

京都大学	博士（工 学）	氏名	焦 利 芳
論文題目	A STUDY ON MICROBUBBLE FLOW BEHAVIORS IN SURFACTANT VISCOELASTIC FLUID FLOW （表面活性剤粘弾性流中のマイクロバブル流動挙動に関する研究）		
（論文内容の要旨） 本論文は、エネルギーの有効利用のための高効率流体輸送に関する基礎的研究である．具体的には表面活性剤粘弾性流とマイクロバブル流を組み合わせた抵抗低減機構の研究に関するものであり、8章から構成されている． 第1章では本研究に至る背景を要領よく纏め、従来の抵抗低減機構に関する研究、特に表面活性剤やポリマー添加による抵抗低減、マイクロバブル導入による抵抗低減、それらの原因である表面活性剤・粘弾性流体の物性研究や粘弾性流の気泡特性などの研究に関するレビューを行い、粘弾性流抵抗低減効果とマイクロバブル流抵抗低減効果を組み合わせた抵抗低減シナジー効果の可能性についての課題を整理し、本研究の目的や内容について記述している． 第2章では粘弾性流中での縮流ノズルとキャビテーションノズルを用いたマイクロバブル発生特性に関して検討しており、粘弾性流体中で約30～50ミクロン程度のマイクロバブルを約4％程度の高ボイド率まで発生させることに成功している． 第3章では粘弾性流体中の気泡除去方法とその物理機構について検討している．一般に粘弾性流体中に発生したマイクロバブルは極めて脱泡が難しいが、超音波照射によって高速にマイクロバブルを除去することに成功するとともに、脱泡機構について理論的に検討し、超音波照射によって生ずる定在波に伴う局所的な圧力勾配に起因する気泡凝集効果と、同じく超音波照射によって生じるマクロバブルの振動に伴う2次放射圧力波による Bjerknes 力に起因する気泡凝集効果によるマイクロバブル・クラスターの発生がその原因であることを明らかにしている． 第4章では、粘弾性流体の熱物性について検討している．特に、低せん断速度場における低濃度の粘弾性流体（界面活性剤 CTAC/NaSal）の粘性について、濃度や温度を変化させた実験を行い、濃度を高くすると粘性が増加、すなわちミセル構造の実効長さが長くなること、並びに温度を高くすると粘性が低下、すなわちミセル構造の実効長さが短くなることを明らかにしている．さらに、大きなせん断速度を与えた場合に粘性が大きく低下し、せん断速度を減ずると粘性が上昇する、所謂 Shear-thinning 効果のあることを確認するとともに、初期の静止状態からせん断速度を増加させた場合にヒステリシスが存在することも示している．また、低せん断速度の場合、粘性の周期的振動が発生することを見出し、その機構がミセル構造の伸張収縮運動に関連していることを明らかにしている． 第5章では、粘弾性流中の単一気泡の上昇挙動について検討している．通常の水の場合、上昇気泡は一定の終端速度を示すが、粘弾性流中では気泡上昇速度は顕著な減速を示すこと、この減速効果は溶液濃度、温度、NaSal イオン濃度に強く依存することを明らかにしている．また、マイクロバブルでは、前章で明らかとなった気泡の周期的な振動は観察されなかったことも報告している．			

京都大学	博士（工 学）	氏名	焦 利 芳
第6章では、表面活性剤粘弾性流中の複数気泡間相互作用と気泡クラスター形成について検討している。可視化観察の結果、表面活性剤の存在が気泡同士の合一を阻害し、気泡に半固体球のような挙動をさせる効果を持つことを確認するとともに、気泡上昇速度の測定からCTAC溶液中でのDKT(Dance, Kissing and Tumbling)挙動はエネルギー散逸機構となっていることを明らかにしている。さらに、表面活性剤粘弾性流中の気泡は、周囲をミセル構造に取り囲まれているため、先行上昇気泡の後流に気泡が追従し、安定した鎖状連結気泡クラスターを形成しながら上昇することを見出している。つまり、ミセル構造が気泡の揺らぎを安定化させていることを明らかにしている。また、安定的な上昇中に気泡クラスターが突然分離したり、加速したりする現象を見出し、その発現機構についてミセル構造とせん断速度の関連を考察し、気泡周囲のミセル構造の変化がこれらの現象の主原因であることを述べている。 第7章では、マイクロバブル流と表面活性剤粘弾性流の抵抗低減シナジー効果の可能性について検討している。まず、マイクロバブルを混入しない場合について、表面活性剤粘弾性流体のミセル構造が壁面近傍のヘアピン渦構造を抑制することによる極めて大きな抵抗低減効果を示すことを確認している。これに対し、表面活性剤流中に生成したマイクロバブル流の場合には、抵抗低減効果は殆ど見られなかった。これは、純粋な水の場合には良く知られている微小気泡の壁面集中が、表面活性剤によって阻害されていることに起因していると推論している。気泡の存在は、低ボイド率の場合においては、壁面近傍のミセル構造と表面活性剤粘弾性流の抵抗低減効果を阻害すること、高ボイド率の場合には、長鎖状気泡クラスターが形成されて壁近傍での乱流構造を変調していることを明らかにしている。 第8章では、本研究で得られた主な結果と新たに見出した現象とその発現機構について総括するとともに、工学上の応用に向けた今後の展望や課題について言及している。特に、本研究で着目したマイクロバブル流による抵抗低減と表面活性剤粘弾性流による抵抗低減のシナジー効果に関する知見は初めて得られたもので、表面活性剤粘弾性流体特有のミセル構造と、この流体中での特有なマイクロバブル挙動の果たす役割を明確に示した点は、大きな新規性と独創性を有している。さらに、研究途中で見出された多くの新たな現象とその解釈は、今後の表面活性剤粘弾性流体混相流の工学利用に向けて先鞭をつけた基礎研究として学術的に大きな意義が認められる。			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、高効率流体輸送に関する基礎的研究であり、表面活性剤粘弾性流中でのマイクロバブル発生とその除去方法の開発、ミセル構造の性質の把握と表面活性剤のマイクロバブル挙動への影響に関する検討を行い、表面活性剤粘弾性流とマイクロバブル流の組み合わせによる抵抗低減シナジー効果に関する研究を纏めたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 表面活性剤粘弾性流中において約30～50ミクロン程度のマイクロバブルを効率良く発生させる方法を開発し、従来に比べて1桁程度高いボイド率を達成した。
2. 表面活性剤粘弾性流中のマイクロバブルに超音波を照射することにより、迅速な脱泡が可能であることを実証するとともに、脱泡過程の特異な気泡凝集現象を理論的に明らかにした。
3. 粘弾性流体の熱物性について、既往の Shear-thinning 効果を確認するとともに、静止状態からせん断速度を増加させた場合には粘性ヒステリシスが存在すること、および低せん断速度の場合には粘性の周期的振動が発生することを見出し、その機構がミセル構造の伸張収縮運動に関連することを指摘した。
4. 粘弾性流中の単一気泡の上昇挙動について検討し、気泡上昇速度が顕著な減速を示し、この減速効果が溶液濃度、温度、NaSal イオン濃度に強く依存することを明らかにした。
5. 表面活性剤粘弾性流中の複数気泡間相互作用と気泡クラスター形成について検討し、表面活性剤の存在が気泡同士の合一を阻害し、気泡に半固体球のような挙動をさせる効果を有することを確認するとともに、気泡上昇速度の測定から CTAC 溶液中での DKT(Dance, Kissing and Tumbling)挙動はエネルギー散逸機構となっていることを明らかにした。
6. 表面活性剤粘弾性流中では、気泡周囲をミセル構造が取り囲んでいるため、先行上昇気泡の後流に気泡が追従し、安定した長鎖状連結気泡クラスターを形成しながら上昇する現象を見出し、ミセル構造が気泡の揺らぎを安定化させることを明らかにした。また、安定に上昇中の気泡クラスターが突然に分離・加速する現象を見出し、その発現機構がミセル構造変化によることを明らかにした。
7. 表面活性剤粘弾性流の場合、ミセル構造が壁面近傍のヘアピン渦構造を抑制し、極めて大きな乱流抵抗低減効果を示すことを確認するとともに、気泡の存在は、低ボイド率の場合では壁面近傍のミセル構造と表面活性剤粘弾性流の抵抗低減効果を阻害すること、また高ボイド率の場合では長鎖状気泡クラスターが形成されて壁近傍での乱流構造を変調していることを明らかにした。

以上のように、表面活性剤粘弾性流体の流動特性およびマイクロバブル流とのシナジー効果に関する新たな知見が得られたことは、学術上、実用上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成25年2月22日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行い、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。