

審査の結果の要旨

氏名 茂渡 悠介

本論文は、「符号付距離関数を用いた離散要素法の壁境界モデルの開発と粉体混合機への応用」という題目であり、5章より構成される。本研究では、粉体シミュレーションの粉体混合機への応用に向けて、粉体流れおよび固気・固液二相流のための符号付距離関数を用いた壁境界モデルの新規提案、粉体混合機プロセスへの応用および実験検証を行っている。本研究では、粉体を離散要素法でモデル化している。既往の数値解析手法では、スクリー搬送をはじめとする実際の粉体プロセスにおける粉体流れや、配管が埋め込まれた流動層や二軸混練機のような複雑形状壁面内の粉体が係る混相流の体系について、安定的に数値解析を実行して精度のよい結果を得ることが困難であった。そのため、産業では、これらの体系において数値解析を導入することが極めて困難であった。本研究では、符号付距離関数を用いて、離散要素法シミュレーションにおける壁境界をモデル化する。符号付距離関数を用いれば、任意壁面形状を容易にモデル化できる。さらに、符号付距離関数を用いた壁面モデルを固気・固液二相流に応用できるように発展させる。本研究で開発した壁面モデルの妥当性が示されれば、粉体シミュレーションの実用化に大きく貢献できる。

第1章は、序論であり、研究の背景が述べられている。過去の研究における粉体シミュレーションの数値解析手法の特徴および応用事例を説明するとともに、既存の離散要素法に係る数値解析技術の問題点が指摘された。具体的には、離散要素法のアルゴリズムの並列計算による効率化、離散要素法の大規模体系への応用、離散要素法シミュレーションにおける任意壁面形状モデリングである。これらの問題の中で、離散要素法の並列計算および大規模化モデリングに関する問題については、近年の研究で解決されつつあることが示され、粉体流れおよび固気・固液二相流のための符号付距離関数を用いた新しい壁境界モデルの研究の必要性が述べられた。

第2章には、「離散要素法による粉体シミュレーション」についてまとめている。本博士論文の以後の章で共通して用いられた、粉体を不連続体としてモデル化する際の基礎式、付着力のモデリング、安定計算条件、離散要素法のアルゴリズム、大規模解析モデリングおよび並列計算アルゴリズムについてまとめられている。本研究では、離散要素法の産業応用の観点から、高効率なアルゴリズムが採用されていることが示された。

第3章には、「離散要素法シミュレーションにおける壁面モデルの開発」についてまとめている。離散要素法シミュレーションにおける既存のいくつかの壁面モデルについて概要を説明するとともに、それらの問題点を指摘した。既存の手法では、衝突判定ア

ルゴリズムの複雑さのため、産業の粉体プロセスのような複雑な容器壁面形状のモデル化が困難であった。そのため、離散要素法シミュレーションの多くの研究は、矩形や円柱のような簡易形状であり、産業の粉体プロセスを模擬したものは極めて少なかった。本研究では、符号付距離関数を用いて、衝突判定アルゴリズムを単純化した新しい壁境界モデルを開発した。本研究で開発した符号付距離関数に基づく壁境界モデルは、離散要素法シミュレーションにおいて、任意壁面形状をモデル化できるとともに、非粘性消散体系においてエネルギーが保存するという特長がある。本手法の妥当性を検証するために、いくつかの数値実験を行った。数値実験では、ホッパー、乾式ミルおよびスクリーン搬送のような実用的な体系において、符号付距離関数を用いた壁境界および既存手法のメッシュを用いた壁境界の数値解析結果を比較した。粉体は、非付着性粒子および付着性粒子を対象とした。すべての数値実験において、両者の結果が一致したため、本手法の妥当性が示された。本手法は、任意壁面形状をシンプルなアルゴリズムで模擬できるため、離散要素法の産業応用の観点から、極めて有用である。

第4章には、「任意壁面形状体系における固気・固液二相流解析」についてまとめられている。産業の粉体プロセスの多くが、固気または固液二相流である。本研究では、離散要素法と数値流体力学を連成した手法に、符号付距離関数と埋め込み境界法を導入して、任意壁面形状体系における固気・固液二相流の新しい数値解析手法を開発した。本手法の妥当性を検証するため、配管が埋め込まれた流動層および二軸混練機において、数値解析および実験を行った。圧力損失、粉体の空間分布をはじめとする粉体のマクロ挙動について両者でよく一致したため、本手法が妥当であることが示された。本手法は、既存の数値解析では実行することが極めて困難であった、複雑な壁面形状（回転機構を含む）体系の固気・固液二相流を模擬できるため、極めて新規性が高いと言えるばかりでなく、産業応用の観点から有用性が認められる。

第5章は、「結論と今後の展望」であり、本研究のまとめを述べている。

以上を要するに、本論文は、符号付距離関数を用いた壁面モデルを開発し、実際の産業の粉体プロセスにおける複雑形状壁面内の粉体流れおよび粉体が係る混相流に離散要素法を応用できることを明らかにした。また、本研究成果は、リチウムイオン電池製造プロセス、循環流動層ガス化システムをはじめとするエネルギー分野、電子写真システム、自動車部品製造システム、製薬プロセスをはじめとする様々な分野に応用できる可能性があり、波及効果が大きい。従って、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。

以 上