

## 審査の結果の要旨

氏 名 田 川 義 之

水中を上昇するミリサイズの気泡の流れは水質浄化システムや化学反応器など工業的に数多くの応用が見られる重要な現象である。この流れを予測するための数値計算モデルでは、気泡の運動を記述するモデル方程式が用いられるが、従来のモデルは直線運動をする気泡の挙動を基にモデリングされており、不純物を含んだ水中における3次元の複雑な運動に対しては、その運動を詳細に記述できるモデルが構築されていない。これは、不純物の中でも気泡運動に特に大きな影響を与える表面活性剤に関して、気泡の3次元運動に対する定量的な評価が十分になされていないことによる。そこで本論文では界面活性剤水溶液中を上昇する単一気泡の3次元運動について基礎的な知見を得ることを目的とし、活性剤の濃度・種類と気泡の大きさをパラメータとした実験を行い、気泡の軌跡・形状・周囲流動場の3次元計測に基づいた議論を行っている。本論文は、「界面活性剤水溶液中における単一気泡の3次元運動」と題し、全6章からなる。

第1章は「序論」であり、研究の背景と目的について述べている。また過去に行われた気泡の3次元運動に関する研究をあげ、本研究の位置づけを明らかにしている。

第2章は「単一気泡の3次元運動に関する理論」であり、気泡の3次元運動と後流構造の間には密接な関係があるため、物体の後流構造について従来の知見をまとめている。また、計測した3次元運動軌跡から気泡にかかる抗力・揚力を求めるための基礎理論式となる一般キルヒホッフ-ケルビン方程式の導出を行っている。

第3章は「3次元運動の軌跡と気泡形状の計測」であり、気泡の運動軌跡と形状をとらえるための独自の測定装置と計測結果について報告している。超純水中では気泡径に依存して、直線運動、らせん運動、ジグザグ運動を観測し、従来の研究結果と一致する結果を得ている。一方、界面活性剤 TritonX-100 の低濃度溶液中において、らせん運動からジグザグ運動へ遷移する運動を観測している。この遷移運動はこれまで報告されてこなかった現象である。

第4章は「気泡周囲流動場のデジタルホログラフィー計測」であり、3次元流動場測定として用いたホログラフィック PIV について述べ、気泡後流の測定結果を示している。ホ

ログライター計測の最大の問題は瞬時流動場に対して得られる速度情報が不足していることであったが、ほぼ同じ3次元運動を行う気泡を発生させ、周囲流動場を繰り返し計測し、結果を重ね合わせることで解決している。また、速度場の算出には4時刻追跡法を採用し、渦度など速度微分量は距離の逆数補間を用いた格子状データから算出している。計測は超純水中でらせん運動する気泡、TritonX-100中でジグザグ運動する気泡について行っている。

第5章は「気泡運動と後流に関する考察」であり、測定結果を踏まえて3次元運動メカニズムについて議論している。本研究で初めて詳細に報告したらせんからジグザグへ遷移する気泡運動は、表面の瞬時すべり条件が運動モードを決定付けているとしている。また、すべり条件の非定常変化がもたらす影響について考察し、本実験で影響は少ないことを明らかにしている。さらに、運動モードを  $Re$  数- $Cp^*$  のグラフにプロットし、ノンスリップ条件、フリースリップ条件では従来の結果と一致する臨界  $Re$  数を確認し、新しい知見であるハーフスリップ条件では全ての  $Re$  数範囲でらせん運動する結果を示している。また、らせん運動する気泡の後流の3次元計測結果から、2つの縦渦が気泡上から見て常に一定位置に存在することを示している。一方ジグザグ運動する気泡からは周期的な渦放出を観測している。これは、軸対象構造が崩れ、定常な非軸対象構造が現れ、さらに周期的構造へ遷移する剛体球の後流で起きる現象と類似していることを示している。

第6章は「結論」であり、得られた結果について総括している。

本論文に報告されている研究は、3次元運動を考える上で活性剤の濃度や気泡径の大きさに留意した実験を行い、統一的な見解が得られていなかった不純物中の気泡運動に対して新たな知見を与えている点で高く評価されるべきものである。特にらせん運動からジグザグ運動への遷移という運動を初めて詳細に計測し、非定常な気泡表面活性剤吸着量の変化と運動モードの関係を明らかにした意義は非常に大きい。ここで得られた知見は、気泡の3次元運動モデルを構築する際に、瞬時濃度分布を用いて気泡の運動を記述できる可能性を示唆しており、数値計算モデル構築の観点からもその工学的意義は大きい。

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。