

審査の結果の要旨

氏名 鵜殿 寛岳

マイクロスケールの固体-流体問題は、バイオエンジニアリング、原子力工学、化学工学をはじめ幅広い工学分野で研究がなされている。マイクロスケール体系における固体-流体問題では、スケールに特有の物理現象の報告がなされている。近年の計算機性能の向上と高精度な物理モデルの開発によって、マイクロスケールの固体-流体問題の物理現象が解明されたり、仮説の設定が行われたりして、本分野の研究が大きく進展している。本研究では、マイクロ流路中における固体粒子挙動および固体粒子凝集状態の懸濁液のレオロジー特性に着目している。本論文は、以下に示す7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。本研究では、マイクロ流路中における固体粒子挙動および固体粒子凝集状態の懸濁液のレオロジー特性のふたつのテーマに取り組んでいる。いずれのテーマにおいても固体粒子間で生じる流体力学的相互作用が重要となる。このようなマイクロスケール体系の固体-流体問題に関する現象の解明において、実験的アプローチでは限界があることを指摘している。これらの体系における物理現象を解明するために、数値シミュレーションを新たに導入して研究を行うことが目的であることを述べている。

第2章では、本研究において使用した固体-流体問題の直接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) と Direct Numerical Simulation (以下、DNS と記す) に基づく数値流体力学を連成した DEM-DNS 法を使用している。DEM-DNS 法では、固体-流体間相互作用を Immersed Boundary Method (以下、IBM と記す) により体積力として模擬することが述べられている。そのほかに、IBM に関する既存研究の成果、世界的に広く採用されている局所体積平均法ベースの固体-流体連成シミュレーション手法に対する DEM-DNS 法の特長および DEM-DNS 法のアルゴリズムについて説明がなされている。

第3章は、マイクロ流路を流れる固体粒子の慣性集約挙動のメカニズムについて述べられている。集約粒子列の等間隔性のメカニズムを明らかにするために、ふたつの固体粒子がマイクロ流路を流れる体系において DEM-DNS 法の数

値シミュレーションを実行し、固体粒子の挙動を綿密に評価している。なお、集約粒子列の等間隔性のメカニズムは、実験では測定することができない。数値シミュレーションにより、集約粒子列の閉じた軌道上での周期的振動のために粒子列の等間隔性が生じることを明らかにしている。

第4章では、マイクロ流路を流れる固体粒子に作用する強い粘性擾乱の影響について述べている。高粒子濃度条件あるいは固体粒子が近接する条件において、固体粒子に作用する強い粘性擾乱が生じると、集約挙動が崩れることが知られている。多粒子系および2粒子系において強い粘性擾乱の起源および集約挙動への影響を綿密に評価している。強い粘性擾乱が固体粒子に作用するとリフトフォースとのバランスを崩すため、非集約挙動が生じることを示している。

第5章では、固体粒子に作用するリフトフォースに対する固体粒子のサイズ効果の評価について述べている。固体粒子サイズによるリフトフォースのプロファイルの変化を示すことにより、リフトフォースの固体粒子サイズ依存性を明らかにしている。

第6章では、固体粒子凝集状態の懸濁液のレオロジー特性について述べている。高レベル放射性廃棄物を処理するガラス溶融炉において、溶融スラリーの制御が安定運転に大きく寄与することが知られている。溶融スラリーは **shear thinning** 流体であることが知られているが、過酷環境のため実験により **shear thinning** のメカニズムを解明することは困難である。本研究では、DEM-DNS 法を固体粒子凝集状態の懸濁液のレオロジー特性評価に応用し、固体粒子凝集状態が壊れることによる見かけ粘度の影響を評価している。外観が等しい一方で、内部構造が異なる2種類の凝集体（密充填凝集体および中空凝集体）を対象としている。剪断流れ場における凝集構造体の変形と粘度変化を評価するための数値シミュレーションを実行しており、その結果、中空凝集体の方が密充填凝集体よりも大きな **shear thinning** が生じる結果が得られている。本計算結果より、溶融スラリーにおける **shear thinning** は、固体粒子の凝集体内部に取り込まれた流体の解放による見かけ体積の減少であることを仮説として立てている。

第7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、本研究はマイクロスケールの固体-流体問題に係わる物理現象を数値シミュレーションにより解明したものであり、当該分野における数値シミュレーション技術の発展に貢献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。