

審査の結果の要旨

氏名 孫 暁松

固体粒子を含む混相流は、化学工学、機械工学、原子力工学をはじめ、さまざまな工学分野において活発に研究がなされている。近年の著しい計算機性能の向上により、このような工学分野において数値シミュレーションを活用することが望まれている。本分野に応用可能な混相流に関する数値解析モデルが開発されれば、現象把握ばかりでなく、二次電池、薬品、食品をはじめとする産業プロセスの設計の最適化にも役立てられる。他方、これまでの混相流の数値シミュレーション手法は、産業応用の観点から問題があった。具体的には、導入が容易で信頼性の高い固気液三相流に関する数値解析モデルがほとんど開発されていなかったばかりでなく、任意形状内のこれらの混相流を模擬するための数値解析モデルも開発されていなかった。本研究では、そのような状況を鑑みて、固相に **Discrete Element Method** (以下、**DEM** と記す)、気液界面のモデリングに **Volume of Fluid** (以下、**VOF** と記す) 法、任意壁面形状モデルに **Signed Distance Function** (以下、**SDF** と記す) および **Immersed Boundary** (以下、**IB**) 法を使用して、数値解析モデルを新たに開発した。本論文は、全体で5つの章から構成されている。

第1章は、序論であり、界面捕獲モデル、固体流体連成問題のモデリングおよび複雑壁面形状のモデリングについて、本研究の背景と目的について述べられている。

第2章では、複雑形状内の気液二相流の数値解析を実行するために開発した、**VOF-IB** 法について述べられている。本研究では、**VOF** 法に **THINC/WLIC** スキームを導入して、界面捕獲を行う。また、複雑形状の壁面境界は、**SDF** を併用した **IB** 法を使用する。これらの既存の数値解析モデルを組み合わせ、任意形状内の気液二相流の数値解析を実行するための **VOF-IB** 法を新たに開発した。このようなモデリングにより、アダプティブメッシュを使用した場合に比べて、実際の産業のプロセスのような複雑形状の壁面を模擬することが比較的容易になる。**VOF-IB** 法の妥当性を検証するために、回転容器内の自由液面形状、液中からの円柱の取り出し、ダムブレイクなどの体系の数値解析を実行した。数値解析結果を理論解または実験結果と比較して、その一致を確認することにより **VOF-IB** 法の妥当性を検証した。本手法により、既存の手法では困難であった、複雑壁面形状内の気液二相流を模擬することが可能になった。

第3章では、複雑形状内の固気液三相流の数値解析を実行するために開発した、**DEM-VOF** 法について述べられている。本研究においても気液二相流のモデリングに関しては **VOF-IB** 法と同じであり、**THINC/WLIC** スキームを導入した **VOF** 法で界面捕獲

を行うとともに、SDFを併用したIB法を壁面境界として使用する。本研究では、局所体積平均による流体の支配方程式を使用する。固相モデルとしてDEMを使用する。固体-流体間相互作用については、経験に基づく関係式を使用する。これらの既存の数値解析モデルを組み合わせて、任意形状内の固気液三相流の数値解析を実行するためのDEM-VOF法を開発した。本研究では、固体粒子に作用する粘性力の導入についても検討した。DEM-VOF法の妥当性を検証するために、回転円筒容器内、ダムブレイク、二軸混練機などの体系において固気液三相流の数値解析を実行した。数値解析結果を実験結果と比較して、その一致を確認することによりDEM-VOF法の妥当性を検証した。本手法により、既存の手法では困難であった、複雑壁面形状内の固気液三相流を模擬することが可能になった。

第4章では、固体-流体間相互作用力をDirect Numerical Simulation（以下、DNSと記す）で評価しながら、任意壁面形状を取り扱えるような固気液三相流の数値解析を実行するために開発した、DEM-VOF-DNS法について述べられている。気液二相流のモデリングのために簡易CLS/VOF法を開発するとともに、表面張力モデルも導入されている。固相はDEMを使用している。これらの既存の数値解析モデルを組み合わせて、固気液三相流の数値解析を実行するためのDEM-VOF-DNS法を新たに開発した。本手法の妥当性を検証するために、固体粒子の沈降、浮遊粒子間相互作用などの体系において固体流体連成問題の数値解析を実行した。数値解析結果の定量的または定性的な検証を行い、DEM-VOF-DNS法の妥当性を示した。さらに3章で述べた経験式と本章のDNSに基づく固体-流体間相互作用の整合性についても検証した。

第5章には、本研究の総括および今後の展望が記載されている。

以上を要すれば、本研究は混相流の数値シミュレーションの産業応用に向けて、導入が比較的容易かつ工学の観点から信頼性が高い新しい数値解析モデルを提案したものであり、工学における混相流分野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。