

## 荷重度変更法による船型試験システム

足達 宏之\* 菅井 信夫\* 森山 文雄\* 上田 隆康\*

### On a Propulsion Model Test System Utilizing Propeller Loading Test Concept

By

Hiroyuki ADACHI, Nobuo SUGAI, Fumio MORIYAMA, Takayasu UEDA

#### Summary

This report describes about a new propulsion test method developed in the S. R. I. The principal idea of the method is based on the theoretical consideration of the mutual interaction among ship hull, propeller and rudder. And the interaction is formulated into the forms of the function of propeller loading. This idea is connected with the loading test concept. The experimental procedure has been constructed which is a consolidation of the interaction theory and the propulsion test.

Application of the new method is demonstrated in this report showing possible utilities of it in the model test system in towing tanks.

#### 1. ま え が き

実船の推進性能を推定するのに相似な模型船から推定する手法が船型試験法として試験水槽で採用されているが、模型船から実船の性能を推定する場合に最も重要な問題点は、いわゆる尺度影響の問題である。模型船の実験データから、何がどのような法則で実船のデータにスケールアップされるかを調査することが船型試験の重要な課題の一つである。

模型船の抵抗試験の結果を実船の抵抗データに変換する方法が W. E. Froude により提案され、それを土台として模型船の推進性能データを実船のものに変換する手法が R. W. Froude によって創案された。以来幾多の改良が Froude の方法に加えられ、今日の船型試験法が構築されてきている。しかしながら、模型船のデータから実船のデータを推定する手法は完成したものではなく、ITTC 1978年方式<sup>1)</sup>にも見られるように、模型船と実船のデータ間の推定方式は理論的考察に立脚するも暫定的な色彩も強く、池畑<sup>2)</sup>の解

説にも述べられているように、より一層の理論的根拠の確実な方法が探求されねばならないであろう。

これまで模型船の自航試験は、実船との対応試験を主眼とするために、模型船そのものの自航性能を調べることはあまり重視されていなかったように見える。しかしながら、模型船の自航性能の詳細を知ることが実船の性能を推定するのに役立つ筈であり、その為の手法の開発は船型試験における重要な課題の一つとして数えられるべきものである。

最近船舶技術研究所推進性能部において開発されたプロペラ荷重度変更法による自航試験システム<sup>3)</sup>は、模型船そのものの自航性能を調べるのに適しており、その方法の基礎となっている理論は、実船の自航性能の精密な推定法を可能とするものであると考えられている。

船研方式の荷重度試験は、プロペラ荷重度により変化する物理量をベースに船型試験を組み立てる所に特徴があり、理論的に推定される量と計測値との対応を基に試験法を構成する。荷重度変更法は、プロペラの推力の変化が船体および舵にどのような影響を与える

\* 推進性能部 原稿受付：昭和57年3月2日

か、またそのような影響がプロペラ自体の性能をどう変化させるかという、いわゆる流体力学上の干渉理論を基礎とするものであり、実験も相互干渉に関係する物理量の計測を行うことを目的としている。

船体、プロペラおよび舵の相互干渉の考え方、および理論的自航条件は山崎<sup>4)</sup>により Computational Fluid Dynamics (CFD) 概念の下に考察がなされており、船体、プロペラおよび舵の諸データが与えられるとき、理論的に推進性能を推進する方法が示唆された。船研方式の荷重量変更法による自航試験は、現時点において船体抵抗のデータおよびプロペラ面の伴流のデータ等を実験に頼っている点において、CFDによる自航性能推定法への過度的なものであると位置付けられる。また本方法は理論的推定法の完成に必要な自航試験データを作り出す試験法であるとも言える。

本報告では荷重量変更法による自航試験の方法を紹介し、自航要素に及ぼす荷重量の影響について考察を行う。またこれまで自航試験時に計測されることが少なかった荷重量変化に対するプロペラの造波抵抗およびプロペラと舵の干渉を計測し、これらが荷重量変更法で重要なものであることを示す。

## 2. 荷重量変更法による自航試験の基礎

プロペラの流力モデルとして無限翼数渦モデルを採用するとき、プロペラ前方の流場はプロペラ面に分布する吸込み特異点によるものと等価であることが示される。(Appendix 1) したがって船体とプロペラの干渉は基本的にはプロペラを作動円盤 (Actuator disc) で置き換えた運動量理論を基礎とする。以下の考察では、プロペラ面に流入する流れは均一かつ一様であるとし、プロペラにより生ずる流場は時間平均線型揚力線理論の仮定により扱うことが可能であるとす。

模型船の船速を  $U$ 、プロペラ面に流入する流速を  $U_a$ 、またプロペラにより無限後方に誘起される流速を  $u_i$  とする。このときプロペラの出す推力  $T$  は次式で表わされる。

$$T = \rho A_p \left( U_a + \frac{1}{2} u_i \right) u_i \quad (1)$$

ここで  $A_p$  はプロペラ面の面積、 $\rho$  は水の密度である。船体が存在しないオープン状態の場合  $U_a = U$  となる。このことはプロペラ面に流入する流速として、プロペラの存在しないときのプロペラ面での流速を考えていることになる。

プロペラ推力  $T=0$  のとき、船体+プロペラの系の抵抗を  $R_e$  とし、推力  $T$  のときの船体抵抗 (曳引力) を  $R_M$  とすると、系の全抵抗  $R$  は次のように表わされる。

$$R = T + R_M \quad (2)$$

これよりプロペラが推力  $T$  で作動しているときの抵抗増加量  $G(T)$  を次式で定義することができる。

$$G(T) = R - R_e = T - (R_e - R_M) \quad (3)$$

ここで  $R_e - R_M$  は有効推力と見ることができ。抵抗増加は  $T=0$  のときの系の抵抗  $R_e$  を用いて定義するのが合理的である。このことは後に示す実験例において明らかになるであろう。

プロペラ面上での吸込み速度を求めるために(1)を  $u_i$  について解くと、

$$\frac{u_i}{U} = -\bar{U}_a + \sqrt{C_T + \bar{U}_a^2} = \bar{\Gamma}_0 \quad (4)$$

$$\bar{\Gamma}_0 = u_i$$

となる。ここで

$$\bar{U}_a = U_a / U, \quad C_T = T / (1/2 \rho A_p U^2)$$

である。(4)はプロペラ面に流入する一様速度が  $\bar{U}_a$ 、プロペラの荷重量が  $C_T$  のとき、プロペラ面上に吸い込まれる流速が  $u_i/2$  であることを示す。したがってプロペラが推力  $T$  で作動しているとき、プロペラ直前で観測される流速  $U_e$  は  $U_a + u_i/2$  であることになる。すなわち

$$\bar{U}_e = \frac{1}{2} (\bar{U}_a + \sqrt{C_T + \bar{U}_a^2}), \quad \bar{U}_e = U_e / U$$

また(4)はプロペラ面上の一様渦分布  $\bar{\Gamma}_0$  の渦円筒による誘起速度と同一であることを示す。以上よりプロペラ前方の流場はプロペラ面上の強さ  $\bar{\Gamma}_0$  の吸込みによって表わされることもわかる。したがって船体の排除効果によりプロペラ面に誘起される流速と吸込み分佈  $\bar{\Gamma}_0$  の積に比例するラガリー力によって船体とプロペラが推力  $T$  で作動しているときの抵抗増加の主要部分を与えるものである。ここでは抵抗増加量を次のように  $\bar{\Gamma}_0$  に比例するものとして定義する。

$$G(T) = \rho B_0 \bar{\Gamma}_0 \quad (5)$$

ここで  $B_0 (>0)$  は船体がプロペラ面に誘起する速度から求められる定数である。これより  $R_e$  を基準とした推力減少率は次式により表わされる。

$$t = \frac{G(T)}{T} = \rho B_0 \frac{\bar{\Gamma}_0}{T} \quad (6)$$

ここで述べた考え方はプロペラに流入する一様速度を  $U_a$  であるとし、これよりプロペラが推力  $T$  を出すとするものである。船後に置かれたプロペラの場合

合,  $\bar{U}_a$  はポテンシャル伴流  $w_p$  と粘性伴流  $w_v$  の2つの成分の和であると仮定する。

$$\bar{U}_a = 1 - (w_p + w_v) = 1 - w \quad (7)$$

$w_p$  は船体の排除効果によってプロペラ面に誘起される速度を,  $w_v$  は粘性により影響される速度を表わす。プロペラが無い場合,  $\bar{U}_a$  は公称伴流  $w_N$  で表わされる。

$$\bar{U}_a = \bar{U}_{a0} = 1 - w_N \quad (8)$$

プロペラが推力  $T$  で作動するとき,  $w_p$  および  $w_v$  は共にプロペラ無しの場合から変化するが,  $w_p$  の変化は  $w_v$  に較べて小さいと考えられる。 $w_v$  の変化はプロペラの作動により船体後部の流れが加速され, そのため境界層が締めつけられ縮むこと(ピンチ効果)によると推測される。また境界層厚さは流速増加に比例して減少することが示されるので, プロペラ面に流入する速度の粘性による変化は  $\bar{\Gamma}_0$  に比例して変化するとして良いとする。(Appendix 2)  $w_p$  のプロペラ推力  $T$  による変化も  $\bar{\Gamma}_0$  に比例するとして良いので, 伴流率  $w$  は比例定数  $\bar{C}_0 (> 0)$  を使って次のように表わされる。

$$w = w_N - \bar{C}_0 \bar{\Gamma}_0 = 1 - \bar{U}_a \quad (9)$$

$\bar{\Gamma}_0 = 0$  のとき  $\bar{U}_a = \bar{U}_{a0}$  であり,  $\bar{\Gamma}_0$  の式(4)を  $\bar{U}_{a0}$  のまわりに展開し  $O(\bar{U}_a - \bar{U}_{a0})$  の項を無視すると, これまでの結果は  $\bar{U}_{a0}$  を使って次のようにまとめられる。

$$\left. \begin{aligned} \bar{\Gamma}_0 &= -\bar{U}_{a0} + \sqrt{C_T + \bar{U}_{a0}^2} \\ G &= \rho \bar{B}_0 \bar{\Gamma}_0 \\ t &= \frac{G}{T} \\ w &= w_N - \bar{C}_0 \bar{\Gamma}_0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

上式は荷重量変更法の基礎式である<sup>9)</sup>。荷重量変更試験はこの関係を基に船体, プロペラおよび舵の相互干渉を調査しようとするものであり, (10)の関係が実験的にどの程度成立するかを吟味しつつ, 合理的な自航要素の分析を行うことを目的とする。

船の自航状態は舵がプロペラの後方に存在し, またプロペラによる造波もあるのが通常である。この場合もプロペラ推力  $T$  のときの船体+プロペラ+舵の系の全抵抗を  $R$ ,  $T=0$  のとき  $R_c = R$  とすると, 抵抗増加  $G(T)$  は(3)と同じ式で定義される。ここで  $R_c$  はプロペラ無しの船体の曳航抵抗を  $R_0$  用いて,

$$R_c = R_0 + \Delta R \quad (11)$$

と書ける。 $\Delta R$  は  $T=0$  における船体, プロペラおよび舵の干渉によって生じた抵抗である。 $R_c$  を基準と

した抵抗増加  $G$  は, 舵無しおよびプロペラの造波の無いとした場合と異なり, 次のような幾つかの成分から成ると考えられる。

$$G(T) = F_{PH} + F_{RH} + F_{PR} + F_{PW} \quad (12)$$

ここで,  $F_{PH}$  = プロペラと船体の干渉による船体抵抗増加量,  $F_{RH}$  = 舵と船体の干渉による船体抵抗増加量,  $F_{PR}$  = プロペラと舵の干渉による舵抗力の増加量, および  $F_{PW}$  = プロペラによる造波抵抗の増加量である。

$F_{PH}$  は舵無し, プロペラ造波無しの場合の(5)と同じもので与えられる。

$$F_{PH} = \rho B_0 \Gamma_0 \quad (13)$$

プロペラによる造波抵抗の増加は, プロペラの吸込み作用による造波とプロペラの作用により船体圧力が変化するために生ずる造波の2つがあるが, 前者は後者より大きな効果を持つと考えられるので, ここでは前者のみを考えることにする。プロペラは通常船体の船尾波の発生位置附近にあるので, 船体造波との干渉は少ないとし, 単に船体造波抵抗にプロペラの造波抵抗を加えた形で系の造波抵抗を考える。プロペラの造波抵抗はプロペラを sink disc とし, これによる造波抵抗を考える。このとき  $F_{PW}$  は  $\Gamma_0^2$  に比例することが知られているので<sup>9)</sup>,

$$F_{PW} = \rho D_0 \Gamma_0^2 \quad (14)$$

とする。

舵がプロペラの直後にあるとき, プロペラと舵の干渉は無視できない影響を持つ。プロペラ後流はプロペラを時間平均揚力線モデルとして求め, 舵は厚みを持った揚力体として扱い。このような流力モデルによって相互干渉を計算する<sup>7)</sup>。舵の摩擦抗力は境界層理論より求めることができる。舵の抵抗増加量は  $T=0$  のときの舵抗力を基準にして定義される。

$$F_{PR} = F_{PX}(T) - F_{RX}(0) \quad (15)$$

$F_{RX}$  は舵の抗力である。 $F_{RX}$  に含まれる摩擦抵抗成分の荷重量による変化は小さいので  $F_{PR}$  はポテンシャル成分によるものが大部分であり,  $\Gamma_0$  の2次式で表わされることが知られている。

舵と船体との干渉力  $F_{RH}$  は舵による誘起速度が  $\Gamma_0$  に比例する形で表わされ, 舵が船体に及ぼす力はラガー力として求められる。 $T=0$  のときの干渉力を(11)の  $\Delta R$  の中に含めると, 次式により干渉力が表わされる。

$$F_{RH} = \rho E_0 \Gamma_0 \quad (16)$$

ここで  $E_0$  はプロペラ後流中の舵を表わす特異点分布

より計算される係数である。

以上によりプロペラ造波および舵のある場合、推力減少率  $t$  は(12)の  $G$  により(6)で定義される。(12)の抵抗増加において粘性に関係する量はプロペラ面流入速度  $U_{a0}$  が主たるものであり、 $t$  の実船との相関も  $U_{a0}$  についてのみ考えれば良いことになる。

伴流率  $w$  に対しては、プロペラの造波を無視して舵の影響のみを考慮することにする。これはプロペラ造波が大きい船に対して許される仮定である。舵の厚みの効果によりプロペラ面の流入速度は次の修正を受ける<sup>9)</sup>。

$$\Delta U_A / U = \varepsilon \bar{U}_{a0} + \bar{F}_0 \bar{F}_0 \quad (17)$$

この流速変化分だけプロペラの推力が変化する。計測された推力  $T$  は(17)の修正を受けた流入速度に対するものである。推力一致法により求められた伴流率は(17)を含んだ形で次式のように表わされる。

$$1-w = 1-w_N + \bar{C}_0 \bar{F}_0 + \frac{\Delta U_A}{U} \\ = (1+\varepsilon)(1-w_N) + (\bar{C}_0 + \bar{F}_0) \bar{F}_0 \quad (18)$$

係数  $\varepsilon$  と  $\bar{F}_0$  はプロペラと舵とのポテンシャル干渉計算から求めることができる。したがって舵による伴流率の修正計算は実船にも適用される。また伴流率の変化分  $\bar{C}_0 \bar{F}_0$  に含まれる粘性影響による部分は、プロペラによる境界層のピンチ率を表わすものであり、模型船と実船で違わないと考えるとき、伴流率の相関も  $\bar{U}_{a0}$  のみについて考えれば良いことになる。

伴流率も荷重度の関数として与えられるので、実船の荷重度の推定ができれば、模型船のデータから推力減少率および伴流率が(10)、(12)および(18)から推定される。これらの式の関係は模型船の荷重度変更法でその妥当性がチェックされるので、実船の推進性能の推定法の開発に新しい視点を与えるものである。

### 3. 荷重度変更法による自航試験の実際

荷重度変更法による自航試験は Fig. 1 に示す計測項目から構成されている。現在プロペラ荷重度変更試験の他に、抵抗試験、伴流計測、波形計測および船尾船体表面圧力計測を行うようにしているが、全ての計測を行う必要は必ずしも無い。しかし船型の推進性能の優劣を合理的に判定するために上に述べた計測を行うのが良いと考えている。

抵抗試験は低速抵抗試験を含めて行い、舵の有無の2つの場合について計測する。舵の有る場合は舵の抗力も計測する。抵抗試験から  $R_0$  が求まり、これは荷

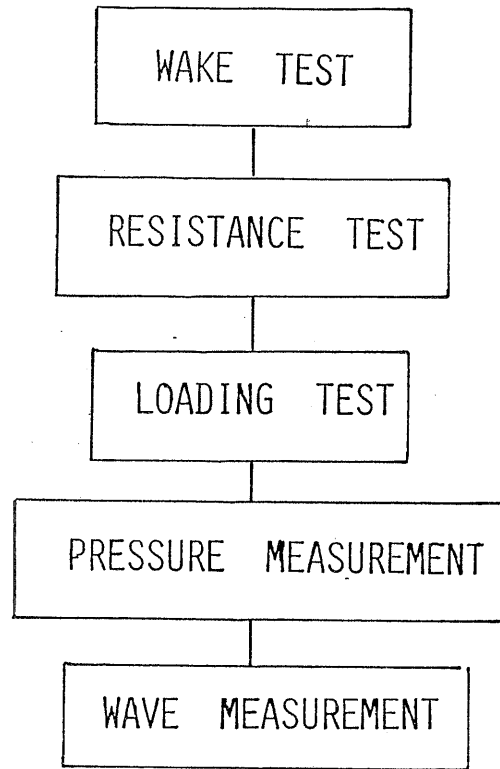


Fig. 1 Test items of propulsion test system using loading test concept

重度変更試験の全抵抗  $R$  の推定計算の入力データとして使用する。逆に荷重度変更試験から抵抗データ  $R_0$  を推定する場合もある。

伴流計測は公称伴流率と伴流分布等を求めるために5孔ピトー管を使用して行い、船速による伴流の違い(主として船体造波の影響)を調べる目的で最低2つの速度について計測を行う。公称伴流率  $w_N$  のデータは(10)、(18)の計算の入力とする。

プロペラ荷重度変更試験は Fig. 2 に示すように、模型船を抵抗動力計に固定し、速度を一定に保ちながらプロペラ回転数  $n$  をパラメータとして荷重度を変化させる方式で行う。このときの荷重度の範囲はプロペラ動力計に掛ける推力が  $T=0$  から、模型船曳引力が  $R_M=0$  のときの推力  $T=T_c$  までとし、計測点はこの範囲を4~6等分する荷重点を選ぶ。実際の計測の際は選んだ荷重度に対応するプロペラ回転数を予め推定しておく。プロペラ回転数は次式で与えられる。

$$n = U_a / JD \quad (19)$$

ここで  $J$  = 前推係数、 $D$  = プロペラ直径である。  $U_a$

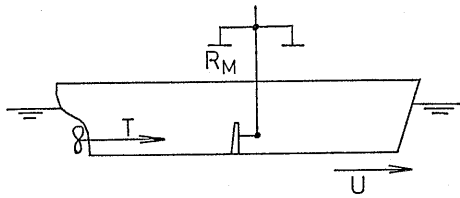


Fig. 2 Test arrangement

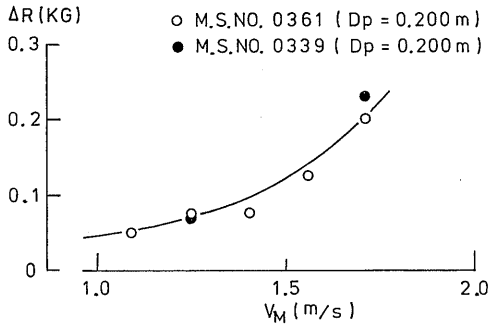


Fig. 3 Difference of resistance with and without propeller

は(9)または(10)で求め、 $J$ はプロペラ性能計算<sup>9)</sup>またはプロペラ単独性能試験結果より推力係数  $K_T$ —前進係数  $J$  の関係から求める。 $R_M=0$  のとき模型船は完全自航状態となる。このとき推力  $T_c$  の推定は(5)または(12)の抵抗増加量  $G(T_c)$  を推定計算して、 $R_c+G(T_c)=T_c$  となる推力を求めれば良い。 $R_c$  の推定は(11)で行うが船の抵抗  $R_0$  を純理論的に計算することは現在まだ困難であるので、抵抗試験の結果等を利用する。また  $\Delta R$  は通常正の量であり、船の大きさの割りにプロペラが小さいときは  $\Delta R/R_0$  は小さく、従って  $R_c \approx R_0$  と扱ってよく  $\Delta R$  は無視できるが、プロペラが相対的に大きくなると  $\Delta R$  の影響は無視で

きなくなる。 $\Delta R$  の推定には理論的な計算法は現在開発されておらず、これまでの実験データより経験的に推定している。 $\Delta R$  は同一船型についてはプロペラ直径、船速により変化する。Fig. 3 に  $\Delta R$  の船速による変化の例を示す。

また(19)の回転数の推定において、伴流率の荷重量度による変化を表わす係数  $\bar{C}_0$  はポテンシャル計算だけでは十分でなく、境界層のピンチ効果を考慮しなくてはならず、これもこれまでの実験データより推定している。 $\Delta R$ ,  $\bar{C}_0$  は荷重量度変更試験が行われれば決定されることは言うまでもない。この2つの量の推定は実際において非常に重要であり、精度のよい計算法の開発が望まれている。

プロペラ荷重量度変更試験における計測項目は模型船の曳航力  $R_M$ , 舵抗力  $F_{Rx}$ , プロペラの推力  $T$  およびトルクそして船首尾の船体沈下量である。速度は実船の自航性能推定速度範囲の5速度を標準としている。Fig. 4 に計測システムのダイアグラムを示す。各計測系のセンサーからのアナログ信号は、増幅器とフィルターを通してコンピュータ内蔵の A/D コンバータにてデジタル化し、リアルタイム処理を行っている。

波形計測は、プロペラの造波影響を調べるために行い、造波抵抗を longitudinal cut 法により求める。荷重量度は  $T=0$ ,  $T_c$  の2点を含み約4点程を選ぶ。通常波形計測の同時時に船体表面圧力の計測も行われる。

船尾表面圧力の計測は荷重量度変化による船尾流場の情報を得ることを目的に行われる。圧力は船体表面に開けた圧力孔からビニール管で圧力センサーまで圧力を導びき、スキュニバルブの切換えによる多点計測を行っている。一航走で60点の圧力計測を標準にしてい

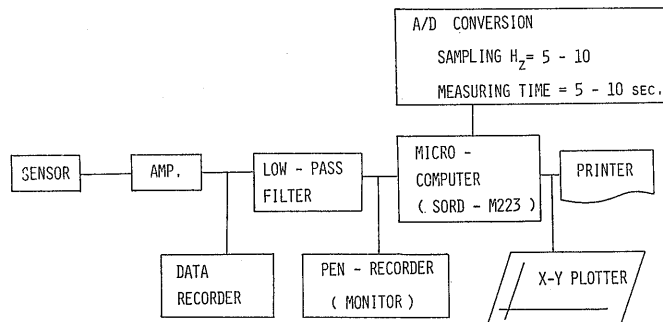


Fig. 4 Diagram of test system of propeller loading test

**Table 1** Particular of M. S. No. 0361

M. S. NO.	0361
$L_{pp}$ (M)	6.000
L/B	5.80
B/d	2.40
$C_B$	0.741
$C_p$	0.750
$C_M$	0.988
L.C.B (%)	-0.86

**Table 2** Particular of M. P. No. 2041

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** Particular of Rudder

CHORD LENGTH (M)	0.1895
SPAN LENGTH (M)	0.2490
MAX. THICKNESS RATIO	0.1847

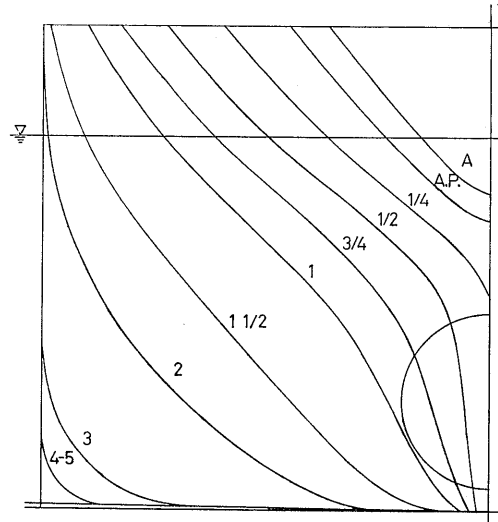
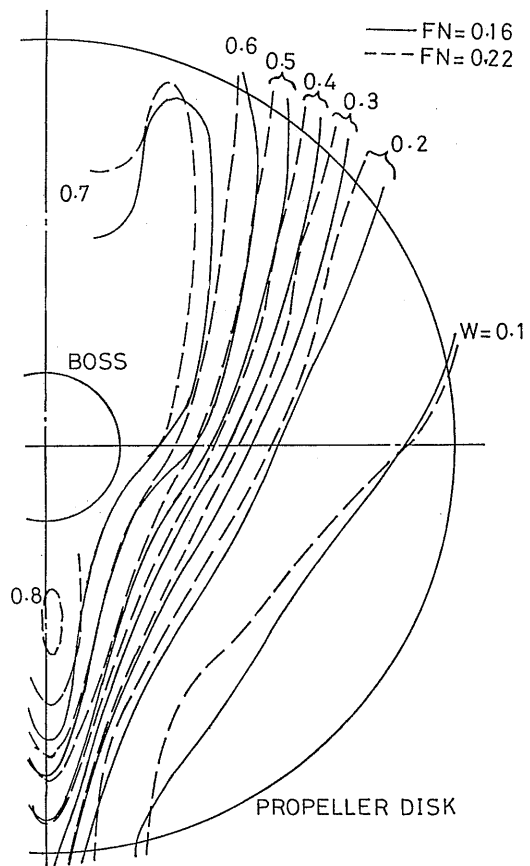
る。

以上の計測は船研の400M水槽で約一週間弱の水槽使用時間で終了するように計画されている。

自航試験法としての荷重量変更試験は、自航要素のうち推力減少率をプロペラの作動による抵抗増加量  $G=R-R_0$  を使って定義すること、および舵の伴流率に及ぼす影響を無しの場合との比較において求めるところが従来の方法と異なる点である。自航模型船のプロペラ効率比、船殻効率比は、各速度において荷重量に対する変化が判然とする利点がある。

実船との相関は、船体抵抗およびプロペラ性能につ

(208)

**Fig. 5** Aft body plan of M. S. No. 0361**Fig. 6** Wake contour curves at propeller disc

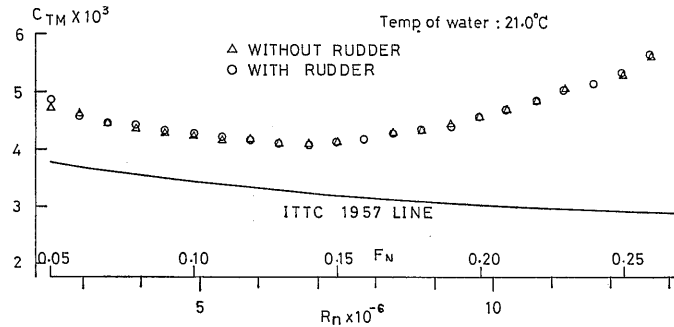


Fig. 7 Resistance coefficient curves

いては従来の方法を利用するが、 $1-t$ 、 $1-w$  については公称伴流の相関のみを考えれば良い。模型船の  $w_N$  のスケールアップを笹島一田中法<sup>10)</sup>、その発展した方法等を利用して行えば良いであろう。

§ 2 で述べた方法は均一流入速度場を仮定するものであるが、伴流の不均一性に帰因する影響については今回の方法では示唆する所は少ない。不均一流入速度場で作動するプロペラの性能計算、および船体、舵の干渉問題は、さらに高次の自航性能の推定のために必要であろう。

#### 4. 荷重量変更法による自航試験法の適用例

荷重量変更法による自航試験を中速貨物船について実施した例について述べる。

模型船、プロペラおよび舵の主要目をそれぞれ Table 1, 2, 3 に示す。また船体後半部の形状を Fig. 5 に示す。試験状態は満載で行い、プロペラ荷重量変更試験の速度は  $F_N=0.14$  から 0.02 おきに計画速度の  $F_N=0.22$  までの 5 点である。

伴流計測は  $F_N=0.16$  と 0.22 について行われた。Fig. 6 に伴流分布図を示す。速度の違いによる  $1-w_N$  はそれぞれ 0.610 と 0.631 と 0.02 程の差を示し、高速の伴流の方がやせた形状をしている。

Fig. 7 には抵抗試験結果を示す。この結果より各速度に対する抵抗  $R_0$  が求められる。 $1-w_N$  と  $R_0$  を使って荷重量変更試験の抵抗-推力曲線 ( $R-T$  線図) と回転数  $n$  の推定計算を行った結果を Fig. 8 および、Fig. 9 に実線で示す。また同図には実験値を描き入れてあるが、推定値と実験値は非常に良い一致を示しており、§ 2 に述べた方法は荷重量変更法において実用的なものであることを示している。推定計算で使用した  $\bar{B}_0$  係数は速度によらず一定のものである

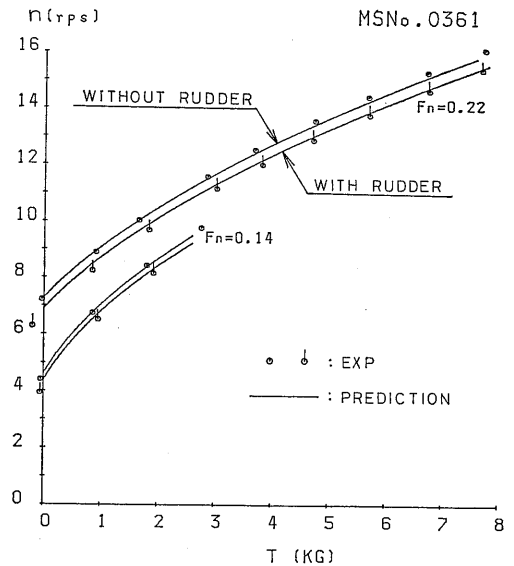


Fig. 8  $n-T$  curves

が、実験値も  $\bar{B}_0$  が変化していないことを示している。これはこの船の実験速度域では船体造波のプロペラにおよぼす影響が小さかったことを示唆している。すなわち船体とプロペラの干渉はここに示した船の例では自由表面を剛体壁として計算したもので良いことを示している。

Fig. 10 に荷重量変化によるトリムの変化を示す。荷重量の増加に対し船首部の沈下量はほとんど変化しなかったため、トリム変化は船尾部の沈下量の増加によるものである。これは船尾表面ではプロペラの作用により圧力が変化し、船体を下向かせる力が働くためである。このことは船体表面圧力計測結果により明らかである。この船の計測範囲で船尾沈下量は 2 mm 程度であるが、実船 ( $L_{pp}=95\text{m}$ ) では約 3 cm に相当す

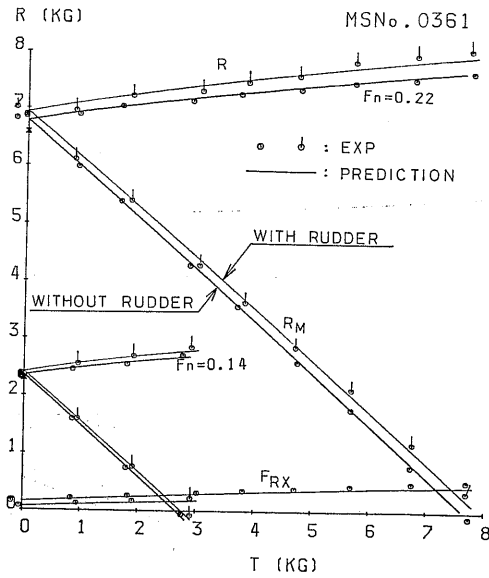


Fig. 9 R-T curves

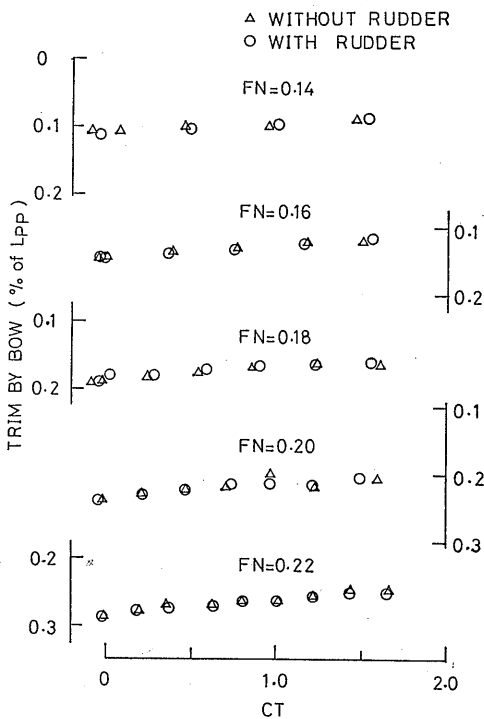


Fig. 10 Trim versus loading coefficient

る量である。

Fig. 11 は  $1-w$  を示したものである。舵付の場合の推定曲線 (図中の実線) は①の修正を施したもので

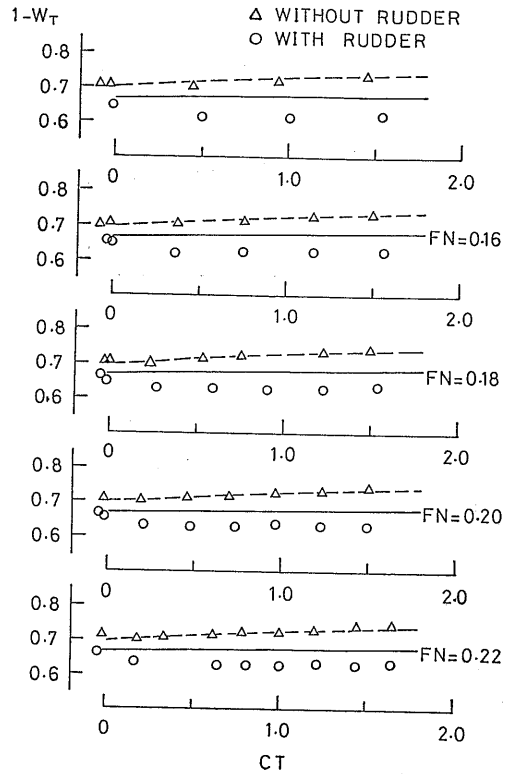


Fig. 11 Effective wake fraction versus loading coefficient

ある。舵の修正は比較的大きなものであり、また荷重量による変化の傾向を変化させるものであることが理解される。実験と差があるのは①の修正計算がもう一つ精度が足りないことを示している。

Fig. 12 に船尾表面圧力計測の一部を示す。これは船底から 0.194m の水線上に配した圧力孔の圧力を荷重量をパラメータとして表わしたものである。プロペラの作用が強くなると圧力低下が生じていることが良く判る。この図より、船尾のどの部分がプロペラの作用を強く受けるかが判定できる。

Fig. 13 に波形解析結果の荷重量による変化を振幅関数の形で示す。この船の試験状態が満載であること、ライナー船型の場合相対的にプロペラ直径が大きくないことなどから、荷重量の変化に対してプロペラ造波の影響は大きくないことがわかる。

最後に、荷重量に対する自航要素の変化を Fig. 14 に示す。舵の有無で自航要素は当然変化するが、特に  $1-w$  においてその変化は大きく、従って  $\eta_H$  にも大きな差が現われる。これまでも知られているように



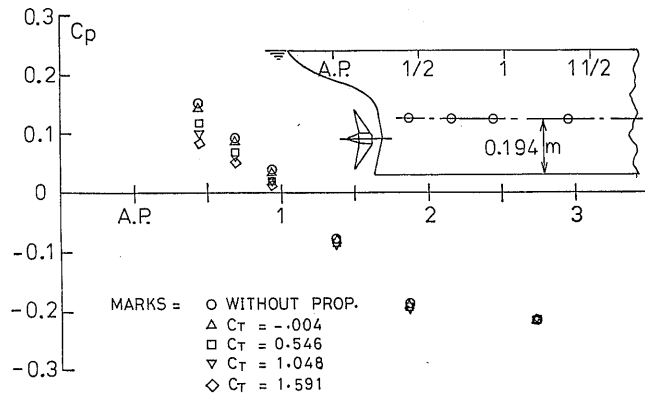


Fig. 12 Distribution of pressure at  $F_N=0.22$ , Without rudder

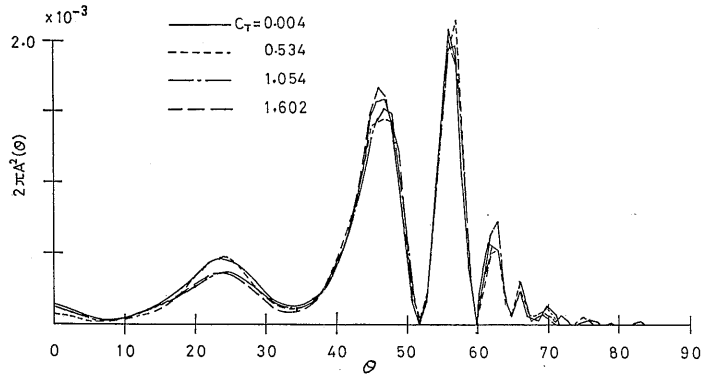


Fig. 13 Amplitude function at  $F_N=0.22$

$\eta_R$  の荷重度による変化は少ない。

上に示した実験例の  $R-T$  線図に見たように、§ 2 の方法に基づく推定値と実験値との一致は非常によい。これより荷重度変更試験のみで抵抗  $R_0$  が逆に推定可能であると言える。すなわち、 $R_c$  が実験より推定されるので、 $\Delta R$  の修正を行うことで  $R_0$  が求められる。また従来の自航試験法であっても、実験点を通るように  $R-T$  線図を描くことで同様に  $R_0$  を推定することが可能である。すなわち荷重度変更法の概念を利用することで、抵抗試験無し自航試験のみで船型試験を組立てることも可能であると思われる。

## 5. あとがき

船研では、本報告で説明したような荷重度変更法による船型試験システムを開発中であるが、これまで得られた主な結果は次の通りである。

(1) 荷重度により変化する抵抗増加は、ポテンシャル理論による関係(5)または(12)で表わすことが実用的に可能である。

(2) 抵抗増加に及ぼす舵の影響はプロペラと舵の干渉計算により推定できる。

(3) 伴流率も荷重度により変化し、その変化は舵無しの場合概ね(9)で表わされる。舵の影響は無視できない大きさをもち(17)の修正を受ける。有効伴流と公称伴流の関係は(9)または(18)で表わされる。

(4) プロペラ無しの抵抗  $R_0$  と推力  $T=0$  のときの抵抗  $R_c$  との違い  $\Delta R$  は無視できない場合があることが示された。推力減少率の定義を  $R_0$ 、 $R_c$  のどちらを使うかをはっきり区別しなければならないことが確認された。荷重度変更法では、 $R_c$  を使った推力減少率を使わなければならない。

(5) 推力減少率、伴流率の実船への相関は、模型船

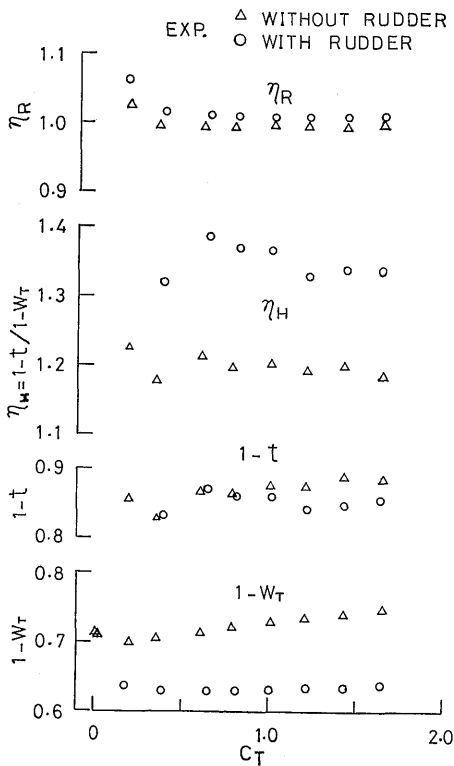


Fig. 14 Self-propulsion factors versus loading coefficient

の伴流のスケールアップによるだけでよいことが明らかにされた。ただし、実船の荷重度の決定の問題は船体抵抗およびプロペラ性能の相関の問題として解決されねばならない。

(6) 船型によっては荷重度により姿勢が大きく変化する場合が考えられるが、荷重度変更試験はこのような場合にも有効であると考えられる。

本報告で述べた荷重度変更法による船型試験システムは、船の自航状態という流体力学上の相互干渉機構について物理的性質を解明すること、および流体力学理論を船型試験に適用し推進性能の推定法を開発することを目的とするものである。そして理論を土台として実験研究の進展を計ると共に、現レベルの理論の簡易化計算を実用面に適用することがねらいの一つである。このねらいは、マイコンを中心とした計測システムの開発によるデータ処理の迅速化、実験効率の向上、理論計算と実験データの実験時照合による実験の高精度化等が長水槽の活用と相俟ってある程度まで達成されたと思われる。しかし本報告で述べた方式は、

(212)

CFDによる自航性能の推定法としてはまた暫定的なものであり、さらに解決されるべき問題点も多い。

最後に、本研究に多大の協力を得た推進性能部塚田吉昭技官ならびに種々の討論に参加し有益な意見を頂いた白夏宗彦研究官に感謝いたします。また本報告の計算の一部は船研計算機センター FACOM M180 II AD を使用して行われたことを附記する。

Appendix 1. プロペラ前方に誘起される速度

無限翼数揚力線渦モデルのプロペラによりプロペラ前方  $x < 0$  に誘起される速度は

$$U_x(x, r) = -\frac{Z}{4\pi} \int_0^R \frac{d\Gamma}{dr'} \frac{r'}{\lambda_i(r')} \int_0^\infty J_0(kr) J_1(kr') e^{-k|x|} dk dr' \tag{A1-1}$$

$$U_r(x, r) = \frac{Z}{4\pi} \int_0^R \frac{d\Gamma}{dr'} \frac{r'}{\lambda_i(r')} \int_0^\infty J_1(kr) J_1(kr') e^{-k|x|} dk dr' \tag{A1-2}$$

$$U_\phi(x, r) = 0 \tag{A1-3}$$

と表わされる。 $U_x$  はプロペラ軸方向速度、 $U_r$  はプロペラ半径方向速度、 $U_\phi$  はプロペラ周方向速度を表わす。以上の式で、 $Z$  = プロペラ翼数、 $\Gamma$  = プロペラ面上の渦分布強さである。また

$$\lambda_i = r \tan \beta_i(r)$$

$$\tan \beta_i = \frac{U_a(r) + U_x}{\Omega r - U_\phi} \Big|_{x=0}$$

であり、 $U_a$  = プロペラ流入速度、 $\Omega$  = プロペラ回転角速度である。

一方プロペラ面上に分布した吸込み  $\sigma(r, \phi)$  により誘起される速度は、吸込み分布が周方向に一樣であると仮定するとき

$$U_x = \frac{1}{2} \int_0^R r' \frac{d\sigma(r')}{dr'} \int_0^\infty J_0(kr) J_1(kr') e^{-k|x|} dk dr' \tag{A1-4}$$

$$U_r = \frac{1}{2} \int_0^R r' \frac{d\sigma(r')}{dr'} \int_0^\infty J_1(kr') J_1(kr') e^{-k|x|} dk dr' \tag{A1-5}$$

と書ける。

$$\int_0^\infty J_0(kr') J_1(kr') dk = \frac{1}{r'}$$

の関係を利用すると、(A1-1) および (A1-4) より  $x=0$  として

$$\sigma(r) = -\frac{Z}{2\pi} \int_0^r \frac{d\Gamma}{dr'} \frac{dr'}{\lambda_i(r')} = -2U_x(0, r) \quad (\text{A1-6})$$

が得られる。さらに  $U_a$ ,  $\Omega r$  に較べて攪乱速度  $U_x$ ,  $U_\varphi$  が小さいとし、これらを見捨てる

$$\tan \beta_i = \frac{U_a(r)}{\Omega r}$$

となり、

$$\int_r^R \frac{d\Gamma}{dr'} \frac{dr'}{\lambda_i(r')} = \frac{1}{\Omega} \int_r^R U_a(r') \frac{d\Gamma}{dr'} dr'$$

の関係が成立する。さらにプロペラ流入速度が半径  $r$  に関係なく一様であると仮定すると最終的に

$$\sigma(r) = -\frac{Z}{2\pi} \frac{U_a \Gamma}{\Omega} \quad (\text{A1-7})$$

を得る。

$$\Gamma_0 = -\frac{Z}{4\pi} \frac{U_a \Gamma}{\Omega} \quad (\text{A1-8})$$

書くと (A1-1), (A1-2) は一様渦同筒により誘起される速度を表わす。

## Appendix 2. 境界層厚さと荷重度の関係

田中一姫野により提案された境界層の第一近似理論<sup>11)</sup>の結果を利用すると、境界層のモーメント厚さは次式で表わすことができる。

$$\frac{\theta_1}{\theta_0} = \alpha_4 \frac{1}{s} \int_0^s \frac{U_1}{U_0} ds + \alpha_5 (H_0) \frac{1}{s} \int_0^s \frac{s}{U_0} \frac{dU_1}{ds} dr + \frac{1}{s} \int_0^s K_1 s ds \quad (\text{A2-1})$$

ここで suffix 0 のついている量は平板に対する解であることを意味する。 $s$  は流線座標であり、積分は流線に沿って行われる。境界層外端速度  $U_1$  は船体に沿っての流速を表わす。

プロペラの作用により船体後部で流体が

$$U_1 \rightarrow U_1 + \Delta U_1$$

に変化すると、 $\theta_1$  も  $\Delta\theta_1$  だけ厚さが変化する。

$$\theta_1 \rightarrow \theta_1 + \Delta\theta_1$$

(A2-1) より、 $K_1$  が  $U_1$  の変化に対して変化しないとして、

$$\Delta\theta_1 = \theta_0 \left\{ \frac{\alpha_4}{s} \int_0^s \frac{\Delta U_1}{U_0} + \frac{\alpha_5}{s} \int_0^s \frac{s}{U_0} \frac{d\Delta U_1}{ds} ds \right\} \quad (\text{A2-2})$$

と書ける。 $\Delta U_1$  は Appendix 1 の (A1-1) により与えられるので、プロペラ流入速度を一様と仮定すると、

$$\Delta U_1 = \Gamma f(r, x) \quad (\text{A2-3})$$

のように  $\Delta U_1$  が  $\Gamma$  に比例する形で表わされる。し

たがって、 $\Delta\theta_1$  は

$$\Delta\theta_1 = \Gamma \theta_0 \left\{ \frac{\alpha_4}{s} \int_0^s \frac{f(s)}{U_0} ds + \alpha_5 \frac{1}{s} \int_0^s \frac{s}{U_0} \frac{df(s)}{ds} ds \right\} \quad (\text{A2-4})$$

となる。この式は船体表面上で境界層の剥離が述べる以前に成立する式であるが、プロペラの吸込み作用により境界層は薄くなり剥離域は小さくなるので (A2-4) がプロペラ面まで成立するとし、流線もプロペラ面まで延長して計算が行えると考えると、プロペラ面での  $\Delta\theta_1$  の大きさは

$$\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^r r dr \Delta\theta_1(\varphi, r) \propto \Gamma \quad (\text{A2-5})$$

で評価される。(A2-5) の荷重度による変化は  $\Gamma$  に比例する。(A2-5) はプロペラ面における平均流速の意味を持つので、プロペラ面に流入する速度の粘性による変化は  $\Gamma$  に比例すると言える。

## 参考文献

- 1) 15th ITTC; Report of Performance Committee, (1978)
- 2) 池畑光尚; 推進性能に影響をおよぼす諸因子, 船型設計のための抵抗・推進シンポジウム, 日本造船学会, (1979)
- 3) 菅井信夫, 足達宏之, 森山文雄; 荷重度変更法の自航試験システムへの応用, 船舶技術研究所講演集, 第38回, (1981)
- 4) Yamazaki, R.; A New Direction in Propulsion Theory of Ships on Still Water, Mem. Faculty of Eng. Kyushu Univ., Vol. 40, (1980)
- 5) 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)
- 6) 田中拓, 足達宏之他; プロペラによる造波の研究, 関西造船協会誌, 第158号, (1975)
- 7) Moriyama, F.; On the Effect of Rudder on Propulsive Performance, 日本造船学会論文集, 第150号, (1981)
- 8) 森山文雄, 菅井信夫; 舵付船の自航特性について—プロペラ荷重度の影響—, 船舶技術研究所報告, 第18巻, 第3号, (1981)
- 9) 森山文雄; プロペラ性能の近似計算法について, 船舶技術研究所報告, 第16巻, 第6号, (1979)
- 10) Sasajima, H., and Tanaka, I.; On the Estimation of Wake of Ships, Proc, 11th ITTC, (1966)
- 11) 田中一朗, 姫野洋司; 3次元乱流境界層の第1近似理論とその応用, 日本造船学会論文集, 第138号, (1975)