

審査の結果の要旨

氏名 松崎 玄伸

本論文は、「集束超音波場中におけるシェル構造を有するマイクロバブルの挙動に関する研究」と題し、直径 $5\mu\text{m}$ 以下の医療用マイクロバブルにより構成されるマイクロバブルクラウドの超音波照射下における振る舞いに関して、実験および数値計算により解析を行っている。直径 $5\mu\text{m}$ 以下のマイクロバブルは、超音波血管造影剤としてすでに臨床応用されている。近年、このマイクロバブルを改良し、ドラッグデリバリーシステムへ利用することも考えられている。このような医療用マイクロバブルでは、気泡を生体内で長時間安定に存在させるために、気泡表面に脂質分子などのコーティングを施しており、シェル付きマイクロバブルとしてモデリングされる。本研究では、このシェル付きマイクロバブルに関して、マイクロバブルクラウドの挙動を調べることにより、シェル無しの中水気泡に関する従来の理論との比較を通して、シェルの影響について議論を行っている。特に、実験では計測の難しい $5\mu\text{m}$ 以下の単一気泡の体積振動に関する実験を実施するのではなく、比較的計測が容易な気泡クラウドの振る舞いを調べることにより、個々の気泡のシェルの影響について知見を得ることを目指している。

本論文は、全 6 章から構成されている。

第 1 章「序論」では、マイクロバブルに関する従来の研究および気泡運動のモデリングについて説明している。第 2 章「単一気泡および 2 気泡の理論」では、本研究で用いている理論の背景となる従来の理論について説明を行っている。特に複数気泡の取り扱いおよびシェル付き気泡モデルについて詳細な説明を行っている。第 3 章「気泡クラウドの理論」では、多重極展開の概念に基づき、体積振動する気泡群の運動を記述する方程式に関して、シェル付き気泡としての定式化を行っている。第 4 章「気泡クラウドの形成実験」では、集束超音波を用いた実験系において、焦点近傍に捕捉されるマイクロバブルクラウドに着目し、超音波の周波数と捕捉されるマイクロバブルクラウドの最大サイズの関係についてデータを取得している。得られた結果は、従来の自由界面気泡の理論において、気泡クラウドの共振周波数と関連づけて議論することができ、定性的な振る舞いとして従来の理論と本実験の結果が良好に一致するのが示されている。その一方で、定量的には違いが見られ、個々の気泡の固有振動数とクラウド全体の固有振動数の比と、個々の気泡の直径とクラウド全体の直径の比のスケール関係は、そのべき指数の値は良好な一致を示したが、係数の値に大きな差があることが議論されており、シェルの存在および気泡クラウド内の

気泡体積（ボイド率）の影響である可能性が指摘されている。第 5 章「気泡クラウドの数値計算」では、第 3 章で導出した気泡クラウドの方程式を用いて、数値計算により振動圧力場における振る舞いを調べている。得られた結果より、シェルの効果のみで、第 4 章で得られた実験と理論の違いを説明することができず、また、ボイド率の影響を考慮に入れても、不十分であることが議論されている。さらに、気泡の並進運動を考慮することにより、超音波照射時間が長くなると、気泡が中心に集まり、クラウド径の減少とボイド率の増加をもたらすことを示した。結果として、並進運動を考慮しない場合と比較すると、初期クラウド径がより大きい条件においてもマイクロバブルクラウドの捕捉が可能であることを示した。気泡径分布やクラウド内の気泡の位置の偏りなどの効果も含めた解析が今後必要となることが述べられている。第 7 章は、「結論」と題し、本論文で得られた結論をまとめている。

以上、本研究では、医療用のシェル付きマイクロバブルの気泡クラウドに対して、集束超音波の照射実験および多重極展開をもとにした数値シミュレーションを実施し、気泡表面のシェルおよび気泡クラウド内の気泡体積率が及ぼす影響について議論している。得られた成果は、今後、ドラッグデリバリーシステムなど超音波造影剤以外の用途で医療用マイクロバブルを利用して行く上で、重要となる基礎的な知見を与え、その医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。