

## 審査の結果の要旨

氏名 松永 拓也

本研究は、攪拌槽内の流動解析に関する研究であり、6章より構成されている。

第1章は序論であり、研究の背景として攪拌槽の用途や構造、そこで生じる流体混合、マイクロミキサーなどについて説明されている。次に、攪拌槽における流体混合問題を解くための数値解析手法に関するこれまでの研究についてまとめられている。ラグランジュ的な粒子法はこうした流体混合問題を精度良く解くことができると考えられるが、境界条件の取り扱いに問題があることなどが述べられている。そこで、本研究では、(1) 簡便な流体混合予測、(2) 高精度流体混合解析、(3) 粒子法における複雑固体壁境界表現、(4) 粒子法の計算高速化について研究するとしている。

第2章はセミラグランジュ型手法を用いた混合予測について述べられている。これは格子法の対流項の計算にセミラグランジュ型スキームを用いる方法である。マイクロミキサーにおける低レイノルズ数流れに本手法を適用し、精度良く混合状態が予測できることを示している。

第3章では格子-粒子ハイブリッド型流体混合解析手法の開発についてまとめられている。本手法では、流れの解法には格子法を用い、パッシブスカラーの濃度の解法には粒子法を用いている。なお、格子法にはコロケート型有限体積法を採用し、粒子法にはLSMPS法を採用している。さらに、粒子再配置手法を取り入れている。本手法を用いて非定常一次元拡散問題を解析し、ランダムな粒子配置において空間解像度に対して2次の収束が得られている。キャビティ内流れにおいては、ペクレ数が $10^4$ の場合に、有限体積法よりもはるかに精度の良い計算結果が得られている。ジグザグ流路内混合では、Mixing Indexを用いて計算結果を評価したところ、有限体積法ではペクレ数が $10^4$ よりも大きくなると精度が悪化するが、本手法ではモンテカルロ法と同様に高精度が維持されることが示されている。

第4章では粒子法における複雑固体壁形状に適したミラー粒子境界表現の開発について述べられている。ミラー粒子とは、固定壁境界をはさんで流体粒子と対称の位置にミラー粒子を仮に発生させることで、境界条件を表現する方法である。本手法では、ミラ

一粒子のミラー粒子を発生させることと、視線判定を行うことが新たな特徴となっている。この特徴により薄肉の壁境界の場合にも本手法を適用することが可能になる。攪拌槽の翼では薄肉の壁を扱わなければならないが、本手法は攪拌槽の解析に有用である。静水圧問題、凹形状壁境界を有する流れ、平行平板間流れ、物体後流の流れを解析し、適切な解が得られることを示した。さらに、6枚の翼と4枚のバッフルを有する攪拌槽内のレイノルズ数が1の流動に対して、粒子数約20万で解析を行ったところ、翼近傍の流速は実験と定量的によく一致した。

第5章では粒子法における代数的マルチグリッド(AMG)法を用いた連立一次方程式の解法について説明されている。攪拌槽解析では高粘性流体を扱う場合が多く、圧力とともに粘性項の速度についても陰的な扱いが必要となり、連立一次方程式を解かなくてはならない。そこで、ここでは連立一次方程式のソルバーとしてAMG法の適用を試みている。粒子法では時々刻々粒子配置が変化するため、前処理の計算負荷が比較的小さいplain aggregation-AMG(PA-AMG)法を用いるとしている。メインソルバーにはBiCGSTAB法を採用している。2次元ポアソン方程式に本手法を適用したところ、粒子数の1乗に比例する計算時間となり、大規模計算において有用であることが示された。次に、2次元ダム崩壊問題に適用し、PA-AMG法前処理によって高速な計算が可能になり、大規模問題であってもソルバーの計算時間が全体の計算時間に占める割合をほぼ一定に保つことができている。

第6章は結論であり、攪拌槽解析のために、セミラグランジュ型格子法の開発、粒子-格子ハイブリッド法の開発、ミラー粒子による壁境界条件の実現、AMG法による粒子数の1乗に比例する連立一次方程式の解法の導出、といった成果が得られたとしている。

以上を要するに、本研究は攪拌槽内の流動解析における、格子法、格子-粒子ハイブリッド法、および粒子法の大幅な進歩をもたらしたと評価できる。よって本論文は博士(工学)の短縮修了の学位請求論文として合格と認められる。