

氏名	あいはら しんたろう 相原 慎太郎
学位(専攻分野)	博士 (工学)
学位記番号	博甲第 1116 号
学位授与の日付	令和 6 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	3 相以上を含む混相流 multi-phase-field モデルの構築と固体を含む問題への適用に関する研究
審査委員	(主査)教授 高木 知弘 教授 北川 石英 准教授 福井 智宏

論文内容の要旨

本論文では、工学的に重要な混相流現象に着目し、特に 3 相以上の任意数の相を含む混相流問題を表現可能な数値計算手法の確立と、本手法の固体表面を含む問題への適用を図ることを目的として研究が行われた。複数相間の流体界面を捕捉する手法として multi-phase-field (MPF) 法を適用した。また、従来型の Cahn–Hilliard (CH) モデルを用いた混相流 phase-field (PF) シミュレーションの課題である高い計算コストは、保存型 Allen–Cahn (CAC) モデルを適用することで解決を図った。従来モデルから段階的に定式化を行い、複数の数値シミュレーションによる体積保存性確認と理論解との比較を通して、最終的に高い体積保存性を有する CAC-MPF モデルの開発に至った。さらに、本手法の固体表面を含む問題への拡張について、複数のシミュレーションを通してその適用可能性を確認した。

第 2 章では、3 相以上の任意数の相を含む混相流現象を表現可能な MPF モデルを、従来モデルから段階的に発展させ導出した。ここで、3 つの CAC-MPF 方程式と、2 つの CH-MPF 方程式を導出した。

第 3 章では、流動現象を再現する連続の式と Navier–Stokes (NS) 方程式を導出し、MPF 方程式と連成させた。NS 方程式においては、3 相以上の相を含む混相流を表現するために、複数界面における表面張力を、PF 変数を用いて導入する定式化を行った。

第 4 章では、第 2 章と第 3 章で導出した支配方程式の無次元化を行った。

第 5 章では、支配方程式の有限差分法による離散化手法について示した。

第 6 章では、複数のシミュレーションを通して、構築した混相流 MPF モデルの精度評価を行った。その結果、いずれの MPF モデルにおいても実用的な精度で 3 相以上の混相流挙動を表現可能であることを示した。中でも、最終的に開発した CAC-MPF モデルは、曲率駆動を除去した CH-MPF モデルと同程度のオーダーの極めて良好な体積保存性を有し、安定に混相流計算が可能であることを確認した。さらに、CAC-MPF モデルは、CH-MPF モデルに比べて大幅な計算コスト低減が達成可能であることを示した。このため、開発した CAC-MPF モデルは、精度とコストの観点から優れたモデルであり、将来的に様々な混相流問題への適用が可能であると結論付けた。さらに、最終開発した CAC-MPF モデルを、固体表面を含む問題に適用し、静的・動的接触角を

評価することで、その適用可能性を示した。

第7章では、結論として、本研究の総括と今後の展望について記載した。

論文審査の結果の要旨

本論文では、流体現象の中で重要な位置づけにある混相流問題に着目し、特に、いまだ数理モデルが確立していない3つ以上の相を含む混相流現象を表現するためのモデル開発とその数値計算法の確立を目的として研究が行われた。研究手法としては、今後の発展が大いに期待できるmulti-phase-field (MPF)法を適用した。また、従来の混相流 phase-field (PF)モデルにおいて用いられてきたCahn-Hilliard (CH)モデルは計算コストが非常に高いことから、Allen-Cahn (AC)モデルから曲率駆動を排除することで体積保存性を確保した保存型AC (CAC)モデルを採用した。

先行研究で開発された従来型CAC-MPFモデルからスタートし、段階的に定式化を進め、3つのCAC-MPFモデルを構築した。また、体積保存性の比較のために2つのCH-MPFモデルを導出した。これら5つのMPFモデルを用いた複数の数値シミュレーションを行い、体積保存性の確認と理論解との比較を通して、構築したいずれのCAC-MPFモデルも3相以上の混相流問題を表現できることを確認した。中でも、最終的に開発したCAC-MPFモデルは、曲率駆動を除去した保存性の極めて高いCH-MPFモデルと同程度の体積保存性を有し、かつCH-MPFモデルに比べて非常に低い計算コストでシミュレーションを実施可能であることを確認した。このため、開発したCAC-MPFモデルは、精度および計算コストの両面において優れた手法であり、今後、様々な混相流現象への適用が可能であることを示した。さらに、本CAC-MPFモデルを、固体表面を含む問題に適用し、静的接触角と動的接触角の評価を通して、固気液混相流モデルとしての有用性を示した。

以上のように、本論文では、学術的かつ工学的に重要な研究課題が明確に設定され、先行研究の十分な調査と文献引用によって本研究の位置づけおよび課題が明確化されている。さらに、研究の方法は目的を達成するために適切である。本研究で達成されたCAC-MPFモデルの確立は、学術的かつ工学的に極めて有用な結果であり、論文の体制も学位論文として適切である。このため、本論文は学位論文として適切であると判断する。

以下に本学位論文の内容に関連する2編の公表論文を示す。

1. S. Aihara, T. Takaki, N. Takada, Multi-phase-field modeling using a conservative Allen-Cahn equation for multiphase flow, *Computers & Fluids* 178 (2019) 141-151. [Elsevier, IF = 2.8]
2. S. Aihara, N. Takada, T. Takaki, Highly conservative Allen-Cahn-type multi-phase-field model and evaluation of its accuracy, *Theoretical and Computational Fluid Dynamics* 37 (2023) 639–659. [Springer, IF = 3.4]

文献[1]に関しては、2024年2月14日の時点で被引用数は69件、FWCIは5.63(Scopus)であり、混相流MPFモデルを代表する論文となっており、当該分野において高い評価を得ていることがわかる。