

氏名	たじり きょうへい <b>田尻 恭平</b>
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	博甲第740号
学位授与の日付	平成27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	<b>シームレス仮想境界法による魚類まわり流れのLES</b>
審査委員	(主査)教授 西田秀利 教授 松野謙一 教授 森西晃嗣 准教授 田中 満

## 論文内容の要旨

本論文はシームレス仮想境界法により魚類モデルまわりの流れの解析を行い、尾鰭後方における渦構造を再現し、遊泳のメカニズムを解明するものである。従来、複雑形状を有する物体まわりの流れの解析においては境界適合座標系が用いられるが、魚類のように変形を繰り返す物体に対しては、その都度計算格子を再生成する必要があるため、本研究では、デカルト座標系において複雑形状を有する物体を表現する手法であるシームレス仮想境界法を用いて魚類モデルまわりの流れの解析を行っている。本手法では、格子上での物体境界の位置を特定するだけでなく、魚類モデルの変形に対応した計算格子をその都度再生成する必要はない。シームレス仮想境界法とは、物体面と格子線が交わる点を仮想境界点とし、仮想境界点における速度条件を満足するように支配方程式に外力項を付加して計算を行う方法であり、物体内部の格子点においても物体の速度条件を満足するように外力項を付加して計算を行うことで境界近傍における圧力振動を抑えることができる。1章では、本研究の背景と目的について、2章から4章では、流れの支配方程式とその離散化および解法、シームレス仮想境界法について述べている。

5章では、シームレス仮想境界法の計算コードの検証を行っている。定量値の算出方法として、付加される外力を用いて算出する方法で定量値を容易に算出することが可能であることを示している。6章では、本手法の移動境界問題への拡張を行い、7章において、その検証を行っている。計算格子上で物体を移動させその都度仮想境界を再決定する方法とALE法により物体と同時に計算格子を移動させる方法による結果を比較検証し、互いによく一致した良好な結果を得ている。後者の方法では移動する物体と計算格子との位置関係が変わらないため、計算時間の大幅な低減が可能である。8章では本手法を三次元に拡張し、その検証を行っている。静止球に一樣流が流入する場合と静止流体中を球が一定速度で移動する場合の互いに等価な条件に対して解析を行い、三次元流れにおける本手法の有効性を示している。

9章では、本計算手法をLESと組み合わせることで乱流解析への適用を行い、10章、11章において三次元チャンネル乱流、球まわり流れのLESを行っている。三次元チャンネル乱流のLESでは、壁面を境界条件により設定した場合と比較し、シームレス仮想境界法にLESを組み合わせた本手法の乱流解析に対する有効性を示している。球まわり流れのLESでは、静止球に一樣流が流入する場合と静止流体中を球が一定速度で移動する場合の互いに等価な条件に対して解析を行い、

互いに良い一致が得られることを確認し、本手法に ALE 法を組み合わせた方法の有効性を示している。12 章では、三次元任意形状物体への拡張を行っており、三角形ポリゴンにより形成された球と解析的に与えられた球のまわりの流れ解析を行い比較検証している。

13 章では、本手法を用いて実際の魚類の遊泳する条件を設定し、魚類モデルまわり流れの LES を行っている。魚類モデルの運動を遊泳動作、並進運動および回転運動に分け、ALE 手法により計算格子ごと移動させることで、計算の簡略化を行っている。遊泳動作による推進力を算出する際は、シームレス仮想境界法において評価される外力を用いることで算出している。本計算の結果、尾鰭後方において実際の魚類の遊泳においても観察される流体排除効果による推進メカニズムをシミュレーションすることに成功している。また、魚類モデルの推進に関して、並進および回転について推進速度を算出した結果、前方への大きな推進速度が得られることを示している。

14 章では、13 章までで得られた成果および知見を総括して述べており、魚類の遊泳に関するメカニズムを解明するための比較的容易なシミュレーション手法を提案している。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、境界が移動・変形する複雑な非圧縮性流れ解析において従来採用されている境界適合座標系ではなくデカルト座標系上で解析可能な手法であるシームレス仮想境界法を用いて、層流から乱流までの解析を可能であることを示している。一般に、複雑な流れの解析には境界に沿った境界適合座標系が採用されるが、そのために計算格子を形成するの必要があり、複雑性が増すと計算格子を形成するために費やされる時間が、実際の流れ解析に費やされる時間を凌駕することになり、効率が低下する。さらに、境界が移動・変形する場合、境界の移動・変形に伴って計算格子を再形成するの必要があり、計算時間の増大を招く。一方、デカルト座標系においては計算格子形成が容易であるため、境界が移動・変形する際にも対応しやすい。しかしながら、デカルト座標系上で曲率を有する境界を取り扱う場合、境界が座標系に沿わないため計算精度が低下する。そこで、境界を仮想点の集合とみなす仮想境界法を採用している。仮想境界法においては、境界における速度条件を満足するように運動方程式に外力項を付加して計算を行うが、従来の仮想境界法においては、境界近傍で圧力の非物理的振動が発生することが知られている。そこで、本研究においては、境界内部にまで速度条件を満足する外力項を付加するシームレス仮想境界法を用いて非物理的な圧力振動を除去することに成功している。さらに、エネルギー方程式に対してもシームレス仮想境界法を拡張し、有効に機能することを示している。これらの検証は二次元発熱静止円柱まわり及び発熱球まわりの流れ解析に対して実施されている。また、流体解析において重要となる抗力の評価に関して、シームレス仮想境界法の付加外力項による評価法を提案し、従来の評価方法と比較することにより付加外力項を用いた評価方法が良好な定量値を算出することを示し、抗力の効率的な評価に成功している。

移動・変形を伴う境界を有する流体解析に対して、運動している境界点を基準に相対的に記述する ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 表示の支配方程式を採用し、ALE 表示方程式にシームレス仮想境界法を適用することにより、移動・変形する境界に追従する計算格子で解析する簡便な手法を提案している。二次元及び三次元の検証問題に対して、本手法が相対的に等価な条件の下で同一結果となることを示している。

さらに、シームレス仮想境界法を乱流解析の LES (Large Eddy Simulation) に適用し、チャネ

ル乱流及び球まわりの乱流解析を実施している。その結果、参考解との良好な一致が示され、本手法が乱流解析においても有効に機能することを明らかにしている。また、球周りの乱流解析において、ALE 手法と従来法との比較を行い、ALE 手法を採用しても同等の数値解が得られることを示している。

最後に、本手法を用いて実際の魚類の遊泳する条件を設定し、魚類モデルまわり流れの LES を実施している。魚類モデルの運動を遊泳動作、並進運動および回転運動に分け、周期的な動作である遊泳動作はフレームごとに仮想境界を事前に設定し、並進運動および回転運動については ALE 手法により計算格子ごと移動させることで、計算の簡略化を行っている。遊泳動作による推進力の評価は、シームレス仮想境界法において評価される外力を用いて算出する方法により抗力および揚力を求めている。本計算の結果、尾鰭後方において実際の魚類の遊泳においても観察される流体排除効果をシミュレーションすることに成功している。また、魚類モデルの推進に関して、並進および回転について推進速度を算出した結果、前方への大きな推進速度が得られることを示している。

以上のように、本論文は流体解析に対してデカルト座標系上で解析を行う新たな手法であるシームレス仮想境界法を開発し、その有効性を実証した研究であり、工学的に高く評価することができる。

本論文の内容は、以下の 5 編のレフリー制度が確立された論文誌及び国際学会において発表されたものであり、内 3 編で申請者が筆頭著者である。

1. H. Nishida and K. Tajiri, Numerical Simulation of Incompressible Flows around a Fish Model at Low Reynolds Number using Seamless Virtual Boundary Method, J. Fluid Science and Technology, 4-3, pp.500-511, (2009).
2. 西田秀利, 田尻恭平, 熱流動を伴う非圧縮性流れに対するシームレス仮想境界法, 機械学会論文集(B), 76-765, pp.741-746, (2010).
3. K. Tajiri, H. Nishida, and M. Tanaka, Numerical Simulation of Incompressible Flows with Heat Transfer using Seamless Immersed Boundary Method, J. Computational Science and Technology, 7-2, pp.286-296, (2013).
4. K. Tajiri, H. Nishida, and M. Tanaka, Property of Seamless Immersed Boundary Method for Large Eddy Simulation of Incompressible Turbulent Flows, J. Fluid Science and Technology, 9-2, pp.1-8, (2014).
5. K. Tajiri, H. Nishida, and M. Tanaka, Large Eddy Simulation of Turbulent Flow using Seamless Immersed Boundary Method, Proc. 8th International Conference on Computational Fluid Dynamics (ICCFD8), ICCFD8-2014-0197, pp.1-13, (2014).