

審査の結果の要旨

題目

ラグランジュ的手法による固液混相流の数値解析手法の開発とその湿式粉砕プロセスへの応用

氏名 山田 祥徳

本審査は、平成 25 年 1 月 15 日、10:00-12:00 工学部 8 号館 222 中会議室にて開催された。主査は、指導教員でシステム創成学専攻准教授の酒井幹夫准教授であり、副査は、システム創成学専攻の越塚誠一教授、藤田豊久教授であり、副査の外部審査員は、奥田洋司教授（新領域創成科学研究科 人間環境学専攻）、堤敦司教授（機械工学専攻）である。

学位論文題目は、「ラグランジュ的手法による固液混相流の数値解析手法の開発とその湿式粉砕プロセスへの応用」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湿式粉砕プロセスへの応用に向けて、ラグランジュ的手法を用いて効率よく固体-流体連成問題の数値解析を実行するための新しい解析手法の提案、湿式粉砕プロセスへの応用およびその実験検証を行っている。固相および液相を、それぞれ、離散要素法および陽的 MPS 法でモデル化している。既往の研究では、湿式粉砕装置のような複雑形状の固液混相流の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ため、実質的に数値解析技術を設計に導入できなかった。本研究成果によりこのような産業の抱える問題を解決することができる。

第 1 章は、緒言であり、研究の背景が述べられている。過去の研究における固体粒子挙動の高精度化および固体-流体連成問題の数値解析手法の特徴を概説するとともに、ラグランジュ的手法を用いた数値解析手法の問題点が示された。さらに、ラグランジュ的手法を用いた数値解析の産業応用事例が示された。最後に、固体-流体連成問題のラグランジュ的手法による新しい数値解析手法を開発するための必要性が述べられた。

第 2 章には、「複雑形状粉体の数値解析手法の開発」についてまとめられている。離散要素法で固体粒子の挙動を模擬する際、計算負荷の低減の観点から、多くの場合、球形粒子が使用される。非球形粒子を模擬する場合、これまでメッシュや複合粒子を用いたため、計算負荷が高くなってしまい、さらには、極めて小規模な体系への適用しかできないという問題があった。本研究では、計算において球形粒子を使用しても、非球形粒子の挙動を模擬できるような回転抵抗モデルを新たに開発した。本モデルの妥当性を検証するために、粉体層の

崩壊について、2次元体系の数値解析および実験を行った。安息角および崩壊時も速度分布を検証パラメータとした。数値解析および実験の結果がよく一致したことから、回転抵抗モデルの妥当性であることが示された。本研究で開発した離散要素法の回転抵抗モデルは、低計算負荷で非球形粒子により構成される粉体の流れを模擬できるため、産業応用の観点から優れている。

第3章には、「自由表面流れの数値解析手法の開発」についてまとめられている。ラグランジュ的手法による自由表面流れの数値解析手法のひとつに半陰解法を用いた **Moving Particle Simulation (SI-MPS)** 法がある。SI-MPS 法は非圧縮性流体を模擬するための解析手法であり、ポアソン方程式を計算することにより圧力の値が得られた。SI-MPS 法では、ポアソン方程式の計算に最も時間を費やした。SI-MPS 法の更なる産業応用に向けてポアソン方程式の計算負荷の低減および並列化効率のよいアルゴリズムの開発が課題であった。さらに、滑らかな曲面を有する壁境界モデルの開発も課題であった。このような課題を解決するために、圧力を陽的に計算するアルゴリズムを導入した陽的 MPS (**E-MPS**) 法を開発した。本手法では、別のラグランジュ的手法の SPH と同じアルゴリズムにより圧力計算を陽的に計算するため、ポアソン方程式を計算しないことから、計算負荷を大幅に低減することができる。さらに、音速の設定値を緩和しても、音速が流れ場に影響を及ぼさない体系において、SI-MPS 法とほとんど同じ精度の結果が得られることが示された。また、ポテンシャルエネルギーに着目した壁モデルを開発し、滑らかな曲面を有する壁を精度よく模擬できることを示した。以上のように、ラグランジュ的手法による自由表面流れの数値解析である SI-MPS 法に、陽的アルゴリズムと壁境界モデルの導入した手法を開発した。本研究は、従来手法と比べて産業のような大規模かつ複雑形状の体系の数値解析を高速に実行できることが優れている。

第4章には、「固液混相流の数値解析手法の開発」についてまとめられている。ラグランジュ的手法による固液混相流の数値解析手法について、産業のような大規模体系を効率よく解析する手法が開発されていなかった。本研究では、局所体積平均法に基づく支配方程式を使用して、離散要素法と E-MPS 法を連成する解析手法を開発した。離散要素法と E-MPS 法を連成した解析手法を円管内の自由表面を伴う固液混相流に応用し、音速の設定値を緩和しても、それが流れ場に影響を及ぼさないでは、効率よく数値解析を実行できることを検証した。なお、過去の研究では、局所体積平均法に基づく支配方程式を使用して、離散要素法と SI-MPS 法を連成する手法が開発されていた。本手法を使用すると、産業のような大規模体系をラグランジュ的手法による固液混相流の数値解析を効率よく実行できることが優れている。

第5章には、「固液混相流の数値解析手法の実験による検証」についてまとめ

られている。離散要素法と E-MPS 法を連成した解析手法の実験による検証について述べられている。離散要素法と E-MPS 法を連成した解析手法を実産業で使用されるビーズミルに応用した。検証実験を行い、ハイスピードカメラでジルコニア製媒体粒子の挙動を撮影した。PIV により、媒体粒子の速度分布を得た。実験により得られた媒体粒子の分布および速度分布を数値解析結果と比較したところ、両者の結果はよく一致した。また、過去の研究で困難であった、攪拌翼まわりの媒体の分布および移動量を評価することができた。本研究を通して、離散要素法と E-MPS 法を連成した解析手法が、実産業で幅広く用いられるビーズミルの設計および運転条件最適化に応用できることが示された。

以上より、本研究を通して、複雑形状粉体の数値解析手法の開発、ラグランジュ的手法による効率的な自由表面流れの数値解析手法の開発、ラグランジュ的手法による効率的な固液混相流解析手法の開発およびその実験による検証がなされた。本論文の研究内容は、新規かつ独創的であり、数値解析による湿式粉砕プロセスの最適化ばかりでなく粉体シミュレーションの実用化に大きく貢献するものである。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。

以 上