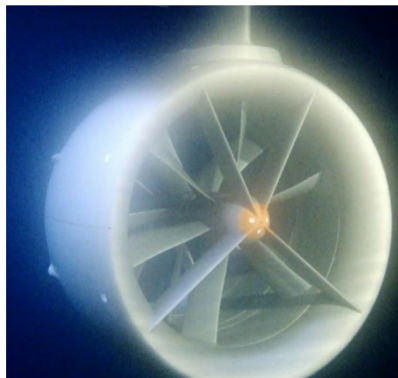


海洋モビリティの電動化・多様化ニーズに適合する 外周駆動型二重反転推進器の開発

Development of a Contra-rotating Rim Driven Propulsion System to Meet the Needs of Electrification and Diversification of Ocean Mobility



山田 卓慶*¹
Takuyoshi Yamada

細野 和樹*²
Kazuki Hosono

妹尾 茂樹*³
Shigeki Seno

西田 健彦*⁴
Takehiko Nishida

脱炭素化社会実現に向け、海洋モビリティのCO₂排出量削減を社会全体で実現していくべく、ソリューションアイデアの一つとして多様なニーズに対する柔軟性を持った電動推進器のコンセプトを提案する。母船の配置設計制約緩和と、運転条件に対するロバストな推進性能を兼ね備えた外周駆動型二重反転推進器の設計・検証を行った。外周駆動型推進器は駆動軸を持たずモータの内側にプロペラ翼が格納された推進器であり、コンパクトさが特徴である。この推進器に二重反転技術等を適用することで、広い運転条件での高い推進性能を狙った。検証を通して、ノズルプロペラに代表される従来の広運用条件適合型推進器に対し推進性能の改善を確認した。

1. はじめに

脱炭素化の流れを受け、船舶に代表される海洋モビリティにおける海上輸送時のCO₂排出量削減は喫緊の課題である。そして、このCO₂排出量削減は、製品性能改善による貢献はもとより、運航や荷役の効率化など、製品生産者のみならず海洋モビリティに関わる全てのステークホルダーで協力して成し遂げる必要がある。

一方で、ステークホルダーはそれぞれ個々の利益を確保する必要があり、またそのニーズは多種多様である。製品は個々のニーズに応える仕様とすべく、これまで都度設計を余儀なくされてきた。これら複雑に絡み合った問題に対する一つのソリューションアイデアとして、脱炭素化に向けた海洋モビリティの電動化に貢献し、母船の設計や運用に関するニーズに対して柔軟性を持った電動推進器のコンセプトを提案する。

母船の配置設計制約を緩和でき、また幅広い運転条件において高い推進性能を維持できる特徴を持たせた、外周駆動型二重反転推進器の設計及び性能検証について本報で紹介する。

2. 外周駆動型二重反転推進器の設計コンセプト

外周駆動型推進器はモータ駆動の電動推進器であるが、駆動軸の先にプロペラ翼が配置された一般的な形式とは異なり、駆動軸を持たずモータの内側にプロペラ翼が格納された推進器である。図1に示す外周駆動型推進器の構成の通り、モータ部と機械部が一体となった推進器であり、母船内には機械部を持つ必要がない。この特徴による、“推進器のコンパクト化や配置のフレキシブル化による、母船の配置設計制約の緩和”を最大のメリットと捉え、さらに駆動軸を持たない利点を生かした二重反転技術の適用による効率向上を狙った。

*1 総合研究所 特殊システム研究推進部

*2 総合研究所 流体研究部

*3 総合研究所 流体研究部 主幹研究員 博士(工学) / 技術士(機械部門)

*4 総合研究所 パワーエレクトロニクス研究部 主幹研究員

プロペラ翼の外側に駆動面を持っており、この駆動面に永久磁石を設置してその外側に電磁石を配置することでプロペラ翼を回転駆動させる構成である。永久磁石部と電磁石部のセットをモータと呼び、このモータを前後二段に配置することで、前後二段のプロペラを駆動させることができる。さらに、前後二段のプロペラの回転方向を互い違いにすることで、前段プロペラで生じる旋回流を後段プロペラで回収する、二重反転化が可能となる。これによって単段構成と比較して飛躍的に推進性能を高めることができると考えた。

また、モータを覆うシュラウドを流線形とし、プロペラ作動に伴う吸引力を利用してシュラウドに推進力が発生するよう設計することで、負荷が高い状態における推進性能低下を抑制することが可能である。この設計はプロペラの外側にシュラウドを持った旧来のノズルプロペラ技術の援用により実現できると考えた。

母船の配置設計制約の緩和・運用ニーズへの柔軟性を課題と考え、外周駆動型推進器のコンパクトさ、配置自由度の高さに、二重反転技術とノズルプロペラ技術を組み合わせることで、広い運転条件で高い推進性能を維持することを、外周駆動型二重反転推進器の設計コンセプトとする。

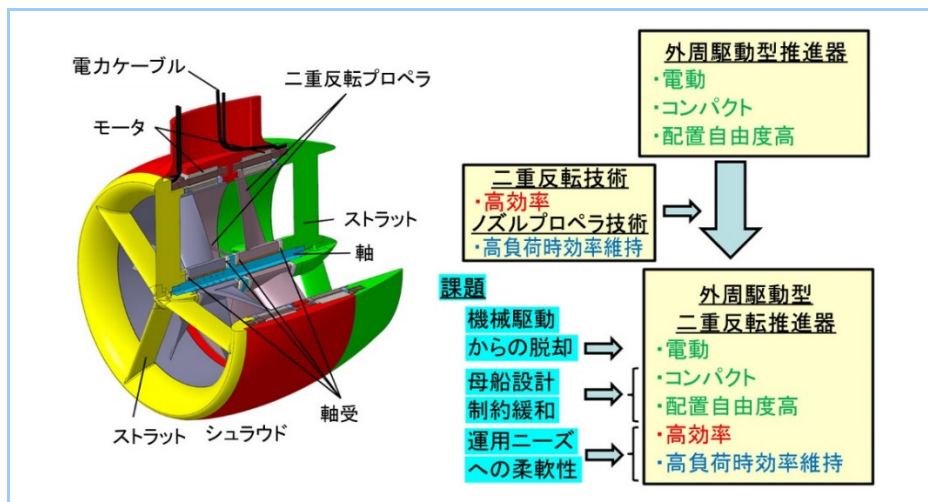


図1 外周駆動型二重反転推進器の構成と設計コンセプト

3. 設計

設計の大分類として、流体設計・電磁気設計・強度/摺動設計・熱設計・製造設計を行った。

各設計で得られた形状や構造は、各設計間で相互に影響を及ぼしあうため、それぞれ仕様を調整しながら設計を進めた。このうち本報では、CO₂ 排出量に直結する推進性能に直接的に影響を及ぼす、流体-電磁気設計について取り上げる。

主要目のうち、プロペラ・モータの直径、シュラウドの厚さ、長さ、及び回転数は、それぞれ流体効率最適解とモータ効率最適解を持っている。このため、順を追った設計では流体効率とモータ効率の積であるシステム効率を最適化することができない。

そこで、図2に示す数値解析を組み込んだ流体-電磁気設計ツールを開発し運用することで、主要目レベルのシステム効率最適化を図った。本ツールで得られた主要目をベースとして、詳細形状パラメタを調整することでプロペラ・シュラウド形状及びモータ寸法・構造の設計解を得た。

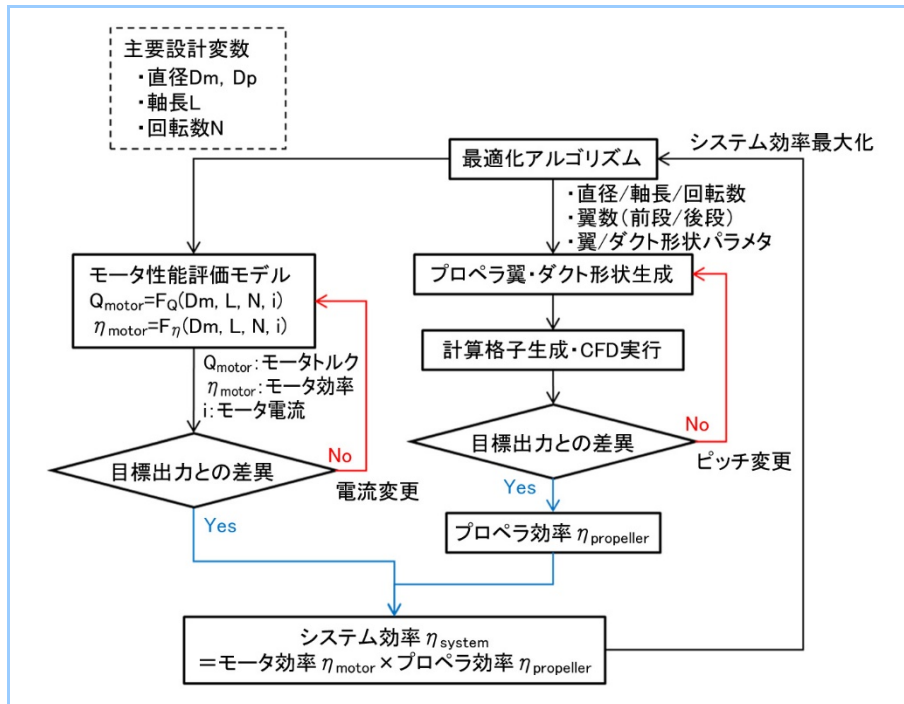


図2 主要目設計システムフロー

4. 検証

4.1 数値解析による検証

数値解析では CFD を活用し、流体性能として、所定の外部流速条件下でのモータトルクの推進力への変換効率である推進器効率を評価した。

一般に、推進器効率は横軸荷重度で整理され、オープンプロペラに代表される船舶の推進器は多くの場合荷重度に対して右肩下がり傾向を示す。荷重度は、単位面積当たりの昇圧量の動圧に対する比であり、荷重度が高い程、小面積に多くの荷重を持たせる条件となる。荷重度が高いことはすなわち外部流速に対して推進器の推力面を通した流体の加速量が大きいことを示している。この場合、推進器面内外の運動量の差が大きいことにより運動量損失が大きくなり、効率が低くなる。

CFD により得られた外周駆動型二重反転推進器の推進器効率は、極めて荷重度が低い領域では低い一方で、中荷重度から高荷重度域で高い値をキープする傾向が見られる。これは、プロペラの吸込みに伴い、シュラウドにかかる流体力が推進力を生み出す効果によるものであり、ノズルプロペラの設計技術を活用したものである。ノズルプロペラは最大効率点が低く、50～60%程度である⁽¹⁾のに対し、外周駆動型二重反転推進器は図3に示す通り 60%を超える最大効率となった。図4に示すとおり、二重反転化により推進器下流における旋回流速成分の放出を大幅に抑制できたことで、効率が向上したと考える。

この特性は、本推進器が幅広い運転条件において高効率を維持していることを示しており、すなわち多様な運用ニーズに応える可能性を示唆する。

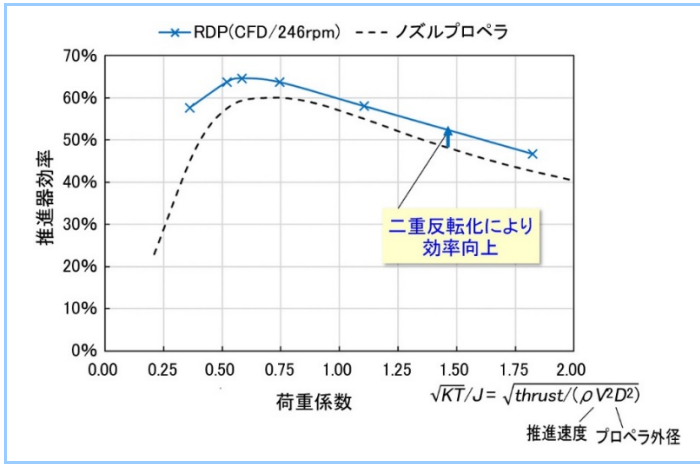


図3 解析による推進器効率検証結果

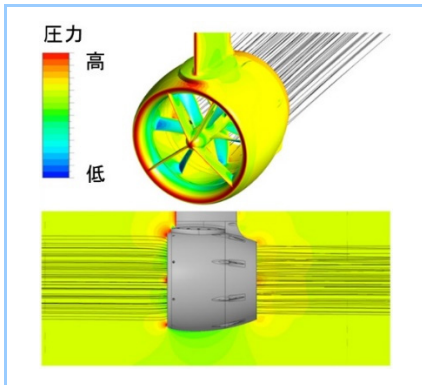


図4 推進器後流流場解析結果

4.2 試作機デザイン

水槽試験による性能検証を目的として、試作機を製作した。試作機は、実運用を想定した仕様とし、強度/摺動設計・熱設計・製造設計を経て製作したものである。

プロペラによる推力を内周側の水潤滑滑り軸受を介して固定軸に伝達させる構造とすることで、主回転軸不要の単純な軸構成とし、ワンパッケージでの二重反転推進器を実現した。また、プロペラ前後の昇圧を利用して、モータの回転子と固定子の間には水が循環する構造とする、モータ水中直接冷却方式を採用した。

このようにして電力ケーブル 6 本で接続されたコンパクトなデザインの推進器を実現し、母船の配置設計制約を極力受けたくないことが期待できる。すなわち、多様な設計ニーズに応える可能性を示唆する。図5に試作機の構成を、表1に推進器の諸元を示す。

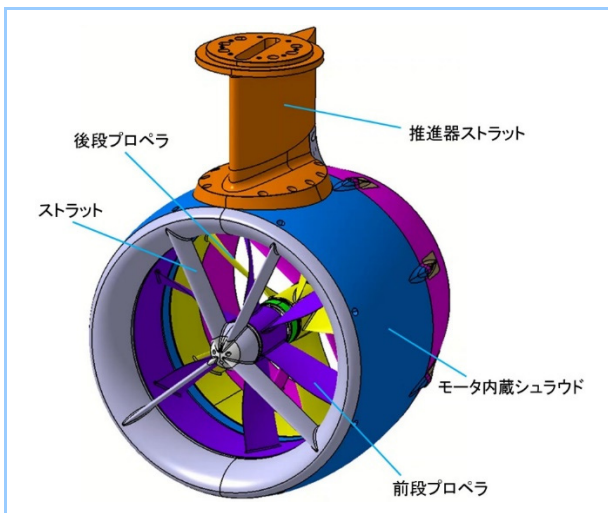


図5 試作推進器の構成

表1 試作推進器諸元

出力	4 kW × 2 stage = 8 kW
回転数	246 rpm
設計船速	4.21 m/s
モータ回転子 - 内径	450 mm
モータ回転子 - 外径	475.9 mm
モータ軸長	85 mm for each
モータ型	3 phases, 30 poles IPMSM
プロペラ直径	440 mm
プロペラボス径	90 mm
前段プロペラ翼数	6
後段プロペラ翼数	5

4.3 試験による検証

本報では、各種要素試験のうち、流体性能の検証を目的とした水槽試験の結果について示す。水槽試験では、曳航装置を用いて推進器を水中にて所定の速度で曳航している状態でモータに電力を供給してプロペラを回転駆動させた。試験装置の概要を図6に示す。外周駆動型二重反転推進器の構成上、駆動軸を持たないため、プロペラの推力やトルクを直接計測することは難しい。そこでプロペラ・シュラウド・ストラット等の推進器構成要素すべてに作用する流体力を計測することで系全体の推力を評価し、推進器に投入する入力電力を計測した。さらに、事前に得ていたモータの入力電力・回転数-負荷トルク特性を用いてプロペラトルクを評価することとした。

計測結果を元に、図7に示す流体特性を算出した。CFD と試験の違いの一つに、CFD で考慮していない軸受の摩擦損失がある。このため、試験結果は CFD に対して推進器効率が低めに評価されている可能性があると考えるが、CFD の結果と同様に、ノズルプロペラに対して推進器効率が改善する結果が得られた。

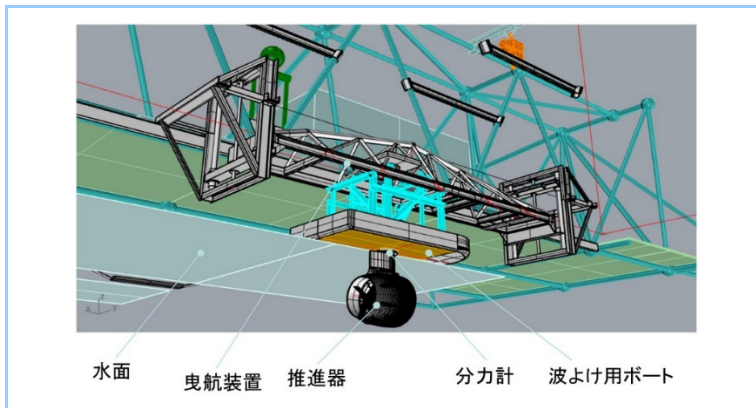


図6 水槽試験配置

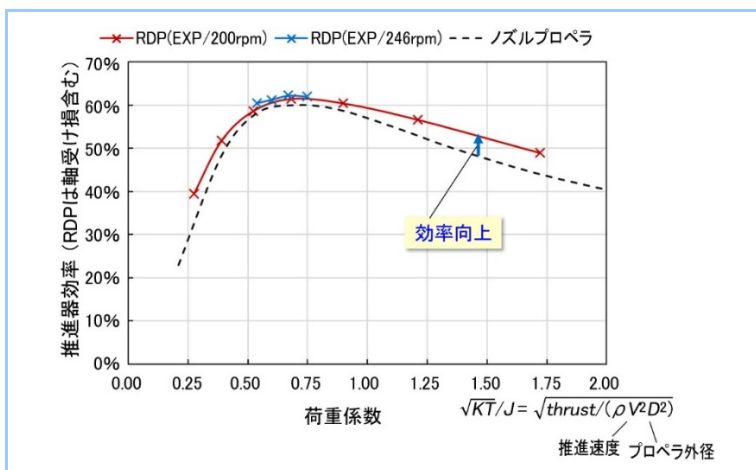


図7 試験による推進器効率検証結果

5. まとめ

脱炭素社会の実現に貢献することを狙って、海洋モビリティの電動化につながる外周駆動型二重反転推進器を開発した。外周駆動型二重反転推進器により解決したい課題は、海洋モビリティに関わるステークホルダーの多様なニーズへの適合であり、母船の配置設計制約の緩和と運用ニーズに対する柔軟性を狙った。

母船内の機械部を不要としたモータ・プロペラ一体型のコンパクトなデザインである外周駆動型推進器の特徴を維持しつつ、二重反転技術とノズルプロペラ技術を適用した設計を行った。解析及び試作試験を通して、広い運転条件に対して推進性能の低下が抑えられるノズルプロペラに対し、高い推進性能を実現できる目途を得ることができた。

最後に外周駆動型二重反転推進器の製品化に向けた課題を示す。本報では、小出力(8kW)の推進器単体の試作・検証結果を報告したが、実機適用に向けてはインバータ、電池、制御を含めた電動推進システムとしての検討が必要である。また、推進器ユーザにおいて重要な項目の一つに導入コストが挙げられる。導入コストを低く抑えるためには、製造コストの徹底的な低減が必要であり、試作を通して得られた製造面の課題を整理し、低コスト化の実現に向け取り組んでいく。

参考文献

- (1) M. W. C. Oosterveld, WAKE ADAPTED DUCTED PROPELLERS, Publication No. 345 Netherlands ship model basin (1970) p.33