

学 位 論 文 要 旨

題 目 CFD を活用した船型設計支援システムの開発

氏 名 石川 暁

近年の CFD 技術の進展は目覚ましく、これまで困難とされてきた粘性を伴う流体現象ならびにその影響を強く受ける船舶の推進性能について十分な精度で推定が可能となってきた。そこで、本研究では、この CFD 技術を活用し、造船所の設計の現場で適用可能な実用的な船型設計支援システムを開発した。まず始めに、先駆的な研究で開発された CFD Solver の船型設計への適用性を検討し、異なる船型の推進性能の優劣を正しく評価するに十分な精度を有していること、実用上十分な計算時間で性能評価が可能な高速 Solve が開発されていることなどを確認した。しかし、同時に、実用船型のような複雑形状への適用性が不十分であることも分かった。そこで、共同研究者の高田が新たに開発したマルチブロック格子法を用いた CFD Solver “FS-MINTS” の船型設計への適用性を検討し、同 Solver にて複雑な形状を有する実用船型の抵抗および自航性能の評価が可能であることを確認した。続いて、同 Solver に最適船型の探索機能を持たせ、さらに船型設計 CAD システムおよび並列計算技術を連携させた船型設計支援システムを開発した。同システムの中核となる船型最適化手法には、「逆問題解法による船型最適化手法」と「順問題解法による船型最適化手法」を併用して用いることとした。本システムによって、船型と推進性能との関係が明確になり、流体力学的な根拠に基づく船型最適化が可能となった。また並列計算の導入で、現実的な時間の範囲内で多数の候補船型の性能評価が可能となった。加えて、模型と実船の尺度影響、あるいは模型試験結果と実船性能との相関係数の評価も可能となった。今後、本研究で開発した船型設計支援システムが実際の設計の現場で活用されていくこと、さらに、実船スケールの流場に基づく船型開発へと発展していくことなどが期待される。以下、本論文の各章の結論を示す。

第 1 章において、本研究の必要性ならびに関連する研究を整理して概説し、船型設計に CFD を援用するにあたっての課題を述べるとともに、本研究の目的と論文構成を示した。

第 2 章では、先駆的な研究で開発された CFD Solver ” NICE” および ” NEPTUNE” による実用船型の推進性能の推定精度を確認し、船型が変更された際の性能の相違に対する追従性を検討した。その結果、推進性能の性能要素である抵抗性能やプロペラ面伴流分布について、いずれも船型の優劣を判断するという観点から十分な精度を有していること、計算時間も高速ソルバーの ” NEPTUNE” を用いることで実用の範囲にあることなどが確認された。しかしながら、定量的な精度については改善の余地が残されていることも明らかとなった。この計算精度に関する課題のうち、プロペラ面の船尾縦渦を過小評価してしまう課題に

対し、本研究にて、その対策として乱流モデルの改良を検討した。その結果、船尾縦渦が強く計算されるようになり、伴流分布の主流方向流速の等値線に見られるフック状の形状が計算でも表現できるようになった。ただし、定量的な精度についてはまだ十分とはいえず、さらなる改善が必要である。

第3章では、複雑な形状を有する実用船型の性能評価を行うために、共同研究者の高田によって新たに開発された CFD Solver “FS-MINTS (Flow Solver of Mitsubishi Numerical Tank System)” の実用船型への適用性を検討した。第2章で述べたとおり、先駆的な研究で開発された CFD Solver は、実用船形が有するトランサム船尾、舵、スタンチューブ、プロペラボス、性能向上デバイスを搭載した複雑形状への対応が難しかった。そこで、このような複雑形状への対応を可能とするために開発されたマルチブロック格子法に基づく CFD Solver “FS-MINTS” の適用性を検討した。その結果、同手法を用いると形状の複雑な船尾端の形状の影響を強く受けるプロペラ面の伴流分布や自航要素についても精度良く推定可能であることが分かった。

第4章では、本研究で開発した新しい船型設計支援システムの概要とその適用例について説明した。第2章および第3章でも説明した CFD 技術の進展を踏まえ、より多数の候補船型の中から性能の優れた船型の絞り込みを迅速に実施することが要求される設計現場でも CFD の有効活用が期待されるようになってきた。特に、CFD で得られる船体周りの流れや圧力に関する詳細な情報を活用することで、流体力学的な根拠に基づいたより合理的な船型設計が迅速に実施可能となることが期待された。そこで、このような船型設計を実現するために、CFD Solver に最適船型の探索機能を持たせ、さらに船型 CAD と並列計算技術を統合した新しい船型設計支援システムを開発した。ここで、その中核となる CFD による船型最適化の手法には、「逆問題解法による船型最適化手法」と「順問題解法による船型最適化手法」を併用することとした。得られた主な成果は以下のとおりである。なお、本船型設計支援システムへ適用する CFD Solver は FS-MINTS を基本としているが、使用目的に応じて “NEPTUNE”、”NAGISA” あるいは汎用コードなども適用している。

- ・ 「逆問題解法」の適用性の検討として実用タンカー船型を対象に粘性抵抗を最小化する船型の検討を実施したところ、船尾のフレームライン形状の V 型化で 3.4% の粘性抵抗低減が得られた。
- ・ 「順問題解法」の適用性の検討としてシリーズ 60 船型を対象に剰余抵抗低減を検討したところ、低速域では肩張りの C_p カーブと小型の船首バルブで 3~8%、高速域では肩落ちの C_p カーブと大型の船首バルブの組み合わせで 10~25% の剰余抵抗改善が得られた。また、「順問題解法」の場合、最適化の課程で実施した CFD 計算を整理して性能評価マップを作成することが可能であること、同マップは船型最適化の次のサイクルの初期船型の計画にあたって有益な情報となることなどが分かった。
- ・ 性能向上エネデバイスの設計の一例として、“NAGISA” を用い、船体 FIN の船尾流れに与える影響と推進性能の関係について検討を行った。その結果、船体 FIN の翼端渦との干渉効果で船尾縦渦領域がプロペラ外周側へ拡大されプロペラ面伴流分布が均一化されるが、これが船体 FIN による伴流利得の改善の主な理由であることが示された。また、このようなコントロールが可能な位置に船体 FIN を配置することが、推進

効率の改善に最も有効であることが分かった。

- ・ 「逆問題解法による船型最適化」と「順問題解法による船型最適化」には、それぞれメリットとデメリットがあるため、問題に応じて使い分ける必要がある。現状では、順問題解法で概略形状を決め、必要に応じて逆問題解法を組み合わせるといった運用形態が実用的であると考えられる。

第5章では、実船と模型船のまわりの流場や性能要素に対する尺度影響の検討を行った。実船と模型船の船体まわりの流場や推進性能にはレイノルズ数の相違に起因する尺度影響が存在するため、模型試験結果から実船性能を推定する際、模型船と実船の性能要素に関する相関を考慮する必要がある。しかし、問題とすべき流体现象が、造波、境界層、渦、伴流など多岐にわたることから、全ての尺度影響の実態が解明されているわけではなく、設計者は、その経験的知見に基づき未解明な部分を補いながら設計を実施している。そこで、第5章では、実船と模型船のまわりの流場や性能要素をCFDで評価し、これらに対する尺度影響ならび模型試験結果と実船性能との相関係数の検討を行った。その結果を以下に示す。なお、この尺度影響の検討には、“NICE” および “NEPTUNE” を使用した。

1) 船体まわりの粘性流れに対する尺度影響

- ・ 実船は模型船と比べ境界層が相対的に薄くなり、主流方向流速 u の等値線の位置が船体表面近傍へと縮むが、計算でもこのような尺度影響を表現することが出来た。特に、船尾縦渦の影響の少ない領域ではその縮み幅も試験結果と良く一致した。

2) 形状影響係数に対する尺度影響

- ・ 「形状影響係数 K はレイノルズ数に依存せず同じ値と取る」という従来から用いられている仮定と異なり、「形状影響係数 K はレイノルズ数の増大に伴い増加する傾向を示す」という傾向を示した。
- ・ 実船と模型船対応のCFDで得られた粘性抵抗を用いて相関係数 ΔC_f を評価したところ、実船の試運転結果から得られた相関係数 ΔC_f とほぼ一致した。このことから、「 K のレイノルズ数依存性を無視して実船の粘性抵抗を評価していることに対する修正が、 ΔC_f の内訳の大きな成分のひとつである」といえることが分かった。

3) 自航要素に対する尺度影響

- ・ 推力減少率は、ポテンシャル近似できる現象で尺度影響は受けないと考えられている。今回のCFDの結果でも、この従来からの考えと同様、推力減少率には尺度影響は見られなかった。
- ・ 有効伴流率は、船尾の境界層流れに強く影響を受けることが知られている。CFDの有効伴流率も、このような尺度影響を受けて実船で小さな値を示した。

4) 造波抵抗に対する尺度影響

- ・ 造波現象は、ポテンシャル近似できる現象で尺度影響は受けないと考えられている。CFDも結果も、粘性影響が顕著となる船尾付近を除き、模型船と実船の造波現象に尺度影響は見られていない。
- ・ しかし、粘性影響が顕著となる船尾付近では尺度影響が見られ、実船の船尾波は模型船のそれよりも大きくなる様子が計算結果で表現することが出来た。
- ・ 船尾波が大きくなる実船では模型船の最適船尾形状よりも船尾端付近の排水量をやや前方に移動した船型が造波抵抗の観点から有利となることが示された。

以上より、本研究で開発した船型設計支援システムが実際の設計の現場で活用されていくこと、さらに、今後は実船スケールの流場に基づく船型開発へと発展していくことなどが期待される。そのために解決が必要な今後の課題を以下に示す。

- ・ 推進性能の性能要素である粘性抵抗、造波抵抗、自航要素、プロペラ面伴流分布について、いずれも船型の優劣を判断するという観点からは実用上十分な精度を有しているが、定量的な精度はいずれも改善の余地がある。
- ・ 船型最適化支援システムについては、実用船型として適切なフェアネスが保てる船体曲面形状の自動変形機能の開発が期待される。
- ・ 実船スケールでの CFD 解析による船型開発あるいは船型最適化の取り組み、および実船データとの比較検証の蓄積が期待される。