

プロペラハブ渦回収技術の動向

PBCF 装着 1,000 隻を迎えて

正員 大内 一之^{*1}
正員 横尾 雅俊^{*2}

1. はじめに

船舶をはじめとする交通機関において、推進エネルギーの省エネ化は常に最重要な技術研究課題であり、またあり続けるであろう。特に、現時点で将来を展望すると、世界的なエネルギー需要の高まりに対して石油供給力が慢性的に逼迫し石油価格が高止まりが予想されること、地球温暖化の主原因と目される CO₂ の排出抑制運動の顕在化により、益々石油消費の削減圧力が高まることが予想されることなどから、船舶の省エネ技術もこれまで以上に重要な位置付けとなっていくと思われる。

1987年に著者らは、当時船用プロペラのエネルギー損失原因として殆ど注目されなかったプロペラハブ渦に着目し、渦として無駄に捨てられていたエネルギーを回収し、結果としてプロペラのトルクを減らしスラスト増加させる装置であるPBCF(Propeller Boss Cap Fins)を考案し、(株)商船三井所属のPCC「まあきゅりーえーす」にて4%の馬力節減効果を確認し、商品化を行った。

以来長らく燃料油価格が低位安定した時期が続き、オイルショック時代に開発された数々の船用省エネ装置が商品として姿を消していった中で、プロペラハブ渦回収装置であるPBCFは順調に売上台数を積み重ね、2006年初には遂に受注1,000隻を突破した。特に最近では急激な燃料油価格の高騰を受けて、以前の倍以上のペースで普及しつつある。

ここでは、PBCFの開発で先鞭がつけられたプロペラハブ渦エネルギー回収の技術動向を概説すると共に、今後の省エネ運動のひとつの手段としてのPBCFの優位性について言及することとしたい。

2. PBCF 効果の発見と原理の解明

Fig. 1にPBCFの形状を示す。特許明細書に示したPBCFの定義は、プロペラ翼と同一翼数のフィン

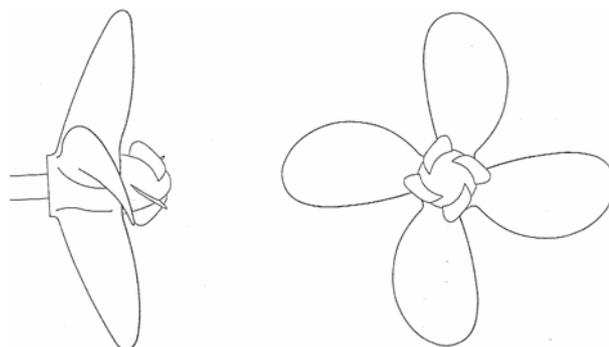


Fig.1 PBCF の形状

を持つボスキャップであり、その直径はボス径よりも大きくプロペラ直径の33%よりも小さい。また、フィンのピッチ角は略プロペラ翼根のピッチ角と等しく、プロペラと同一軸にて同一回転するものである。従って装置としては比較的小さいもので、可動部も無く単純な構造であり、コスト的にも製作・取付・メンテナンス等何れにおいても手頃なものである。

PBCF開発はタンデムプロペラの研究がきっかけとなって始まった。タンデムプロペラの後プロペラの直径を小さくしていくと、大直径では効率が低下しているものが若干向上の兆しが認められた。そこで、小径の後プロペラで単独性能試験をということではいろいろやってみるが、せいぜい1%に満たない効率向上しか得られなく難渋しているところに、新たな試験法である「逆POT」が提案された。

プロペラ単独試験(POT)は一様流中でのプロペラ性能を計測するものであるから、プロペラの駆動軸及び駆動モーター等を収容するオープンボートをプロペラの後流側に配置するのが常である(Fig.2の下図参照)。しかし、この軸が本来実船ではクリアになっているボス後部に位置するために、実船では生じているであろう強いハブ渦を弱めているのではないかという疑問が生じる。そこで逆POTではFig.2の上図に示すように、オープンポートプロペラ上流に配置しを実船と同様にボス後部をクリアにして

*1 (株)大内海洋コンサルタント

*2 商船三井テクノトレード(株)

実験を行った結果 2~3%という有意な効果を見出すに至ったものである¹⁾。勿論、プロペラに入る流れが一様流ではなくなるので、厳密な意味でのPOTとは言いがたいところもあるが、性能の絶対値ではなく今回のようなハブ渦を問題とした比較の試験の場合は、有用な試験法として今後も適用されていくものと思われる。

逆 POT にて計測した PBCF の有無によるプロペラ単独性能の向上の一例を Fig.3 に示す。トルクが減少、スラストが増加し、効率が向上していることがわかる。

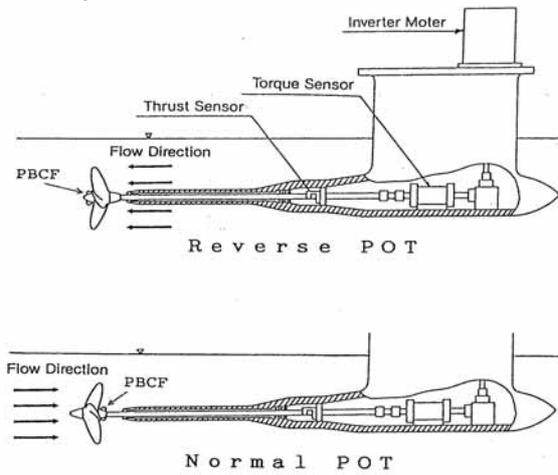


Fig.2 POTと逆 POT

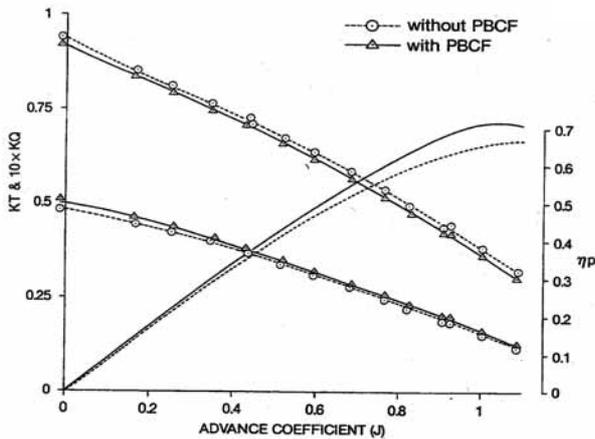


Fig.3 逆 POT による単独性能試験結果

さて、このようなPBCF効果のメカニズムを調べるために、プロペラ後流の流場の計測²⁾、ハブ渦によるキャビテーション等の調査³⁾等を行い、PBCFが従来型プロペラの出す強いハブ渦をほぼ全面的に消去し、それを軸方向への流れに変換していることが確認された。Fig 4 にレーザー流速計による3次元の流場計測結果をベクトルにて示すが、ここでの

X軸周りの流場の違いが際立って変化していることがわかる。また、Fig.5 には、強いハブ渦により生じるキャビテーションがPBCFの装着により消滅している写真を示す。

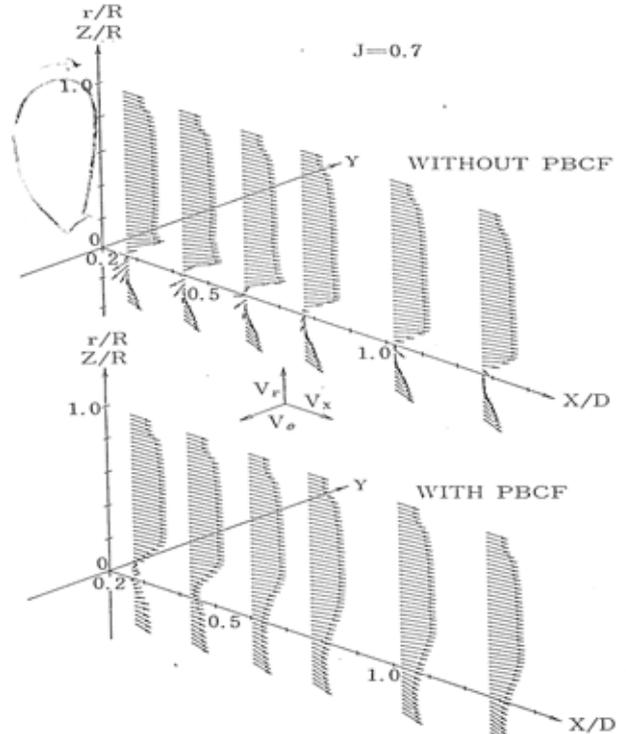
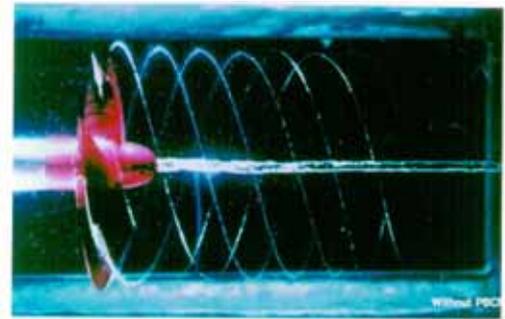
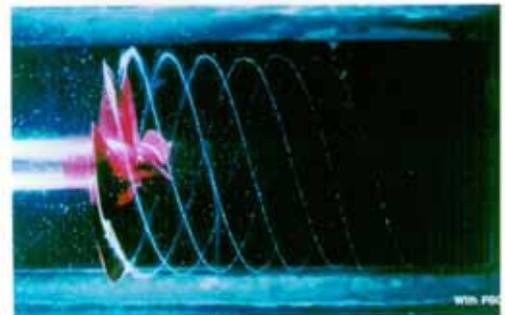


Fig.4 PBCFによるプロペラ後流場の変化



Without PBCF



With PBCF

Fig.5 ハブ渦キャビテーションの消滅

PBCFの有無による流場の変化の中で、プロペラ翼、PBCF、ボスキャップがそれぞれどのような力を発生しているかをFig.6 に模式的に示す。PBCF無し的时候はプロペラ翼後縁からプロペラの回転方向に向う流れが、PBCFの付加により整流され方向が変わり、プロペラ前縁での流れと同じ方向に流れることになる。そのため、プロペラ翼の発生する力 (TPとQPの合力) は流れの上流側に傾き、それによりTPは増加 (TP > 0)、QPは減少する (QP < 0)。一方、PBCF自体は流れを整流することでトルクを減らす方向 (QF < 0) に、また軸方向に関しては進行方向と反対側 (TF < 0) に流体力を受ける。また、ハブ渦の消滅により従来のハブ渦による低圧域 (TB0 < 0) が無くなり、ボスキャップは後方へ引っ張られなくなる (TB > 0)、PBCFの後方への力 (TF) とボスキャップの抵抗の解消 (TB) がほぼつりあうことにより、ボスキャップも含めたPBCF全体ではスラストは0となり、トルクだけを減らしていることが実験上からも確認された⁴⁾。

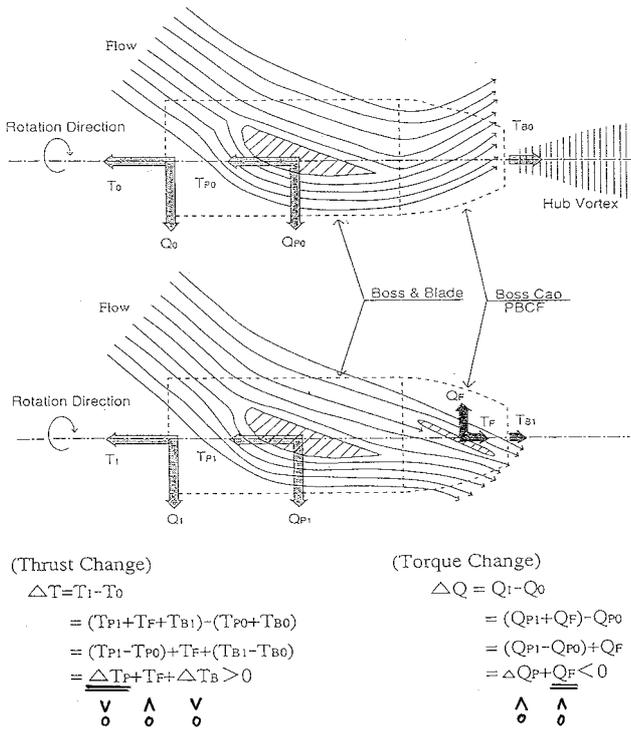


Fig.6 プロペラ翼とPBCFの発生する力

3. 実船での効果と尺度影響

最初の実船装着は自動車専用船 (PCC) のまきゅりーえーす (Lpp x B x D x d : 189.8m x 29.2m x 28.25m x 7.74m、M/E : 12,200ps、プロペラ径 x ピッチ比 : 4.35m x 0.8905) であり、その時の試運転

結果をFig.7 に示す。完全同型船ねぶちゅーんえーすの試運転結果と比較したところ、全ての速度範囲で約4%の馬力低減が認められた¹⁾。

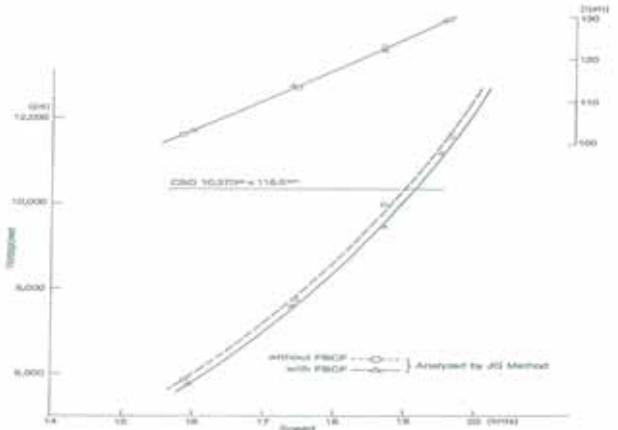


Fig.7 まきゅりーえーす海上試運転結果

さて、このまきゅりーえーす用のPBCFは、勿論、逆POT、自航試験等の水槽試験を注意深く行いながら最適設計を行ったものであるが、模型段階では効率向上率が2%程度であった。しかし、実船では4%となり模型に比べて2倍の有意差が生じている。またFig.8 に示すように、それ以降の実船装着例を見ても模型と実船では、多少のばらつきはあるが、実船のほうが模型の効率向上率の2倍以上の効率向上率が得られていることが実績より判明しており、明らかに尺度影響が存在することが判った²⁾。

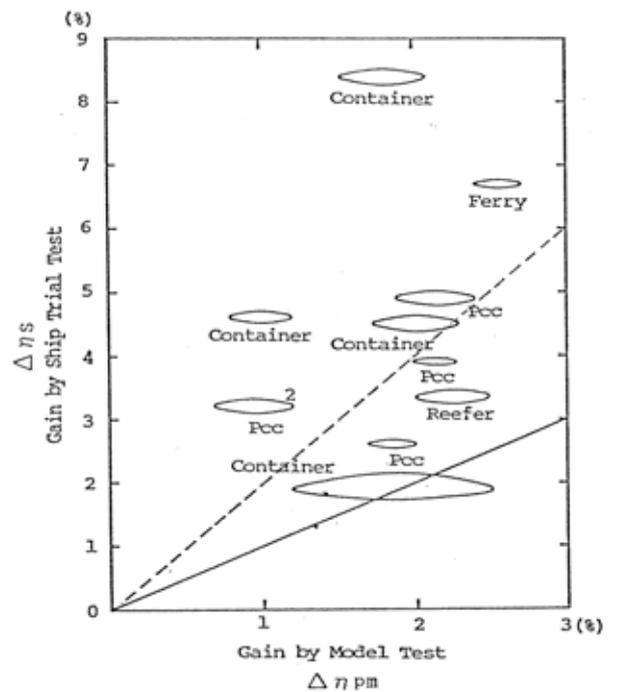
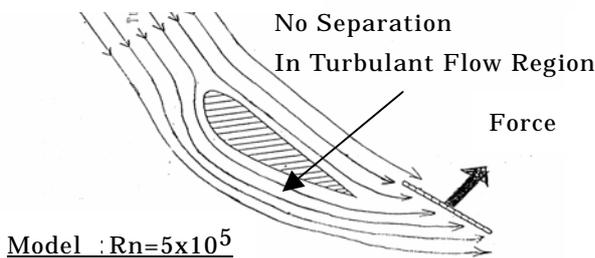


Fig.8 PBCFの尺度影響

大型構造物の流体力学的性質を縮尺模型による水槽試験の結果から推定するためには、必ず尺度影響を考慮する必要があり、これは船舶工学の永遠の課題であると言える。特に、流体の慣性と粘性の影響度の指標であるレイノルズ数(Rn)が大きく異なる場合は、層流・乱流の遷移問題、境界層の厚みの問題、渦の問題などが複雑に絡み合って、定性的には説明できても定量的な予測は難しい場合が多い。現状技術でのPBCFの実船での効率向上予測に関してはCFDによる計算も試みてはいるが⁵⁾、やはり実船の実績をフィードバックしたデータベースに頼らざるを得なく、またそれが実用上は一番確実な方法と考えられる。

Fig.9にPBCFの尺度影響の物理的解釈についての筆者らの仮説を示す⁴⁾。模型ではRn数が小さくプロペラ翼背面で層流剥離が起こっているが、実船では乱流が支配的であり剥離は起こらない。そのためPBCFにかかる流体力は図に示すように実船の方が顕著となるというものである。

Full Scale : Rn=5x10⁷



Model : Rn=5x10⁵

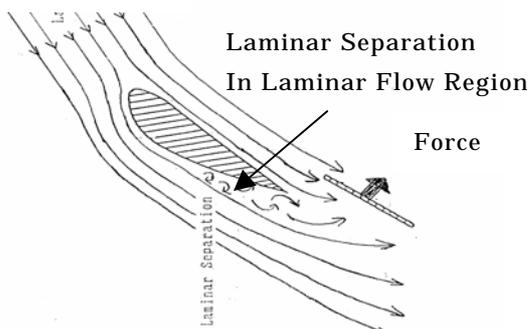


Fig.9 尺度影響の原因

4. プロペラハブ渦回収の研究開発

スクリュープロペラは翼を回転させて推力を出す装置であるから、後流が旋回流となることは免れない。しかし、この旋回流は推進力にはなっておらず、無駄に捨てられているエネルギーである。Fig.10は運動量理論によるプロペラの理想効率に対して、実

際に使用されているプロペラとの間にはどのようなエネルギー損失があるかを示している⁶⁾。これによれば、旋回流の損失は実際の商船のプロペラ(荷重量:0.4~4.0で使用)に有効に使われるエネルギーの()/ = 10~12%となっており、このエネルギーを有効に回収できれば確実な省エネ効果が期待できる。

プロペラ効率

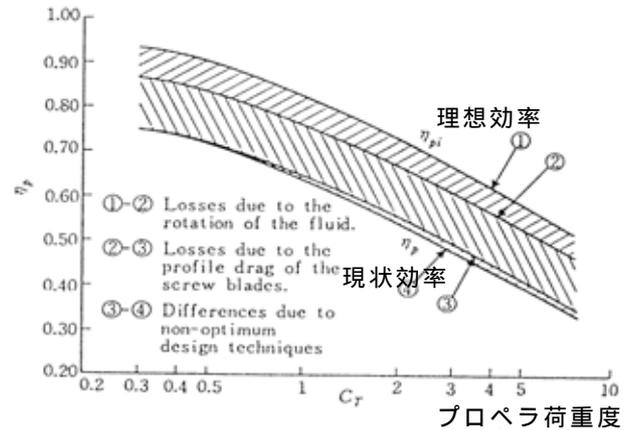


Fig.10 プロペラにおけるエネルギー損失

これまで、プロペラ後流の旋回流の回収装置としては二重反転プロペラ(CRP)、グリムベーンホイール(GWV)、反動舵(リアクションラダー)、ラダー付フィン、等多彩な技術が提案されている。しかし、これらはプロペラ全体の旋回流を回収しようとするためどうしてもプロペラ直径をカバーするような大型の装置とならざるを得ず、実用化・商品化に向けては強度的・コスト的に難しい問題を抱えており、費用対効果面から大幅な普及には至っていない。

PBCFは、旋回流回収をプロペラ直径の33%以下の狭い範囲であるが強いハブ渦に限って行うこととしており、エネルギー的には旋回流全体の40%程度を回収するコンセプトである。このため装置が小型で済むので強度的・コスト的にも有利であり、省エネ装置のようにコストパフォーマンスが厳しく要求される装置としては非常に優位性が高いといえる。

PBCFの開発により、ハブ渦を見直そうという機運が醸成され、1989年にはPBCFほぼ同じ形状だが、直径がプロペラ径の33%以上という「ターボリング」が神戸製鋼より商品化された。同じく1989年にボスキャップに溝を切りハブ渦を弱めるものとして「ハブボルテックスフリーキャップ(HVFC)」が三菱重工より提案された。また1990年代になって、今までほとんど採用されることの無かった「コ

スタバルブ（スペインのコスタ氏の発明したボスの直後の舵部にボス径より径の大きい砲弾状の膨らみを持たせハブ渦を拡散する装置）が三井造船、川重などでリバイバル開発され、実船に適用されている。1996年にはドイツのショッテル社より、尖らせたボスキャップの先端にボス径より小さいフィンを付加してハブ渦を弱める「Hub Vortex Vane (HVV)」が商品化されている。

ハブ渦及びPBCF関連の追試を主題にした論文・報告も、ペンシルベニア州立大学⁷⁾（米国）、三星重工（韓国）、上海交通大学⁸⁾（中国）、MARIN⁹⁾（オランダ）等から発表されている。ハブ渦も含めてプロペラ旋回流の回収装置を主題とした技術サーベイレポートが1999年にThe Specialist Committee on Unconventional Propulsors: Final Report and Recommendations to the 22nd ITTC¹⁰⁾として提出されており、客観的報告書として非常に示唆に富んだものである。

このようにPBCFの出現以来、比較的安いコストでエネルギー回収の可能なプロペラハブ渦への関心が高まっており、これからの省エネを取り巻く環境を考えれば、ハブ渦エネルギーの回収はそのコストパフォーマンスを考えると、今後のプロペラ省エネには欠かせない要素技術となっていくと思われる。

5. PBCF 事業化と 1,000 隻への道程

PBCFの事業化から1,000隻達成まで約18年を要した。当初、PBCFの価格設定は費用対効果を考慮して設定した為、結果としてコスト上は割高な面があり、更には、波や風などの外乱が多く効果を短期間では実感しにくい船舶の特殊性もあって、新規顧客が気軽に導入しづらく普及を阻害した面はあったと思われる。

現在は燃料高の背景とともに、環境配慮からも、普及させることを第一義に柔軟な価格設定に努めているが、一般的には燃料消費量の多い大型コンテナ船等の高馬力船への採用が増加しており、投資効率の良い省エネ装置としての評価が得られている。Table1にPBCF事業の開始から1,000隻達成までの道程を簡単にまとめた。

PBCFはプロペラ後部に位置しているため、その要目はプロペラ諸元には大きな影響を受けるが、船体形状にはほとんど影響を受けない。そのため、どのような船種にも効果が期待できる。Fig.11に2,000PS以上のPBCF装着船689隻の船種別内訳を

示すが、ほとんど万遍なく全ての船種に採用されているのが判る。

Table1 PBCF1,000 隻への道程

PBCF小史	
1986. 9	商船三井, 西日本流体技研, ミカドプロペラの3社で共同研究開発を開始
1987. 3	新プロペラ単独試験法(逆POT)にてPBCF効果を発見
1987. 7	特許申請(上記3社で共同出願)
1987. 9	PCC「まきゅりーえーす」の海上試運転にて4%の効率向上を確認
1987. 9	上記3社にて事業化基本協定を締結し販売事業を開始
1988. 3	東大でのキャビテーション試験でハブ渦消滅を確認
1988. 3	装着船10隻突破
1988. 5	日本造船学会へ技術論文発表
1988. 6	MARIN (オランダ)にて後流場の詳細計測実施
1989. 6	Norshipping展示会 (Oslo)に実物出品
1990. 1	CPP用の1号機をフェリー「ニューベがさす」に装着
1991. 3	装着隻数が100隻を突破
1991.12	小型船用PBCF「冠太郎」を開発しミカドより販売開始
1994. 7	PBCF販売事業を商船三井からエム・オー・シップマネージメントへ移管
1996. 6	販売隻数が500隻を突破
1996. 9	日本での特許が成立
2000. 4	販売事業を商船三井テクノトレードに移管
2000. 6	装備船がエコシップに認定
2002. 6	装着船がe-シップ (二酸化炭素低減化船)に認定
2005. 8	NEDOの省エネ装置として認定
2006. 1	装着隻数1,000隻を突破
主な受賞歴	
1990. 2	日本機械工業連合会優秀省エネルギー機器賞
1990. 5	日本造船学会賞
1991. 5	日本船用機関学会賞
1991. 7	運輸大臣表彰

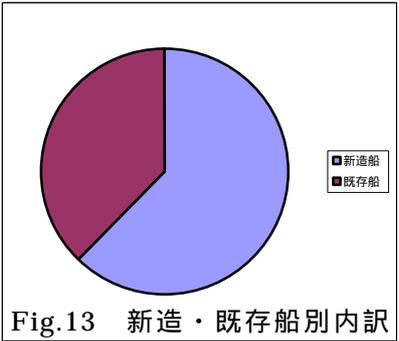
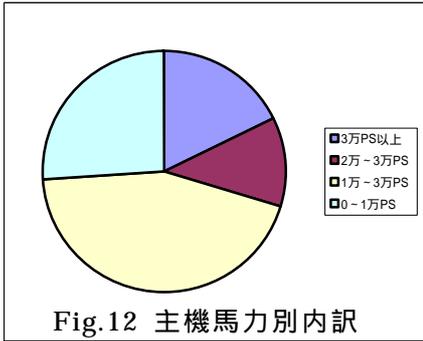
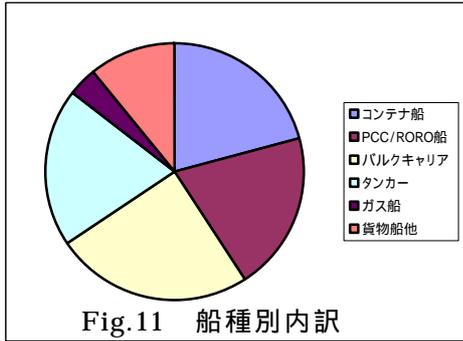


Fig.12 には主機馬力別の装着内訳を示す。燃料消費量の多い高馬力船への採用が多いことが判る。

Fig.13 には、新造船と既存船別の内訳を示すが、PBCF の特徴として、既存船へも改造なしで取付可能ということがあり、1/3 以上は既存船への採用となっている。

6. おわりに

今後益々大きなうねりとなっていくであろう省エネ圧力に対して、無駄に捨てられているプロペラ後流の旋回流の回収は重要である。その中でもハブ渦に関しては PBCF のように簡便な装置で 4~5% のハブ渦エネルギー損失を回収することが可能であり、燃費節減効果だけでなく、CO2 排出を抑制し地球環境への貢献のためにもこれを効率良く回収していくことが望まれる。

最後に PBCF の開発・事業化にあたって多大な貢献をされた、(株)西日本流体技研の故小倉理一博士、恋塚初氏、(有)流体テクノ玉島正裕博士、当時ミカドプロペラ(株)の河野嘉雄氏、エーワンマリタイムコンサルティング折戸博允氏、エムオーエンジニアリング(株)塩津高志氏、(株)商船三井の川崎敏夫氏、新井健太氏、及びその他関係諸氏に対して深甚なる敬意を表して結言に代えることと致したい。

参考文献

1) 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 プロペラボス後部流れに改善、日本造船学会論文集第 163 号、1988.6

2) 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

3) 大内一之、玉島正裕、新井健太：PBCF によるプロペラ水中騒音の低減、関西造船協会誌第 216 号、1991.9

4) 大内一之：PBCF の効果と実績、日本船用機関学会誌第 27 巻 9 号、1992.9

5) Tamashima, M., Yang, C. J., : Calculation of the Performance of Propeller with Boss Cap Fins in Uniform Flow, International Symposium on Propeller and Cavitation '92, Hang Zhou China, 1992.9

6) Van Manen: 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

7) Gearhart, W.S., McBride, M.W., : Performance Assessment of Propeller Boss Cap Fin Type Device, Proc. Of the 22nd American Towing Tank Conference, St. John's Newfoundland, 1989.8

8) Jian-hua Zhang, Hai-hong Ma: Energy Saving Propulsor, The 2nd International Symposium on Propeller and Cavitation '92, Hang Zhou China, 1992.9

9) Propeller Boss Cap Fins : MARIN REPORT NO.47, 1992

10) The Specialist Committee on Unconventional Propulsors : Final Report and Recommendations to the 22nd ITTC, 1999