

## 特集論文

## 次世代カーフェリーの省エネ化への取組み

## Approaches of the Energy-Saving ROPAX Ferry for the Next Generation



森 哲也\*<sup>1</sup>  
Tetsuya Mori

北村 徹\*<sup>2</sup>  
Tohru Kitamura

山本 明\*<sup>3</sup>  
Akira Yamamoto

大西 克司\*<sup>4</sup>  
Katsushi Ohnishi

上田 直樹\*<sup>5</sup>  
Naoki Ueda

土井 明\*<sup>6</sup>  
Akira Doi

当社はこれまでに、ディーゼル主機関とプロペラとを直結した推進系統を2組有する、2機2軸推進方式のカーフェリーを多数建造してきたが、近年の地球温暖化問題や燃料油価格の異常高騰を背景として、環境負荷低減のニーズが急速に高まってきており、これらのニーズに応えるため、新たなコンセプトの推進プラントを有する省エネカーフェリーの開発が急務となっている。本報では、燃料消費量低減という観点にスポットを当て、新しい推進プラントを有する省エネカーフェリーの開発における当社の取組みについて述べる。

## 1. はじめに

1997年の地球温暖化防止京都会議以降、世界規模で地球環境保全に向けての取組みが加速しており、日本国内においては、物流効率化と環境負荷低減を目指したモーダルシフトの促進や国土交通省によるスーパーエコシッププロジェクト<sup>(1)</sup>の推進、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)によるエネルギー使用合理化事業者支援事業<sup>(2)</sup>が積極的に進められてきている。一方、最近の燃料油価格の異常高騰は船舶の運航採算に多大な影響を与え、船社の経営にとって深刻な問題となっている。このような背景の下、当社は地球環境と船社の経済活動の調和を図るべく低燃費カーフェリーの開発に取り組んできた。本報では、まず、カーフェリーに対する要求性能について触れ、これまで建造してきた在来型カーフェリーの推進プラントの特徴について述べる。次に、省エネ次世代カーフェリーの開発において解決すべき課題について述べ、最後に、当社が考える新たな推進プラントのコンセプトについて紹介する。

## 2. カーフェリーに対する要求性能

北海道、本州、四国、九州とその周辺の島々からなる日本では、島と島の架け橋として、人や物資を輸送する渡船が古くから発達してきた。その中で、長距離カーフェリー(片道300km以上の航路に就航するカーフェリー)は、国内のトラック輸送における海上のバ

イパスとしての役割を担うことで国内物流に貢献してきた。図1にカーフェリーの航海速力の変遷を竣工年ごとに示す。国内では1985年頃から航海速力が20ktを超えるカーフェリーが増え始め、その後も徐々に航海速力は上がっている。フェリー船社にとっては、陸走するトラックや鉄道との輸送時間の格差を縮めることが輸送サービス上の重要な課題であり、現在においても依然として高速化のニーズは高い。

一方、地球環境保全に対する関心の高まりや最近の燃料油価格の異常高騰により、低燃費化に対するニーズが急速に高まってきており、次世代のカーフェリーでは、高速化と低燃費化という相反する要素の両立が今まで以上に強く求められている。

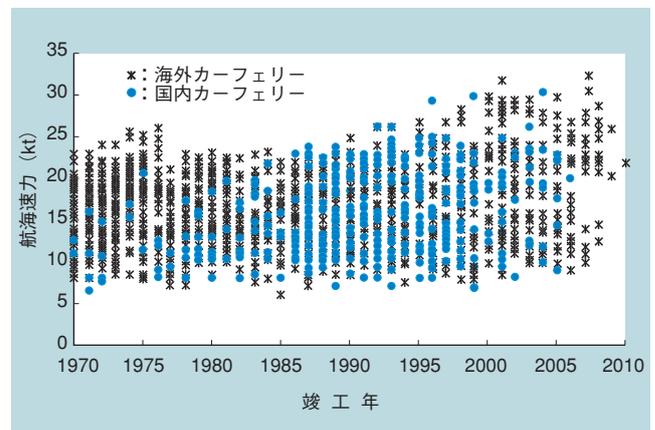


図1 カーフェリーの航海速力  
1970年以降の航海速力の変遷を示す。

\*1 下関造船所船舶・海洋部 計画設計課

\*2 下関造船所船舶・海洋部次長

\*3 下関造船所船舶・海洋部 計画設計課長

\*4 下関造船所船舶・海洋部 計画設計課主席

\*5 船舶・海洋事業本部船舶技術部商船・海洋計画グループ長

\*6 船舶・海洋事業本部船舶技術部商船・海洋計画グループ

1997年に開かれた地球温暖化防止京都会議では、1990年を基準として2008年から2012年までの間に、温室効果ガスを国別に設定した目標値以下に削減することが採択された（日本の目標値は6%の削減）。国土交通省の調べ<sup>3)</sup>によると、1990年度における国内運輸部門のCO<sub>2</sub>排出量は217百万トンCO<sub>2</sub>で、このうち船舶の排出量は6.3%（13.7百万トンCO<sub>2</sub>）であった。これに対して2005年度の排出量は257百万トンCO<sub>2</sub>で、このうち船舶の排出量は5.0%（12.9百万トンCO<sub>2</sub>）となっており、運輸部門全体のCO<sub>2</sub>排出量は増加傾向にあるものの、船舶の排出量が運輸部門全体に占める割合は減少傾向にある。2005年2月の京都議定書発効を受けて2005年4月に閣議決定された京都議定書目標達成計画の施策では、前述の状況を踏まえ、CO<sub>2</sub>排出量が増加している鉄道や航空機に対しては、単体のエネルギー効率向上によるCO<sub>2</sub>削減目標値が与えられているものの、船舶に対しては具体的な目標値は定められていない。一方、トラック輸送から鉄道輸送・海運への転換を図るモーダルシフトを中心とした物流の効率化に対しては、運輸部門の各施策と比べて相対的に高いCO<sub>2</sub>削減目標値が割り当てられている。このことから、大量の貨物を長距離輸送するのに適した船舶が環境負荷低減に果たす役割への大きな期待がうかがえる。

図2に1995年以降のC重油価格（1kL当り）の変動<sup>4)</sup>を示す。最近のC重油価格は、2000年以前の2倍以上に高騰している。C重油単価を¥47,000/kLとして、航海速度23kt、総トン数20,000GT弱の大型カーフェリーを対象として船舶経費を試算したところ、全船舶経費に占める燃料費の割合は30%を超えており、燃料費の高騰はフェリー船社の経営にとって大きな負担となっていることが分かる。

### 3. 在来型カーフェリーの推進プラント

一般的に、カーフェリーは通常の商船と比べて高速

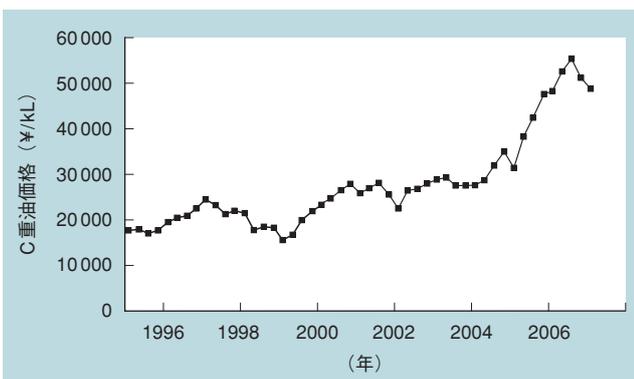


図2 C重油価格  
1995年以降の価格変動を示す。

で推進馬力は大きくなるが、岸壁の水深から決定される喫水の制限により、プロペラ直径は制約を受ける。したがって、1つのプロペラでは所要の推進馬力を吸収することが困難となるため、従来のカーフェリーでは独立した2組の推進系統を左右対称に配置した2軸推進方式が採用されてきた。2軸推進方式では、船体からプロペラ軸が露出し、軸をボッシングとブラケットで支持するシャフトブラケット方式（図3）が一般的である。

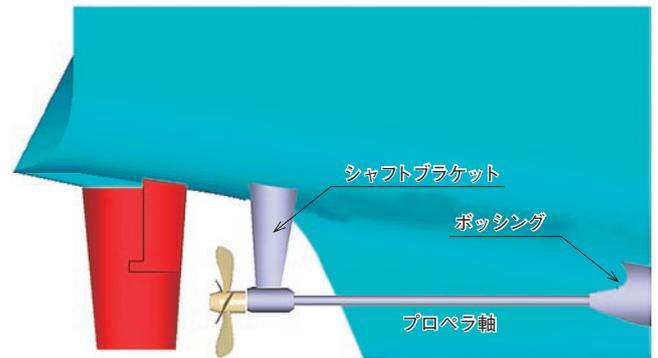


図3 2軸推進方式（シャフトブラケット方式）  
在来型カーフェリーで多数採用されている。

2軸推進方式は、所要の推進馬力が2分割されることでプロペラ起振力を低減でき、振動や騒音を抑えるといった点において有効である。また万一、一方の推進系統にトラブルが生じた場合でも、もう一方の推進系統で運航を継続することが可能であり、旅客船としての冗長性や安全性には優れていると言える。さらに、推進プラントが2分割されることで操縦装置である舵も2分割されるため、港湾内や船舶の往来が激しい狭水域での操船性にも優れている。これらの理由によって、在来型カーフェリーには2軸推進方式が数多く採用されてきた。

図4に在来型2軸カーフェリーの推進プラントを比較して示す。推進プラントはディーゼル直結方式と電気推進方式に大別される。ディーゼル直結方式には2機2軸と4機2軸の方式があり、国内のカーフェリーでは2機2軸方式が一般的であるが、近年、欧州のカーフェリーでは、4機2軸方式が多数採用されている。4機2軸方式は、主機関のトラブルに対する冗長性に優れるだけでなく、運航速度に合わせて主機関の運転台数を調整できるといった柔軟性を有している。例えば、低速航行時に主機関の運転台数を減らすことで、燃料油の節約やCO<sub>2</sub>排出量の低減を図ることができる。電気推進方式は、振動・騒音面でディーゼル直結方式よりも有利であるため、大型客船での採用実績が多い。

| 2機2軸ディーゼル直結方式  | 4機2軸ディーゼル直結方式   | 2軸プロペラ+電気推進方式  |
|--|---|--|
|  |   |  |
| <p>(特徴)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 減速機を介して主機関とプロペラを1対1で直結する方式。</li> <li>■ 国内フェリーのほとんどが本方式を採用。</li> <li>■ 軸発電機 (S/G) を採用せずに、ディーゼル発電機で港内操船時のスラスト電力を賄う場合もある。</li> </ul> | <p>(特徴)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 減速機を介して主機関とプロペラを2対1で直結する方式。</li> <li>■ 推進機関の冗長性に優れる。</li> <li>■ 低速域は2軸推進を維持した減機運転が可能 (当て舵が不要)。</li> <li>■ 近年の欧州フェリーで数多く採用されている。</li> </ul> | <p>(特徴)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ プロペラをモータで駆動する方式 (客船での実績が多い)。</li> <li>■ 左記のディーゼル直結方式と比べて振動・騒音面で有利。</li> </ul> |

図4 2軸カーフェリーの推進プラント

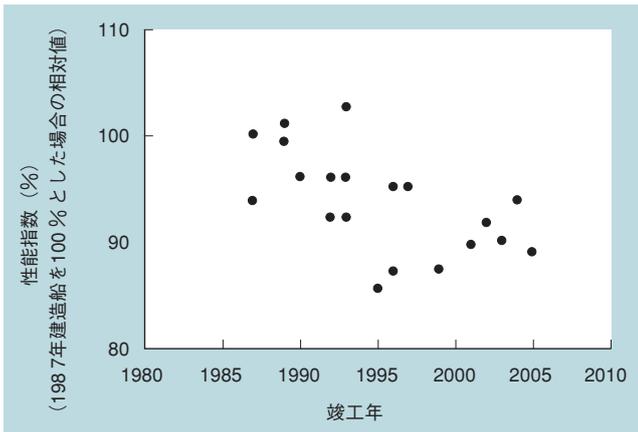


図5 当社建造大型2軸カーフェリーの推進性能  
1987年からの約20年間で約10%の性能改善を実現している。

図5に当社で建造した垂線間長が150m以上の大型2軸カーフェリーの推進性能を年代ごとに並べて示す。縦軸の性能指数は1987年建造船の推進性能を100%とした相対値としている。カーフェリーの高速化に伴う主機馬力の増加を抑えるために数値流体力学 (CFD: Computational Fluid Dynamics) を活用して船型開発を進め、1987年から現在までの約20年間で約10%の性能改善を達成している。

#### 4. 次世代カーフェリーの開発における課題

今後、さらなる高速化・低燃費化の両立を図っていく上では、船体抵抗の低減が不可欠となる。一般的には、2軸船型よりも、一般商船で常識的に採用されている1軸船型 (図6) の方が、喫水線下の軸系支

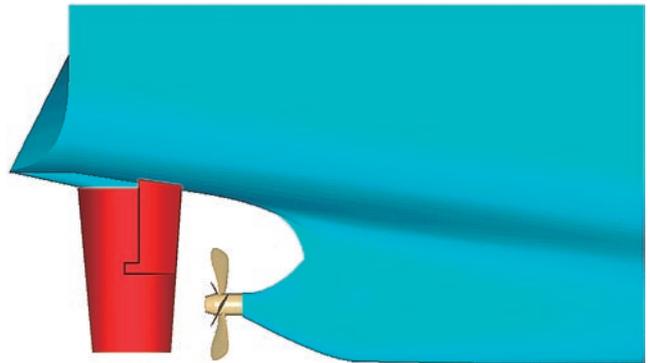


図6 1軸推進方式  
1軸のため軸系の支持構造を船内へ配置できる。

持構造が簡略化されるため (シャフトブラケットがなく、ボッシングの数が減少) 船体抵抗が小さく、10~15%程度の推進性能改善が期待される。そこで、カーフェリーに対して1軸推進方式の採用を視野に入れて、新たな推進プラントを有するカーフェリーの開発に取り組むこととした。

1軸推進方式のカーフェリーの開発に際しては、トラック等の貨物を運ぶ船としての要求の他に、人を運ぶ船としての安全性・信頼性・静粛性を確保する必要がある。2軸船は2組の推進系統を有するが、1軸船の場合、2機1軸方式を採用することで主機関のトラブルに対する冗長性は確保できるが、軸系のトラブルに対する冗長性は2軸船よりも劣る。このため、軸系装置の信頼性を確保することが重要となる。また、静粛性とプロペラ効率の観点からは、プロペラ起振力低減のため、プロペラと船尾船底のクリアランスを十分

に確保した上で、大直径プロペラを採用してプロペラ効率の向上を図る必要があるが、プロペラの直径は使用岸壁の水深から決まる喫水により制限されるため、これらの全ての要素をバランスさせた設計が必要となる。

### 5. 次世代カーフェリーの推進プラント

次世代カーフェリーの開発における推進プラントのコンセプトを図7に示す。まず1軸船型の良好な推進性能をいかした2機1軸方式が挙げられるが、本方式では4章で述べたように軸系の信頼性確保が重要な課題となる。この課題を解決するための方式としては、電気推進方式（2軸ポッド推進方式）あるいはハイブリッド推進方式が考えられる。

電気推進方式では、プロペラに代えて電気駆動式ポッド推進器の採用が考えられる。ポッド推進器の採用により主機関及び軸系が省略できるため、配置設計の自由度が大きくなる。また、電気推進方式の採用によって、在来型（機械駆動式）の推進プラントに比べて振動・騒音を抑えることが可能となる。

ハイブリッド推進方式は、機械駆動式のプロペラに、電気駆動式のポッド推進器またはアジマス推進器を組

み合わせた推進方式であり、一般的にポッド推進器やアジマス推進器等の電気駆動方式は、機械駆動に比べエネルギーの変換ロスが大きいが、機械駆動式のプロペラと組み合わせて電気駆動の分担を下げることで、このデメリットを軽減している。これらのハイブリッド推進方式は、推進系統は完全に独立した構成になっているため、2軸推進方式と同等の冗長性を確保することが可能となる。図7では、機械駆動系統は2機1軸方式の記載としているが、推進系統は電気駆動系統のバックアップがあるので、1機1軸方式とすることも可能である。

また、ポッド推進器またはアジマス推進器は船尾船体下部に取付けられ、いずれも360度回転できるので、舵とスラストの機能を合わせ持つことになり、港湾内や離着岸時の操縦性向上が期待できる。

### 6. 当社での採用事例

5章で述べたハイブリッド推進方式の内、ハイブリッド型CRPポッド推進方式は、2004年6月に就航した新日本海フェリー(株)の“はまなす”“あかしあ”に採用され、この2隻は、在来型の2軸推進方式を採用した場合と比較して13%の燃料消費量低減を達成

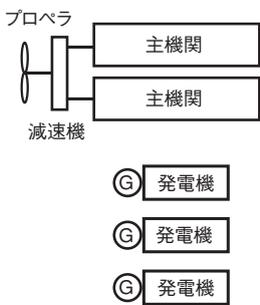
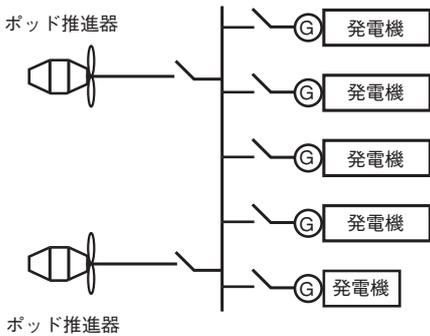
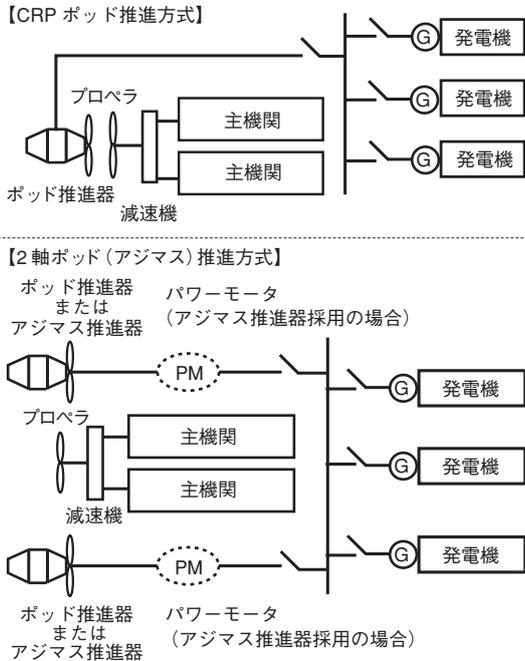
| 2機1軸ディーゼル推進方式  | 電気推進方式（2軸ポッド推進方式）   | ハイブリッド推進方式  |
|--|---|---|
|                                       |    |   |
| <p>(特徴)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 減速機を介して主機関とプロペラを2対1で直結する方式。</li> <li>■ 2軸方式に対して付加物抵抗が減少。</li> </ul> | <p>(特徴)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ プロペラに代えてポッド推進器を配置。</li> <li>■ ポッド推進器はスラストとしても使用可能。</li> <li>■ 推進系統は2軸船と同等の冗長性を有する。</li> <li>■ 電気推進方式のため、振動・騒音が比較的小さい。</li> <li>■ 主機/軸系がないため、配置設計の自由度が大きい。</li> </ul> | <p>(特徴)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 主プロペラの後ろにポッド推進器（またはアジマス推進器）を配置。</li> <li>■ ポッド推進器（またはアジマス推進器）はスラストとしても使用可能。</li> <li>■ 推進系統は2軸船と同等の冗長性を有する。</li> </ul> |

図7 次世代カーフェリーの推進プラント

し、運航コストの改善と CO<sub>2</sub> 排出量の削減に貢献している<sup>6)</sup>。以下、本船の推進プラントの概要について紹介する。

ポッド推進器とは、ポッド状の容器の中にモータを組み込み、モータに直結したプロペラを駆動させる推進ユニットである。

図8に示すように、ポッド推進器を主プロペラの軸心延長線上に配置して、主プロペラとポッドプロペラを1組の二重反転型推進器（CRP：Contra Rotating Propeller）とするよう近接して配置している。近接した2つのプロペラをお互いに反転させることにより、回転流回収効果が得られる。

主プロペラは可変ピッチプロペラで、クラッチ付き減速機と中間軸を介して2基の中速ディーゼル主機関により直接駆動される。後方に位置するポッドプロペラは主発電機からの電力によりポッド内の電動モータで駆動される電気駆動式である。

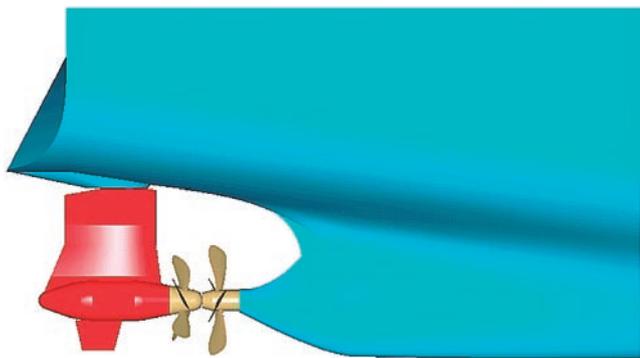


図8 ハイブリッド型 CRP ポッド推進方式  
主プロペラの後方に CRP ポッド推進器を備えている。

## 7. ま と め

グローバル経済の進展に伴い、原油の需要が著しく増加し、燃料油価格がこの数年で異常高騰している。また、年々、世界的にエネルギー消費量が増大している中で、化石燃料の使用に起因する地球温暖化に対する不安が高まっており、地球規模での環境保全が急務となっている。

このような社会環境の下、当社としては、高性能でかつ燃費に優れた船を世の中に送り出すことが、船社の経済活動を支え、地球環境保護に貢献していく上での使命であると考えている。

新たな推進プラントの開発の他、次世代カーフェリー開発に対する新たな取組みとして、

(1) SOLAS（海上人命安全条約）改正による確率論（HARDER）での損傷時復原性評価

(2) MARPOL（海洋汚染防止条約）改正による燃料油タンクのダブルハル化

の国内法への取入れを考慮し、これらの規則要求を満足させ、旅客船としての安全性強化や海洋汚染防止に繋げていく必要がある。

また、旅客船としての居住性・静粛性・バリアフリー等にも配慮することで、船社のみならず利用客にも喜んでもらえる付加価値の高いカーフェリーを今後も提供していきたいと考えている。

## 参 考 文 献

- (1) <http://www.jrtt.go.jp/business/vessel.htm>
- (2) <http://www.mlit.go.jp/kaiji/nedo/nedo.html>
- (3) <http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/kankyuu/ondankal.htm>
- (4) [http://www.geocities.jp/tetchan\\_99\\_99/oil/c-oil.html](http://www.geocities.jp/tetchan_99_99/oil/c-oil.html)
- (5) 上田直樹ほか、世界初のハイブリッド型 CRP ポッド推進高速フェリー、三菱重工技報 Vol.41 No.6 (2004) p.338



森哲也



北村徹



山本明



大西克司



上田直樹



土井明