

二重反転プロペラ型ポッド推進器の実寸大モデル試験

輸送高度化研究領域 *川並 康剛、工藤 達郎
ナカシマプロペラ株式会社 吉岡 勝、石原 泰明、竹田 敦
東芝三菱電機産業システム株式会社 米良 孝、菊井 量一、寺門 正義

1. はじめに

海上技術安全研究所では、平成13年度から国土交通省海事局の委託を受けて次世代内航船に関する研究開発を進めてきた。内航海運のさらなる活性化と京都議定書に定められたCO₂削減目標に寄与することを目的としたこの研究委託をうけて、海技研ではスーパーエコシップ・プロジェクトチームを組織し、産学官の協力体制のもと、次世代を担う内航船舶の開発と普及促進を目指す研究を続けてきた。

スーパーエコシップに課せられた使命には、国内におけるモーダルシフトの促進、環境負荷低減への寄与、乗員省人化の実現、内航物流の効率化などがある^{1),2),3)}。スーパーエコシップにはこれらを実現するためのさまざまな新技術が導入されるが、その中でも大きな眼目のひとつが本報告で述べる二重反転プロペラ型ポッド推進器である。ポッド推進器は主にヨーロッパ諸国で開発・実装が進んでおり、操船性の良さによる離着岸時間の短縮や狭い港内でのその場回頭など、今までの軸系推進器には無い柔軟性を持ち、この特徴が経済的にも環境的にも効果があることが実証されている。次世代内航船においては環境負荷低減の観点からして電気推進システム装備が不可欠である。しかし、電気推進システムは従来のディーゼル直結駆動の推進システムに比べてエネルギー変換に伴うロスにより馬力伝達の効率が悪くなり、燃費の増大を招いてしまう。

この困難を克服し、燃費がよく環境負荷が小さい次世代内航船を実現するのが本プロジェクトの大きな目的のひとつである。すなわち、抵抗の小さい改良船型、および省エネ推進デバイスとして代表的な二重反転プロペラをポッド推進器と組み合わせて導入することによってポッドの操船性を

維持したまま伝達効率の悪化を補う。このような新技術を駆使し、将来の内航海運の担い手として普及する環境適合型船舶の開発が要求されている。

二重反転プロペラとポッド推進器の組み合わせには様々な技術的困難が伴う。本報告では、海技研、ナカシマプロペラ株式会社、東芝三菱電機産業システム株式会社が共同して開発した世界初の二重反転プロペラ型ポッド推進器の特徴と、その実寸大モデル試験結果の概略を述べる。

2. ポッド推進器のモジュール構造

本プロジェクトで開発された二重反転プロペラ型ポッド推進器の大きな特徴のひとつは、そのモジュール構造である。図1に示すように、旋回機構部、ストラット部、電動機モジュール、二重反転プロペラからなるモジュール構造を採用することにより、分解・点検・交換等が容易になるばかりではなく、ポッドの軽量化にもつながる。

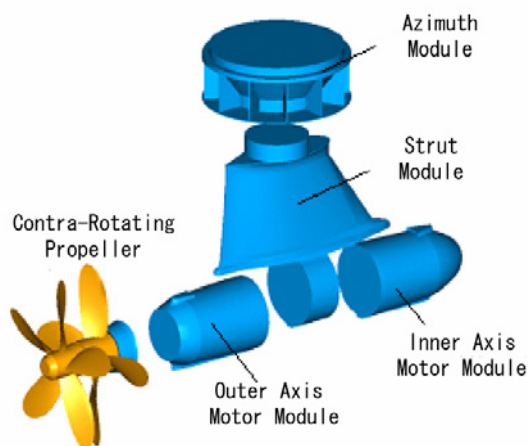


図1 ポッド推進器のモジュール構造

本ポッド推進器は基本的にプッシュヤ型・トラクタ型両用であるが、図1はプッシュヤ型の場合であり、実寸モデル試験もプッシュヤ型配置で行われた。

3. ポッド推進器の構造

図2は本ポッド推進器の構造を模式的に示したものである。旋回機構部にはポッド回転させるための油圧モータM3、M4が配置されている。2基の油圧モータが装備されているのは冗長性確保のためであり、実際は1基の油圧モータでも旋回可能である。旋回速度は最大 $1.5 [\text{min}^{-1}]$ である。油圧モータにより、ポッド推進器の大きな特徴である360度全方位旋回が可能になる。旋回機構部に組み込まれたスリッピングを通して電力伝達が行われる仕組みになっている。

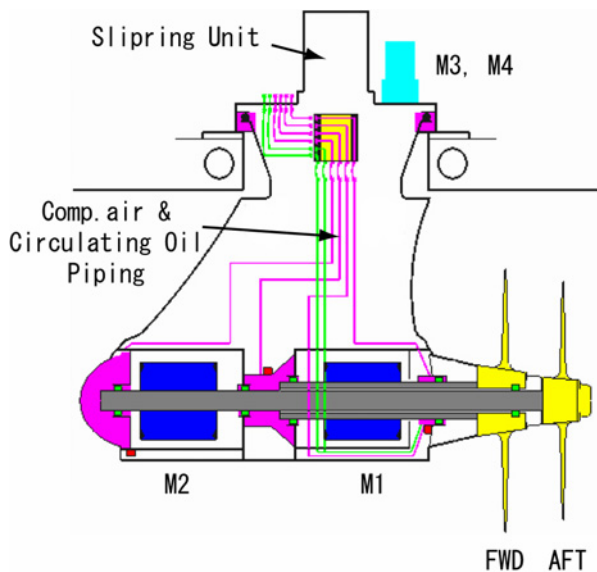


図2 ポッド推進器の内部構造

図2のM1、M2が二重反転プロペラを駆動する電動機である。M1が外軸すなわち前プロペラを、M2が内軸に結合された後プロペラを回転させる。2つのプロペラ駆動電動機M1、M2はともに回転子に永久磁石を用いた永久磁石電動機であり、電流によって磁界を作る必要がないため、電動機をコンパクトにできるという利点がある。また、本ポッド推進器の特徴のひとつは、電動機のケーシングがそのままポッドケーシングとなっている点である。すなわち、ポッドケーシング外部の海水の流れによる強制対流熱伝達により、電動機を冷却することができる。通常の電動機冷却には空冷式や内蔵水冷式があるが、本ポッド推進器ではこれを省略することによりさらにポッド直径を小さくすることに成功した。また、先に述べたモジュ

ール構造を採用しているため、ストラット部と電動機モジュールの間に隙間を設けることができ、冷却効率が一層向上するよう工夫されている。

表1に本ポッド推進器の基本仕様を示す。2基の電動機合わせて $2,500 [\text{kW}]$ の出力を持ち、5,000 DWT級の内航船を推進させることを想定して設計されている。各電動機はインバータ制御によって緻密な制御が可能である。常用回転数 $200 [\text{min}^{-1}]$ 、最大回転数 $250 [\text{min}^{-1}]$ であり、これに装備される二重反転プロペラはあらゆる使用範囲において電動機の最大トルクと最大回転数（又は設定値）を超えないように制御される。

表1 ポッド推進器の基本仕様

Output [kW]	1,250 x 2
Rated rotation speed [min^{-1}]	200
Maximum rotation speed [min^{-1}]	250
Approx. mass without azimuth module [kg]	47,000
Drive system	PWM inverter

本ポッド推進器を開発するにあたって最大の難点のひとつがプロペラシャフトのシールである。もともと二重反転プロペラは19世紀に登場していたが、この頃は二重反転プロペラのトルクがバランスすることが注目されていた。その省エネ効果が認められるようになり、本格的な設計法が確立されるのは1955年のLerbs⁴⁾による画期的な二重反転プロペラ設計法の開発を待たなければならなかった。さらに、二重反転プロペラが実用に供されるまでには十数年を要している。これは二重反転プロペラの推進効率推定法が確立されていなかったことにも一因があるが、軸機構部の複雑化とそれに伴うシールの困難さが大きな要因である。

電動機内蔵型のポッド推進器においては、エンジン直結の二重反転プロペラの場合に比べて漏水時のダメージが著しく大きいため、漏水には細心の注意を払う必要がある。また、二重反転プロペラでは互いに反転するシャフト部が通常の1軸よりも2倍の周速で回転し、シール部の発熱・損傷が懸念される。本ポッド推進器にはこの複雑な軸機構をコンパクトにまとめ、さらに内部の電動機

を漏水から守るために特別な技術が採用されている。

3. 二重反転プロペラとその設計

海技研では、独自の二重反転プロペラ設計プログラムを用いて多くの二重反転プロペラを設計し、その試験結果を設計プログラムにフィードバックすることにより、二重反転プロペラ最適設計法を開発してきた⁵⁾。基礎となる理論は Lerbs-Morgan の設計理論⁶⁾であり、これにさまざまな改良を加えて、より性能のよい二重反転プロペラの設計が可能になっている。

通常航行状態のプロペラであれば荷重度が与えられれば作動点がきまり、到達しうる最高の単独効率が定まる。しかし、本ポッド推進器実寸モデル試験は、後述するように、造船所のドック内にポッドを固定した状態で行われた。したがって、これに装備されるべき二重反転プロペラはボラードに近い状態で作動することになり、通常航行状態でのプロペラ設計法を用いることができない。

供試二重反転プロペラは、海技研の設計プログラムを用いて設計された5つの二重反転プロペラの試験結果をベースにして設計され、ドイツのハンブルク水槽で開発された二重反転プロペラ性能解析プログラム⁷⁾で性能を推定し、ナカシマプロペラ株式会社で製作された。この二重反転プロペラに要求されるのは、決まった回転数で所要トルクを発生すること、シャフトやシール部に通常航行状態と同様の力がかかるようにすることである。これらの条件を満たすことによって、本ポッド推進器の耐久性試験結果の信憑性が保証されることになる。

二重反転プロペラは、海技研での試験結果において最も実績のある前プロペラ4翼、後プロペラ5翼の配置とし、翼輪郭には MAU、翼断面には NACA6608、 $a=0.8$ meal line (ともに TMB modified) を用いている。表2に供試二重反転プロペラの主要目を示す。前後プロペラの直径比が 0.906 となっており、通常の二重反転プロペラに比べて小さくなっているのが大きな特徴である。これは、ボラード状態の高荷重による前プロペラの縮流が大きいことに起因する。

表2 供試二重反転プロペラ主要目

	Forward	Aft
Diameter [m]	3.400	3.080
Pitch ratio at 0.7R [-]	0.4800	0.6875
Expanded area ratio [-]	0.4130	0.4800
Boss ratio [-]	0.2387	0.1829
Number of blade	4	5

4. 実寸モデル設置

実寸モデル試験は、株式会社アイ・エイチ・アイ・アムテックの相生事業所ドック内にて行われた。ドック内排水後、計測に必要な機器と制御装置を備えた計測制御室とスリッピング室を備えたプラットフォームをドック横方向に渡し、これにポッドを据え付けた。プラットフォーム、ポッド推進器のドック内配置の概念図を図3に示す。



図3 実験設備のドック内配置

プラットフォームの大きさは長手方向約 18[m]、横方向約 27[m]であり、4本の支柱と2つの桁でドックに固定されている。底部がスリッピング室、上部が計測制御室である。

図4は、このプラットフォーム構造物にポッド推進器本体取り付け後の写真である。



図4 ポッド本体の取り付け

ポッド推進器本体取り付けの後、二重反転プロペラを装着する。図5に取り付けられた二重反転プロペラの写真を、図6に試験開始前の二重反転プロペラ型ポッド推進器の写真を示す。



図5 二重反転プロペラ



図6 二重反転プロペラ型ポッド推進器

5. 実寸モデル試験

実寸モデル試験は注水前試験と注水後試験に大別される。

注水前試験の主な目的は電気システムが正常に動作するかどうかの確認である。システム制御試験では、制御装置、安全装置、ディスプレイユニット、計測装置の動作確認を行った。また、潤滑油ポンプを8時間連続運転しシール部やポッド下部に潤滑油の漏れがないことを確認し、ポッド旋回試験では24時間の加圧で潤滑油の漏れがないことを確認した。

以上の注水前試験を経た後、ドックを海水で満たし注水後試験を行った。注水後試験では、本ポッド推進器をさまざまなモードで作動させその機械的・流体力学的な特性を把握することに注力した。注水後試験の具体的な目的は、

- (1) プロペラ起振の異常振動有無の確認
- (2) 連続最大出力での本ポッド推進器各部の耐久試験

である。

電動機特性試験

電動機を制御可能な最低回転数 30 [min^{-1}]で連続4時間回転させ信頼性の確認を行った。また、最大トルクで電動機回転数が所定の回転数を上回らないことを確認した。

旋回特性試験

ポッド推進器の旋回速度を 0.5 [min^{-1}] から最大 1.5 [min^{-1}]まで変化させ、左右に 180 度旋回させる変速試験を行った。さらに、旋回加速度が旋回開始時と停止時が充分滑らかであること、停止精度が許容範囲内であることを確認するため連続回転試験もあわせて行った。

ポッド推進器特性試験

二基のプロペラ駆動電動機を等速で回転させ、ロードプル状態の 25%、50%、75%および 100%出力で異常振動が認められないことを確認した。この試験は二重反転プロペラ正転と逆転の両状態で行っている。固有振動試験では、プロペラ回転数を最小から最大まで変化させポッド推進器が異常振動を起こさないことを確認した。

耐久性試験

プロペラ駆動電動機を最大トルクの回転数にて累積 100 万回転させ、ベアリング、シールおよびシャフトに損傷がないことを確認した。

緊急時作動試験

電動機 135 [min^{-1}]でシャフトベアリングやその他の重要な部分の温度をモニタリングし、安全な範囲で平衡状態に達することを確認した。

注水後試験では以上のように網羅的な試験を行った。ここでは、それらの試験結果のうちいくつかについて検討を行う。

図7は、二重反転プロペラ駆動電動機を最大出力時のドック水面の様子を撮影した写真である。電動機出力を吸収し回転する二重反転プロペラが誘起する流れで、ドック内の海水が激しく攪拌されている様子が見て取れる。実際に観察しているとドック水面に複数の渦が生じては移動し、消滅するという現象が見られた。



図7 電動機最大出力時のドック水面

これらの渦により、プロペラへの流入迎角が変動し非定常キャビテーションが発生したためであると予想されるが、試験後の二重反転プロペラにはエロージョンピットが残されていた。

図8は、二重反転プロペラ正転時と逆転時の電動機回転数－出力データである。通常の単独プロペラの場合と同様、正転時・逆転時のデータとも馬力三乗曲線でよく近似される。

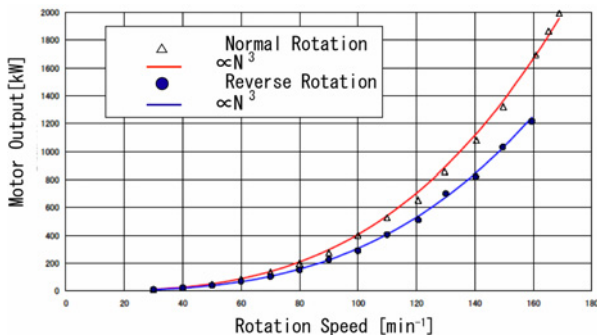


図8 電動機回転数－出力データ

先にも述べたように、スーパーエコシップでは電気推進システムを採用するため、ディーゼルエンジンによる推進システムに比べて伝達効率が悪くなる。そこで、船型と二重反転プロペラによって伝達効率の低下分を補うわけであるが、電動機としてのポッド推進器の電氣的な効率も可能な限り高いことが望ましい。本ポッド推進器開発段階では、変圧器入力/電動機出力が93%となることを目標に研究を進めた。図9は横軸に電動機出力、縦軸に電動機効率（変圧器入力/電動機出力）をプロットしたものである。図中には等速二重反転の場合と、後プロペラのトルクを前プロペラより重

くした異速反転の場合のデータが示されている。

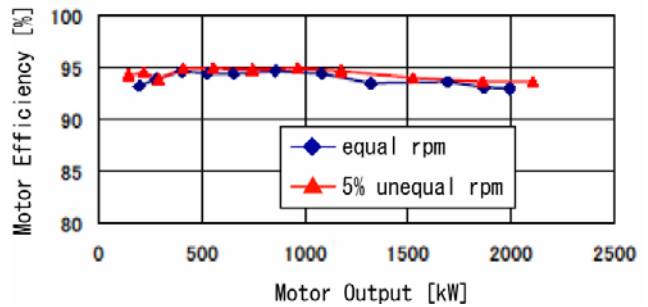


図9 ポッド推進器の電動機効率

これを見れば明らかのように、当初目標であった電動機効率93%を超え、94%程度の効率を達成していることがわかる。本ポッド推進器はきわめて優れた電動機効率を持つ電動機であるといえる。

安全性という点からみて、ポッドストラットに作用する力を計測しておくことも重要である。注水後試験では、ポッドストラットの各所に歪ゲージを取り付け、ストラットの応力分布を計測した。ストラットに作用する力は、プロペラ回転数の2乗に比例して大きくなるという結果が得られた。これは、トルクを相殺する効果のある二重反転プロペラの場合、ストラットに作用する力はプロペラの出すスラストに比例することを意味する。ポッドストラットの有限要素解析も平行して行ったが、計測結果と計算結果の一致はよく、何らかの方法でポッドに働く力がわかれば有限要素解析がポッド強度設計の有力なツールであることが示された。

もちろん実船に装備されるポッドであるから、船体運動に伴う流体力の作用を考慮する必要があることはいうまでもないことであるが、ポッドの流力特性に関する詳細な試験は本実寸モデル試験の範疇外であり、別途模型試験や数値計算で十分に検討する必要がある。

最後に、スクループロペラの宿命であるプロペラ誘起振動の計測結果を考察する。通常のプロペラでは、荷重による変動圧力、翼厚による変動圧力、キャビテーションによる変動圧力などが発生するが、これらはそのまま二重反転プロペラにも当てはまる。本実寸モデル試験におけるプロペ

ラ回転時の振動解析結果を図10に示す。

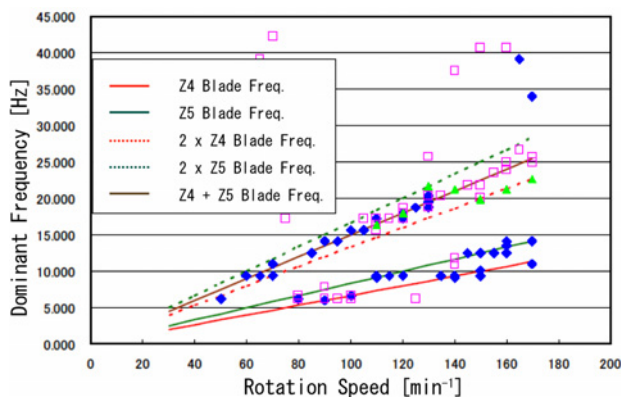


図10 二重反転プロペラによる誘起振動

横軸はプロペラ回転数であり、縦軸は各回転数における卓越振動の周波数である。図の下部にある2本の線は4翼前プロペラ1次成分と5翼後プロペラ1次成分である。1次成分が卓越するという現象は通常の単独プロペラにもよく見られる現象であるが、二重反転プロペラの場合は前後プロペラの翼数を加算した翼数次成分が卓越するのが特徴である。図中、中ほどの実線は4 + 5 = 9翼数1次成分を表しており、本実寸モデル試験においても二重反転プロペラによる誘起振動の特徴がよく現れている。模型試験によれば、前後を加えた翼数次成分の振動振幅は後プロペラ1次の振動振幅と同程度である。

6. おわりに

スーパーエコシップ・プロジェクトでは、さまざまな技術を駆使して新しい内航船のあり方を模索し、普及に努めている。本報告で述べた二重反転プロペラ型ポッド推進器はスーパーエコシップの大きな眼目のひとつであり、この実寸モデル試験が無事終了し満足のいく結果が得られたことは大きな研究の進捗である。

本ポッド推進器はあらゆる新技術と既存の技術を組み合わせたまったく新しい推進器であり、世界に類を見ない高性能ポッド型推進器である。このポッド推進器を開発するに当たって開発・採用された技術や知見は、類型のポッド推進器開発に応用可能なものであり、その意味で本ポッド推進器は技術的最先端を行くひとつのプロトタイプであるといえよう。

謝辞

本研究は、国土交通省海事局からの受託研究「次世代内航船の研究開発」の一部として行われたものである。財団法人日本造船技術センターの武隈克義技術顧問には本ポッド推進器実寸モデル試験実施委員会の座長として多大なご助力をいただいた。また、著者らの他、海上技術安全研究所スーパーエコシップ・プロジェクトチーム、ナカシマプロペラ株式会社、東芝三菱電機産業システム株式会社の関係各位、試験に際して種々ご協力いただいた株式会社アイ・エイチ・アイ・アムテックの関係各位、その他枚挙に暇のない貴重な協力なくして、本実寸モデルの開発と試験は実現しなかったであろうことをここに付記し、関係各位への謝辞とする。

参考文献

- 1) 日野 孝則他、「スーパーエコシップ（次世代内航船）の研究開発」、平成14年度(第2回)海上技術安全研究所講演会講演集、2002
- 2) 加納 敏幸他、「次世代内航船（スーパーエコシップ）の研究開発」、日本造船学会講演論文集第4号、2004
- 3) 加納 敏幸他、「二重反転ポッドプロペラ遂に完成 —実機ドック内試験報告—」、平成16年度(第4回)海上技術安全研究所講演集、2004
- 4) Lerbs, H., W., “Contra-rotating optimum propellers operating in a radially non-uniform wake”, DTMB Report 941, 1995
- 5) 右近 良孝他、「二重反転プロペラ的设计について —高速コンテナ船への適用—」、西部造船学会会報第75号、1988
- 6) Morgan, W., B., “The Design of Counterrotating Propellers Using Lerbs’ Theory”, SNAME, 1960
- 7) Streckwall, H., “HSVA CRP-Program manual”, HSVA Report CFD, 2001