

プロペラ特性を考慮した停止性能の推定と 操船・制御への応用に関する研究

学位論文内容の要旨

[研究の背景と目的]

調査船では、定点観測の必要性から、操縦性能を向上させる目的で推力調整の容易な可変ピッチプロペラ（CPP）が使用される。また、種々の超音波観測装置を使用することから船の静穏化が要求され、プロペラを Highly Skewed Propeller（HSP）とする傾向がある。こうしたプロペラは、通常の操船の局面において特段問題にはならないが、調査船の多くは1軸1舵船であることから、停止性能については必ずしもプラスとなるとは限らない。CPPでは、翼角を後進側に操作して船を停止させる場合は、針路保持が困難になることが知られており、また、プロペラのスキューが大きくなるほど後進推力自体が弱くなるという欠点も指摘されている。このような船の操船者にとって、停止性能は、船舶運航のさまざまな局面で安全な操船を行う上で重要な指標のひとつであり、航海速力からの緊急逆転停止性能に加え、投錨、着棧時に行われる比較的低速力からのそれも風潮等の外乱を考慮した実海域における停止性能に関する情報を提供する必要がある。

操船者に高度な技術が要求される操船局面として、棧橋へのアプローチ操船が挙げられる。操船者は、停止運動に及ぼす風潮等の影響を推定しながら、舵、主機、スラスト等の複数のアクチュエータを同時に使用して複雑な船体運動を制御しつつ、本船を所定の位置へ正確に停止させる必要があり、操船者の労働負荷と精神的負担が非常に大きくなる。この時、労働負荷と精神的負担の増加により、操船者の処理機能が低下して過ちを犯すヒューマンエラーが起これば、棧橋への衝突、座礁といった海難事故につながる。このような事故を防止するためには、操船者が行うアプローチ操船を効率的に行えるように支援し、操船者の労働負荷を軽減するための支援システムが必要である。

本研究では、まず停止性能に及ぼす HSP と CPP の特性、実海域における CPP1 軸 1 舵船の停止性能の特性を解明する。次にこの結果を踏まえて、安全運航に資する実用的な操

船ブックレット及びプロペラの特性を考慮した実海域における効果的な停止操船法を検討し、また、操船者の労働負荷軽減のためのアプローチ操船支援システムの開発を目的とする。

[方法及び内容]

本研究では、同一の実船を用いた HSP と CP、CPP と FPP それぞれの比較実験、模型試験及びシミュレーション計算により、停止性能に及ぼす HSP と CPP の特性を検討する。また、実海域における CPP1 軸 1 舵船の停止運動を表現する数学モデルを誘導し、風力下における停止運動の特性と自力着棧操船の限界を推定する手法及び操船ブックレットの作成法を検討するとともに、プロペラの特性を考慮した効果的な操船・制御法について述べる。さらに、操縦運動数学モデルによるシミュレーション手法と操船ブックレットを応用したアプローチ操船支援システムとその評価について論じる。内容は以下のとおりである。第 1 章では、停止性能に関するこれまでの研究を概括し、プロペラの特性を考慮した停止操船法と操船者の労働負荷軽減のためのアプローチ操船支援システムの必要性について述べる。第 2 章では、実船実験、模型試験及びシミュレーション計算により、停止性能に及ぼす HSP の特性を解析する。第 3 章では、CPP と FPP の比較実験により CPP の停止性能の特性を解析する。第 4 章では、CPP 1 軸 1 舵船の風力下の停止運動を推定するための数学モデルを誘導する手法を述べる。第 5 章では、シミュレーション計算により CPP 1 軸 1 舵船の停止性能に及ぼす風の影響を明らかにするとともに、風力下における自力着棧操船の限界を推定する方法と実用的な操船ブックレットの作成について述べる。第 6 章では、アプローチ操船におけるプロペラの特性を考慮した効果的な停止操船法について論じる。第 7 章では、シミュレーションと操船ブックレットを応用したアプローチ操船支援システムについて述べる。第 8 章に本研究のまとめを述べる。

[結論及び考察]

- 1) HSP は、低速力で前進中に後進とした場合の推力が弱く、低速力で行われる投錨操船、アプローチ操船の局面で CP に較べ停止時間等が長くなる。また HSP では、プロペラ逆転に伴って誘起される横力及びモーメントが CP に較べ大きく、停止操船における横流れと回頭運動が大きくなる。この特性は、プロペラ自体の特性に起因するといえる。
- 2) CPP の停止時間等は FPP に較べ短く、また、初速が大きいほどその違いが顕著であり、CPP の停止性能が優れている。CPP の回頭運動については、針路安定性の良い船型にあっても回頭方向が FPP のようには一定せず、風の影響を受け易い特性がある。
- 3) CPP の停止性能は、FPP と同様に見掛け前進率 $J_{50} (=U_0/(n \cdot P))$ を用いて整理する

ことができるが、このときのピッチとして有効ピッチを使用する必要がある。

4) CPP 1 軸 1 舵船の実海域における停止運動を表現する数学モデルは、FPP 船の数学モデルの考え方を適用して、模型試験及びデータベースから平均的流体力特性を特定する方法により誘導することができるが、後進操作に伴って誘起される流体力に関しては資料が少なく、煩雑な模型試験による推定が必要で、データベースの整備が課題である。

5) 風力下の停止運動特性及び操船限界をシミュレーションにより推定する手法を示した。これにより、海上公試等で得られる操縦性能データを補足し、実用的な操船ブックレットとして整理することが可能となり、船舶の安全かつ効率的な運航に寄与できる。

6) CP に較べ後進推力が弱い HSP 船の停止操船では、最小舵効速力とした上、CP 船より少し強めの後進とする操船法により、停止距離を CP 船と同程度とすることが可能で、かつ、回頭運動を小さく抑えることができる。また、CPP 船の回頭運動は、翼角を後進とする直前の操船履歴によって方向付けされる傾向があるが、後進とする前に大舵角で操舵を行う操船法により回頭運動の制御が可能である。この操船・制御法は、停止操船と同時に回頭運動の制御が必要な風力下の投錨操船、衝突回避等危急時の避航操船にも適用可能で、実海域における港内操船の安全と効率運航に寄与できる。

7) 操船記録と操船ブックレットで構成するデータベース及び操縦運動のシミュレーション手法を用いて、操船計画の立案、操船時の運動推定と制御法の事前検討、操船の事後評価を行う操船支援システムについて実船データによる評価を行い、その実用性を示した。操船計画支援機能では、操船者の操縦運動法則についての知識をシミュレーションにより補完することとしており、操船者は安全で効率的な操船計画を立案することができる他、事前検証と予習が可能で、労働負荷の軽減と安全運航に寄与できる。操船者の経験則を補完するデータベースは、操船を行う都度情報の質と検索の確度が向上する学習型とし、操船者間の共有データベースとしたことより、操船者は、比較的短期間のうちに操船技術を習得することが可能で、船員の減少と急激な高齢化に伴って、従来の OJT による操船技術の伝承が困難となりつつある現状に対応できる。なお、労働負荷の更なる軽減のためには、提案したシステムの機能のみでは不十分で、操船計画に従って操船者が半自動で操船を行うことができる機能等、操船の実行段階における支援機能の開発が課題となる。以上の、シミュレーションにより実海域における停止性能を推定して操船ブックレット及び操船・制御法にまとめ、操船支援システムを構築する手法は、一般船舶にも適用可能で、安全運航と効率運航に貢献できる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 芳 村 康 男
副 査 教 授 山 本 勝 太 郎
副 査 教 授 木 村 暢 夫
副 査 助 教 授 蛇 沼 俊 二

学 位 論 文 題 名

プロペラ特性を考慮した停止性能の推定と 操船・制御への応用に関する研究

漁業・海洋調査船では、定点観測の必要性から、操縦性能を向上させる目的で推力調整の容易な可変ピッチプロペラ(CPP)が使用される。また、精巧な超音波観測装置を使用することから船の静穏化が要求され、騒音の低いHighly Skewed Propeller (HSP)が使用される。こうしたプロペラは、通常の操船の局面において有益であるが、停止性能については問題が多い。本研究では、HSPとCPPのプロペラ特性が停止性能に及ぼす影響を明らかにし、これらのプロペラを装備した船の停止性能の特性を解明した。続いて、安全運航に資するため、外乱を含む実海域における効果的な停止操船法を検討し、また、港内のアプローチ操船支援システムの開発研究を行った。

主要な研究成果は以下のとおりである。

1. Highly Skewed Propeller (HSP)における停止性能の把握

Highly Skewed Propeller は、低速力で前進中に後進とした場合の推力が弱く、低速力で行われる投錨操船、アプローチ操船の局面で通常のプロペラに較べて停止時間等が長くなる。またプロペラ逆転に伴って誘起される横力及びモーメントが大きく、停止操船における横流れと回頭運動が大きくなる。これを模型船のみならず実船試験で定量的に明らかにした。

2. 可変ピッチプロペラ(CPP)における停止性能の把握

可変ピッチプロペラ(CPP)の停止時間等は通常の固定ピッチプロペラ(FPP)に較べ短く、また、初速が大きいほどその違いが顕著であり、CPPの停止性能が優れている。CPPの回頭運動については、針路安定性の良い船型にあっても回頭方向がFPPのようには一定せず、風の影響を受け易い特性があることを実船実験で明らかにした。また、停止性能が見掛け前進率を用いて整理することができることを明らかにし、このとき解析に適用するプロペラピッチとして有効ピッチを使用すれば通常のプロペラと同様に扱えることを明らかにした。

3. 数値シミュレーションによる停止性能の推定法の開発

CPPを装備した1軸1舵船の実海域における停止運動をシミュレーション計算するための数学モデルを開発した。具体的には、HSP船の数学モデルを基本に、上記2. で明らかにした有効ピッチを適用して、後進操作に伴って誘起される流体力の表現を試みた。シミュレーションは実船実験の結果を比較的精度良く推定することが可能になった。ただし、後進操作時の流体力については資料が少なく、煩雑な模型試験による推定が必要で、今後はこうした流体力データベースの整備が課題である。

4. HSP, CPP装備船の停止操船・制御方法の開発

上記の数値シミュレーションを種々の操船環境の下で行うことによって、最適な停止操船・制御方法の開発を試みた。HSPにおいては、最小舵効速力とした上、通常プロペラより強めの後進とする操船法により、停止性能を通常プロペラと同程度にすることが可能である。また、CPPを装備した船では、後進操作直前に大舵角で操舵を行う操船法により回頭運動の制御が可能なることを明らかにした。

5. 港内操船支援システムの開発

操船記録と操船ブックレットで構成したデータベース、及び操縦運動のシミュレーション手法を用いて、操船計画の立案、操船時の運動推定と制御法の事前検討、操船の事後評価を行う操船支援システムについて実船データによる評価手法を開発し、その実用性を示した。操船計画支援機能では、操船者の操縦運動法則についての知識をシミュレーションにより補完することとしており、操船者は安全で効率的な操船計画を立案することができる他、事前検証と予習が可能で、労働負荷の軽減と安全運航に寄与できることが明らかとなった。

審査員一同が評価した点は以下の通りである。

- 1) 漁業・海洋調査船によく使用される可変ピッチプロペラ(CPP),あるいは騒音の低いHighly Skewed Propeller(HSP)を装備した場合の船の停止性能の問題点について、力学的にメカニズムを解明し、また、多くの実船試験を実施することによって、これらを定量的に明らかにしたこと。
- 2) プロペラを後進に操作した場合の船の停止運動や停止性能について、数値シミュレーションを行うという実用的な推定手法を開発したこと。
- 3) 各種の外力条件下に対して数値シミュレーションを行うことにより、上記1)の停止性能の問題点に対して、これを上手く解決する実用的な操船手法・制御方法を考案し、これを確認したこと。
- 4) 更に、操船の労働負荷の軽減と安全運航を目的として、接岸、錨泊を行う港内操船の新しい支援システムを、各種のデータベース、及び操縦運動のシミュレーション手法を用いて、操船計画の立案、操船時の運動推定と制御法の事前検討、操船の事後評価を行う操船支援システムを開発し、その実用性を確認したこと。

審査員一同は本研究が、漁業・観測調査船を含む一般船舶に対して、実海域における港内操船の安全と効率運航に資するものと高く評価し、本論文が博士(水産科学)の学位を授与される資格のあるものと判定した。