

学 位 論 文 題 名

BASIC STUDIES OF CFD ON SHIP HYDRODYNAMIC
FORCES IN THE WIDE DRIFT ANGLE RANGE

（広範囲の斜航角での船体流体力に関する計算流体力学の研究）

学位論文内容の要旨

港湾内において曳船やサイドスラストを使用して操船する場合や低速航行時に風や潮流により漂流する場合、また海洋調査船を定点保持する場合など船の前進速度に比べ横移動速度の方が大きい時の船体に働く流体力を精度良く推定することは、これら船舶の運動シミュレーション等によって船舶操縦性能や操船機器等を評価する上で重要である。このような高迎角で運動する船舶や特殊舵などの翼形状を持つ物体の周りの流れは大きな剥離渦を伴う非定常現象であり、模型試験においても計測した流体力は時間と共に激しく変動するものとなり定常値を得るのが困難である。

近年、時間的な要素を含めた総合的経済効率の面からも船舶の操縦流体力の推定に Navier-Stokes (NS) 方程式を数値計算によって解く計算流体力学(CFD)手法を用いた研究が数多く報告されていて、船舶設計においてCFD手法を幅広く用いられるようになってきた。これまでCFD手法は主に横移動速度に比べ前進速度が大きい小斜航角で運動する通常航走時の船体に働く流体力の計算に用いられて、操縦性流体力の精度良い推定法であることが確認されている。また斜航角 90 度にあたる横移動時の計算も行われている。しかし、冒頭で述べた運動のように斜航角 20 度から 90 度の間にあたる大斜航角時の船体に働く流体力をCFD手法で計算された例を見ない。

斜航角 0 度から 90 度にわたる広範囲の船体流体力を記述する場合、流体力数学モデルを使ってそれらを表現することで効率良く推定できる。しかし船体流体力学モデル

ルを使うにはその船体の付加質量と定常粘性流体力の推定が必要となる。

本研究ではこの流力数学モデルを表現するのに必要となる付加質量や広範囲の斜航角での粘性流体力を CFD 手法を用いて推定する方法を提案し、Circular Motion Test を用いた実験(CMT 実験)値等と比較することでその有効性を検証する。

付加質量計算は円柱や楕円柱、球、四角柱などの単純な形状の 2 次元および 3 次元物体を対象に行った。CFD 計算には市販の CFD コードを使用している。1 時間ステップの時間間隔を 10^{-3} 秒とし、斜航角 45 度の定加速度斜航試験を模擬した計算を行い、1 時間ステップ後の物体に働く流体力から付加質量を算出した。付加質量の計算結果は理論値、実験値およびポテンシャル計算値と比較した。その結果、3 次元角柱の船体前後方向の付加質量 m_x については計算値はポテンシャル計算値とは良く一致したが実験値とは大きく異なる値となった。これは模型実験とその解析精度が原因と思われる。即ち、模型試験から付加質量を求める際には付加質量に模型質量を含んだ仮想質量値を解析で求め、さらにそれから模型質量を差し引くことで付加質量を求めている。このとき計測量自体が小さく、さらに付加質量が模型質量に比べて極端に小さい m_x のような場合には解析精度を十分確保することは容易ではない。しかし 3 次元角柱の m_x を除くと良い一致を示したことから本計算法の妥当性が確認できた。CFD 手法による付加質量計算は、従来ポテンシャル計算に多く用いられてきたパネル法をはじめとする境界要素法と異なり幾何学的な制限がないためにより複雑な形状の物体に適用でき付加質量の計算方法として有用である。

次に斜航角 0 ～90 度について模型船が静止から定加速度区間(2 秒間)を経て、その後定速度(5.5 秒間)で運動するシミュレーションを行った。供試模型は前後対称で矩形断面をもつ円弧翼船である。CFD 計算には有限体積法を用

いた自作のコードを使用した。計算格子は H-O 型格子で 3 次元の楕円型偏微分方程式を用いた格子形成をしている。乱流モデルとして Smagorinsky による渦粘性モデルを適用した。定速時のレイノルズ数は 2.4×10^5 であり、1 時間ステップの時間間隔は 0.02 秒(無次元時間間隔 $\Delta t U/L$ (U: 定速時の船速、L: 船長)で 0.0033)である。計算の結果得られた船体流体力の時系列は CMT 実験値と比較し、船体に働く過渡的流体力の推定における本計算法の有効性を検証した。前後力と横力の計算値と実験値を比較すると模型船の加速開始、終了時の部分に流体力の変化に違いが見られた。これらの加速開始、終了時の流体力の不一致は計算上単純化した加速運動と実際の運動の部分的差違が主な原因と考えられる。それらを除くと加速およびそれに続く定速時を含めて全体的に計算値は実験値と良く一致した。ヨーモーメントについては全体的に計算値は実験値よりやや低めの値となったが流体力の時間的变化の傾向はほぼ一致した。これらの比較から広範囲の斜航角における船体に働く過渡的流体力の推定とそれに伴う付加質量の算出にも本計算法が有効であることが確認できた。

また 3 次元渦構造や船体表面の圧力分布の時間的变化を用いて大斜航角での船体流体力の過渡特性について考察した。これらの非定常現象を把握することは大斜航角時の船体に働く過渡的流体力の把握やその数学モデル化において重要である。このような過渡特性の理解やモデル化に本手法が有効な手段となることが確認できた。

次に斜航角 0 ～90 度における船体に働く定常粘性流体力を CFD 手法を用いて推定した。CFD 計算には有限体積法を用いた自作のコードを使用した。格子形成法は過渡的流体力の計算と同じものである。停止から定速に到るまでの加速区間を 2 秒間、定速区間を 48 秒間(8 無次元時間)とし、最後の 12 秒間(2 無次元時間)の流体力の平均値を定常流体力とした。1 時間ステップの無次

元時間間隔は 0.033 である。レイノルズ数は 2.4×10^5 で、計算は層流計算と
している。定常流体力の計算値は CMT 実験値と比較し、本計算法の妥当性を
検証した。船体前後力と横力については斜航角 $0^\circ \sim 90^\circ$ の全域にわたって
計算値は実験値と良く一致した。ヨーモーメントについては斜航角 60 度以上
になると計算値は実験値よりやや低めの値となったが、全体的には良い一致
を示した。これらの計算値と実験値の比較から、本計算法が広範囲の斜航角
における定常流体力の推定に有効であることが確認できた。

本研究で開発した手法は付加質量および広範囲の斜航角における非定常お
よび定常の船体流体力を推定するのに有効であり、流体力の数学モデルと本
計算手法を用いた効率の良い広範囲の斜航角における船体流体力の推定が実
現可能になるものと思われる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 烏 野 慶 一

副 査 教 授 芳 村 康 男

副 査 助教授 戸 田 保 幸 (大阪大学)

副 査 助教授 田 原 裕 介 (大阪府立大学)

学 位 論 文 題 名

BASIC STUDIES OF CFD ON SHIP HYDRODYNAMIC FORCES IN THE WIDE DRIFT ANGLE RANGE

(広範囲の斜航角での船体流体力に関する計算流体力学の研究)

港湾内において曳船やサイドスラストを使用して操船する場合や低速航行時に風や潮流により漂流する場合、操業時の漁船や調査中の海洋調査船が低速航行で作業する場合、また海洋調査船を定点保持する場合など船の前進速度に比べ横移動速度の方が大きい時の船体に働く流体力を精度良く推定することは、これら船舶の運動シミュレーションなどによって船舶操縦性能や操船機器等を評価する上で重要である。

申請者の研究は Navier-Stokes 方程式を数値計算によって解く計算流体力学 (CFD) 手法により付加質量や大斜航角時の主船体流体力を推定することを目的とした。特に大斜航角時の主船体流体力を求める CFD 計算法について検討し、本論文を 107 頁より構成している。次に各章について評価した点を述べる。

第 1 章は緒言である。CFD 手法と操縦性流体力の数学モデルを使用した広範囲の斜航角の船体流体力を効率良く推定する考えに至った背景を述べ、研究の焦点を定めている。また本論文に関係する過去に行われた研究を紹介している。そして本論文全体の構成と流れを概説している。

第 2 章は CFD 手法による付加質量推定法について述べている。CFD 手法により種々の物体を対象として付加質量を求め、理論値、実験値、ポテンシャル計算値と比較し、本手法が付加質量を算出する有効な手法であることを示している。また本手法はパネル法を代表とする境界要素法によるポテンシャル計算と違い、揚力体や厚さ零

の物体に対しても特別な取り扱いを必要としないため付加質量を算出する有力な方法であることをのべている。

第3章ではCFD手法でこれまで行われてこなかった大斜航角時の船体に働く過渡的流体力の推定法について述べている。斜航角0から90度までの斜航流体力を計算し、その流体力の時系列をCMT模型実験値と比較することで大斜航角時の船体流体力推定における本計算手法の有効性を示している。また3次元渦構造を可視化することで、斜航時の過渡的現象を認識し、ヨーモーメントの時間的变化について考察している。

第4章ではCFD手法でこれまで行われてこなかった大斜航角時の船体に働く定常流体力の推定法について述べている。斜航角0から90度までの斜航流体力を計算し、その結果を模型実験値と比較することで大斜航角時の船体流体力推定における本計算手法の有効性を検討している。その結果は、大斜航角において良い一致を見せており、本計算手法の大斜航角時の定常流体力推定における有効性を示している。これら定常流体力と付加質量の推定により操縦性流体力の数学モデルの使用が可能となることを述べている。

第5章は結言である。申請者は

- 1) CFD手法による付加質量推定法が形状による特別な取り扱いを必要としないためこれまでの計算法より有利であることを示した。
- 2) 大斜航角での過渡的流体力の推定にCFD手法が有効な方法であることを示した。
- 3) 一定加速度運動から定速度運動に到る時のヨーモーメントの時間的变化を3次元渦構造の時間的变化により明らかにした。
- 4) 大斜航角での定常流体力の推定にCFD手法が有効な方法であることを示した。

以上の評価を踏まえて以下に総括すると

1. CFD手法により種々の物体を対象として付加質量を求め、理論値、実験値、ポテンシャル計算値と比較し、本手法が付加質量を算出する有効な手法であることを示した。本手法はパネル法を代表とする境界要素法によるポテンシャル計算と違い、揚力体や厚さ零の物体に対しても特別な取り扱いを必要としないため付加質量を算出する有力な方法である。

2. CFD 手法でこれまで行われてこなかった大斜航角時の船体に働く過渡的流体力を計算し、その結果を模型実験値と比較することで大斜航角時の船体流体力推定における本計算手法の有効性を示した。また 3 次元渦構造を可視化することで、斜航時の過渡的現象を認識した。
3. CFD 手法でこれまで行われてこなかった大斜航角時の船体に働く定常流体力を計算し、その結果を模型実験値と比較することで大斜航角時の船体流体力推定における本計算手法の有効性を検討した。その結果は、大斜航角において良い一致を見せており、本計算手法の大斜航角時の定常流体力推定における有効性を示した。
4. 以上、停止から出発して一定速度で斜航運動する一連の運動状態の CFD 計算は付加質量と定常流体力の推定ができ、模型実験なしに操縦流体力の成分分離型数学モデルの使用を可能とした。

以上の成果を得るにあたって開発された CFD コードおよび手法は船舶工学分野、流体力学分野、水産工学分野での広い応用性と共に、またその手法の独創性について高く評価するものである。

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有るものと判定した。