

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名： 小笠原 紀行

本論文は、水中に含まれる界面活性剤による気泡乱流の大域的な構造への影響を実験的に明らかにし、気泡流の流動構造を決定する様々なスケールの現象及びその相互作用に関する力学について基礎的な知見を得ることを目的としている。工業プロセスにおける気泡流の代表としては、水質浄化施設での曝気槽や発電施設での冷却系統であるが、いずれの場合も水の汚れは無視できず、また様々な状況が考えられる。界面活性剤は水中の汚れを模擬するものであるが、従来の気泡流研究においては深く考慮されることのなかったパラメータである。したがって、本論文のように気泡流に対する界面活性剤の効果を解析することは、工業分野における気泡流現象のより深い理解に直結するものであり、工学的に意義深い。

濃度マランゴニ効果で説明される水道水中における気泡の終端速度の低下で知られるように、水中における気泡挙動は液相に含まれる微量の界面活性剤に大きく影響される。単一気泡を対象とした従来の研究では水中に含まれる不純物の影響が不可欠なパラメータとして設定され、上昇過程の気泡変形や非定常挙動、三次元運動の安定性などに関する考察がされている。また、球体を受ける流体力に関しても理論解析や高精度な数値解析の進展による多くの知識の蓄積がある。一方、大スケールの気泡流を対象とした既存の研究では、マランゴニ効果はもとより、個々の気泡運動に着目した解析という点においては不十分であった。そこで、本研究では液相に混入する界面活性剤を実験条件として設定した上で気泡群の挙動を個々の気泡運動に着目して解析し、気泡-液相間の相互作用を明らかにすることを目的として実験を行っている。気泡流の大域的な構造特性を解析する際、気泡表面における界面活性剤分子の存在やそれに伴う気泡-液相間の相互作用の変化など、気泡流のマルチスケール構造を強く意識した上で内在する力学の理解に努める点がこの研究の特色である。

本論文は、「チャンネル内上昇気泡乱流のマルチスケール構造に対する界面活性剤の影響」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、また過去に行われた気泡流および気泡に関する研究を挙げ、これらに対する本論文の位置づけを述べている。

第2章は「実験装置及び実験条件」であり、はじめに本論文において中心的役割を果たす垂直チャンネルを用いた上昇気泡流のための実験装置及び径のそろった球形気泡を発生する気泡発生装置の説明を行っている。また、流量条件や添加する界面活性剤の条件について記述している。

第3章は「気泡の壁面方向への移動傾向に対する界面活性剤の影響」であり、まず界面活性剤溶液を用いた気泡流に関して、ppm オーダーの界面活性剤の添加によって、チャンネル

内上昇気泡流における局所ボイド率分布が壁面ピーク型から一様分散型へと劇的に変化することを示している。この現象のメカニズムを説明するため、静止流体中における単一気泡の実験によりマランゴニ効果による気泡への影響を定量的に評価し、さらに層流場における単一気泡実験により気泡に働く力を求めることで、気泡の壁面方向への移動傾向を決定するせん断に起因する揚力に対する界面活性剤の影響に関する詳細を解析している。さらに、マランゴニ効果の強度を端的に表し、かつ計測が容易な抗力によって、揚力係数や気泡流の状態がスケーリングし得ることを示している。局所ボイド率分布はマクロスケールの気泡流構造を特徴付ける重要なパラメータであるが、それが界面活性剤によるマランゴニ効果というミクロな現象から個々の気泡に働く揚力というメゾスケールの現象を通じて決定される素過程を明らかにしている点は意義深い成果である。最後に、局所ボイド率が壁面ピーク型となる際に生じる壁面近傍に集積した気泡群によるクラスタ化現象について調べ、気泡群が壁面近傍において壁面に押し付けられる力によって幾何学的な拘束条件を受け、2次元面内で運動することが重要であることを示している。

第4章は「レーザードップラー流速計による気泡流の計測」であり、計測対象として局所ボイド率分布が「壁面ピーク型」の場合と「一様分散型」の場合を設定し、両者の比較を行っている。壁面ピーク型の場合、チャンネル中央部の広い領域において平均速度分布の平坦化、変動速度分布（主流方向、壁面垂直方向）の減少と平坦化、レイノルズ応力の著しい減少を確認している。一方、一様分散型の場合、平均流速分布とレイノルズ応力分布には単相乱流との比較において変化がなく、変動速度分布が全領域において増加することを示している。以上の結果から、壁面ピーク型では単相乱流とは全く異なり、壁面近傍に集積した気泡群の乱れの遮蔽効果によりチャンネル中央部における乱れの生産は気泡運動に起因するものが支配的になるが、一方で、一様分散型の場合には、単相流の乱流構造が維持されつつ、さらに気泡運動による乱れた加えられた流動構造となることを明らかにしている。つまり、局所ボイド率分布の相違が気泡混入による乱流変調に多大な影響を与えることを実験的に示した結果である。

第5章は「結論」であり、大域的な乱流構造に対して、界面活性剤や個々の気泡に働く揚力といった気泡流中における微視的な現象の詳細について得られた知見がまとめられている。

先に述べたような背景から、現状の気泡流研究においては、異なるスケール間における流体力学的な相互作用をしっかりと捉えられる、より深い物理現象の理解が求められている。本論文は、気泡流現象のキープポイントとなる力学を的確に抑え、個々の現象の解析に留まることなく、ミクロスケールの現象からマクロスケールの現象に至るまでの一連のプロセスを丁寧に解析した点が大きく評価できる。また、本論文での、水中における汚れが単一気泡のみならず大規模な気泡流構造にも大きく影響するという結論は、実際の気泡流の工業応用に対して重要な意味を持つ。特に、乱流制御を目的とした気泡流利用に際しては、導入気泡径や気相流量と共に水中の界面活性剤を制御することによって大きな効果が期待され、工学的に価値の高い知見である。

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。