

3-11

Ducted Propeller を装備する肥大船の水槽試験と その解析法

大橋 誠三・矢崎 敦生・南方 潤三*

1. まえがき

Ducted Propeller を装備する肥大船について的水槽試験およびその解析法には、まだ確立された方法が存在していないように思われる。このために、水槽試験と実船の推進性能の関連、Ducted Propeller 系の設計、実船の試運転成績の解析、よりよい Ducted Propeller 装備船型の開発等に、現在までの水槽試験や船型学の知識が十分利用されていない。

目白水槽では、ここ数年来、約30隻におよぶ Ducted Propeller を装備する VLCC の模型試験を実施し

たり、また、Ducted Propeller の系統的試験を行ったりして、上記の問題に関し若干の調査研究と考察を行ってきた。

ここに、その成果の一部を報告したいと思う。

なお、本報告では、第1部には、主として Ducted Propeller を装備する VLCC の水槽試験とその結果の解析法に関する問題を扱い、第2部では、主として、水槽試験の結果から実船の性能を推定したり、Ducted Propeller を設計したり、また、実船の速力試運転成績を解析したりすることに関する問題を扱う。

第1部 水槽試験とその解析

2. 必要な水槽試験の種類

Ducted Propeller 装備船に関する抵抗、推進性能上のマクロな情報を得るためには、少くとも、次のような試験が必要と思われる。

(1) 抵抗試験

- 1-1 Duct を装備しない状態の抵抗試験
- 1-2 Duct を装備したときの抵抗試験
- 1-3 1-2 における Duct の抵抗の計測
- 1-4 Duct のみの抵抗試験

(2) 自航試験

- 2-1 Ducted Propeller を装備した状態の自航試験……プロペラの回転数、スラストおよびトルクの測定のほかに Duct のスラストも同時に計測する。
- 2-2 Conventional Propeller を装備したときの自航試験

(3) プロペラ単独試験

- 3-1 Ducted Propeller 系の単独試験……… Impeller についての回転数、トルク、

スラストの計測のほかに、Duct のスラストも同時に計測する。

- 3-2 Impeller のみの単独試験
- 3-3 上記の自航試験 2-2 で使用した Conventional Propeller の単独試験

これらの試験結果を使って、次のような解析を行なうことができる。

3. 試験結果の解析

3.1 抵抗試験

Duct を船体に装備することによって、模型船の抵抗が減少する例がある^{1),6)}。この Duct と船体の相互干渉を調べるために、前記の各種の抵抗試験結果を使って、Duct が船体の抵抗に及ぼす影響と、船体が Duct の抵抗におよぼす影響とに別けて考察してみる。

3.1.1 Duct が船体の抵抗におよぼす影響

Duct を船体にとりつけると、Duct の整流効果のために、主として粘性抵抗が減少する⁶⁾。特に幅広の肥大船型の抵抗試験時に、流れが剝離を生ずるような船型において、Duct による抵抗の減少効果は大きい。

低フルード数における抵抗試験の結果から、たとえば、シェーンヘルの摩擦抵抗係数をベースとして形状

* (株)神戸製鋼所

係数 K を求め、それを抵抗試験 1-1 および 1-2 で比較すれば、両試験状態の形状係数の値は相違するに違いない。また、造波抵抗係数 $r_w = R_w / \rho v^2 l^3$ は、両者であり差はないであろう。ある一つの試験例¹⁾について、このようにして求めた形状係数を **Table 1** に、また造波抵抗係数を **Fig. 1** に示した。

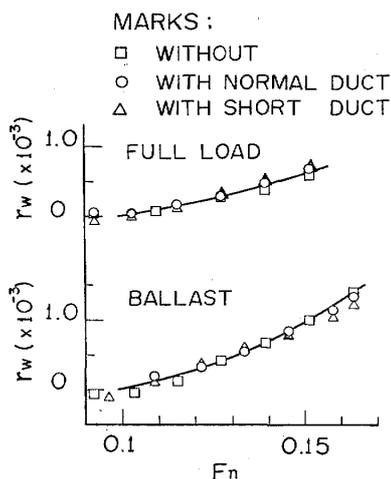


Fig. 1 r_w -Curves

Table 1 形状影響係数 K の値

| 模型船の 状態 載貨状態 | Duct を 装備せず | Duct 付き | Short Duct 付き |
|--------------------|----------------|---------|------------------|
| Full | 0.35 | 0.31 | 0.32 |
| Ballast | 0.28 | 0.23 | 0.26 |

Table 1 によれば、Duct 付きの状態では、両載貨状態とも形状係数が減じていること、また、**Fig. 1** によれば、Duct の有無による r_w の相違は両載貨状態とも殆ど認められないことが示されている。したがって、例としてとりあげた肥大船型にあっては、Duct を装備することによって、全抵抗が低下するが、それは主として Duct による船尾まわりの流れに対する整流効果であって、そのために形状抵抗が減じ、造波抵抗は殆ど変化しないということがわかる。

3.1.2 船体が Duct の抵抗におよぼす影響

Duct についての抵抗計測、すなわち 2. (1) 1-3 および 2. (1) 1-4 の試験結果を使えば、船体が Duct の抵抗におよぼす影響を調べることができる。

いま、Duct の抵抗係数を、次式で定義する。

$$C_{DN} = \frac{D_N}{\pi \cdot D \cdot L \cdot \frac{1}{2} \rho v^2}$$

ここに、

D_N ; 2. (1) 1-3 または 2. (1) 1-4 で計測された Duct の抵抗

D ; Impeller 位置における Duct の内径

L ; Duct の長さ

v ; 対水速度……2. (1) 1-4 では Duct の前進速度をとり、2. (1) 1-3 では模型船の速度に 2. (2) 2-2 で求められた伴流係数 $(1-w)$ を乗じた値をとる。

そして、2. (1) 1-3 および 2. (1) 1-4 の抵抗試験結果を比較すると、船体が Duct の抵抗におよぼす影響を知ることができる。

前記の試験例について、図示したものが **Fig. 2** である。**Fig. 2** の横軸はレイノルズ数 R_{nD} で、これを計算するときの速度 v も上記の対水速度の値を用いた。**Fig. 2** によれば、抵抗試験時に船後で計測された Duct の抵抗は、対応速度における Duct 単独の抵抗より格段に小さいことがわかる。

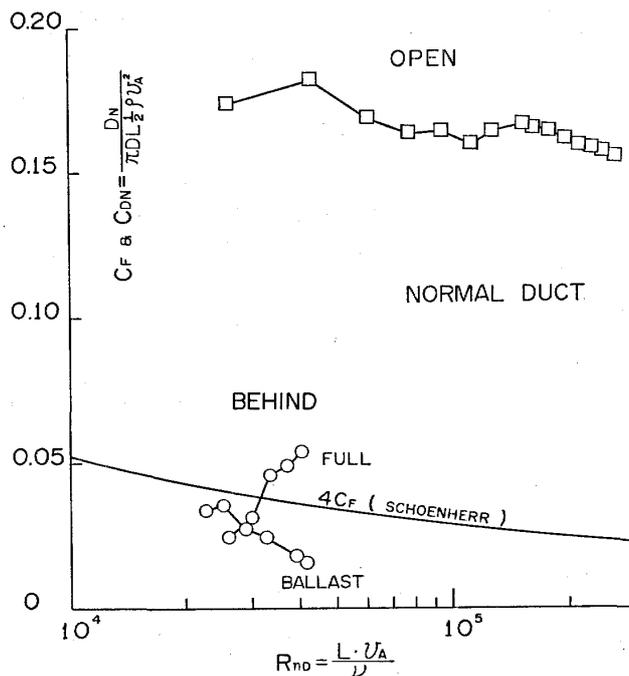


Fig. 2 Resistance of Duct

これから、Duct は船後の流れのなかでは抵抗が減ずる、すなわち、Duct は船後の斜流の影響を受けて若干のスラストを発生して自らの抵抗を相殺していることがわかる。そして、その量はバラスト状態において大きい。

3.1.3 船体と Duct との相互影響

いま、

Duct を装備しないときの抵抗を R_1

Duct を装備したときの抵抗を R_2

Duct を装備した抵抗試験時の Duct の抵抗を

$$\Delta R_{D2}$$

Duct のみの抵抗を ΔR_D

Duct による船体抵抗の変化分を δR

Duct が船後に出すスラストを ΔT_{D2}

とすれば,

$$\Delta R_{D2} = \Delta R_D - \Delta T_{D2}$$

かつ,

$$\begin{aligned} R_1 - R_2 &\doteq \delta R - \Delta R_{D2} \\ &\doteq \delta R - \Delta R_D + \Delta T_{D2} \end{aligned} \quad (1)$$

となる。3-1-1 で形状抵抗の減少分として示されたものは (1) 式で与えられるものである。

δR や ΔT_{D2} は, Duct 本来の形状のほかに船尾まわりの流れの模様によって左右されるところが大きいように思われる。したがって, 抵抗の見地からみても, Duct と主船体のマッチングには, 主船体の設計が関与するところが多い。

以上の考察により, 抵抗の見地からいえば, 船体と Duct の相互干渉として, Duct は船尾まわりの流れに対し整流効果を与えることによって, 船体の抵抗を減じ, また, 船体はその船尾流れの影響として, Duct の抵抗を減じ, 両者あいまって, Duct を装備する模型船の抵抗を減ずることになる。

なお, Duct 装備船の Duct を含まない主船体の抵抗は, $R_2 - \Delta R_{D2}$ で与えられる。

3.2 プロペラの単独試験

Ducted Propeller の単独性能は, 次のような無次元係数によって表現されるのが普通である。

$$K_{TP} = \frac{T_P}{\rho n^2 D^4} \quad (2)$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad (3)$$

$$K_{TT} = \frac{T_P + T_D}{\rho n^2 D^4} \quad (4)$$

$$J = \frac{v_A}{nD} \quad (5)$$

$$\eta_0 = \frac{JK_{TT}}{2\pi K_Q} \quad (6)$$

$$\tau = \frac{T_P}{T_P + T_D} \quad (7)$$

上式中, D は Impeller の直径を, v_A は Ducted Propeller 系の前進速度である。

また, Impeller の単独性能は, 通常のプロペラと同様な形式で表現される。

同一作動状態における τ の値を単独状態と自航状

(86)

態で比較することによって, 単独状態と自航状態の Ducted Propeller の性能の変化の模様を知ることができる。

1例を Fig. 3 に示した。この例では, τ の値は, 自航試験時の方が単独試験時より大きい。すなわち, 自航試験時には, Impeller のスラスト受け持ち分が大きくなることを示している。

このように, 単独時にくらべて自航試験時に, Ducted Propeller の性能が変化する可能性があるということは, 水槽試験結果の解析のみならず, Ducted Propeller の設計や実船速力試運転成績の解析を複雑にする一つの原因になっている。

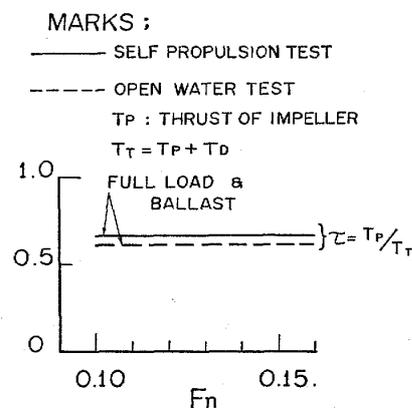


Fig. 3 Component of Total Thrust

3.3 自航試験

3.3.1 推進係数と自航要素

幅広の肥大船型に Ducted Propeller を採用すると, Conventional Propeller を装備したものより推進性能が改善される例が多いといわれているが, ここで Ducted Propeller を装備した肥大船型の推進係数と自航要素等の関係について考察してみる。

推進係数 η は, 次式で定義される。

$$\eta = \frac{EHP}{DHP} = \frac{R_S \cdot v_S}{2\pi n Q_B}$$

上式をスラスト一致法で変形して, 次の関係式が導かれる。

$$\tau = \frac{T \cdot v_A}{2\pi n Q_B} \cdot \frac{R_S}{T} \cdot \frac{v_S}{v_A}$$

ここで, Ducted Propeller を装備した場合

- (1) Ducted Propeller 系を一つの推進器とする
- (2) Impeller を推進器と考え, Duct は船体の付加物とする

の2通りの考え方ができる。

- (1) の考え方をとると, 推進係数 η は, 次のよう

になる。

$$\eta = \frac{(T_P + T_D) \cdot v_A}{2\pi n Q_0} \cdot \frac{Q_0}{Q_B} \cdot \frac{R_S}{(T_P + T_D)} \cdot \frac{v_S}{v_A}$$

ここで、上式中の船の抵抗 R_S についての考え方に2つある。すなわち、Duct は推進器の一部としているので、船の抵抗 R_S は Duct を装備していないときの抵抗 R_1 をとる考えと、前記 3.1.3 に述べたように Duct 装備船における Duct を含まない主船体の抵抗 ($R_2 - \Delta R_{D2}$) をとる考え方である。

したがって、

$$\eta = \eta_{0T} \cdot \eta_{RT} \cdot \frac{(1-t)}{1-w_{TT}} \quad (8)$$

$$\eta = \eta_{0T} \cdot \eta_{RT} \cdot \frac{(1-t')}{1-w_{TT}} \quad (9)$$

ただし、 T_P, T_D は、それぞれ Impeller および Duct のスラスト、 $(1-t)$ は Duct を装備しないときの船の抵抗と全スラスト ($T_P + T_D$) で定義されるもの、 $(1-t')$ は Duct が船体の抵抗におよぼす影響を考慮したときの Duct を含まない主船体の抵抗 (3.1.3 の $R_2 - \Delta R_{D2}$ に対応する) と全スラストで定義されるもの、また、 $\eta_{0T}, \eta_{RT}, 1-w_{TT}$ は、全スラスト係数 K_{TT} に基づいて求められたものである。

(2) の考え方を採ると、推進係数 η は、次のようになる。

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{T_P \cdot v_{AP}}{2\pi n Q_B} \cdot \frac{R_S}{T_P} \cdot \frac{v_S}{v_{AP}} \\ &= \eta_{0IMP} \cdot \eta_{RIMP} \cdot \frac{1-t_P}{1-w_{TIMP}} \quad (10) \end{aligned}$$

ここで、 v_{AP} は、Duct 内の Impeller 位置の流速に相当するもの、 $\eta_{0IMP}, \eta_{RIMP}, 1-w_{TIMP}$ は Impeller のスラスト係数 K_{TP} に基づき、Impeller 単独の状態におけるプロペラ特性曲線より求められたものである。また、 $1-t_P$ は前記 3.1.3 の Duct を装備した船の抵抗 R_{S2} と Impeller のスラスト T_P によって定義されるものである。

また、Impeller のスラストの全スラストに対するスラスト分担率 $\tau = T_P / (T_P + T_D)$ を導入すると、(10) 式の推進係数 η は、次のようになる。

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{T_P \cdot v_{AP}}{2\pi n Q_B} \cdot \frac{R_S}{(T_P + T_D)} \cdot \frac{(T_P + T_D)}{T_P} \cdot \frac{v_S}{v_{AP}} \\ &= \eta_{0IMP} \cdot \eta_{RIMP} \cdot \frac{(1-t) \text{ or } (1-t')}{1-w_{TIMP}} \cdot \frac{1}{\tau} \quad (11) \end{aligned}$$

同様に、推進係数 η は、つぎのようにも表すことができる。

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{T_P \cdot v'_{AP}}{2\pi n Q_B} \cdot \frac{R_S}{(T_P + T_D)} \cdot \frac{(T_P + T_D)}{T_P} \cdot \frac{v_S}{v'_{AP}} \\ &= \eta_{0P} \cdot \eta_{RP} \cdot \frac{(1-t) \text{ or } (1-t')}{1-w_{TP}} \cdot \frac{1}{\tau} \quad (12) \end{aligned}$$

式中の $\eta_{0P}, \eta_{RP}, 1-w_{TP}, v'_{AP}$ は Impeller のスラスト係数 K_{TP} に基づいて、Ducted Propeller 系としての Impeller の特性曲線より求められたものである。なお、(11) 式は、三井造船 (株) の安部氏が導かれた式で、この (11) 式と (10) 式は、次の関係で結びつけられる。

$$\frac{1-t_P}{1-w_{TIMP}} = \frac{(1-t) \text{ or } (1-t')}{1-w_{TIMP}} \cdot \frac{1}{\tau}$$

したがって、上記の (10) または (11) 式いずれを用いても、 $(1-t_P)$ に対応する $(1-t')$ をとることにすれば、推進係数 η の値は同じになる。

要するに、どの式を用いた方が Ducted Propeller 装備船の性能をよりよく説明し、実船性能の推定やプロペラの設計に役立つかということになる。

各式の特色と考えられる点を要約すると、次のようになる。

- (1) (8) および (9) 式は、Ducted Propeller 系を1個の推進器と考えて、総体的に Ducted Propeller 装備船の推進性能を考えるのに使いやすい。また、Ducted Propeller の設計に当たり、AU-Da シリーズ²⁾のような設計チャートが与えられているときには便利である。また、Ducted Propeller の全スラストのみを問題にして、その内部に立ち入ることなく、Impeller と Duct のスラスト配分、すなわち τ の値が単独状態と自航状態で変化することを考える必要のない場合には、使用できる。
- (2) (10) 式は、Impeller を推進器とし、Duct は船体の付加物と考える場合で、Impeller の単独性能を通常の Conventional Propeller の場合と同じように、一つの尺度として使うことになるから、(11) または (12) 式のような τ の変化をプラペラ側として考える必要がない。また、実船の速力試運転では、Impeller に関する諸量しか計測されないことを考えると、(10) 式は、実船の試運転成績を解析する面からも便利である。
- (3) (11) 式は、Impeller を推進器と考える点では (10) 式と同じであるが、 τ の値を Ducted Propeller 装備船の優劣の判断の一つの目安に

しうる特色がある。特に、 $(1-t)$ と $(1-t')$ の差も τ の中に含ませて考えれば、 τ の値は本来の定義である T_P/T_T のほかに、Duct による船体抵抗減少の効果も含んだ一つの係数と解することができる利点がある。

(4) (12) 式は、Duct 内の Impeller の性能を基準にとっている。このために、自航状態の τ が単独状態のものより大きくなる場合、 K_{TP} が大きくなり、Fig. 5 または、Fig. 6 に見るように、 $1-w_{TP}$ または $1-w_{QP}$ が異常な値となることがある。

以上の考察から、推進係数の中味の分解の方法として、いずれによるのが便利であるかは、解析の目的によって判断しなければならないことがわかる。

つぎに、Ducted Propeller 装備模型船の推進係数 η の値が、Conventional Propeller 装備の模型船のものに比べて、どのような関係にあるかということは一概にいえぬ。

たとえば、同一母船型に、Conventional Propeller, Ducted Propeller ならびに Short Ducted Propeller をつけた一連の水槽試験の結果によれば、定格出力付近において Table 2 のような数値を与えている。

Table 2 模型船の η の値 (その 1)

| 載貨状態 \ 装備するプロペラ | Conventional Propeller | Ducted Propeller | Short Ducted Propeller |
|-----------------|------------------------|------------------|------------------------|
| Full | 0.693 | 0.697 | 0.685 |
| Ballast | 0.792 | 0.827 | 0.788 |

Ducted Propeller 装備船の η の計算は、(9) 式により、 $(1-t')$ を採用したときのものが示してある。Table 2 によれば、この試験例においては、普通の Ducted Propeller 装備のものが数 % 推進係数の改善が見られるが、Short Ducted Propeller 装備のものは、ごく僅か推進係数の値が低下している。しかし、この表の大小関係には、水槽試験に用いた模型プロペラ、模型ダクテッド・プロペラがそれぞれの推進器として条件が同一であるかどうかという問題も含んでいるので、直ちに本表の関係が一般的であるということとは出来ない。むしろ、大局的な見方をすれば、Duct による抵抗減少を別途に考える解析法によるときは、推進係数の値は、Ducted Propeller 装備の有無により大きく変らないか、または適切な Duct を採用することに

(88)

Table 3 模型船の η の値 (その 2)

| 載貨状態 \ 装備するプロペラ | Conventional Propeller | Ducted Propeller | Short Ducted Propeller |
|-----------------|------------------------|------------------|------------------------|
| Full | 0.693 | 0.755 | 0.722 |
| Ballast | 0.792 | 0.893 | 0.842 |

より、僅か改善されるとした方がよいかもしいない。もし、Duct による抵抗減少効果を推進係数の上昇という形でとらえれば、この試験例の場合にも Table 3 に示すように、推進係数の値は、Conventional Propeller 装備船の場合より数 % 上昇した形で現われる。

また、Table 2 によれば、模型試験で Short Ducted Propeller 装備船が、Conventional Propeller 装備船に比らべて、同一速力における馬力の低下を示すのは、Short Duct による抵抗減少効果に基因することがわかる。したがって、もし、Duct による抵抗減少効果が実船では期待できないか、あるいは、少ないとすれば、Short Duct の効果はかなり小さくなってしまふであろう。

3.3.2 スラスト減少係数 t

スラスト減少係数は、自航試験で計測されたプロペラのスラストの値で、それに対応する抵抗の値を割ったものとして定義されるが、Ducted Propeller 装備船にあつては、前項で述べたように、抵抗やスラストの採り方によって、下記のような考え方ができる。

$$(1) \quad 1-t = \frac{R_{S1}}{T_T}$$

R_{S1} ; 自航試験で Ducted Propeller 系のスラストを計測する状態に対応する抵抗で、模型船に Duct を装備していないときの抵抗試験 (2. (1) 1-1) から導かれる。

T_T ; 自航試験で計測された Impeller のスラスト T_P と Duct のスラスト T_D を合計したもの

$$(2) \quad 1-t' = \frac{(R_{S2} - \Delta R_{DS2})}{T_T}$$

$(R_{S2} - \Delta R_{DS2})$; 自航試験で Ducted Propeller 系のスラストを計測する状態に対応する抵抗で、模型船に Duct を装備したときの抵抗試験 (2. (1) 1-2) の結果から、その抵抗試験時に計測された Duct の抵抗 (2. (1) 1-3) を差し引

いたものから導かれる。

$$(3) \quad 1-t_P = \frac{R_{S2}}{T_P}$$

R_{S2} : 自航試験で, Duct 内で作動する Impeller を推進器とし, Duct は船体の付加物と考えた場合に対応する抵抗で, Duct をつけた模型船の抵抗試験 (2. (1) 1-2) から導かれる。

T_P : 自航試験で計測された Impeller のスラスト

$1-t$ および $1-t'$ は, いずれも Ducted Propeller 系を 1 個の推進器と考えた場合である。 $1-t'$ では, 分子となる抵抗に Duct による抵抗減少分を考慮している。

従来, Ducted Propeller 系を 1 個の推進器と考える解析法をとる場合にも, Duct の抵抗減少効果を考えずに Duct をつけないときの抵抗試験から導かれた R_{S1} をスラスト減少係数の計算に使用する例が多かったが, これでは, 計測されたスラストに対応する抵抗を考えないこととなり, スラストをベースにして別途計算される伴流係数やプロペラ効率比の値と直接対応しないことになる。

$1-t_P$ は, Impeller のみを推進器として考え, Duct を船体の付加物として扱う場合である。

Duct を装備しない抵抗試験時に, 船尾流れの乱れ度が大きいような船型にあっては, Duct による整流効果が期待されるから, このときには, 定義からも明らかのように, $(1-t) > (1-t')$ となる。また, $1-t_P$ は計算上かなり大きな値, すなわち $(1-t')$ を T_P/T_T で割った値に, ほぼ近い数値を示す。

また, Ducted Propeller 系の推進器は, “その前後方向の中心が船体寄りにある Conventional Propeller に Equivalent な効果を持っている” という考え方⁵⁾に従えば, Conventional Propeller 装備の対応模型船から導かれる $1-t_0$ の値にくらべて, Ducted Propeller 装備模型船の $1-t'$ は小さな値を持つことが予想される。

1 例について, スラスト減少係数の解析を行ない Conventional 装備模型船と比較したものが Fig. 4 である。Fig. 4 によれば, Conventional Propeller のスラスト減少係数を t_0 とすれば, $(1-t_0) > (1-t')$ であること, また $(1-t) > (1-t')$ であること, さらに $(1-t')$ の定義によるスラスト減少係数の値は満載状態とバラスト状態で異なること等がわかる。 $(1-t')$ が

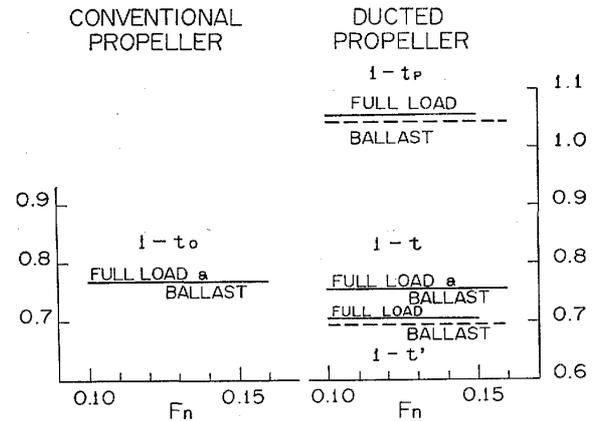


Fig. 4 Curves of Thrust Deduction Factor

載貨状態によって異なるのは, ダクトが船体抵抗におよぼす効果が, 載貨状態・トリム等によって異なるため, そのような内容も, $(1-t')$ という定義によって表現される。

3.3.3 伴流係数 w

自航試験時に計測されたスラストまたはトルクを基にして解析される伴流係数についても, どのような条件の推進器を仲立ちにするかによって, 次のような考え方ができる。

- (1) Ducted Propeller 系の全スラストを基にするもの, $1-w_{TT}$
- (2) Impeller のスラストまたはトルクを基にするもの
 - (2)-1 Impeller 単独作動時のスラストまたは, トルクを基にするもの, $1-w_{T IMP}$, $1-w_{Q IMP}$
 - (2)-2 Impeller が Duct 内におかれたときの, Impeller のスラストまたはトルクを基にするもの, $1-w_{TP}$, $1-w_{QP}$
- (3) Duct のスラストを基にするもの, $1-w_{TD}$

(2)-1 の解析法は Conventional Propeller 装備船と同じである。(1), (2)-2 および (3) の解析法を図式的に示したものが Fig. 5 である。Fig. 5 の横軸上に求められた各々の J の値から, 伴流係数が計算される。

1 例について, これらの解析を行なった結果を Fig. 6 に示す。Fig. 6 中, w_{TT} , w_{TP} , w_{TD} 等は J_{TT} , J_{TP} , J_{TD} にそれぞれ対応し, また $w_{T IMP}$, $w_{Q IMP}$ は Impeller 単独作動時のスラストまたはトルクを基にして解析した伴流係数の値であることを示す。なお, Fig. 6 中には, Ducted Propeller の代りに Conven-

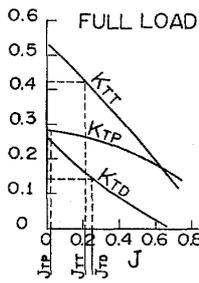


Fig. 5 Relation between K_T and J

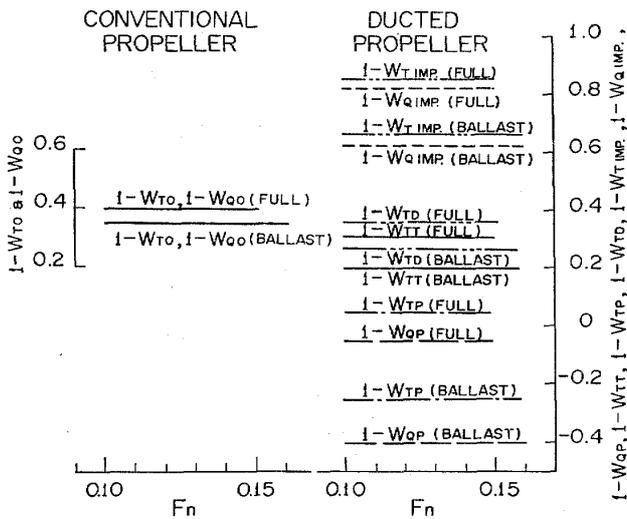


Fig. 6 $1-w_M$ Curves

tional Propeller を装備したときの伴流係数 w_{T0} , w_{Q0} の値も示してある。

このような解析法をとることにより、次のようなことがわかる。

- (ア) $1-w_{T0}$ と $1-w_{TT}$ の値を比較すると、 $1-w_{T0}$ の方が若干大きな値を示している。この相違の中には、両者の有効直径の違いのほかに、両者の船尾まわりの流れの相違などが含まれており複雑であるが、この場合にも Ducted Propeller 系は、その前後位置が船体に近い Conventional Propeller に Equivalent な性能を示すと解しても大局的によいことを表わしている。
- (イ) $1-w_{T IMP}$ または $1-w_{Q IMP}$ の値はかなり大きいですが、これは Impeller の対水速度に対する Duct による加速効果である。
- (ウ) $1-w_{TP}$ または $1-w_{QP}$ はかなり小さな値を示し、ゼロ近傍またはマイナスの値を与えている。これは、Fig. 3 でも見たように、Duct Propeller の性能が単独状態と自航状態で変化

し、このために Duct 内の Impeller の性能も自航試験時には、単独試験時と異なっているにもかかわらず、それが変化しないとして解析計算したためである。したがって、別に報告する S-ダクトの満載状態のように、単独状態の性能と自航状態の性能が変わらない場合には、 $1-w_{TP}$ 、および $1-w_{TD}$ の値は $1-w_{TT}$ と等しくなる。

(エ) $1-w_{TD}$ の値も、単独状態時と自航状態時で、Impeller の性能が異なるため、 $1-w_{TT}$ の値とは異なる。

(オ) Ducted Propeller の性能が単独状態と自航状態（伴流中）で異なるために、模型試験で解析された各種の伴流係数の定義のうち、いずれが Ducted Propeller の設計や実船速力試運転の解析に用いて然るべきかということは重要な問題である。すくなくとも、Duct 内の Impeller の性能や Duct だけを取り出した Duct の性能などは、基準とするには不向きのように思われる。これらの伴流係数と前記のスラスト減少係数の対応は、次のようになる。

$$(1-w_{TT}) \text{ と } (1-t) \text{ または } (1-t')$$

$$(1-w_{T IMP}) \text{ または } (1-w_{Q IMP}) \text{ と } (1-t_P)$$

3.3.4 船体効率 η_H

前記の伴流係数とスラスト減少係数の組合せから、次の3種の船体効率が計算される。

$$\eta_{HT} = \frac{1-t}{1-w_{TT}}$$

$$\eta'_{HT} = \frac{1-t'}{1-w_{TT}}$$

$$\eta_{H IMP} = \frac{1-t_P}{1-w_{T IMP}} \text{ または } \frac{1-t_P}{1-w_{Q IMP}}$$

Conventional Ship にくらべて Ducted Propeller 装備船の船体効率 η_{HT} または η'_{HT} の値は、かなり良くなるということは、今までの報告にもみられるところであるが、後述のように、Ducted Propeller 装備船ではプロペラ効率比 η_R が小さくなる傾向があるので、Conventional Ship との比較を船体効率の値のみで行なうことは好ましくない。両者の比較は、

$$(\text{船体効率}) \times (\text{プロペラ効率比})$$

の形で行なうべきであろう。

一つの試験例について、 η_H および $\eta_H \times \eta_{RTT}$ の値を、定格速力付近の速力で求めて Table 4 に示した。なお η_{RTT} の定義は、次節に示される。

Table 4 η_H , $\eta_H \cdot \eta_{RTT}$ の数値例

| 装備する プロペラ 載貨状態 | Conventional Propeller | | Ducted Propeller | | Short Ducted Propeller | |
|----------------------|------------------------|---------------------------|------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------|
| | η_H | $\eta_H \cdot \eta_{RTT}$ | η_H | $\eta_H \cdot \eta_{RTT}$ | η_H | $\eta_H \cdot \eta_{RTT}$ |
| Full | 1.93 | 1.93 | 2.27 | 2.14 | 2.25 | 2.21 |
| Ballast | 2.20 | 2.20 | 3.50 | 3.18 | 3.23 | 3.08 |

ただし、上表中、Ducted Propeller 装備船の η_H は、 $\eta'_{HT} = (1-t)/(1-w_{TT})$ の定義による場合の値を示す。

Table 4 によれば、Ducted Propeller 装備模型船では、船体効率の改善が大幅であるために、 η_R の低下を補って、 $\eta_H \cdot \eta_{RTT}$ でも、なお良好な数値を与えていることがわかる。

3.3.5 単独効率 η_0 およびプロペラ効率比 η_R

前記の伴流係数の解析法に対応して、それぞれの自航試験時の単独効率が求められる。また、同時に上記の単独効率に対応するプロペラ効率比も求められる。

Table 4 に示した試験例につき、各種のプロペラ効率比の値を Table 5 に示した。

Table 5 η_{RTT} , η_{RT0} などの数値例

| プロペラ の種類 | 載貨状態 プロペラ効率比 | | Full | Ballast |
|------------------------|-----------------|--|------|---------|
| | | | | |
| Conventional Propeller | η_{RT0} | | 1.00 | 1.00 |
| Ducted Propeller | η_{RTT} | | 0.95 | 0.91 |
| Impeller | η_{RTIMP} | | 0.96 | 0.95 |
| | η_{RQIMP} | | 0.95 | 0.94 |

[注] 満載・バラスト状態の値は、それぞれ $F_m = 0.13$ および 0.14 におけるものを示す

上表に示したプロペラ効率比 η_{RT0} , η_{RTT} , η_{RTIMP} および η_{RQIMP} は、前記の伴流係数 w_{T0} , w_{TT} , w_{TIMP} および w_{QIMP} に対応するものである。

Table 5 によれば、 η_{RTT} および η_{RTIMP} 共に、両

載貨状態において Conventional Propeller を装備する模型船の η_{RT0} より、小さな値を与えていることがわかる。このことから、プロペラに Duct をかぶせることにより、プロペラ効率比が低下すること、また Ducted Propeller の効率が不均一流中では低下することが推察される。なお、後者に対しては、船尾形状と関連させたウェーク・アダプテッド・ダクト¹⁴⁾などの効果が期待されるかもしれない。

3.3.6 Impeller のスラスト分担率 τ

Ducted Propeller 系の Impeller と Duct のスラスト配分を表わす係数である Impeller のスラスト分担率 $\tau = T_P / (T_P + T_D)$ は、前述のように単独状態と船後の不均一流中（伴流）で作動する自航状態においては、その値が変化する場合がある (Fig. 3 参照)。したがって、 τ の値は Ducted Propeller 系の単独状態と自航状態における性能の変化の様相を知る一つの尺度となる。しかし、一方では、 τ の値が単独状態と自航状態において変ることにより水槽試験結果の解析、Ducted Propeller の設計、また実船の速力試運転解析を複雑にする。

自航状態における τ の値が、単独状態にくらべて、船体の船尾まわりの流れの様子により大きく影響されることから、主船体の主要目・形状、載貨状態等と Duct の大きさ・形状・位置および Impeller の要目・形状等との関連が Ducted Propeller 装備船の性能を左右する重要な要素の一つとなっている。

さらに、模型船の自航状態における τ の値は、実船の航走時における τ の値とは、上記の理由により、何らかの尺度影響をうけて変化するものとも考えられる。

第2部 実船性能の推定法など

4. 伴流係数の尺度影響と実船の推進性能の推定

4.1 伴流係数の尺度影響の推定

Ducted Propeller 装備船の伴流係数の尺度影響の問題は Conventional Propeller 装備船の伴流係数に対する尺度影響の問題よりも、一層複雑である。しかし、理論的な厳密性はともかくとして、何らかの実用的方法を考案しないと Ducted Propeller 装備船の計画は勿論、Ducted Propeller の設計も行なうことができない。そこで、次のような考え方により、伴流係数の尺度影響の推定方法をいくつか考えて見た。

(1) $(1-w_{TT})_S$ の推定

Ducted Propeller 系を1個の推進体としたとき、次のような方法で、水槽試験の結果から実船の伴流係数を推定する。

すなわち、

$$(1-w_{TT}) = \left[\begin{array}{l} \text{Conventional} \\ \text{Propeller を} \\ \text{装備したとき} \\ \text{の } (1-w_T) \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Duct に} \\ \text{よる影響} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Ducted Propeller の有} \\ \text{効直径と Conventional} \\ \text{Propeller の直径の差} \\ \text{による影響} \end{array} \right]$$

と考える。そして、上式を更に、次のように書き改める。

$$(1-w_{TT}) = (1-w_T) + \delta(1-w)_1 + \delta(1-w)_2 \quad (13)$$

ここに、

$\delta(1-w)_1$; Duct の作用による項で $(1-w_T)$ に対しては、それを減ずるような効果を示す。すなわち、Duct によるプロペラ前進速度に対する堰止め効果を表わす。

$\delta(1-w)_2$; Conventional Propeller と Ducted Propeller の有効直径の差の効果を表わす。

上式右辺の第2項、すなわち $\delta(1-w)_1$ は尺度影響は受けないと仮定する。このようにし、かつ Conventional Propeller 装備船と同様な考え方⁹⁾で $(1-w_T)$ および $\delta(1-w)_2$ の尺度影響を考慮すれば、 $(1-w_{TT})$ の実船の値を推定することが出来る。

Ducted Propeller の有効直径として、Duct 入口の直径をとるか、Impeller 装備位置の外径をとるか議論

(92)

のあるところであるが、幅広肥大模型船における伴流係数におよぼす Propeller 直径の影響はかなり小さいから、いずれをとっても $\delta(1-w)_2$ の値には、たいした影響はないはずである。

前に Table 2 に引用した試験例について、実船と模型船の長さの比を 50:1 と仮定して、実船の $(1-w_{TT})_S$ を上記の方法で計算してみると Table 6 のようになる。

Table 6 の推定では、Ducted Propeller の有効直径として、Impeller 位置の Duct の外径をとった。

Table 6 実船の伴流係数及び ϵ の値

| プロペラの種類 載貨状態 | $(w_T)_S$ | $(w_{TT})_S$ | |
|-----------------|------------------------|------------------|------------------------|
| | Conventional Propeller | Ducted Propeller | Short Ducted Propeller |
| Full | 0.45 | 0.54 | 0.53 |
| Ballast | 0.41 | 0.56 | 0.54 |
| ϵ の値 | | | |
| Full | 1.37 | 1.48 | 1.47 |
| Ballast | 1.64 | 2.19 | 2.08 |

(2) $(1-w_{T IMP})_S$ の推定

Duct は船体の付加物とし、Impeller のみを推進体と考えた場合の Impeller に対する実船の伴流係数を (1) と同じように、下に示すような考え方で推定してみる。

$$(1-w_{T IMP}) = \left[\begin{array}{l} \text{Conventional} \\ \text{Propeller を} \\ \text{装備したとき} \\ \text{の } (1-w_T) \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Duct に} \\ \text{よる影響} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Ducted Propeller の有} \\ \text{効直径と Conventional} \\ \text{Propeller の直径の差} \\ \text{による影響} \end{array} \right]$$

すなわち、

$$(1-w_{T IMP}) = (1-w_T) + \delta(1-w)_3 + \delta(1-w)_4 \quad (14)$$

ここに、

$\delta(1-w)_3$; Duct の作用による項で $(1-w_T)$ に対しては、それを増加させるような効果を示す。すなわち、Duct によるプロペラ前進速度に対する加速効果を表わす。

$\delta(1-w)_4$; Conventional Propeller と Ducted Pro-

propeller の有効直径の差の効果を表わす。

(1) と同様に、 $\delta(1-w)_s$ は尺度影響を受けないと仮定する。このように仮定すれば、(1) の場合と同様にして、 $(1-w_{T IMP})$ の実船の値を推定することが出来る。

Table 6 に採用したのと同じ試験例について本推定法による $(w_{T IMP})_s$ の値を **Table 7** に示す。

Table 7 実船の伴流係数及び ϵ の値

| プロペラの種類 載貨状態 | $(w_T)_s$ | | |
|-----------------|------------------------|------------------|------------------------|
| | Conventional Propeller | Ducted Propeller | Short Ducted Propeller |
| Full | 0.45 | 0 | 0.19 |
| Ballast | 0.41 | 0.08 | 0.23 |

| ϵ の値 | | | |
|---------------|------|------|------|
| Full | 1.37 | 1.18 | 1.23 |
| Ballast | 1.64 | 1.39 | 1.50 |

4.2 実船の推進性能の推定

Conventional Propeller を装備した船舶では、ラスト減少係数やプロペラ効率比は尺度影響を受けないと仮定して実船の推進係数の値が推定されることが多い。しかし、Ducted Propeller 装備船にあっては、前述のように τ の値が伴流分布によって影響されるので、伴流係数の尺度影響と併せて τ の尺度影響も考えなければならないし、また Duct の整流効果に基づく抵抗の軽減効果も考慮するなど、かなり問題は複雑である。そこで、実用的な解を求めるために、まず Duct の整流効果については、Duct による抵抗減少を考慮した水槽試験の結果を使うものとし、また τ の尺度影響は小さいと仮定する。そうすれば、通常の船舶と同じように、伴流係数やプロペラ効率の尺度影響を考えれば、近似的に求めることができる。また、ここで、Ducted Propeller の尺度影響のうち、船後における Duct の影響は小さいとして、これも省略するこ

Table 8 実船の推進係数 η_s (その1)

| プロペラの種類 載貨状態 | Conventional Propeller | Ducted Propeller | Short Ducted Propeller |
|-----------------|------------------------|------------------|------------------------|
| Full | 0.64 | 0.64 | 0.65 |
| Ballast | 0.67 | 0.68 | 0.68 |

とにする。このようにすれば、Conventional Ship と同様にして、実船の推進係数を推定できるであろう。

上述の考え方により、前記の試験例について実船に対応する推進係数を推定した結果が **Table 8** である。

なお、**Table 8** の値は、**Table 2** の η の値に対応するものである。

前記のような仮定のもとに計算した τ_s の値について見ると、推進係数の値は、推進器の種類によって殆ど変化していない。このことは、実船で Ducted Propeller 装備船の推進性能が優れている主たる原因は、Duct による抵抗減少効果にあるということになる。

もし、Duct による抵抗減少効果を推進係数の中に入れてしまう考え方をとれば、**Table 3** に対応して、次の値が計算される。

Table 9 実船の推進係数 τ_s (その2)

| プロペラの種類 載貨状態 | Conventional Propeller | Ducted Propeller | Short Ducted Propeller |
|-----------------|------------------------|------------------|------------------------|
| Full | 0.64 | 0.69 | 0.69 |
| Ballast | 0.67 | 0.74 | 0.75 |

5. Ducted Propeller の設計

水槽試験を利用して Ducted Propeller 系の設計を行なう方法には、大別すると次の2種が考えられる。

- (1) Ducted Propeller 系の設計図表、たとえば、AU-Da シリーズ設計図表群と $(1-w_{TT})_M$ または $(1-w_{TT})_s$ 等を利用するもの
- (2) Impeller についての設計図表群と $(1-w_{T IMP})_M$, $(1-w_{Q IMP})_M$ または $(1-w_{T IMP})_s$, $(1-w_{Q IMP})_s$ などを利用するもの

(1) による場合、AU-Da シリーズの設計図表群²⁾には系統的試験による $J-K_T, K_{TT}, K_{TD}, K_Q$ 曲線および $\sqrt{B_P}$ 型式の図表が用意されているので、それらを利用することができる。

(2) による場合は、AU-Da シリーズの Impeller について、やはり系統的試験による $J-K_T, K_Q$ 曲線および $\sqrt{B_P}$ 型式の図表が近いうちに作成される予定であるので、それを利用することができる。

この両方法により **Table 8** に引用した船舶について、45,000 PS×100 rpm の主機をとう載したときの満載状態の速力を 16 ノットと仮定して、実船のプロペラの要目を求めてみると、次のようになる。ただし、この計算では、いずれの Propeller または Impeller と

も5翼で展開面積比は0.65とし、また、(2)の方法による設計図表群がないので、一応ここでは、AU5-65設計図表を使用している。

(a) Normal Ducted Propeller

設計法(1)の場合

$$D=8.2\text{ m}, H/D=0.82, \eta_{0T}=0.42$$

設計法(2)の場合

$$D=8.15\text{ m}, H/D=0.86, \eta_0=0.62$$

(b) Short Ducted Propeller

設計法(1)の場合

$$D=8.1\text{ m}, H/D=0.77, \eta_{0T}=0.40$$

設計法(2)の場合

$$D=8.27\text{ m}, H/D=0.87, \eta_0=0.56$$

設計法(1)と設計法(2)では、使用した設計図表等が異なることを考えれば、両設計法の対応は、かなり良好といえる。

このことは、前節で考察した実船の伴流係数の推定法が、その大胆な仮定にもかかわらず、当らずといえども遠からずのところにあることを推測させる。

6. 実船の試運転成績の解析に関連して

実船では Duct のスラストが計測されることはないし、Impeller のスラストも計測されることは稀であろう。

計測されるものは、船速のほかに、Impeller の回転数とトルクが普通であるということになる。トルクをベースにした試運転結果を解析して、 ΔC_F や伴流係数を求めるには、2通りの方法が考えられる。

(1) Impeller のトルクを基にして、Ducted Propeller 系を推進器とする単独性能曲線を利用する方法

(2) Impeller のトルクを基にして、Impeller のオープン状態の単独性能曲線を利用する方法

これらの解析に当っては、スラスト減少係数やプロペラ効率比の値は、模型試験から得られた値を使用するのが普通である。したがって、スラスト減少係数に、前述の $1-t$ を使うか $1-t'$ を使うかによって、解析結果は異なってくる。Impeller のトルク係数を K_Q とし、(1)または(2)の方法を利用するときのプロペラ効率比を $\eta_{R(1)}$ または $\eta_{R(2)}$ ($\equiv \eta_{RQIMP}$) とすれば、 $K_Q \cdot \eta_{R(1)}$ から K_{TT} および $(1-w_{TT})_S$ が求められ、それから ΔC_F および ϵ ($= \frac{(1-w_{TT})_S}{(1-w_{TT})_M}$) が計算され、また、 $K_Q \cdot \eta_{R(2)}$ から Impeller 単独状態のスラ

スト係数 K_{TIMP} および $(1-w_{TIMP})_S$ が求められ、それから ΔC_F および ϵ ($= \frac{(1-w_{TIMP})_S}{(1-w_{TIMP})_M}$) が求められる。

(1)の方法では、模型船と実船で τ の値の変化があったとしても、Ducted Propeller 系の K_Q と K_{TT} の関係は単独状態における K_Q と K_{TT} の関係がそのままあてはまることを想定している。従って、(1)の方法で実船試運転解析を行なうとき、 $\eta_{R(1)}$ の値を使う代わりにプロペラ効率比の値は1.0とした方が妥当な解析値が得られるという議論も出てくる⁶⁾ことにもなる。

このような疑問を一つ除くには、むしろ、(2)の方法の方が better であると思われる。

三井造船(株)建造の“Thorsaga”の試運転から解析された ϵ および ΔC_F の値⁵⁾を Table 10 に示した。これは、(1)の方法にしたがって解析されている。

Table 10 実船試運転解析より得られた ϵ と ΔC_F

| | 姉妹船 | | “Thorsaga” | |
|--------------------------|------|---------|------------|---------|
| | Full | Ballast | Full | Ballast |
| ϵ | 1.36 | 1.53 | 1.52 | 1.89 |
| $\Delta C_F \times 10^3$ | 0.11 | 0.09 | -0.03 | -0.29 |

Table 10 の Conventional Propeller を装備した姉妹船と Ducted Propeller 装備の“Thorsaga”との ϵ の値の相違は Table 6 に示した傾向と軌を一つにしている。 ΔC_F の値は“Thorsaga”の方が小さくなっているが、この中には、単独状態と実船の船後状態で、 τ の値が変化することの影響なども含まれていると考えられる。

7. まとめ

Ducted Propeller 装備船の水槽試験とその解析方法について、種々検討を行なった結果を取りまとめると、次のようになる。

(1) Ducted Propeller を装備する船舶の水槽試験には、それに対応する Conventional Propeller を装備する船舶の試験を含む多様な試験が必要である。

(2) Ducted Propeller 装備船の水槽試験の解析法には、Ducted Propeller 系を1個の推進器として扱う方法と Impeller のみを推進器として扱う方法があり、それぞれの特色を持っている。

(3) Duct は船体の抵抗, 特に形状抵抗に影響をおよぼす。特に幅広肥大船型で, F-Type または S-Type の流れ場の存在するような船型において著しい。

(4) Ducted Propeller 装備船の推進性能の改善は, Duct による抵抗減少が主役を演じ, それに推進係数の改善が付加される。

(5) 従って, Duct をつけることによって抵抗が増加するような船型にあっては, Duct の効果は減殺されるか, 逆に裏目に出ることもある。

(6) Ducted Propeller 装備船の性能を評価するために, 今まで推進係数の改善面に主体をおいていたが, Duct は船体との間で flow control device の役目を果たすことが大きいので, 船尾流れ場の調査を含む Duct と船体との結びつきに関する研究が重要である。

(7) Ducted Propeller 装備船の自航要素は, 「Ducted Propeller の前後方向の取りつけの中心が船体寄りにある Conventional Propeller に等価である」という考え方で, Conventional Propeller 装備船の自航要素と対比して考察することができる。

(8) 実船の性能を推定する方法を見出すためには, より詳細な試験研究が必要である。一応, 実船の伴流係数 $(1-w_{TT})_S$ または $(1-w_{TIPM})_S$ を推定する方法を示したが, これとて, 単なる目安を与えるのみで, まだ不十分である。

(9) 実船では, 速度のほか Impeller の回転とトルクしか計測されないため, 実船の試運転成績の解析には, Impeller の単独作動状態をベースにして解析された自航要素群を使うのが便利である。

(10) Duct の尺度影響は, 抵抗の見地のみならず伴流係数の尺度影響にも重要であるが, 未検討である。

(11) Ducted Propeller 系を一つの推進器として扱う方法をとる場合, $\tau = T_P/T_T$ の値が, 均一流中で作動する場合と, 肥大船型の船後のような不均一流中において作動する場合とは相違する。したがって, 実船の伴流の尺度影響を考えれば, 実船と模型船とは,

τ の値は変化するものと考えられる。この変化の様子を明確に知ることは, 実船の推進性能を推定する場合や, Ducted Propeller を設計する場合等にも重要な問題で, 今後の調査研究の課題の一つとなろう。

終りに, 本報告は, 共著者の1人である南方が, 造技セにおける研修中にとりまとめの作業を行なったものであることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 塩原 修, 他: “短いダクトを装備した肥大船型に関する模型試験” 日本造船技術センター技報 No. 3, 1975
- 2) 三井造船, 神戸製鋼, 日本造船技術センター: “ノズル・プロペラの性能に関する試験(5翼ノズル・プロペラの系統的単独試験)” 1974年3月, 未発表
- 3) V. S. Shpakoff and S. Watanabe: “The flow pattern at the stern of full ship form” 13th ITTC, 1972
- 4) 矢崎敦生: “肥大船のスラスト減少係数(第1報)” 33回 JTTC 第1部会, 1974年7月
- 5) H. Narita, Y. Kunitake and H. Yagi: “Application and development of a large ducted propeller for the 280,000 dwt tanker M. S. Thor-saga” SNAME 1974
- 6) SNAME Paper 5) の Discussion, Nov. 1974
- 7) J. W. English et al.: “Some aspects of ducted propeller propulsion” Smp. of Ducted propellers, 1973
- 8) 矢崎敦生: “ノズル・プロペラの設計と水槽試験” プロペラ研究会 1973年7月
- 9) A. Yazaki: “A diagram to estimate the wake fraction for a actual ship from a model tank test” 12th ITTC, 1969
- 10) K. J. Minssas, G. M. Jacobson and H. Okamoto: “The design of large ducted propellers for a optimum efficiency and manoeuvability” Smp. of Ducted propellers, 1973
- 11) M. W. C. Oosterveld: “Wake Adapted Ducted Propellers” NSMB Pub. No. 345, 1970