

PBCF(Propeller Boss Cap Fins)による
船舶推進性能向上に関する研究

犬 肉 一 之

1988年10月

①

P B C F (Propeller Boss Cap Fins) による

船舶推進性能向上に関する研究

大 内 一 之

1993年10月

目 次

| | |
|---------------------------|----|
| 第1章 緒 言 | 4 |
| 第2章 PBCFの要目と効果 | 7 |
| 2.1 流れの可視化 | 8 |
| 2.1.1 ハブボルテックスの観察 | |
| 2.1.2 ハブボルテックスキャビテーションの観察 | |
| 2.1.3 プロペラボス近傍流れの観察 | |
| 2.2 プロペラ単独性能 | 12 |
| 2.2.1 試験方法（逆POT） | |
| 2.2.2 PBCFによるプロペラ性能の向上 | |
| 2.3 PBCF要目シリーズ試験 | 15 |
| 2.3.1 フィンの大きさの影響 | |
| 2.3.2 フィン取付角度の影響 | |
| 2.3.3 フィン傾斜角の影響 | |
| 2.3.4 フィン枚数の影響 | |
| 2.4 フィンに作用する流体力 | 17 |
| 第3章 PBCFの原理 | 19 |
| 3.1 プロペラ後流場の計測 | 19 |
| 3.1.1 計測方法 | |
| 3.1.2 流速分布の変化 | |
| 3.1.3 流力ピッチ角の変化 | |
| 3.1.4 圧力分布の変化 | |

| | | |
|-------|--------------------|----|
| 3.1.5 | 運動量理論によるスラスト・トルク計算 | |
| 3.2 | PBCFに働くスラスト・トルクの計測 | 26 |
| 3.2.1 | 計測方法 | |
| 3.2.2 | プロペラとPBCFの力の分担 | |
| 3.3 | PBCFの作動メカニズム | 29 |
| 第4章 | PBCF付プロペラの理論計算 | 32 |
| 4.1 | 計算方法 | 32 |
| 4.1.1 | 定式化 | |
| 4.1.2 | プロペラ後流の自由渦の取扱い | |
| 4.1.3 | 数値計算 | |
| 4.2 | 計算結果と実験値との比較 | 38 |
| 第5章 | プロペラピッチ分布とPBCFの効果 | 41 |
| 5.1 | プロペラ性能の計測 | 41 |
| 5.1.1 | 実験方法 | |
| 5.1.2 | 均一流中での計測 | |
| 5.1.3 | 不均一流中での計測 | |
| 5.2 | プロペラ性能の比較 | 44 |
| 5.2.1 | 通増、通減ピッチプロペラと不均一流 | |
| 5.2.2 | PBCFの効果 | |
| 第6章 | 船体と舵を含めた推進性能 | 46 |
| 6.1 | PBCFと舵との相互干渉 | 46 |

| | | |
|---------|-------------------|----|
| 6.1.1 | 舵によるPBCF特性の変化 | |
| 6.1.2 | PBCFによる舵に働く流体力の変化 | |
| 6.2 | 自航試験 | 48 |
| 6.2.1 | 推進効率 | |
| 6.2.2 | 自航要素 | |
| 第7章 | 実船に於ける性能 | 51 |
| 7.1 | 海上試運転解析 | 51 |
| 7.1.1 | 速力試験 | |
| 7.1.2 | 操縦性能 | |
| 7.2 | 実船性能比較 | 52 |
| 7.2.1 | 速力計測比較 | |
| 7.2.2 | 就航実績比較 | |
| 7.3 | 尺度影響 | 54 |
| 第8章 | 結 論 | 57 |
| 謝 辞 | | 59 |
| 参 考 文 献 | | 60 |
| 付 表 | | 64 |
| 付 図 | | 77 |

21世紀に向けて、省エネルギーは単に経済的利益向上の目的だけでなく、地球環境問題、石油・石炭等の有限な化石エネルギーの節約等の観点からも見直され、今まで以上に重要な技術トレンドとなりつつある。特に船舶の推進エネルギー源としては、そのエネルギー密度の高さ及び取扱いの容易性等から現在広範に使用されている石油に代わる適当なエネルギー源が当分実用化されるとは考えにくく、従って船舶に対する省エネルギーの要請及び重要性はとりわけ高まっていくものと考えられる。

船舶の推進性能に大きく影響を与える推進器の効率について考えてみると、現在一部の高速艇及び特殊船、を除き水中スクリュプロペラが最も効率の高い装置としてはほぼ全ての船舶に採用されており、その座はしばらく揺るぎそうにない。スクリュプロペラに関しては昔から数々の改良・工夫が施され、またプロペラの船体・舵とのマッチングについても多くの研究が行われ、プロペラ単独性能に於いても、また船全体としての推進性能に於いてもほぼ極限に近いところまで達していると言う向きもある。しかし、一方では特にプロペラ回りに多様な省エネルギー装置が提案されているのも事実である。このような動向は、ある意味でプロペラに於いてまだ無駄に捨てられているエネルギーがあり、これを回収しようという努力の結果であると思われる。

Fig.1-1 に Van Mannen の図表を示す。¹⁾ これは運動量理論に基づくプロペラの理想効率と現実のスクリュプロペラの効率の比較及びその差(損失)の内訳を縦軸にプロペラ効率 (η_p)、横軸にプロペラ荷重度 (CT)をとって示した図である。この図からプロペラ効率を更に高めるためには以下の項目が有効であることが分かる。

- ① プロペラ荷重度を下げる。
- ② プロペラ後流の旋回流を減らす。
- ③ ブレードの粘性抗力を減らす。

①の例としてはプロペラの大直径化、③の例としては翼型の改良、展開面積比の減少等プロペラそれ自体の変更・改善が主となるが、②の場合は逆にプロペラ前後の付加物や装置として工夫されることが多い。代表的な装置として、二重反転プロペラ(CRP)、²⁾³⁾ グリム・ベーン・ホイール(GVW)、⁴⁾ リアクション・フィン、⁵⁾ 等が提案されており実用化されている。しかし、これらの提案はプロペラ後流全体の旋回流エネルギーの回収を目指しているため、どうしても形状が大きくなり更には可動部分を持つものも多く、大型かつ複雑な装置となってしまうコストパフォーマンスが良いとは言い難い面があり、なかなか広範な普及にまでは至っていない。

さて、プロペラ後流の旋回流のうちでも特に強い旋回流であり、プロペラ軸の延長線上に発生するハブボルテックスについては、プロペラブレード先端より発生するチップボルテックスとともにプロペラから発生する自由渦として昔から良く知られている。⁶⁾ しかし、ハブボルテックスによるプロペラ効率の損失についての研究は、チップボルテックスに関する研究が種々行われているのに対し、⁷⁾⁸⁾⁹⁾ これまで全くないと言っても過言ではなく、またプロペラボス及びボスキャップ付近の流れに関する研究も非常に少ない。ボスを考慮したプロペラ理論計算が可能になってきたのがつい最近のことであり、¹⁰⁾¹¹⁾ ¹²⁾ これまではボスの影響が理論計算上無視されていたこと、及び本論文2.2.1で述べるプロペラ単独試験方法がハブボルテックスを論議するには不適切であったことも、ハブボルテックスによるプロペラ効率の損失に関する研究がほとんどなされなかった大きな原因と考えられる。

筆者は1986年以来、小倉らの提唱したフィン付のプロペラボスキャップに注目し、ハブボルテックスを消去し、このエネルギーを回収してプロペラ効率を高め、しかも簡便でコストパフォーマンスの良い船舶用省エネルギー装置として研究開発及び実用化を行い、¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾²⁷⁾ P B C F (Propeller Boss Cap Fins)と名付けた。そして、1987年9月にP B C Fが初めて大阪商船三井船舶の4,000台積自動車専用船「まあきゅりい・えーす」に実験的に装着されて以来、1993年9月までに200隻以上の実船に採用・装着され新形式の船舶推進用省エネルギー装置として稼動している。

一方、P B C Fの効果に関する確認テストも各方面で行われている様であり、例えば、Pennsylvania State College (米国) や China Ship Scientific Research Centre (中国) 等からは、P B C Fに関する水槽テスト、流場計測等を実施した結果、一定の効果が出ていることが報告されており、¹⁸⁾¹⁹⁾ 世界的にもP B C Fに関してのより一般的な認識が深まりつつある。

本論文は船舶推進のための簡便で実用的な省エネルギー装置という観点から、P B C Fの効果、原理、及びこれを採用した船舶の性能に関しての研究成果をまとめたものである。

第2章 PBCFの要目と効果

PBCFの概念図をFig. 2-1に示す。PBCFはプロペラ後部のボスキャップにプロペラブレードと同一枚数小さなフィンを付加したものであり、プロペラ及び軸系と一緒に同一回転する。従ってPBCF自体はプロペラに対して固定されており、可動部のないシンプルな構造である。

本章ではPBCFの効果及びその要目との関係を模型プロペラ及び模型PBCFを使用して実験的に調査する。実験施設としては特記したもの以外は全て(株)西日本流体技研のNo. 1回流水槽(観測部寸法 長さ: 5.5m、巾2.0m、深さ1.0m、最大流速: 2.0m/s、流速均一性: $\pm 1.5\%$ 以内)を使用した。供試プロペラは直径220mmのMAU断面の一定ピッチの標準プロペラを使用した。その要目を Table 2-1に示す。供試PBCFについてはその要目を Table 2-2に示す。トルク及びスラスト計測器の特性等については Table 2-3に示す。また本章での実験でのプロペラ軸没水深度は300mmとした。

各記号については以下に定義する。

- a : プロペラ翼後縁とフィン前縁のボスキャップ前端部における円周方向の周上距離 (Fig. 2-2 参照)
- b : プロペラ翼後縁とフィン前縁のプロペラ軸方向のボスキャップ表面上の距離 (Fig. 2-2 参照)
- α : フィンの幾何学的ピッチ角 (Fig. 2-2 参照)
- ε : プロペラ翼根部の幾何学的ピッチ角 (Fig. 2-2 参照)
- γ : フィンのプロペラ回転方向への傾斜角 (Fig. 2-15 参照)
- r : PBCFの半径
- R : プロペラの半径

D : プロペラの直径

形状 : Fig. 2-3 に各フィンの実形及びプロペラ軸からの相対高さを示す。

なお点線より下の部分はボスキャップに埋め込まれた部分を示す。

K T : スラスト係数

K Q : トルク係数

η_p : プロペラ効率

$\Delta \eta_p$: プロペラ効率向上率(%)

$$\{\eta_p(\text{with PBCF})/\eta_p(\text{without PBCF})-1\} \times 100$$

J : 前進係数 $J = V_a/(n \cdot D)$

V_a : プロペラ前進速度

n : プロペラ回転速度

2.1 流れの可視化

PBCFの有無によりハブボルテックス及びボスキャップ近傍の流れがどのような変化をしているかを調べる。本章で述べる実験のセットアップについては2.2.1で詳しく述べるが、Fig. 2-10の下図に示す様にプロペラ駆動軸をプロペラ上流側に配置しており、プロペラボス後部の流れの様子が見易いものとした。

2.1.1 ハブボルテックスの観察

染料注入法²⁰⁾によるプロペラボスの後部の流れの可視化写真をFig. 2-4に示す。この時の模型プロペラはMAU型の標準プロペラでピッチ比が1.2のCP26 (Table 2-1参照)を使用し、PBCFはCP26-1(Table 2-2参照)を使用し、 $n=3.0\text{rps}$ 、 $J=0.8$ として実験を行った。なおレイノルズ数 ($Re=nD^2$)

／ μ 、 n ：プロペラ回転数、 D ：プロペラ直径、 μ ：水の動粘性係数）は約 2×10^5 である。

Fig. 2-4 から分かるように、同じ量の染料をプロペラボスキャップに注入すると、PBCF無しの場合はボスキャップ後端から発生しているハブボルテックスの中心の圧力の低い部分に染料が集中しており、強い渦の存在を示しているのに対して、PBCF有の場合は、ハブボルテックスが弱まっているため圧力差もなく、染料もぼやけて拡散しているのが分かる。

気泡注入法²⁰による可視化写真をFig. 2-5に示す。この時の模型プロペラはピッチ比1.0のMAU型標準プロペラCP25 (Table 2-1参照)を使用し、PBCFはCP25-1 (Table 2-2参照)を使用した。また $n=7.5\text{rps}$ 、 $J=0.7$ として実験を行い、レイノルズ数は約 4×10^5 である。

Fig. 2-5もPBCFの有無によるハブボルテックスの強弱をよく表しており、PBCF無しの場合は、気泡の列がプロペラ回転軸上のハブボルテックスの中心にかなり後方まで一直線に連なっているのに対し、PBCF付きの場合はボスキャップ後端に気泡を注入しても、気泡はすぐに拡散浮上してしまいボスキャップ後部に気泡の列は出ていない。

以上の実験から、適当な取付位置、角度、形状のフィンをもつPBCFをプロペラの後部に組み合わせることにより、ハブボルテックスを相当弱めることが出来ることが定性的に確認出来た。

2. 1. 2 ハブボルテックスキャビテーションの観察

2. 1. 1の実験はいわゆるノンキャビテーション状態での実験であるが、実船のプロペラはある程度のキャビテーションが発生した状態で作動しているのが普通である。ここでは、第3. 4. 6. 7章で供試プロペラとして使用している“まあ

きゅりい・えす”のプロペラ及びPBCFの模型 (Table 3-1参照) を使用してハブボルテックスキャビテーションの観察を行った。実験は東京大学工学部船舶海洋工学科のキャビテーションタンネル(観察部寸法 $L \times B \times D$: $3.0 \times 0.45 \times 0.45$ m) にて行った。²¹⁾ プロペラ回転数は30rpsとし、KTは0.20 ($J \approx 0.62$)として、プロペラ回転数とストロボ照明を同期させ、キャビテーションの可視化を行った。

Fig. 2-6に実船での通常の使用状態に近いキャビテーション数 σ_n ($\sigma_n = 2$) ($(P_o - e) / \rho n^2 D^2$, ここで P_o : テストセクション静圧、 e : 流体の蒸気圧、 ρ : 流体の密度) が1.88に於けるプロペラ後流キャビテーションの状態写真を示す。PBCFの装着により従来型プロペラで発生しているハブボルテックスキャビテーションが全く消えているのがわかる。

更に Fig. 2-7にはタンネル内を更に減圧し ($\sigma_n = 1.0$) キャビテーションが起りやすくした状態に於ける写真を示す。チップボルテックスキャビテーションは、ここではつぶれて雲状になっているが、PBCFの有無により大きな差は認められないのに対し、ハブボルテックスはPBCFにより完全に消去されているのが分かる。(注: Fig. 2-6, 2-7 でボスキャップ後部のプロペラ軸よりやや上に写っている白い棒の様なものは計器であり、キャビテーションではない)。一方、チップボルテックスキャビテーションは、PBCFの有無で、全く同じ様に発生しており、変化は認められない。

以上の結果よりPBCFがプロペラボス後部の流れを変化させ、ハブボルテックスキャビテーションを消去する効果のある事が確認された。

2.1.3 プロペラボス近傍流れの観察

PBCFの要目を決定するには、ハブボルテックスが生成されるまでの流れ、

つまりプロペラ翼根部後縁からボスキャップ近傍を経てボスキャップ後方へ至る流れの様子につき詳細に観察する必要がある。ここではボスキャップに6本のタフトを取りつけ、タフト法により、プロペラ回転数とストロボ照明を同期させてボスキャップ近傍の流れを観察した。タフトの取付けは Fig. 2-8 に示す様にボスキャップの表面に近い流れを見るために、表面から 3mm 離れた位置に3本のタフト（以下 Surface Tuft という）を取付け、PBCFの最大半径よりも若干外側の位置の流れを見るために、表面より10mm離れた位置に同じく3本のタフト（以下 Depth Tuft という）を取付け、各々の方向を観察した。この時の可視化写真をFig. 2-9 に示す。模型プロペラは Table 2-1のCP26を使用し、PBCFは Table 2-2のCP26-1を使用した。

Fig. 2-9 はプロペラ後部から見て時計回り回転のプロペラを左舷側より見た写真である。Fig. 2-9 のPBCFなしの写真から分かるように Surface Tuft は、PBCFなしの場合は、ボスキャップ表面をプロペラの回転方向に向かって回り込んで流れており、ボスキャップ付近の流れはボスキャップの回転速度よりも早い回転速度成分を持っていることがわかる。この流れがボスキャップ後端でまとまり、強いハブボルテックスを生成させていると考えられる。一方PBCF付の写真をみると、Surface Tuft はフィンによって仕切られているため、回り込みは見られずほぼフィンに沿って真っ直ぐな流れに整流されてボスキャップ後方へ抜けている。この流れの角度から、PBCFの有る場合のボスキャップ付近の流れは、ボスキャップの回転速度よりも遅い回転速度成分を持つ流れであることがわかる。従って、このような流れからは強いハブボルテックスは生成されていないと思われる。

ボスキャップ表面より10mm離れた位置の Depth Tuft は、PBCFの有無で、プロペラから流出して来る流れの角度に若干の違いはあるものの、さほど違っ

た流れとはなっておらず、両方ともほぼプロペラピッチ面に近い角度へ真っ直ぐに流れている。つまり、PBCFの最大外径より外側の流れはボス付近の流れに比べてそれ程大きな変化がないことがわかる。

以上より、PBCFはボスキャップ表面付近の流れの方向を大きく変化させており、ボスキャップ表面付近のプロペラ回転方向へ回り込んでいる強い旋回成分を持った流れを、フィンに沿った流れに整流することにより、ハブボルテックスを大巾に弱めていることが認められた。

2.2 プロペラ単独性能

流れの可視化実験の結果からPBCFがボスキャップ近傍及びプロペラ後流場に変化をもたらし、ハブボルテックスを大巾に弱めていることが確認されたので、ここではPBCFによる流場の変化が定量的にどれだけのプロペラ効率向上につながるかを調べるためにプロペラ単独性能試験を行い、スラスト・トルクを計測しプロペラ単独性能の比較を行う。

2.2.1 試験方法（逆POT）

均一流中でのプロペラ単独性能を計測するために現在一般に行われているプロペラオープンテスト（POT）は、Fig. 2-10 の上図に示す様にトルク・スラスト計、プロペラ駆動機構などを内蔵したプロペラオープンテストボートを供試プロペラの下流側に配置し、プロペラには乱れのない様流が流れ込むようにアレンジされている。しかし、この方法ではプロペラを回転させるための駆動軸をボスキャップの後端から突っ込んでいるので、2.1で観察したハブボルテックスが発生する場所に駆動軸が位置してしまい、ハブボルテックスの

強弱を問題にしているPBCFの効果の定量的計測には、適当な計測方法とは言えないと考えられる。実際に通常のPOTでの計測ではPBCFによる効率向上はほとんど認められていない。

そのため、PBCFの本来の効果を計測するための装置として、Fig. 2-10の下図に示す様なテストポートおよび駆動シャフトを供試プロペラの上流に配置し、プロペラボスキャップ後方には障害物がなく、ハブボルテックスの有無が充分に対比出来るアレンジの実験装置を採用する。ただしこの装置では上流にテストポートがあるため、プロペラに流入する流れは弱いものではあるが伴流となり、一様流ではなくなる。Fig. 5-4 に本装置におけるテストポートによる伴流分布と平均伴流率 W_n を示す。しかし本装置の様に $W_n=0.05$ 程度であれば、代表流速としてテストポート上流の一様流の流速を利用しても、計測結果をPBCFの有無の比較のための相対的な差として使用するのであれば、この方法が充分精度もあり、PBCFの計測に適していると考えられる。以下本方法を“逆POT”と呼ぶこととし、PBCFによるプロペラ単独性能計測に使用する。

なお、本節で行った逆POTは回転数が6~9 rps、レイノルズ数は約 4×10^5 、プロペラ軸没水深度は300mmとして実施した。

2.2.2 PBCFによるプロペラ性能の向上

逆POT装置を使用して、Table 2-1 および Fig. 2-1 に示したMAU型標準模型プロペラおよびボスキャップについて、PBCFの有無での実験を行い、種々のPBCFによるプロペラ単独効率の変化を計測した。

供試PBCFの要目を決定するに当たり、重要と思われるパラメーター、すなわち

- ① フィンの形状
- ② PBCF直径のプロペラ直径に対する比 (r/R)
- ③ フィンの前縁のプロペラブレード後縁に対する取付位置 (a, b)
- ④ フィンの取付角度 (α)

をそれぞれ、種々変化させたPBCFを作製し実験を行った。ただし、フィン枚数はプロペラ翼数と同じ4枚とし、3.3で述べるフィン傾斜 (γ) は 0° とした。またフィンは厚さが1mmの塩化ビニール製のものを使用し、エッジはスムーズに丸めた。

Table 2-2にCP 24, 25, 26のMAU型各標準プロペラに種々の要目のPBCFを組合わせて最も効率が向上したPBCFの要目について示した。評価に使用した $\Delta \eta_p$ は、それぞれのピッチ比のプロペラにおいて、通常のプロペラ設計点付近の前進係数 (J) における $\Delta \eta_p$ の値とした。

これらのデータのうち最も $\Delta \eta_p$ が大きいCP26-1 についてのプロペラ単独性能曲線をFig. 2-11に示す。この実験では、PBCF有りの場合KQが減少し、KTが増加し、結果として η_p も増加するという形になっている。他のデータを見ても、効率向上の顕著なものは、数値の大小はあるものの、例外なくこの傾向を示している。

Table 2-2のデータおよびその他の逆POT計測データを整理、分析してみると以下のことがいえる。

- ① MAU型の標準プロペラ(一定ピッチ) に於いてピッチ比1.2のもの(CP26)で $\Delta \eta_p$ が約7%と最大の値が得られ、0.8、1.0のピッチ比のもの(PC24, 25)では約4%程度の $\Delta \eta_p$ が得られPBCFにより有意なプロペラ効率改善が得られた。

- ② r/R は0.20~0.25程度のものがよい。
- ③ プロペラ翼根部の幾何学的ピッチ角 ε (Fig. 2-2参照)と大体同じようなピッチ角を持つフィン、すなわち $\alpha - \varepsilon$ が0付近のものがよい。
- ④ フィンの前縁の位置は、プロペラの各翼根部のノーズテイルラインを後部に延長した直線上から多少プロペラ回転側にずれた位置がよい。
- ⑤ PBCFは同じ前進係数において、ほぼ例外なくプロペラのトルクを減らし、スラストを増やす効果が認められた。

またPBCFによるプロペラ単独性能の向上については、第1章にも述べた様に、筆者らの実験以外に Gearhartら¹⁸⁾ や Zhangら¹⁹⁾ などによっても確認試験が行われており、効率向上が報告されている。これらの文献によればそれぞれ4~5%、4%の単独効率向上があったとされている。

2.3 PBCF要目シリーズ試験

前節での実験計測によりプロペラ効率改善率の高いPBCFの要目(r/R 、 α 、 a 、 b)について大まかな値をつかんだが、ここでは更にこれらの要目を変化させるシリーズテストを行い、PBCFの要目を変化させた時のプロペラ効率の変化特性について調べ、最適なPBCFの要目についての調査を行う。

2.3.1 フィンの大きさ(r/R)の影響

Fig. 2-3に示す形状(大きさ)のフィンを使って r/R シリーズテストを行い、Fig. 2-12にその結果を示す。実験に使用したプロペラはCP26 (Table 2-1参照)であり、PBCFはCP26-1 (Table 2-2参照)と同じ要目で、フィンの大きさ(r/R)のみを変化させた。

この結果から、PBCFの直径は、 r/R で表すと0.18~0.33（ボス径に
対する比で表すと1.0~1.8倍）の範囲で効率が向上し、 r/R が0.25（ボス径に
対する比で1.4倍の直径）付近に効率向上の極大値があることが認められる。

2.3.2 フィン取付角度（ α ）の影響

CP26（Table 2-1参照）を使用し、PBCFはCP26-1（Table 2-2参照）
と同じ要目で、 α のみを変化させたときの $\Delta\eta_p$ の変化を Fig. 2-13に示す。
この結果により α の値は、 $\alpha - \varepsilon$ が $-20 \sim +30^\circ$ の範囲で効率が向上し $\alpha - \varepsilon$
がほぼ 0° 付近で効率向上の極大値があることが認められる。また、CP24で
もほぼ同様な $\alpha - \varepsilon$ の範囲で効果のあることを確認した。

2.3.3 フィン傾斜角（ γ ）の影響

これまでのPBCFは、フィンの図心がボスキャップ表面の法線上を通るも
のとしてPBCFの製作を行っていたが、ここでは Fig. 2-14 に示すように、
フィン前縁と後縁を結ぶ直線を軸にして、プロペラ回転方向に $\pm 30^\circ$ の傾斜角
（ γ ）をつけて実験を行った。プロペラはCP24（Table 2-1参照）を使用し、
PBCFはCP24-1（Table 2-2参照）の要目のものとした。結果を Fig. 2-15
に示す。ここで $J_{\max\eta}$ は η が最大になる時の J の値とし、常用作動点は
 $J/J_{\max\eta}$ が0.8~0.9程度となる。この結果から、フィンの傾斜をプロペラ回転
方向と反対側につけることにより、 J の変化による $\Delta\eta_p$ の特性を変えること
が出来、常用作動点での $\Delta\eta_p$ の改善を計ることが可能である。また、プロペラ
回転方向側に傾斜をつけると $\Delta\eta_p$ は減少する傾向があることが認められた。

2.3.4 フィン枚数の影響

これまでの、プロペラ翼数とフィン枚数が同じPBCFで実験を行って来たが、ここでは Fig. 2-16に示すようにプロペラ翼数に対して、フィン枚数を種々変化させて実験を行った。使用したプロペラはCP24 (Table 2-1参照)、PBCFはCP24-2 (Table 2-2) のものであるが、 a 、 b の値は、翼数とフィン枚数が違うので、基準点のみでの値である。

横軸に $J/J_{max\eta}$ をとった効率向上率をFig. 2-17に示す。この結果より、4翼のプロペラに対しては4枚のPBCFが、2、3、5枚のPBCFに比べ、 J の如何を問わず効率が高いことがわかる。

2.4 フィンに作用する流体力

PBCFを実船に適用するためには、フィンにかかる力を推定し、実物の強度を決定する必要がある。そのため、模型プロペラの後部に、根元部に歪ゲージを貼り付けたリン青銅板のフィンをもつPBCFを組み合わせ、フィンの根元にかかる応力の計測を行った。試験装置は逆POTと同じプロペラオープンテストボートの配置とし、歪ゲージからの信号はテストボートに内蔵されたスリップリングを介して取り出され、処理される。供試プロペラおよびPBCFの要目は Table 2-4に示し、計測の結果を Fig. 2-18に示す。ここで縦軸のForce は歪ゲージで計測された応力に相当するフィンの先端にかかる集中荷重を表し、フィンの面に直角な力とし、プロペラ回転方向側に作用する力を負とする。

この結果で興味深いのは、船舶での通常の使用状態である船が前進状態でプロペラが正転している場合 ($V_a > 0$, $n > 0$, (第1象限)) におけるフィ

ンに作用する力は、プロペラ回転方向側に働いているという事実である。このことは言い換えればフィンにかかる力はプロペラブレードにかかる力とは逆方向ということである。フィンにかかるこのプロペラと逆方向の力をスラストとトルクに分解するとFig. 2-19の様になり、フィンにはプロペラ回転方向のトルクがかかり、PBCFも含めたプロペラ全体に働くトルクを減少させることに寄与している。またフィンには同様に負のスラストもかかっており、抵抗も増加することが推測出来る。

以上よりPBCFはプロペラと逆方向にトルクとスラストを発生しており、PBCFと形状が似かよっていると思われるいわゆるタンデムプロペラとは全く異なったコンセプトの装置であり、プロペラ後流に対して、水車又はタービンに近い作用をしていることがわかる。

更に Fig. 2-18 より、フィンに最も大きな流体力が掛かる状態をみてみると、 $V_a = 0$ 、 $n < 0$ のとき、つまり船が静止してプロペラを逆転させている時である。またフィンにかかる力の方向をみてみるとFig. 2-18のグラフの第2象限の一部の場合を除き、プロペラ正転・逆転にかかわらず、フィンはプロペラ回転方向に流体力を受けることがわかる。

このことからプロペラ正転時にはPBCFは水車又はタービンの様な働きをしているが、逆転時にはPBCFは後進方向にプロペラとして働いていることが理解出来る。

第3章 PBCFの原理

第2章では、PBCFがもたらすスラスト・トルクといった“力”をベースにした効果を、プロペラとPBCFを組合せたシステムとして定量的に明らかにした。本章ではこれに続いてプロペラ後流場の計測、プロペラ及びPBCFの各々独立したスラスト・トルク計測等を行い、PBCFの原理・効果についてより細かく分析し、流体力学的な作動メカニズムを考察する。

3.1 プロペラ後流場の計測

プロペラ後流場の計測は古くから多くの研究者達によって行われている。²²⁾ 23)24)25)26) しかし本論文の様にプロペラボス部に注目した後流計測は現在まで殆んど見られないようである。

2.1で述べた可視化実験では、PBCFによりハブボルテックスが弱められていることが定量的に確認された。ここでは更にプロペラ後流の流場がPBCFによりどの様に変化するのかを定量的に把握するために、プロペラ後流の流速を3次元の各成分に分けて同時計測する。また、これらの流場の変化がプロペラ特性にどのような影響を与えるかについて、運動量理論を用いて考察を行う。

座標及び記号を以下及び Fig. 3-1の様に定義する。

X, Y, Z: 空間に固定された直交座標で、プロペラ軸方向をX軸、上下方向をY軸、左右方向をZ軸とし、Fig. 3-1に示す矢印方向を正とする。原点Oはプロペラ軸と Blade Generator Line の交点とする。

r 、 θ 、 X : 原点と X 軸を上記の直交座標と共有する空間に固定された円筒座標で、半径方向を r 、円周方向を θ で表し、Fig. 3-1に示す矢印方向を正とする。

R 及び D : プロペラの半径及び直径

V_a : プロペラ流入速度

V_x : 流速のプロペラ軸方向成分

V_θ : 流速のプロペラ円周方向成分

V_r : 流速のプロペラ半径方向成分

3.1.1 計測方法

供試模型プロペラ及びPBCFについては第6、7章で述べる実船試験用供試船“まあきゅりー・えーす”のプロペラに対応する模型プロペラを使用した。その要目および模型PBCFの要目についてはTable3-1に示す。実験装置内に取付けられた供試模型の写真をFig. 3-2に示す。

本計測にはオランダにあるMARIN (Maritime Research Institute Netherlands) の大型キャビテーションタンネル (観測部寸法: $L \times B \times D = 4.0 \times 0.9 \times 0.9\text{m}$) を使用し、流速の計測装置としては DANTEC 社の 3D-LDV (3 Dimensional Laser Doppler Velocimeter) を用いた。本LDVは同時に3軸方向の流速成分が計測可能な5ビーム、2カラー方式であり、4ワットのアルゴンイオンレーザーを使用している。グリーンビームは+70MHzと-40MHzとで分離され2方向の流速計測が可能であり、ブルービームは70MHzで分離されている。計測範囲は $0.2 \times 0.2 \times 0.7\text{mm}$ であり、データ処理はBurst Spectrum 解析法によっている。

計測はFig. 3-3に示す様に、2.1.1で述べた“逆POT”方式で行った。すな

わち、駆動用のポットをプロベラ前方に配置し、ポットを支えるストラットは観測部の横から挿入した。3D-LDVは観測部上部の補助タンク内に配置し流速計測を行った。

計測位置については、プロベラはほぼ均一流中で作動しているものと考え、プロベラ後流のプロベラ軸を含む水平面の、 $X-Z$ 平面のみ計測した。

Fig. 3-4に示す様に、 Z 方向に Z/R (r/R) が $+1.0$ から -0.27 までの48点 (3mm間隔) の流速の3成分を計測し、この計測を X 方向に X/D が 0.273 から 1.273 までの間で6カ所行った。なお、ボスキャップ後端の位置は、 $X/D=0.22$ の位置にある。

プロベラ回転数 n は15rpsとし、前進係数 J ($J=V_a/nD$) については、本プロベラの設計作動点付近の $J=0.7$ 及び、より荷重度の高い $J=0.3$ の2ケースにつき計測を行った。

3.1.2 流速分布の変化

3.1.1に示した方法で計測したプロベラ後流の流速について、 $J=0.7$ の場合の流速ベクトルをPBCFの有無に分けてFig. 3-4~Fig. 3-7に示す。ここで、

Fig. 3-4: V_x , V_θ , V_r の合成ベクトルの3次元表示。

Fig. 3-5: V_x , V_r の合成ベクトルの2次元表示。

Fig. 3-6: V_r , V_θ の合成ベクトルの2次元表示。

Fig. 3-7: V_x , V_θ の合成ベクトルの2次元表示。

次に流速の各成分 V_x , V_θ , V_r を V_a で除して無次元化した V_x^* , V_θ^* , V_r^* につき、プロベラ直後の $X/D=0.273$ と、充分遠い $X/D=1.273$ の2断面に於ける分布を、PBCFの有無の両ケースについて、Fig. 3-8に示す。更にPBCF有の場合から無の場合を差引いた流速の差

ΔV_x^* , ΔV_θ^* , ΔV_r^* について Fig. 3-9 に示す。

Fig. 3-4~3-9 の結果より、 r/R が 0.3 より小さい範囲で PBCF の有無によられると思われる大きな流場の変化が認められる。逆に、 r/R が 0.3 より大きい範囲では殆ど差は出でおらず、計測誤差等も考慮すれば流場の変化はないと考えられるのが妥当であろう。これは PBCF の直径とプロペラ直径の比が 0.28 であることとよく対応しており、 r/R が 0.3 付近より外側つまり PBCF の直径より外側では PBCF の直接的な影響による流場の変化はないと考えられる。この傾向は $J=0.3$ での計測結果でも同じ様に出て来ている。

以下に各成分毎に $r/R < 0.3$ での PBCF の有無によるプロペラ後流の流場の相違及び特徴を列記する。

① PBCF 有の場合、プロペラ直後 ($X/D=0.273$) での V_x は PBCF 無に比べて小さいが (Fig. 3-5, 3-8, 3-9 参照)、後流側に行くに従って加速され $X/D=1.273$ の位置では V_x は PBCF 無の場合と比べて明らかに大きくなっており (Fig. 3-5, 3-8, 3-9 参照)、しかも $V_x^* = V_x / V_a$ が 1.0 を越す値まで加速が行われている。(Fig. 3-8 参照)。

以上の V_x の増加から、PBCF がスラストの増加に寄与していることが分かる。

② V_θ に関しては、PBCF 有の場合プロペラ直後 ($X/D=0.273$) では $r/R < 0.12$ の範囲でプロペラ回転方向と逆向きの旋回流となっている (Fig. 3-6, 3-8 参照)。この逆向きの旋回流は後流側に行くに従って弱まっていき X/D が 0.5 を越えるとプロペラ回転方向と同じ向きに戻るが (Fig. 3-6 参照)、 V_θ の値は $X/D=1.273$ の位置でも PBCF 無の場合に比べて相当小さくなっている (Fig. 3-6, 3-8, 3-9 参照)。

以上により、PBCF がプロペラ後流の旋回流を弱め、トルクの軽減に寄与

していることが分かる。

- ③ V_r に関しては、PBCF無の場合 $X/D=0.4$ 程度より小さな位置で r/R の全範囲にわたって若干内側への流速を持ち、プロペラ後流の縮流現象がみられるが (Fig. 3-5, 3-8 参照)、PBCF有の場合は $r/R < 0.3$ の範囲で内側への流速はほとんどないため、 ΔV_r^* の値が正となる傾向が見られる (Fig. 3-5, 3-8, 3-9 参照)。

以上の特徴は $J=0.7$ での計測結果より考察したものであるが、 $J=0.3$ の場合についても①、②については全く同じ傾向が出て来ている。③については $J=0.3$ の場合 ΔV_r^* はほぼ 0 に近い値であり、 $J=0.7$ の時はどの差は出ていない。

3.1.3 流力ピッチ角の変化

計測したデータを用いて PBCF の有無によるプロペラ後流の流力ピッチ角の比較を行う。流力ピッチ角 β は次式で与えられる。

$$\tan \beta = \frac{V_x}{\omega r - V_\theta} \quad (3.1)$$

ここで、 ω : プロペラ回転角速度

Fig. 3-10 に各位置での流力ピッチ角を PBCF の有無に分けて示す。

$\beta=90^\circ$ のときプロペラ回転速度 ωr と V_θ が等しくなるが、PBCF無の場合 $r/R < 0.15$ の範囲で V_θ が ωr より大きくなり、旋回流成分がプロペラ回転速度よりも速くなり、強いハボルテックスの存在を示している。またこの旋回流は後流側 ($X/D=1.273$ の位置) でも減衰せずに残っていることが分かる。一方、PBCF有の場合は r/R 全ての範囲で $\beta < 90^\circ$ であり、旋回流成分はプロペラ回転速度より遅くなっていることが分かる。また $r/R < 0.$

25の範囲では、プロペラ直後より $X/D=0.7$ までは流力ビッチが急激に変化しているが $X>0.7$ ではほぼ一定の値となっている。

PBCF半径に相当する $r/R=0.28$ より外側では、PBCFの有無により β の値は殆ど変化を示していない。

3.1.4 圧力分布の変化

計測した流速データを用いて、PBCFの有無によるプロペラ後流での圧力分布を調べる。ここでは $V_r=0$ として半径方向の均合いの式を用いて、3.1.2に示した V_θ の計測結果からプロペラ後流の圧力分布 C_p を近似的に計算した。ここで $C_p=2(P-P_o)/\rho V_a$ 、 P ：任意の点の静圧、 P_o ：テストセクションの静圧、 ρ ：流体の密度、 V_a ：プロペラ流入速度とする。プロペラ後流の $X/D=0.273$ 及び $X/D=1.023$ の位置に於ける圧力分布について、横軸に r/R をとりFig. 3-11に示す。

この結果より、PBCF無しの際は、特にボスキャップ直後に於て軸中心に強い負圧が形成されているが、PBCFによりこの負圧はほぼ0に近いところまで回復しており、この傾向はかなり下流に於ても続いている。このことから、PBCFは従来のプロペラでは抵抗として働いている軸中心部の負圧域を解消しており、この圧力差は、ボスキャップを通してPBCFによるスラストの増加につながるものと考えられる。

3.1.5 運動量理論によるスラスト・トルク計算

3.1.2で計測したプロペラ後流の速度から、プロペラ運動量理論を用いて、PBCFによりどの程度のスラスト・トルクの変化が生じているかの計算を行う。プロペラ運動量理論によると、 V_x 、 V_θ をプロペラから充分遠い位置

での速度とし、プロペラの発生するスラストを T 、トルクを Q 、流体の密度を ρ とすれば、

$$T = 2\pi\rho \int_0^R r V_1 (V_x - V_a) dr \quad (3.2)$$

$$Q = 2\pi\rho \int_0^R r^2 V_1 V_\theta dr \quad (3.3)$$

$$\text{ここで } V_1 = (V_x + V_a) / 2 \quad (3.4)$$

と表すことが出来る。

PBCFによる T 及び Q の増加量をそれぞれ ΔT 、 ΔQ とし、 V_x 、 V_θ についてはFig. 3-8に示した $X/D=1.273$ での計測値を使い、(3.2)、(3.3)、(3-4)式により数値的に積分を行う。但し積分範囲についてはPBCFの有無による有意差が認められる範囲とした。即ち、PBCF半径より充分大きい r の位置では、PBCFによる流速差はないとした。

プロペラ効率を η_p 、PBCFによる効率増加を $\Delta\eta_p$ とすると、次の結果が得られた。

$J=0.7$ の場合

$$\Delta T/T \times 100 = +0.9(\%)$$

$$\Delta Q/Q \times 100 = -1.6(\%)$$

$$\Delta\eta_p/\eta_p \times 100 = +2.3(\%)$$

$J=0.3$ の場合

$$\Delta T/T \times 100 = +0.4(\%)$$

$$\Delta Q/Q \times 100 = -0.7(\%)$$

$$\Delta\eta_p/\eta_p \times 100 = +1.1(\%)$$

ここで、 $\eta_p = TV_a / 2\pi nQ$

$$1 + \Delta \eta_p / \eta_p = (1 + \Delta T / T) / (1 + \Delta Q / Q)$$

T 、 Q 、 η_p はPBCFが無い場合のスラスト、トルク、プロペラ効率を示す。

以上の結果を3.2に述べる曳航水槽における逆POTでのプロペラ単独性能の計測値の上にプロットするとFig. 3-12の様になり、オーダー的に実験値と大きくは違っておらず、運動量理論による計算結果からもPBCFにより有意な効率向上が得られている事が確認された。

3.2 PBCFに働くスラスト・トルクの計測

2.4に於いてプロペラと組合わされて作動しているPBCFのフィンの根元の応力を計測し、フィンはプロペラ回転方向へ流体力を受けることを定性的に確認したが、ここでは更に、PBCFそれ自体が受けるスラスト及びトルクを定量的に計測し、プロペラ全体のストローク及びトルクとの比較を行う。更に、この結果からPBCFがプロペラ本体に与える干渉、及びプロペラとPBCFのスラスト・トルクにおける力の分担についての考察を行う。

3.2.1 計測方法

本実験も3.1と同じMARINで行った。PBCF又は通常のボスキャップにかかるスラスト・トルク計測は3.1で述べた大型キャビテーショントンネルでFig. 3-2, 3-3と同様な配置にて行ったが、ここではボスキャップのみに働く力を計測するため、ボスキャップをプロペラ本体から独立させ、ボスキャップに働くスラスト・トルクを、プロペラ本体と分離されたボス内部のシャフト

に取付けた高感度の検力計により計測した。本検力計の略図を Fig. 3-13に示す。

一方、プロペラにPBCF又は通常のボスキャップを組合せた状態での全体のスラスト・トルクについては、曳航水槽（長さ×巾×深さ：250×10.5×5.5 m）に於いて、同様な「逆POT方式」のセットアップで計測した。

3. 2. 2 プロペラとPBCFの力の分担

Fig. 3-14に計測されたプロペラとPBCF又は通常のボスキャップを組合せた全体のスラスト係数 KT ($KT = T / \rho n^2 D^4$) 及びトルク係数 KQ ($KQ = Q / \rho n^2 D^5$) を示す。Fig. 3-15にはPBCF又は通常のボスキャップに働くスラスト係数 KT_c ($KT_c = T_c / \rho n^2 D^4$) 及びトルク係数 KQ_c ($KQ_c = Q_c / \rho n^2 D^5$) を示す。但し T_c 、 Q_c はそれぞれPBCF又は通常のボスキャップに働くスラスト及びトルクとする。またここでの D の値は主プロペラのものとする。

ここでプロペラ自体に働くスラスト係数を KT_p ($KT_p = T_p / \rho n^2 D^4$)、トルク係数を KQ_p ($KQ_p = Q_p / \rho n^2 D^5$) とすると(T_p 、 Q_p はそれぞれプロペラ本体に働くスラスト及びトルクとする)、下式が成り立つ。

$$KT = KT_p + KT_c \quad (3.5)$$

$$KQ = KQ_p + KQ_c \quad (3.6)$$

(3-5)、(3-6)式を基にPBCFの有無での KT_p 、 KQ_p の値をFig. 3-14及び3-15に示した計測結果より求め、 KT 及び KQ の量を100.0として各スラスト・トルク係数を指数で表示した量を、設計作動点 $J=0.7$ の場合及びプロペラ荷重の高い $J=0.3$ の場合について Table 3-3に示す。

これらの結果より以下の事が言える。

- ① プロペラにPBCFを組合せることによって、全体としてスラストが0.6～0.9%増大し、トルクが1.3～1.5%減少した結果、プロペラ単独効率として2.2%程度の効率向上が確認された。
- ② ボスキャップのみに働く力をみると、従来型ボスキャップに於てはトルクはほぼ0であるが、スラストは負の方向に若干量(0.2%)発生しており、ボスキャップに働く抵抗があることを示している。
- この抵抗は3.1.4で述べたハブボルテックスが造るボスキャップ後部の低圧部に起因するものと考えられる。
- ③ PBCFに働く力をみると、スラストに関しては従来型ボスキャップに比べて殆んど変化はなく、やはり若干の抵抗がある。しかし、トルクに関しては負の方向(プロペラ回転方向)に1.0～1.4%程度働いており、PBCF自体の発生するトルクがプロペラ全体のトルクの軽減に役立っている。
- ④ プロペラ本体のみに働く力に関しては、PBCF取付時はスラストが0.6～0.8%増加し、トルクに関しても0.1～0.3%減少しており、PBCFによるプロペラ本体への干渉効果が認められる。

以上の知見から、PBCFはそれ自体がトルクを軽減する様な力を発生していると共に、プロペラ本体のスラストを増大、トルクを減少させる干渉効果のあることが確認された。そしてこれらの総和が最終的にプロペラ全体のスラストの増大及びトルクの減少につながっていると考えられる。次節ではそのメカニズムについて考察する。

3.3 PBCFの作動メカニズム

これまでの実験等から、PBCFの主たる効果として以下のものが挙げられる。

- ① ハブボルテックスの消去
- ② トルクの軽減
- ③ スラストの増大

これらの三つの効果はPBCFのどのような働きによって起こるのだろうか。ここでもう一度ボスキャップ付近の流場を考えるため 2.1.3の 流れの可視化写真に注目すると、PBCF無しの場合はタフトはプロペラ回転方向へ回り込む様な流れとなっているのに対し、PBCF有の場合はPBCFに沿った流れに整流されており、またプロペラ後縁部より出て来る流れの角度も大きく変化していることが分かる。また、3.1.3の Fig3-10に示したPBCFの有無によるボスキャップ後部での流場の大きな変化、つまりPBCF無しの時 120° 以上あった流力のピッチ角 β が、PBCFの装着により 90° 以下に減少していることも考え合わせてPBCFによるプロペラ翼根部の流場の変化を以下考察する。

Fig. 3-16に、これまでの実験結果を総合したプロペラとPBCF回りの流れ場及びプロペラブレード、PBCF、ボスに働く流体力を模式的に示す。

ここで、

T, Q ; トータルのスラスト及びトルク、

T_p, Q_p ; プロペラブレードの発生するスラスト及びトルク、

T_F, Q_F ; PBCFの発生するスラスト及びトルク、

T_B ; ボスに発生するスラスト

とし、添字0はPBCF無し、添字1はPBCF有りを表す。符号はスラストについては進行方向を正、トルクについてはプロペラ回転の逆方向（後方から

みて反時計回り)を正とする。またFig. 3-16はプロペラボスの上に乗って流れを見ている図である。

PBCF無しの場合、ブレード根本部から出た流れはボスキャップ付近で強い吹きおろし(ダウン・ウォッシュ:翼から出る流れが翼の圧力面側に曲げられる現象)となつて、ボスキャップの回転速度よりも速い旋回流($\beta > 90^\circ$ の流れ)を形成し、これが各翼重なり合つてボスキャップの後部に強いハブボルテックスを発生させる。これに対して、PBCF有りの場合は強い吹きおろしは現れず、ほぼPBCFのピッチ角に沿つた流れとなり、旋回流もボスキャップの回転速度より遅くなり($\beta < 90^\circ$)、強いハブボルテックスは消滅する。

このとき、ブレード、PBCF及びボスに発生する力は以下の様になる。
スラストの変化を ΔT とすると

$$\begin{aligned}\Delta T &= T_1 - T_0 \\ &= (T_{p1} + T_F + T_{B1}) - (T_{p0} + T_{B0}) \\ &= (T_{p1} - T_{p0}) + T_F + (T_{B1} - T_{B0})\end{aligned}$$

ここで、 $\Delta T_p = T_{p1} - T_{p0}$, $\Delta T_B = T_{B1} - T_{B0}$ とすると

$$\Delta T = \Delta T_p + T_F + \Delta T_B \quad (3.7)$$

(3.7)式において、これまでの実験結果をあてはめると

$\Delta T_B > 0$: ハブボルテックス低圧部によるボスキャップに働く抵抗が

PBCFにより減少。(3.1.4及び3.2.2参照)

$T_F < 0$: PBCFの圧力面、揚力面はプロペラと逆となるため、

ボスキャップの抵抗が増加。(2.4参照)

$\Delta T_p > 0$: PBCFのプロペラへの干渉によるプロペラ本体のスラスト

増加。(3.2.2参照)

ここで、ボスキャップに発生する力は、3.2.2で示す様にほぼ変化しない

ので $\Delta T_B + T_F \approx 0$ と考えられる。従って上記三項の和である ΔT は正となり、プロペラのトータルスラストが増加する。

トルクの変化を ΔQ とすると

$$\begin{aligned}\Delta Q &= Q_1 - Q_0 \\ &= (Q_{p1} + Q_F) - Q_{p0} \\ &= (Q_{p1} - Q_{p0}) + Q_F\end{aligned}$$

ここで、 $\Delta Q_p = Q_{p1} - Q_{p0}$ とすると

$$\Delta Q = \Delta Q_p + Q_F \quad (3.8)$$

(3-8)式に於いて、これまでの実験結果をあてはめると

$Q_F < 0$: P B C Fの圧力面、揚力面はプロペラと逆となるため、ボスキャップのトルクが減少。(2.4及び3.2.2参照)

$\Delta Q_p < 0$: P B C Fのプロペラへの干渉によるプロペラ本体のトルク減少。(3.2.2参照)

従って上記二項の和である ΔQ は負となり、プロペラのトータルトルクは減少する。

通常、プロペラにおいて同じ流場の中ではスラストが増せばトルクも増すはずであるが、P B C Fを付加した場合は上記の様に ΔT_p が正で ΔQ_p は負となる。これはFig. 3-16に示すようにP B C Fがプロペラ翼根部回りの流場を大きく変化させるため、プロペラ翼根部の揚抗比もこれに応じて変化するためと考えられる。

第4章 PBCF付プロペラの理論計算

3章までの研究によりPBCFの要目、効果、原理が実験的に明らかになったが、この現象を一般的に理解するためには理論的な取扱いが必要である。

しかし、プロペラ翼及びPBCFとボスの接合部は形状的にも複雑であり、従ってこれらの周囲の流場も複雑となり、正確に定量的な流場を把握することは容易ではないと思われる。ここでは、第一歩としてプロペラ翼とフィンを揚力体と考え、均一流中のPBCF付プロペラまわりの流れをポテンシャル流れとして取扱い、プロペラ翼とフィンの計算には渦格子法を適用し、ボス及びボスキャップの影響はパネル法により考慮した玉島らによって開発された方法を援用して計算を行うこととする。²⁷⁾ 本計算法を用いて、本章ではPBCFの有無についてプロペラ後方の流場及びプロペラ翼、PBCF、ボスに働く力の計算を行い実験値との比較を行う。なお力の評価にあたっては、プロペラ及びPBCFについて経験則による摩擦抗力を付加的に考慮する。

流速等の表現に用いる座標系をFig. 4-1に示す。プロペラに固定した直交座標系をO-XYZ、円筒座標系をO-Xr θ とする。X軸はプロペラ軸と一致させ、Y軸はある翼の母線と一致し、プロペラはX軸の負の方向に向かって時計まわりに一定角速度 Ω で回転しているものとする。x、r、 θ 方向の流速成分を V_x 、 V_r 、 V_θ とする。

4.1 計算方法

4.1.1 定式化

PBCFは、プロペラ直径の30%程度の最大径を持ち、ボスキャップの半径

の変化の大きい所に取り付けられているので、ボスおよびボスキャップを何らかの方法で考慮する必要がある。

PBCF付プロペラは、非粘性、非圧縮性流場の中で作動するものとし、そのまわりの流れを速度ポテンシャル Φ により表す。 Φ はプロペラの各部分の速度ポテンシャルによって次のように表されると仮定する。

$$\Phi = \Phi I + \Phi P + \Phi F + \Phi B \quad (4.1)$$

ただし、添字I, P, F, Bは、それぞれプロペラ流入速度、プロペラ翼、PBCF、ボスとボスキャップを表す。このポテンシャル流れを支配するラプラスの方程式を数値的に解くには、種々のパネル法が開発されているが、ここでは計算時間、容量を節約するために、プロペラ翼及びPBCFを薄い揚力体として揚力面理論で計算し、ボスキャップの計算にはパネル法を適用するという簡便な方法を用いた。²⁷⁾すでに玉島らによって示されている、渦格子法(VLM)とHess-Smithのパネル法の組み合わせによるボスとボスキャップの影響を含んだプロペラ性能の簡易計算法²⁸⁾を拡張し、PBCF付きプロペラのまわりの流場および性能を計算した。

プロペラ翼およびPBCFはそれぞれの平均キャンバー面に置かれた渦格子で表し、プロペラの翼厚は線状吹き出しによって考慮する。PBCFは薄い平板であるため、厚みの影響は無視することができ、ボスとボスキャップは四角形状の平面パネルによって離散化し、各パネルには一様の強さの吹き出しを分布させている。各渦格子及び吹き出しパネルの中心(コントロール・ポイント)で物体表面条件を満足させることによって、渦及び吹き出しの強さに関する以下の連立方程式が得られる。

$$\sum_{j=1}^{N_P} A_{ij} \Gamma_j^P + \sum_{j=1}^{N_F} B_{ij} \Gamma_j^F + \sum_{j=1}^{N_B} C_{ij} \sigma_j^B = - (V_i + V_{QP}) i \cdot n_i \quad (4.2)$$

$$(i=1, 2, \dots, N_P + N_F + N_B)$$

ただし、 N_P , N_F , N_B はそれぞれプロペラ翼、PBCF、ボスとボスカップの一翼当たりの未知数の数であり、 A_{ij} , B_{ij} , C_{ij} は影響係数、 Γ^P , Γ^F はそれぞれプロペラ翼、PBCFの渦の強さ、 σ^B はボス、ボスカップの吹き出しの強さである。 V_i はプロペラに固定した座標系に対する流入速度、 V_{QP} はプロペラの翼厚による誘起速度である。ただし、翼厚を表す吹き出しの強さが薄翼理論によって近似的に求められた為、 V_{QP} は既知となる。 n_i は第 i 番目のコントロール・ポイントにおける平均キャンバー面（またはボス、ボスカップ表面）の法線ベクトルである。(4.2)式を解くことによって、プロペラ翼、PBCF、ボスとボスカップを表す特異点の強さが求められ、それぞれの部分に働く力およびPBCF付プロペラまわりの流場が求まる。

各部分に働く力は、以下の方法により求められる。

(1) 渦分布に働く Kutta-Joukowski 力：

$$dF_1 = \rho V \times \Delta L \Gamma \quad (4.3)$$

(2) 翼厚を表す吹き出し分布に作用する Lagally 力：

$$dF_2 = -\rho \sigma^P V \mid \Delta L \mid \quad (4.4)$$

(3) プロペラ翼及びPBCFに働く摩擦力：

$$dF_3 = 0.5 \rho C_f \Delta A \mid V_m \mid V_m \quad (4.5)$$

(4) プロペラ翼での迎角変化による粘性抗力の増加：

$$dF_4 = -0.25 \pi \rho K_s C_s^2 \Delta r s \quad (4.6)$$

(5) ボス、ボスカップに作用する Lagally 力：

$$dF_5 = -\rho V B \sigma^B \Delta S \quad (4.7)$$

ここで

V : 流速ベクトル

Γ : 渦の強さ

ΔL : 渦線分ベクトル

σ^p : プロペラ翼を表わす吹出しの強さ

σ^b : ボスを表わす吹出しの強さ

V_m : 渦格子上の流速ベクトル

V_B : 吹出しパネル上の流速ベクトル

ΔA : 渦格子の面積

ΔS : 吹出しパネルの面積

C_f : プロペラ及びPBCFの断面効力係数、プロペラについては Prandtl-Schlichting の式で計算し、³³⁾ PBCFについては経験的に 0.0084を用いた。

C_s : 前縁の吸い込み力係数 ³³⁾

s : 前縁の法線ベクトル

K_s : 定数 (プロペラについて 1/3 とする)

ρ : 流体密度

なお、本計算ではボス・ボスカップに働く粘性抗力は無視した。

4.1.2 プロペラ後流の自由渦の取扱い

渦格子法では、プロペラ後流の自由渦を渦糸で表している。これらの渦糸が力を受けないためには流線と一致しなければならないが、自由渦の強さおよび位置は、その前身である束縛渦分布によって決まり、同時に自由渦により流れが束縛渦に影響するので、渦糸が流線と一致するまで計算を繰り返すいわゆる wake alignment を行う必要がある。そこで計算時間の短縮を図ることも含め、後流渦の位置を経験的にモデル化する方法が考えられる。例えば Kerwin らの roll-up モデル²⁹⁾ は縮流も考慮した簡単で精度の良い後流渦モデルの一つとして良く用いられる。しかし、PBCF付プロペラの場合、後流渦がプロペラ翼とPBCF両方から流出した自由渦からなり、しかもPBCFの幾何形状はプロペラ翼とかなり異なるため、通常のプロペラ単独の後流渦モデルをそのまま適用するのには無理がある。そこで、従来の後流渦モデルおよび第3章における実験結果を参照しながらPBCF付きプロペラの後流渦を新しくモデル化し、計算結果に最も大きい影響を与える後流渦のピッチ角をwake alignment によって求める方法を開発した。²⁷⁾

Fig. 4-2に示すようにプロペラおよびPBCFの後流を Near Wake と Far Wake との二つの領域に分ける。Near Wake では後流渦のピッチと半径とも円周方向に線形的に変化するものとする。Far Wake では両者とも一定とし、それらの値は Near Wake と Far Wake の境界で一致させる。

プロペラの Near Wake での後流渦のピッチ角 β_w は次式で計算する。

$$\tan \beta_w = \frac{V_a + U_x}{\Omega r + U_\theta} \quad (4.8)$$

ただし、 V_a 、 Ωr は流入速度の X 、 θ 成分、 U_x 、 U_θ はプロペラ翼、PBCF、ボスとボスキャップによる誘起速度の X 、 θ 成分である。先に述べたよう

に、 β_w を決めるには繰り返し計算が必要である。Far Wake での後流渦のピッチ角は、Near Wake の後端の β_w の値を一定値として用いる。

PBCFの後流渦については、PBCFの後縁で自由渦のピッチ角が流入ピッチ角(β_I)と幾何ピッチ角(β_G)の平均とする。ただし、流入速度には、一様流のほかにプロペラ及びボスとボスキャップの誘起速度が入っている。後縁から下流へ後流渦のピッチ角が線形的に変化し、Near Wake と Far Wake の境界で最終的ピッチ角に達する。この最終的ピッチ角はプロペラ Far Wake での後流渦角に一致させる。

半径方向の変化については、プロペラチップから流出した自由渦(チップ渦)が最終的にプロペラ直径の95%まで収縮し、プロペラボスに一番近い断面から流出した自由渦(ハブ渦)はPBCF有りの場合はプロペラ直径の5%まで、PBCF無しの場合は2.5%まで収縮するものとする。ボスとチップの間にある自由渦の収縮率はチップ渦とハブ渦の収縮率から半径方向に線形補間によって求める。

プロペラ翼およびPBCFの後流の Near Wake の範囲 θ_{nw} は、後縁から円周方向にそれぞれ 180° と 90° とする。自由渦は本来無限下流まで続くものであるが、数値計算ではこれをプロペラから十分遠い下流位置 X_{fw} で打ち切る。

PBCF付プロペラの後流渦モデルをまとめて Table 4-1に示す。ここでは各パラメーターを下記定義する。

β_{TE} : 後縁直後の後流渦のピッチ角

β_w : Near Wake 後端における後流渦のピッチ角

r_{wt} : Near Wake 後端におけるチップ渦の半径

r_{wh} : Near Wake 後端におけるハブ渦の半径

R_p , および R_f : プロペラ及びPBCFの半径

4.1.3 数値計算

数値計算は第3章で使用した「まあきゅりい・えーす」の模型プロペラ及びPBCF（主要目はTable 3-1 参照）について行った。PBCFの有り無しでの離散化した形状をFig. 4-3に示す。PBCFの有無にかかわらずプロペラ翼、ボスおよびボスキャップ上の分割方法は同一とした。プロペラ翼根部のグリッドサイズは、できるだけPBCFのグリッドサイズと合わせるよう細かく分割した。プロペラ翼は、コード方向とスパン方向にそれぞれ10分割、14分割した。ボスは、翼根部の曲線に沿って翼間に4分割、軸方向に10分割した。また、ボスキャップは、PBCF間を4分割、軸方向に8分割した。

上流側には実際のプロペラと異なるダミーボスを仮定している。ダミーボスの長さはプロペラボス径の2倍とした。分割は軸を中心とした放射状に分割し、円周方向はボスの上流側の分割と一致させ、軸方向には12分割とした。これらの分割数は、力の計算結果に分割数の影響が現れない最小の分割数として決められた。

4.2 計算結果と実験値との比較

4.1.2で示した後流渦モデルに従い wake alignment によって求めた計算結果をFig. 4-4に示す。計算されたプロペラ翼およびPBCFの束縛渦の強さをそれぞれFig. 4-5及び4-6に示す。ここではプロペラ翼の循環は、PBCF有の場合には $r/R < 0.4$ の範囲で若干増加している。一方、PBCF自体の循環 Γ はプロペラ翼とは反対で負になっており、2.4及び3.3で述べた結果と一致している。

次にプロペラ後流場の計算値と3.1で行った実験値の比較をFig. 4-7、4-8に

示す。

V_θ については、PBCFの有無の両方の場合とも本計算値は実験値とほぼ一致している。特にPBCF有りの場合、ボス直後の $X/D=0.273$ の位置で、軸中心部での旋回流の逆転現象もうまく表現されており、 $X/D=1.023$ の位置での値も実験値とほぼ対応している。しかし、 V_x については、PBCF有の場合は、 $X/D=0.023$ でも概ね良い対応を示しているのに対し、PBCF無しの場合は、軸中心部のみでなく r/R が0.5より大きい範囲まで計算値が実験値を上回っており、特に $X/D=1.023$ では分布傾向も異なっている。 V_r についても、PBCF有の場合は、計算と実験はほぼ一致しているが、PBCF無しの場合は、実験では $X/D=1.023$ で軸中心部でまだ縮流現象が現われているのに対し、計算では現われていない。

これらの結果より、PBCF有の場合は、本後流モデルによる計算でも比較的流場を良く表現出来ているのではないと思われる。そこで、本方法によりPBCFの圧力分布の計算を行い、結果をFig. 4-9に示す。ここでPBCFの半径(r/R)はスパン方向のストリップの平均値を示している。70%コード長付近を中心に力が作用している。このときのPBCFへの流入角をFig. 4-10に示す。流入角は、プロペラ翼と逆方向で負となっている。又、半径方向(厳密にはボスキャップの法線方向)には外側ほど流入角が小さくなる傾向があり、一方、コード方向には、後縁に行くに従って流入角が大きくなっている。本計算結果からもPBCFは、プロペラ翼と反対方向のトルク、スラストを発生することがわかる。

最後にプロペラ及びPBCFに働く力の計算結果と実験値との比較について示す。Fig. 4-11にプロペラとPBCF全体に働く力を、Fig. 4-12プロペラ翼のみに働く力を示す。また、Fig. 4-13には、PBCFに働く力及び従来型ボスキャ

ップに働く力を示す。ここでの実験値は3.2で計測された値を用いている。

プロペラとPBCF全体に働く力のうちKQの定性的な傾向は一致しているが、KTについては実験ではPBCFを付けた場合スラストが若干増加するが、計算値では減少している。プロペラ翼とPBCFの干渉に関しては、実験ではPBCFの影響によりプロペラのスラストは増加、トルクは減少という傾向を示しているのに対し、計算ではスラスト、トルク共若干増加している。

またボスキャップおよびフィンに働く力は他の力に比べて小さいが、トルクの傾向は実験値と一致するもののスラストの傾向が合っておらず、これらが全体の力に影響している。

以上より、本計算法に関してPBCF有の場合は実験と比べて概ね流場と力を表現出来たと思われるが、PBCF無の場合はプロペラ後流モデルが現実的でなく、特にスラストに関しては実際の流場を必ずしもうまく表せてはおらず、従ってPBCFによる力の変化を定量的に表わすまでには至っていないと考えられる。今後は更にプロペラ後流のモデル化の検討等の考慮が必要である。又、ボスキャップ直後の軸方向流速に対しては、鈍い物体形状の影響として粘性等も考慮すると共に、プロペラやPBCFの翼根の接続部流れについても考慮する必要があると思われる。

第5章 プロペラピッチ分布とPBCFの効果

第3章で示した様に、PBCFはハブボルテックスの原因となるプロペラ翼根部の後縁から生じる吹おろしを整流し防ぐことにより効果が出るものであるが、この吹おろしの角度（即ちハブボルテックスの強さ）は当然プロペラ翼根部のピッチ角、及びプロペラに流入する迎え角に影響されると考えられる。従ってPBCFによる効率向上率は、プロペラ翼根部のピッチ角及びプロペラ翼根部における流入流場の不均一性に影響を受けることが考えられる。

この様な観点から、Gearhart は¹⁸⁾ や木下³⁴⁾ 等よりハブボルテックスの少ないプロペラ設計、つまり翼根部のピッチ分布を工夫したプロペラについては、PBCFの効果は望めないのではないかと疑問が提示されている。

本章では均一流及び2種類の不均一流中に於いて、翼根部のピッチ分布の異なるプロペラに対するPBCFの効果がどの様に変化するかをプロペラ単独試験を行い実験的に調査する。

5.1 プロペラ性能の調査

5.1.1 実験の方法

供試プロペラとしてプロペラ翼根部のピッチ分布の異なる3種類の模型プロペラを製作した。一定ピッチプロペラとしては第2章で用いたMAU型翼断面のピッチ比0.8の標準プロペラCP24 (Table 5-1 参照) を用い、これをベースとして翼根部のピッチを減らしたいわゆる通増ピッチプロペラと逆に翼根部のピッチを増加させたいわゆる通減ピッチプロペラを製作した。これらのプロ

ペラのピッチ分布を Fig. 5-1 に示す。ピッチ比の通増、通減の度合は現象を際立たせるため翼根部で $\pm 20\%$ としたが、これは通常使用されている通増、通減ピッチプロペラに比べると最も大きな部類に属する。また、当然各プロペラの平均ピッチも多少異なることになる。3種の供試プロペラについて、参考としてPBCF無の状態での通常のプロペラ単独試験（POT：プロペラオープンボート）をプロペラ後部に配置（Fig. 2-10の上図参照）を行いその結果をTable 5-3及び Fig. 5-7 に示す。

供試PBCFは、プロペラ翼根部ピッチ角（ ε ）とPBCFのピッチ角（ α ）が概略等しい場合、又PBCFの最大径（ r ）とプロペラ径（ R ）の比が25%付近の場合に最も効率が高くなることが第2章での研究により知られており、ここでの供試PBCFとしては、数種類の $\alpha - \varepsilon$ 及び r/R の違うPBCFの中から最も効率向上率の良いものを選び、Table 5-2に示した要目のものを使用した。本実験で使ったPBCFの形状及びPBCF付プロペラの概略図を Fig. 5-2に示す。

本実験は（株）西日本流体技研の No. 1 回流水槽（観測部寸法： $L \times B \times D = 5.5\text{m} \times 2.0\text{m} \times 1.0\text{m}$ 、流速均一性は $\pm 1.5\%$ 以内）に於いて同社製のプロペラ単独試験機を用いて行った。試験装置の配置を Fig. 5-3に示すが、この方法は2.1.1で提案したハブ渦の有無を正確に把握するためオープンボートをプロペラの上流に配置した形のプロペラ単独試験（逆POT）である。また、不均一流はプロペラ前方にワイヤーメッシュを適当に組合わせることにより発生させている。

各プロペラ単独試験計測は1回のみでなく数回の繰り返し試験を行い、再現性のあるデータとして確認しながら試験を行った。

尚、本試験でのプロペラ回転数は6～9 rpsで行っておりレイノルズ数（ Re

$= n \cdot D^2 / \nu$, n : プロペラ回転数、 D : プロペラ直径、 ν : 水の動粘性係数) は約 4×10^5 である。

5. 1. 2 均一流中での計測

本実験はいわゆる逆POT方式の配置であり、オープンボートによる平均伴流係数 (W_n) が0.051の弱い伴流があり、プロペラ流入速度も完全には均一ではない。しかし、プロペラ位置での流場の実験値は Fig. 5-4に示す様にはほぼ均一流に近づく、ここでは、この流場を均一流とみなしプロペラ流入速度 (V_a) の代わりにオープンボート上流の一樣流速 (V) をとり、前進係数 ($J = V / n \cdot D$)、荷重度 ($CT = T / (1/2 \rho V^2 \cdot \pi D^2 / 4)$)、 T : スラスト、 ρ : 水の密度) 及びプロペラ効率 ($\eta_p = T \cdot V / (2 \pi \cdot n \cdot Q)$)、 Q : トルク) を定義した。

通増、一定、通減ピッチの各プロペラは平均ピッチがそれぞれ異なっており、効率を評価するためには同じ前進係数にて比較するのは適当ではなく、 KT/J^2 または荷重度が一定という条件で比較する必要がある。

Table 5-4には、供試プロペラの設計作動点である $J = 0.6$ において KT/J^2 を一定 (0.5459) とした場合のスラスト係数 ($KT = T / (\rho \cdot n^2 \cdot D^4)$)、トルク係数 ($KQ = Q / (\rho \cdot n^2 \cdot D^5)$) 及びプロペラ効率の計測値を、PBCFの有無の状態での通増、一定、通減ピッチプロペラについてそれぞれ比較した。尚、ここでは各々の KT 、 KQ 、 η_p の値については比較を容易にするために、計測値と合わせて一定ピッチプロペラのPBCF無しの値を100とした指数も示した。

Fig. 5-8には横軸に CT 、縦軸に各プロペラのPBCF有無でのプロペラ効率 η_p をとったグラフを示す。尚、本プロペラの設計作動点での CT は約1.4である。

5.1.3 不均一流中での計測

不均一流については、平均伴流係数(体積積分) W_n が0.365でFig. 5-5に示す様な円周方向は均一で半径方向のみ不均一な流場(以下不均一流(1)と略す)と、供試の一定ピッチプロペラが装着可能な船型(8万トンタンカー)で W_n が0.608となるFig. 5-6に示す様な円周方向と半径方向の両方に不均一な流場(以下不均一流(2)と略す)の2種類を作成し試験を行い、プロペラ流入速度としては $V_a = V(1 - W_n)$ を使用した。

Table 5-5, 5-6及び Fig. 5-9, 5-10にはそれぞれ不均一流(1)、(2)についてTable 5-4及び Fig. 5-8と同様($K T/J^2 = 0.5459$)な計測値の相対比較を示す。

5.2 プロペラ性能の比較

5.2.1 通増、通減ピッチプロペラと不均一流

PBCF無の場合、均一流中では Table 5-3, 5-4及び5-7, 5-8に示す様に通増、一定、通減ピッチの3種類のプロペラ間での効率の相違はほとんどないが、不均一流(1)中では Table 5-5及び Fig. 5-9に示す通り通増が最も高く、ついで一定、通減の順に低くなっており、通増と通減の間には有意な効率の差(約2%)が認められる。更に不均一流(2)中では Table 5-6及び Fig. 5-10に示す様に不均一流(1)と同様な順番であるが、この場合は各プロペラ間の差が大きくなっており通増と通減の間では約3%の差となっている。

不均一流中で通増ピッチプロペラの効率が高いのはボス部のプロペラ流入速度が遅い為、通増ピッチ分布がいわゆる Wake Adapted の効果となっており

いるものと考えられる。³⁰⁾

5.2.2 PBCFの効果

PBCF有りの場合、Fig. 5-8～5-10の結果から、均一流中及び不均一流（１）（２）中に於いてプロペラ荷重度の変化にかかわらず、通増、一定、通減ピッチの全てのケースでPBCFによる２～８％の有意な効率向上が認められる。特に通減ピッチ、一定ピッチに於いてのPBCFによる効率向上率が３～８％と大きい。通増ピッチの場合でも２～４％の効率向上が達成されている。通減ピッチの場合は翼根部のピッチが大きく従って循環も大きくなり、ハブ渦も強いことが推察され、PBCFによるハブ渦の消去が大きな効率向上につながっていると思われる。一方、本実験で使用したかなり極端な通増ピッチの場合でもやはりハブ渦が発生しており、PBCFの効果が充分期待出来ることを示している。

また本実験では、均一流中では通減ピッチプロペラにPBCFを付加するのが最も効率が高く、不均一流（１）及び（２）中ではPBCFを付加すれば通減、一定、通増ピッチの３種類のプロペラともほぼ同程度の効率となった。このことから、通減ピッチプロペラにPBCF組合わせることによって、プロペラ効果を落さずにチップ付近のキャビテーションを小さくすることが可能となると考えられ、より高性能なプロペラ設計が可能となることを示唆している。

第6章 船体と舵を含めた推進性能

前章までの研究では、PBCFを使っていかにプロペラ単独の効率改善を行うかについて検討してきた。別の言い方をすれば、プロペラとPBCFだけの系でのPBCFの効果を検討してきたが、実船での実用化を考えた場合、船体および舵とPBCF付プロペラとの相互干渉を考慮した全体の系としての推進性能がどうなるかの性能確認が問題となる。本章ではこれらを明確にするため、PBCF付プロペラを舵および船体と組み合わせたトータルな推進性能について考察する。本章での実験は Table 6-1 に示すまきゅりい えーす及びあめりか丸の2隻の供試模型を使用して行った。

6.1 PBCFと舵の相互干渉

6.1.1 舵によるPBCFの特性の変化

プロペラボスキャップの直後にある舵は、ハブボルテックスに大きな影響を与え、さらにはボス近傍の流場にも大きな影響を与えることが予想される。Fig. 6-1に舵の有無によるタフト法による可視化写真を示す。プロペラおよび舵はあめりか丸の模型を使用している。Fig. 6-1より、舵を取り付けると、タフトの巻き込まれ方がかなり弱くなっており、ハブボルテックスが相当弱まっていることが推察される。このことから舵無しに比べて舵付きの場合はハブボルテックスが弱いのでPBCFを付けても舵無しの時に比べて $\Delta \eta_p$ は小さくなることが予想される。

以上を踏まえて、2隻の供試船についてFig. 6-2に示す様な舵も含めた形で

の逆POT（以後舵付逆POTと呼ぶ）を行い、幾何形状、及び流力設計パラメーター、 α , γ , a , b などについて様々に変化させて最適PBCFの探究を行った。これら一連の実験でまきゅりいえすについては、設計作動点である $J=0.65$ で $\Delta\eta_p$ が2.0~2.5%（数回の再現テストの結果）という結果を、あめりか丸については $J=0.85$ で $\Delta\eta_p$ が約2.5%という結果を得た。

舵無しの場合と舵付きの場合で、最適なPBCFの流力的パラメーターや幾何形状が大きく変化することはない様であるが、 $\Delta\eta_p$ についてはかなりの相異がある。Fig. 6-3にあめりか丸の舵付逆POTで設計作動点である $J=0.85$ で最適化したPBCFの $\Delta\eta_p$ についての計測結果を舵付き、舵無しについて合わせて示した。本データも含め、一般的に舵無し状態で最適化したPBCFをそのまま舵付逆POTを行った場合、舵無しに比べ、プロペラ及び舵の種類にもよるが $\Delta\eta_p$ は20%~50%減少する結果が得られている。

以上の結果よりプロペラ直後に配置された舵はハブボルテックスを弱める働きをしており、このため一般的には舵付きの場合は舵無しに比べ効率向上率が少なくなると考えられる。

6.1.2 PBCFによる舵に働く流体力の変化

6.1.1では舵がPBCF付プロペラに与える影響について考察したが、ここではPBCF付プロペラが舵に与える流体力学的影響を考えてみることとし、推進性能に最も関係のある舵に働く前後方向の力について、舵付逆POTに於てPBCFの有無での計測を行った。結果をTable 6-2に示す。ここでの ΔR_f は舵に働く前後方向の力の差、すなわち $R_f(\text{with PBCF}) - R_f(\text{without PBCF})$ の値である。ここで R_f の方向は舵の進行方向と逆の方向を正とする。供試プロペラおよび舵はあめりか丸のものを使用し、PBCFは

4.1で最適化したものを使用した。

PBCFを付けることによる舵にかかる力の増加の程度を知るため ΔR_f を $\rho n^2 D^4$ で無次元化した $\Delta K R_f$ を求め、プロペラのKTとの対比結果もあわせて Table 6-2に示す。この結果から、PBCFを付けることによりプロペラスラストの約0.2%程度の力が舵の抗力として増加していることがわかる。他の船で計測してみても $\Delta K R_f / K T$ がほとんど0.3%以内に納まる様である。

舵の抗力が増加している理由としては、3.1での計測結果にもある様にボスキャップ後方の舵の位置でPBCFにより流速 V_x が増加していることと、旋回流 V_θ が減少したため旋回流による舵の前方への揚力が少なくなったこと等が考えられる。いずれにしてもPBCFが舵に与える干渉については、若干舵抗力は増加する傾向だが、オーダーとしてはほとんど無視出来る量であると言える。

6.2 自航試験

6.1で得られた最適PBCFを使用して、2隻の供試船にて荷重度変更法による自航試験を行う。³¹⁾ 2隻の模型船およびプロペラ要目に関してはTable 6-1に示す。

まあきゅりいえーすに関しては、(株)西日本流体技研の大型回流水槽(観測部寸法、長さ45m、幅4m、深さ1.6m)を使用し、あめりか丸に関しては、(財)日本造船技術センターの大型曳航水槽を使用し実験を行った。これらの実験では両船とも設計作動点付近で約2.0~2.3%程度の推進効率の改善が得られた。以下、例としてあめりか丸の試験データについて解析評価を行う。

6.2.1 推進効率

PBCFの有無での推進効率を比較するため、自航試験から得られたスラスト(T)、トルク(Q)を用い、またプロペラ前進速度でなく船速(V)を用いて算出した「推進効率」($TV/2\pi nQ$)を、プロペラ荷重度($CT=T/(1/2)\rho V^2 \cdot \pi D^2/4$)を横軸としてプロットした結果をFig. 6-4に示す。試運転状態、満載状態とも全ての荷重度でPBCFによる効率向上が認められる。効率向上率は設計作動点(Ship Point)付近即ち $CT \approx 0.5$ で2.0~2.3%程度であった。

この値は舵付逆POTの結果とはほぼ一致しており、舵付きでのプロペラ単独効率向上がほとんどそのまま船全体の推進効率向上に反映していると考えられる。

6.2.2 自航要素

スラスト一致法により自航要素を求め、PBCFの自航要素に与える影響を調べる。本来は、PBCFをつけることによりプロペラとPBCFを組合せたシステムとしてプロペラ単独性能が改善され η_p が向上すると考えるのが自然である。しかし逆POT方式では正確な単独性能の絶対値が得られないため、ここでの自航要素の解析では、PBCFはプロペラの付加物と考え、プロペラ単独性能はPBCF無しでのMAU型標準プロペラ図表の値を使用した。また、抵抗値は荷重度変更試験からの推定値を、PBCF有無の両状態に使用した。Fig. 6-5に設計作動点付近の荷重度における各自航要素のPBCF有無による変化を示した。

Fig. 6-5によると、プロペラ効率比(η_r)が増加し、伴流係数(1-w)および推力減少係数(1-t)がともにわずかに減少している。ここで η_r が

増加しているのは本来の η_r の意味（均一流からのズレによるプロペラ効率の変化）によるものの他に、この解析ではPBCFによるプロペラ効率の上昇が η_r を増加させていると考えられる。また $1-t$ の減少は非常に少ないが、6.4.2で計測した舵抵抗の増加分もここに入ってくると考えられる。

以上の結果より、本解析でも $\eta_r \cdot \eta_h$ ベースで試運転、満載両状態とも約2.0%程度の効率向上が認められる（ここで $\eta_h = 1-t/1-w$ ）。

なお、Fig. 6-5で $1-t$ の値が、通常行われている抵抗自航試験で求められる値よりも高くなっているのは、抵抗値として前に述べた荷重度変更試験からの推定値を用いたためである。

第7章 実船に於ける性能

PBCFによる効率向上の定量的な評価は、最終的には実船でのデータによって行われなければならない。ここではPBCFの実船での効率向上について、海上公試に於ける速力/馬力の計測解析、及び実船航海に於けるログ・ブックの集計解析を行う。また、模型プロペラでの単独性能試験との比較も合わせて行い、尺度影響についても考察する。

7.1 海上試運転解析

4章までの水槽実験での研究開発を受け、供試船においての実船実験を行う。本章では、まあきゅりいえーす（以下M. A. と略す）に実物PBCFを製作・取付けて、PBCF非装備の完全同型船ほぼ同船令船のねぶちゅーんえーす（以下N. A. と略す）との性能比較を行った。Fig. 7-1にM. A. へPBCFを装着した様子を示す。Table 7-1に、以下に行った各試験時の本船状態および気海象状態等を示す。なお、両船とも船底塗装施工直後の状態で試験を行った。

7.1.1 速力試験

Table 7-1に示す状態で、MCOの50%、70%、85%、100%の4点で1マイルの往復航走を行い速力、馬力、回転数の計測を行った。両船とも速力計測には電波式速力計測装置マースメック-2を使用し、馬力および回転数計測には湘洋エンジニアリング（株）製の軸馬力計（精度 $\pm 0.8\%$ ）および同社の回転計を使用した。Fig. 7-2に運輸省方式（JTTC法）の風潮力の修正³²⁾を行った後の速力/馬力/回転数の曲線を示す。

この結果より実船テストでは馬力ベースで約4%、85%MCOでの速力では約0.2ノットの効率改善が認められた。また同一馬力における回転数は1.0~1.5rpm増加した。

7.1.2 操縦性能

Fig. 7-3旋回試験による航跡比較図を示す。この試験は、85%MCOで航走中、0°と標示されている位置で舵を左右とも最大舵角35°をとり、そのまま一周するまでの航跡を示したものであり、船首方位を30°ごとにプロットしたものである。

Fig. 7-4に後進性能比較図を示す。この試験は、85%MCOで航走中、後進全速を指令し、その後の速力などの変化の様子を示したものである。

Fig. 7-3およびFig. 7-4から、PBCFによる旋回、後進性能への影響については、有意な差はないと認められる。

7.2 実船性能比較

7.2.1 速力計測比較

PBCFを装備した16隻の船について7.1.1の要領で海上試運転にて速力計測を行いPBCFによる実船での効率向上を求めた。Table 7-2にこれらの要目、効率向上率等をまとめて示す。ここで、

$\Delta \eta_s$: 実船での推進効率向上率（計画速力における馬力減少率）

Δrpm : 計画出力に於けるプロペラ回転数の増加率

$\Delta \eta_{pm}$: 舵付逆POT（模型プロペラ）でのプロペラ効率向上率

と定義する。

これらの16隻のPBCFの性能比較は同一船比較が3ケース、同型船比較が7ケース、PBCF無の場合の予想カーブとの比較が6ケースとなっている。速力計測は概ねマースメック、馬力計測は軸馬力計の計測結果を用い、採取データに対してはJTTC法又は谷口・田村法を用いて風潮力の修正を行った上で比較を行った。

$\Delta \eta s$ の数値をながめてみるとかなりバラついているものの全ての船で効率が上がっている。現在の海上公試運転の精度は少なく見積もって馬力ベースで $\pm 3\%$ 程度はあると言われており、真の効率向上率はなかなかつかみにくい。これら16隻の平均をとってみると4.3%となる。しかし、16隻中6ケースをしめる予想カーブとの比較については、予想カーブ自体が、固く（低く）見積られる傾向が見受けられるため、この集計では $\Delta \eta s$ が過大に出てくる可能性がある。ともあれ、データ数もある程度揃っていることから、この4.3%という数字はある程度の参考とはなるものであり、実船でのPBCF効果の目安になると思われる。

Δrpm についても、約1%ではあるがやはり全ての船で増加しており、このことは同じ回転数に於いてはプロペラトルクが軽くなるという事であり、就航後徐々にトルクリッチの方向へ向かう傾向を考慮すれば好ましい特徴といえる。

7.2.2 就航実績比較

就航実験解析にはログブックのデイリーデータを利用した。これは毎日正午に、前日から1日の間の速力、燃料消費量、正午の気海象等を記したもので、速力は船位計測を基にした対地速力であり、燃料消費量はフローメーター、

風速は風速計、波高は目視にて計測したものである。

速力データとして対地速力をとっているため、潮流や気海象による影響を除いてやる必要があり、そのためには、同一航路、同一時期（季節）のデータを使用することが望ましい。更には排水量の統一（修正）、気海象の悪い日のデータの除外、船底汚損のない時のデータの収集等、出来るだけ同一条件下でのデータ収集が必要である。Fig. 7-5 に速力と燃料消費量に関する就航実績解析として日本／豪州（東岸）の定期コンテナ航路に就航している大阪商船三井船舶の2,000TEU積コンテナ船「さざんくろす丸」の例を示す。図中の各点はPBCFの有無に分けて、航路・季節が同一のデیلیーデータを取り出し、更に排水量の修正、風速8m/s、波高3m以上のデータの除外を行った後のデータをプロットしたものである。図中の2本の曲線は、本船の試運転時の速力馬力曲線と同じ傾きを持つ曲線で、PBCF有無のデータをそれぞれ最小二乗法を使って試運転の曲線で代表させたものである。従ってこの2本の曲線を比較することでPBCFによる推進効率向上率が求められる。

Table. 7-3にはこのような手法で解析した12隻の船の要目及び効率向上率等を示す。就航実績解析の場合は試運転解析に比べ外乱の影響がより大きく、試運転解析よりも更に精度は悪いと考えられるが、一応これら12隻の推進効率向上率の平均は5.4%となった。また Δrpm も全て確実に増加しており、PBCFの特徴が現れている。

7.3 尺度影響

Table 7-2及びTable. 7-3には実船に於ける効率向上率 $\Delta \eta_s$ に加えて当該船の模型プロペラの単独試験での効率向上率（ $\Delta \eta_{pm}$ ）も合わせて示した。

7.2で得られた実船に於ける効率向上率 $\Delta \eta_s$ の平均値は4~5%程度であるのに対し $\Delta \eta_{pm}$ の平均値は2%弱であり2倍以上の開きがあり、有意な差と考えられる。Fig. 7-6に $\Delta \eta_s$ と $\Delta \eta_{pm}$ の関係をグラフで示す。

一般に相似な形状物の周囲の流れでも、レイノルズ数($Re=UL/\nu$, U :流速、 L :代表長さ、 ν :動粘性係数)が異なると流体の慣性力と粘性力のバランスが変化し、また層流/乱流の遷移が起こる等の理由で、流場は変化する。プロペラの場合も実船と模型試験では 10^2 オーダーでレイノルズ数の相異があるため、効率向上率も流場の違いによって異なってくることが考えられる。特に船のような大きな構造物の性能を小さな模型船での水槽実験から予測外挿しようとする場合は必ずレイノルズ数の影響(又は尺度影響)を考慮することが必要であり、これは船舶流体力学上の古くしてなお新しい課題と言えよう。

PBCFについては、Fig. 7-6における実船と模型の効率向上率の差が上記の尺度影響と考えられる。従ってこれらのデータにより、PBCFによる効率向上率に関する尺度影響は、模型実験での効率向上率の2~3倍程度にも達すると尺度影響の原因は基本的には流場の変化によるものであり、実船及び模型船での圧力流場計測を行えばより直接的に尺度影響を明らかにすることが出来、実船での流場計測は波、風、潮流等の影響があるため、これらを除いた計測は事実上不可能である。したがって現実的にはこれらの影響の総合結果としての船に働く力、船速といった二次的諸量について、なるべく多くのデータを集めて尺度影響を推定していく以外に今のところ方法はないと思われる。ただし細い点で追加するなら、尺度影響の一つの可能性として模型実験に於ける層流剥離の問題を提起したい。Fig. 7-7に示すように、模型の場合は、レイノルズ数が小さいため層流となっており、ほぼ乱流と考えられる実船に比べて層流剥離といって乱流よりも剥離が起こりやすい性質がある。そのため翼に沿って

PBCFに向かう流れは実船に比べ弱められ、PBCFが受ける力も小さくなるため効率向上率も小さいという考え方が成り立つ。つまり模型船の方が実船よりもハブボルテックスが少ないのではないかという推測である。いずれにせよ今後も鋭意実船データの蓄積を図り、PBCFの評価及び効率向上の見積もりをより正確に行うと共に、CFDによる高レイノルズ数でのPBCF付プロペラ計算を試みることにより尺度影響の本格的解明を期待するものである。

今まであまり問題にされなかったスクリュープロペラのハブボルテックスに着目し、これによるプロペラ効率の損失を回収する手段としてPBCF (Propeller Boss Cap Fins) を提案し、船舶の省エネルギー装置の開発という観点からの研究を行った。

以下に本研究によって得られた結果を要約する。

- (1) PBCFをプロペラと組合せることにより、主たる効果として次の3つの現象があることを明らかにした。
 - ① ハブボルテックスが消去される。
 - ② プロペラトルクが軽減される。
 - ③ プロペラのスラストが増大する。
- (2) PBCFの作動メカニズムが以下の通りであることを示した。即ち、PBCFは、プロペラ翼根部の後流場に生じている吹きおろし現象をなくし、流れをPBCFのピッチ角方向へ整流する。そのためにPBCFはプロペラ回転方向に流体力を受け、プロペラトルクを軽減させると共に、プロペラ翼根部での揚抗比も変化させプロペラ翼のスラストを増加、トルクを減少させる干渉作用をもつ。また各翼に生じる吹きおろしがまとまって強いハブボルテックスが出来、これがボスキャップ後部に 低圧域を作るが、PBCFによりこの低圧域がなくなり、スラスト方向への抵抗も減少する。PBCFの効果として、これらの力がうまくかみ合って、全体としてプロペラ効率の向上につながる。
- (3) PBCFの諸要目とプロペラ効率向上率の関係を明らかにし、最適なPBCFの要目を求めた。即ち最適PBCFはプロペラと同数のフィンを

持ち、その直径はプロペラの約 1/4 で、そのピッチ角はプロペラ翼根部のピッチ角とはほぼ等しいという概略要目をもつものである。

- (4) P B C Fによる効率向上（ハブボルテックスによる効率損失）を定量的に計測する試験方法としてプロペラオープンボートをプロペラの上流側に配置する“逆POT”方式を提案した。
- (5) P B C F付プロペラの理論計算を渦格子法・パネル法を用いて行い、実験値と概ね合っている事を確認した。しかし、P B C F無の場合については更に検討を要する。
- (6) プロペラ翼根部のピッチ分布の如何にかかわらず、適切なP B C Fにより一定のプロペラ効率向上が可能であることを示した。
- (7) P B C Fの舵との相互干渉に関して、舵の存在はP B C Fの効率向上率を相当に低下させること、またP B C Fの存在は舵による抵抗を若干増加させるが、殆んど無視出来るオーダーであることを示した。
- (8) 自航試験を行い、P B C Fによる船全体の推進効率がほぼプロペラ効率の向上率と同程度であることを確認した。
- (9) 海上公試及び就航実績の解析を行い、実船でのP B C Fによる効率向上率が4%以上あることを明らかにすると共に、模型と実船の間にはかなりの尺度影響があることを示唆した。

以上によってP B C Fが船舶の推進性能を簡便な形で向上させ、船舶の実用的省エネルギー装置として有効であることを確認した。

謝 辞

本論文をまとめるにあたり、東京大学工学部 梶谷 尚教授に懇切で暖かい御指導を頂き、心からの謝意を表します。

また本研究の遂行にあたり、貴重な助言・協力・激励を頂きました東京大学工学部 加藤 洋治教授、前田 正二技官、九州大学工学部 山崎 隆介名誉教授、中武 一明教授、広島大学工学部 故 波多野 修次名誉教授、東海大学 高橋 肇教授及び木下 昌雄博士に厚く感謝申し上げます。

さらに本研究の実施及びその成果については、(株)西日本流体技研 小倉 理一氏、玉島 正裕博士、恋塚 初氏、ミカドプロペラ(株) 河野 嘉雄氏、大阪商船三井船舶(株)の 折戸 博允氏、塩津 高志氏、川崎 敏夫氏、新井 健太氏、(財)日本造船技術センターの 佐藤 和範博士、塩田 昭男氏、オランダ MARIN の Van den Berg 氏、中国上海交通大学 C・J・Yang 講師の有益なる討論と多大なるご協力を頂いた結果であることを記し、深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Van Manen, D. J. : Non-Conventional Propulsion Devices, 第2回船用プロペラに関するシンポジウム、日本造船学会、1971。
- 2) 二重反転プロペラ付き商船“とよふじ5”、三菱重工技報、Vol. 25、No. 6、1988。
- 3) 石田駿一、藤野良亮：二重反転プロペラの設計法、石川島播磨重工技報、Vol. 28、No. 6、1988。
- 4) Grim, O. : Propeller and Vane Wheel, Journal of Ship Research, Vol. 24、No. 4、1980。
- 5) リアクションフィン：三菱重工技報、Vol. 14、No. 6、1977. 11。
- 6) Report of Propeller Committee, Proceedings of the 16th ITTC. 1981。
- 7) “The Tip-Vortex-Free Propeller”、The Motor Ship(1980/9)、P. 43~44。
- 8) Perez Gomez, G., Gonzales Adalid, J., “Comparison between CLT and conventional propellers” Shipping World & Shipbuilder, March 1990。
- 9) 伊藤真一郎、田古里哲夫、石井規夫、井手敏治：翼端小翼付きプロペラの研究（第1報）、（第2報）、日本造船学会論文集、第159号、1986、第161号、1987。
- 10) 凌 志浩、佐々木康夫、高橋通雄：境界要素法の直接法によるプロペラまわりの三次元流れ解析、日本造船学会論文集、第157号、1985。
- 11) Sudeb chattopadhyay, Hiroharu Kato, Hajime Yamaguchi : “A Study on Performance and Cavitation of Propellers for High Speed Crafts Including Effect of Boss”、(1 st Report; Analysis in Unifor Flow)、Journal of the Society of Naval Archtects of Japan Vol. 158、1985。

- 12) Hoshino, T. : "Hydrodynamic Analysis of Propellers in Steady Flow Using a Surface Panel Method", Journal of Society of Naval Architects of Japan, Vol. 165, 1989.
- 13) 大内一之、小倉理一、河野嘉雄、折戸博允、塩津高志、玉島正裕、恋塚 初 : PBCFの研究開発 (第1報 プロペラボス後部流れの改善)、日本造船学会論文集第163号、1988-6。
- 14) 大内一之、玉島正裕、川崎敏夫、恋塚 初 : PBCFの研究開発 (第2報 プロペラ後流調査及び実船性能について)、日本造船学会論文集第165号、1989-6。
- 15) 大内一之、玉島正裕、新井健太 : PBCFによるプロペラ水中雑音の低減、関西造船協会誌 第216号、1991. 9。
- 16) 大内一之、玉島正裕、恋塚 初、新井健太 : PBCFによるプロペラ効率向上とプロペラピッチ分布の関係について、関西造船協会誌第217号、1992. 3。
- 17) 大内一之 : PBCF (Propeller Boss Cap Fins) の効果と実績、日本船用機関学会誌、Vol. 27、No. 9、1992. 9。
- 18) Gearhart, W. S. and McBride, M. W. : Performance Assessment of PBCF Type Device, Proc. of 22nd American Towing Tank Conference, St. John's New Foundland, 1989. 8。
- 19) J. H. Zang, H. H. Ma : Energy Saving Propulsor, Proceedings of the 2nd International Symposium on Propeller and Cavitation, Hangzhou China, 1992. 9。
- 20) 例えば、浅沼 強 (編) : 流れの可視化ハンドブック、朝倉書店、1977。
- 21) 加藤洋治、渡辺弥幸、小村隆二、前田正二、宮永大 : 東京大学の船舶用プロ

- ペラキャビテーショントンネルの設計思想と特徴、日本造船学会論文集
第150号、1981。
- 22) Min, K. S. : Numerical and Experimental Method for the Prediction of
Field Point Velocities around Propeller Blades : Dept. of Ocean
Engineering Report No. 78-12, MIT, Cambridge, 1978。
- 23) 岡村尚昭 : 船用プロペラ近傍流場の実験的解析、石川島播磨技報 Vol. 23
No. 3, 1983。
- 24) 小山鴻一、角川 明、岡本三千朗 : レーザー流速計による船用プロペラまわ
りの流場計測、日本機械学会論文集51巻466号、1985. 9。
- 25) 永松宣雄、清水穂高 : LDVによるプロペラ後流の計測、関西造船協会誌
第198号、1985. 9。
- 26) Hoshino, T. Oshima, A. Sasajima. : Flow Measurements by 3-Compartment L. D.
V. in a Cavitation Tunnel : Written Contribution for the Group
Discussion on Application and Accuracy of LDV Measurements ITTC '87
Kobe Japan, 1987。
- 27) Tamashima, M., Yang, C. J., Ouchi, K. : Calculation of the Performance of
Propeller with Boss Cap Fins in Uniform Flow. Proceedings of
International Symposium on Propeller and Cavitation, Hangzhou China,
1992. 9。
- 28) Yang, C. J., Tamashima, M. : "A Simplified Method to Predict Marine
Propeller Performance Including the Effect of Boss", Trans. of the
West Japan Society of Naval Architects, No. 70, 1990。
- 29) Kerwin, J. E., Lee, C. S. : "Prediction of Steady and Unsteady Marine
Propeller Performance by Numerical Lifting-Surface Theory", SNAME

Transactions, Vol. 86, 1987。

- 30) 家永稜威雄、門井弘行、山崎芳嗣、岡本三千朗、山本利弘 : Wake Adaoted Propeller に関する実験的研究、第56回西部造船会、1978。
- 31) 足達宏之 : 荷重度変更法の基礎とその応用法について、日本造船学会論文集、第154号、1983。
- 32) 例えば、関西造船協会 (編) : 造船設計便覧、海文堂、他。
- 33) Wang, G. Q, Hu, S. G., : Improvement of Prediction Method, for Propeller Characteristics and Blade Pressure Distributution, Journal of Shipbuilding of China, 1987。
- 34) 木下昌雄 : P B C Fの研究開発 (第2報) に対する討論、日本造船学会論文集、第165号、P307~308, 1989. 6。

付 表

Table 2-1 Particulars of Model Propellers

Table 2-2 Particulars of PBCF and Test Results

Table 2-3 Characteristics of Propeller Open Test Instrument

Table 2-4 Particulars of Propeller and PBCF for Force Measurement

Table 3-1 Particulars of Model Propeller and PBCF

Table 3-2 Comparison of Thrust and Torque on Propeller and PBCF

Table 4-1 Values of Wake Parameters

Table 5-1 Particulars of Model Propeller

Table 5-2 Particulars of Model PBCF

Table 5-3 POT results(without PBCF)

Table 5-4 Reverse POT Results in uniform flow

Table 5-5 Reverse POT Results in non-uniform flow(1)

Table 5-6 Reverse POT Results in non-uniform flow(2)

Table 6-1 Particulars of Experimental Ships

Table 6-2 Change of Force Acting on Rudder by PBCF

Table 7-1 Conditions of Sea Trial

Table 7-2 Result of Sea Trial and Model Test

Table 7-3 Result of Voyage Data and Model Test

Table 2-1 Particulars of Model Propellers

| Model Propeller No. | CP24 | CP25 | CP26 |
|---|------|------|------|
| Diameter (mm) | 220 | 220 | 220 |
| Pitch Ratio | 0.8 | 1.0 | 1.2 |
| Expanded Area Ratio | 0.55 | 0.55 | 0.55 |
| Boss Ratio | 0.18 | 0.18 | 0.18 |
| Blade Thick. Ratio | 0.05 | 0.05 | 0.05 |
| Blade Section | MAU | MAU | MAU |
| Blade No. | 4 | 4 | 4 |
| Pitch Angle in Blade Root (ε) (deg.) | 58.6 | 64.4 | 68.7 |

Table 2-2 Particulars of PBCF and Test Results

| Test No. | a (mm) | b (mm) | α (deg) | r/R | Configura- tion | $\Delta \eta p$ (%) | J |
|----------|-----------|-----------|-------------------|------|--------------------|------------------------|-----|
| CP24-1 | 10 | 7 | 63 | 0.23 | C | 3.93 | 0.6 |
| 24-2 | 10 | 7 | 57 | 0.22 | C | 2.32 | 0.6 |
| 25-1 | 11 | 1 | 55 | 0.25 | C | 3.84 | 0.8 |
| 26-1 | 10 | 5 | 66 | 0.23 | C | 7.66 | 0.9 |

Table 2-3 Characteristics of Propeller Open Test Instrument

| | Thrust | Torque |
|----------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| Max. Capacity | 10 (Kgf) | 0.2 (Kg-m) |
| Zero Balance (@No LOAD) | ± 0.002 (% F.S.) | ± 0.05 (% F.S.) |
| Linearity | ± 0.015 (% F.S.) | ± 0.1 (% F.S.) |
| Sensor Type | SM-10 (Strain gauge) | SS-20 (Phase differential) |
| Maker | Inter face | Ono Sokki |

Table 2-4 Particulars of Propeller and PBCF for Force Measurement

| | | | |
|--|-------|--------------------------|---------|
| Model propeller | N. P. | PBCF | NP-1 |
| Diameter (mm) | 320 | a (mm) | 2 |
| Pitch Ratio(@0.157R) | 0.716 | b (mm) | 10 |
| Expanded Area Ratio | 0.450 | α (deg.) | 60 |
| Boss Ratio | 0.157 | r/R | 0.17 |
| Blade Thick. Ratio | 0.044 | Configuration | C |
| Blade Section | MAU | Fin No. | 4 |
| Blade No. | 4 | $\Delta \eta p (@J=0.5)$ | 1.8 (%) |
| Pitch Angle in Blade Root (ε)(deg.) | 60.2 | | |

Table 3-1 Particulars of Model Propeller and PBCF

| Propeller | |
|---------------------------------|---------------|
| Diameter | 220.0 (mm) |
| Number of Blades | 5 |
| Expanded Arc Ratio | 0.62 |
| Boss Ratio | 0.1888 |
| Pitch Ratio at 0.7R | 0.8904 |
| Maximum Skew | 45.93 (deg.) |
| Maximum Rake | -12.03 (deg.) |
| Blade Thickness Ratio | 0.0405 |
| Type of Blade Section | MAU |
| Pitch Angle in | 61.8 |
| Blade Root (ϵ)(deg.) | |
| PBCF | |
| a | 12 (mm) |
| b | 10 (mm) |
| α | 58 (deg.) |
| γ | 10 (deg.) |
| r/R | 0.286 |

Table 3-2 Comparison of Thrust and Torque on Propeller and PBCF

$J = 0.7$

| | WITH BARE CAP | WITH PBCF | BALANCE |
|-----------|------------------|------------------|-----------------|
| K T | 100.0%(0.162) | 100.6%(0.163) | +0.6%(+0.001) |
| K T c | -0.2%(-0.00032) | -0.2%(-0.00026) | +0.0%(+0.00006) |
| K T p | 100.2%(0.16232) | 100.8%(0.16326) | +0.6%(+0.00094) |
| 1 O K Q | 100.0%(0.268) | 98.5%(0.264) | -1.5%(-0.004) |
| 1 O K Q c | -0.0%(-0.00001) | -1.4%(-0.0037) | -1.4%(-0.00369) |
| 1 O K Q p | 100.0%(0.26801) | 99.9%(0.2677) | -0.1%(-0.00031) |

$J = 0.3$

| | WITH BARE CAP | WITH PBCF | BALANCE |
|-----------|------------------|------------------|-----------------|
| K T | 100.0%(0.340) | 100.9%(0.343) | +0.9%(+0.003) |
| K T c | -0.2%(-0.00065) | -0.1%(-0.00039) | +0.1%(+0.00026) |
| K T p | 100.2%(0.34065) | 101.0%(0.34339) | +0.8%(+0.00274) |
| 1 O K Q | 100.0%(0.479) | 98.7%(0.473) | -1.3%(-0.006) |
| 1 O K Q c | -0.0%(-0.00009) | -1.0%(-0.00477) | -1.0%(-0.00468) |
| 1 O K Q p | 100.0%(0.47909) | 99.7%(0.47777) | -0.3%(-0.00132) |

Table 4-1 Values of Wake Parameters

| | Propeller | PBCF |
|---------------|---|--------------------------|
| β_{TE} | According to (4.8) | $0.5(\beta_I + \beta_G)$ |
| β_w | According to (4.8) | According to (4.8) |
| r_{wt} | $0.95R_P$ | $0.95 R_F$ |
| r_{wh} | $0.050 R_P$ (with PBCF) $0.025 R_P$ (without PBCF) | $0.05 R_P$ |
| θ_{nw} | 180° | 90° |
| X_{fw} | $8.0 R_P$ | $8.0 R_P$ |

Table 5-1 Particulars of Model Propeller

| | |
|------------------------------|----------|
| DIAMETER | 220 (MM) |
| PITCH RATIO | 0.8 |
| BOSS RATIO | 0.18 |
| EXPANDED ARE RATIO | 0.55 |
| MAX BLADE WIDTH RATIO | 0.311 |
| MEAN BLADE WIDTH RATIO | 0.263 |
| MAX BLADE THICKNESS RATIO | 0.050 |
| RAKE ANGLE | 10° |
| NUMBER OF BLADE | 4 |
| BLADE SECTION | MAU |

Table 5-2 Particulars of Model PBCF

| PROPELLER TYPE | INCREASE | CONSTANT | DECREASE |
|-----------------------------------|----------|----------|----------|
| ROOT PITCH ANGLE(ε) | 48.5° | 54.7° | 59.5° |
| PBCF PITCH ANGLE(α) | 57° | 63° | 66° |
| PBCF r/R | 23.2% | 23.5% | 25.8% |

Table 5-3 POT results(without PBCF)

| | INCREASE | CONSTANT | DECREASE |
|-----------|----------------|----------------|----------------|
| J | 0.5587 | 0.5659 | 0.5689 |
| K T | 0.1700(97.5%) | 0.1744(100.0%) | 0.1762(101.0%) |
| I O K Q | 0.2326(96.2%) | 0.2419(100.0%) | 0.2472(102.2%) |
| $\bar{7}$ | 0.6493(100.0%) | 0.6490(100.0%) | 0.6455(99.3%) |

Table 5-4 Reverse POT Results in uniform flow

| | INCREASE | | CONSTANT | | DECREASE | |
|-----------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| | WITHOUT PBCF | WITH PBCF | WITHOUT PBCF | WITH PBCF | WITHOUT PBCF | WITH PBCF |
| J | 0.5525 | 0.5550 | 0.5619 | 0.5656 | 0.5654 | 0.5692 |
| K T | 0.1895(96.9%) | 0.1678(97.6%) | 0.1719(100.0%) | 0.1741(101.3%) | 0.1741(101.3%) | 0.1765(102.7%) |
| I O K Q | 0.2300(95.0%) | 0.2281(95.0%) | 0.2400(100.0%) | 0.2378(98.1%) | 0.2449(102.0%) | 0.2407(100.3%) |
| $\bar{7}$ | 0.6368(99.5%) | 0.6496(101.5%) | 0.6402(100.0%) | 0.6590(102.9%) | 0.6394(99.9%) | 0.6643(103.8%) |

Table 5-5 Reverse POT Results in non-uniform flow(1)

| | INCREASE | | CONSTANT | | DECREASE | |
|-----------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| | WITHOUT PBCF | WITH PBCF | WITHOUT PBCF | WITH PBCF | WITHOUT PBCF | WITH PBCF |
| J | 0.5137 | 0.5158 | 0.5170 | 0.5187 | 0.5210 | 0.5233 |
| K T | 0.1435(98.6%) | 0.1448(99.5%) | 0.1455(100.0%) | 0.1485(100.7%) | 0.1478(101.6%) | 0.1493(102.0%) |
| I O K Q | 0.2018(97.4%) | 0.1997(96.4%) | 0.2071(100.0%) | 0.2040(98.5%) | 0.2142(103.4%) | 0.2094(101.1%) |
| $\bar{7}$ | 0.5812(100.6%) | 0.5848(103.0%) | 0.5777(100.0%) | 0.5925(102.6%) | 0.5724(99.1%) | 0.5936(102.8%) |

Table 5-6 Reverse POT Results in non-uniform flow(2)

| | INCREASE | | CONSTANT | | DECREASE | |
|-----------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| | WITHOUT PBCF | WITH PBCF | WITHOUT PBCF | WITH PBCF | WITHOUT PBCF | WITH PBCF |
| J | 0.4681 | 0.4725 | 0.4732 | 0.4778 | 0.4736 | 0.4798 |
| K T | 0.1192(97.6%) | 0.1216(99.6%) | 0.1221(100.0%) | 0.1249(102.3%) | 0.1223(100.2%) | 0.1252(103.4%) |
| I O K Q | 0.1736(95.5%) | 0.1711(94.1%) | 0.1818(100.0%) | 0.1774(97.6%) | 0.1863(102.5%) | 0.1803(99.2%) |
| $\bar{7}$ | 0.5112(101.1%) | 0.5345(105.7%) | 0.5055(100.0%) | 0.5353(105.9%) | 0.4949(97.9%) | 0.5344(105.7%) |

Table 6-1 Particulars of Experimental Ships

| Ship's Name | Mercury Ace (Pure Car Carrier) | | America Haru (Container Carrier) | |
|---|-----------------------------------|----------|-------------------------------------|--------|
| | Actual | Model | Actual | Model |
| Lpp (m) | 189.8 | 7.095 | 206.0 | 7.45 |
| B | 29.2 | 1.092 | 32.2 | 1.165 |
| D | 28.25 | - | 18.8 | - |
| d | 7.74 | 0.289 | 11.6 | 0.42 |
| Gross Ton. (ton) | 44,800 | - | 31,855 | - |
| Deadweight (mt) | 16,560 | - | 32,210 | - |
| Main Engine Output (ps) | 12,200 | - | 35,500 | - |
| Main Engine R.P.M. (r.p.m.) | 123 | - | 97 | - |
| Propeller | | | | |
| Dia. (mm) | 5,350 | 200.0 | 7,400 | 267.6 |
| Pitch Ratio | 0.8905 | 0.8905 | 1.095 | 1.095 |
| Developed Area Ratio | 0.600 | 0.600 | 0.775 | 0.775 |
| Boss Ratio | 0.1888 | 0.1888 | 0.1800 | 0.1800 |
| Blade Thick. Ratio | 0.05 | 0.05 | 0.04 | 0.04 |
| Blade Section | HAU | HAU | HAU | HAU |
| Blade No. | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Rudder | | | | |
| Maximum Thickness (mm) | 1126 | 42.1 | 1146 | 41.6 |
| Height (mm) | 6800 | 254.2 | 8700 | 315.7 |
| Length in fore/aft derivation (mm) (at shaft center line) | 6080 | 227.3 | 5067 | 183.8 |
| Type | Reaction | Reaction | Normal | Normal |

Table 6-2 Change of Force Acting on Rudder by PBCF

| J | ΔR_f (g) | $\Delta K R_f$ $= \Delta R_f / \rho n^2 D^4$ | $\Delta K R_f / K T$ (%) |
|------|---------------------|---|-----------------------------|
| 0.60 | +14 | 1.2×10^{-3} | 0.35 |
| 0.65 | +12 | 1.0×10^{-3} | 0.31 |
| 0.70 | +9 | 0.8×10^{-3} | 0.27 |
| 0.75 | +7 | 0.6×10^{-3} | 0.22 |
| 0.80 | +6 | 0.5×10^{-3} | 0.21 |
| 0.85 | +6 | 0.5×10^{-3} | 0.23 |
| 0.90 | +5 | 0.4×10^{-3} | 0.21 |
| 0.95 | +6 | 0.5×10^{-3} | 0.30 |
| 1.00 | +7 | 0.6×10^{-3} | 0.43 |

Table 7-1 Conditions of Sea Trial

| Ship's name | Neptune Ace (Without PBCF) | Mercury Ace (With PBCF) |
|-----------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| Date | Aug. 19 & 20 1987 | Sep. 30 & Oct. 1 1987 |
| Place | Hariaa nada | Hariaa nada |
| Weather | Fine | Rain (Sep. 30) Fine (Oct. 1) |
| Wind (m/s) | South 8 | N. East 1.5 |
| Sea condition | Calm sea | Calm sea |
| Ship condition | abt. 47 % D.V. | abt. 47 % D.V. |
| Temp. of water (deg.) | 28 | 23 |
| Spec. grav. of w. | 1.021 | 1.022 |
| d.f.p. (m) | 6.824 | 6.81 |
| d.A.p. (m) | 6.746 | 6.71 |
| Trim (m) | -0.078 | -0.10 |
| Disp. weight (mt) | 20.815 | 20.789 |

Table 7-2 Result of Sea Trial and Model Test

| | 船種 | 総トン (TON) | 主機出力 (PS) | プロペラ | | | 比較対象 | ΔK_s (%) | Δrpm (%) | Δrpm (%) |
|----|------|-----------------|--------------|-----------|-----------|----------|------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | | | | 直径 (M) | 展開 面積比 | ピッチ 比 | | | | |
| 1 | 自動車 | 44,979 | 12,500 | 5.35 | 0.60 | 0.89 | 0.19 | 5 | 3.9 | 1.2 |
| 2 | 冷凍 | 13,700 | 9,700 | 5.55 | 0.50 | 0.81 | 0.16 | 4 | 3.3 | 0.8 |
| 3 | 自動車 | 31,200 | 10,500 | 5.50 | 0.67 | 1.05 | 0.17 | 5 | 4.9 | 3 |
| 4 | 自動車 | 55,600 | 15,900 | 6.80 | 0.59 | 1.03 | 0.16 | 5 | 3.2 | 1 |
| 5 | 自動車 | 55,600 | 15,900 | 6.60 | 0.59 | 1.03 | 0.16 | 5 | 3.2 | 1 |
| 6 | コンテナ | 41,700 | 37,890 | 8.10 | 0.73 | 1.08 | 0.16 | 5 | 8.4 | 0.5 |
| 7 | 自動車 | 57,000 | 16,600 | 6.40 | 0.63 | 1.03 | 0.17 | 5 | 2.6 | 0.8 |
| 8 | コンテナ | 51,000 | 39,000 | 8.55 | 0.65 | 1.06 | 0.16 | 4 | 4.6 | 1 |
| 9 | コンテナ | 41,400 | 37,890 | 7.70 | 0.81 | 1.21 | 0.17 | 5 | 1.9 | 0.8 |
| 10 | 自動車 | 499 2 x 1,000 | 2,23 | 0.52 | 0.92 | 0.16 | 0.16 | 4 | 6.7 | 2 |
| 11 | コンテナ | 41,300 | 32,000 | 8.00 | 0.61 | 1.01 | 0.17 | 5 | 4.5 | 2 |
| 12 | チップ | 38,800 | 9,400 | 6.25 | 0.43 | 0.69 | 0.13 | 4 | 3.3 | 1 |
| 13 | タンカー | 59,200 | 15,300 | 7.30 | 0.49 | 0.63 | 0.17 | 4 | 3 | 1.8 |
| 14 | タンカー | 146,600 | 29,600 | 9.80 | 0.38 | 0.70 | 0.14 | 4 | 4.8 | 1.9 |
| 15 | タンカー | 3,200 2 x 2,000 | 2.72 | 0.44 | 0.61 | 0.14 | 0.14 | 4 | 5.3 | 0.5 |
| 16 | LPG | 41,800 | 16,800 | 7.20 | 0.55 | 0.67 | 0.17 | 4 | 5 | 1.3 |
| 平均 | | | | | | | | 4.3 | 0.9 | 1.7 |

Table 7-3 Result of Voyage Data and Model Test

| 船種 | 総トン (TON) | 主機 出力 (PS) | プロペラ | | | データ採取期間 | | ΔKs (%) | Δrpm (%) | Δrpm (%) | | |
|---------|--------------|------------------|-----------|-----------|----------|-----------|-------|--------------------|---------------------|---------------------|-------|-----|
| | | | 直径 (M) | 展開 面積比 | ピッチ 比 | ボス比 翼数 | PBCF有 | | | | PBCF無 | |
| 1 コンテナ | 2,646 | 9,600 | 4.40 | 0.69 | 0.96 | 0.16 | 4 | 89.8-90.3 | 88.8-89.8 | 5.9 | 0.8 | 1.7 |
| 2 自動車 | 6,531 | 8,200 | 4.10 | 0.70 | 0.91 | 0.18 | 4 | 88.8-88.10 | 87.8-87.10 | 8.5 | | 2.6 |
| 3 自動車 | 34,226 | 15,360 | 5.60 | 0.73 | 0.92 | 0.18 | 5 | 89.4-89.11 | 88.4-88.10 | 4.9 | 1.2 | 2.4 |
| 4 コンテナ | 35,610 | 43,720 | 7.65 | 0.64 | 1.03 | 0.18 | 5 | 90.10-91.6 | 88.12-90.9 | 5.1 | 0.5 | 2.0 |
| 5 チップ | 36,182 | 12,000 | 6.14 | 0.58 | 0.62 | 0.16 | 4 | 88.9-89.6 | 86.9-87.9 | 2.8 | | 1.9 |
| 6 コンテナ | 36,912 | 27,300 | 7.40 | 0.65 | 1.03 | 0.18 | 5 | 91.3-91.6 | 90.6-91.1 | 3.9 | 1.5 | 1.9 |
| 7 コンテナ | 41,700 | 37,890 | 8.10 | 0.73 | 1.08 | 0.16 | 5 | 88.3-88.9 | 88.3-88.9 | 2.9 | | 2.6 |
| 8 自動車 | 47,350 | 16,800 | 5.80 | 0.73 | 0.95 | 0.18 | 5 | 89.6-89.12 | 87.3-89.6 | 6.3 | 0.5 | 2.4 |
| 9 タンカー | 59,289 | 13,800 | 7.40 | 0.48 | 0.88 | 0.17 | 4 | 89.4-89.5 | 87.11-89.3 | 9.9 | 1.0 | 1.7 |
| 10 タンカー | 67,798 | 16,235 | 8.00 | 0.46 | 0.71 | 0.15 | 4 | 90.7-91.6 | 87.7-88.7 | 3.5 | 0.5 | 1.6 |
| 11 鉱石 | 69,996 | 14,700 | 6.80 | 0.54 | 0.77 | 0.16 | 5 | 89.3-89.8 | 87.4-88.6 | 6.1 | 0.9 | 1.8 |
| 12 鉱石 | 98,587 | 20,700 | 7.90 | 0.58 | 0.62 | 0.16 | 4 | 89.2-89.6 | 85.2-86.2 | 4.4 | 0.6 | 2.4 |
| 平均 | | | | | | | | | | 5.4 | 0.8 | 2.1 |

Fig. 1-1 Energy Losses of Screw Propeller

Fig. 2-1 Outline of PBCF

Fig. 2-2 Installation of Fins

Fig. 2-3 Configuration of Fins

Fig. 2-4 Hub Vortex Visualized by Dye Injection Method

Fig. 2-5 Hub Vortex Visualized by Air Bubble Injection Method

Fig. 2-6 Hub Vortex Cavitation in the Propeller Slipstream($\sigma n=1.88$)

Fig. 2-7 Hub Vortex Cavitation in the Propeller Slipstream($\sigma n=1.0$)

Fig. 2-8 Tuft Arrangement

Fig. 2-9 Flow Around Boss Cap Visualized by Tuft Method

Fig. 2-10 Arrangement of Propeller Open Test

Fig. 2-11 Change of Propeller Performance by PBCF

Fig. 2-12 Relation between $\Delta \eta_p$ and r/R

Fig. 2-13 Relation between $\Delta \eta_p$ and α

Fig. 2-14 Inclination of Fins

Fig. 2-15 Effect of γ on $\Delta \eta_p$

Fig. 2-16 Fin Arrangement

Fig. 2-17 Effect of Fin's Number on $\Delta \eta_p$

Fin. 2-18 Relation between Advance Coefficient and Force Acting on PBCF

Fin. 2-19 Force Acting on Fin

- Fin. 3-1 Coordinate System
- Fig. 3-2 Picture of Model Propeller and PBCF Set-up
- Fig. 3-3 Set-up for Flow Velocity Measurement Behind Propeller
- Fig. 3-4 3-D Vectors of Flow Velocities Behind Propeller(V_x, V_θ, V_r)
- Fig. 3-5 2-D Vectors of Flow Velocities Behind Propeller(V_x, V_r)
- Fig. 3-6 2-D Vectors of Flow Velocities Behind Propeller(V_θ, V_r)
- Fig. 3-7 2-D Vectors of Flow Velocities Behind Propeller(V_x, V_θ)
- Fig. 3-8 Flow Velocities Behind Propeller($J=0.7$)
- Fig. 3-9 Difference of Flow Velocities Behind Propeller Between with and without PBC($J=0.7$)
- Fig. 3-10 Hydrodynamic Pitch Angles of Flow Behind Propeller
- Fig. 3-11 Pressure Distribution in Propeller Slipstream
- Fig. 3-12 Improvement of Propeller Performance by PBCF
- Fig. 3-13 Thrust and Torque Gauge Arrangement
- Fig. 3-14 Thrust and Torque Acting on Propeller with PBCF and with Bear Cap
- Fig. 3-15 Thrust and Torque Acting on PBCF and Bear Cap
- Fig. 3-16 Schematic Drawing of Flow Field and Hydrodynamic Force on Propeller and PBCF
-
- Fig. 4-1 Coordinate System
- Fig. 4-2 Wake Model
- Fig. 4-3 Arrangement of Vortex Lattices and Source Panels
- Fig. 4-4 Trailing Vortex Positions Obtained from Wake Alignment
- Fig. 4-5 Calculated Circulation on Propeller

- Fig. 4-6 Calculated Circulation on PBCF
- Fig. 4-7 Comparison of Calculated Slipstream Velocity Distributions
with LDV Measurements($X/D=0.273$)
- Fig. 4-8 Comparison of Calculated Slipstream Velocity Distributions
with LDV Measurements($X/D=1.023$)
- Fig. 4-9 Calculated Pressure Distribution on PBCF
- Fig. 4-10 Calculated Inflow Angle Towards PBCF
- Fig. 4-11 Comparison of Calculated Total Forces with Measurements
- Fig. 4-12 Comparison of Calculated Forces Acting on Propeller
with Measurements
- Fig. 4-13 Comparison of Calculated Forces Acting on PBCF or Boss Cap
with Measurements
-
- Fig. 5-1 Pitch Distribution of Model Propeller
- Fig. 5-2 Outline of Model Propeller and PBCF
- Fig. 5-3 Arrangement of Test Equipments
- Fig. 5-4 Wake Distribution of Uniform Flow
- Fig. 5-5 Wake Distribution of Non-uniform Flow(1)
- Fig. 5-6 Wake Distribution of Non-uniform Flow(2)
- Fig. 5-7 Propeller Open-Water Efficiency of Model Propeller
(without PBCF)
- Fig. 5-8 Propeller Efficiency Gain By PBCF in Uniform Flow
- Fig. 5-9 Propeller Efficiency Gain By PBCF in Non-uniform Flow(1)
- Fig. 5-10 Propeller Efficiency Gain By PBCF in Non-uniform Flow(2)

- Fig. 6-1 Flow Visualized By Tuft method(with/without Rudder)
- Fig. 6-2 Arrangement of Reverse POT with Rudder
- Fig. 6-3 Change of $\Delta \eta_p$ by Rudder
- Fig. 6-4 Change of Self Propulsion Efficiency by PBCF
- Fig. 6-5 Change of Self Propulsion Factors by PBCF
-
- Fig. 7-1 PBCF Installation on "Mercury Ace"
- Fig. 7-2 Speed Trial Result
- Fig. 7-3 Turning Circle Test Result
- Fig. 7-4 Crash Astern Test Result
- Fig. 7-5 Analysis of Voyage Data
- Fig. 7-6 Correlation of Efficiency Gains by PBCF Between Model and
Actual Ship
- Fig. 7-7 Possible View for Difference of Flow Field Between Model and
Full Scale

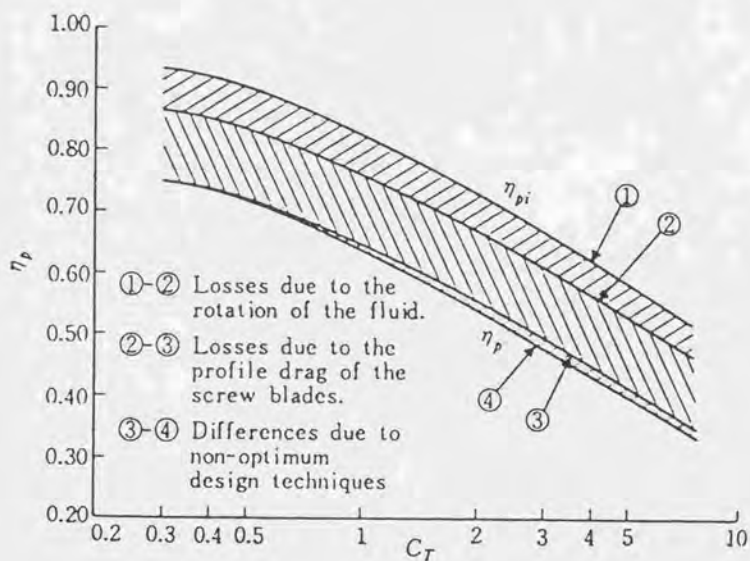


Fig. 1-1 Energy Losses of Screw Propeller

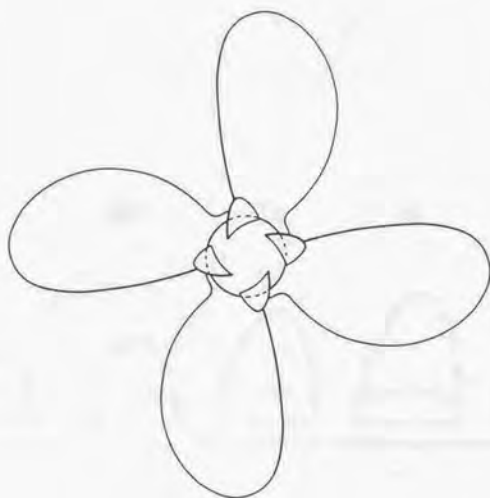
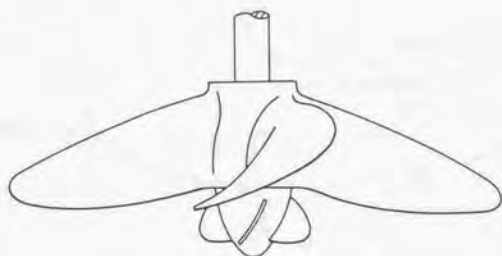


Fig. 2-1 Outline of PECF

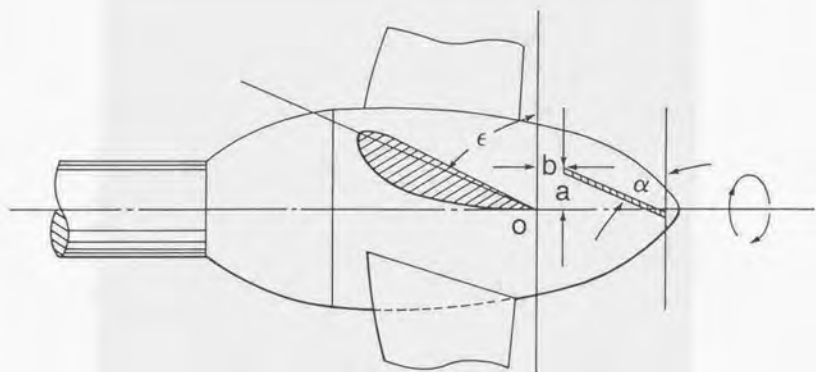


Fig. 2-2 Installation of Fins

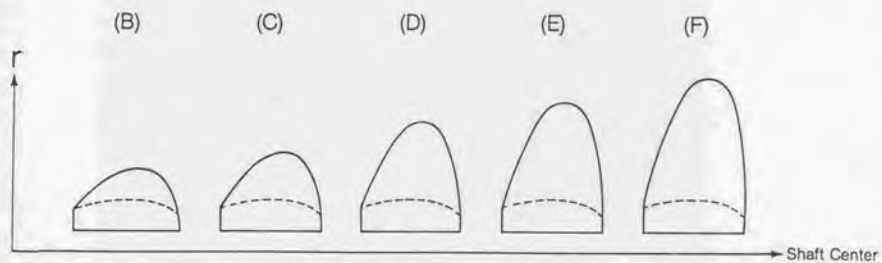
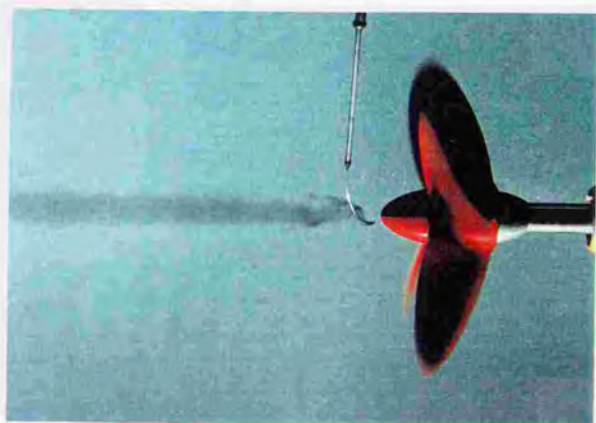


Fig. 2-3 Configuration of Fins

< without PBCF >



< with PBCF >



Fig. 2-4 Hub Vortex Visualized by Dye Injection Method

< without PBCF >

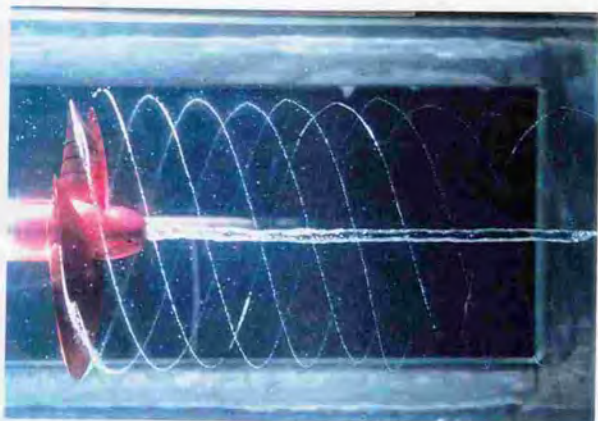


< with PBCF >



Fig. 2-5 Hub Vortex Visualized by Air Bubble Injection Method

< without PBCF >



< with PBCF >

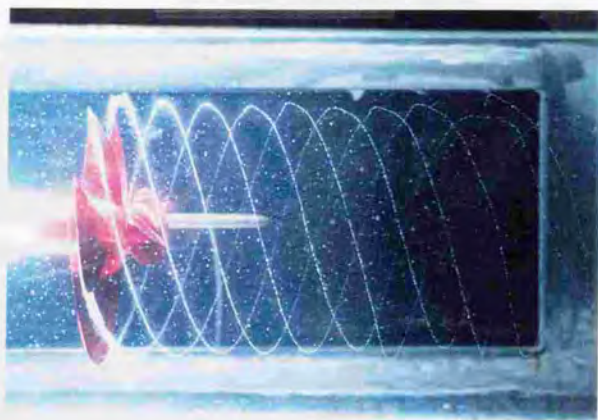


Fig. 2-6 Hub Vortex Cavitation in the Propeller Slipstream($\sigma n=1.88$)

< without PBCF >



< with PBCF >

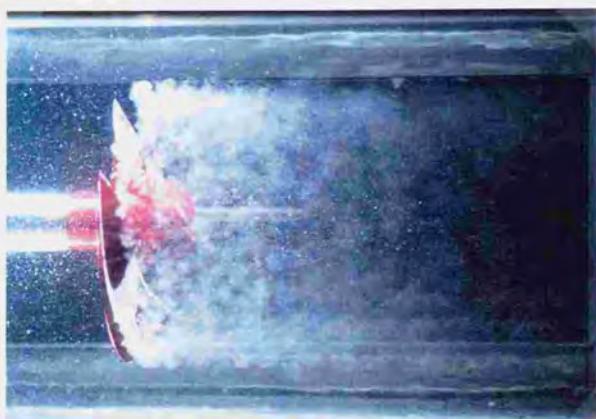


Fig. 2-7 Hub Vortex Cavitation in the Propeller Slipstream($\sigma_n=1.0$)

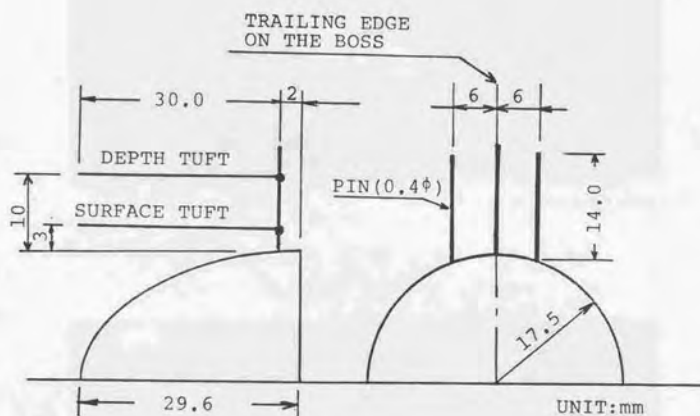
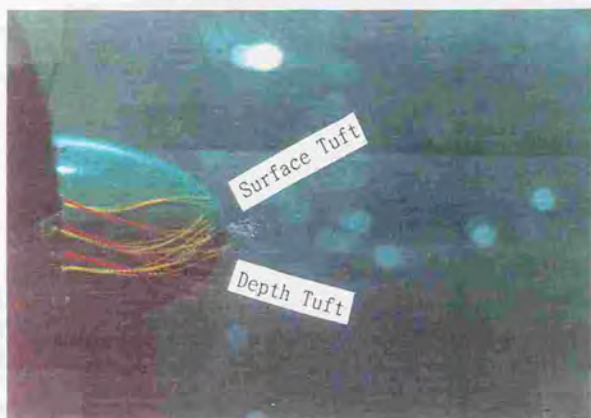


Fig.2-8 Tuft Arrangement

< without PBCF >



< with PBCF >



Fig. 2-9 Flow Around Boss Cap Visualized by Tuft Method

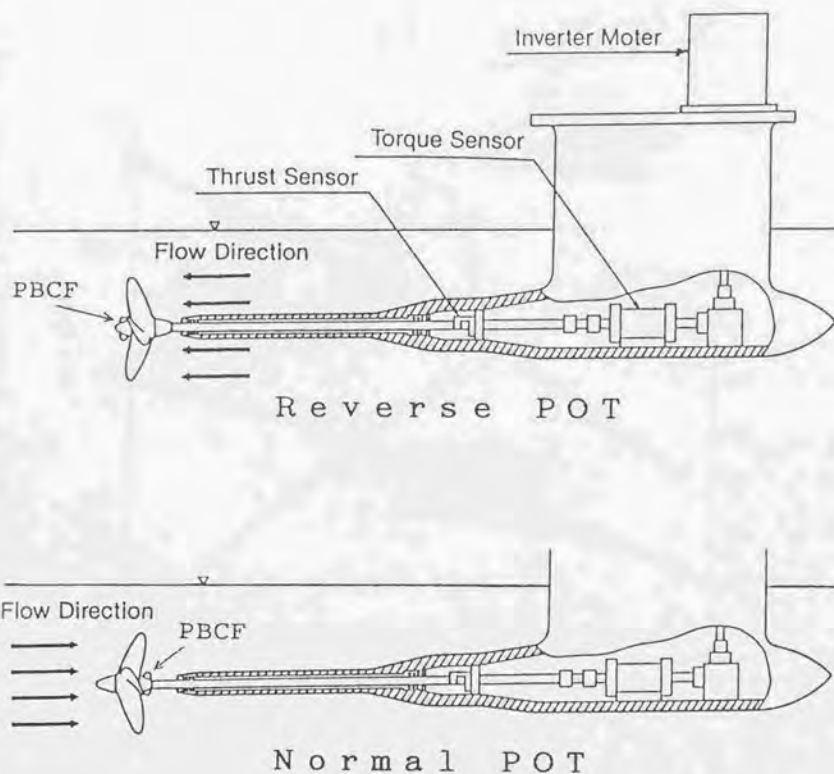


Fig. 2-10 Arrangement of Propeller Open Test

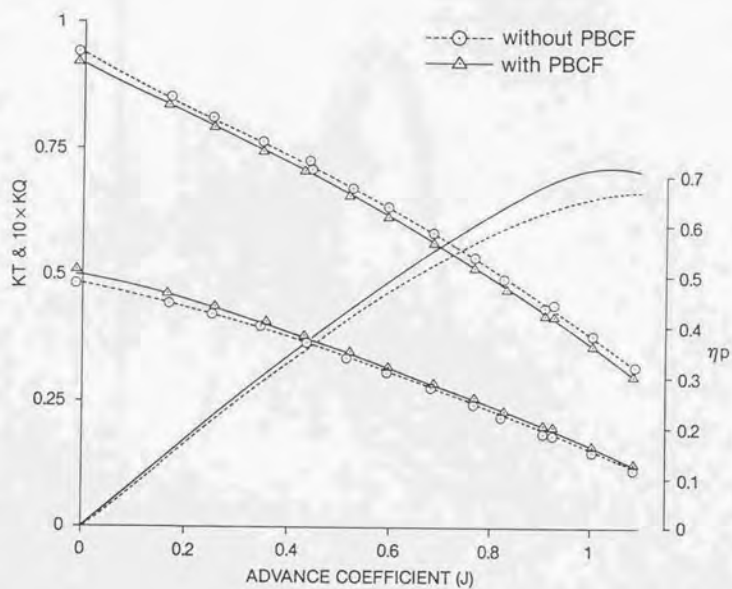


Fig.2-11 Change of Propeller Performance by PBCF

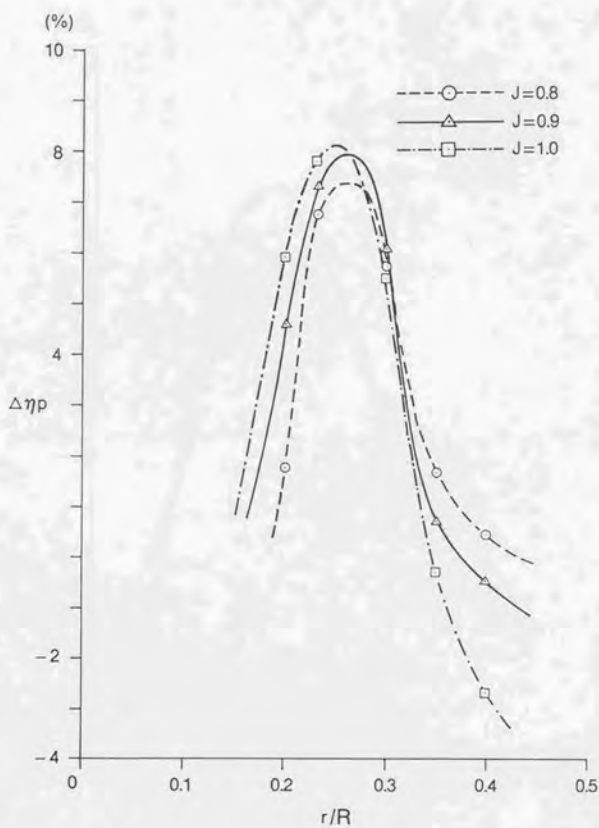


Fig. 2-12 Relation between $\Delta\eta_p$ and r/R

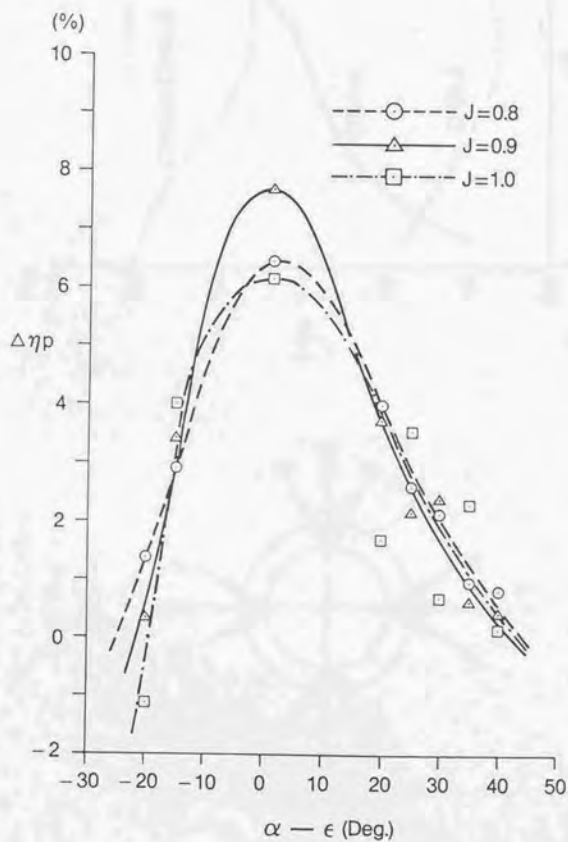


Fig. 2-13 Relation between $\Delta\eta_p$ and α

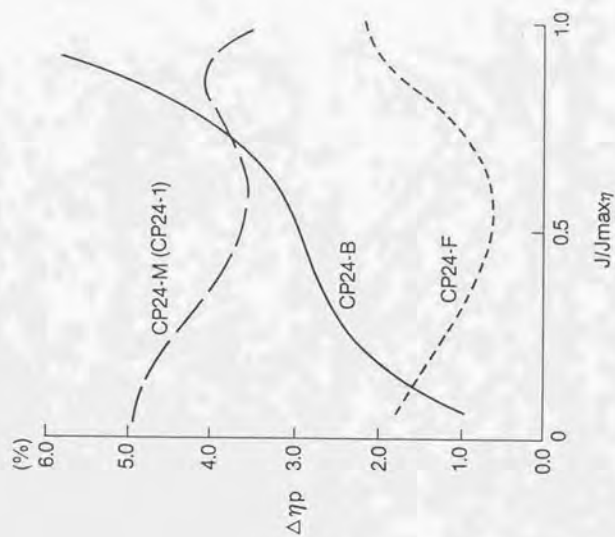


Fig. 2-15 Effect of γ on $\Delta\eta_p$

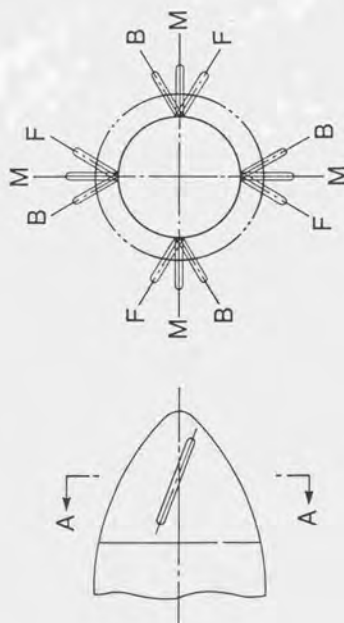


Fig. 2-14 Inclination of Fins

- 4 Fins (CP24-N4)
- 2 Fins (CP24-N2)
- △ 3 Fins (CP24-N3)
- 5 Fins (CP24-N5)

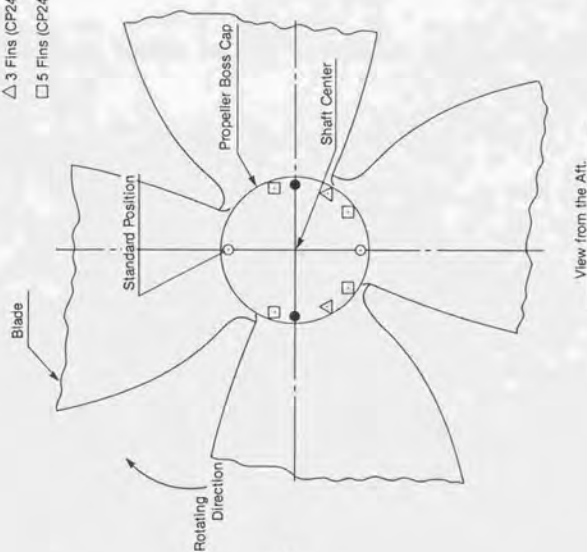


Fig. 2-16 Fin Arrangement

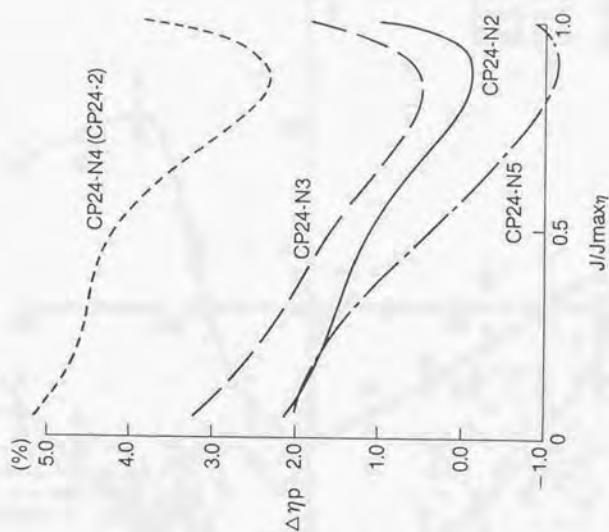
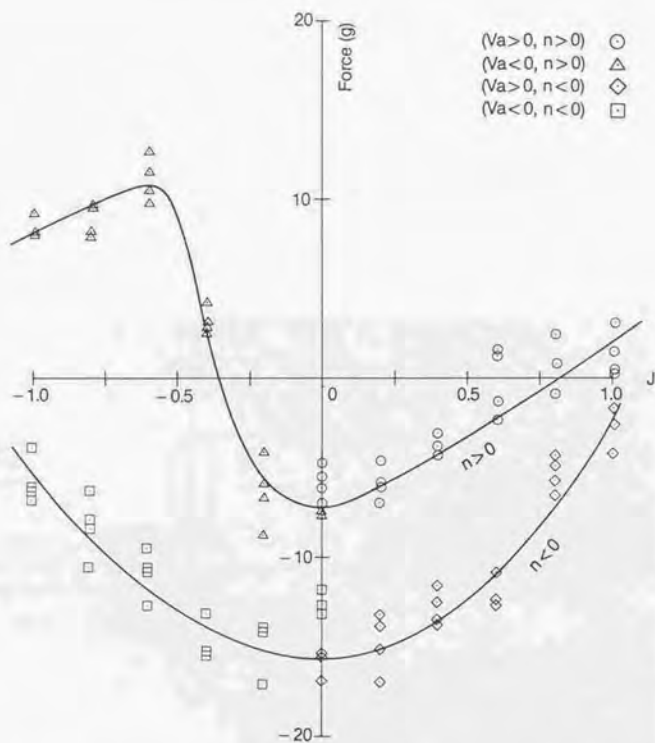
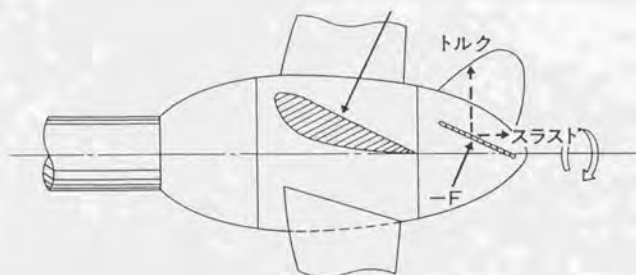


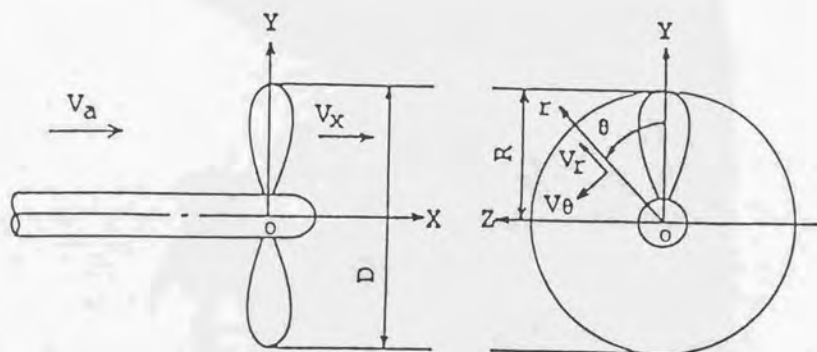
Fig. 2-17 Effect of Fin's Number on $\Delta \eta_p$



Fin. 2-18 Relation between Advance Coefficient and Force Acting on PBCF



Fin. 2-19 Force Acting on Fin



Looking from portside

Looking from aft

Fin. 3-1 Coordinate System



Fig.3-2 Picture of Model Propeller and PBCF Set-up

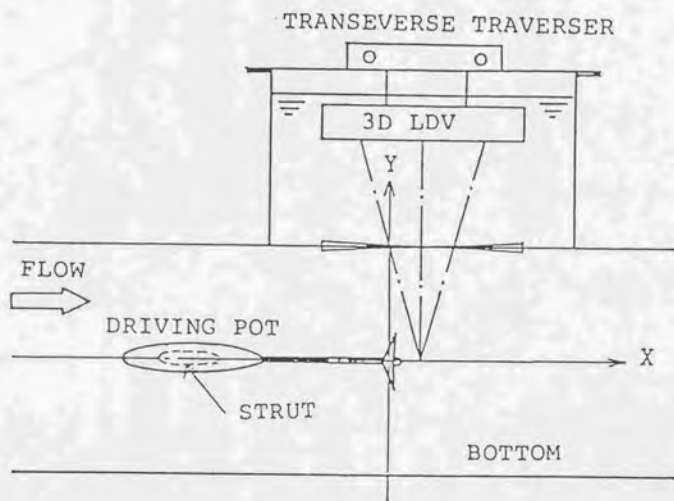


Fig.3-3 Set-up for Flow Velocity Measurement Behind Propeller

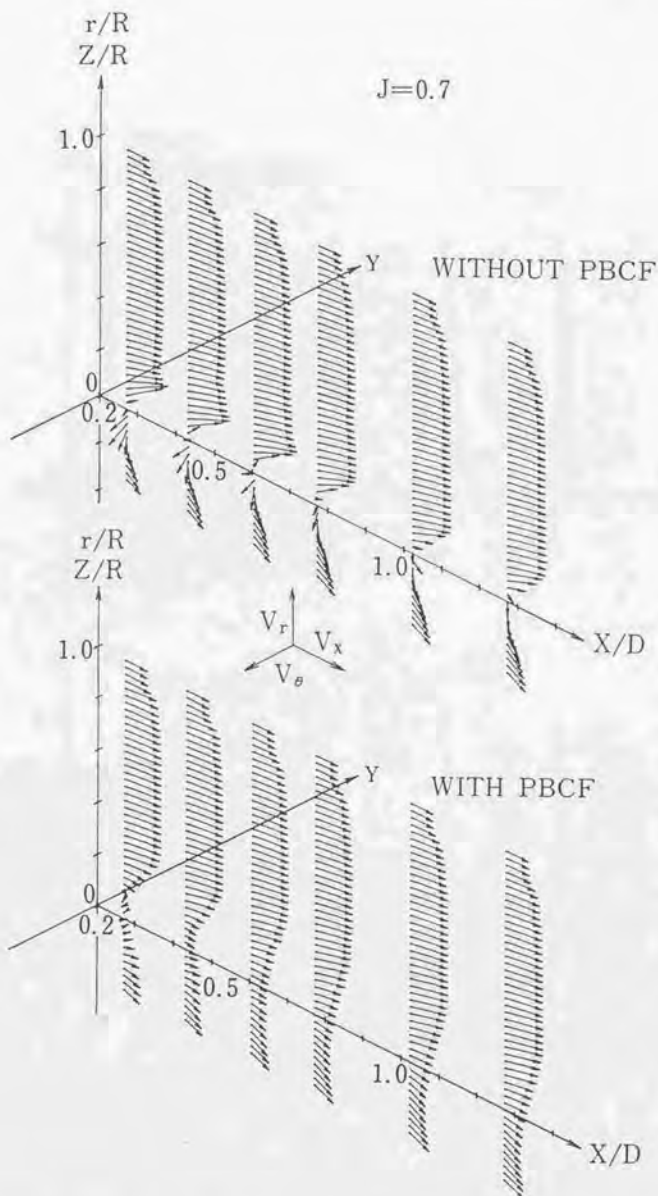


Fig. 3-4 3-D Vectors of Flow Velocities Behind Propeller(V_x, V_θ, V_r)

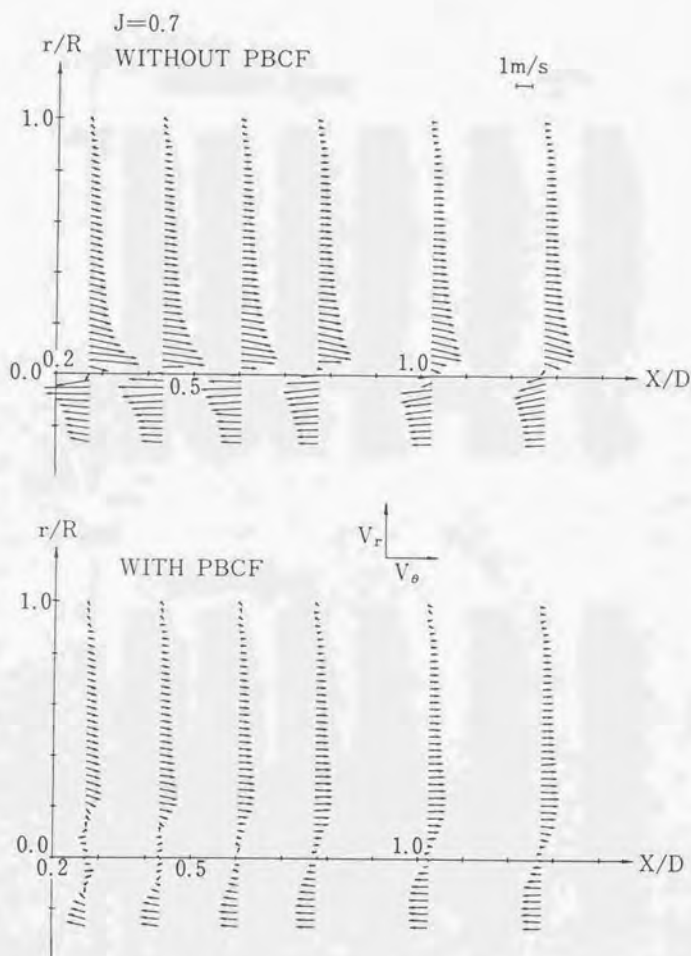


Fig. 3-5 2-D Vectors of Flow Velocities Behind Propeller(V_x, V_r)

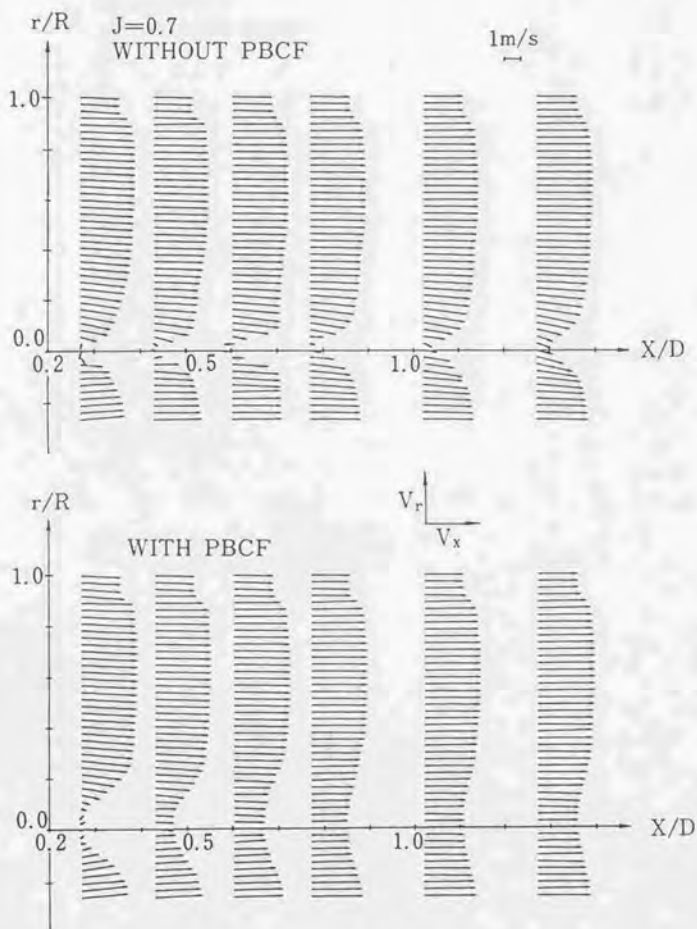


Fig. 3-6 2-D Vectors of Flow Velocities Behind Propeller(V_θ, V_r)

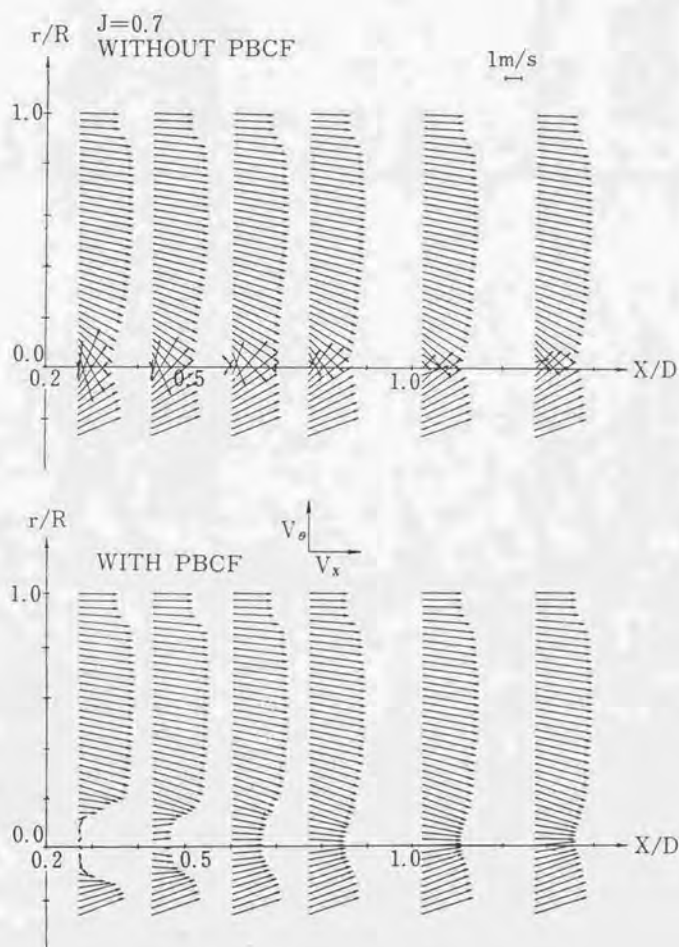


Fig.3-7 2-D Vectors of Flow Velocities Behind Propeller(V_x, V_θ)

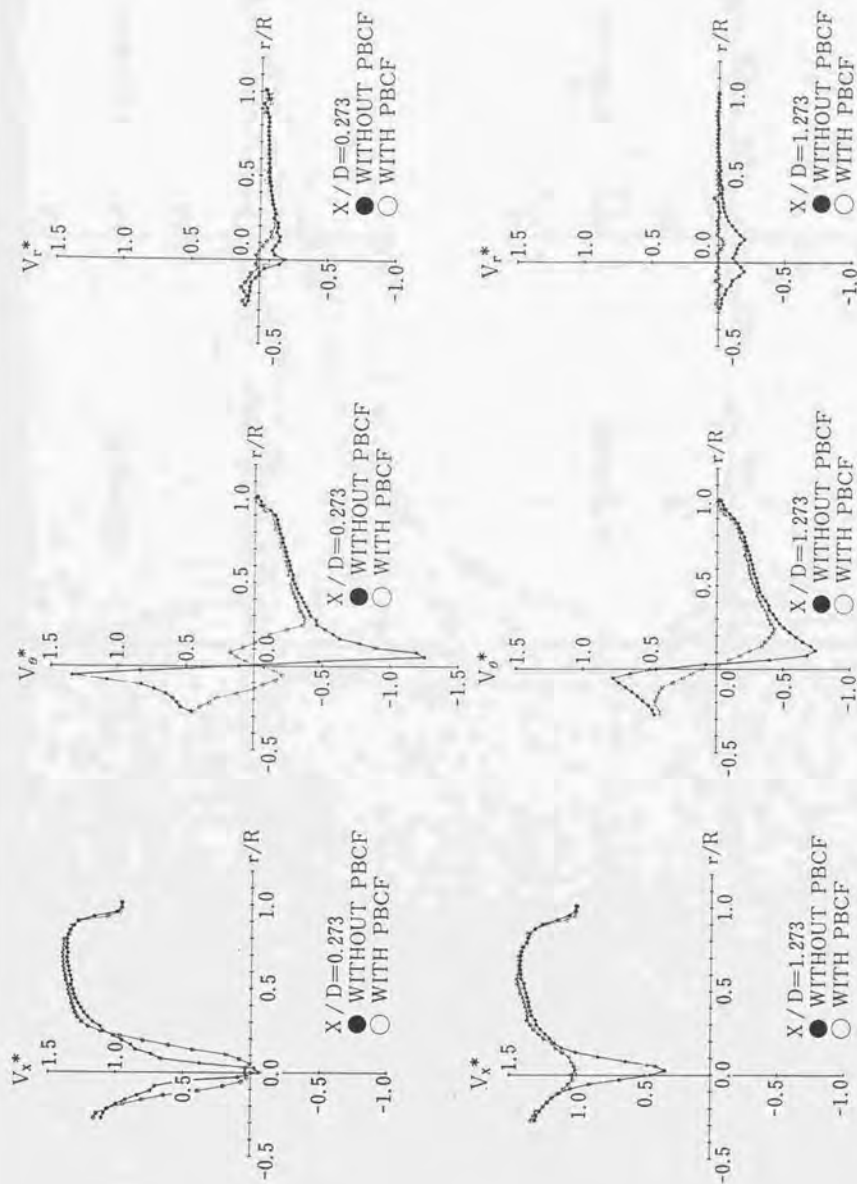


Fig. 3-8 Flow Velocities Behind Propeller ($J=0.7$)



Fig. 3-9 Difference of Flow Velocities Behind Propeller Between with and without PBC ($J=0.7$)

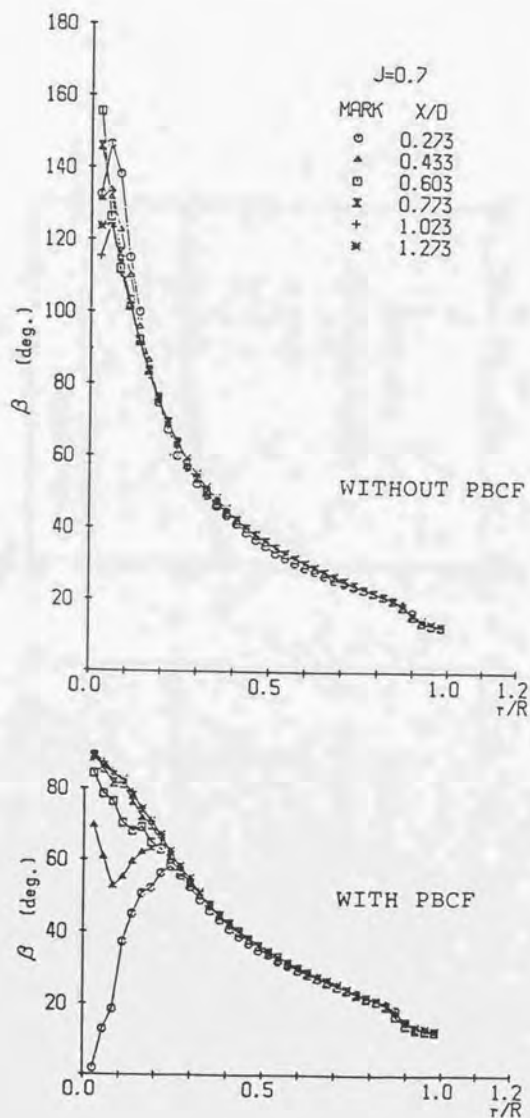


Fig. 3-10 Hydrodynamic Pitch Angles of Flow Behind Propeller

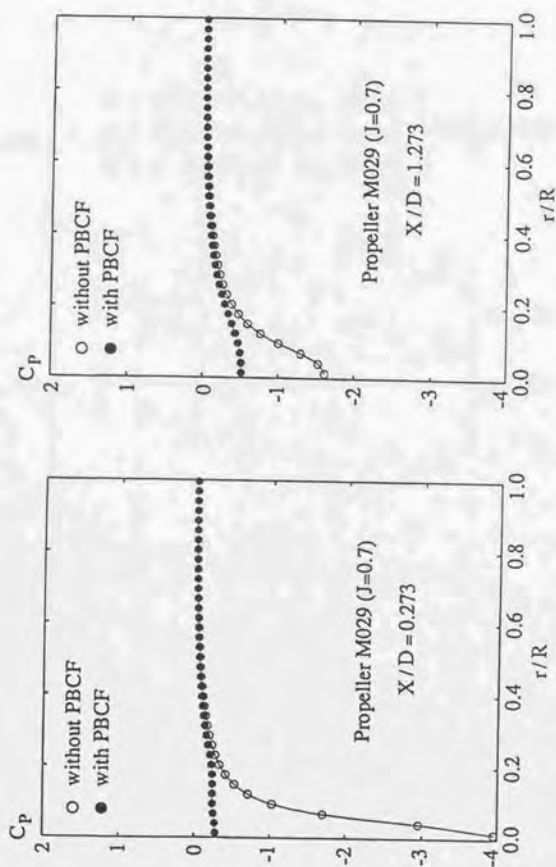


Fig. 3-11 Pressure Distribution in Propeller Slipstream

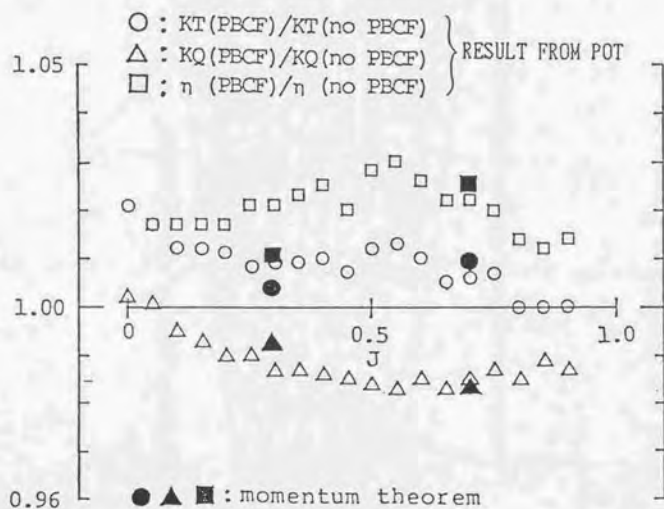


Fig. 3-12 Improvement of Propeller Performance by PBCF

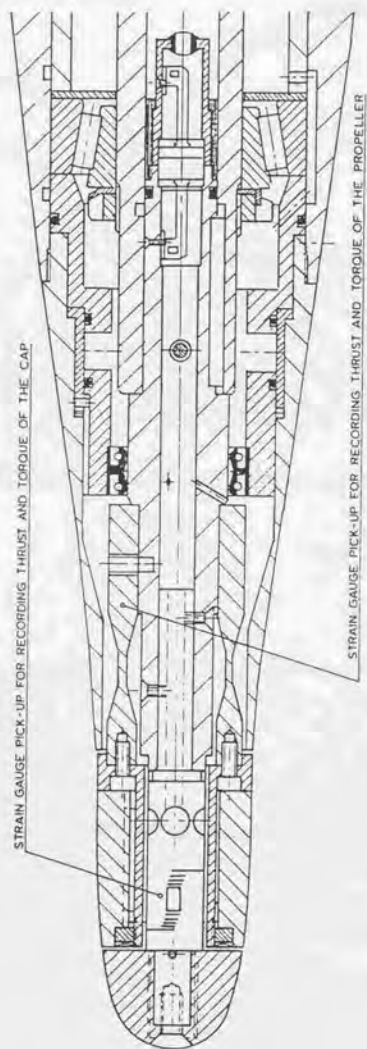


Fig. 3-13 Thrust and Torque Gauge Arrangement

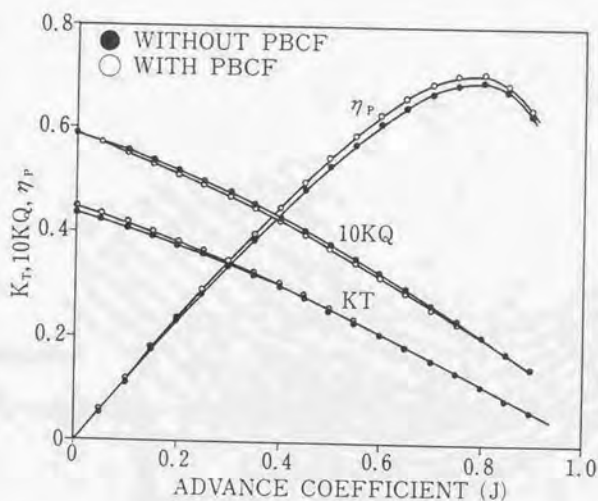


Fig.3-14 Thrust and Torque Acting on Propeller with PBCF and with Bear Cap

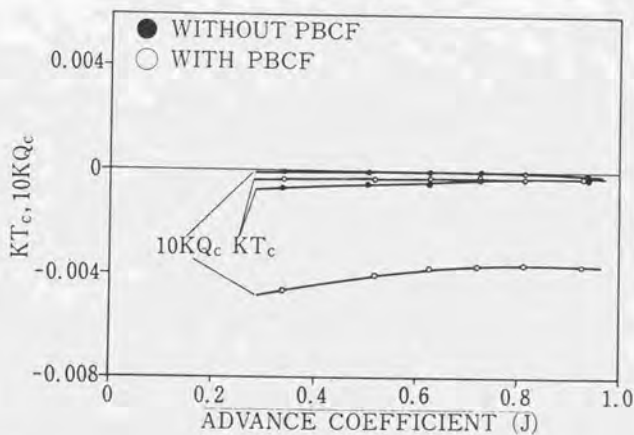


Fig.3-15 Thrust and Torque Acting on PBCF and Bear Cap

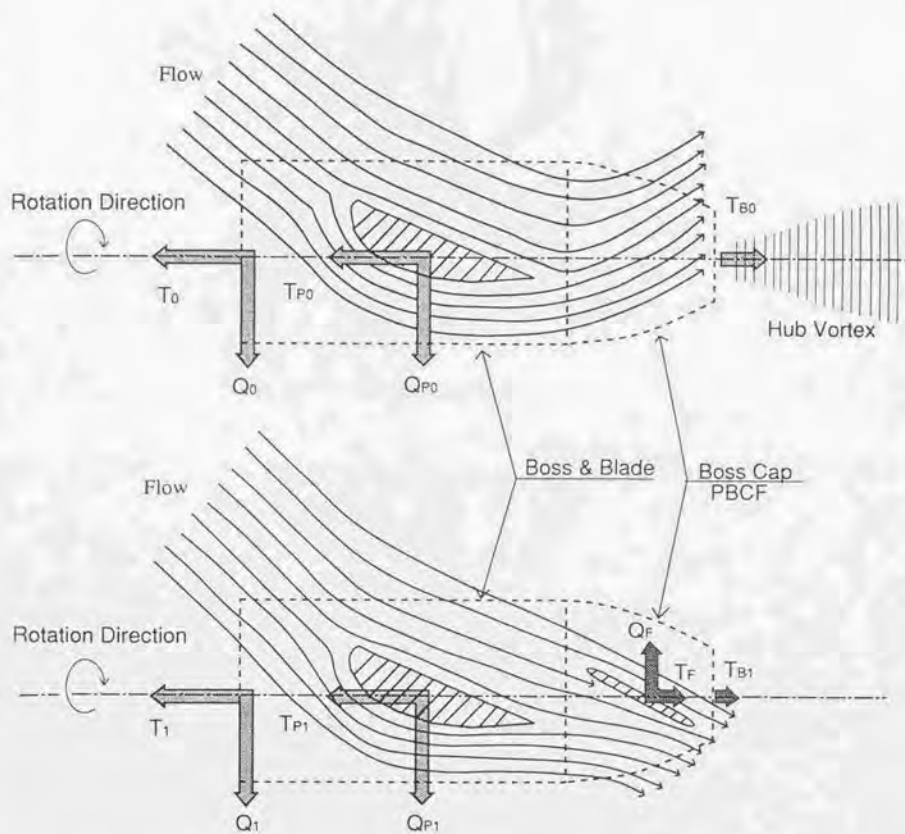


Fig.3-16 Schematic Drawing of Flow Field and Hydrodynamic Force on Propeller and PBCF

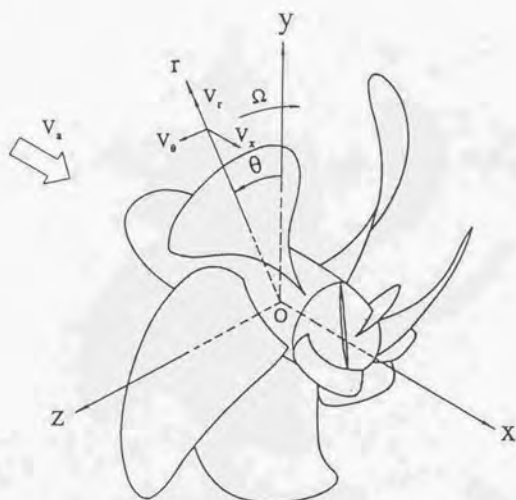


Fig. 4-1 Coordinate System

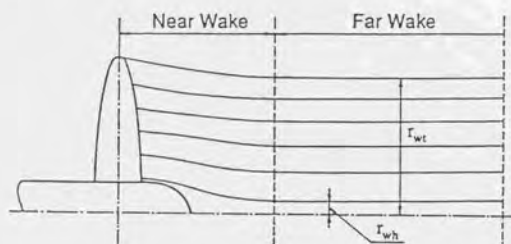
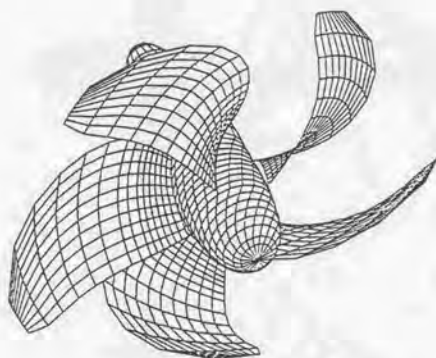
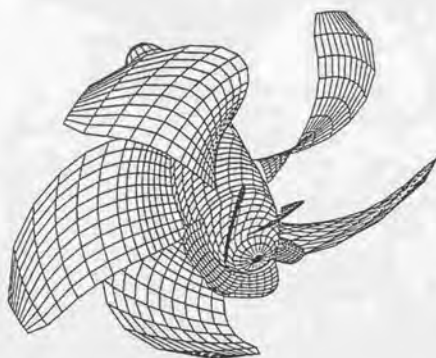


Fig. 4-2 Wake Model

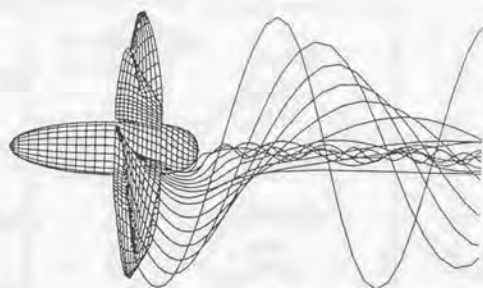


(a) without PBCF

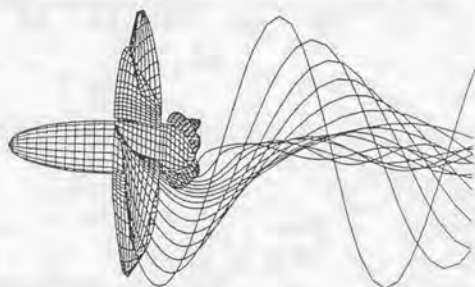


(b) with PBCF

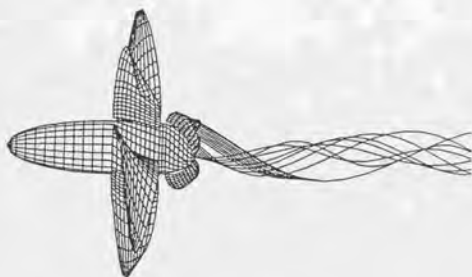
Fig. 4-3 Arrangement of Vortex Lattices and Source Panels



(a) without PBCF



(b) with PBCF



(c) with PBCF

Fig. 4-4 Trailing Vortex Positions Obtained from Wake Alignment

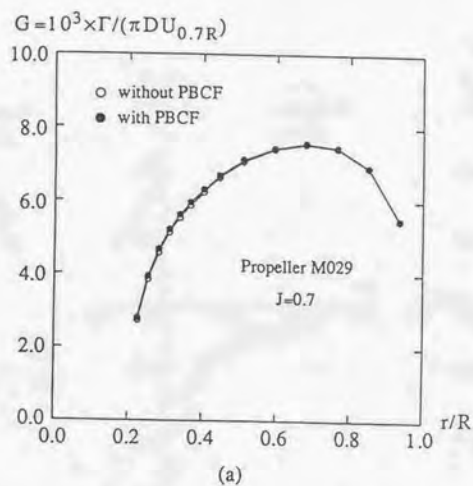


Fig. 4-5 Calculated Circulation on Propeller

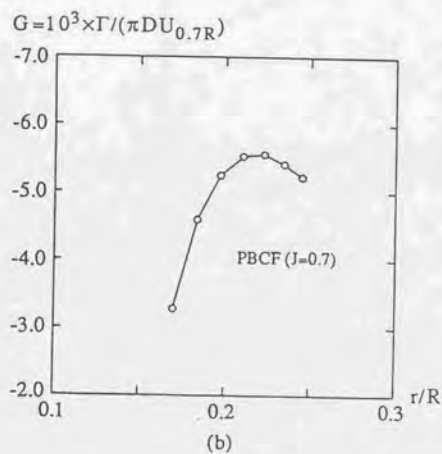
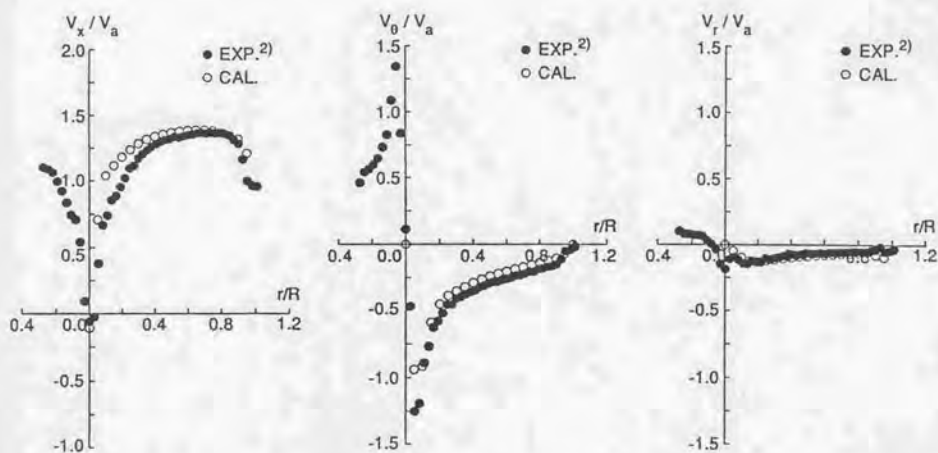
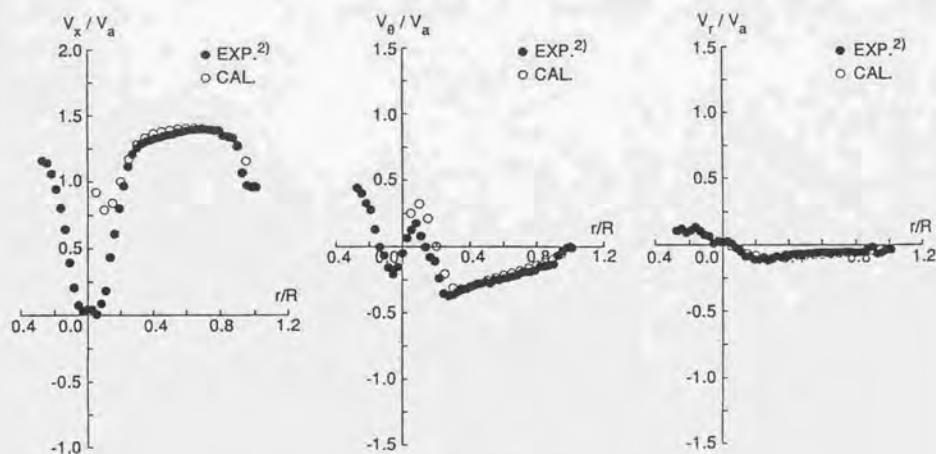


Fig. 4-6 Calculated Circulation on PBCF

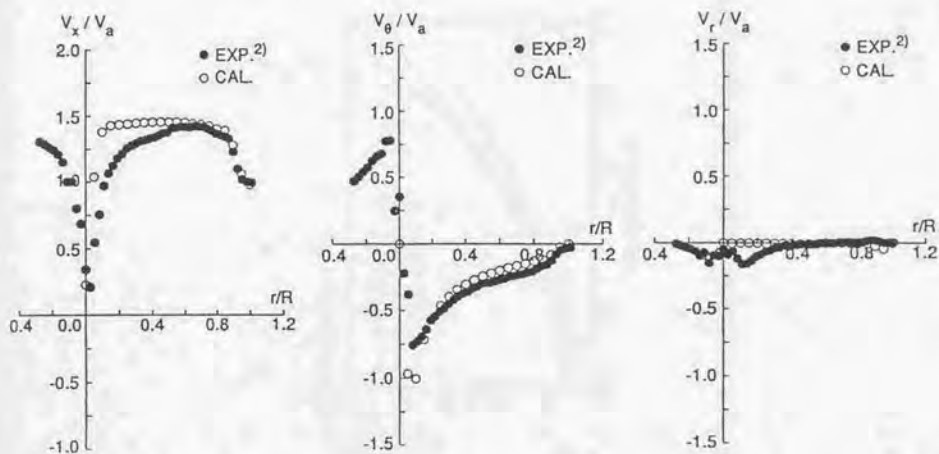


without PBCF, $X/D=0.273$

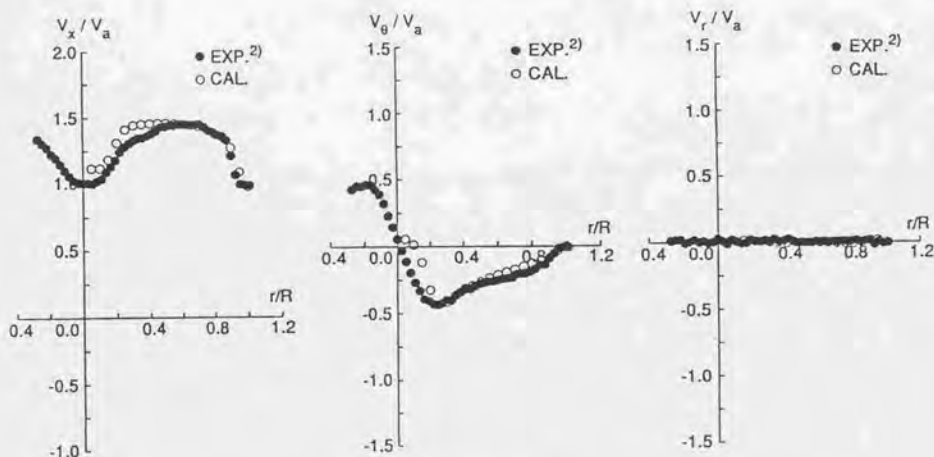


with PBCF, $X/D=0.273$

Fig. 4-7 Comparison of Calculated Slipstream Velocity Distributions
with LDV Measurements ($X/D=0.273$)



without PBCF, $X/D=1.023$



with PBCF, $X/D=1.023$

Fig.4-8 Comparison of Calculated Slipstream Velocity Distributions
with LDV Measurements($X/D=1.023$)

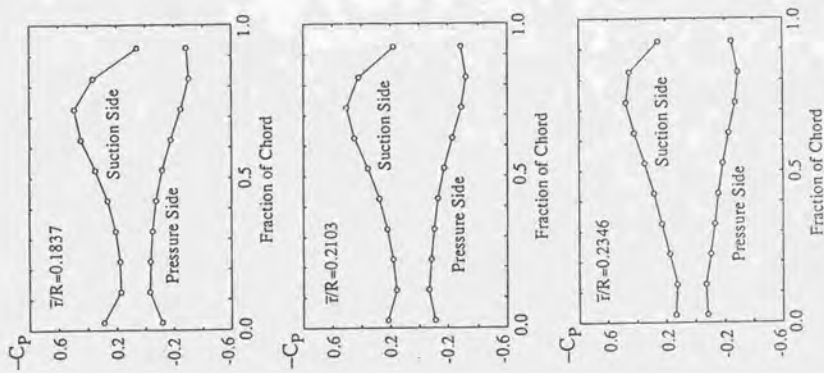


Fig. 4-9 Calculated Pressure Distribution on PBCF

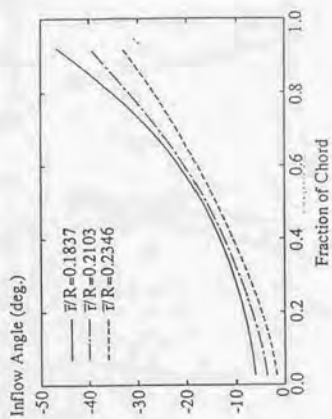


Fig. 4-10 Calculated Inflow Angle Towards PBCF

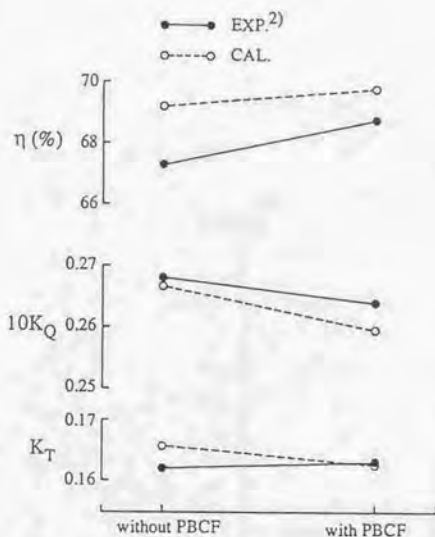


Fig. 4-11 Comparison of Calculated Total Forces with Measurements

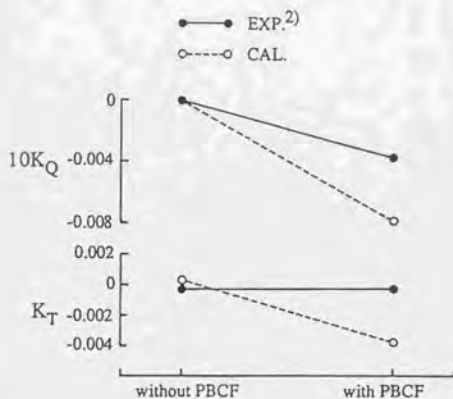


Fig. 4-12 Comparison of Calculated Forces Acting on Propeller with Measurements

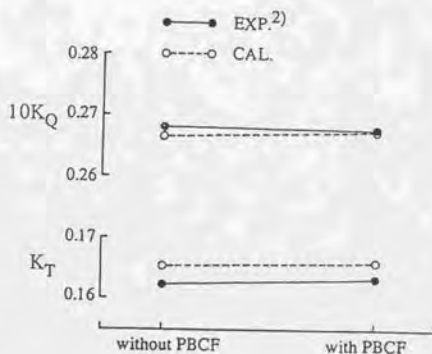


Fig. 4-13 Comparison of Calculated Forces Acting on PBCF or Boss Cap with Measurements

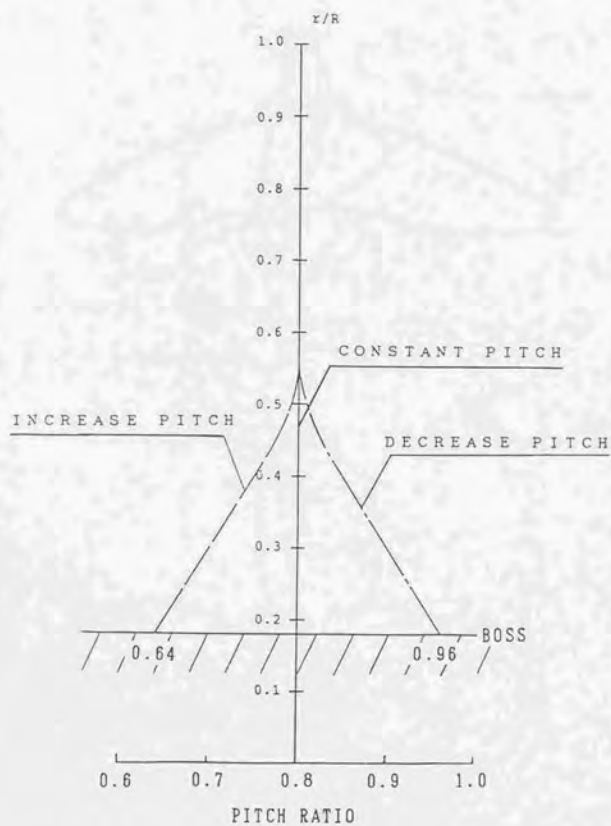


Fig. 5-1 Pitch Distribution of Model Propeller

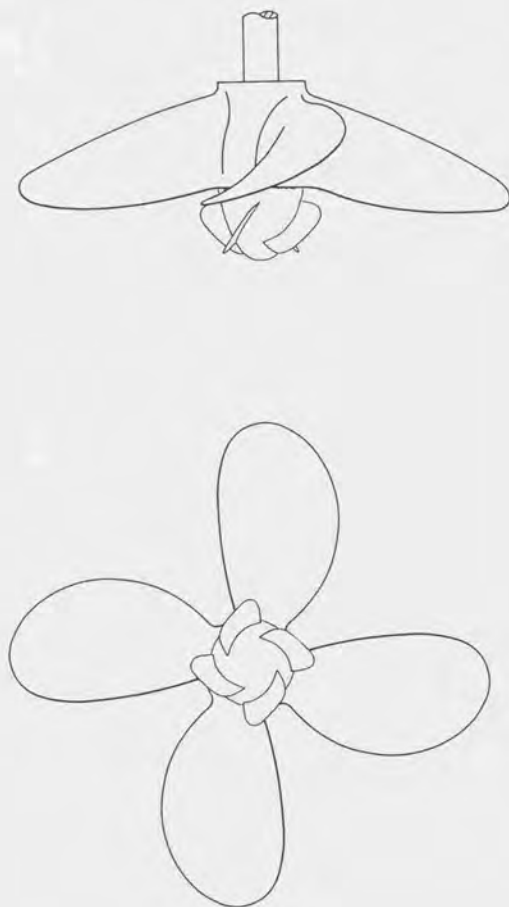


Fig. 5-2 Outline of Model Propeller and PECF

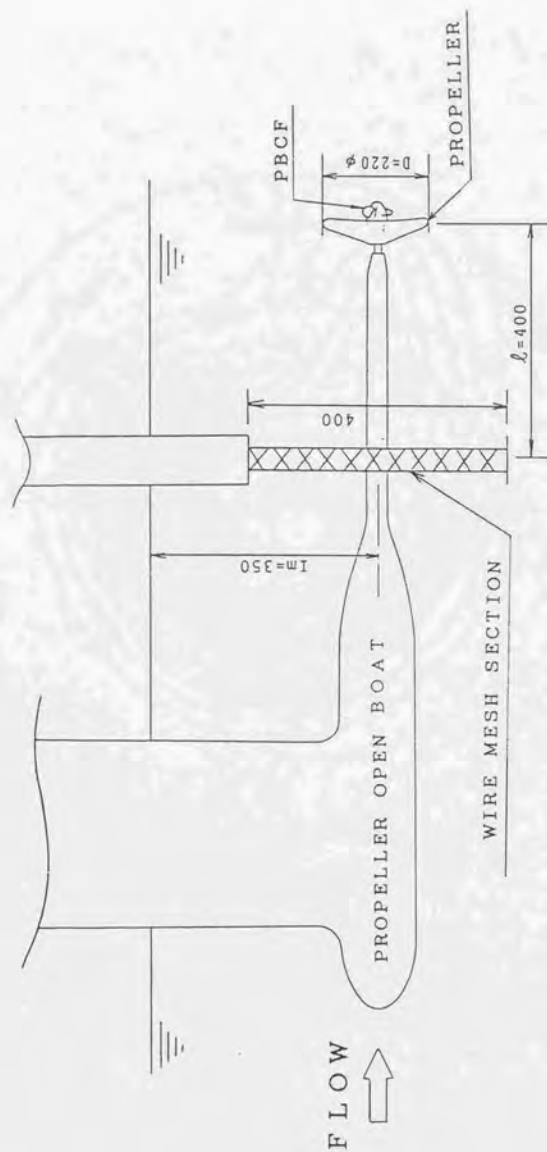


Fig.5-3 Arrangement of Test Equipments

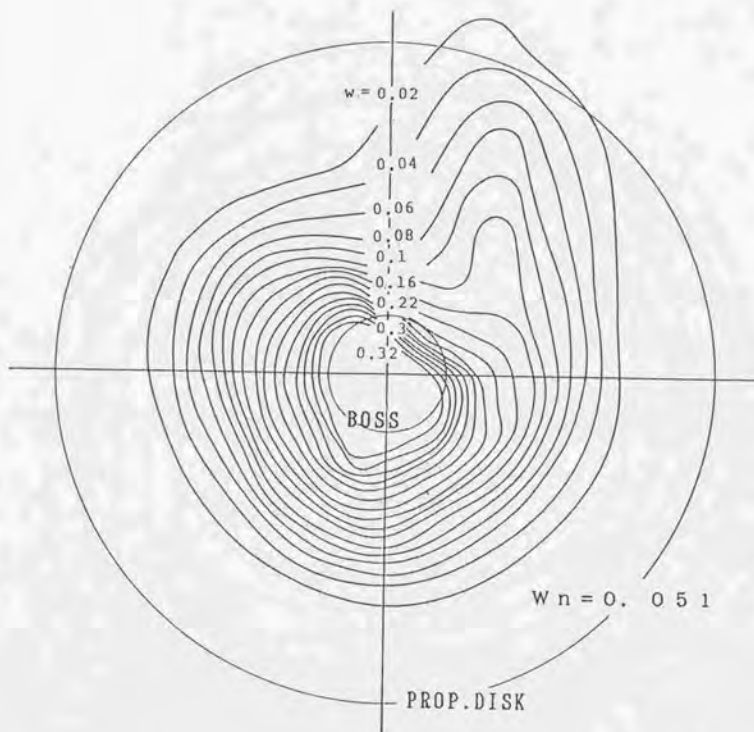


Fig. 5-4 Wake Distribution of Uniform Flow

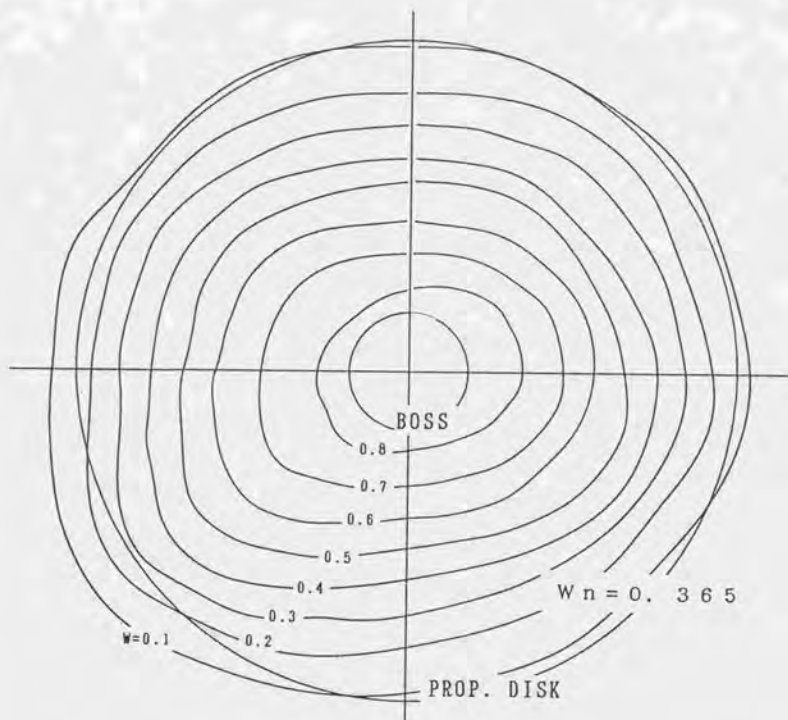


Fig. 5-5 Wake Distribution of Non-uniform Flow(1)

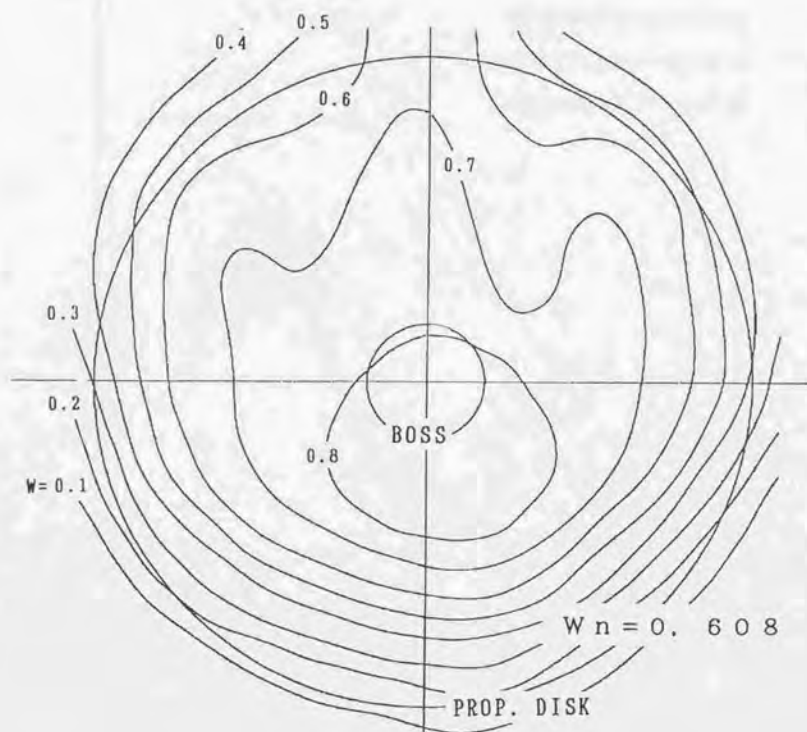


Fig. 5-6 Wake Distribution of Non-uniform Flow(2)

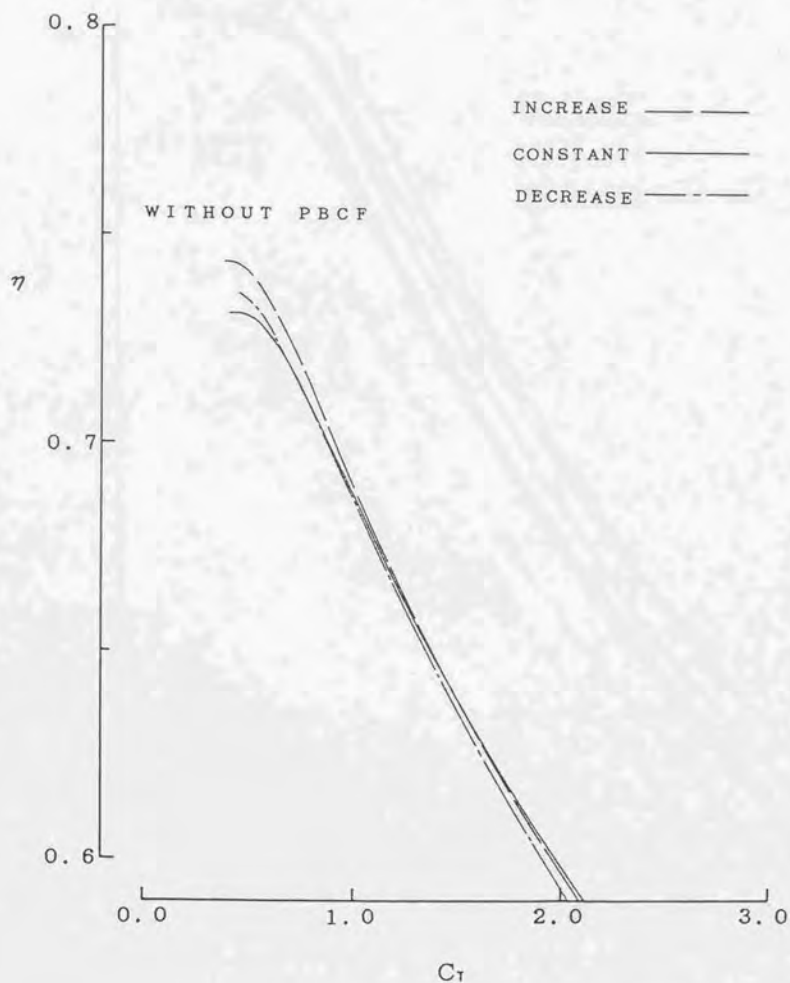


Fig. 5-7 Propeller Open-Water Efficiency of Model Propeller
(without PBCF)

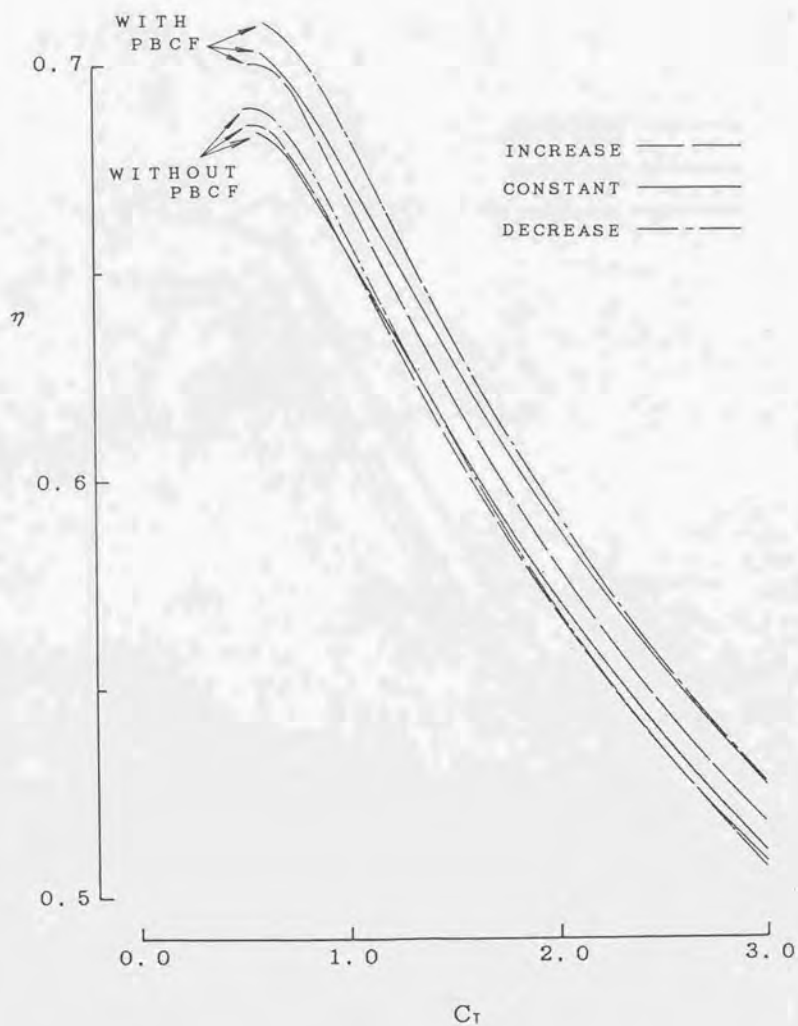


Fig.5-8 Propeller Efficiency Gain By PBCF in Uniform Flow

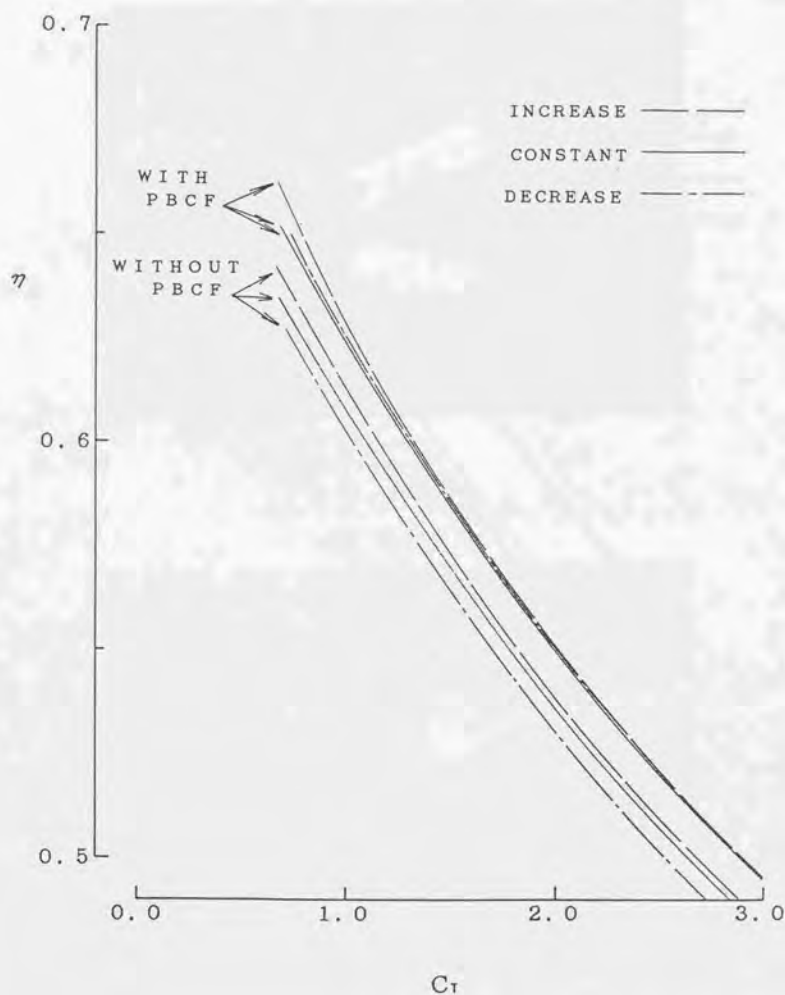


Fig. 5-9 Propeller Efficiency Gain By PBCF in Non-uniform Flow(1)

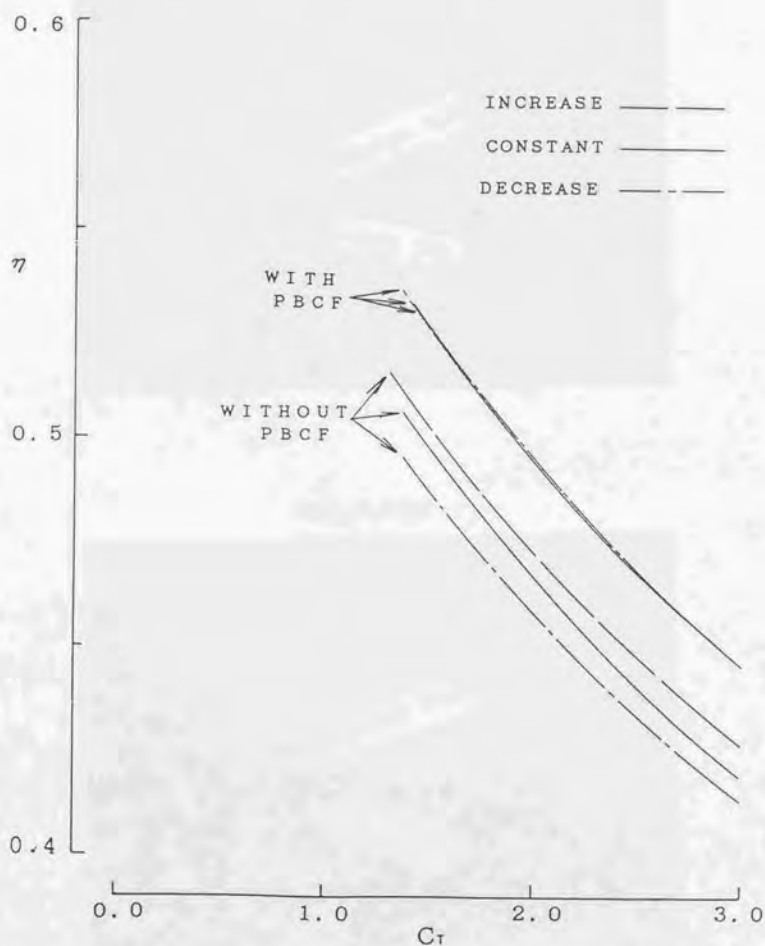


Fig. 5-10 Propeller Efficiency Gain By PBCF in Non-uniform Flow(2)

without Rudder



with Rudder



Fig.6-1 Flow Visualized By Tuft method(with/without Rudder)

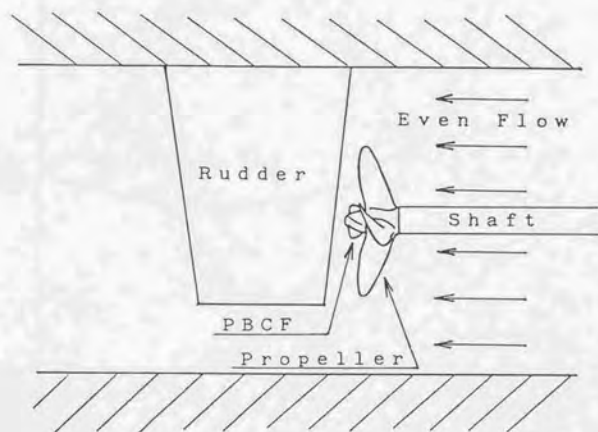


Fig. 6-2 Arrangement of Reverse POT with Rudder

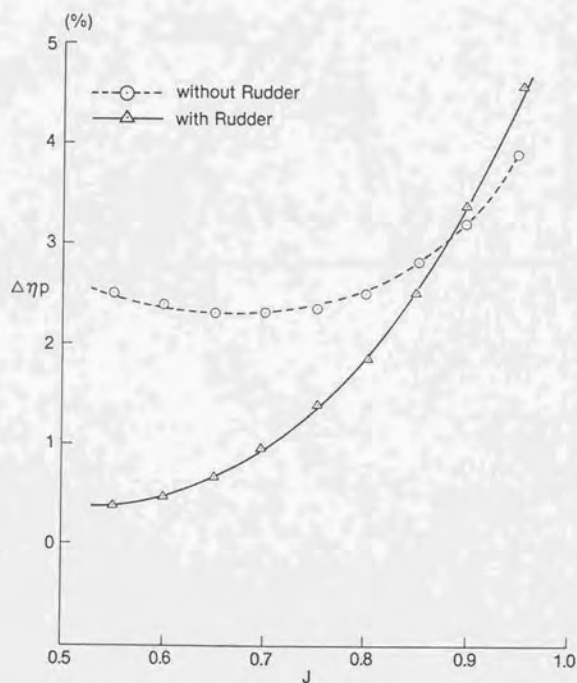


Fig. 6-3 Change of $\Delta\eta_p$ by Rudder

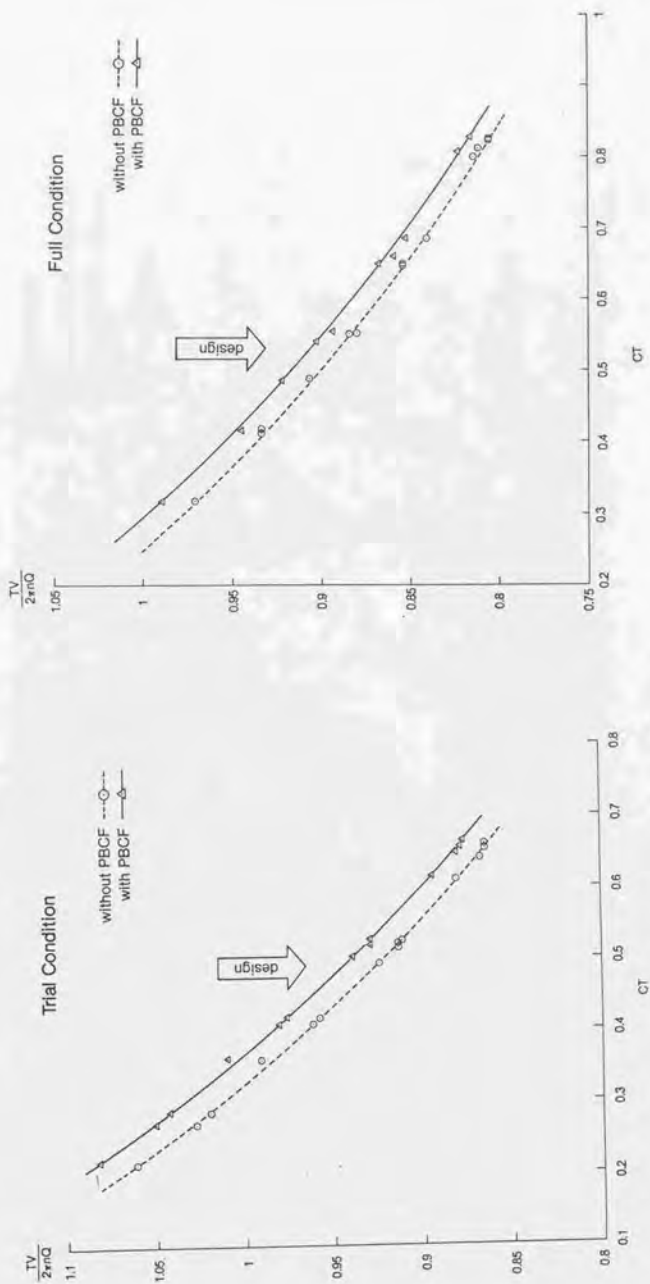


Fig. 6-4 Change of Self Propulsion Efficiency by PBCF

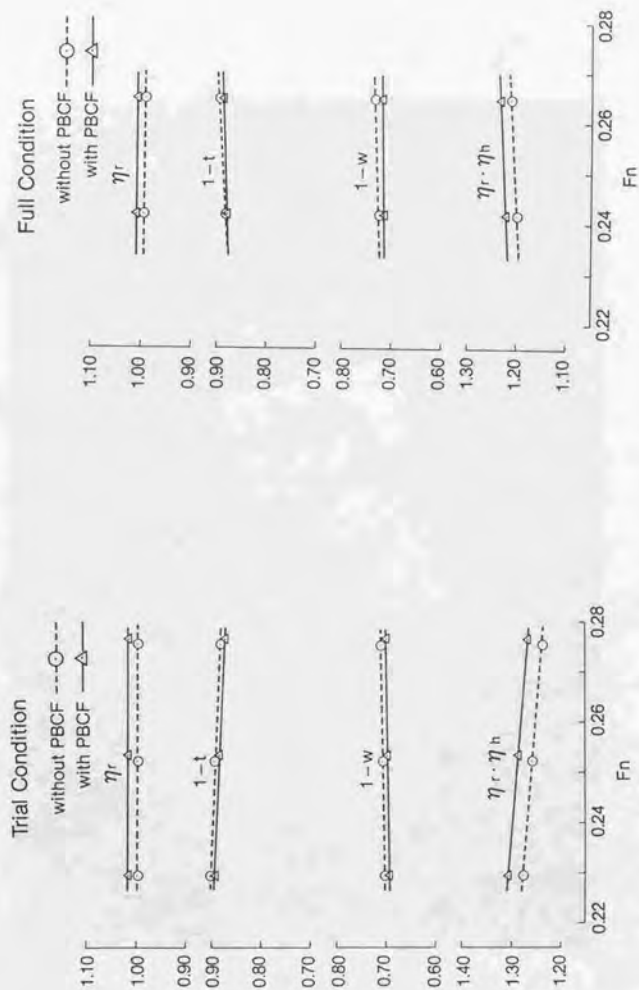


Fig. 6-5 Change of Self Propulsion Factors by PBCF



Fig. 7-1 PBCF Installation on "Mercury Ace"

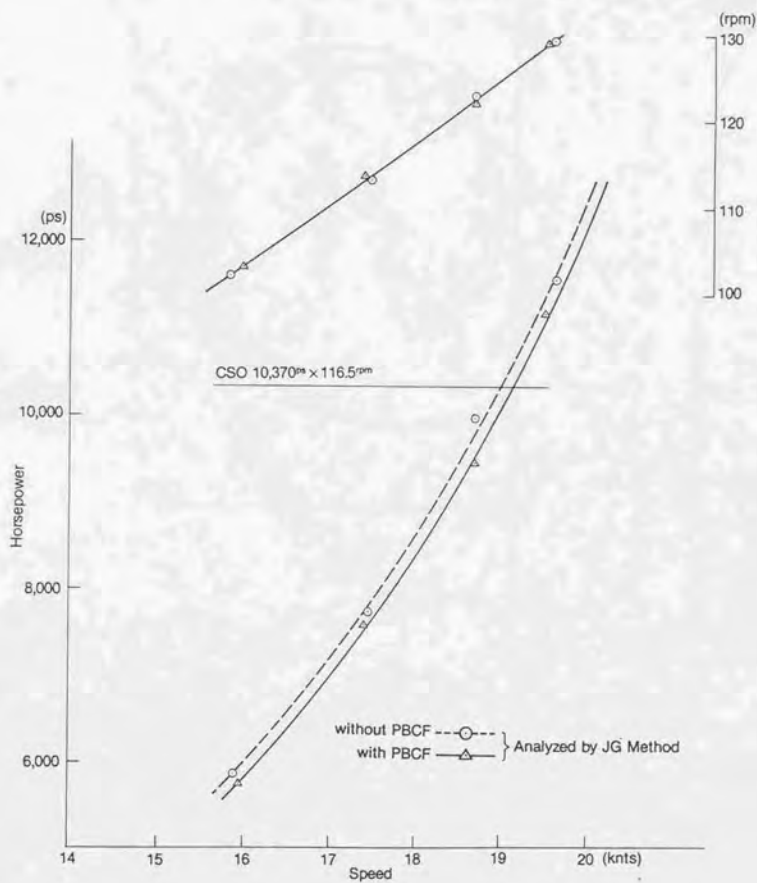


Fig. 7-2 Speed Trial Result

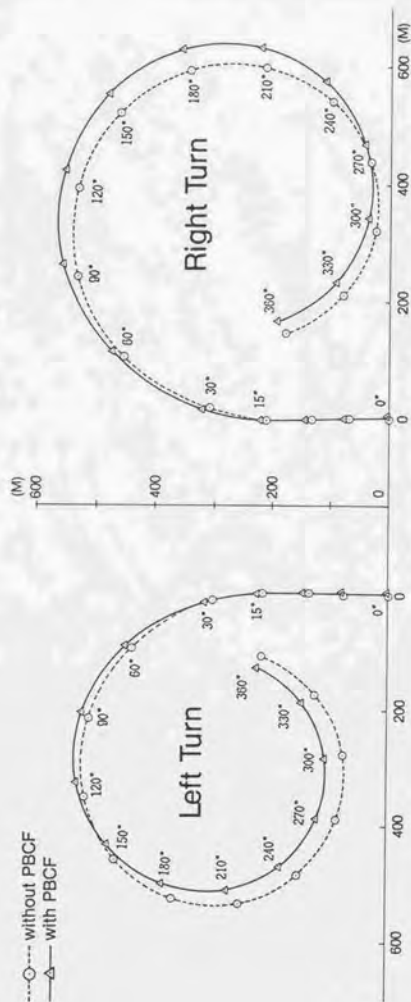


Fig. 7-3 Turning Circle Test Result

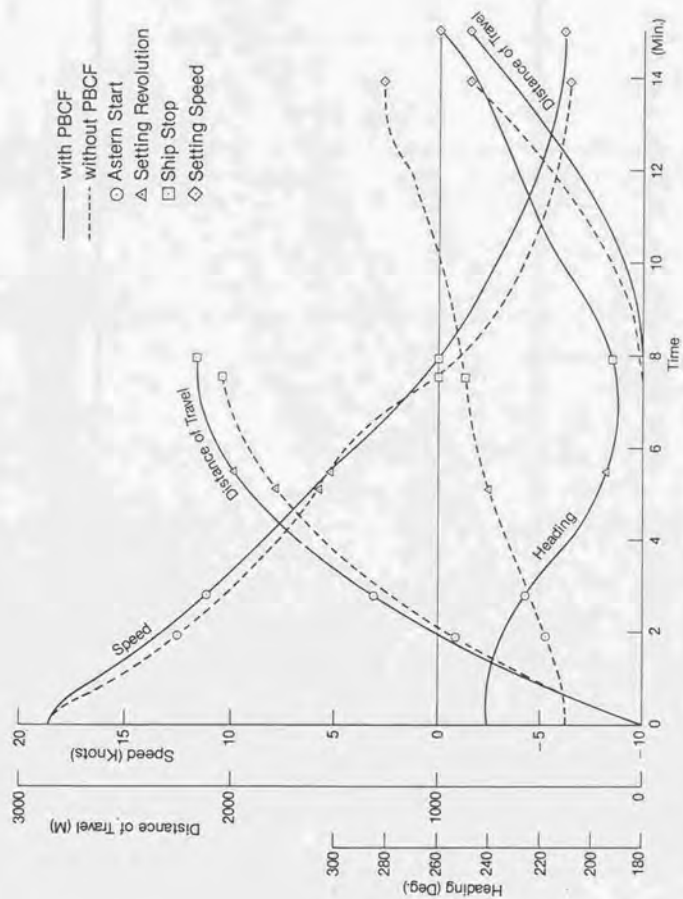


Fig. 7-4 Crash Astern Test Result

SOUTHERN CROSS MARU

W0:87/03/19-89/05/12W:89/05/19-90/03/03

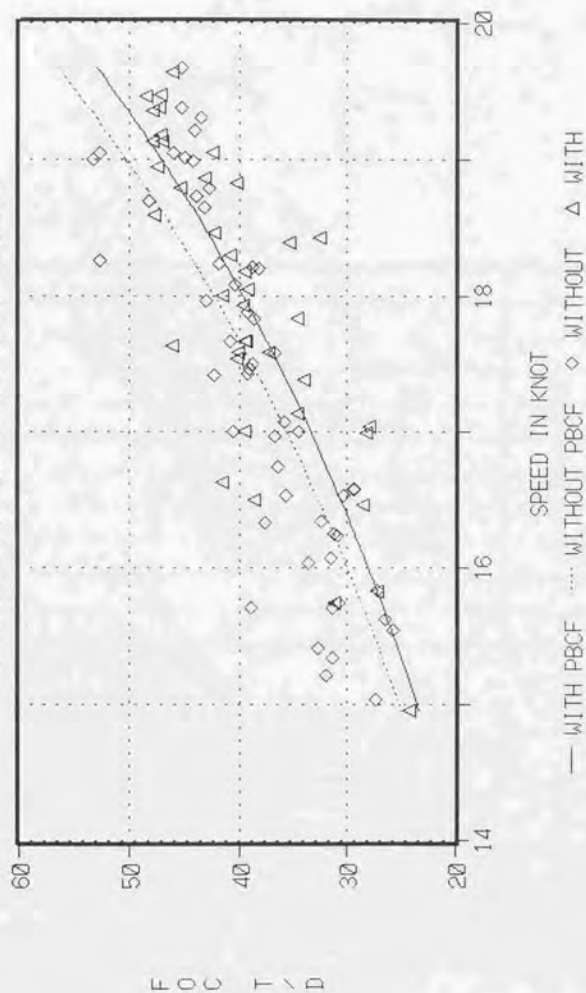


Fig. 7-5 Analysis of Voyage Data

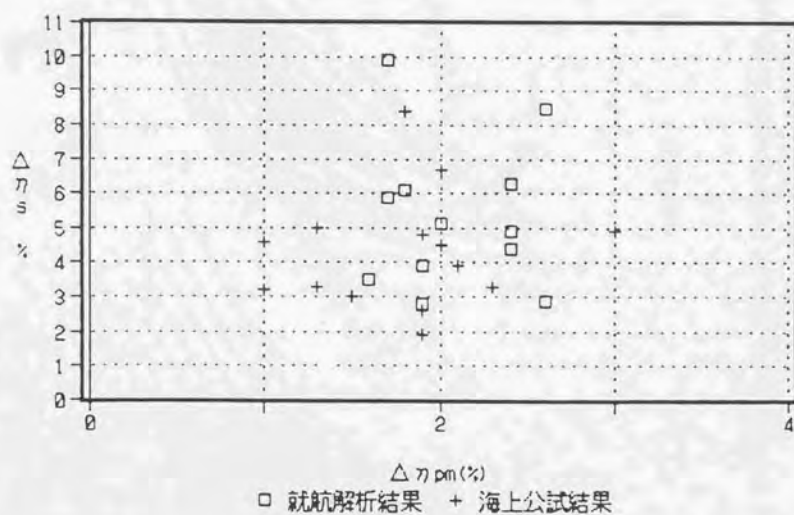


Fig. 7-6 Correlation of Efficiency Gains by PBCF Between Model and Actual Ship

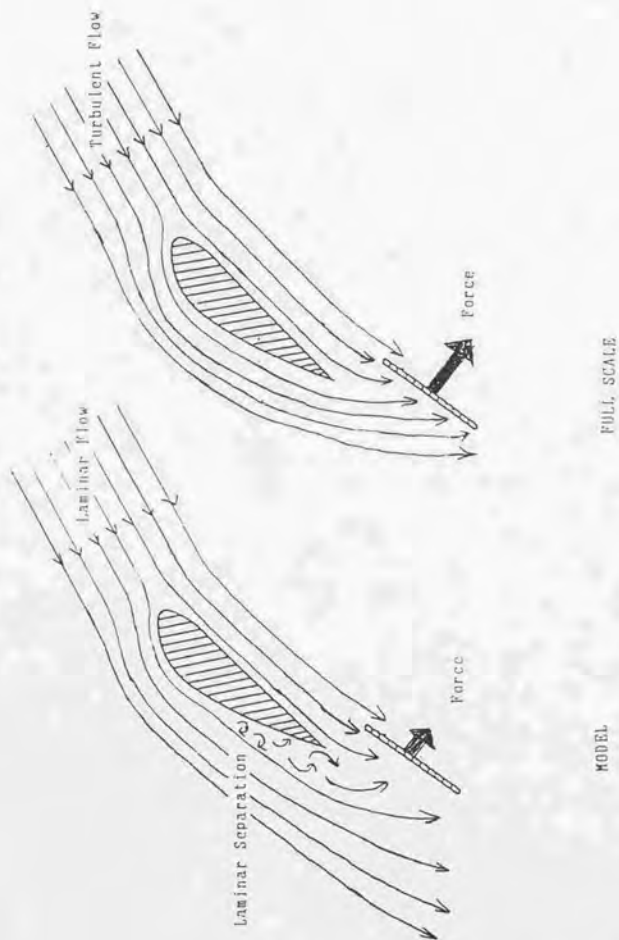
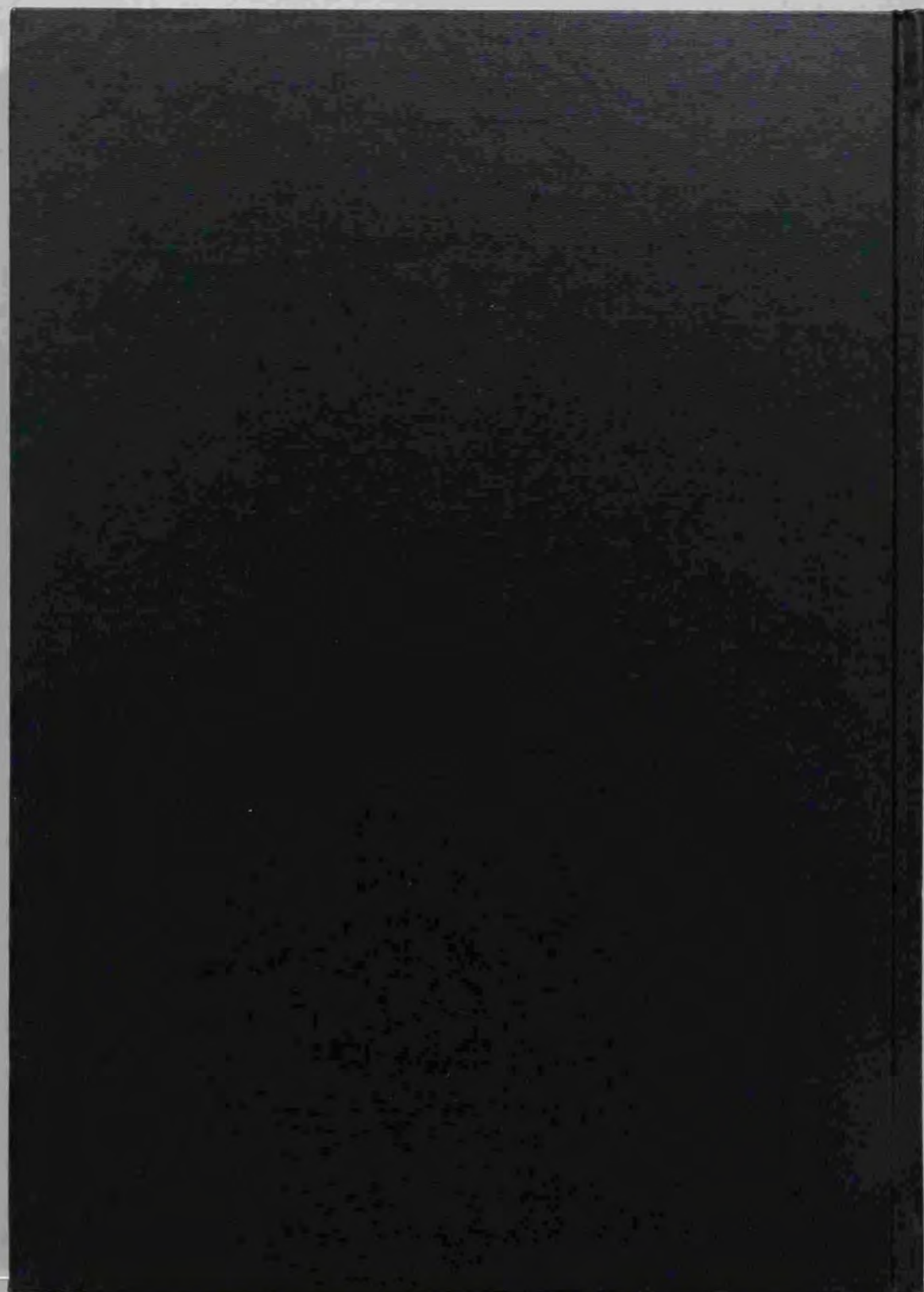


Fig. 7-7 Possible View for Difference of Flow Field Between Model and Full Scale



inches 1 2 3 4 5 6 7 8
centimeters 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19

Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM Kodak

Blue Cyan Green Yellow Red Magenta White 3/Color Black



Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM Kodak

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19

