

肥大船尾を持つ回転体の自航試験

菅井信夫*・足達宏之*

Self-propulsion Test on a Submerged Body of Revolution with Full Stern

By

Nobuo SUGAI and Hiroyuki ADACHI

Abstract

The problem of the hull-propeller interaction is of practical importance. Therefore, many efforts have been done with the purpose of getting knowledge of the functional dependance of the thrust force on the resistance of self-propelled ship.

This paper deals with the experimental results of a submerged body of revolution under the action of propeller just behind the body. The purpose of the experiments lies in getting the basic experimental data, making an effort to find undiscovered facts and estimating the self-propulsion performance of the actual ship of usual form.

The experiments are consisted of following items;

- 1) resistance tests
- 2) wake measurement on propeller disk
- 3) self-propulsion test: propeller is driven behind body
- 4) pressure measurement on hull surface.

It can be said from the result of experiment that the submerged body of revolution could be replaced by a ship with full stern. And some questions for the procedure of self-propulsion test are raised.

目 次

- | | |
|--|--|
| <ol style="list-style-type: none">1. 緒 言2. 船尾付近の流れの等価性について3. 肥大船船尾流れの特徴4. 回転没水体の自航試験<ol style="list-style-type: none">4.1 模型および実験概要<ol style="list-style-type: none">4.1.1 模 型4.1.2 模型プロペラ4.1.3 実験状態4.1.4 実験概要4.2 実験および実験結果<ol style="list-style-type: none">4.2.1 抵抗試験 | <ol style="list-style-type: none"><ol style="list-style-type: none">4.2.2 伴流計測4.2.3 自航試験5. 推力減少率の理論と実験との比較および考察<ol style="list-style-type: none">5.1 推力減少率の圧力成分<ol style="list-style-type: none">5.1.1 圧力の計測5.1.2 計測結果5.2 推力減少率の全成分と圧力成分との比較6. 肥大船の自航要素と肥大船尾形状の没水体との関連の実験的考察<ol style="list-style-type: none">6.1 肥大船の自航試験結果6.2 肥大船船尾形状の回転没水体の自航試験6.3 結 論 <p>Appendix 船体表面圧力の解析方法</p> <p>参考文献</p> |
|--|--|

* 推進性能部 原稿受付: 昭和52年1月12日

1. 緒 言

船体とプロペラおよび舵との相互干渉については、古くからその重要性が認識され、多くの研究がなされてきた。船の推進性能を知るためには、これらの相互影響を考慮しなければならないのは当然であろう。この中で、船体とプロペラとの相互干渉は、それぞれの立場より研究されており重要なものである。プロペラに及ぼす船体の影響は wake adapted propeller の概念として造船工学の中に生かされている。また、プロペラが船体に及ぼす影響は、いわゆる推力減少率として、船の自航性能の解析法に関して、重要な量として知られている。船体の水の抵抗に打ち勝って進む力が、プロペラの作動の有無により大きく変化するという事実は、船型設計者の大きな関心事になっている。そのため、この推力減少率に関する研究は、Froude が初めて自航試験を行って以来、多くの研究者によって熱心に進められている。

船は粘性のある流体中を、しかも、水面の影響があるという複雑な流場を航走するので、解析的にこれらの状況を考慮に入れた研究を行うことは困難である。しかし、これらの複雑な場を合理的な仮定の下に単純化し、解析的に自航試験をシミュレートしようとする努力が精力的に続けられている¹⁾。一方、現実の問題として、肥大船の自航試験に関して、技術的および試験時に現れる現象の物理的な問題、また新型式の船舶の自航要素の問題、および実船の自航性能推定等々、重要な問題が解決を急がれている²⁾。これらの問題に関しては、経験的な資料の集積による推定法により解決可能なものもあろうが、このような方法を適用できる領域は狭いものであろう。このことが、船型の広い領域に適用できる合理的な手法が求められる所以である。

解析的なアプローチが必要であることは確かであるが、そのための基礎的な実験事実の集積を欠く訳にはいかない。そのため、推力減少率に関して基礎的な実験が色々と行われており³⁾、解析的な方法のチェックに役立てられている。さらに、この方向は推進されるべきであろう。これは、古い問題に解答を与え、また、その過程において新しい問題を提起するためにも役立つであろう。この論文で扱おうとしている主題は、上に述べた意味において、非常に単純な型の船体モデルで実際の船型の自航性能をどれだけ推定できるかという問題と、基礎的な実験データの集積、およびその解

析により新しい事実を見出そうとすることである。

2. 船尾附近の流れの等価性について

無限流体中を一定速度で航行する物体周りの流場は、流体の粘性を無視すれば計算が可能である⁴⁾。肥大船尾形状の船体についても同様であるが、粘性の影響を考慮に入れた時の、船尾部での圧力変化を計算で具体的に示すことは、定性的にはともかく定量的には今まだ困難であると言える。実際の流体中の運動、特に粘性の影響が大きいと考えられる船体形状の場合には、流場を知るには実験的な手法に頼らざるを得ない。ここで次の事を考えて見る。すなわち、形状の異なる二つの物体が実際の流体中を航行しているとし、物体の後半部、および物体直後の流場を計測したとすると、この時の流場を規定する物理量が、如何にして二つの物体について比較されるか、また二つの物体の流場が同等であると云うことはどのように定義されるか。

今、二つの物体として、肥大船尾形状の回転没水体と、いわゆる肥大船とを考え、この両者の船尾流場の比較について考察を行う。

回転体の流場は、回転体の軸を主流に対して平行に置く時、自由表面の影響が小さければ、剥離は軸対称に生じると考えられる。肥大船の場合には3次元剥離といわれる複雑なパターンを示す⁵⁾。すなわち、剥離の形式において両者は異なると考えられることから、船尾の伴流の形も異なるであろう。Fig. 2.1 および Fig. 2.2 に、両者の伴流の形状についての比較を示している。これら伴流の形状は定性的な認識を与

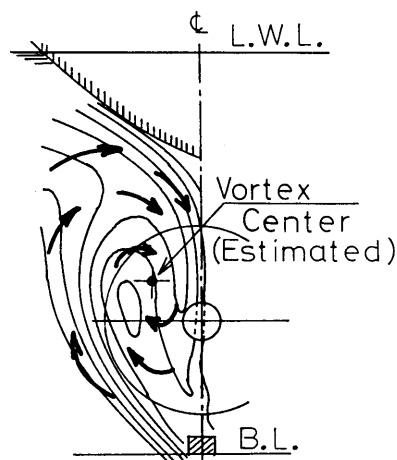


Fig. 2.1 Wake pattern of full ship model

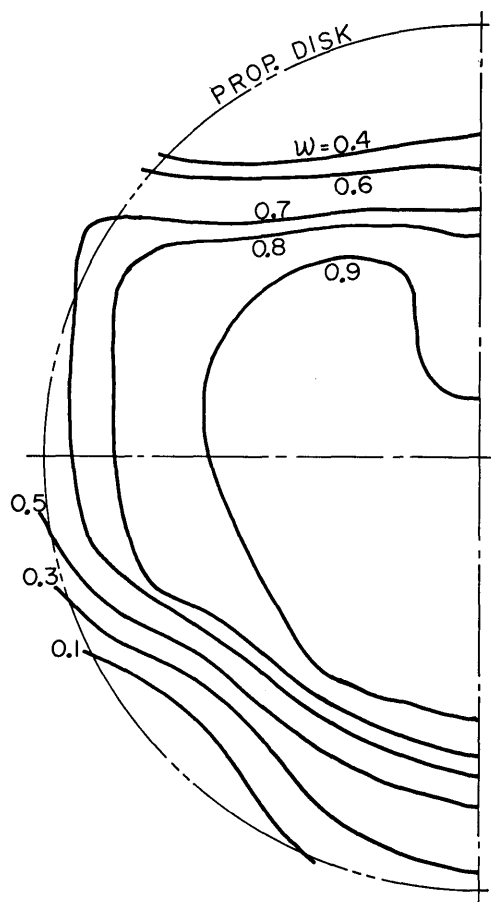


Fig. 2.2 Wake pattern of submerged body of revolution

えるが、定量的な量については、伴流のプロペラ面内における流量分布を考えて見る。回転体はプロペラ軸が中心軸上にあるとして計算を行うこととし、プロペラ円の半径方向の円周毎の平均流量による伴流分布を Fig. 2.3 に示す*。

Fig. 2.1, Fig. 2.2 の比較で明らかのように、伴流形状は両者異なるが、伴流の半径方向分布の形と同じ傾向および量を持つ肥大船の伴流がある時、両者は伴流の半径方向分布につき同じ流場を持つということが出来る。円周方向の伴流分布については回転体の場合、Fig. 2.2 に見られるように変化は少ないことから、伴流の円周方向分布は異なると結論されるが、半

* 半径方向および円周方向伴流分布は、それぞれプロペラ面内の流量の半径方向および円周方向の平均流量について考える。

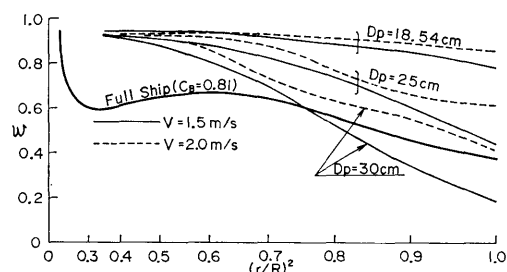


Fig. 2.3 Radial distribution of wake for a submerged body of revolution

径方向の平均伴流については、両者似た形の分布を得ることは可能である。ここで、流場の同一性について伴流の半径方向分布について考えることにすると、回転体の自航要素を肥大船のモデルとして考えることができるか、調べる事が可能になる。

3. 肥大船船尾流れの特徴

ブロック係数 C_B が 0.8 以上で幅広の肥大船船尾の流れを特徴づける物理量について考えて見る。

Fig. 3.1 にこのような船型の代表的な伴流分布図を示す。伴流分布形状は船尾形状の僅かな違いによって変化するが、共通する特徴を指摘すると次のようになる。

(1) プロペラ面上側より舌状の伴流の弱い部分が下方へ伸びており、その舌状の部分に囲まれるように伴流の強い部分がある。これは伴流分布の眼と呼ばれているものであるが、この伴流の強い所は船体後半部からの縦渦によるものと解釈されている⁵⁾。

(2) Fig. 3.2 に示した肥大船の伴流の半径方向分布に見られるように、伴流の半径方向分布は大体において平坦であり、 $w=0.4\sim 0.8$ 位の伴流率レベルにある。

(3) プロペラ面内の伴流の円周方向分布は伴流の複雑な分布を反映して単純ではない。

肥大船船尾流場を特徴づける量を考える時、一般に伴流の円周方向分布の形状は、プロペラ推力に関しては 2 次的影響であると考えられることから、伴流の半径方向分布の形およびその平坦部のレベルを規定することにし、その量について考えてみる。

Nominal wake としてプロペラ面を通過する流量は、プロペラ直径を変化させることで変えることができる。また、船尾肥大度の変化にもよることから、伴流を大きくすることを押し進めて行くと、船尾部の C_B

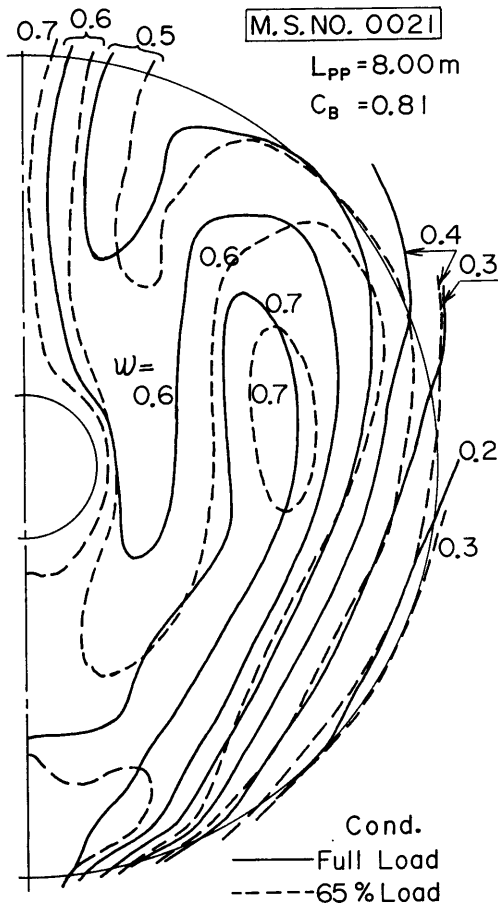


Fig. 3.1 Wake pattern (Full ship model)

を 1.0 とすることに対応する状態が考えられる。Fig. 3.3 に示すよう状態を考えると、プロペラ位置では

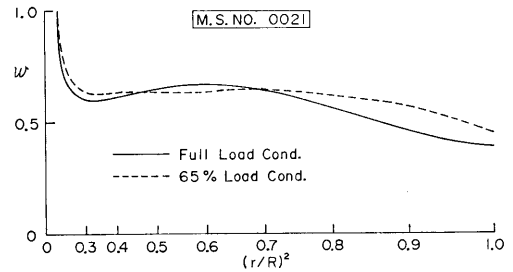


Fig. 3.2 Radial distribution of wake

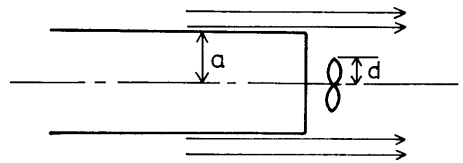


Fig. 3.3 Flow pattern just after a column

死水領域となっていることが予想され、この場合の Nominal wake は 1.0 に近いと考えられる。

肥大船船尾の伴流の半径方向分布の形状の模型図として Fig. 3.4 (a) に示す。ここで伴流を規定するパラメータとして、伴流率 w が下がり始める点 r_0 、および r_0 までの平坦部の平均的レベル w_0 が考えられる。Fig. 3.4 (b) は Fig. 3.3 に示したモデルの伴流の半径方向分布を概念的に示したものであるが、この場合も同様に考えることができる。ここで考えた r_0 , w_0 は伴流を規定するパラメータの一例であり、他にも様々な定義の仕方があろう。

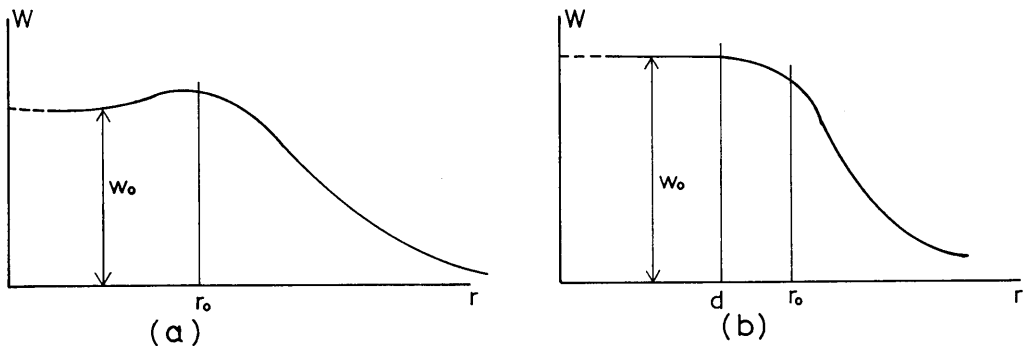


Fig. 3.4 Radial distribution wake of model

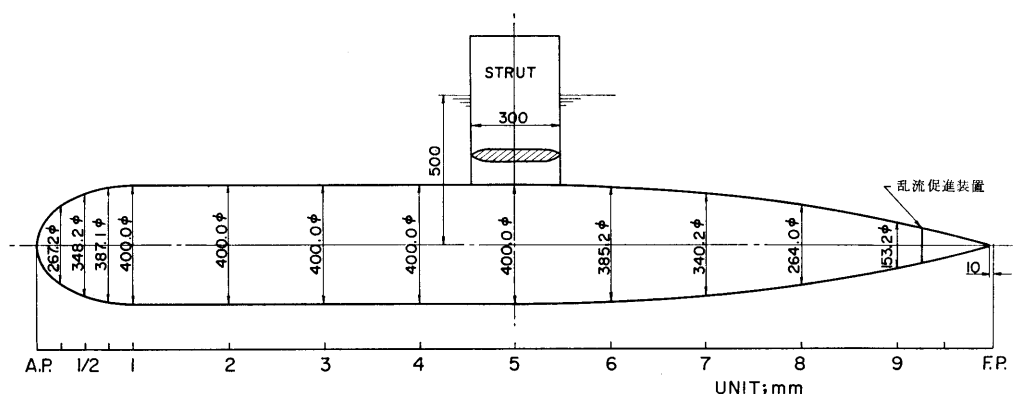


Fig. 4.1 Model geometry

4. 回転没水体の自航試験

4.1 模型および実験概要

4.1.1 模型

肥大船舶尾形状を想定した没水体模型の自航試験を行うにあたり、模型の形状の選択は重要である。使用した模型は、解析を容易にするために回転体であり、肥大船舶尾形状の模型として後部の肥大度は大きく採られている。模型を Fig. 4.1 に、主要目を Table 4.1

Table 4.1 Particulars of model

Length	3.200 m
Max. Diameter	0.400 m
C_P	0.741
C_P (Half body of Aft)	0.936
Type	body of revolution
Material	wood

に示した。模型の形状は A.P. から S.S. No. 1 まではほぼ回転楕円体、S.S. No. 1 から S.S. No. 5 までは、推力減少率の圧力成分の解析を容易にするために平行部となっている。模型は木で作られ、その構造は実験準備を容易にするために、上下の半割りとした。実験準備としての模型を沈めるためのウェイト調整は、まず模型を上下に切り離し、あらかじめ計算されたウェイトを積み込んだ後、上下を合わせて一体とする。次に水中に沈めてから姿勢を整えるための微量のウェイト調整を、ストラット取付用の開口部から行っ

た。

4.1.2 模型プロペラ

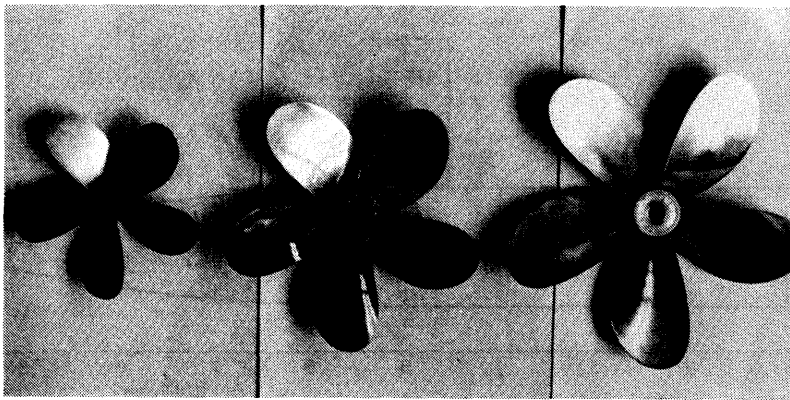
模型プロペラの選択にあたっては、(1) 直径は 20 cm から 30 cm 位まで、(2) ピッチ比をはじめ、その他の要目はなるべく同一とすることなどに留意して Table 4.2 に示す 3 個のプロペラを選んだ。Photo 4.1 にこれらの翼形状を示す。Fig. 4.2 に単独性能曲線を示す。M.P. No. 1374 ($D_P=18.54$ cm) はピッチ比が他の 2 つよりも若干大きいために、 K_T , K_Q 共に大き目となっている。しかし、直径以外のプロペラ要目の若干の相異は、自航要素にはほとんど影響しない⁵⁾とされていることから問題はないであろう。

Table 4.2 Particulars of model propellers

M. P. No.	1374	1134	0110
Diameter (m)	0.1854	0.2500	0.3008
Boss ratio	0.180	0.180	0.1606
Pitch ratio (constant)	0.740	0.600	0.6155
Exp. are ratio	0.650	0.650	0.605
Number of blades	5	5	5
Type of blade section	AU	AU	AU

4.1.3 実験状態

模型の没水深度は自由表面の影響を受けないように、なるべく大きくとった方が好ましい。しかし、動力計の制約から模型中心までの深度は $1.25D$ (D =没水体模型最大直径) とした。自航試験時の模型と各プロペラの $0.7R$ における母線上の翼厚さの中心までの



M.P. No. 1375

M.P. No. 1134

M.P. No. 0110

Photo 4.1 Model propellers

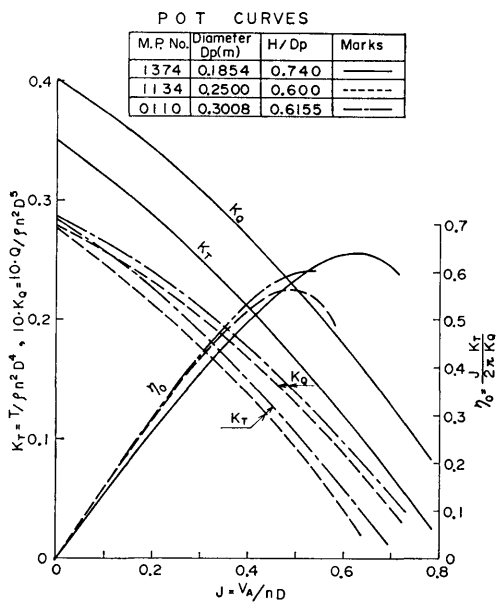


Fig. 4.2 POT curves

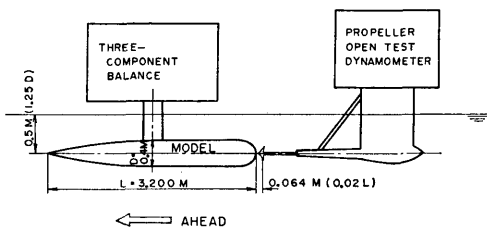


Fig. 4.3 Installation of model and dynamometer

クリアランスは 64 mm (0.02 L) に一定した。模型と各動力計の配置を Fig. 4.3 に示す。

4.1.4 実験概要

実験は抵抗試験、伴流計測、自航試験、圧力計測の 4 項目について実施した。

(1) 抵抗試験では $V=0.5$ m/s から 2.5 m/s までの範囲で 0.1 m/s おきに計測し、後進状態についても 1.0, 1.5, 2.0 m/s の 3 速度について行った。

(2) 伴流計測は $V=1.5, 2.0$ m/s の 2 速度について、5 孔ピトー管によりプロペラ面の流場の様子を調べた。

(3) 自航試験では 1.0 から 2.0 m/s までの範囲で、0.25 m/s おきに Behind 方式で試験を行い、自航要素を求めた。

(4) 圧力計測では模型表面の圧力計測を行うことにより、推力減少率の圧力成分を求め、また船尾の圧力変化の調査の一助とした。圧力計測については別項で述べる。

4.2 実験および実験結果

4.2.1 抵抗試験

供試模型の自航要素を求めるにあたり、通常の抵抗試験を実施した。動力計は 3 分力計 (島津製作所製、容量; Drag=30 kg, 15 kg, 6 kg の 3 レンジ切換え、精度; 各レンジ共フルスケールに対して $\pm 1\%$ 以内) を使用し、抵抗成分の他に揚力とビッチングモーメントを計測した。計測結果を Fig. 4.4 (a), (b) に示す。この抵抗成分には、ストラットの抵抗は含まれていない。これらの結果からハンプホローが大きく現れ、波の影響を受けていることが認められる。

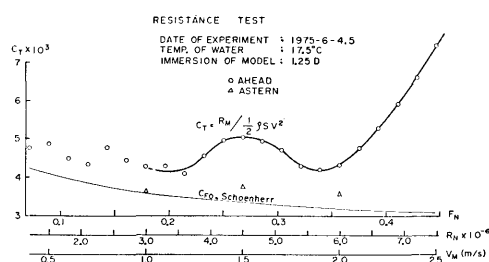


Fig. 4.4 (a) Resistance test results (C_T curve)

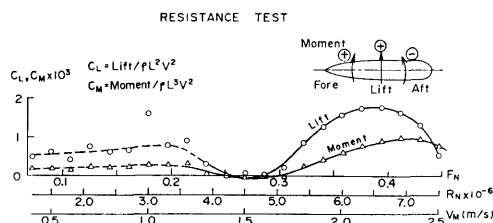


Fig. 4.4 (b) Resistance test results (Lift and pitching moment curves)

4.2.2 伴流計測

自航要素を求めるに際して、プロペラがどのような流場で作動するかが、あらかじめわかっていた方が良

い。そこでプロペラ面とその近傍の流場の様子を調べるために伴流計測を実施した。使用したビトー管は、Apex Angle=25° の球型の 5 孔管⁶⁾である。圧力はペローズ式差圧計 (容量 50 g/cm²) で変換し、ペンレコーダに記録した。速度は抵抗曲線のハンプホローの大きく現れている 1.5 m/s と 2.0 m/s の 2 つを選んだ。計測結果を Fig. 4.5 (a), (b) に示す。図に見られるように、両速度共に伴流分布は軸対称になっていない。1.5 m/s では流速の速い部分はプロペラ円の下方を占め、2.0 m/s ではその逆の傾向を示しており、プロペラ円の伴流は自由表面の影響を受け、流速によって伴流分布形状は変化していることが見られる。

次に記録の変動の様子から、プロペラ面附近の流れの変動について調べ、Fig. 4.5 の ○△× 印で表わしてみた。○印は記録の変動が非常に少ない領域を示しており、これはほとんどが死水領域である。×印は記録の変動の非常に大きい領域を示しており、△印は○印と×印の間と思われる領域である。Fig. 4.6 には○印と×印の記録例を示しており、○印の変動の小さい例では、各圧力共に模型が停止している時の状態から変位していないことから、死水領域と認めることがで

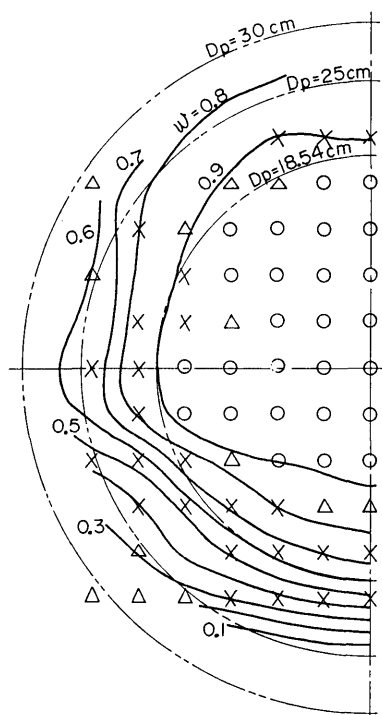


Fig. 4.5 (a) Wake pattern of body of revolution ($V=1.5$ m/s)

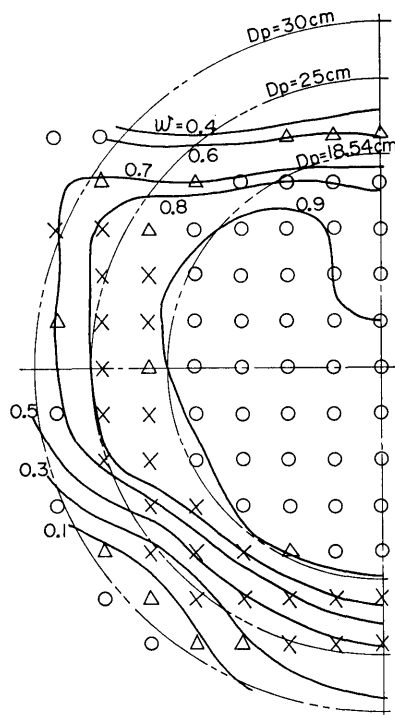


Fig. 4.5 (b) Wake pattern of body of revolution ($V=2.0$ m/s)

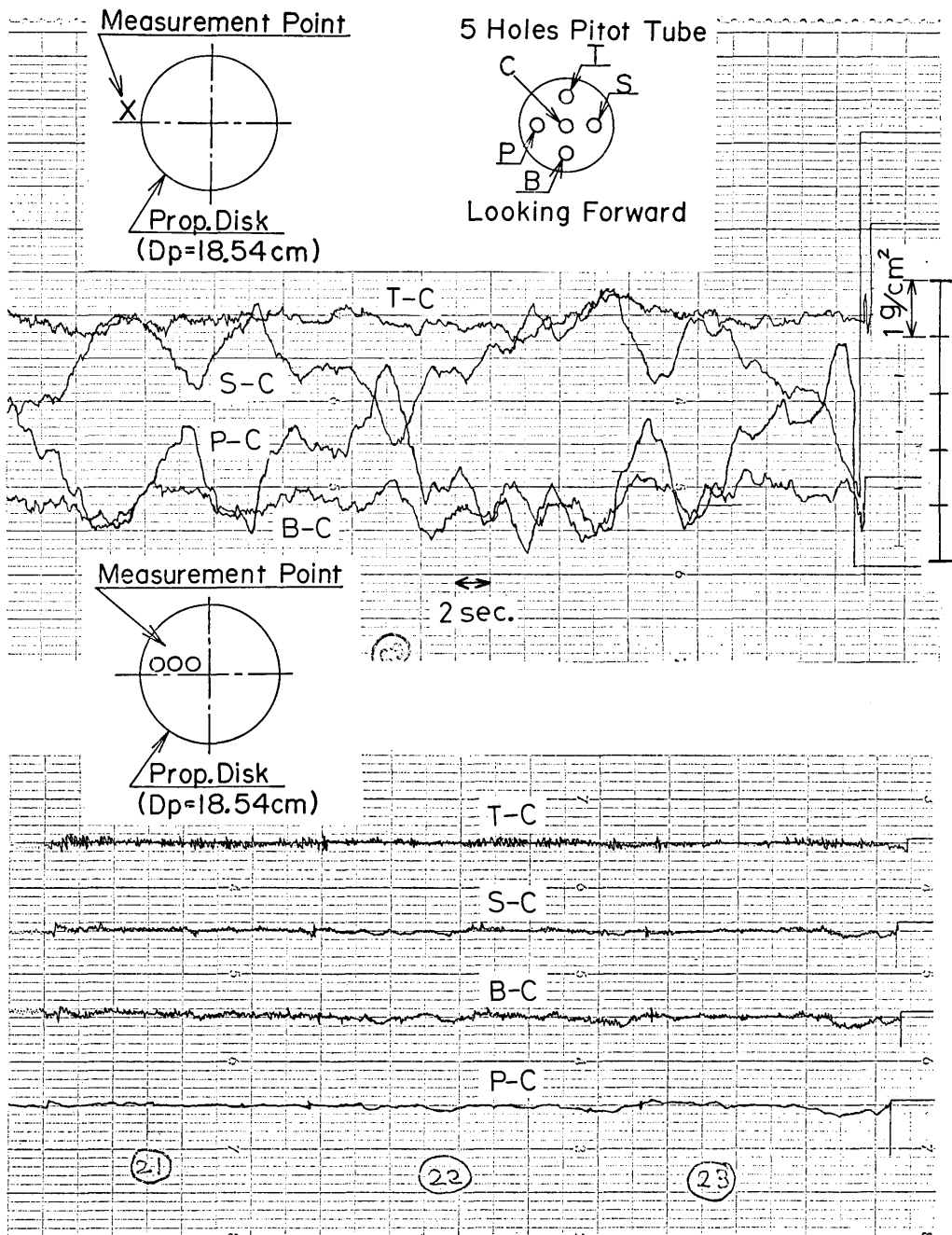


Fig. 4.6 Example of record of 5 hole pitot tube in measuring wake pattern

きる。×印の変動の大きい方の例は、プロペラ円の横方向の位置のものであるために (S-C) と (P-C) の変動が大きく現れている。このような変動の大きい現象は、プロペラ円 (M.P. No. 1374, $D_p=18.54$ cm) の外端附近から外側にかけて数 cm の厚さにわたり、この現象が見られる。これは模型表面で剝離した部分が、後に流れ去る様子を示しているものと思われる。これに大阪大学で行われた流線観測結果から、若干の考察を加える⁷⁾。大阪大学での剝離点を観測するための方法は、模型表面に絵具を塗り、その流れ去る様子から限界流線を求め、それより剝離点を求めている。速度は 0.5 m/s と 0.7 m/s であるが、両速度共にプロペラなしの時は、S.S. 1/2 附近で剝離している。そして、プロペラを作動させると剝離点は次第に後方に移動し、プロペラ荷重度を大きくするとプロペラボス附近を除いて、剝離点は無くなるという結果を得ている。S.S. 1/2 は供試模型の場合、直型約 17 cm の所に相当する。しかしプロペラ面での伴流の変動の大きい領域は、直径約 10 cm の所で起っていることから、剝離領域がそのまま平行に流れ去ったとすると、大阪大学の結果と一致しない。このことはレイノルズ数の違いによるものと解釈され、剝離域が流れに平行に流れるものとする、供試模型での剝離位置は S.S. 1/8 位の所と推定される。

変動の大きい領域については、さらに流向の変動について調べてみた。記録の変動の特に大きいと思われる、代表的な例から 2 秒間隔でデータをサンプリングし、 V_r/V , V_z/V を求め Fig. 4.7 に示した。ただし、

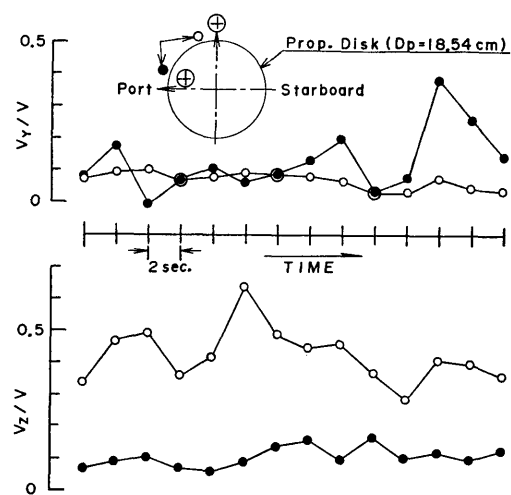


Fig. 4.7 Variation of wake with time

V_r , V_z は模型の幅方向成分および上下方向成分である。流向については、プロペラ円の横の位置では左右の、またプロペラ面の上方では、上下方向の大きな変動を見ることができる。各々の値については、共に最大変動量は V の 35% 位を示している。

4.2.3 自航試験

Behind 方式による自航試験の長所は、船型の肥大化に伴う測定の時定数の増加に関係がなくなること²⁾であるが、その反面同一試験速度に対して、プロペラ荷重度を変化させて計測を行う必要から、航走回数が増加する短所がある。ここでは自航点として、一つの速度においてプロペラ回転数を変化させることによって、プロペラ荷重度を変えて数回航走し、その時の模型の抵抗曲線とプロペラ推力曲線の交った所を採用している。

Fig. 4.8 (a), (b), (c) に試験結果を示している。横軸はプロペラ回転数 n を、縦軸はプロペラ推力 T , Behind 試験時の模型の抵抗 R_B をそれぞれ表わしている。この結果、自航点の推力は、同一速度では各プロペラ直径ともに、 $V=1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0$ m/s でそれぞれ、 $1.3, 2.2, 3.8, 4.5, 5.9$ kg 位の値を示し、プロペラ直径にはほとんど影響されていない。

また、プロペラ直径 $D_p=18.54$ cm では $V=2.0$ m/s を除くと、推力曲線は速度に関係なく、回転数だけの関数となっているように見えることが注目される。こ

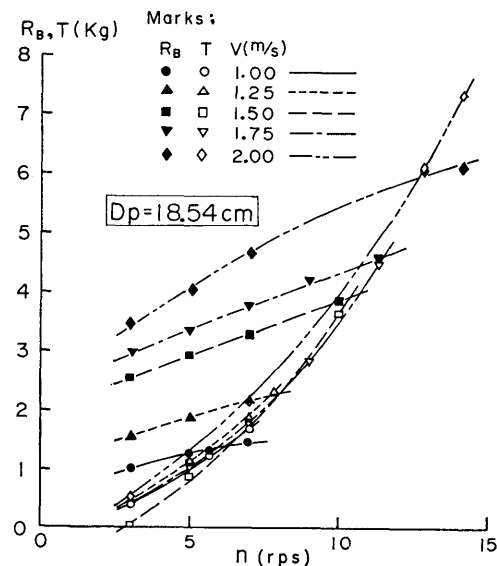


Fig. 4.8 (a) Relation between R_B , T and n ($D_p=18.54$ cm)

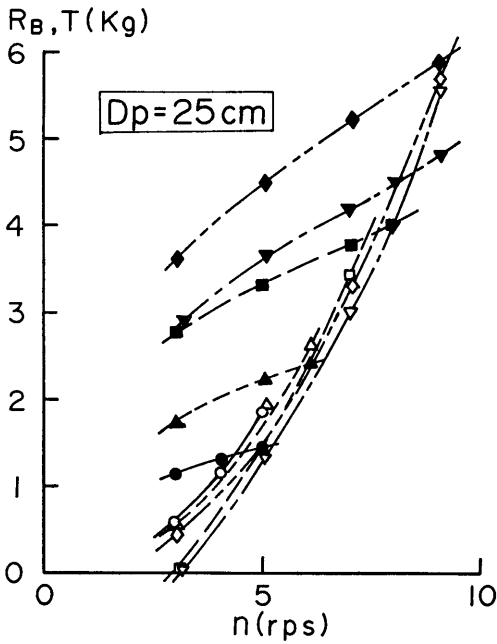


Fig. 4.8 (b) Relation between R_B , T and n ($D_p=25$ cm)

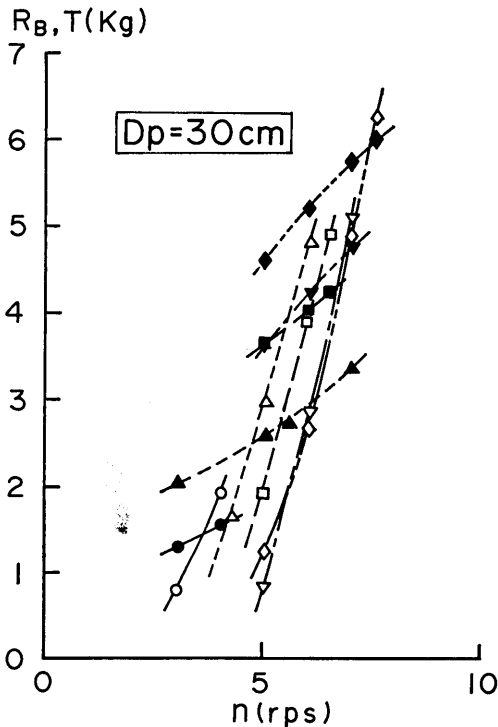


Fig. 4.8 (c) Relation between R_B , T and n ($D_p=30$ cm)

れは、伴流計測結果から推定されるように、 $D_p=18.54$ cm のプロペラ面では速度に関係なく、死水領域がほとんどを占めていると思われる。

次に回転体の各自航要素について述べるが、ここではプロペラ直径を変化させることによって、nominal wake w_N が変化するものとする。

(1) 伴流率

推力一致法によって求めた effective wake w_T と nominal wake w_N 、推力減少率 t を Fig. 4.9 に示した。伴流率については、 w_T と w_N はプロペラ直径に対して、同程度の割合で変化している。Fig. 4.10 に代表

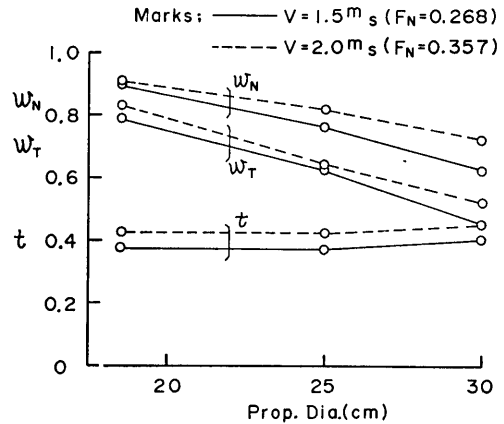


Fig. 4.9 Thrust deduction and wake fraction versus propeller dia.

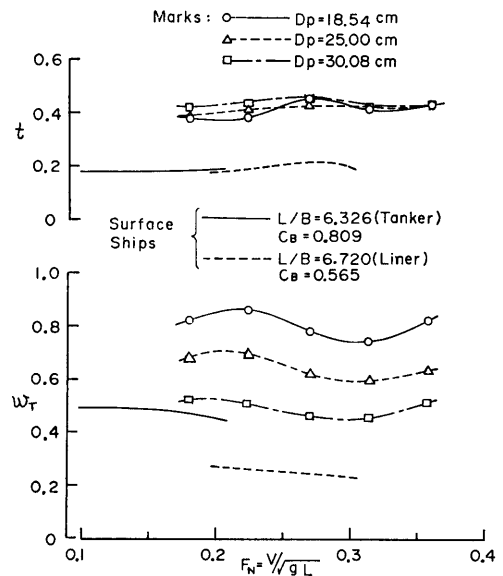


Fig. 4.10 Nominal wake, Effective wake and Thrust deduction versus F_N

的な肥大船型とライナー船型の値と共に、 w_T と t を示した。 w_T については、 $D_p=30$ cm の値が $C_B=0.81$ の肥大船型と近い値を示している。

(2) 推力減少率

推力減少率は、その定義から $t=1-R/T$ として求めた。ただし、 R は抵抗試験時の回転体の抵抗値である。推力減少率は、プロペラ直径の変化の影響をほとんど受けていないようである。値の大きさについてみると、0.37 から 0.45 位を示し、可成特殊なように見える。ここで推力減少率の性質として、nominal wake との関係から、次のような事柄を挙げる事ができる。

- (a) nominal wake が 0.6 から 0.65 以下では、 t の値はほぼ一定で、通常は 0.15 から 0.25 位の範囲にある。
- (b) nominal wake が 0.65 から 0.7 以上では、 t は急激に増加する傾向にある。

このような事から、回転体の w_T は 0.63 から 0.91 位にあるところから、 t はそれ程不自然な値ではない。

一方、高橋等の行ったフレームライン・シリーズの試験⁸⁾では、船尾フレーム・ラインを変化させて、 w_T の値を 0.57 から 0.76 に変化させることによって、 t を 0.18 から 0.35 へと大きく変えている。

Behind 方式による自航試験は、プロペラ荷重度変更試験を行うことであるが、そのためプロペラ荷重度の変化による、 t の値を見ることができる。Fig. 4.11

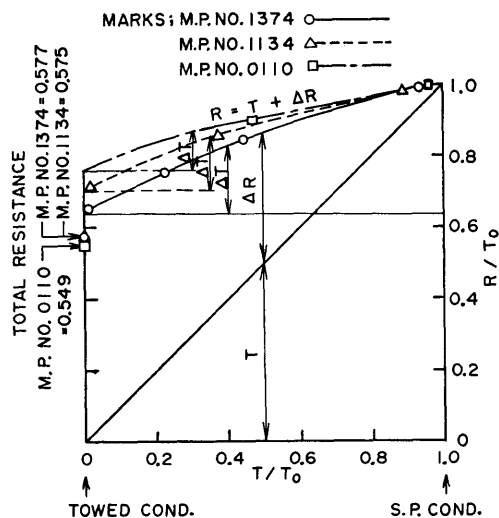


Fig. 4.11 Result of test for changing load of propeller

に各プロペラについて、1.5 m/s の結果を示している。横軸、縦軸共に自航試験時の T , R_B を自航点の推力 T_0 で無次元化している。よって横軸は、プロペラ荷重度を表わしており、この任意の位置での t は

$$t=1-R_0/T$$

として簡単に求めることができる。ここで R_0 は抵抗試験時の回転体の抵抗を表わしている。

Fig. 4.11 から次のような現象を見ることができる。プロペラ直径が大きくなるに伴って、 T が零となる時の R_B/T_0 と R_0/T_0 の差が大きくなる。これは、推力が零となる時のプロペラ回転数が、プロペラ直径が大きい程、高いことを示している。これは Fig. 4.8 に現れているように、プロペラ直径の増加によって、回転数の変化による推力の増加率が大きくなっていることで明らかである。このことはまた、プロペラ半径方向の伴流分布 (Fig. 2.3) において、nominal wake の値はプロペラ直径が大きくなると、小さくなることから容易に想像される。

(3) 推進効率等

自航試験から得られた推進効率等を Fig. 4.12 に示す。

ただし、

$$\eta_0: \text{プロペラ単独効率} = \frac{JK_T}{2\pi K_Q}$$

$$\eta: \text{推進係数} = \frac{1-t}{1-w_T} \eta_0 \eta_R$$

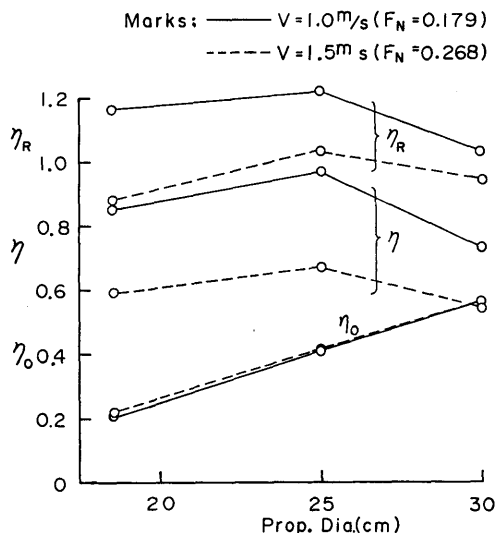


Fig. 4.12 Efficiencies versus propeller dia.

$$\eta_R: \text{プロペラ効率比} = \frac{t'}{p'} \frac{1-w_T}{\gamma_0}$$

$$t' = T/\rho r^{2/3} V^2, \quad p' = 2\pi n Q/\rho r^{2/3} V^3$$

プロペラ単独効率は、プロペラ直径の増加，すなわち nominal wake の減少に伴って増加しており，これは実用船型の傾向と同一である。推進係数およびプロペラ効率比は，実用船型においては nominal wake の減少に伴って，漸増の傾向が見られるのが普通であるが，回転体では $D_p=30$ cm で減少している。これはプロペラ半径方向の伴流分布 (Fig. 2.3) に見られるように，伴流の大きい領域が $D_p=30$ cm では，その $0.6R$ の内側に入ってしまったために，プロペラ直径の増加によって下るべき回転数が，下がらなかったことによるものと考えられる。一方， $D_p=18.54$ cm では，死水領域がプロペラ面の多くを占めているのに対し， $D_p=25$ cm ではその半径方向の分布形状がプロペラに適していたために，推進係数はこの $D_p=25$ cm が一番高い値を示したものと思われる。

5. 推力減少率の理論と実験との比較 および考察

推力減少率はその成分から

$$t = t_P + t_W + t_V$$

と表わすことができる。ただし， t_P : ポテンシャル成分， t_W : 造波成分， t_V : 粘性成分

推力減少率は， t_W ， t_V の2成分が非常に小さい⁹⁾ところから， t_P によるものが大部分である。この t_P を計算，あるいは実験によって求めることにより，推力減少率の大部分を求めることができる。ここでは，圧力計測によって求めたものと自航試験から求めた推力減少率の全成分とを比較し，これらの考察を行う。

5.1 推力減少率の圧力成分

5.1.1 圧力の計測

回転体表面の圧力計測は，表面に圧力計測孔を設けて，その圧力を曳引車上のマンオメータに接続して読みとる方法をとった。その時の計測システムの概略を，Fig. 5.1 に示した。圧力計測孔の直径は，1 mm と小さくしたために，回転体後部の圧力変動の大きいと思われる所でも，マンオメータにはその変動は現れなかった。また，圧力の整定時間は大きく，約 100 秒であった。

5.1.2 計測結果

(1) プロペラなしの圧力計測結果

プロペラなしの状態の表面圧力を計測した。速度は

(252)

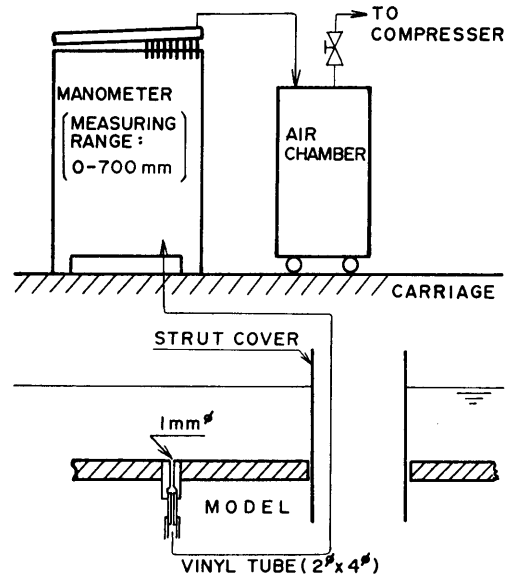


Fig. 5.1 Measuring system of surface pressure

自航試験と同様，1.0 m/s から 0.25 m/s 毎に 2.0 m/s までである。前進状態における表面圧力分布を Fig. 5.2 (a) に，後進状態の圧力分布を Fig. 5.2 (b) に示

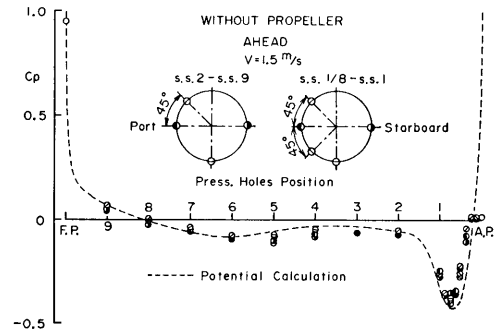


Fig. 5.2 (a) Pressure distribution along hull surface (Ahead)

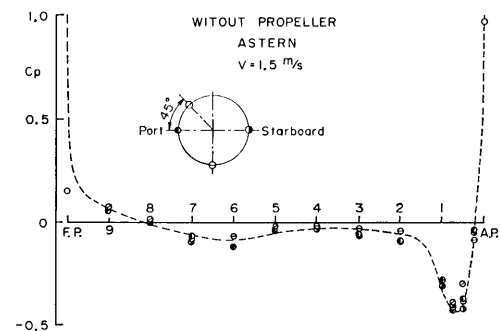


Fig. 5.2 (b) Pressure distribution along hull surface (Astern)

す。後進状態では、ほぼ計算値と合っており、ポテンシャル流に近いことを示していると同時に、これ等の圧力計測値が適正であることを示している。

(2) プロペラを作動させた時の圧力計測

プロペラを回転体後方へ 64 mm (0.02 L) 離れた所で作動させ、その時の圧力分布を計測した。プロペラ直径 $D_p=18.54$ cm の時の圧力計測では、圧力計測孔の数が回転体後部の彎曲部で不足していたために、 $D_p=25, 30$ cm の計測に際しては、彎曲部の前後方向と円周方向の数を増加して行った。計測孔の数は、解析精度に大きく影響するために、 $D_p=18.54$ cm では他の 2 個のプロペラの場合よりも精度は、若干落ちたと思われる。

(a) 円周方向の表面圧力分布

プロペラの吸込み作用による、圧力分布の変化を見るために、後部彎曲部の円周方向の表面圧力分布を、Fig. 5.3 (a), (b), (c) に示した。この図からは、表面圧力におよぼすプロペラ直径の影響を見ることはできない。しかし、プロペラを作動させることによって、

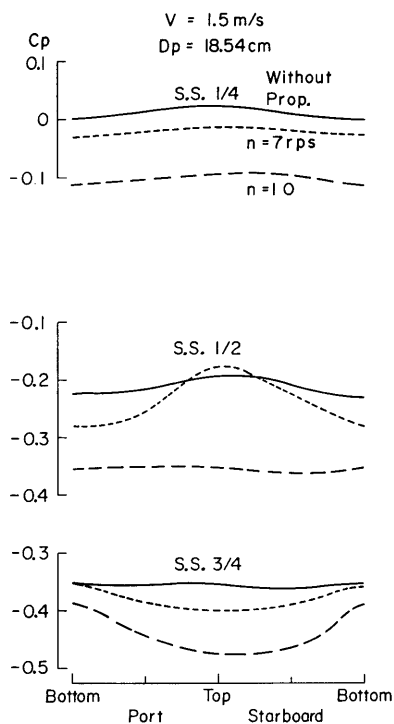


Fig. 5.3 (a) Circumferential distribution of pressure ($D_p=18.54$ cm)

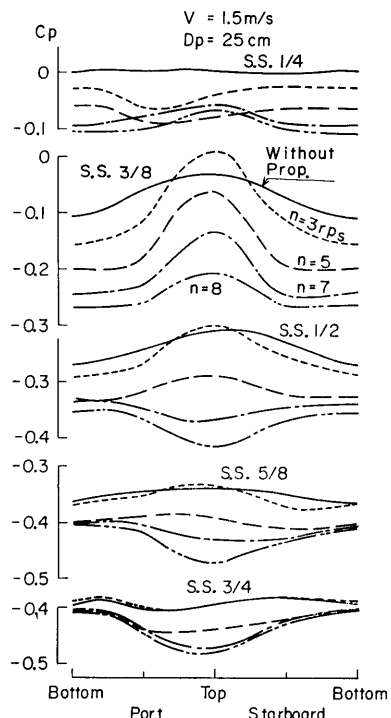


Fig. 5.3 (b) Circumferential distribution of pressure ($D_p=25$ cm)

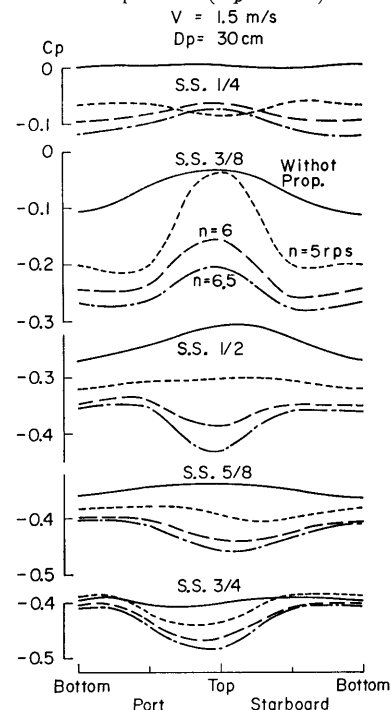


Fig. 5.3 (c) Circumferential distribution of pressure ($D_p=30$ cm)

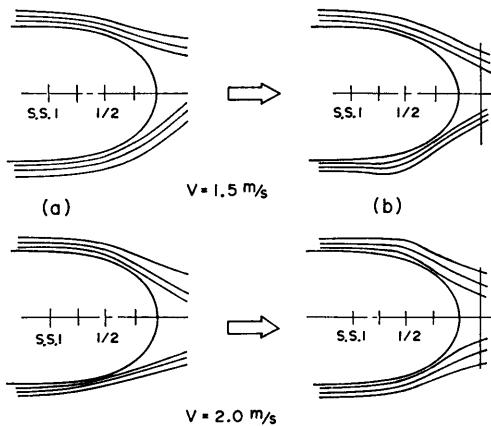


Fig. 5.4 Schematic flow pattern aft of the body of revolution

彎曲部の流れは、Fig. 5.4 の (a) から (b) に推移することが想像される。(a) のプロペラなしの状態の流れは、伴流計測結果と一致する。このように、回転体後部の流れの状態は、没水深度が比較的浅い状態では、

プロペラ荷重度によって変化するものであることがわかる。

(b) 長さ方向の表面圧力分布

速度 1.5 m/s について、各プロペラ直径での回転体後部の表面圧力分布を Fig. 5.5 (a), (b), (c) に示す。円周方向の圧力分布では、プロペラ直径の影響を見ることは困難であったが、Fig. 5.5 ではプロペラ直径の変化による、圧力分布の様子を見ることができる。特に、各プロペラの Top 側の S.S. 5/8 以後において、その変化が現れている。

(c) プロペラの作用による縮流効果について

回転体後部の表面圧力分布から、プロペラの作用による縮流効果を見るために、Fig. 5.6 (a), (b) に示すように横軸にプロペラ荷重度 Γ を、縦軸に圧力を取り、その影響を表わしてみた。

S.S. No. に対する前後方向を、Fig. 5.5 と参照すると、 $V=1.5$ m/s については、S.S. 1/4 から後方と S.S. 3/4 から前方ではその影響は小さい。S.S. 1/2 付近でプロペラ荷重度の増加によって、比較的大きな圧

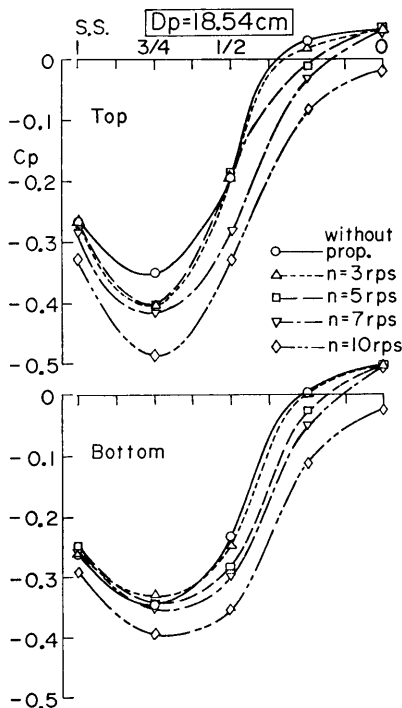


Fig. 5.5 (a) Longitudinal distribution of pressure around stern ($V=1.5$ m/s)

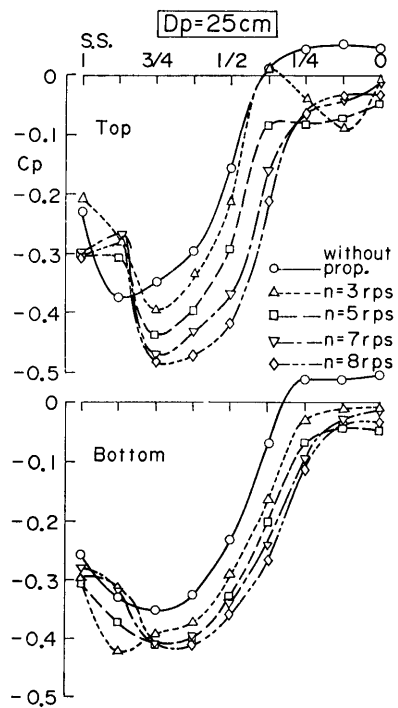


Fig. 5.5 (b) Longitudinal distribution of pressure around stern ($V=1.5$ m/s)

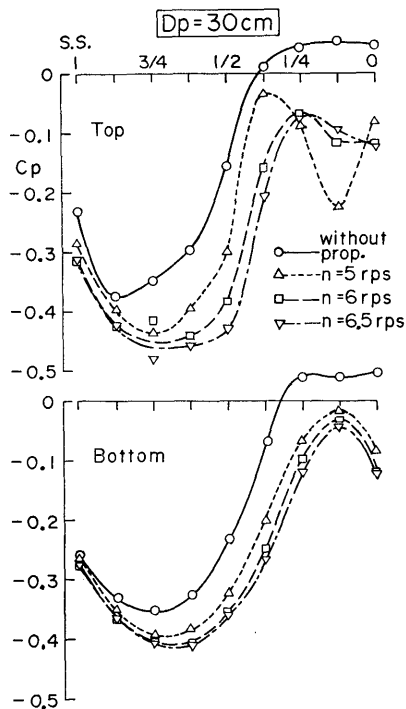


Fig. 5.5 (c) Longitudinal distribution of pressure around stern ($V=1.5$ m/s)

力降下，すなわちプロペラの作用による縮流効果を見ることができる。 $V=2.0$ m/s では，ほぼ全域にわたって縮流の効果が見られる。

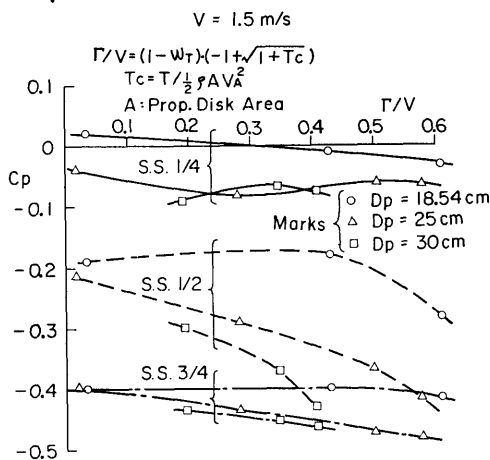


Fig. 5.6 (a) Effect of propeller suction on pressure coefficient ($V=1.5$ m/s)

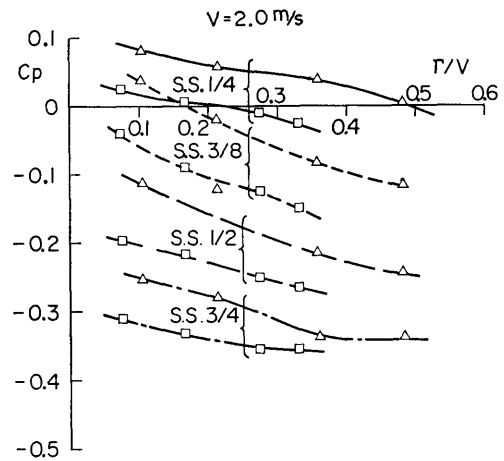


Fig. 5.6 (b) Effect of propeller suction on pressure coefficient ($V=2.0$ m/s)

5.2 推力減少率の全成分と圧力成分との比較

推力減少率の全成分の中で，圧力成分の占める割合を検討するために，Fig. 5.7 に自航試験から得られた全成分と，圧力計測から得られた圧力成分を示した。 $D_p=18.54$ cm のプロペラの圧力成分は，他の2個の計測時よりも，計測孔の数が少ないことから，精度が落ちると思われるために省略した。

圧力成分のプロペラ直径の影響は， $D_p=18.54$ cm の t_p/t は約 0.8 から 0.9， $D_p=30$ cm の t_p/t は 0.85

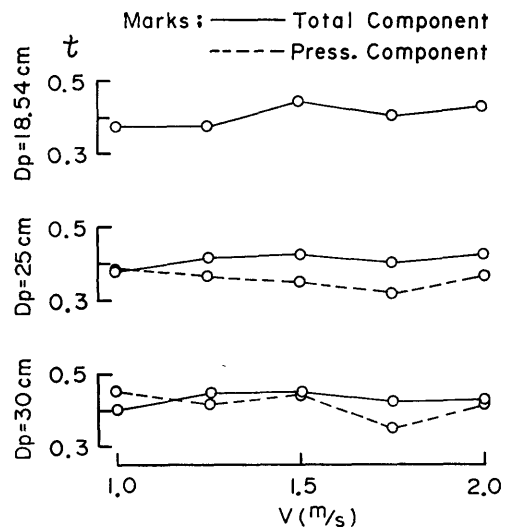


Fig. 5.7 Thrust deduction due to pressure component

から 0.95 位の値を示していることから、プロペラ直径の大きい方が圧力成分の占める割合は大きく現れている。これは、プロペラ直径の増加に伴って、圧力成分が大きく影響される回転体後部彎曲部に対して、プロペラの吸込み作用が強く働くものと考えられる。このことは、Fig. 5.5 (c) において S.S. 1/4 以後で、 $D_p=30$ cm の時の圧力は $D_p=25$ cm の時のそれよりも、可成低い圧力値を示していることから推察される。

速度 1.0 m/s の時に、両プロペラ共に圧力成分が全成分よりも高い値を示している。この原因について考えられることは、速度が低いために圧力の計測誤差を生じたことによるものであろう。

6. 肥大船の自航要素と肥大船船尾形状の回転没水体との関連の実験的考察

供試模型の回転没水体の形状から、この回転体の船型上の位置づけを行うために、回転体と肥大船の自航要素との関連を実験結果から考察する。

6.1 肥大船の自航試験結果

肥大船の自航試験結果について数多くの資料がある¹⁰⁾が、船尾肥大度と直接関連するものは多くない。この肥大度の測度を、マクロな量ではあるがプロペラ面における nominal wake の量を考えることにする。基本的な考え方は、nominal wake の量は Fig. 3.4 (a) に見るように、船尾肥大度と伴流率 w_0 と関連しているとす。この考え方の下に、プロペラ面における nominal wake w_N が計測された肥大船について、effective wake w_T を自航試験解析 (K_T 一致法) から求め、 w_N に対してプロットしたものを Fig. 6.1 に、

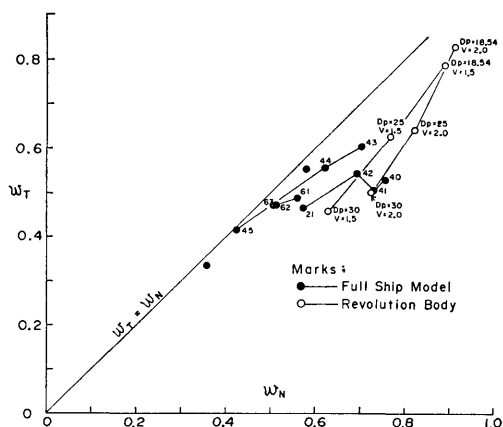


Fig. 6.1 Relation between nominal wake and effective wake

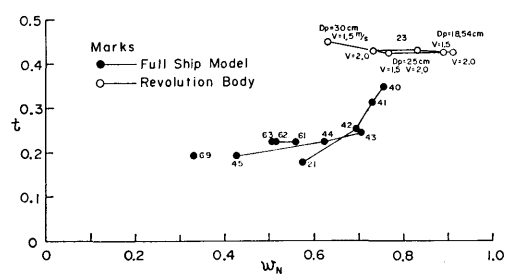


Fig. 6.2 Relation between nominal wake and thrust deduction

また推力減少率 t をプロットしたものを Fig. 6.2 に示す。これ等の図は、船尾肥大度と自航要素との関係を示すものと考えられる。伴流率については、 w_N が大きくなると w_T が w_N に較べ、小さくなる傾向が見られる。この原因の一つとして、プロペラによる伴流の縮流効果であると思われるが¹¹⁾、自航試験を Friction Correction を使って行い、 w_T を K_T 一致法で求めていることにも一因があると考えられる。そのため $w_N - w_T$ の関係は、定量的にははっきりしたことは云えない。なお、Fig. 6.1 は $w_T < w_N$ となっているが、佐藤の調査した結果¹²⁾は必ずしもこの傾向を示しておらず、前記の原因の他にも種々の要因が $w_T - w_N$ の関係に入っていることを示唆している。しかし、Friction Correction を零とした時の完全自航の場合、 $w_T < w_N$ の関係は、プロペラの縮流効果が一因となっていることは正しいと考えられる。この w_N と w_T の差について、幾つかの定性的な説明がなされているが、確定した説はまだ無いようである。

推力減少率については、Fig. 6.2 に見られるように w_N が大きくなると、 t も大きくなる傾向が見られる。 w_N の大きさは、選んだプロペラ直径の値により変わり得るので、定量的な関係をこの図より読みとることはできない。(通常の船型では、船体の寸法に対するプロペラ直径の比がほぼ一定なので、このような比較が意味を持つと考えられる。)

船尾肥大度により推力減少率 t が大きくなるという、これまで定性的に云われてきたことは、 $w_N > 0.7$ で非常に顕著に現われており、また $w_N < 0.7$ でも t は、ゆるやかではあるが全体的に w_N に比例して増加していると思われる。

6.2 肥大船船尾形状の回転没水体の自航試験

Fig. 6.1, Fig. 6.2 に肥大船の関係を共に、回転体の結果をプロットしている。この図によると、この回

転体は肥大船型の延長上にあり、肥大船型の一つの極限状態のように見える。しかし、これはあくまで nominal wake の量に対する対応である。伴流の形状は、Fig. 2.1, Fig. 2.2 に示しているように、肥大船型と回転体の一致点を指摘することは難しい。また、nominal wake の量は、プロペラ直径を変化させることによって変わるものとしているので、それにつれて w_T , t も変化する。回転体の例では、プロペラ直径の変化に対しては、Fig. 6.1, Fig. 6.2 に見られるように、 t は変化しないが w_T は w_N に比例して変化している。このことにより、 t は船尾肥大度のみによって定まる量であることが推察される。 w_T は w_N とプロペラの作用によることが考えられる。

Behind 方式による自航試験は、ある物体をプロペラの前に置いた状態の、プロペラ特性試験であると云い換えることができる。Fig. 6.3 にその一例を示す。この図は回転体直後のプロペラ面内の nominal wake を、プロペラ流入速度 V_A に換算し、 $J=(1-w_N)V/nD$ として k_T-J 図としたものである。 w_N の大きな場合、プロペラ単独時の結果と異なる傾向と結果を示し

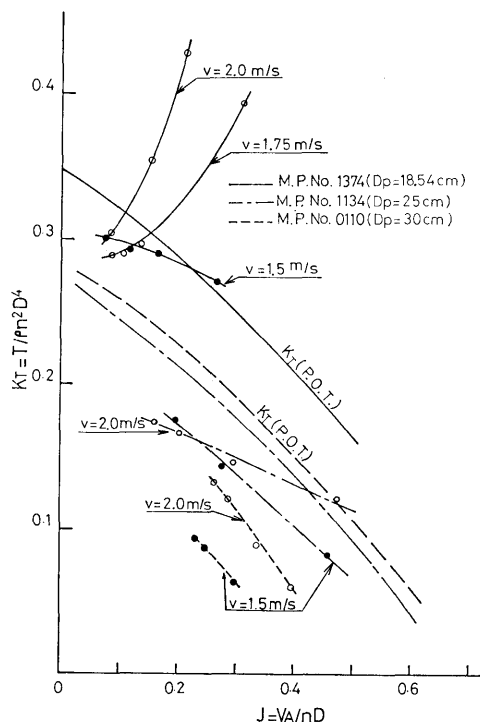


Fig. 6.3 Characteristic curves of propeller just after body of revolution

ている。各プロペラ直径の nominal wake は Fig. 2.3 に示されるように、 $D_p=18.54$ cm は非常に大きな伴流率を持ち、プロペラ作動の状態は、死水領域中のようである。 $D_p=30$ cm の場合、プロペラ直径の約 70% の所で伴流率は 0.5~0.6 であり、POT 曲線の K_T と同じ傾向を示す。これ等の傾向については、さらに考察が必要であり、実際問題として自航試験解析に何らかの、修正を考えなければならないことを示唆している。

6.3 結 論

肥大船と回転体の自航要素と、それ等の自航要素に大きな影響を及ぼすプロペラ面の流場および自航要素の関連について調べた。この結果、供試模型の回転体を肥大船のモデルと仮定しても、差しつかえないとの結論が得られたと思われる。そして、この回転体の一連の自航試験を通して経験したことから、特に肥大船型の自航試験法等について気づいた点を記す。

(1) 肥大船の自航試験時の伴流構造が、POT 時と大きく異なるため、effective wake w_T の推定に誤差を生じ易い。(Fig. 6.3)

(2) 伴流形状がプロペラ荷重度により、大きく変化する場合がある。これはプロペラ直径と剝離域の大きさと関連がある。

(3) このため、プロペラが船体より受ける wake gain は複雑である。

以上は伴流の尺度影響とも絡み、肥大船の自航要素解析を困難にしている原因と考えられる。

最後に、実験にあたり終始御協力していただいた、横尾直幸主任研究官に深く感謝いたします。また、実験に使用した模型の線図は、大阪大学工学部造船学科の御好意によるもので厚く御礼申し上げる。

Appendix 船体表面圧力の解析方法

圧力計測によって求められた、圧力の模型の進行方向成分を表面に沿って積分すれば、圧力抵抗が求められる。プロペラの作動による、抵抗増加を ΔR とすると模型全体では

$$\Delta R = \iint_s \Delta p \cos \alpha \, ds \quad (\text{A-1})$$

と表わされる。但し、 Δp はプロペラを作動させたことによる圧力変化量。

供試模型では、プロペラ誘導作用は模型前半部には及ばないとし、後半部について積分を行うと

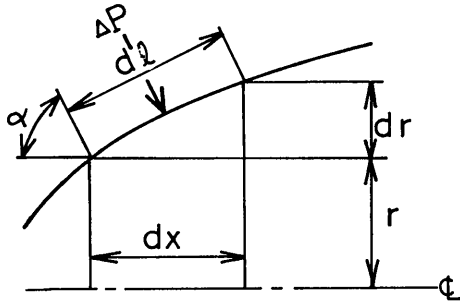


Fig. A.1

$$\Delta R = - \int_0^{R_{\max}} R \int_0^{2\pi} \Delta P_{a\theta} d\theta dr \quad (\text{A-2})$$

$$= - \int_0^{R_{\max}} \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \Delta P_{a\theta} d\theta d(r^2) \quad (\text{A-3})$$

$$= - \frac{\rho V^2}{4} \cdot R_{\max}^2 \int_0^{2\pi} \Delta p_{a\theta} d\theta d(r_1^2) \quad (\text{A-4})$$

として ΔR (kg) を求めることができる。

但し、 R_{\max} = 回転体最大半径 $dr = \cos \alpha dl$, $r_1 = r / R_{\max}$, $\Delta p = \Delta P / \frac{1}{2} \rho V^2$ (A-4) 式によって ΔR が求められれば

$$t = \Delta R / T \quad (\text{A-5})$$

によって推力減少率を求めることができる。(A-4) 式の積分項において θ 方向、 r^2 方向の積分はプランメータによって求めた。

参 考 文 献

1) 例えば、山崎隆介； 静水中における船舶の推進

性能に関する序論，西部造船会々報，第 33 回 (1966)

- 2) 肥大船の推進性能に関するシンポジウム，日本造船学会 (1975)
- 3) 例えば，大阪大学において行われている研究，卒論，修士論文および博士論文として発表されているもの
- 4) J. L. Hess and A. M. O. Smith; Calculation of Non-Lifting Potential Flow about Arbitrary Three-Dimensional Bodies, Report No. E. S. 40622, Douglas Aircraft Co., Inc. (1962)
- 5) 抵抗，推進シンポジウム，日本造船学会 (1968)，および粘性抵抗シンポジウム，日本造船学会 (1973)
- 6) 第 107 研究部会； 船舶の速度計測および馬力推定法の向上に関する研究，日本造船研究協会研究資料，第 142 号 (1972)
- 7) 近藤時生，藤原一志； 回転体の推力減少率，大阪大学工学部造船学科卒業論文 (1972)
- 8) 高橋肇，川上善郎，小出達成，菅井信夫； 船尾バルブ形状変化の推進性能に及ぼす影響，船舶技術研究所研究発表会概要，第 12 回 (1968)
- 9) 笹島秀雄，田中一郎，小寺山亘，引野正己； 推力減少率に関する基礎的研究，関西造船協会誌，第 149 号 (1973)
- 10) 例えば，横尾幸一，斉藤 勇； 船型試験資料—自航要素編—，船舶技術研究所報告，第 11 巻，第 5 号 (1974)
- 11) 永松哲郎，笹島孝夫； Effect of Propeller Suction on Wake, 日本造船学会論文集，第 139 号 (1975)
- 12) 佐藤和範； 有効伴流と公称伴流，日本造船技術センター技報，第 4 号 (1976)