

称号及び氏名 博士（工学） 畠中 浩行

学位授与の日付 2025年3月31日

論文名 「船外機付小型ボートの  
低速離着岸運動シミュレーションの開発」

論文審査委員 主査 片山 徹  
副査 橋本 博公  
副査 中谷 直樹  
副査 谷口 友基

## 論文要旨

近年商船では、産業競争力の向上、船上労働環境の改善、船員不足に伴う生産性低下の解決、人為的ミスによる事故の低減を目指し、運航自動化、自律化およびサポート技術の開発が行われている。一方、小型プレジャーボートでは、熟練していない操船者の事故の低減やボート性能を最大限に引き出す操船を可能とすることを目指し、同様の技術開発が行われている。

このような技術の実現には、操縦運動モデルを用いた最適制御理論、機械学習や深層強化学習などによる方が注目されている。機械学習や深層強化学習による方法では運用時に操縦運動モデルを必要としないが、開発段階では制御アルゴリズムの構築のために膨大な操縦運動データが必要であり、このデータを実船から得ることはコストや時間の制約のため容易ではなく、机上で制御アルゴリズムによる入出力結果を学習できる操縦運動モデルによるシミュレーションが必要となる。

このような操縦運動モデルの開発には、対象とする運動に対して推進装置や操舵機器を含む船全体に働く流体力の特徴を把握し、操縦運動モデルの使用目的に合わせて必要な流体力の特徴を考慮した操縦運動方程式を立てる必要がある。商船（いわゆる大型排水量型船舶）

分野では、小川らの操縦運動の数学モデル検討グループが、船体に作用する流体力として揚力が支配的となる前進速度域での通常の操縦運動を対象に、船舶設計やオートパイロットに使用できるモデルとして、船全体に作用する流体力を船体、プロペラおよび舵に単独に作用する成分とそれらの干渉成分に分離して扱う **Mathematical Modeling Group (MMG)** モデルを提案し、後に小瀬や芳村らによって、低速運動時の各流体力の操縦運動モデルも提案されている。一方、小型ボートでは、Lewandowski や片山らにより、高速操船時の不安定現象の発生評価を含む操縦性能評価のための研究が行われ、高速に伴う航走姿勢や操船に伴う船体運動を考慮した操縦運動モデルが提案されているが、離着棧を含む低速操縦運動モデルの研究は十分に行われていない。

小型ボートの低速操船では航走姿勢の変化や操船に伴う船体運動が小さく、大型排水量船舶を対象に開発された **MMG** モデルの成分分離の考え方を適用できるのではないかと考えた。しかし、**MMG** モデルでは各流体力のモデルが大型排水量船舶の各流体力特性に基づいて提案おり、小型ボートにそのまま適用できない可能性がある。具体的には、大型排水量型船舶と比べて、短時間での横移動、後進、その場回頭を行うことがあるため、船体に作用する流体力の特性が異なる可能性がある。さらに、小型ボートに多く採用されている船外機は舵角によりプロペラとプロペラ直前にある船外機 **Lower-hull** の向きが変化するため、大型排水量型船舶で一般的な一軸一舵とは推力・舵力の特性が異なる。また、この船外機の機構と近い **POD** 推進器の流体力モデルが、安川らにより提案されているが、**POD** 推進器が船尾流場内で作動するのに対し、船外機は一般的には船尾船底より低い位置に設置される等の違いがあり、流体力特性が異なる可能性がある。

このように、小型ボート特有の運動特性や推進器の構造的特徴を考慮する必要があるため、大型排水量型船舶の操縦運動モデルを低速離着棧運動時の小型ボートにそのまま適用することは難しく、小型ボート特有の運動特性に基づいて各流体力をモデル化することが求められる。そこで、本研究では、船外機付小型ボートの離着棧運動時の流体力特性を調査し、各流体力をモデル化することで、離着棧運動時のシミュレーションを開発することを目標としている。

本論文は、第1章～5章で構成される。

第1章では、本研究の背景と目的を示すとともに、研究概要について述べる。

第2章では、船体に作用する流体力の特性を調査し、最低限必要な計測条件およびその範囲と計測間隔（計測数）について検討した結果について示す。まず、斜航角、回頭角速度と走行姿勢の計測条件の範囲を実艇の着棧・旋回運動の実測値から決定した。斜航試験の計測結果から、流体力は斜航時に船体からの流れの剥離により大きく変化するが、曳航速度の影響は曳航速度の2乗で割ることによりほとんど無視できることを明らかにした。また、**PMM** 試験の計測結果から、**yawing with constant drift angle** 試験と曳航速度なしの **yawing** 試験で得られる流体力は、船体の前後方向の非対称性のために **pure yawing** 試験で得られる流体力と同程度の大きさとなるため無視できないが、**yawing with constant drift angle** 試験では、計測条件のうち、曳航速度と回頭角速度は、流体力を曳航速度の二乗と回頭角速度で割ることで影響をほとんど無視できるため、適切な範囲内で1種類の組み合わせを計測すれば十分であることが分かった。

第3章では、低速離着棧運動時の船外機の推力・舵力特性を完全拘束模型試験で計測した結果を基に調査し、最低限必要な計測条件およびその範囲と計測間隔（計測数）について検討した結果について示す。プロペラ前進係数、舵角、斜航角の実験条件の範囲は、実艇の着棧操船時の実測データに基づいて決定した。船外機を作動させた斜航試験の結果から、実艇の着棧時の運動範囲内で、斜航角と舵角の和である船外機の流入角とプロペラ前進係数を幾つか設定し、複数の前進速度で試験を行う必要があることが確認された。一方、後進時では、前進時の条件に加え、斜航角と舵角の組み合わせを複数設定する必要がある。しかし、水槽の長手方向に線対称となる2つの条件での推力と舵力の測定値はほぼ同じであり、どちらか

一方を省略することができる。また、船外機を作動させた場合と作動させない場合の斜航試験結果の比較から、大型排水量型船舶の舵と異なり、船外機 Lower-hull がプロペラより前にあるため、プロペラ作動による舵力への影響は小さく、船外機を作動させた場合の試験から舵力を求めることができる。

第4章では、船外機付自由航走模型を製作し、自由航走模型試験結果と前章までで計測した流体力のデータテーブルを用いた操縦運動シミュレーションを比較し、提案する計測範囲と計測条件数の妥当性を検証する。自由航走模型の運動計測結果とシミュレーション結果の比較から、提案する計測範囲で十分に操縦運動をシミュレーションできることが分かった。また、全計測条件から作成したデータテーブルと前章までで提案した最低限の計測条件から作成したデータテーブルを用いたシミュレーションを比較し、簡略化した計測条件数でも操縦運動をある程度の精度でシミュレーションできることを確認した。

第5章では、結論として各章で得られた結果を総括する。

本研究は MMG モデルを対象に、大型排水量型船舶で培われてきた実験および解析手法をベースとして、水槽試験結果に基づいて船外機付小型ボートの離着岸運動時の流体力特性を考慮した操縦運動モデルを構築するとともに離着岸運動シミュレーションを開発し、そのシミュレーションの精度について船外機付自由航走模型を製作して自走試験結果と比較することで評価したものである。本研究の成果によって、船外機付小型ボートの低速離着岸時の自律操船・操船サポートシステムの開発を促進し、船外機付小型ボートの性能を最大限引き出すことに寄与できる。また、本研究で行った操縦運動モデルの構築手順は、特殊な運動特性を持った異なる船舶への適用が可能である。

## 審査結果の要旨

本研究は、大型排水量型船舶の操縦性能評価で培われてきた MMG モデルの考え方をベースに、水槽試験結果に基づいて船外機付小型ボートの離着岸運動時の流体力特性を考慮した操縦運動モデルを構築するとともに、離着岸運動シミュレーションを開発し、そのシミュレーション精度について船外機付小型ボートの自由航走模型を製作して自走試験結果と比較することで、評価したものであり、以下の成果を得ている。

- (1) 船体に作用する流体力の特性を調査し、最低限必要な計測条件およびその範囲と計測間隔について検討した結果を示した。なお、斜航角、回頭角速度と走行姿勢の計測条件の範囲は実艇の着岸・旋回運動の実測値から決定した。斜航試験の計測結果から、流体力は斜航時に船体からの流れの剥離により大きく変化するが、曳航速度の影響は曳航速度の2乗で割ることで無視できる。また、PMM 試験の計測結果から、yawing with constant drift angle 試験と曳航速度なしの yawing 試験で得られる流体力は、船体の前後方向の非対称性のために pure yawing 試験で得られる流体力と同程度の大きさとなり無視できないが、yawing with constant drift angle 試験では、計測条件のうち、曳航速度と回頭角速度は、流体力を曳航速度の二乗と回頭角速度で割ることでこれらの影響をほとんど無視できるため、適切な範囲内で1種類の組み合わせを計測すれば十分である。
- (2) 低速離着岸運動時の船外機の推力・舵力特性を完全拘束模型試験によって調査し、最低限必要な計測条件およびその範囲と計測間隔について検討した結果を示した。なお、プロペラ前進係数、舵角、斜航角の実験条件の範囲は、実艇の着岸操船時の実測データに基づいて決定した。船外機を作動させた斜航試験の結果から、実艇の着岸時の運動範囲内で、斜航角と舵角の和である船外機の流入角とプロペラ前進係数を幾つか設

定し、複数の前進速度で試験を行う必要があり、一方後進時では、前進時の条件に加え、斜航角と舵角の組み合わせを複数設定する必要がある。しかし、水槽の長手方向に線対称となる2つの条件での推力と舵力の測定値はほぼ同じであり、どちらか一方を省略することができる。また、船外機を作動させた場合と作動させない場合の比較から、大型排水量型船舶の舵と異なり、船外機 Lower-hull がプロペラより前にあるため、プロペラ作動による舵力への影響は小さく、船外機を作動させた場合の試験から舵力を求めることができる。

- (3) 船外機付自由航走模型を製作し自由航走模型試験結果と操縦運動シミュレーションを比較し、提案する計測範囲と計測条件数の妥当性を検証した。自由航走模型の運動計測結果とシミュレーション結果の比較から、喫水が異なる場合にも、自由航走模型試験時の喫水と拘束模型試験時の喫水の比率を用いて、排水量の影響を考慮することで、試験結果に近いシミュレーションを行うことができる。また、斜航角のわずかな違いが、試験結果とシミュレーション結果の差異に影響を及ぼしていることが分かり、斜航流体力や船外機に働く推力および舵力を計測する試験において、斜航角と舵角が 0deg 付近の計測間隔を狭めて実験本数を増やすことで、対策できる可能性がある。さらに、船外機の推力および舵力を計測する試験の試験本数を削減した場合、前進かつプロペラ逆回転状態で船速が遅くなりすぎて流体力データ範囲外となることで、シミュレーションの船速および斜航角が試験結果と異なることが分かり、この違いは、船速が遅い範囲での前進かつプロペラ逆回転状態での試験本数の削減条件を検討することで解決できる可能性がある。

以上の諸成果は、船外機付小型ボートの低速離着岸時の自律操船・操船サポートシステムの開発を促進し、その性能を最大限引き出すことに寄与でき、また本研究で行った操縦運動モデルの構築手順は特殊な運動特性を持った様々な船舶へ適用可能であり、関連分野の学術的・産業的な発展に貢献するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。