

講演 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 -



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

加納 敏幸、工藤 達郎、川並 康剛

1. はじめに

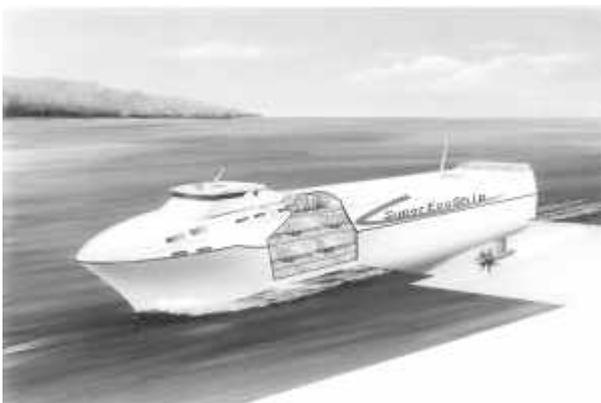
海上技術安全研究所では、平成13年4月から国土交通省海事局からの委託を受けスーパーエコシッププロジェクトの研究開発を進めている。このプロジェクトでは、技術的なブレークスルーを通じ、国際的に関心の高まっている二酸化炭素など環境負荷の低減と、内航海運にとって解決すべき課題となっている運送コストの低減を図り、居住環境と労働環境を改善する21世紀に対応した革新的な内航船の開発を行う。

スーパーエコシップを普及し、内航海運活性化によるモーダルシフトの推進、運輸分野における環境負荷の低減をめざす。

2. スーパーエコシップ

スーパーエコシップは、ディーゼル機関に比較しNOx、SOxの排出量の格段に少ないガスタービンを採用した。ガスタービン、電気推進の採用に伴い、従来に比べ貨物スペースを2割程度増大し、CFD(Computational Fluid Dynamics: 数値流体力学)技術を駆使した最適船型と省エネルギー効果の大きな二重反転ポッドプロペラを組み合わせることで、総合的な運航効率を10%向上し、トン・キロベースでの二酸化炭素の排出量を25%削減、ガスタービンを用いて窒素酸化物を1/10に削減する。これにより、環境に優しいだけでなく経済性も兼ね備えた次世代内航船を提案する。

また近年、内航海運は、物流合理化の流れや若年船員の確保など様々な問題を



抱えているが、ガスタービンは船上でのメンテナンスを前提とせず、不純物の少ない油種を用いること、冷却水の配管が不要となることなどから、船上での主機関のメンテナンスに要する負担の低減と、推進器に起因する振動や機関の騒音を低減し、職場環境の改善を図ることができる。これにより若年船員にも夢のある船を提供できる。

スーパーエコシップのイメージ

3 . スーパーエコシップの推進システム

3.1 スーパーマリンガスタービン

ガスタービンシステムは、軽量・コンパクトという特徴の他、特に環境保全の観点からのキーテクノロジーの一つとなっている。高効率の船用ガスタービンを開発する国家プロジェクトとしてスーパーマリンガスタービン（SMGT）の研究開発が 1997 年から実施されている。温度が 800 程度ある排ガスの熱回収サイクルを設け、燃料を予熱して全体の効率向上を図る。

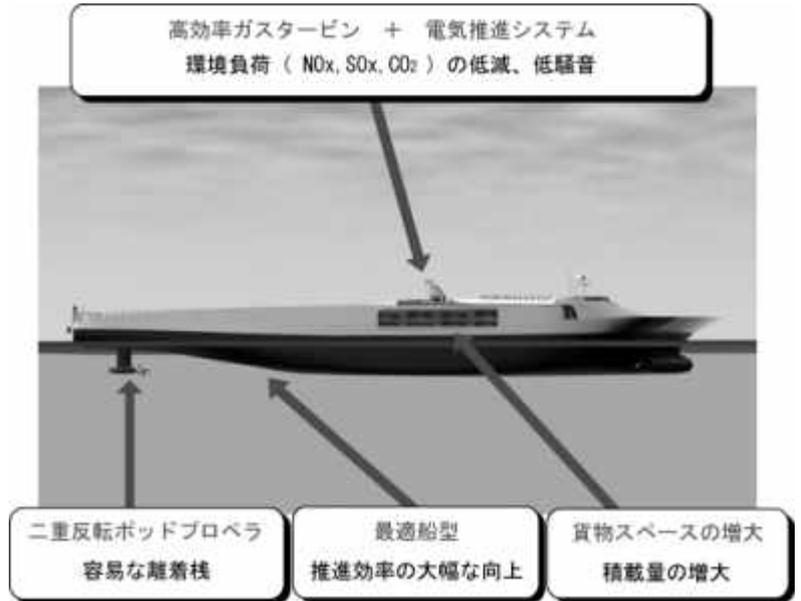


図 1 スーパーエコシップのイメージ

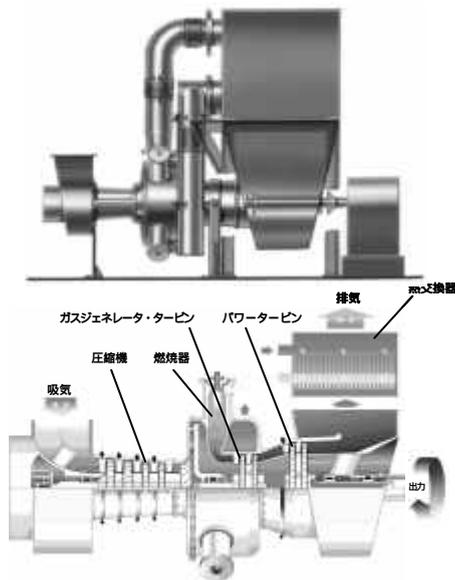


図 2 S M G T の仕様と概念図

SMGT 仕様

| | | |
|----------|-----------------|-----------------------|
| G/T名 | SMGT | |
| 開発主体 | SMGT技術研究組合 | |
| G/T形式 | 再熱開放2軸式(1/LP/R) | |
| G/T構成 | 圧縮機 | 軸流4段 遠心1段 |
| | 燃焼器 | 4缶偏流式 |
| | GG | 軸流2段 |
| | PT | 軸流2段 |
| | 熱交換器 | プレートフィン型 |
| 寸法 L×W×H | m | 2.2×1.0×1.0 (熱交換器を除く) |
| 重量 | kg | 41500 (SMGT本体 3500) |
| 出力取出方向 | 排気側 | |
| 燃料 | 軽油、A重油 | |
| 出力 | | |
| 定格連続出力 | kW | 2300 (吸気温度15) |
| 最高連続出力 | kW | 2600 (吸気温度 0) |
| 熱効率 | % | 36.5 |

スーパーエコシップに採用予定のスーパーマリンガスタービンは、2500kw 級の図 2 に示すような排ガスの熱回収サイクルを設けた再生サイクル形を採用した高効率のガスタービンであり、SMGT 技術研究組合が日本財団の助成を受け耐久試験等所要の開発が進められている。実証船搭載機は、信頼性に重点を置く仕様で検討する。

3.1.1 排出ガスについて

ガスタービンの採用理由の一つが環境親和性である。特に、NOx については排出量が 1.2 g/kwh 以下であり船用高速ディーゼルエンジンの 1/10、工業用のガスタービンとの比較でも 1/3 となる（図 3 参照）。また、SOx 排出量についても 2/5 になるが、これは良質の燃料油の使用による。

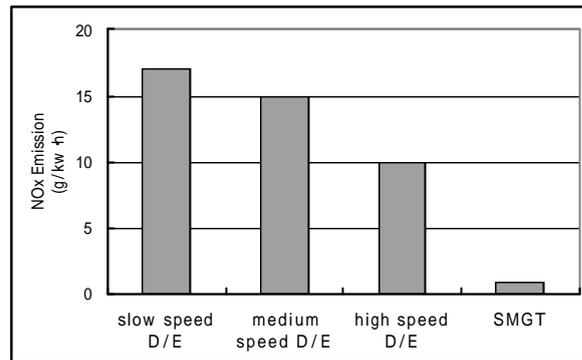


図 3 NOx の排出量

3.1.2 その他の効果

- 1) 小型軽量の特徴を活かして設計を工夫すれば、機関室の容積や機関重量の軽減分だけ多くの貨物を搭載できる。貨物量の増大効果としては、タンカーとフェリーについての試設計結果で 6,500m³ 積の白油タンカーの基本仕様を変えずに 7,000m³ 積まで搭載可能となる。また、フェリーの場合には、乗用車換算で 22%の搭載台数増加が達成された。
- 2) 振動と騒音を低減することができ、より快適な船内環境が得られる。
- 3) 船内でのメンテナンスが軽減され船員の労働負荷が軽減される。ガスタービンを甲板上に配置すれば、エンジンの換装や保守作業は極めて容易となる。
- 4) 廃熱を利用できれば、経済性の向上及び CO₂ の削減ができる、

といった効果が期待できる。

解決すべき課題は、初期コストとメンテナンス費用の低減である。

3.2 二重反転プロペラ型ポッド推進器

ポッド推進システムとは、上から吊り下げられた鰭型（ポッド）の容器の中に取り付けられたプロペラを回転させ推進するシステムであり、ポッドを水平方向に 360° 旋回させることにより推力の方向が制御できることから舵機能をそれ自体が有している。また推進力の方向を直接変えられることから操船性能が格段に向上する。

ポッド型電気推進システムは、1998 年、ABB 社の AZIPOD が大型客船に納入されて以来、欧米では、ほとんどの大型客船に採用されている。特に EU 主導の OPTIPOD などの開発プロジェクトにより、欧州で普及している。また、客船以外の船種についてもケミカルタンカーなどその利用が広がりを見せている。ポッドプロペラを搭載することによるメリットは、後にまとめる。海技研が、ナカシマプロペラ（株）及び東芝三菱電機産業システム（株）等の協力を得て現在開発中の二重反転プロペラ型ポッド推進器は、推進効率において世界でトップクラスのものをめざす。

3.2.1 二重反転プロペラ型ポッド推進器の特徴

ポッド推進システムの前提となる電気推進システムには 10%程度のエネルギーの伝達損失があり、このシステムの普及を阻害する要因になっている。そのため、ここで開発している二重反転ポッドプロペラでは、反対方向に回転する2個のプロペラを直列にした二重反転プロペラを採用することにより流体力学的な効率を高め、さらにプロペラを低回転・大直径化して効率の向上を図ることにより、現状の技術で最高のプロペラ効率を得る。

二重反転プロペラのアイデア自体は、すでに19世紀前半にその概念が登場している。しかし、二重反転プロペラの軸機構の複雑さや推進効率推定法の難しさが大きな阻害要因となり、理論的研究と実船装備が本格化するのには20世紀になってからである。その特徴は、省エネルギー効果であり、図4に模式的に示すように、通常の単独プロペラでは、プロペラの作り出す旋回流は再利用されることなく船尾から無駄に流れ去ってゆく。この旋回流のエネルギーを反転する後のプロペラで回収し推力に変換して再利用するのが二重反転プロペラの特徴で、単独プロペラよりも高い効率を達成することが可能となる。

今般開発された二重反転プロペラ型ポッド推進器は、通常の船尾に装着するときでさえ軸系の複雑さから敬遠されがちな二重反転プロペラを、モータと直結するシンプルな形式で狭いポッド内に装備したことが大きな特徴である。モータがポッド内部に装填されているため、二重反転シール部の漏水を完全に防止することが課題となる。特に、二重反転プロペラのシール部は2つのプロペラ軸が反転しているため、周速が通常プロペラの2倍となり、より厳しい条件が課せられる。この難点をクリアするために、シール部には特別な工夫がなされている。

CRP (Contra-Rotating Propeller) 二重反転プロペラ

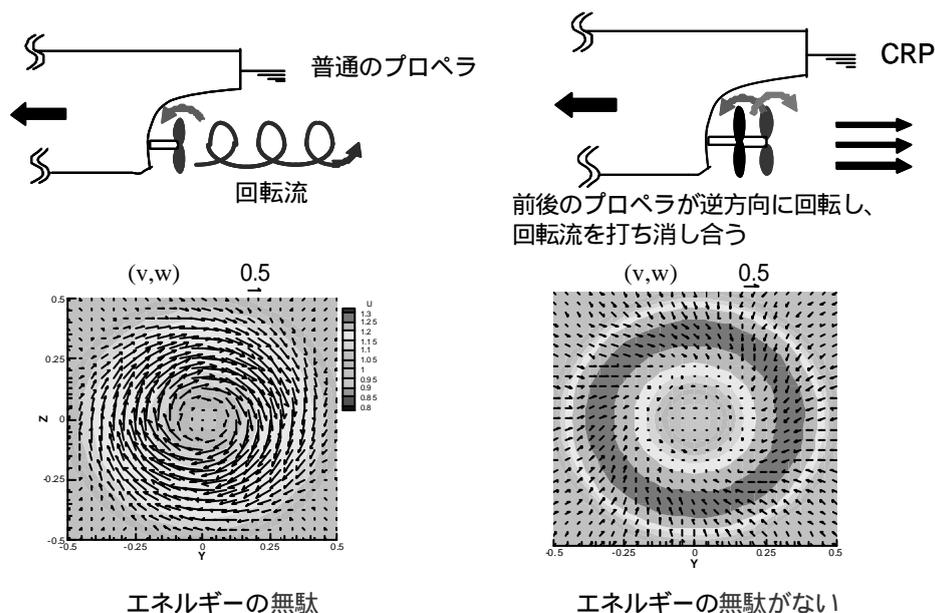


図4 二重反転プロペラ の概念

注) OPTIPOD：EU主導でポッド船の設計、運航指針の作成、ポッド推進器の運航時性能評価を行ったプロジェクトである。クルーズ客船のミレニアム等5隻のポッド船についてポッド荷重、主機の負荷変動、騒音などをモニタリングも実施している。

全体の機構は、ポッド内にモータを2台内装し「モータ軸の中にもうひとつの回転軸を通す」というギアを用いないシンプルな構造とし、推進効率の向上を図るため直径を小さくできる永久磁石方式の電動機を採用、ポッド及びストラットの形状もCFDを駆使して最適化を図っている。

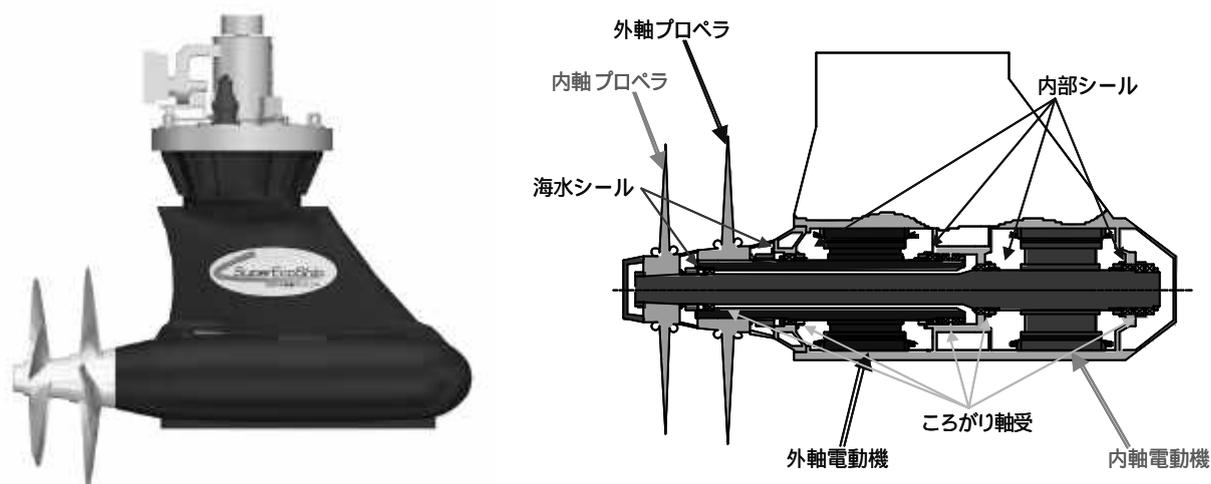


図5 二重反転プロペラ型ポッド推進器の概略構造

表1 二重反転プロペラ型ポッド推進器の仕様

| | |
|---------------|------------------------------|
| 電動機形式 | 永久磁石電動機 |
| 電動機台数 | 2 |
| 連続最大出力(1台当たり) | 1250 kW (200 rpm時) |
| 定格電圧 | 約 1100 V |
| 出力回転速度 | -200 ~ 200 rpm (等速反転、定トルク出力) |
| 旋回時間 | 最速 20秒/180° (1.5rpm) |

3.2.2 電動機構造

低回転時にも高い軸トルクを得る電動機を開発し、極力コンパクトにするため回転子に永久磁石を採用した。さらに電動機通風冷却装置を不要とした構造となっている。

電動機枠とポッドケーシングを兼用した構造として、ポッドケーシングの表面

を流れる海水により電動機固定子を冷却することにより、ポッドの小型化を図っている。

3.2.3 ストラットとポッドケーシング

ポッド本体部とストラットはボルトで結合される構造で、必要に応じてモジュール単位で分解・組立が可能となっている。このため、製造工程においてはモジュール毎に製作することが可能で工程の短縮およびコストの削減に寄与でき、メンテナンスにおいてもモジュール単位での分解整備により、工期の短縮とメンテナンスコストの削減が可能となる。

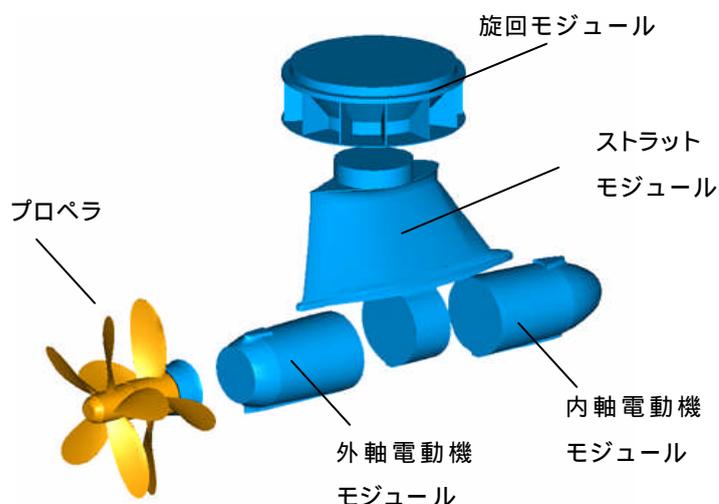


図6 モジュール構造

3.2.4 シール構造

2本のプロペラ軸のプロペラの船首側にはエアー式海水シールが取り付けられ、エアーにより海水側と潤滑油（転がり軸受用）側を分離し海水の侵入と潤滑油の漏出を防止している。さらに、万が一海水がモーター側に浸入した場合の対策として海水を吸い出す機構も備えており、浸水による事故防止に万全の対策を施している。

3.2.5 二重反転プロペラ型ポッド推進器の実機試験

この二重反転プロペラ型ポッド推進器の実機が完成し、7月22日一般に公開され国土交通省富士原技術審議官他約200名の方々が参加し、その模様は、NHK大阪の17時のニュース、日刊工業新聞、日本海事新聞、日刊海事通信、海事プレスにより報道された。



写真1 CRP POD 実機の公開

その後、8月24日までドックに注水し実際に船舶に搭載した状態を模擬して、機能と耐久性を確認する実験をIHIアムテック（相生工場）にて行った。現在、その試験結果について解析を行っている。

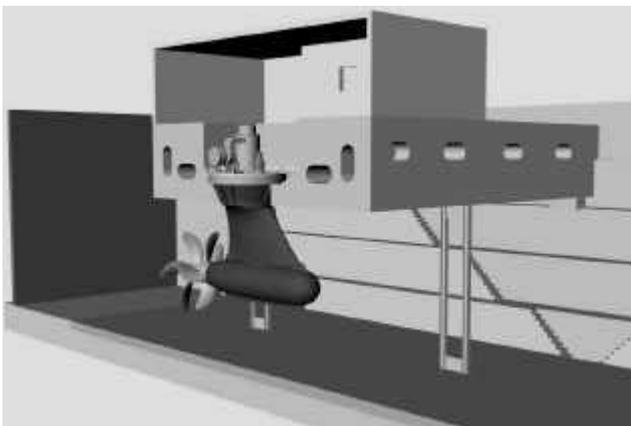


写真2 CRP POD 実機の試験風景

試験は、通常の日重反転の状態の他逆日重反転、前プロペラのみ固定・遊転、後プロペラのみ固定・遊転した場合など、想定される航行時の作動状態下での試験も行った。現在のところ、次のような結果が得られている。

ポッド推進器を船舶に装備した際のプロペラ起振力は、図7に示すように、前プロペラ4翼1次成分、後プロペラ5翼1次成分、 $4 + 5 = 9$ 翼1次成分の振動が卓越している。これは、推測通りの結果である。これにより、プロペラ起振力の卓越振動数が把握できたので、船体構造設計に反映する。

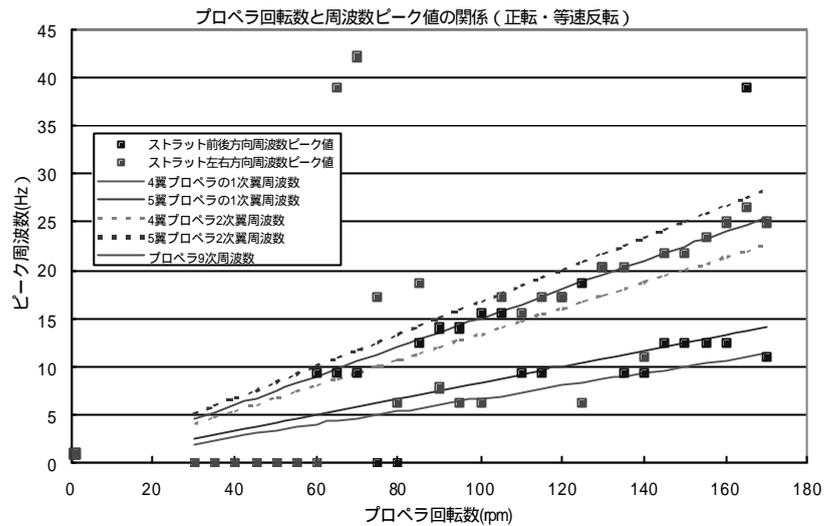


図7 プロペラ回転数と起振力ピーク周波数

また、二重反転プロペラの正転及び逆転時の前後プロペラの合計出力・回転数カーブを図8に示す。正転、逆転ともに馬力の増加に対して3乗カーブでほぼ近似できている。

その他、モータ・シール部の耐久試験等様々な試験を終え、現在、データの解析・問題点の洗い出しと、実船搭載の二重反転ポッド推進器の設計準備を行っている段階である。

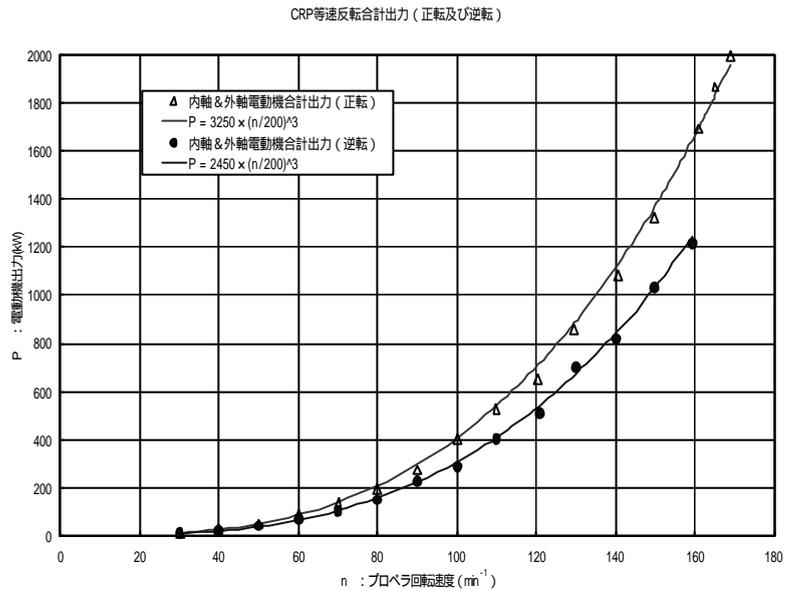


図8 二重反転プロペラ正転・逆転時の馬力-回転数カーブ

3.3 二重反転プロペラ型ポッド推進器搭載船のメリット

船舶に本ポッド推進器を搭載すると、次のようなメリットがある。

- 1) 船型改良の効果と相俟って電気推進システムのエネルギーの伝達損失を補い総合効率が10%程度向上する。
- 2) ポッドを90°回転し強力なスターンスラストとして用いることができ離着岸性能が向上する。

- 3) 旋回半径が30%減少するなど操縦性能が格段に向上する。
- 4) 推進プラントによる振動及び騒音が低減し、船尾船型が改善できプロペラに流入する流れが比較的均一になるのでプロペラによる船体振動が低減する。
- 5) 在来型の主機関、プロペラ軸、舵、スターンスラスト等が不要のため、船内空間の有効利用（貨物搭載スペースや旅客スペースへの振替）を図ることが可能。

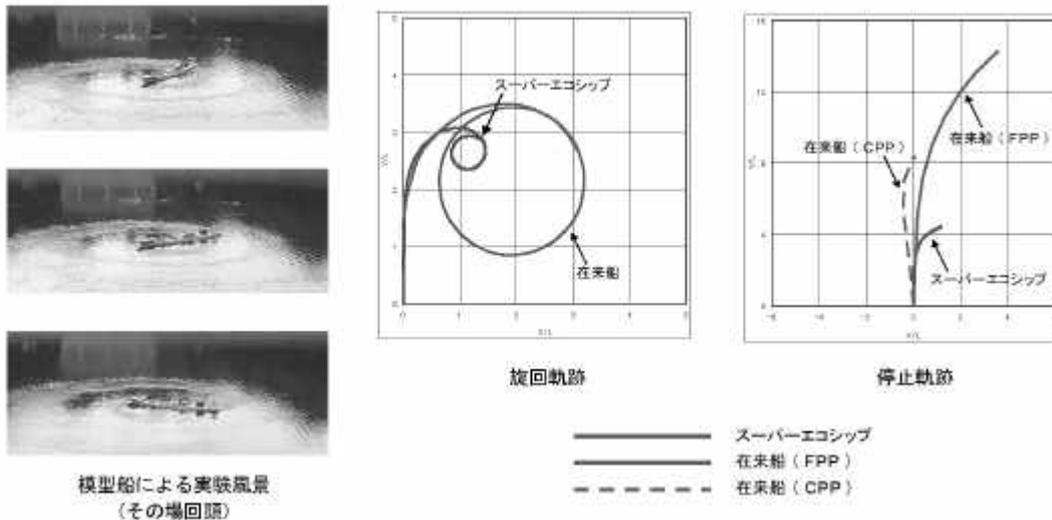


図9 ポッド船の操船性能

このような高い推進効率により経済性の向上が期待され、また、操縦性能が改善されることから、運航性能や安全性の向上も期待される。特に、輻輳海域を航行する機会が多く、また、離着栈の回数も多い内航船にとってこれらの性能の向上による効果は大きい。

ただし、留意すべきことは旋回性能が良いことは、舵をとると回頭し易いことであるから、船が多少の風による外乱を受けても真進するという性能、保針性能が悪くなる傾向がある。

この保針性能は、スパイラル試験における不安定ループ幅等により判別が可能となる。図10には改善段階のものであるが一軸船の例を示している。この結果によると、不安定ループ幅が7°であり、実用上許容できるが、今後さらなる改善を図り5°程度の不安定ループ幅を目指していこうと考えている。

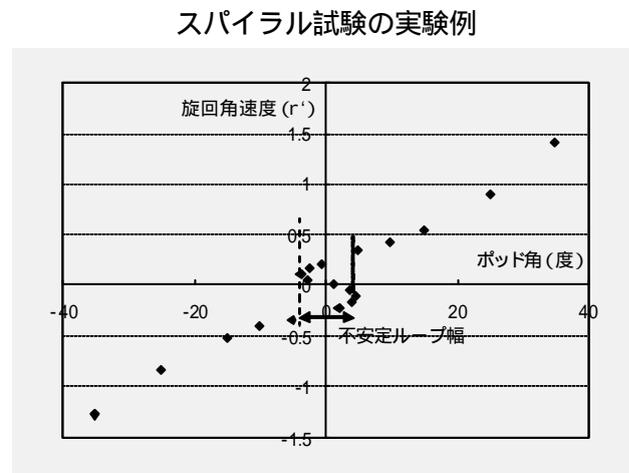


図10 スパイラル試験による不安定ループ幅

おわりに

1997年に京都で開催された国際会議で、先進38ヶ国に二酸化炭素などの地球温暖化ガスの削減目標を定めた京都議定書が採択された。政府は、2002年3月に地球温暖化対策推進大綱を見直し、6月地球温暖化防止条約・京都議定書の批准を承認した。内航海運の二酸化炭素の排出原単位（1トンの貨物を1km運んだ場合の二酸化炭素排出量（g））は商業用普通トラックに比較し1/5と高効率な輸送機関である。（図11）

モーダルシフトを実現し、地球環境保全を達成するためには、二重反転ポッドプロペラ、スーパーマリンガスタービン、ポッド船型開発などにより所要の環境目標を達成し、さらに、スーパーエコシップが現存船に比較し高い経済性、運航性能をもつ船として広く利用される必要がある。これまで開発してきた技術は要素技術の集大成といえるが、個々の技術は幅広く活用できるものである。

今後、これらの個々の技術を活用し各種の船種に適用できる幾つかの推進システムを提案していきたい。二重反転プロペラ型ポッド推進器の技術開発は、スーパーエコシップにとって要となる技術開発であり、次世代に大きな役割を担っている。

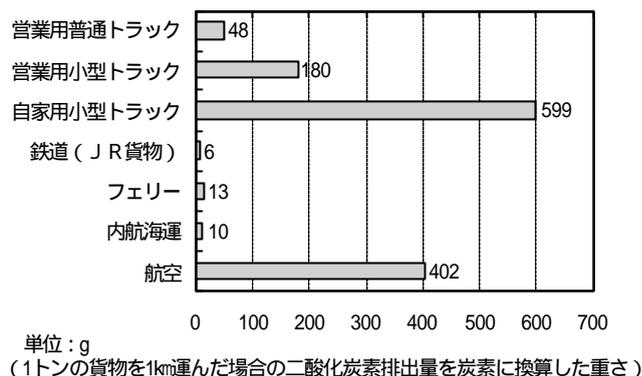


図11 貨物輸送機関のCO₂排出原単位

