

審査の結果の要旨

氏名 森 勇稀

化学工学や原子力工学をはじめ様々な工学分野において粉体プロセスがあり、粉体プロセスにおいて粉体流れや粉体と流体の混在した流れの制御が工業製品の品質を決める上で極めて重要となる。多くの粉体プロセスでは、粉体の粒子形状や表面物性に係わるマイクロ挙動がシステムにおける粉体のマクロ挙動に大きな影響を与えることが知られている。従って、このような体系の数値シミュレーションを実行するには、所謂、マルチスケール現象を考慮する必要がある。本研究では、固体-流体連成問題におけるマルチスケールシミュレーションに向けて新しい数値解析モデルの開発に取り組んでいる。本論文は、以下に示す6つの章から構成されている。

第1章は序論であり、本研究の背景および目的が述べられている。まず、化学工学分野および原子力工学分野におけるマルチスケール現象について説明がなされている。化学工学分野では粒子形状により最小流動化速度が変化する流動層、原子力工学分野では噴流層を用いた TRISO 燃料の製造プロセスをマルチスケール現象の事例として説明している。さらに、このような粉体が係わるマルチスケール現象を模擬するための数値シミュレーション手法について述べられている。本研究では、Discrete Element Method (以下、DEM と記す) および DEM と Computational Fluid Dynamics (以下、CFD と記す) を連成した DEM-CFD 法に注目している。既存研究におけるマルチスケール現象の数値シミュレーションに関する課題を抽出し、これらを解決するために、異なるスケールの粉体と大物体が混在する固気混相流手法の開発、湿潤粉体を対象とした大規模体系シミュレーション手法の開発および非球形粒子を対象とした固気混相流手法の開発を行うことが本研究の目的として述べられている。

第2章では、本研究において新たに開発した粉体・混相流の数値シミュレーション手法について述べられている。異なるスケールの粉体と大物体が混在する固気混相流を模擬するための埋込境界法を導入した DEM-CFD 法、液架橋力を対象とした DEM 粗視化モデル (スケーリング則モデル) および符号付距離関数を壁境界モデルおよび楕円粒子を用いた DEM とともに、最先端の粉体・

混相流の数値シミュレーションに関するアルゴリズムが丁寧に記述されている。

第3章は、埋込境界法を導入した DEM-CFD 法の開発および妥当性確認に関する研究について述べられている。本手法は、DEM の計算粒子を繋ぎ合わせた剛体として大物体を模擬して、大物体-流体間相互作用および大物体間相互作用をそれぞれ、埋込境界法および DEM の接触モデルで模擬するものである。妥当性確認のために、既存研究の流動層実験体系に本手法を応用し、本手法が実際の物理現象（大物体の位置、大物体に作用する力、など）を模擬できることが示されている。

第4章は、湿潤粉体を対象とした DEM 粗視化モデルの開発および妥当性確認に関する研究について述べられている。本モデルは、トロイダル近似に基づく液架橋力モデルを用いて、粗視化粒子とそれに含まれるオリジナル粒子群とで総エネルギーが一致するようにモデル化がなされている。妥当性確認のための体系として、撥水加工および親水加工の回転円筒容器内で湿潤粉体（固体粒子表面の接触角を 60 度と設定）を流動させる体系を選定している。粗視化粒子がオリジナル粒子のマクロ挙動（固体粒子の空間分布、円筒容器に作用するトルク、など）を定量的に模擬できることを示し、湿潤粉体を対象とした DEM 粗視化モデルの妥当性確認を行っている。

第5章は、符号付距離関数に基づく壁境界モデルおよび楕円粒子モデルを用いた DEM の開発および妥当性確認に関する研究について述べられている。本研究では、任意形状壁面内の楕円粒子の挙動を模擬するために符号付距離関数を壁境界モデルに採用し、接触判定アルゴリズムにポテンシャル法を導入した楕円粒子の DEM を開発している。回転円筒容器内の楕円粒子の流動に関する実験体系に本手法を応用し、計算結果が実験結果と一致することを示して、妥当性確認を行っている。さらに、粉末金型充填に本手法を応用して、楕円粒子の形状および抗力が粉末充填率に及ぼす影響についても評価することに成功している。

第6章は、結論であり、本論文の成果および今後の研究課題の方向性について述べられている。

以上を要すれば、本研究は、粉体および粉体が係わる混相流のマルチスケールシミュレーションに向けた基盤技術の構築を行っており、工学分野における数値シミュレーション技術の進展に寄与するところが少なくない。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。