼす境界層と伴流の影響, 日本造船学会論文集, 第200号 (1987)
- 11) Mori, K., Nishimoto, H.: Prediction of Flow Fields around Ships by Modified Rankine Source Method (1st Report), Journal of Society of Naval Architects of Japan, Vol. 150 (1981)
- 12) 池畑光尚, 長瀬 裕, 丸尾 孟: 境界層理論を改良した船尾粘性流場の解法, 日本造船学会論文集, 第152号 (1983)
- 13) 荻原誠功: Rankine Source による船体まわりの流れの近似計算法, 関西造船協会誌, 第190号 (1983)
- 14) 荻原誠功, 丸尾 孟: 船体まわりの自由表面流れの非線形計算法, 日本造船学会論文集, 第157号 (1985)
- 15) 並松正明, 荻原誠功, 田中 拓, 日夏宗彦, 梶谷 尚: Wigley 相似模型の水槽試験結果の評価 3. 船体表面圧力計測結果の検討, 関西造船協会誌, 第197号 (1985)
- 16) 中武一明, 田中英雄: 水面分割方の違いによる波形の変化, NTG 11-4, 1986