

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名： 大山峻幸

本論文は、水処理や化学反応器などで用いられる曝気槽内の気泡流動と関連し、気泡が自由界面および剛体壁に衝突し再び沈み込む現象を対象とした数値計算を行い、界面における気泡の反発現象のメカニズムを解析したものである。

自由界面において気泡が反発する現象については、興味深い現象としてすでに報告されているが、反発が起こるメカニズムに関しては、気泡や自由界面の変形による運動エネルギーと表面エネルギーの交換、気泡・界面間、気泡・壁面間の間隙が狭くなることにより生じる潤滑圧力、不純物の界面吸着に依存するクーロン力や表面張力の分布の変化などの化学的要因等いくつかの理由が挙げられており、未だ明確な説明が与えられていない。本研究ではこの現象に対し、気泡や自由界面の変形による運動エネルギーと表面エネルギーの交換に着目して、気泡が静止流体中で重力により浮上し、自由界面や壁面に接触し、再び水中に沈みこむまでの気泡挙動の数値解析を行っている。反発過程における定量的な表面エネルギーの評価、先行研究での実験結果から提唱されているモデルと本計算結果の比較から、気泡の反発運動のメカニズムを論じている点が特色である。

本論文は「自由界面・壁面における単一気泡の反発現象に関する数値解析」と題し、全5章からなる。

第1章は「序論」であり、研究の背景と目的、先行研究で報告されている気泡や液滴の反発現象に関する実験やそれから導かれる反発運動のモデルについて記述している。

第2章は「計算手法」であり、本研究で用いられている基礎方程式と数値計算手法について説明している。本研究では、界面の位置を陽に持つため、表面積の捕捉に優れ、一つの計算格子に二つの界面が存在する場合でも安定して計算可能なフロント・トラッキング法を用いており、陽に表わされる界面と固定矩形格子の情報のやりとりや曲率の算出方法を述べている。

第3章は「三次元計算」である。デカルト座標系において合理的に支配方程式の離散化が行えることから、対象とする現象に対して三次元計算を行っている。まず、気泡速度の時間履歴や壁面と気泡の間隙距離の空間解像度依存性を二次元計算で検証し、次に三次元

計算において周囲流体の粘性と表面張力係数をパラメータとして気泡の自由界面や剛体壁における反発運動の計算を行っている。反発現象を定量的に評価する指標として、先行研究でも調べられている接触時間と反発係数について評価し、実験結果とに比較により計算結果の妥当性を示すとともに、実験では観察することが困難な気泡や自由界面の変形量や表面エネルギーの時間推移、オーダー評価を行っている。

第4章は「軸対称計算」である。三次元計算では気泡の運動エネルギーが表面エネルギーに変換され反発に至る過程を捉えられている一方、気泡の浮上速度に対する格子解像度や計算領域の依存性に関する議論は不十分であるため、本章では軸対称計算を実行し、結果を解析している。自由界面系と剛体壁系で反発係数が大きく異なることから本章では、壁面の滑りの有無に着目し、剛体壁とフリースリップ壁面における気泡の反発運動の数値計算を行っている。軸対称系での計算手法、反発過程におけるエネルギー収支や、気泡が壁面に接触中に形成される液膜に関して記述している。数値計算手法に関して、重み付き接ベクトルと Ferguson 曲線を用いることで、フロントポイントが等間隔に配置されていない場合でもエレメントの曲率や中心座標、リグリッドを高精度化できること、spurious current の抑制にはハイブリッド法が有効に機能するが、浮上気泡への適用には安定性の問題があり、本研究が対象とする浮上気泡においては従来の表面張力の表現法を問題なく適用できることを示している。計算結果の考察から、接触過程でのエネルギー収支より、反発現象は気泡が自由界面や壁面に接触している際の運動エネルギーと表面エネルギーの交換が重要であること、また自由界面と気泡、壁面と気泡の間隙に形成される液膜での粘性散逸は、接触過程における周囲流体での粘性散逸と比較して十分小さく、反発現象に与える影響は無視できることを示している。

第5章は「結論」であり、気泡の反発運動のために導入した数値計算技法をまとめるとともに、物理現象の観点から、気泡の反発運動は、気泡が自由界面や壁面に接触している際の運動エネルギーと表面エネルギーの交換が重要であること、剛体壁での反発係数は先行研究で提案されているモデル式と異なる傾向を示し、気泡径のみで反発係数が決まる傾向があること、これは系のエネルギー散逸に関して、気泡が壁面に接触する過程の前半に発生する大きな粘性散逸が支配的となることに起因することなどの知見がまとめられている。

以上、本論文では、自由界面や壁面における単一気泡の反発運動の数値計算を行い、実験からでは定量的な捕捉が困難な表面エネルギーや粘性散逸の推移や接触中に運動エネルギーと表面エネルギーが交換されていること、従来提案されていたモデルでは考慮されていない接触過程前半に発生する粘性散逸が反発係数に影響することを報告している点が、気泡運動のモデリングに関連して流体力学的に重要な意義を持つ。

よって本論文は博士（工学）学位請求論文として合格と認められる。