

# 舵付船の自航特性について

—プロペラ荷重度の影響—

森山 文雄\* 菅井 信夫\*

## On the Propulsive Performance of a Ship with Rudder

—Propeller Loading Effect—

By

Fumio MORIYAMA, Nobuo SUGAI

### (Abstract)

As a rudder behind a hull and a propeller has a great influence on the propulsive performance, it is important to research the rudder effects on ship propulsion. Recently, one of the authors presented the method which estimates the propeller-rudder interactive forces qualitatively by paying attention to rudder thickness effects and adapting thick wing theory. The other of the authors performed the propeller load tests of ships without rudder and discussed the propulsive effects as a function of propeller load.

In this paper, the authors deal with the problem in the case that a propeller and a rudder are behind a hull. The propeller load test of a ship with a rudder is carried out including a measurement of rudder drag, and the method which estimates the propulsive effects of a rudder by changing the propeller load is discussed.

### 1 緒 言

自航船のプロペラ後方におかれた舵は、推進特性に大きな影響を与えるので、その効果をしらへることは重要な問題である。近年、船の推進性能を船体、プロペラ、舵の相互干渉問題として取扱い、より定量性をもたせた理論的推定法の開発かなされつつある<sup>1)</sup>。

一方、推進性能におよぼす舵の効果に関する研究は多くの研究者によって実験的、理論的な手法で行われてきたか、最近、プロペラ後流中におかれた舵の厚みを流体力学的により厳密に表わすことによって、舵の特性を定量的に推定する理論計算法が導かれている<sup>2)</sup>。

本報告では、舵無船のプロペラスラストに対する推進諸特性が既知の場合に<sup>3)</sup>、文献〔2〕の方法を用いてその船に舵が装備されたときの推進特性を舵無状態からの変化量の形で求める手法を導き、プロペラ荷重度の広い範囲で舵の効果をしらへた。

\* 推進性能部 原稿受付 昭和56年3月2日

### 2 基礎理論

#### 2.1 座標系及び船体、プロペラ、舵の幾何表示

Fig 1 に示すように、船体の後方に無限翼数のプロペラと厚みを有する舵がおかれている場合を考える。座標系として船体中央の水線面上に原点  $O$  をもち船体に固定した  $O-XYZ$  直交座標系、プロペラ中心  $O'$  に固定した  $O'-xyz$  直交座標系及び  $O'-xr\theta$  円筒座標系をとる。さらに補助座標系として舵表面に原点  $O''$  をもち、外向き法線方向に  $\zeta$  軸をもつ  $O''-\xi\eta\zeta$  直交座標系及び船体表面  $O'''$  に原点をもち、その法線方向に  $\gamma$  軸をもつ  $O'''-\alpha\beta\gamma$  直交座標系をとる。

プロペラは、半径  $r_0$ 、ホス半径  $r_B$ 、半径  $r=r$  におけるプロペラ翼弦長を  $c(r)$ 、プロペラ翼の有効ピッチを  $2\pi a(r)$  とし、近似的に rake, skew 及び翼厚さを無視した無限翼数プロペラで置換えるとプロペラ面 (SP) は次式で表わされる。

$$(SP) \quad x=0 \quad r_B \leq r \leq r_0 \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi \quad (2.1.1)$$

舵は高さ  $(\bar{y}_{Ru} + \bar{y}_{Rl})$ 、幅  $2\bar{x}_R$  の矩型舵とし、舵

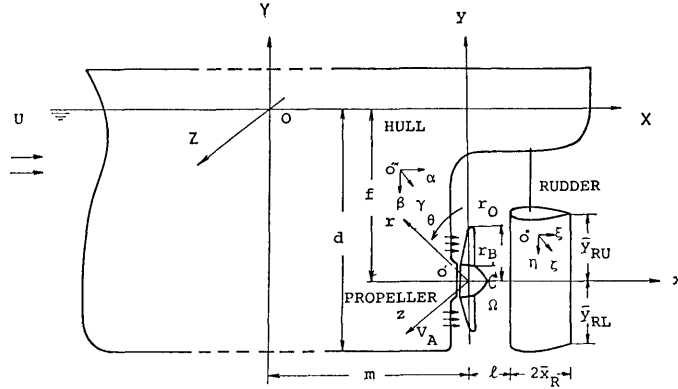


Fig. 1 Coordinate System

前縁とプロペラ面 (SP) との距離を  $l$  とする。舵表面 (SR) 及びその自由渦層 (SF) は次式で表わされる。

$$(SR) \quad Z = \pm Z_R(x_R, y_R) \quad \dots\dots(2.1.2)$$

ただし,

$$l \leq x_R(\xi, \eta) \leq l + 2\bar{x}_R, \\ -\bar{y}_{Rl} \leq y_R(\xi, \eta) \leq \bar{y}_{Ru}$$

$$(SF) \quad Z = 0 \quad \dots\dots(2.1.3)$$

ただし,

$$l + 2\bar{x}_R \leq x_R(\xi, \eta) < \infty, \\ \bar{y}_{Rl} \leq y_R(\xi, \eta) \leq \bar{y}_{Ru}$$

船体は長さ  $L$ , 幅  $B$ , 吃水  $d$  とし, プロペラ面 (SP) と船体中央との距離を  $m$ , プロペラ軸の深度を  $f$  とする。船体表面 (SH) は次式で表わされる。

$$(SH) \quad Z = \pm Z_H(X_H, Y_H) \quad \dots\dots(2.1.4)$$

ただし

$$-\frac{L}{2} \leq X_H(\alpha, \beta) \leq \frac{L}{2}, \quad -f \leq Y_H(\alpha, \beta) \leq 0$$

## 2.2 速度ポテンシャル

今, 船が静水中を一定速度  $U$  で前進しているものとし, 船体のつくる伴流中にプロペラ及び舵がおかれているものとする。ここでは, 造波の影響は無視する。さらに, プロペラ面 (SP) に流入する流速は, その不均一な分布をプロペラ面内で平均化した流速  $V_A$  で置換える。そして, この流入速度  $V_A$  の場の中でプロペラが一定角速度  $\Omega$  で  $\theta$  の負の方向に回転しているものとし, その後方  $l$  なる距離に舵がある場合を考える。

プロペラは, 面 (SP) に分布して半径方向に軸をもつ束縛渦とそれから流出する自由渦で置換えること

(134)

ができる。プロペラ面に分布する束縛渦の強さを  $\Gamma(r, \theta)$ , 自由渦のピッチを  $2\pi h(r)$  とおけば, プロペラによる速度ポテンシャル  $\phi_P$  は次式で表わされる。

$$\phi_P = \frac{1}{4\pi} \int_{r_B}^{r_0} dr' \int_0^{2\pi} \Gamma(r', \theta') \\ G_P(x, y, z; r', \theta') d\theta' \quad \dots\dots(2.2.1)$$

$G_P(x, y, z; r', \theta')$  はプロペラを表わすグリーン関数で, 次式で表わされる。

$$G_P(x, y, z; r', \theta') = \\ \frac{r'/h(r')}{\sqrt{x^2 + (y-r'\cos\theta')^2 + (z-r'\sin\theta')^2}} \\ + \frac{-(y-r'\cos\theta')\sin\theta' + (z-r'\sin\theta')\cos\theta'}{(y-r'\cos\theta')^2 + (z-r'\sin\theta')^2} \\ \left\{ 1 + \frac{x}{\sqrt{x^2 + (y-r'\cos\theta')^2 + (z-r'\sin\theta')^2}} \right\} \\ \dots\dots(2.2.2)$$

プロペラの後方におかれた舵は厚みをもつ揚力物体として作用するので, これを厚翼<sup>4)</sup>として取扱ひ, 舵表面 (SR) 上に分布する強さ  $\sigma_R(\xi, \eta)$  の source と, 面 (SR) 及び自由渦層 (SF) 上に分布し面の法線方向に軸をもつ強さ  $\mu(\xi, \eta)$  の doublet で置換えることができる。舵による速度ポテンシャル  $\phi_R$  は, その荷重に関する項  $\phi_{RS}$  及び舵厚さに関する項  $\phi_{RD}$  に分けて次式で表わされる。

$$\phi_R = \phi_{RS} + \phi_{RD} \\ \phi_{RS} = \frac{1}{4\pi} \iint_{(SR)} \sigma_R(\xi', \eta') \\ G_{RS}(x, y, z; \xi', \eta') d\xi' d\eta' \\ \phi_{RD} = \frac{1}{4\pi} \iint_{(SR)+(SF)} \mu(\xi', \eta')$$

$$GRD(x, y, z; \xi', \eta') d\xi' d\eta' \quad \dots\dots(2.2.3)$$

ここで,  $G_{RS}(x, y, z; \xi', \eta')$ ,  $GRD(x, y, z; \xi', \eta')$  はそれぞれ舵厚さ及び荷重を表わすグリーン関数で, 座標系  $0'-xyz$  と座標系  $0''-\xi\eta\zeta$  の変換 matrix ( $M_R$ ) で結びつけられた関係式

$$(x, y, z) = (M_R)(\xi, \eta, \zeta) \quad \dots\dots(2.2.4)$$

を用いて表わせば次式のようになる。

$$\left. \begin{aligned} G_{RS}(x_E, y_E, z_E; \xi', \eta') \\ &= \frac{1}{\sqrt{(x_E - \xi')^2 + (y_E - \eta')^2 + z_E^2}} \\ GRD(x_E, y_E, z_E; \xi', \eta') \\ &= \frac{z_E}{\sqrt{(x_E - \xi')^2 + (y_E - \eta')^2 + z_E^2}^3} \\ (x, y, z) &= (M_R)(x_E, y_E, z_E) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(2.2.5)$$

船体は無揚力物体として取扱い, 船体がプロペラ, 舵に与える流入速度場は粘性の影響を強く受けるので, 本論では流入速度  $V_A$  の推定には伴流計測値を用いる。そして船体はプロペラ及び舵の影響を受ける被作用物体として取扱い, 船体表面 ( $SH$ ) に分布する強さ  $\sigma_H(\alpha', \beta')$  の source で置換えると, 速度ポテンシャル  $\phi_H$  は次式で表わされる。

$$\phi_H = \frac{1}{4\pi} \iint_{(SH)} \sigma_H(\alpha', \beta') \quad G_H(x, y, z; \alpha', \beta') d\beta' d\alpha' \quad \dots\dots(2.2.6)$$

ここで  $G_H(x, y, z; \alpha', \beta')$  は船体を表わすグリーン関数で次式で表わされる。

$$\begin{aligned} G_H(x, y, z; \alpha', \beta') \\ &= \frac{1}{\sqrt{(x_E - \alpha')^2 + (y_E - \beta')^2 + z_E^2}} \\ (x, y, z) &= (M_H)(x_E, y_E, z_E) \end{aligned} \quad \dots\dots(2.2.7)$$

ここで matrix ( $M_H$ ) は座標系  $0'-xyz$  と座標系  $0''-\alpha\beta\gamma$  の関係を表わす。

### 2.3 境界条件

プロペラ面における境界条件は,  $x$  及び  $\theta$  方向の流入速度を  $[V_x^*]_{(SP)}$ ,  $[V_\theta^*]_{(SP)}$  とおけば次式で表わされる。

$$\begin{aligned} &\left[ \frac{2\sqrt{r^2 + a(r)^2}}{Nk_1 rc(r)} + \frac{r^2 + h(r)^2}{2h(r)r^2\kappa(r, h)} \right] \Gamma(r, \theta) \\ &+ \left[ \frac{\partial\phi_P}{\partial x} \right]_{(SP)} - \frac{h(r)}{r} \left[ \frac{\partial\phi_P}{r\partial\theta} \right]_{(SP)} \\ &= \frac{a(r)}{r} [V_\theta^*]_{(SP)} - [V_x^*]_{(SP)} \quad \dots\dots(2.3.1) \end{aligned}$$

ただし

$$\left. \begin{aligned} [V_x^*]_{(SP)} &= V_A + \left[ \frac{\partial\phi_R}{\partial x} \right]_{(SP)} \\ [V_\theta^*]_{(SP)} &= r\Omega + \left[ \frac{\partial\phi_R}{r\partial\theta} \right]_{(SP)} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(2.3.2)$$

ここで,  $\kappa(r, h)$  及び  $k_1$  は有限翼数及び揚力面補正係数である。

プロペラ自由渦の流出条件は, プロペラ面上の  $x$  及び  $\theta$  方向の流速を  $[V_x]_{(SP)}$ ,  $[V_\theta]_{(SP)}$  とし, それらの  $\theta$  方向平均を  $[V_{ox}]_{(RP)}$ ,  $[V_{o\theta}]_{(SP)}$ , 流出自由渦に対する実験的修正係数を  $A$  とすれば, 次式で表わされる。

$$h(r) = A \frac{r[V_{ox}]_{(SP)}}{[V_{o\theta}]_{(SP)}} \quad \dots\dots(2.3.3)$$

ただし

$$\left. \begin{aligned} [V_x]_{(SP)} &= [V_x^*]_{(SP)} + \frac{\Gamma(r, \theta)}{2h(r)\kappa(r, h)} \\ &+ \left[ \frac{\partial\phi_P}{\partial x} \right]_{(SP)} \\ [V_\theta]_{(SP)} &= [V_\theta^*]_{(SP)} - \frac{\Gamma(r, \theta)}{2r\kappa(r, h)} \\ &+ \left[ \frac{\partial\phi_P}{r\partial\theta} \right]_{(SP)} \\ [V_{ox}]_{(SP)} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [V_x]_{(SP)} d\theta \\ [V_{o\theta}]_{(SP)} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [V_\theta]_{(SP)} d\theta \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(2.3.4)$$

舵表面における境特界条件は, 舵表面 ( $SR$ ) の法線ベクトルを  $\vec{n}_R = (n_{Rx}, n_{Ry}, n_{Rz})$ , 舵表面への流入速度ベクトルを  $\vec{V}_R$  とおけば, 次式で表わされる。

$$\left[ \frac{\partial\phi_R}{\partial n_R} \right]_{(SR)} + [\vec{V}_R \cdot \vec{n}_R]_{(SR)} = 0 \quad \dots\dots(2.3.5)$$

ただし

$$\left. \begin{aligned} \vec{V}_R &= ([V_x^*]_{(SR)}, 0, [V_z^*]_{(SR)}) \\ [V_x^*]_{(SR)} &= V_A + \frac{\Gamma(r, \theta)}{h(r)} + \left[ \frac{\partial\phi_P}{\partial x} \right]_{(SR)} \\ [V_z^*]_{(SR)} &= \left\{ -\frac{\Gamma(r, \theta)}{r} + \left[ \frac{\partial\phi_P}{r\partial\theta} \right]_{(SR)} \right\} \cos \theta \\ &\quad \theta=0 \text{ or } \pi \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(2.3.6)$$

舵の自由渦の流出条件は舵後縁からわずかに流出した自由渦層上で考える。自由渦層上に立てた法線ベクトルを  $\vec{n}_P = (0, 0, 1)$  とし, 後縁における量を ( $TE$ ) なる添字で表わせば, 流出条件は次式で表わされる。

$$\left[ \frac{\partial \phi_R}{\partial \mathbf{n}_F} \right]_{(TE)} + [\vec{V}_P \cdot \vec{n}_F]_{(TE)} = 0 \dots (2.3.7)$$

ここで、舵の揚力効果を表わす doublet 分布  $\mu(\xi, \eta)$  を、その分布型に関する項  $\mu_0(\xi, \eta)$  と自由渦の強さに関する項  $B(\eta)$  に分けて

$$\mu(\xi, \eta) = \mu_0(\xi, \eta)B(\eta) \dots (2.3.8)$$

とおく。 $\mu_0(\xi, \eta)$  は (SF) 上で一定値をとり、(SR) 上では任意の分布が選択できる。

船体表面における境界条件は、船体表面上に立てた法線ベクトルを  $\vec{n}_H = (n_{Hx}, n_{Hy}, n_{Hz})$  とおけば、次式で表わされる。

$$\left[ \frac{\partial \phi_H}{\partial \mathbf{n}_H} \right]_{(SH)} + \left[ \frac{\partial(\phi_P + \phi_R)}{\partial \mathbf{n}_H} \right]_{(SH)} + u \left[ \frac{\partial x}{\partial \mathbf{n}_H} \right]_{(SH)} = 0 \dots (2.3.9)$$

式 (2.3.1) (2.3.3) (2.3.5) (2.3.7) (2.3.9) を未知数  $\Gamma(r, \theta)$ ,  $h(r)$ ,  $\sigma_R(\xi, \eta)$ ,  $B(\eta)$ ,  $\sigma_H(\alpha, \beta)$  について解けば、 $\phi_P$ ,  $\phi_R$ ,  $\phi_H$  が求まり、各々の干渉流体力が求まる。

#### 2.4 流体力

プロペラに働くスラスト  $T$  及びトルク  $Q$  は、水の密度を  $\rho$ 、プロペラ翼の粘性抗力係数を  $C_{PD}$  とおけば、次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} T &= \rho \int_{r_B}^{r_0} \left\{ \int_0^{2\pi} \Gamma(r, \theta) [V_\theta]_{(SP)} d\theta \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{2} C_{PD} N c(r) \sqrt{1 + \frac{h(r)^2}{r^2}} \right. \\ &\quad \left. \times [V_{0x}]_{(SP)} [V_{0\theta}]_{(SP)} \right\} dr \\ Q &= \rho \int_{r_B}^{r_0} \left\{ \int_0^{2\pi} \Gamma(r, \theta) [V_x]_{(SP)} d\theta \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} C_{PD} N c(r) \sqrt{1 + \frac{h(r)^2}{r^2}} \right. \\ &\quad \left. [V_{0\theta}]_{(SP)} \right\} r dr \end{aligned} \right\} \dots (2.4.1)$$

舵に働く抗力  $F_{Rx}$  は、舵表面の圧力を  $p$ 、舵表面の  $x$  方向流速の平均量を  $\bar{V}_{Rx}(\eta)$ 、舵の粘性抗力係数

を  $C_{RD}$  とおけば、次式で表わされる。

$$F_{Rx} = - \iint_{(SR)} p \cdot n_x d\xi d\eta + \rho \int_{(SR)} C_{RD} \bar{x}_R \bar{V}_{Rx}^2 d\eta \dots (2.4.2)$$

プロペラによる船体抵抗増加量を  $F_{PH}$ 、舵によるそれを  $F_{RH}$  とおけば次式で表わされる。

$$F_{PH} = 4\pi\rho \iint_{(SH)} \sigma_H(\alpha, \beta) \left[ \frac{\partial \phi_P}{\partial x} \right]_{(SH)} d\alpha d\beta \dots (2.4.3)$$

$$F_{RH} = 4\pi\rho \iint_{(SH)} \sigma_H(\alpha, \beta) \left[ \frac{\partial \phi_R}{\partial x} \right]_{(SH)} d\alpha d\beta \dots (2.4.4)$$

### 3. 自航船における舵の影響

Fig. 2 に示すように、舵付模型船が速度  $U$  で前進しながらプロペラスラスト  $T$  を得る回転数  $n(=2\pi\Omega)$  でプロペラを回転しているものとする。このとき、船の全抵抗を  $R$ 、模型船が曳引される力 (例えば、抵抗動力計にかかる力) を  $R_M$ 、 $R_M$  の船体に作用している成分を  $R_{M0}$ 、舵抗力を  $F_{Rx}$  とおけば、力のつり合いから次式が成立する。

$$R = R_M + T = R_{M0} + F_{Rx} + T \dots (3.0.1)$$

#### 3.1 船体抵抗増加

本報では、舵付船の推力減少を考える際に、船体とプロペラ又は舵との相互干渉効果によって生ずる船体抵抗増加量  $F_{PH}$  及び  $F_{RH}$  と、プロペラと舵の相互干渉によって生ずる舵抗力  $F_{Rx}$  を区別して考える。

今、 $T=0$  の場合、船体だけの抵抗を  $R_{M0}=R_C$  とおき  $R_C$  を基準にして抵抗増加量  $F_{PH}$ ,  $F_{RH}$  を導けば次式が得られる。

$$R - R_C = F_{PH} + F_{RH} + F_{Rx} \dots (3.1.1)$$

ここで、舵無船では

$$R - R_C = F_{PH} \dots (3.1.2)$$

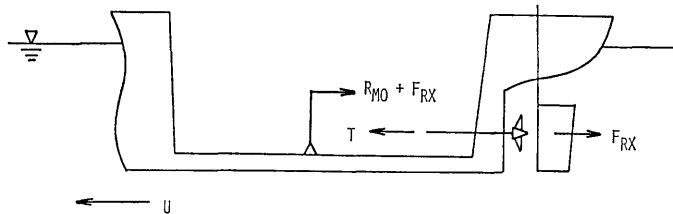


Fig. 2 Condition on Propulsion of a Ship with Rudder

となる。 $R_C$  は同一船速、プロペラ、舵無し状態の抵抗試験時の抵抗量  $R_0$  と異なり、一般に  $R_C > R_0$  である<sup>3)</sup>。

プロペラと船体の相互干渉効果について、文献〔3〕の手法を用いると、第1次近似では、 $F_{PH} \propto \Gamma$  (プロペラ束縛渦強さ) であり  $B_0$  を定数として次式で表わされる。

$$F_{PH} = \rho \Gamma B_0 \quad \dots\dots(3.1.3)$$

同様に、舵と船体の干渉について考える。 $F_{RH}$  の大部分は舵の排除効果すなわち  $\sigma_R(\xi, \eta)$  から生じるものとすれば、 $F_{RH} \propto V_P$  (プロペラ後流速度) で、式(2.3.6) から  $\alpha$  を定数として

$$V_P = V_A + \Gamma \cdot \alpha \quad \dots\dots(3.1.4)$$

で表示される。ここで、 $T=0$  の場合の  $F_{RH}$  は大きくないものとすれば、式(3.1.4)の第2項のみの寄与を考慮して、 $F_{RH}$  は、 $E_0$  を定数として次式で表わされる。

$$F_{RH} = \rho \Gamma E_0 \quad \dots\dots(3.1.5)$$

プロペラスラスト係数を  $C_T$ 、船体抵抗増加係数を  $C_{GH}$  とおき

$$\left. \begin{aligned} C_T &= \frac{T}{\frac{1}{2} \rho A_P U^2} \\ C_{GH} &= \frac{F_{PH} + F_{RH}}{\frac{1}{2} \rho A_P U^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots(3.1.6)$$

ただし  $A_P = \pi r_0^2$

で定義し、式(3.1.3)(3.1.5)を無次元表示すれば、第1近似では次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} \frac{C_{GH}}{C_T} &= \frac{\bar{B}_0 + \bar{E}_0}{\bar{U}_{a0} + \sqrt{C_T + \bar{U}_{a0}^2}} \\ \bar{U}_{a0} &= \frac{V_A}{U} \end{aligned} \right\} \dots\dots(3.1.7)$$

ここで、 $\bar{B}_0 > 0$ 、 $\bar{E}_0 < 0$  である。

### 3.2 舵抗力

舵抗力は式(2.4.2)で表わされるように、プロペラと舵の相互干渉効果によって圧力成分と粘性成分に分けられ、一般に  $F_{Rz} \propto V_P^2 = (V_A + \Gamma \alpha)^2$  なる関係で示される。舵抗力係数  $C_R$  を次式で定義する。

$$C_R = \frac{F_{RH}}{\frac{1}{2} \rho A_R U^2} \quad \dots\dots(3.2.1)$$

ただし  $A_R = 2\bar{x}_R(\bar{y}_{Ru} + \bar{y}_{Rl})$

式(3.1.7) (3.1.2) から、プロペラスラスト  $T$  に対する舵付船の推力減少量  $C_G$  は次式で表わされる。

$$C_G = \frac{G}{\frac{1}{2} \rho A_P U^2} = C_G + C_R \left( \frac{A_R}{A_P} \right)^2 \quad \dots\dots(3.2.2)$$

ただし  $G = F_{PH} + F_{RH} + F_{RX}$

また、このときの推進力は  $(T - F_{RX})$  である。

### 3.3 伴流率

舵付船では、プロペラ後流中におかれた舵の厚みによる排除効果によって、舵無船に比べ伴流率  $w$  は見掛け上増加する<sup>2)</sup>。舵によるプロペラ流入速度の変化量をプロペラ面 (SP) で平均して  $\Delta V_A$  とおけば次式を得る。

$$\Delta V_A = \frac{\int_0^{2\pi} d\theta \int_{r_B}^{r_0} \left[ \frac{\partial \phi_{RS}}{\partial x} \right]_{(SP)} r dr}{\int_0^{2\pi} d\theta \int_{r_B}^{r_0} r dr} \quad \dots\dots(3.3.1)$$

今、舵無船の伴流率を  $1 - w_0$  とすれば、舵付船の伴流率は次式で表わされる。

$$1 - w = (1 - w_0) + \frac{\Delta V_A}{U} \quad \dots\dots(3.3.2)$$

ここで  $\Delta V_A = V_A + \Gamma \alpha'$  で表わされるような関数関係が成立する。また、文献〔3〕によれば

$$1 - w_0 \doteq \bar{U}_{a0} + \bar{C}(-\bar{U}_{a0} + \sqrt{C_T + \bar{U}_{a0}^2}) \quad \dots\dots(3.3.3)$$

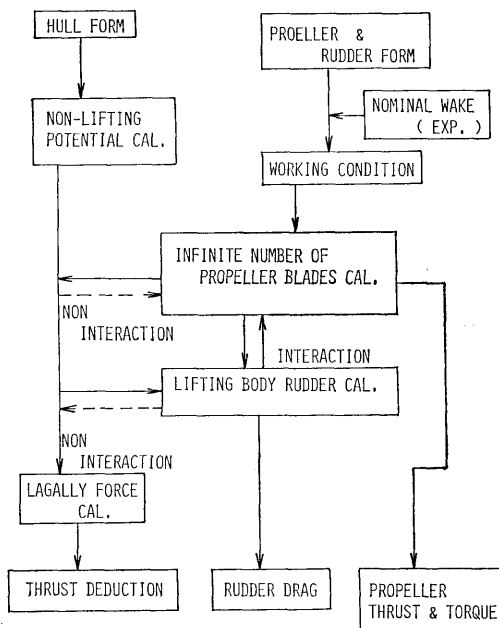


Fig. 3 Flow Chart of Propulsive Performance Calculation on Ship with Rudder

である。ここで $\bar{C}$ は船型によって異なる係数である。

#### 4. 数値計算法

Fig. 3 に数値計算の流れ図を示す。与えられた船速 $U$ に対応して、船体の無揚力ポテンシャル計算を行い source 分布  $\sigma_H(\alpha, \beta)$  を求めておく。次に、実験から求められた伴流率を用いて、プロペラへの流入速度  $V_A$  を与え、プロペラと舵の相互干渉計算を行う。得られたプロペラ及び舵の特異点分布  $\Gamma(r, \theta)$ ,  $\sigma_R(\xi, \eta)$ ,  $\mu(\xi, \eta)$  を用いて、プロペラスラスト $T$ , トルク $Q$ , 舵抗力  $F_{Rx}$  を求める。ここでは、船体とプロペラ-舵系との干渉計算は行わない。プロペラ、舵による船体表面への誘導速度を計算し、ラガリーカとして、 $\sigma_H(\xi, \eta)$  を用いて船体抵抗増加量  $F_{PH}$ ,  $F_{RH}$  を求める。

#### 5. 実験

Table 1 Particuler of Model Ship

M.S.No.	0339
$L_{pp}$ (M)	6.000
L/B	5.80
B/a	2.40
$C_B$	0.742
$C_p$	0.751
$C_M$	0.988
L.C.B. (%)	-0.81

#### 5.1 実験状態

実験に使用した模型船、プロペラ及び舵の主要寸法を Tables 1~3 に示す。模型船の船尾形状を Fig. 4 に示す。舵は MSNo. 0339 付属の MR-2 の他に、断面形状(舵厚)の異なるMR-1, MR-3 の3種を使用した。舵の断面形状を Fig. 5 に示し、プロペラ後方の配置を Fig. 6 に示す。ここでプロペラと舵の距離は  $l=0.215D(D=2r_0)$  である。実験は満載状態でを行い、船速は  $U=1.710[\text{m/sec}](F_N=0.22)$  である。

#### 5.2 実験方法

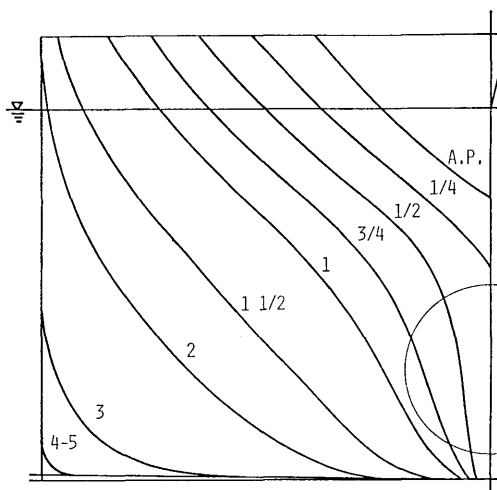
プロペラ荷重度試験法を用いて、プロペラ、舵及び船体に働く相互干渉流体力を計測する。すなわち、模型船を抵抗動力計で曳航しながらプロペラ回転数を変えることによりプロペラ荷重度を変化させ、その時の曳航力 ( $R_{M0}+F_{Rx}$ ) を抵抗動力計で、舵抗力  $F_{Rx}$

Table 2 Particuler of Model Propeller

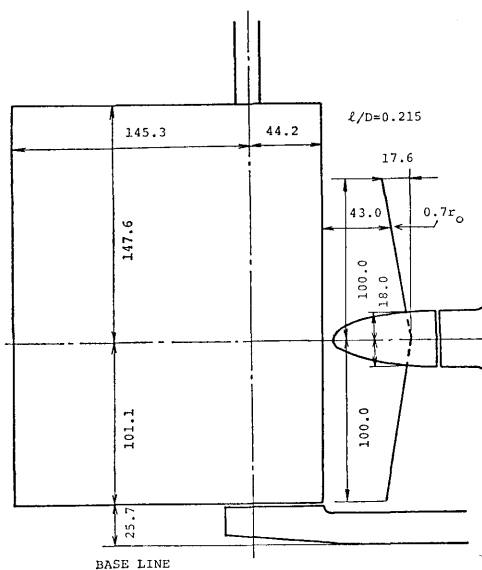
M.P.No.	2041
DIAMETER (M)	0.200
BOSS RATIO	0.180
PITCH RATIO	0.710
EXP.AREA RATIO	0.550
B.T.RATIO	0.050
MAX.B.W.RATIO	0.311
NUMBER OF BLADES	4
TYPE OF SECTION	AU

Table 3 Particuler of Model Rudder

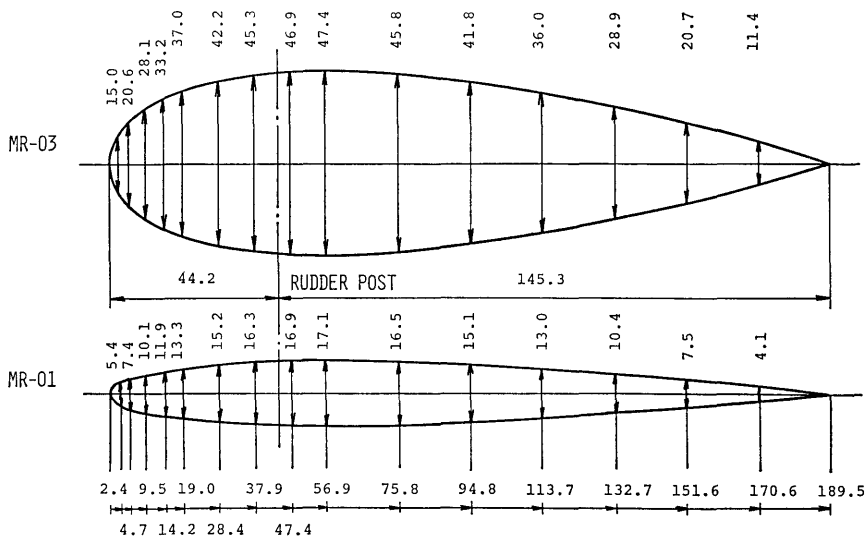
M.R.No.	MR-01	MR-02	MR-03
CHORD LENGTH (M)	0.1895	0.1895	0.1895
SPAN LENGTH (M)	0.2490	0.2490	0.2490
MAX.THICKNESS RATIO	0.0900	0.1847	0.2500
TYPE OF SECTION	NACA0009	ORIGINAL	NACA0025



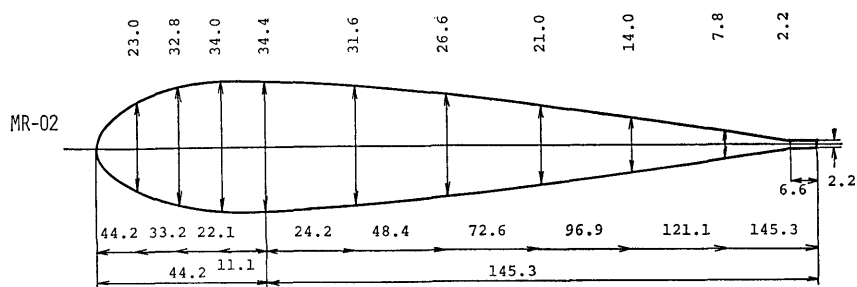
**Fig. 4** Body Plan of Model Ship Aft-Part (M. S. No. 0339)



**Fig. 6** Arrangement of Propeller and Rudder



**Fig. 5-1** Model Rudder Section



**Fig. 5-2** Model Rudder Section

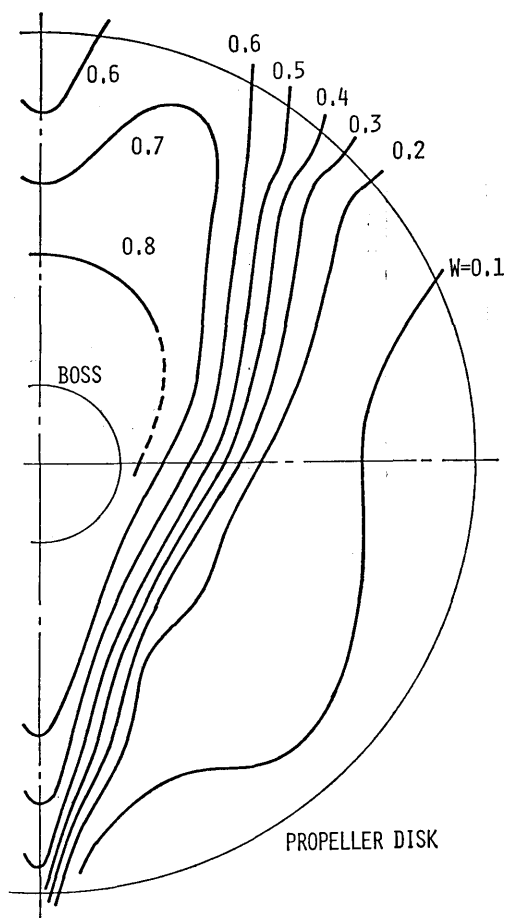


Fig. 7 Wake Distribution on Propeller Disk of Model Ship without a Rudder (M. S. No. 0339 Full Load  $F_n=0.22$ )

を舵軸を界して3分力検出器で、又、プロペラスラスト $T$ 、及びトルク $Q$ を自航動力計でそれぞれ分離計測する。

## 6. 数値計算と実験結果

Fig. 7 に、舵無状態で計測された伴流分布を示す。又、Fig. 8 に MPNo. 2041 の単独特性を示す。Fig. 9 に舵無及び舵付3状態のプロペラ荷重変更試験の $R-T$ 曲線を示す。ここで、試験解析では、抵抗試験時の船体抵抗（舵抗力を除く。） $R_0$  及び  $T=0$  の場合の船体抵抗（舵抗力を除く。） $R_C$  は上記4状態と若干の差効異がみられるのでその平均値をとり

$$R_0=6.39[\text{kg}], R_C=6.48[\text{kg}]$$

(140)

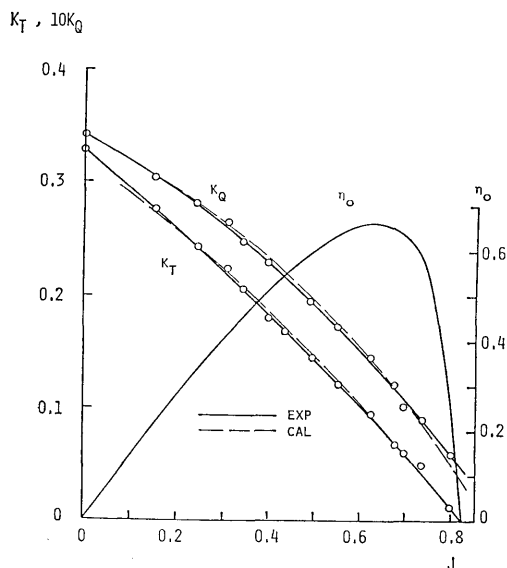


Fig. 8 Result of Open Water Test (M. P. No. 2041)

としている。

### 6.1 船体抵抗増加 $F_{PH}+F_{RH}$

Figs. 10-1~3 に、プロペラ荷重度に対する体抵抗増加係数  $C_{GH}$  を示す。式 (2.4.3), (2.4.4), (3.1.6), (3.1.7) から示されるように  $C_{GH}$  は  $CT^{1/2}$  に比例していることがわかる。舵の効果は、 $MR-1$  については舵厚が小さいために舵無状態との差異がつかみくいが、舵が厚いと舵無状態に比べ  $C_{GH}$  を緩和する方向に働いている。この効果は  $\bar{E}_0 (<0)$  で表わされ、 $MR-2$  についての数値計算は実験とほぼ一致している。

### 6.2 舵抗力 $F_{Rx}$

Fig. 11 に舵抗力係数  $C_R$  のプロペラ荷重度に関する変化を示す。厚い舵では  $CT$  の増加に対して  $C_R$  が著しく増加するのに比べて、うすい舵では  $C_R$  の増加は微小である。また、舵の粘性抗力係数  $C_{RD}$  をプロペラ荷重度に関して一定値として実験値から仮定すれば、数値計算結果は  $CT$  に対してその傾向をよく示している。

### 6.3 全船体抵抗増加量 $G(=F_{PH}+F_{RH}+F_{Rx})$

6.1及び6.2の検討を行うことにより、 $G$ 値を求めることができる。 $G=R-R_C$  とおくことができ、Fig. 9 の  $R-T$  Curve から  $G$ 値が示されている。本報告で実施した実験では、 $MR-1$ でも  $F_{Rx}>0$  であ



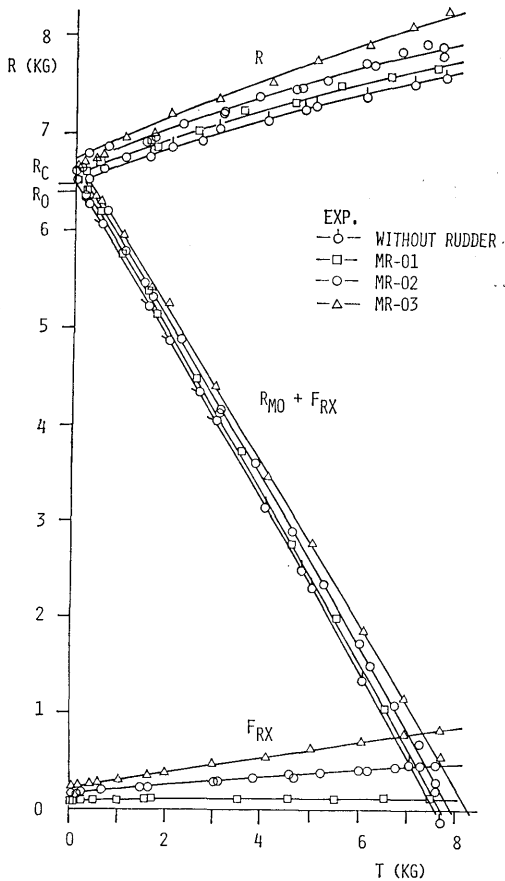


Fig. 9 Results of Propeller Load Test on a Ship with Rudder (M.S. No. 0339 Full Load  $F_n=0.22$ )

たために、舵の存在によって船体の抵抗増加は増大している。

6.4 伴流率

Fig. 12-1 にプロペラスラスト一致法により求め

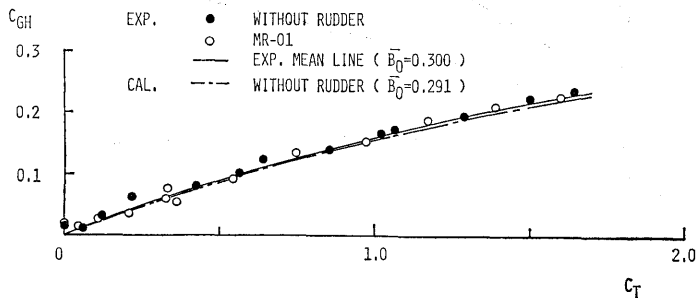


Fig. 10-1  $C_T-C_{GH}$  Curve (Without Rudder and MR-01)

られた伴流率  $1-wr$  を  $C_T$  をベースに示す。舵付の場合、その舵厚の大きさに従って、プロペラ面の伴流率が見掛上増加している。Fig. 12-2 にその効果  $\Delta V_A/U$  を舵による排除伴流として数値計算値と比べると  $T=0$  時の実験値との差異はみられるが、 $C_T$  に対する変化は実験の傾向をよく表わしている。なお、解析には  $\bar{U}_{a0}=0.69$ 、 $\bar{C}=0.056$  を実験から導いて使用している。

7. 結言及び謝辞

舵無船の荷重度変更試験結果が既知の場合、その船に舵を装備したときの推進特性を舵無状態からの変化量の形で考察した。今後の課題として  $\eta_R$  に関する考察及び多くの船型に対する適用と数値計算による特性推定法の確立が必要である。

舵の推進性能に対する効果をプロペラ荷重度の関数としてとらえる点を示唆された推進性能部足達宏之氏に感謝します。なお、本研究は推進性能部船尾研究グループ (SRG) の中で実施されたものであり、本報の実験等に助力いただいた横尾直幸氏及び塚田吉昭氏に感謝いたします。また、本報の数値計算には船研中央計算機センター TOSBAC 5600 を使用したことをつけ加え、関係各位に感謝します。

参考文献

- 1) 例えば、“船型設計のための抵抗，推進理論シンポジウム第4編推進”，日本造船学会，東京(1979)。
- 2) 森山文雄，山崎隆介：“プロペラの舵におよぼす影響について”，西部造船会々報第61号 (1981)。
- 3) 足達宏之，菅井信夫：“推力減少率について—荷重度変更法による考察—”，関西造船協会誌第171号 (1978)。
- 4) Hess, J.L.: “Calculation of Potential Flow about Arbitrary Three Dimensional Lifting Bodies”, Douglas Report MDC-J5679 (1972)。

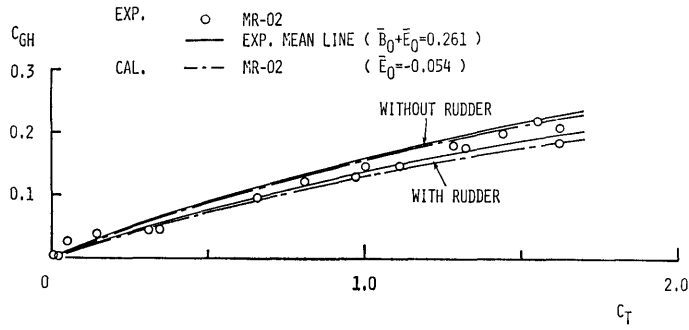


Fig. 10-2  $C_T-C_{GH}$  Curve (MR-02)

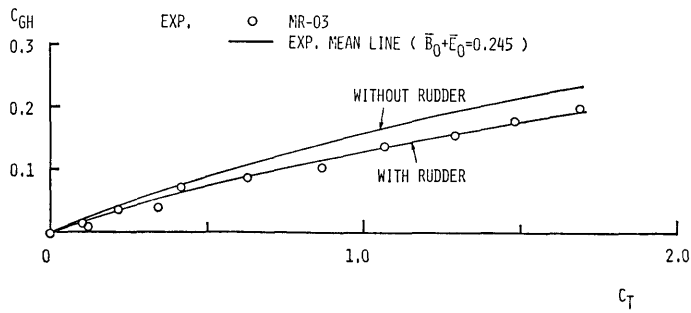


Fig. 10-3  $C_T-C_{GH}$  Curve (MR-03)

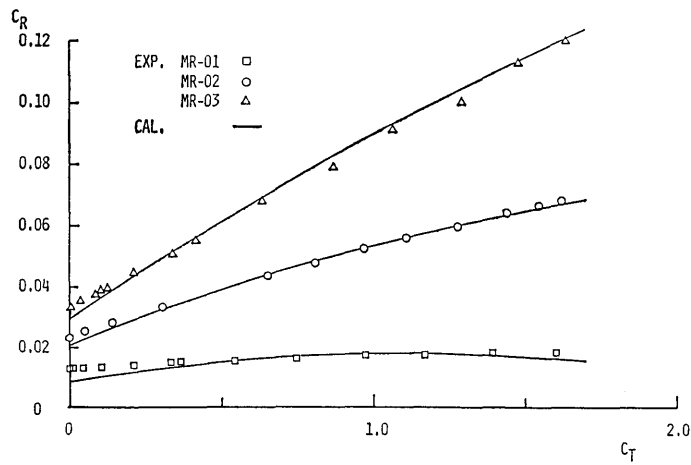
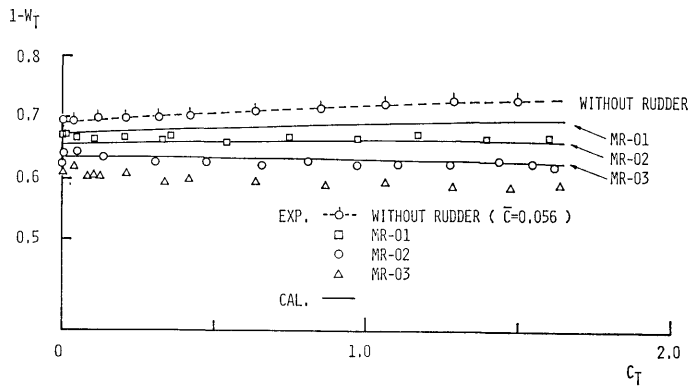
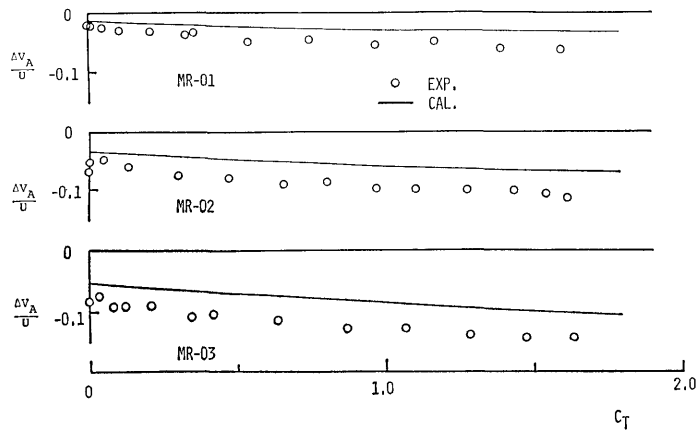


Fig. 11 Rudder Drag Coefficient ( $C_T-C_R$  Curve)



**Fig. 12-1** Wake Fraction ( $C_T - (1 - W_T)$  Curve)



**Fig. 12-2** Effective Wake by Rudder