

審査の結果の要旨

氏名 福多 将人

本論文では、界面活性剤溶液中での気泡挙動の変化を解明することを目的としている。ここでは特に、流れ場にせん断が存在するときに気泡に対して流れと垂直方向に働く揚力が、界面活性剤の気泡表面への吸着により受ける影響について議論した。

静止流体中においては、水中を上昇する気泡は液相に存在する微量の界面活性剤の影響を大きく受け、純水中を上昇する気泡に比べて、その上昇速度が大幅に低下することが知られている。この現象は、界面活性剤分子が気泡表面へ吸着・脱離することで現れるマランゴニ効果によってそのメカニズムの説明が与えられている。気泡挙動に対する界面活性剤の影響に関する既存の研究を参照すると、気泡表面はクリーンな状態のときにせん断応力の働かないフリースリップ面であるのに対し、界面活性剤が吸着して表面が十分に汚れたとき、滑り速度を持たないノースリップの状態にまで変化していると考えられている。このとき、気泡は水中で剛体球のように振る舞い、個々の気泡挙動の変化が気泡流の巨視的な流動構造にまで影響を与えることが実験により示されている。実験結果の詳細を見ると、界面活性剤の種類と濃度の違いによる気泡の壁面集積傾向の変化が観測されており、これは、界面活性剤溶液中での気泡表面における境界条件の変化と関連して、せん断流中の気泡に働く揚力が変化することに起因していると考えられる。しかしながら、界面活性剤溶液中で気泡に働く揚力の変化について詳細な解析を行った研究は、著者の知る限りでは存在せず、このため、マランゴニ効果が気泡に働く揚力に与える影響の解明が強く求められている。

以上を背景として本論文では、単純せん断流中の単一気泡を解析対象として、界面活性剤溶液中で気泡に働く揚力の変化を数値計算により解析した。計算手法として、変形の効果を無視した球形気泡に関しては、気泡回りの流れ場の情報を詳細に得ることの可能な、気泡形状に沿った計算格子を生成する境界適合格子法を採用している。また、変形気泡に関しては、変形量を微小と仮定して、理論解析的な手法である領域摂動法を取り入れた数値計算手法を開発し、これを用いて揚力に対するマランゴニ効果と変形の影響の解析を行っている。本論文は、以下に記すように全5章から構成される。

第1章は「序論」とし、界面活性剤溶液中における気泡挙動、気泡に働く揚力に関する既存研究から得られている知見をまとめ、本研究の目的を述べる。

第2章は「Stagnant cap model」であり、マランゴニ効果の近似モデルであるStagnant cap modelを用いて気泡表面における速度の境界条件を設定し、気泡回りの流れ場を数値計算により求める。これにより、気泡表面における速度の境界条件と揚力の関係について議論し、境界条件の変化による揚力低下のメカニズムを明らかにする。

第3章は「マランゴニ効果の直接数値計算」である。ここでは、界面活性剤の吸着・

脱離過程を考慮した濃度の保存式を解き、求めた表面濃度分布から接線方向に働くマランゴニ応力を直接計算して、気泡表面での応力のつりあいから表面における速度の境界条件の変化を評価している。計算結果より、界面活性剤の脱離速度定数の変化がマランゴニ応力の発生に大きく関わっており、脱離しにくい特性を持つ界面活性剤が気泡に対して大きな揚力低下をもたらすことを示した。さらに、前章での **Stagnant cap model** による解析結果との比較からモデルの妥当性を検証し、揚力変化に大きく関わる要因として界面活性剤の表面濃度分布の非軸対称性が与える影響を解析した。これより、流れ場のせん断による濃度分布の僅かな非軸対称性から揚力は大きな影響を受けて、軸対称濃度分布を仮定した **Stagnant cap model** を用いた計算結果に比べて揚力が増加することを示した。

第4章は「変形気泡に働く揚力」であり、気泡の変形によって気泡回りの流れ場に現れる擾乱を求め、このときの変形による揚力変化を解析している。ここでは、気泡形状に対して微小変形を仮定して領域摂動法を取り入れた数値解析を行っており、気泡の軸対称、非軸対称な変形モードが揚力に与える影響を明らかにした。また、気泡の変形と界面活性剤の吸着を同時に考慮した解析を行い、マランゴニ効果の存在下で変形の効果が揚力に対してどのように現れるかを議論している。

第5章は「結論」である。本研究では、マランゴニ効果がもたらす気泡に働く揚力の変化について議論しており、上記のような知見を得た。

本論文は、実スケールの気泡流における流動構造に大きな影響を与える、界面活性剤溶液中の気泡に働く揚力に関して、高精度数値計算に基づいた非常に有意な知見を得ており、その工学的意義は大きい。

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。