

氏名	いしはら さだのり 石原 定典
学位(専攻分野)	博士 (工学)
学位記番号	博甲第918号
学位授与の日付	平成31年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	工芸科学研究科 設計工学専攻
学位論文題目	運動する水没物体を含む自由表面流れの数値解析に関する研究
審査委員	(主査)准教授 山川勝史 教授 森西晃嗣 教授 西田秀利 准教授 田中 満

論文内容の要旨

本論文は、運動する水没物体を含む自由表面流れに着目し、このような流れ場に適用できる非常に複雑な運動をする水没物体が、領域に制限されずに精度良く計算する手法を構築している。具体的には、移動格子有限体積法および移動計算領域法と、自由表面を追跡する界面追跡法とを組み合わせた新しい数値解析手法を提案すると共に、高さ関数法を移動領域に適用できるように拡張している。さらに移動格子有限体積法と高さ関数法とのカップリング法も構築している。

自由表面を含む流体領域中に運動する物体が存在する流れ場、つまり運動する水没物体に誘起される流れ場は、物体運動の速度、径路、自由表面と物体との距離によって物体抵抗や自由表面形状が変化し、波力発電、海中沈殿構造物等の検知、潜水艇などの様々な工学上の応用の観点からきわめて興味深いといえる。また水中における身近な移動体として魚に焦点をあてると、泳ぐ際の運動方向の効率的な変化方法や抵抗低減機能などは水中の乗り物やロボットへの応用が可能である。しかしながら魚類が外敵から逃げる際には、形状を大きく変形させることで、急に進行方向を変えることが知られている。この場合には直線運動のみに限らず、複雑な曲線運動をする場合も多く、物体にかかる抵抗・自由表面の形状が運動の速度や回転の半径によって変化することが予想される。したがって、水面下の移動体の動き工学利用するためには、このような非常に複雑な動きを詳細に把握する必要がある。

このような自由表面と運動する水没物体との流れにおいては、まず自由表面を精度よく表現する方法が重要であり、本論文では、計算効率が突出して高いことに注目し、界面追跡法の一つである高さ関数を用いる方法を採用している。さらに、初期に自由表面上に存在した格子は常に自由表面上にあるため、計算格子を集中させることで計算の解像度を担保しやすい。あわせて、流体解析の計算スキームに対して時間とともに移動・変形する計算格子に適した方法が必要であるが、この方法に対しては流れ場に対する物理保存則を満足するだけでなく、流れ場が計算格子の移動・変形に影響を受けない、つまり幾何保存則も満足する必要がある。この幾何保存則を厳密に満足する移動格子に適した計算スキームとして、移動格子有限体積法が提案されている。この手法は有限体積法を時間-空間をあわせた検査体積に適用するものであり、様々な非定常流れ場に成功裏に適用してきた。さらに移動計算領域法を用い、物体を含む計算領域全体を運動させるこ

とで、物体を自由に運動させつつ流れの解析を行うことが可能としている。しかしながら、この手法は基本的に気体もしくは液体の单相流を想定した構築および適用がなされており、本論文で対象とするような自由表面流れへの適用例は無い。このため、以下の検討を行った。

まず、界面追跡法として用いた高さ関数および離散化手法について検討した。特に、物体が運動する場合への展開を考慮し、高さ関数法を計算領域が移動する場合に適用可能なように離散化手法を構築した。

次に、用いた計算コードの基礎的検証として、まず水没物体のない自由表面流れへ適用した。具体的には、直方体容器内のスロッシング流れに適用し、他者の実験値および解析結果と比較した。さらに、円筒容器内のスロッシング流れへ適用し、他者の解析結果とも比較を行った。また、流れ場の常流・射流がフルード数の変更により変化するかを確認するために、傾斜付流路に適用し、解析解や他者の数値解との比較を行った。以上の基礎的検証から、水没物体のない流れ場に対して本手法の有効性を示した。

次に、単純な運動をする水没物体を含む自由表面流れへの適用を行なった。最初に単純な二次元形状である水没円柱を対象とし、円柱を固定した場合および円柱が直線運動する場合へ適用し、他者の数値解との比較を行った。また、三次元形状への適用可能性を示すため、水没球への適用を行った。以上の結果から、単純な運動をする水没物体のある流れ場に対して本手法の有効性を示した。

最後に応用として、運動する魚への適用を行った。まず初めに、検証として、単一の魚が旋回運動する場合に適用し、旋回の半径および初期自由表面からの魚の深さを変更した解析を行い、回転半径および深さの影響を考察した。次に、複数の魚として二匹の魚が存在する場合の旋回運動を解析した。魚の配置は前後に並ぶ場合と、横に並ぶ場合で実施し、流れ場への影響を考察した。この応用から、本手法が旋回運動する水没物体を含む自由表面流れに有効であることを示した。

以上より本研究で提案した手法は、複雑な運動を行う水没物体を含む自由表面流れの数値解析に対して有効な手法であると結論付けられた。

論文審査の結果の要旨

本論文は自由表面を含む運動する物体周りの流れ場に対する高精度な新しい数値計算法を構築している。本手法では水没物体の動きそのものとその動作の影響を受けた自由表面の変化を、各々物理保存則および幾何保存則を満足したまま物体適合座標系にて計算が可能であり、さらに物体の移動範囲の制限を無くすることができる高精度かつ実用性の高いものである。申請者は物体移動の計算誤差を大幅に削減できる移動格子有限体積法に高さ関数法を用いることで自由表面に対する新しい界面追跡法を提案し、その定式化を完成させている。さらに移動計算領域法を組み合わせることで、広大な計算領域においても自由表面を含む流れ場計算を可能とする画期的な手法も同時に構築している。他者の計算結果および実験結果との検証により妥当性を確認した後、旋回する複数の魚周りの流れ場へ適用することで、その実用性を示している。

本研究は波力発電の効率化検討、海中沈殿構造物等の検知、潜水艇の高性能化等様々な工学分野への応用が可能であり、また将来的には海面形状からその下に泳ぐ魚の群を予測するなど新し

い魚群探知機の開発への利用も期待できる。このことから移動制限の無い唯一の自由表面計算を可能とした本手法の構築だけでなく、工学分野における貢献も期待できることから高く評価されるものであると考える。

本論文の基礎となっている学術論文は学術雑誌に掲載された2編（印刷中1編含む）と、査読制度の確立した国際会議の Proceedings に記載された3編であり、全て申請者が筆頭著者である。

1. S. Ishihara, M. Yamakawa, T. Inomoto and S. Asao, Free Surface Flow Simulation of Fish Turning Motion, *Lecture Notes in Computer Science* 10862(2018), pp.24-36
2. 石原定典, 山川勝史, 井ノ本健, 浅尾慎一, 複数の魚が曲線運動する場合の自由表面流れに関する数値解析, 日本計算工学会論文集 (2019) (採択済み・印刷中)
3. S. Ishihara, K. Matsuno, M. Yamakawa, T. Inomoto and S. Asao, Free Surface Flow Simulation Using Moving-Grid Finite-Volume Method, *Proceedings of The 6th International Conference on Computational Methods* (2015), pp. 1-9
4. S. Ishihara, K. Matsuno, M. Yamakawa, T. Inomoto and S. Asao, Numerical Simulation of Free Surface Flow with Submerged Object Using Moving-Grid Finite-Volume Method, *Proceedings of The 26th International Symposium on Transport Phenomena* 2015
5. S. Ishihara, M. Yamakawa, T. Inomoto and S. Asao, Parallel Free Surface Flow Simulation of Fish Turning Motion, *Proceedings of 12th Asian Computational Fluid Dynamics Conference* 2018