

審査の結果の要旨

氏名 姚華秦

薬品・食品、自動車部品から原子燃料まで、幅広い工業製品が粉末成形プロセスを経て製造される。粉末成形において、粉末を金型に充填する粉末金型充填が適切になされるかどうかは最終製品の品質を決定すると言っても過言ではない。本研究では、実際の産業における粉末金型充填の最適化を行うための計算手法の開発とその妥当性検証を行う。本論文は、以下に示す6つの章から構成されている。

第1章には、粉末金型充填に関する研究背景がまとめられている。まず、粉末金型充填の基本原理、粉末金型充填の薬品・食品、原子燃料製造への応用が述べられている。次に、粉末金型充填の数値シミュレーション手法について述べられており、産業用の粉末金型充填において、移動壁となる粉箱、莫大な数の固体粒子および体系内の空気の流れのモデル化が必要になることが示されている。粉末金型充填において、固体粒子の流動挙動はラグランジュ的手法の **Discrete Element Method** (以下、**DEM** と記す) により模擬できること、固体と流体の挙動を模擬するには、**DEM** と **Computational Fluid Dynamics** (以下、**CFD** と記す) を連成した **DEM-CFD** 法が応用できることが述べられている。粉末金型充填の固体-流体連成シミュレーションにおいて、移動壁境界をモデル化する際に、**Signed Distance Functions** (以下、**SDF** と記す) と **Immersed Boundary Method** (以下、**IBM** と記す) を組み合わせた手法が有効となることが示されている。このような背景から、**DEM-CFD** 法に **SDF** と **IBM** を導入した数値シミュレーション手法 (**Advanced DEM-CFD** 法) を開発し、それを粉末金型充填に応用して、本手法の妥当性を検証することが本研究の目的として述べられている。

第2章には、本研究の数値シミュレーションモデルが述べられている。まず、**DEM** および **DEM-CFD** 法の概要、**DEM** の安定条件、局所体積平均を導入した流体の支配方程式・モデリングが説明されている。**SDF** と **IBM** を組み合わせた壁境界モデルについて、**CFD** の格子内の **SDF** の点数をカウントするだけで固体-流体間相互作用力を模擬できることが示されている。**DEM** において、オリ

オリジナル粒子群をひとつのモデル粒子で代表して計算するスケーリング則モデルの DEM 粗視化モデルの概要が述べられている。

第3章には、Advanced DEM-CFD 法の実験による検証について述べられている。本研究では、空気の流れの影響を受けやすい細粒子を対象として、粉末金型充填の既存研究で広く用いられるステップ付きの金型を選定した。Advanced DEM-CFD 法により、空気の流れの影響を受けた粉体の挙動を模擬できることを検証するために DEM（固相単相）および DEM-CFD 法（固気二相）の2種類の数値シミュレーションを実行した。DEM の計算結果では粉末は完全に充填されたが、DEM-CFD 法の計算結果では粉末の上部に空隙が見られ、空気の模擬の有無により計算結果が異なっていた。DEM-CFD 法の計算結果は、固体粒子の空間配置の時間変化が実験結果とよく一致したため、細粒子の粉末金型充填には、細粒子と空気の相互作用が極めて重要になることが示された。このように、実験による検証を通して、Advanced DEM-CFD 法により粉末金型充填における細粒子の挙動を適切に模擬できることが示された。

第4章および第5章では、DEM 粗視化モデルの粉末金型充填への適用性について検討した。第4章では、細粒子を矩形形状の金型に充填するシミュレーションを実行した。実際よりも2倍または3倍大きな計算粒子を使用しても、DEM 粗視化モデルにより、オリジナル粒子体系の充填量の経時変化や粉体の空間配置を模擬できることを示した。他方、単に大きな計算粒子を使用すると、全く異なる計算結果が得られた。そのため、実際よりも大きな計算粒子を用いる場合は DEM 粗視化モデルのようなスケーリング則モデルの導入が必要になることが示された。第5章では、細粒子を矩形形状の中に構造物を有する金型に充填するシミュレーションを実行した。第4章の場合と同様に実際よりも2倍または3倍大きな計算粒子を使用しても、DEM 粗視化モデルにより、オリジナル粒子体系の充填量の経時変化や粉体の空間配置を模擬できることを示した。このようにして、DEM 粗視化モデルは粉末金型充填に応用できることが示された。

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、本研究は粉末金型充填において信頼性の高い数値解析モデルを提案したものであり、化学工学および原子力工学における粉体の数値シミュレーション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。