

## 2. 船型に関する研究

上田 隆康

### Historical Review of Studies on Ship Hull Form

By

Takayasu UEDA

#### Abstract

Ship Research Institute (SRI) was established in 1963. The planning and design of Mitaka No. 2 Ship Experimental Tank (400m tank) were started at the same year. This tank was completed in 1966, investing enormous money at that time. Immediately after the completion, the studies on huge ship hull form, high speed ship hull form and others were carried out in high density, and many results of studies have been published.

Besides, as the largest model ship towing tank in Japan, the standard test data has been offered to many fields.

In 1983, the "20 year history" since the establishment of SRI was issued, and the studies on ship hull form carried out over 20 years were described by being classified into the increases of ship size and ship speed and the energy saving.

In the "25 year history of 400m tank", which will be issued in 1991, considering the connection with the 20 year history of SRI, it was decided to go back to about 10 years ago and to introduce the outline of the ship hull form studies carried out during this period.

The outline is described about the studies on flow field around ship hull, various resistance performances, self-propulsive performance, improvement of ship hull form, series tests on model ships and propulsive performance in waves, centering around various kinds of displacement type ships. Finally the way which the study on ship hull form should be hereafter is presented.

## 目次

1. 概要
  2. 船体周り流れの研究
    2. 1 境界層に及ぼす造波の影響
    2. 2 境界層と伴流、渦の関係に関する研究
    2. 3 プロペラ荷重度と有効伴流
    2. 4 船体周り流れの実験的調査
  3. 各種抵抗性能の研究
    3. 1 抵抗性能の研究
    3. 2 抵抗成分分離に関する研究
  4. 自航性能に関する研究
  5. 船型改良の研究
  6. 系統的模型試験（シリーズテスト）
  7. 波浪中性能の研究
  8. 船型に関する研究の今後のあり方
- 参考文献

## 1. 概要

戦後における商船の研究は、巨大化、高速化、省エネルギー化の研究に大別される。

船舶の巨大化は、戦後の復興とともに、石油、工業材料などの輸入が拡大する時期に始まった。すなわち、昭和20年代は4~5万トン型で推移したが、その後半から大型化が始まり、昭和36年には一挙に13万トン型が出現した。その後は工業生産量の伸びと共に大型化、肥大化が一層加速され、昭和52年にはついに50万トンの巨大タンカーが建造されるに到った。

この巨大化船の傾向は、主としてタンカーによるものであったが、鉱石運搬船においても同様であった。これらの巨大化船に関する船型の研究は、系統的模型試験によってその大部分が支えられてきた。この巨大化船の傾向を船型学的立場から見ると、長さ幅比の減少、船体の肥大化が進み、船尾流れの不安定化をもたらすとともに、更に尺度影響、浅水影響、船首バルブの有効性についても調査すべき課題が生じて来たので、系統的模型試験と平行してこれらの問題に対する研究が鋭意進められた。更に、我が国の経済成長の進展を見通して、100万トンタンカーの建造技術の研究が計画されたが（昭和49年度~51年度）、オイルショック等の時勢の変化により、

この計画は研究の開始後まもなくして中止された。

船舶の高速化は、貨物の高付加価値化とともに進んできたが、我が国では、復興期を脱しつつあった昭和35年頃から高速化が進み、その頃平均速度20ノットの高性能定期貨物船が建造された。船舶の高速化は、造波抵抗理論、プロペラ理論の目覚ましい進歩に負うところが大きい。

ほぼこの時期に米国においてコンテナ船が突如として出現したが、これは貨物船の高速化に画期的な飛躍をもたらした。その典型的な例は、米国の国策として主要航路に投入された平均速度30ノット以上の高速大型コンテナ船群であり、世界の貨物海運界を席卷した。我が国も2軸、3軸推進の高速大型コンテナ船を次々に建造し、28ノット以上に達したが、より強力な競争力を発揮させるため、35ノットの超高速大型コンテナ船の開発研究が実施された。しかし、その後石油価格の高騰期に入ったため、この研究成果の活用は見られなかった。

この時期の造波抵抗研究は専ら実用化に進んでいたが、同時期、境界層理論等の粘性流体研究は発達の上にあった。推進理論は、プロペラ理論と共に実用化に向けてその評価の時期に入っていた。

船舶の大型化、高速化とともに、プロペラ起振力をはじめとする振動、騒音の問題がクローズアップしてきたので、プロペラ理論の適用等によりこの問題の研究が推し進められた。

石油危機を境にすべての分野にわたる省エネルギー時代に入ったが、船舶においては、省燃費、高効率のいわゆる強力な高経済性能を発揮する船舶の開発が叫ばれるようになった。

時代の要請に伴う船型の推移に対応しながら、低抵抗船型、高推進効率の船尾形状の開発に取り組むと共に、低回転大直径プロペラの研究、多軸推進の研究も大々的に実施されてきた。

以上は、昭和55年頃までの船型研究を、造船界の変遷との関係で概観してきた。

船舶技術研究所は、我が国の造船業が、戦後の復興期から興隆期に入り、建造量のシェアがまさしく世界のトップに立つのと期を同じくして、昭和38年に設立された。その後の造船界は、約10年間、前例のない好況を呈したが、昭和48年のオイルショックに見舞われてからは極度の低迷期に入った。この



ては船尾近傍で厚い境界層計算により改善されている。運動量厚さ  $\theta$  は逆に船尾付近で第一近似理論がよくあっているが、全体的に見て第一近似理論、厚い境界層計算とも実験値とよい一致を示した。ただし、 $\beta$  の一致性はES-201、船研標準模型船とも悪かった。

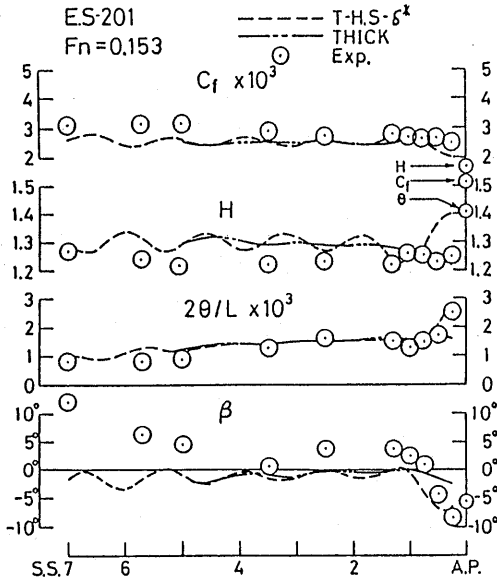


Fig. 1 Boundary Layer Parameters (S-201)<sup>2)</sup>

2. 2 境界層と伴流、渦の関係に関する研究

公称伴流係数  $W_N$  は船型の検討に重要であるばかりでなく、プロペラ設計には不可欠である。この  $W_N$  を求めるための最も一般的な方法は、ピトー管を用いてプロペラ位置の伴流分布を計測し、プロペラ円面積の流量平均から求める方法であるが、これを計算で求めるとすると、境界層方程式の解がプロペラ位置で発散するなどのため、 $W_N$  の推定そのものも容易でなく、かつ推定値と実験値との一致も良くなかった。そこで、3次元乱流境界層第1近似解を使って、 $W_N$  の実用推定法の作製を試みた。ポテンシャル計算と境界層計算を用いて船尾の発散前まで通常の流れ解析を行ない、それ以後は船体曲面に沿ってそのま

ま流し、プロペラ円積分し、公称伴流係数を求める方法を開発した<sup>3)</sup>。つまり、流線追跡をプロペラ位置まで行なうことが困難であるため、S.S.1/2付近までの流線追跡の結果から、プロペラ面に流入する流線を外挿法により求め、この流線から境界層諸量を計算する。計算された排除厚さを使って摩擦伴流  $W_f$  を求める。この方法では、ポテンシャル伴流  $W_p$  と船尾縦渦のない場合の摩擦伴流を求めているので、縦渦の影響が大きいと予想される船型に適用するには実験資料から修正しなければならないが、やせ型船型では、実用性が高い (Fig. 2 参照)。

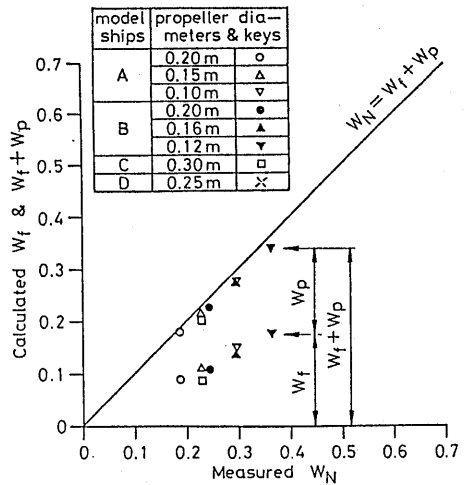


Fig. 2 Comparison of Calculated and Measured Nominal Wake Coefficients<sup>3)</sup>

プロペラ作動時の伴流すなわち有効伴流は、自航性能を評価する場合に重要である。そこでいわゆる高次の厚い境界層理論を用いて肥大船とやせ型船について境界層が計算され、次にプロペラによる誘導速度を考慮した境界層計算が再び行われ、実験で得られた結果と比較、検討された。すなわち、プロペラ作動影響を受けた船尾粘性流場の計算により、有効伴流係数の推定が試みられた<sup>4)</sup>。その結果、プロペラ作動影響は、肥大船よりやせ型船の方に顕著な境界層変化を及ぼすこと、大略プロペラ直径の2倍の範囲に及ぶことなどが確かめられた。しかし、有効伴流の推定においては、やせ型船では計算の有効

性が認められたが、肥大船では計算値と実験値の差が大きく、今後の検討が必要である事が明らかになった。

船尾に発生する縦渦は渦抵抗や伴流率への影響の原因となるが、この生成には境界層内の2次流れが大きく寄与している。このことから、船尾形状検討法の中に、船尾における2次流れのエネルギー $T_2$ を計算し、これによって船尾形状の良否を判断する方法がある。この方法に改良を加え、数種の船型に適用した結果、オフセットから簡単に求まる $T_2$ 分布や水線の微係数曲線あるいは断面内垂直方向速度成分 $W$ の分布図を見ることで、2次流れの発達の様子や縦渦の大きさの推定が可能となった<sup>5)</sup>。

船尾縦渦に関する実験調査も行なわれた<sup>6)</sup>。各種船型に現われる縦渦の成長過程、プロペラ位置の伴流パターン及び縦渦強さを調査し、これらが船底の面積と密接な関係にある事を見出した。この関係図をFig. 3に示す。

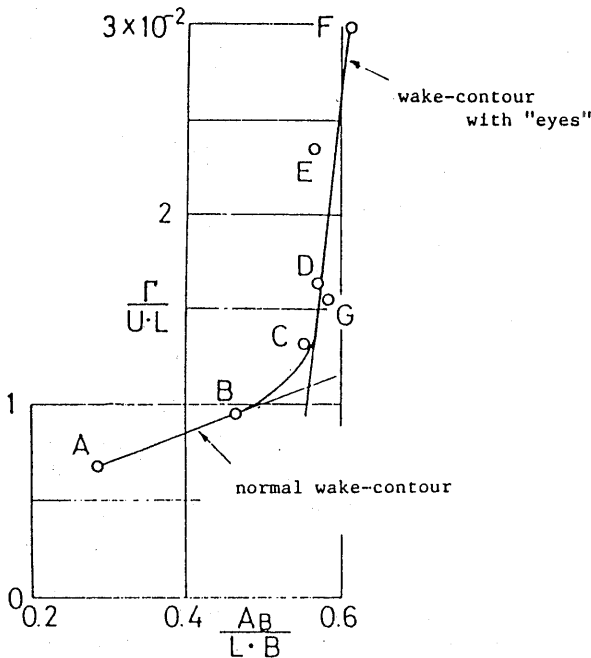


Fig. 3 Estimation Diagram of Circulation Coefficient for Single Screw Ship<sup>6)</sup>

$r$ 、 $L$ 、 $U$  はプロペラ円のサーキュレーション、船の

長さ、船速であり、 $A_B$ 、 $B$  はフラットな船底面積、船の幅である。この相関関係を用いて船尾の縦渦強さ、及びそれによる伴流係数を求め、公称伴流係数に占める成分比を推定した。

### 2. 3 プロペラ荷重度と有効伴流

プロペラ荷重による有効伴流の変化の関係がプロペラ荷重度試験とプロペラ直前の伴流計測によって調査された<sup>7)</sup>。プロペラ荷重度試験の基礎となっている運動量理論などを使って有効伴流を計算した結果とそれに対応する実験値が比較された。その結果、ポテンシャル伴流に対するプロペラ影響は少ないこと、プロペラ作動による有効伴流の変化の原因は境界層内の渦とプロペラ誘導速度との干涉によるものであること、従って、渦の存在が有効伴流の変化に重要な役割をもつことなどが明らかになった。船尾縦渦が存在する場合、渦とプロペラ作動の干涉は無視できず、プロペラサクシオンによる縦渦の集中は軸方向の流速を増加させ、有効伴流の変化をもたらすと考えられる。

また、波浪中航行時のプロペラ荷重度変化とそれに対応する船尾伴流の計測が行なわれた<sup>8)</sup>。後者の結果は7章で述べる。

### 2. 4 船体周り流れの実験的調査

#### 2. 4. 1 可視化

船体周り流れの調査については、タンカーの2.0m透明模型を使った可視化実験の試みがある<sup>9)</sup>。はじめに、色素液を使った注入流脈法による船尾流の追跡を行なった。その結果、船側近傍の流体は水面に拡がり、プロペラ面に流入する流体はそのほとんどが船底からくることがわかった。縦渦の様子も観測され、また、プロペラ作動時では、S.S.1/2 付近から後部にかけて水面近傍の流体が船体に沿って吸い込まれていくことが確認された。次に、水素気泡法により二次流れ角(cross flow angle)の定量測定を行なった。二次流れ角はその位置でのポテンシャル流線の流向角を基準にとり、計測した結果を Fig. 4に示す。図中の $\zeta$ は流線座標による船体表面法線方

向である。流速分布のねじれのうちでプロペラの吸い込み作用による成分は S.S. 3/4 付近まではほとんど認められず、S.S. 1/2 において壁面から 5mm 程度の厚さに限って角度が急激に大きくなり、プロペラに向かって吸い込まれている様子が把握された。これはトレーサによる可視化でも壁面付近の流体がプロペラに吸い込まれていくことが認められた事と一致した。

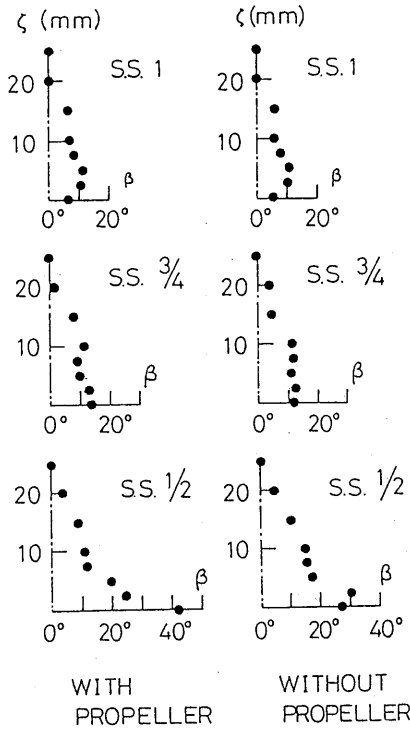


Fig. 4 Distribution of Cross Flow Angle in Boundary Layer<sup>9)</sup>

透明模型船を用いると、従来困難であった船尾付近の流れの観察も容易になり非常に有用であることが確かめられた。また模型船のレンズ効果による像の歪みも当初予想していたよりも小さいものであったが、今後この修正法の開発が必要である。

#### 2. 4. 2 船尾伴流・渦

船尾伴流については非常に多くの調査が行なわれているが、その中から 2 例を挙げると次のとおりである。

船尾バルブの採用は、プロペラ位置への流入速度分布を均一化させる狙いがあり、均一化の効果は省エネルギーのほかにプロペラ・キャビテーション及び船尾振動の面でも検討すべき課題となっている。ここでは、 $C_B=0.825$ の船尾バルブ型のバラ積み運搬船の 6m 模型を用いて、船尾バルブの伴流分布に及ぼす影響の調査及び各種伴流計測法による伴流分布の差異、各種推定法による実船伴流分布の差異を比較検討した<sup>10)</sup>。

最近の高度技術の一つである LDV (レーザー Doppler 流速計) の船型研究への実用化が内外の研究機関で熱心に行なわれている。キャビテーション水槽での LDV 使用実績をもとに、曳航水槽においてプロペラ及び舵の周辺における流場の計測を実施し、従来にないデータを収集した<sup>11)</sup>。もっとも、曳航水槽での LDV 実用化には、未解決の問題も多い。例えば、完全防水で性能が安定したセンサーを必要とすること、曳引車の走行振動が LDV の微細に調整された光学系に伝わらないようにすること、後方散乱方式の場合は人為的に適当濃度の光反射粒子を水槽水に供給しなければならないことなどである。これらの問題を克服すれば、曳航水槽における LDV の応用面は広いと思われる。PCC の  $L_{PP}=4.5m$  模型船の船尾伴流を、LDV を使って曳航水槽において計測された一例を Fig. 5 に示す。

船尾伴流の推定を困難にしている原因の一つが船尾縦渦であるとの考えから、rotor 型渦度計を開発し、ビルジで発生する渦の性質を数種の船型について調査した<sup>12)</sup>。その結果、いわゆる“目”の有る伴流分布において、この目と縦渦の中心が一致していること、目の中心の伴流強さはその付近の渦度の強さと密接な関係にあること、渦核はボス付近で最も安定した分布に発達し舵の後端付近で著しく拡散すること、また、プロペラ付近の循環係数  $\Gamma/UL$  ( $U$  は船速、 $L$  は船長) が主として船型に依存しており、模型船の大きさ、船速などによって変化が少ない安定した量であることなどを見出した。

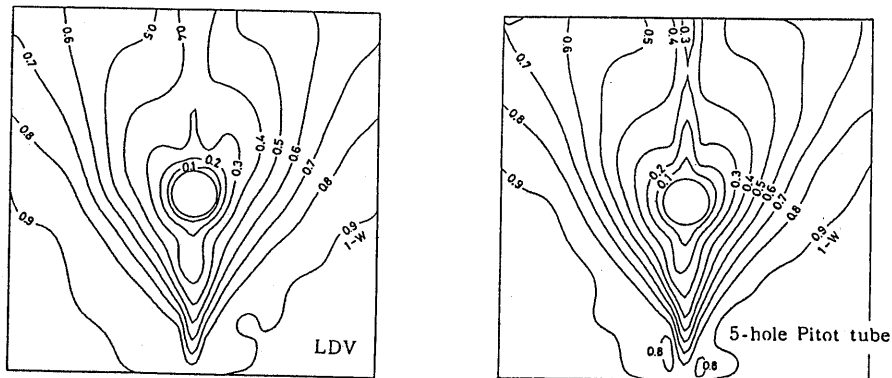


Fig. 5 Comparison of Wake Fraction Contours obtained by LDV and 5-hole Pitot Tube<sup>1)</sup>

### 2. 4. 3 圧力分布

船体周りの圧力計測については、Wigley相似模型を使用して圧力計測を実施し、次のような種々の検討を行なった<sup>13)</sup>。相似模型の圧力係数を比較した結果、船尾部で明らかに尺度影響が認められた。圧力抵抗を船の前半部と後半部またはLWL以下の部分とに分割して求め、抵抗曲線との関係を示した。全抵抗から圧力抵抗を差し引いた値と平板の摩擦抵抗係数と比較した。Dippingを固定したときの抵抗と通常の自由航走時の抵抗との差を、船体表面圧力の違いをもとに考察した。境界層の排除影響を考慮したGuilotton法を用いて圧力分布を計算した値は計測値と良く一致した。以上のような結果を得ている。

現在各研究機関では、高速船用の新形式船型について開発研究が実施されている。高速船には色々な形式のものが考えられているが、最近では専ら複合形式のものが注目されている。その中には、半没水状態の回転体を双胴形式として利用したSWASHがある。このような特殊船舶の構成要素となる没水体の浅水航行特性を調査するため、船体周りの圧力分布計測が実施されている<sup>14)</sup>。研究対象の没水体は $L/D=10$  (船長 $L=3m$ ;  $D$ :最大直径)であり、没水深度 $f=0.75, 1.0, 1.83$  ( $f$ =水面から没水体回転軸までの深度/回転体直径)、迎角 $\alpha=6^\circ\sim 6^\circ$ 、最大Froude数 $=0.7$ のもとに実験が行われた。計算としては、船体表面

分布のNeumann-Kelvin法(N-K法)を用いたので著しく計算値の精度が向上し、 $f=0.75, \alpha=2^\circ, 4^\circ$ 以外ではほとんど圧力分布計測値と変わらない結果が得られた。しかし、N-K法の常用化については、まだ計算時間にも問題があり一般的ではない。計算の速い固定水面付きのHess-Smith法では精度的に十分でないこともわかった。圧力分布計測から求めた各方向力などは、3分力計測値との比較で予期以上の成果が得られた。特に、没水比、迎角別及びフルード数別の揚力値は没水体の性質を良く示すが、これらのパラメータに対する揚力係数の固有変化のデータを収集している。 $f=0.75$ では迎角がかなり大きい場合揚力が減少するが、没水体下面は一樣流中の計算値と大きな違いはなく、上面の圧力分布が模型船直上の波紋を示していることから、結局表面波の変化に大きく影響されたものと考えられる。さらに、トリム及び造波流れの相乗効果も考えられる。

### 2. 4. 4 浅水影響

浅水時の操縦性能を検討するための資料を収集する目的で、回転体模型を使って浅水時の斜航実験を行ない、作用する力 $F_x, F_y$ 、モーメント $M_z$ 、表面圧力分布の計測並びに表面流れの観察を行なう<sup>15)</sup>。水深 $H$ が浅くなれば、 $F_x, F_y, M_z$ は大きくなるが、水深の影響の方が没水深度の影響よりも大きいこと

が判明した。また、斜航時の $F_N$ は、速度が大きくなるにつれてその絶対値が小さくなる傾向を示した。速度に対するこれらの力とモーメントの変化は、意外にも造波よりも粘性のほうの影響が大きいようであった。没水体表面の圧力分布は、斜航角や浅水状態（水深と没水深度の相互関係）によって態様がかなり変化していた。負圧、剥離のそれぞれの位置も上記要素の影響を受けていた。表面流れの観察では、主として限界流線を調べる目的であったが、技術上の困難さもあって、再付着線の一部をとらえただけに止まった。

浅水影響に関する研究の一環として、低速域における船体姿勢の変化の原因を流れの可視化によって調査している<sup>16)</sup>。4.5mの肥大船模型を使い、各ガス線に沿ったトレーサ抽出孔からポスターカラーを流出させて、これを船側、水槽底から各種のカメラで記録するやり方である。水槽底付近の流れの様子を Fig. 6 に示す。水槽底の流向図には、波動による粒子の動きなども把握された。その一例は、浅水域で模型船が航走し始めると、前方に孤立波が生じ、その波が $\sqrt{gH}$ の速度で前方へ伝播して行くが、水槽底の粒子の運動によってそれを確認した。また、肥大船型の船首周りには特に広い領域に局部波の山が

生じ、それが船と共に移動し、水槽底にも影響を及ぼしていた。また、模型船の平行部が通過するときには、水槽底に逆向きの強い流れが誘起されること、模型船の船尾が通過した後に、大きな渦と伴流が生じていることも確認された。船首周りの流れの調査では、船首バルブ後方での流れが水深が浅くなるにつれて、船首の沈下量が増すにもかかわらず、水平になる傾向を示した。これらの流場調査によって浅水航行時の姿勢変化に検討を加えた。

入出港時の流力特性調査の一環として、船体が斜航しているときの船尾のプロペラ位置における流れについて、水深の影響が実験的に調査されている<sup>17)</sup>。コンテナ船の4.5m模型を使い、斜航角 $=9^\circ, 20^\circ$ 、浅水比  $H/d=16, 1.56$  ( $H$ は水深、 $d$ は喫水)、速度12ノット相当で実験を行う。浅水時には船体のFace面側で深水時よりも下向き流れが少なく二次元的であり、船体のBack側の渦中心の位置が浅水時には深水時よりも大きく外側にずれた。これは、浅水時には船底と水槽底との間隔が小さく、船底を巡る流れが剥離しやすく、深水時とは渦の発生位置及び流出方向が異なるためであった。また、 $1-W_N$ は斜航角の増加と共に増加し、水深の増加と共に減少することがわかった。

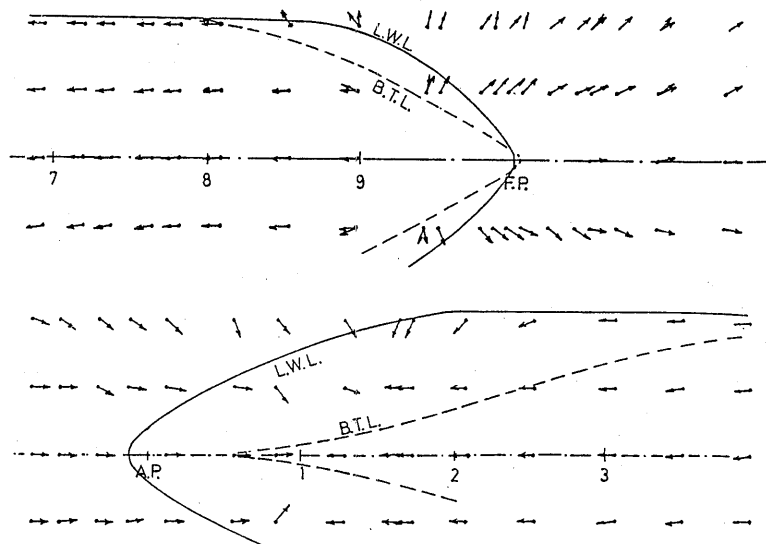


Fig. 6 Flow Direction at Tank Bottom ( $F_n=0.06$ ,  $d/H=0.733$ )<sup>16)</sup>



### 3. 各種抵抗性能の研究

#### 3. 1 抵抗性能の研究

造波抵抗に関する理論的研究では、Slender Body理論による低速造波抵抗理論の研究が行なわれている<sup>18)</sup>。この理論は比較的低速時の造波抵抗を計算する場合最も実用的であると考えられているが、更に計算精度を高め、船体近傍の流場をより詳細に調査するためには、より高次の理論展開を必要とする。そのための問題点は、特に船首部の近傍流場で発生する波の局所的非定常現象の取り扱いである。低速時の厳密な境界値問題を取り扱うためには、3次元Neumann-Kelvin問題を取り扱わなければならないが、現在この数値解法は容易ではないと思われる。3次元Neumann-Kelvin問題を避けるため、船がやせ型であるとの仮定をSlender Body理論の使用に当たって導入した。次に、matched asymptotic expansion法を使用することによって、ディフラクションと局所的な非線形影響も取り入れた方程式を導き、この問題の数値解法を容易にした。

一方、従来の造波抵抗の取り扱いでは粘性の影響は考慮されていなかったのが次のように粘性を考慮した取り扱いが試みられた<sup>19)</sup>。すなわち、境界層の影響を考慮した造波抵抗問題を取り扱うために流場を渦有りと渦無し領域に分け、後者での造波抵抗計算は、Guilotton法が用いられた。船体周りの境界層計算を行なって、船体に排除厚さの2倍の層が加わった仮定の船体を考え、この船体についての特異点分布を求め、これによって造波抵抗を計算した。計算例としてWigley Modelについてこのような手順で境界層が造波抵抗に及ぼす影響を求めた結果、船尾波に対する粘性修正が直接的ではなく、かつ割合少ないため、船の幅を増した境界層による排除効果は造波抵抗計算にそれほど大きい影響を及ぼさないことが明らかになった。更に同様の手順を用いて、長胴Inuid模型、貨物船模型についても計算された<sup>20)</sup>。その結果、用いられた排除厚さによる造波粘性干渉モデルでは、境界層の造波への影響は船尾付近に限られ、幾分船尾圧力低下をもたらすことが示された。抵抗推定に関しては、一般的な貨物船模型の粘性圧力抵抗などの推定にまだ問題の残されている

ことが判明した。

抵抗相似則に関係の深い抵抗の相似性の問題は、船舶の抵抗に関する基本的な研究課題であるばかりでなく、馬力推定の精度向上の観点からも論理的な発展が期待されている。近年の各種理論の発展を期にこの問題を取り上げ、複雑な流れを伴わない換言すれば自由表面衝撃波、縦渦、剥離などの流れを伴わないWigley船型のgeosim模型を用いて相似性に関する調査が実施された<sup>21)</sup>。共同実験の形で、国内3機関が参加し、2.5m、4m、6mの模型のうち、船研は4m模型を担当した。その結果、供試模型が流体力学上簡単な性質を持っているので、低速域では波形造波抵抗が造波抵抗に等しいと考えて、抵抗成分間の関係を説明した。これによって、摩擦抵抗係数のform factorの速度依存性を示したが、これを用いてgeosim模型間の抵抗の相似性を明らかにした。本調査の内容は、抵抗相似則の論理的研究の基礎を示したと言えよう。

造波抵抗理論の検証、船型の改良などの用途に波解析法が広く利用されているが、その尺度影響に関する国際共同研究が実施された<sup>22)</sup>。供試模型はSeries-60の $C_B=0.60$ 船型であり、2.5m~10.0mの模型が使用された。国内4機関が実験に参加し、当所は7m模型を担当した。研究の結果、波形造波抵抗及び波スペクトルに関し、波の発生及び伝播の過程において粘性の影響を受けたと考えられる尺度影響が認められた。レイノルズ数の低下につれて（すなわち模型が小さくなるにつれて）波形造波抵抗係数が低下する尺度影響が認められた。しかし、造波抵抗係数のgeosim間での差異は小さかった。また、打ち切り点の位置の影響も大きいことが見出された。

細長回転没水体の浅深度航行性能に関する調査が文献14に続いて発表された<sup>23)</sup>。文献14では、主として圧力分布の解析をもとに、揚力性能の検討が行われたが、続いて摩擦応力の計算も加え、抵抗及び揚力方向の摩擦応力成分を圧力成分などと比較した。また、抵抗係数、pitching moment係数を3分力計、圧力分布計測、N-K法を基礎とした計算からそれぞれ求めて比較した。ただし、計算は深度 $f=0.75$ 、迎角 $\alpha=0^\circ$ と $2^\circ$ 、フルード数 $F_n=0.315$ の場合である。その結果、 $f=0.75$ 、 $\alpha=0^\circ\sim 2^\circ$ において揚力係数が急激に減少し、pitching moment係数にも異常が現

われる範囲を除けば、それぞれの一致性は良好であった。しかしこの範囲では揚力の圧力積分値と3分力計測値に不一致が生じたが、この理由は解明されなかった。浅深度航行は、抵抗減少法の一案として提案されたが、研究結果の示すように lower hullとしての細長回転体には翼型の失速に似た流力的特異現象—これはおそらく造波に起因したものと思われる—の現われることが見出された。すなわち、この実験研究によって、浅深度航行の場合、没水体周りに特殊な流場ができ、そのために通常の縦安定性能や抵抗特性に特異な変化の現われる事が明らかになった。

現在用いられている実船馬力推定法は、専ら3次元法であるが、それだけに形状影響係数 $K$ を正しく知る必要がある。そこで、抵抗試験の低速領域から $K$ を求める従来の方法に替わって、低速域と高速域の両方に適用できる、 $F_n$ の多項式を含んだ形の式から $K$ を求めることを試みた。各種の船型へ適用して求められた $K$ とその実験値を比較することによって、適用式の今後改良すべき点を明らかにすると共に、この式が粘性抵抗の減少を図る場合に役立つ可能性の有ることを示した<sup>24)</sup>。

### 3. 2 抵抗成分分離に関する研究

水面を貫通した薄い柱体が平水中を高速で直進する場合の抵抗成分分離を理論的実験的に検討した<sup>25)</sup>。2次元境界層計算、及び Guilloton法による圧力分布計算などの理論計算並びに Wake survey、波形解析及び柱体表面圧力分布計測などの実験により、柱体の近傍及び遠方流場における抵抗分離を行なう。その結果、理論計算のみにより高速柱体の抵抗推定が可能であること、柱体の後方に波崩れが発生した場合でも造波抵抗値の推定には線形造波抵抗理論が適用可能であることを見出した。この研究は、半没水体と水上の構造体を結合するストラットの抵抗を推定する場合に有用である。

また、Wigley模型 ( $L=4m$ ) を用いた抵抗成分分離に関する調査が行なわれた<sup>26)</sup>。実験は、抵抗試験、波形計測、後流計測、船体表面圧力分布計測が行なわれ、計算は、Guilloton 法による造波抵抗計算、田中—姫野第1近似法による摩擦抵抗計算が行なわれた。実験結果をFig.7に示すが、全抵抗係数 $C_t$ 、粘性抵抗係数 $C_v$ 、平板の乱流摩擦抵抗係数 $C_f$ の関係は、抵抗成分の3次元分離法が、薄いWigley模型の場合に有効であることを示している。

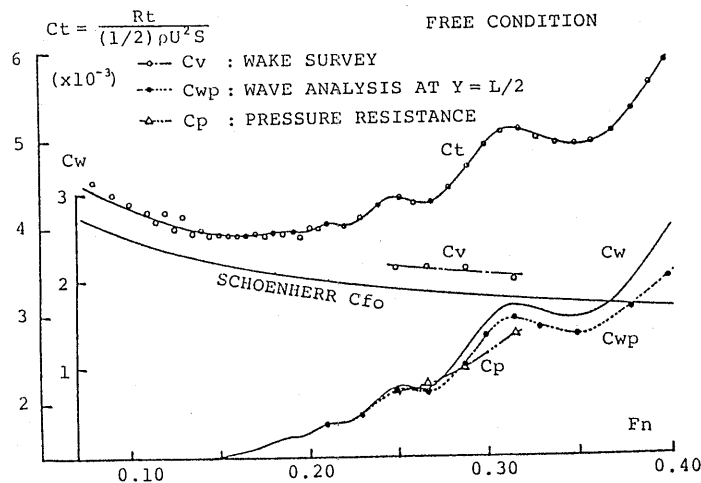


Fig. 7 Resistance Components<sup>26)</sup>

圧力抵抗は、造波と粘性による成分からなっていると考えられるが、図中の圧力抵抗係数 $C_p$ と造波抵抗係数 $C_w$ から判断して本供試体では後者の成分がほとんど含まれていなかったと言える。波形造波抵抗係数 $C_{wp}$ と $C_w$ に幾分かの違いが見られる原因は、船首での碎波などが考えられるが詳細は明らかではなかった。なお、抵抗分離に関して、実験と計算の両結果は良好な一致を示した。

4. 自航性能の研究

船舶の推進性能の問題は、船体、プロペラ、舵の流体力学的総合干渉の問題である。しかも、プロペラ、舵の配置は、船体後端部の複雑な不均一流場内である。それだけにこの問題の理論的取扱は複雑であるが、最近この分野の研究が大いに進められている。プロペラは船尾における流力干渉問題の中核的役割を果たしており、そのモデル化には、各種の方法があるが、上記の流力干渉問題の取り扱いでは、無限翼数プロペラ理論を応用したプロペラモデルに改良が加えられて使用された<sup>27)</sup>。その改良点は、プロペラ後方へ流出する自由渦モデルの変更、及びプロペラ性能に影響する物理量をプロペラ半径方向に変化させ、半径方向の単一断面における値で代表させることを極力避けた点である。改良された計算法を、形状を系統的に変化させた AU、MAU型、及び Troost 型シリーズプロペラに適用し、単独性能を計算した結果、かなり広い範囲のプロペラ形状の変化に対して計算値は実験値とよく一致し、実用上十分な精度で実験結果を表すことが判明した (Fig.8 参照)。

プロペラの後流中に置かれた舵とプロペラとの干渉問題では、従来は無限翼数プロペラ理論と薄翼近似による舵理論を組み合わせた相互干渉の数値モデルを用いて干渉流体力が推定されていた。しかし舵の厚さが相互干渉の主要パラメータであることに着目して舵を無限翼数プロペラ後方におかれた厚い揚力物体として取り扱った。舵のモデルを厚翼の揚力体に置き換え、舵表面の境界条件を厳密に満足させるような相互干渉の計算法を作成した。次いで、舵に働く力、舵が推進性能に及ぼす影響などの干渉流

体力及び近傍流場を計算した結果、流体干渉力の計算値は実験値と良好な一致が得られた<sup>28)</sup>。その一例を Fig.9 に示す。

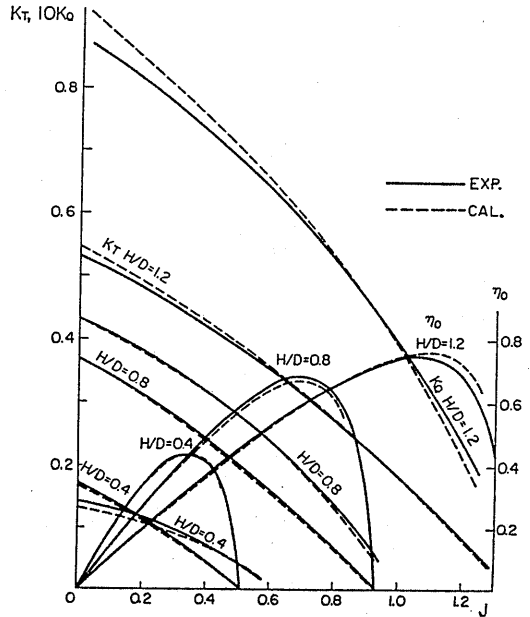


Fig. 8 Propeller Open Water Characteristics (AU5-50)<sup>27)</sup>

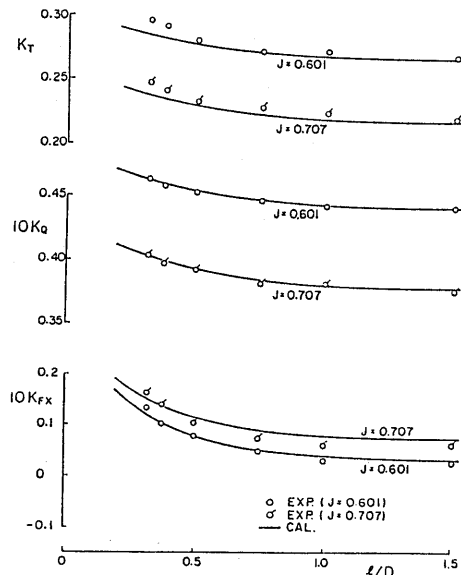


Fig. 9 Interaction between Propeller and Rudder (MP-A/MR-3)<sup>28)</sup>

MP-Aは直径 $D=0.25\text{m}$ 、ピッチ比 1.02のプロペラ、M R-3はアスペクト比1.5、翼厚比 25%の厚翼舵であり、舵厚が大きい場合は舵とプロペラの距離 $l/D$ が小さくなるに従って  $K_T$ 、 $K_Q$ 、 $K_{Fx}$  (舵抵抗係数) は大きく変化する。薄い舵はスラストを発生するが厚い舵では大きな抵抗となった。

また、非ポテンシャル流場であるプロペラ後流中に置かれた舵の表面圧力をベルヌーイの定理の拡張によって定式化し、舵表面圧力計測値と比較する。これによって、舵の圧力抗力成分の評価を行なうと共に、境界層計算を使って舵抗力の推定精度の改良を試みた<sup>29)</sup>。計算と実験の比較を、直径 $0.2389\text{m}$ 、ピッチ比 0.679のMP-Bプロペラとアスペクト比 1.5、翼厚比15%のMR-2の舵の組合せにおいて、 $J=0.312\sim 0.7$ 、 $l/D=0.291\sim 1.0$  の場合について行い、いずれもよい一致をみた。特に舵抗力と舵後縁における圧力において良好な一致が得られた。

舵付き船の自航性能の調査として、舵無し船のプロペラスラストに対する推進性能が既知の場合に、厚翼の取り扱いを用いた舵理論にもとずき舵付き船の推進特性を舵無し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調査した<sup>30)</sup>。

従来の自航試験及びその解析は、主として、実船馬力を求めるため、実船自航点で実験し、プロペラ単独性能を使って自航要素を求めたが、試験と解析に一層理論性を高め、自航性能の分析をより可能にするため、プロペラ荷重度変更試験法が考案された<sup>31)</sup>。この試験法の概要は、[5. 計測技術の研究]の中で述べられるが、プロペラのスラストをゼロから模型自航点となるまで広い範囲にわたって変化させ、自航特性をプロペラ荷重度の関数としてとらえ、実験計測値を理論計算と対比させつつ表現するものである。はじめに、プロペラの荷重度変化を基礎とした自航試験システムを構築し、実験に適用した。その結果の一例をFig.10に示すが、自航特性(プロペラ単独効率 $\eta_0$ 、プロペラ効率比 $\eta_R$ 、船殻効率 $\eta_H$ )のプロペラ荷重度 $C_T$ に対する傾向がよく表現されており、計算値の実験値との一致度も良好であった。この試験法は、上記のとおり広い荷重条件下での推進性能を推定する手法として適しているので、例えば、曳船の曳航状態、漁船の曳網状態、帆走船の航

走状態、一般的な風波浪による抵抗変化状態、船体汚損による抵抗増加状態などによる推進性能を検討する場合に適用可能である。すなわち、従来の自航試験法を拡張した利用法に止まらず航海性能のシミュレーションも可能である。

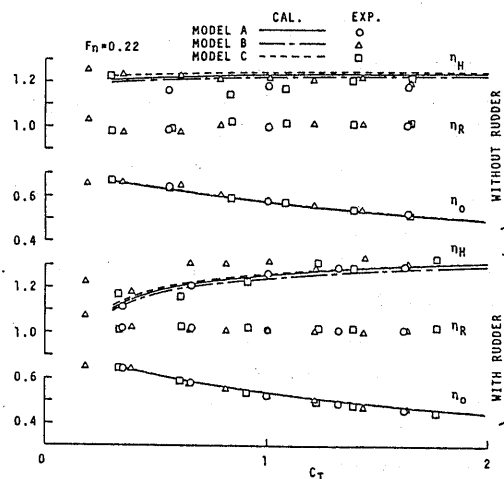


Fig.10 Self-propulsion Factors Versus Propeller Load Coefficient<sup>32)</sup>

しかしこれまでの、模型試験ベースにおける荷重度変更試験法の応用例はまだ多くはない。この試験法による研究例は次のようなものである。この荷重度変更法の中に用いられているプロペラと船体の干渉計算などを使って、船尾形状改良法の開発とその評価が行なわれた<sup>32)</sup>。また、肥大船型の自航性能の尺度影響の調査<sup>33)</sup>、荷重度変化の船尾流場に及ぼす影響の調査が行なわれ、低回転大直径プロペラ船の推進性能の調査、有効伴流の分析、波浪中新試験法の開発などが行なわれた。更に、回流水槽における自航試験は従来極めて困難であったが、この試験法の採用によって容易に自航特性が得られるようになり、広く普及した。荷重度変更試験法には、理論の導入が各処に行なわれているが、それによって複雑化することを極力避け、干渉係数などを使って取り扱いの簡単化が図られた。船体とプロペラ、プロペラと船尾境界層のそれぞれの干渉係数と各種船型との関係について調査が実施されたが、本試験法の適用性をより広くするためには、精度向上のための

調査数をより多くする必要性が認められた<sup>34)</sup>。

## 5. 船型改良の研究

過去には、大型コンテナ船、特に35ノット3000個積み大型高速コンテナ船や大型肥大タンカー、広幅浅喫水船、中速船、及び2軸を含む多軸化などの研究が盛んに行なわれて、我が国の造船最盛期の船型設計技術の一端を支えてきたが、昭和58年頃からの造船不況とともに、外航用大型船舶の研究要望が急速に減少してきた。2軸船の研究以外は昭和62年を境にほとんど途絶えた。しかし、4章で記したような船体とプロペラの干渉計算を基礎とする船尾形状の改良法並びにその評価法について研究が続けられた。それ以後、船尾振動軽減化、特殊推進法の効果などの研究では大型模型船が使用されているが、それ以外では、外航船用大型模型船の使用は少なくなった。

一方、当研究所では、約15年程前から中小型船の研究も実施してきており、中小造船界の設計技術の向上に貢献してきた。昭和57年には、199 総トン型小型カーフェリーの船尾振動の調査を行なって、その原因を以下のように把握した。すなわち、当該船舶の船型は、通常の船型と比べてL/Bが大幅に小さく、船尾の肥大度が大き過ぎるため、船尾伴流分布の不均一性がかなり強くなっている。このような流場中で高馬力を供給されたプロペラを作動させるため、大規模な非定常キャビテーションとPHVキャビテーションが発生し、これらが強い船尾振動の原因となっていたこと、及び無理な船型のための抵抗増加もきたしていたことを見出した。この対策として船尾船型の改良の必要性及びその方針を具体的に示した<sup>35)</sup>。

第1次、第2次オイルショック以後全面的な省エネルギーが叫ばれ、内航船舶も省エネルギーの技術開発が必要になってきた。その一環として、昭和58年から61年の間、999総トン型、699総トン型内航タンカーの推進性能向上のための船型改良の研究を実施した<sup>36)、37)</sup>。この研究の概要は、数種の理論計算の援用のもとに、主要寸法、横截面積曲線、船首船尾のフレームラインの最適化及び高効率プロペラ

の設計などを行ない、形状影響係数、造波抵抗係数、推力減少係数、伴流係数、プロペラ効率等の改善を図り、プロペラ起振力計算、経済性メリット計算も行なって高経済性船舶を開発するものである。この研究過程をFig.11に示す。

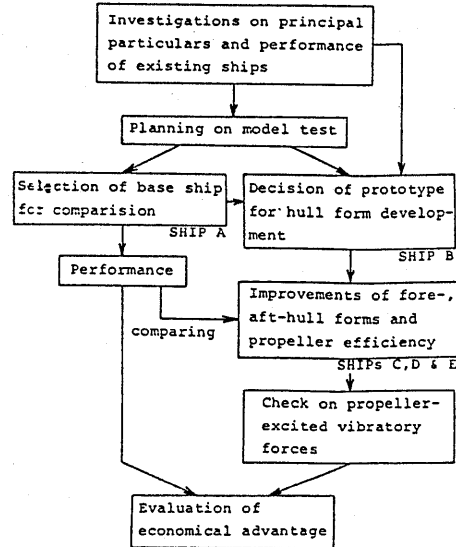


Fig.11 Procedure on Hull Form Improvement<sup>36)</sup>

999船、699船とも5隻ずつの模型船を使って船型等の改良を行なった結果、前者では29%、後者では20%の馬力低下を達成した(999船の場合をTable 1に示す)。併せて、波浪中の性能についても調査し、特に問題のないことを確認した<sup>38)</sup>。

続いて、内航高速旅客船についても、船型改良などによって性能改善を図った<sup>39)</sup>。半滑走単胴型70総トンクラスの中型で、需要の一番多い大きさの船を母型に選んだ。高速船は流体现象が複雑なために、理論研究が排水量型船の場合よりかなり遅れており、実用の可能なものがほとんど無いため、過去のシリーズテストの資料その他の知見をもとに、5隻の模型船と4個の模型プロペラを設計製作し、最終的には約18%の馬力低下とプロペラキャビテーションの大幅な減少が達成された。併せて波浪中試験を実施し、動揺量、動揺加速度、馬力増加などに問題の無い事を確かめた。

Table 1 Results of Hull Form Improvement<sup>36)</sup>

SHIP	Fully loaded C. 12knots					Ballast C. 13.5knots				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
K	0.19	0.16	0.20	0.21	0.15	0.26	0.17	0.36	0.34	0.27
Fn	0.223	0.220				0.251	0.248			
$\tau_R$	0.00455	0.00455	0.00292	0.00292	0.00284	0.00473	0.00420	0.00560	0.00555	0.00495
1-W <sub>T</sub>	0.660	0.708	0.667	0.667	0.715	0.655	0.693	0.643	0.650	0.698
1-t	0.786	0.827	0.813	0.829	0.847	0.790	0.805	0.804	0.818	0.840
$\eta_R$	0.997	1.002	0.983	0.997	0.968	1.012	1.005	0.993	0.993	0.962
EHP (ps)	792	835	725	725	718	840	805	903	913	856
BHP (ps)	1340	1362	1132	1106	1018	1310	1270	1390	1370	1210
$\Delta_s$ (ton)	3198.3	3419.0	3431.1	3429.5	3421.6	1800				
BHP/ $\Delta_s$ (ps/ton)	0.419	0.400	0.330	0.322	0.298	0.728	0.706	0.772	0.761	0.672
	100%	95%	79%	77%	71%	100%	97%	106%	105%	92%

Stock propeller : for SHIPS A,B,C and D  
 Designed propeller : for SHIP E

## 6. 系統的模型試験 (シリーズテスト)

船型試験で重要なものは、いわゆる系統的模型試験であり、内外の大型船型試験水槽ではかなりの比重で実施し、多くの船型設計資料を作成してきた。公表されているものも少なくなく、なかでもテラーチャートは有名であり世界的規模で現在も使用されている。我が国も各種の船のシリーズテストが種々の規模において実施されてきた。当所の大水槽は、本来基礎的先導的研究を実施し、その主導的役割を果たすものとされているが、大水槽の能力を必要とするシリーズテストについては共同研究などの形で実施された例がある。

それは、広幅浅喫水船型の多軸化の船型試験として、twin-skeg stern のシリーズテストが行なわれた<sup>40)</sup>。想定船舶は  $L_{PP}=270$ mクラスのLNG運搬船である。数隻の模型船を使用して幅方向skeg位置の変化及びskeg間tunnel部の船底傾斜の変化が推進性能に及ぼす影響が調査された。また、この船尾船型と比較するために、船尾部を1軸、2軸(ボッシング型)および3軸にした場合の馬力性能が明かにされた。続いて、LNG船やRO-RO船を対象にした広幅浅喫水2軸船型についてL/B、 $C_B$ 、B/d、 $\ell_{CB}$ の主要目を変化させ、これらの変化が推進性能に及ぼす影響を調査し、今後の設計資料として発表された<sup>41)</sup>。また、6万トンと12万トンのバルクキャリアを対象に、排水量とトリムを変化させ、載荷状態が推進性能に与える影響を調査した資料が作成された<sup>42)</sup>。

次は、理論的検討を基本として独自に実施されている広幅浅喫水船型の一連のシリーズテストがある<sup>43)</sup>。これは、SR171で行なわれたシリーズテストを拡張したものであり、 $C_B=0.65$ のL/Bシリーズである。本シリーズにおける船型では、L/Bの値に応じて船首バルブの大きさを変化させ、かつ統計解析の方法によって造波抵抗が小さくなる横断面積曲線を求めている。統計解析の方法で造波抵抗を推定し実験値と比較して、推定方法の有効性を明らかにすると共に、主要寸法あるいは横断面積曲線を変化させた船型の性能推定に利用できることを示した。この一連の試験の中で、船尾形状を普通型からバルブ型に、また非対称船尾に変化させて推進性能に及ぼす影響を調査した<sup>44)</sup>。

内航船のシリーズテストでは、 $C_B=0.78$ のL/B、B/dの変化が推進性能に及ぼす影響について調べ、以前に発表した設計資料の拡張結果として有用な資料を作製した<sup>45)</sup>。また、999型内航タンカーの船型について、非対称船尾形状を採用した場合の推進性能と直進時舵力が調査されている<sup>46)</sup>。

## 7. 波浪中性能の研究

通常、船型試験と言えば多くの場合、平水中試験を指すが、波浪中試験も前者に劣らず重要である。この重要性は十分認識されながらも、曳航水槽では波浪中の試験自体が容易でないため、平水中試験ほ

どルーチンワークとしては実施されなかった。このような観点から、波浪中試験及びその解析を容易にしかも迅速に実施可能とするために、荷重度変更法を採り入れた波浪中船型試験システムが作成された<sup>47)</sup>。このシステムの完成により、試験の実施や実船性能の推定が容易になった。このシステムの適用として、肥大船、コンテナ船、鉱石運搬船の波浪中自航試験が行なわれ、優れたシステムであることが明らかになった。また、自動車専用運搬船 (PCC) の波浪中航行時のプロペラ負荷変動の調査が行なわれた<sup>48)</sup>。PCCの、荷重度変更法による水槽試験結果の一例をFig.12に示す。図中の $T$ 、 $R_M$ 、 $R$ 、 $H_w$ 、 $\lambda$ はそれぞれプロペラのスラスト、模型船抵抗、 $R=T+R_M$ 、波高、波長であり、 $n$ と $Q$ はプロペラの回転数とトルクである。

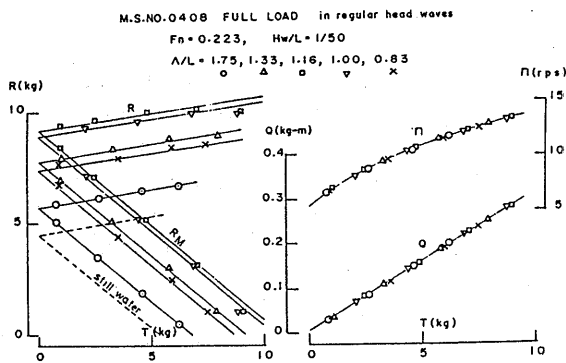


Fig.12 Results of the Propeller Load Varying Tests in Regular Head Waves<sup>48)</sup>

これは、PCCのプロペラ翼損傷事故例が報告され、その原因を調べるためであった。実船の損傷解析では、波、船体運動、船尾伴流分布等に基づく繰り返し荷重がプロペラ翼に加わったための疲労破壊と推察された。このため、広い範囲の荷重条件下で、波浪中のプロペラ荷重度増加、プロペラ負荷変動、船体とプロペラの相互干渉についての実験データが採られた。PCCの実験の一環として、波浪による船体運動中の伴流変化が円環伴流計、5孔ピトー管、表面タフトの方法で計測された<sup>48)</sup>。その結果、波浪中におけるプロペラ円内の流速分布および速度ベクトルの詳細な時間変化を得るとともに、可視化実験が

ら、波浪中の船尾流場へのプロペラ影響が判明した。伴流データは、プロペラ負荷変動データとともに実船プロペラの翼強度の検討に使用された。

以上のほか、高速船艇、内航船の波浪中特性が調査されている。

## 8. 船型に関する研究の今後の在り方

推進性能部における、過去10年間にわたる船型研究の概要を前章までに示してきた。研究の計画、実施、成果、及びその活用などは、社会の趨勢に直接的あるいは間接的に関係するものであり、従って研究計画の立案時にこのことが反映されて来た。これは当然と言えば、当然のことである。ここ10年間の研究計画書及び現在の状況から、船型に関する研究に注目すると、2、3の傾向が挙げられる。すなわち、今まで船型研究の主流をなしてきた各種大型船の船型試験、例えば、大型高速船型 (コンテナ船、RO-RO船、自動車運搬船など)、超大型肥大船型 (タンカー、鉱石運搬船など)あるいは幅広浅喫水船型、多軸船型などの開発とか系統的模型試験が次第に減少し、今日では時折実施される程度になった。

従来の船型研究は、設計資料を提供すると共に、その研究成果が、直接実船設計に活用されてきた。換言すれば、研究自体が、その方向付けで実施され、いわゆる船型試験の主務を果たしてきた。この点が大水槽の必要性の1つでもあった。従って、当研究所の船型研究も主として実験中心に行なわれてきたと言える。しかし最近では、このようなニーズが少なくなり、代って、基礎研究の充実と未来研究の必要性が述べられているが、実験的船型研究の立場から有用な未来研究の道を拓くためには、現在の延長上なる道が今はかなり不透明になっているので、それだけに優れた未来予測が必要となっている。

数値流体理論 (CFD) の最近の発達は目覚ましいものがあり、近未来に、数値水槽コンセプトによる理論計算が水槽試験に替わるものとして期待されている。従って、船型性能の改善、新船型の開発などへの活用分野が拓かれると思われるが、CFDの実用化に到るまでの言わば過渡期の実験的研究は不可欠であろうし、また、CFDの開発段階、実用段階にお

いても実証試験は必ず実施する必要がある。

以上のような大きな傾向が見られるものの、個々に見れば今後引き続いてなすべき研究課題は山積していると言わなければならない。船首造波の非線形性と表面張力影響に関する定式化の課題がある。また、粘性問題の取り組みもやや停滞気味であり、粘性と造波の干渉問題、船尾渦構造の解明、船型と粘性圧力抵抗の関係、船尾流場の推定精度向上などに関する研究の進捗が待たれる。排水量型船あるいは単純形状体の抵抗成分はかなり解明されているが、浅深度を航走する半没水体、半滑走体あるいは滑走体、水面貫通体などの抵抗成分については今後の重要研究課題と言える。自航性能の研究は、かなり高いレベルに到っているが、船尾流場の不均一性がプロペラと舵の特性に与える影響を明らかにする課題が残されており、船体とプロペラ及び舵の相互干渉を一貫したプログラムのもとに解析出来るようにしなければならない。

船型に関する実験研究の課題は、民間側では決して少なくないが、国立研究所の立場では従来のように具体的な活用が明確でないことは確かである。設計資料の作製及び提供にしても、それが有用となる具体的な方向が把握できないのが現状である。大型船については、前述したように船型性能の向上を図る目的以上に、例えばプロペラサージの改良に適合する船型を定めるための調査であったりする。

広幅浅喫水船の船型試験資料、2軸を含む多軸船の推進性能調査資料、海上作業船などの特殊船の性能試験資料などはかなり少ないので、これらの整備が強く望まれていることは確かである。広幅浅喫水船、多軸船尾船は今後の需要の伸びが期待されるので、最近の造船景気の回復と相俟って、これらの船型研究を実施する必要がある。すなわち、これらの船型に対し設計者の意向を十分反映させた、より広範な系統的模型試験を実施し充実した設計資料を整備することが重要であろうし、またこれに伴って持ち上がる種々の研究課題に対しては、従来とは視点を変えた対処の仕方で行う必要があるであろう。

当研究所に期待されていることのもう一つに、中小型船の研究がある。現在多用されている船舶の高性能化を図らなければならないのは勿論のこと、色々な意味での物流の急速な変化に対応する新しい海

上交通の方法を考えて行かなければならない。例えば、国内では高水準の経済活動が維持されているが、それに見合う物流体系が円滑に作用しているとは言いがたく、陸上輸送は慢性化した渋滞に見舞われ、これを改善するためにも、かつ環境保全の立場から、国内輸送体系の変革が必要である。このためには、内航海運システムの改善及び内航船舶の近代化を図ることが急務である。また、国外との関係では、本邦とNIESを結ぶ新需要に応えるための新形式高速船の開発が必要である。国内に生産労働力が次第に減少しつつある状況から、生産拠点が海外に移されており、また、NIESの工業進展を考慮合わせるとき、工業品の高速輸送がますます増加するであろう。また、急速に進む国際情勢から、我が国から近距離にあるソ連、中国などとの交通・輸送体系も変化し、日本と両国の生産拠点の間には、例えば新しいランドブリッジ方式を生み出す必要があるであろうし、また両国への人的交流もあらゆる分野にわたってますます活発にあるであろうから、このような新需要に備えた船舶の開発が必要になってくるであろう。

#### 参考文献

- 1) 船舶技術研究所二十年史、運輸省船舶技術研究所発行、1985.3
- 2) 日夏宗彦他：造波影響を考慮した境界層計算と計測結果について、第44回 船舶技術研究所研究発表会 講演集、1984.11
- 3) 石坂純：3次元乱流境界層第一近似解を用いた公称伴流係数の一試算、船舶技術研究所報告第19巻 第4号、1982.7
- 4) 日夏宗彦：厚い境界層計算とその有効伴流推定への応用、船舶技術研究所報告 第21巻 第1号、1984.1
- 5) 日夏宗彦他：境界層内の二次流れと船尾形状に関する研究、第46回 船舶技術研究所研究発表会講演集、1985.11,
- 6) Tanaka, H. et al.: Experimental Studies on





- 27) 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、1979.11
- 28) 森山文雄, 山崎隆介：プロペラの舵に及ぼす影響について、西部造船会々報、第61号、1981.3
- 29) 森山文雄, 山崎隆介：プロペラ後流中に置かれた舵に働く力について、西部造船会々報、第62号、1981.8
- 30) 森山文雄, 菅井信夫：舵付き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、1981.5
- 31) 足達宏之：荷重度変更法の基礎と応用について、日本造船学会論文集、第154号、1983.12
- 32) 上田隆康他：荷重度変更自航試験システムによる船尾形状変化の性能評価について、日本造船学会論文集、第152号、1983.1 あるいは Ueda, T. et al. : An Evaluation for Stern Forms by Means of Propeller Load Varying Test System, Naval Architecture and Ocean Engineering Vol.21 1983、日本造船学会
- 33) 足達宏之他：荷重度変更法による肥大船尺度影響の調査、第40回 船舶技術研究所研究発表会講演集、1982.12
- 34) 菅井信夫他：プロペラ荷重度変更法による干渉係数の調査、第44回 船舶技術研究所研究発表会 講演集、1984.11
- 35) 児玉良明他：小型カーフェリーの船尾振動に関する総合的水槽試験—特に船尾船底フィンの効果について—、船舶技術研究所報告 第20巻、第5号、1983.9
- 36) 上田隆康他：高経済性内航船舶の船型開発に関する研究、船舶技術研究所報告 第23巻 第4号、1986.7 あるいは Ueda, T. et al. : Hull Form Development of Coastal Ship of Highly Economical Performance, 3rd PRADS Sym. 1987.6 Norway
- 37) 菅井信夫他：699G.T.型内航タンカーの船型改良に関する研究、船舶技術研究所報告 第26巻 第1号、1989.1
- 38) 塚田吉昭他：内航タンカーの波浪中推進性能に関する研究、船舶技術研究所報告 第27巻 第2号、1990.5
- 39) 塚田吉昭他：内航高速旅客船の性能向上に関する研究、1991年の船舶技術研究所報告に発表予定
- 40) 川上善郎他：Twin-skeg stern船型の推進性能に関する実験的研究—幅方向skeg位置の変化及びskeg間tunnel部の船底の傾斜の変化が推進性能におよぼす影響、船舶技術研究所報告 第18巻 第6号、1981.11
- 41) 川上善郎他：広幅浅喫水船型の推進性能に関する研究—2軸船の主要目比が推進性能に及ぼす影響—、船舶技術研究所報告 第20巻 第4号、1983.7
- 42) 柳原健, 川上善郎：載荷状態が推進性能に及ぼす影響—バルクキャリア船型についての調査資料—、船舶技術研究所報告 第22巻 第2号、1985.5
- 43) 山口真裕他： $C_B=0.65$ の広幅浅喫水船の推進性能に関する水槽試験、船舶技術研究所報告 第19巻 第3号、1982.5
- 44) 山口真裕他：広幅浅喫水船の水槽試験(その3)、第38回 船舶技術研究所研究発表会 講演集 1981.12
- 45) 石坂純他：内航船( $C_B=0.78$ )のL/BおよびB/dの変化が推進性能に及ぼす影響について、第40回 船舶技術研究所研究発表会 講演集、1982.12
- 46) 石坂純他：左右非対称船尾形状を有する船型の自航特性、第46回 船舶技術研究所研究発表会 講演集、1985.11
- 47) 堀利文他：プロペラ荷重度変更法による波浪中船型試験システム、第44回 船舶技術研究所

研究発表会 講演集、1984.11

- 48) 門井弘行他：自動車専用運搬船の波浪中における推進性能に関する模型試験、船舶技術研究所報告 第23巻 第4号、1986.7