

## 学 位 論 文 題 名

直接数値シミュレーションによる船体および搭載物の  
流体力特性の研究

## 学位論文内容の要旨

水産においては、フィールドが水圏であることから、そこで使用される多くの機器が海水などの流体力を受け、性能や強度が左右される。とりわけ、水産において非常に重要なプラットフォームであり、水産物の漁獲のみならず海洋の資源調査にも欠かすことができない船舶については、船体抵抗のみならず各種の流体力が船の性能を決定することから、それらに作用する流体力特性を適切に推定する必要がある。

これらの流体力を見積るには流体力学がベースになるが、流体の粘性などの影響で、流体力を理論的に推定することは困難となる。従来は模型実験によって流体力の計測が行われていたが、近年、コンピュータハードウェアの性能向上により、流体力学における設計および解析ツールとして各種の数値流体力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）が広く利用されるようになってきた。CFDとは、流体の運動に関する方程式をコンピュータで解くことによって流れを求める数値解析法のこと、コンピュータの性能向上に伴って大きく発展し、模型実験と並ぶ重要な解析ツールとなっている。

本研究では、CFDの一種である直接数値シミュレーション（Direct Numerical Simulation, DNS）という手法を使用し、特殊な形状のため通常のCFDでは精度よく計算できない物体の流体力、また流向が極めて大きくなり流体が剥離する場合の流体力計算を試みた。具体的には、漁船によく装備される高揚力舵（フィッシュテール舵）やダブルキャンバス型のスパンカーを例として流場計算を行った。この際、物体周りの流場を観察し、未だ詳しく解明されていない高揚力のメカニズムについての解明を試みた。また、空力特性を詳しく検証した例が少ないスパンカーについては、その性能についての解明を試みた。さらに、前進速度が小さく横流れが卓越する港内操船においてDNSにより船体周りの流場計算を行い、その操縦運動流体力特性の推定を行った。

本論文は全6章で構成されており、各章の概要は以下の通りである。

まず、第1章では、水産における流体力学およびCFDの必要性、本研究で使用するCFD手法であるDNSの概要、一般的なCFDに対するDNS計算手法の優位性、および本研究の目的について述べた。

第2章では、初めにDNS計算の基礎式と計算手法の詳細について説明した。続いて、幾何学的な形状として球、平板および円柱を使用し、DNS計算を用いてそれらの物体周りの流場計算を行った。流場から物体に作用する流体力を算出し、特にレイノルズ数が $1.0 \times 10^5$ 付近において計算値と実験値が極めてよく一致することを確認した。さらに、球周りの流場の観察を行い、カルマン渦の発生状況からストローハル数を算出し、実験値と精度よく一致することを確認した。これにより、DNS計算では物体周りの流場が正確に再現できていることを示し、その有効性について述べた。

第3章では、DNS計算を高揚力舵に適用した。フィッシュテール舵と呼ばれる高揚力舵は、通常舵と比べて高い揚力を発生させることが知られているが、そのメカニズムについては未だ解明されていない点が多い。このため、DNS計算による舵周りの流場計算を行い、高揚力の要因についての解明を試みた。まず、舵の2次元断面周りの流場計算を行い、流体力の傾向が実験値と定性的

に一致することを確認した。続いて、流場の観察を行い、通常舵と比べて高揚力舵では「見かけ上の舵コード長が伸びる」「見かけ上のキャンバーラインの変化により迎角が大きくなる」という現象が明らかとなった。この見かけ上の形状を使用してポテンシャル流れにおいて舵に作用する流体力の計算を行ったところ、実際に高い揚力を発生させる形状となっていることが確認できた。これにより、高揚力舵が高い揚力を発生させるメカニズムについて、前述の現象が寄与している可能性が推測できた。加えて、従来の CFD 計算手法との比較を行い、本研究で使用した DNS 計算手法の優位性について示した。続いて、舵の 3 次元形状周りの流場計算を行い、流体力が定性的には実験値と一致するものの、定量的には小さく計算されるという結果が得られた。ただし、これについては、将来のコンピュータ性能の発達を考慮すると流体力を定量的にも精度よく計算することは十分可能と推測された。

第 4 章では、DNS 計算をスパンカーに適用した。わが国のスパンカーは経験的に開発・改良が行われてきたものであり、その空力特性を詳しく検証した例は少ない。このため、DNS 計算によりスパンカー周りの流場計算を行い、その性能についての検討を行った。第 3 章と同様、まず 2 次元断面周りの流場計算を行い、流体力の傾向を確認した。さらに、流場の観察を行い、開き角が大きいほど「見かけ上の断面積が増大する」「一樣流に対する投影面積が増加する」「見かけ上のコード長が大きく伸びる」という現象が発生していることが明らかとなった。この見かけ上の形状を使用して、ポテンシャル流れにおいてスパンカーに作用する流体力の計算を行ったところ、これらの現象が向首性能の向上に寄与している可能性が明らかとなった。加えて、従来の CFD 計算手法との比較を行い、本研究で使用した DNS 計算手法の優位性について示した。続いて、スパンカーの 3 次元形状周りの流場計算を行い、流体力が実験値と定性的および定量的に一致することが確認できた。

第 5 章では、DNS 計算を船体流体力に適用した。船体に作用する流体力に関しては、通常の操縦運動については多くの研究が行われているが、港内操船における操縦性能については現状でも操縦流体力の研究や推定方法は少ない。そこで、DNS 計算による操縦流体力の推定を検討した。まず、港内操船を含む操縦運動モデルについて説明し、モデルに含まれる非線形操縦性微係数について説明した。これらの非線形操縦性微係数は拘束模型実験結果から得られるが、しかしながら拘束模型実験には多大な時間と費用がかかり、実施例は多くはない。このため、模型実験ではなく DNS 計算を用いて非線形操縦性微係数を推定する手法を検討した。本研究では、円弧状船型を使用して流体力の計算を行い、船体に作用する揚力および回頭モーメントが実験値と比較的よく一致することを確認した。この結果から、非線形操縦性微係数の新しい回帰表現を作成し、従来の回帰表現よりも傾向をより正確に再現できることが確認できた。したがって、今後 DNS 計算により様々な船型についてのデータを蓄積すれば、信頼性のある回帰表現を得ることが可能となり、船の設計段階における操縦性能の推定に大きく役立てる可能性が明らかとなった。

第 6 章では、本研究で得られた結果を総括し、DNS 計算により物体に作用する流体力を求めることができること、高揚力舵およびスパンカーでは見かけの形状の変化が高揚力および高性能の要因となっていることが推測されること、および複雑な船体流体力の計算も可能であることが確認でき、DNS 計算による流体力の推定が役立つことを示した。なお、DNS 計算は現時点では通常の CFD に比べて大幅な計算時間が必要であるが、計算機の更なる発展によって、将来こうした計算が極めて容易になり、有効な流体力計算手法になると期待できる。

|     |     |                |
|-----|-----|----------------|
| 主 査 | 教 授 | 木 村 暢 夫        |
| 副 査 | 教 授 | 芳 村 康 男        |
| 副 査 | 教 授 | 平 石 智 徳        |
| 副 査 | 教 授 | 土 井 康 明 (広島大学) |

## 学 位 論 文 題 名

# 直接数値シミュレーションによる船体および搭載物の 流体力特性の研究

水産においては、フィールドが水圏であることから、そこで使用される多くの機器が海水などの流体力を受け、性能や強度が左右される。とりわけ、水産において非常に重要なプラットフォームであり、水産物の漁獲や海洋の資源調査に使用される船舶については、船体抵抗のみならず各種の流体力が船の性能を決定することから、それらに作用する流体力特性を適切に推定する必要がある。本研究では、CFD の一種である直接数値シミュレーション (Direct Numerical Simulation, DNS) という手法を使用し、特殊な形状をしているため通常の CFD では精度よく計算できない高揚力舵、および小型漁船で多用されるダブルキャンバス型のスパンカーについて、物体周りの流場計算を行った。さらに、物体周りの流場を観察し、高い揚力を発生させるメカニズムが未だ詳しく解明されていない高揚力舵について、その要因についての解明を試みた。また、その空力特性を詳しく検証した例が少ないスパンカーについては、その性能についての解明を試みた。さらに、前進速度が小さく流場が複雑に変化する港内操船において、DNS により船体周りの流場計算を行い、その操縦運動特性の推定を行った。これにより、通常の操縦運動から港内操船にいたるまで、すべての操縦性能を船の設計段階において推定する手法について検討を行った。得られた成果は以下の通りである。

- 2) 幾何学的な形状として球、平板および円柱に対する DNS 計算結果は既報の実験結果と比較して、流体力の値のみならず、それらのレイノルズ数変化、非定常なカルマン渦によるストローハル数が実験値と精度よく一致することを確認し、物体周りの流場が正確に再現できることを示した。
- 2) 高揚力舵に適用した結果では、舵力の推定精度を確認した他、高揚力を発生する要因について、DNS 計算による流場解析からそのメカニズムを解明した。
- 3) 小型漁船に使用されるスパンカー (船尾の帆) については、わが国で経験的に開発が進められてきた 2 枚帆について DNS 計算を行い、開き角が漁船の風に対する向首性能を良くするメカニズムについて解明した。
- 4) また、従来の CFD では計算ができない船の横移動時の流体力の推定についても行い、船の主要目に対する特性を明らかにした。

以上の結果は、計算機的能力から精度的にはまだ不十分ながらも、複雑な形状や大きな剥離を伴う流体力の推定を模型実験によらず計算できることを示したもので、水産の生産現場から資源調査における各種の機器・設備の設計に大きく寄与するものと判断される。よって審査員一同は申請者が博士 (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。