

審査の結果の要旨

論文提出者氏名： 吉澤 晋

本論文は、超音波医療で用いられる微小気泡造影剤、および強力集束超音波（HIFU: High Intensity Focused Ultrasound）によって生じる音響キャビテーションの挙動を数値解析によって明らかにし、超音波治療の発展に寄与できる知見を得ることを目的としている。

現在、超音波治療は、患部を非侵襲かつ選択的に治療ができる手法として注目を集めており、様々な分野において研究・開発が進められている。超音波治療においては、強力な超音波を集束させるために音響キャビテーションが生じる。この音響キャビテーションは、治療の精度および効率に大きく影響するものの、その挙動は複雑で制御することが困難であるとされている。さらに、そのような医療用超音波によって生成するキャビテーション気泡は、大きさが μm オーダ、もしくはそれ以下のサイズの微小気泡であり、観測も困難となっている。また、超音波診断の分野においては、 μm オーダ、もしくはそれ以下のサイズの微小気泡を造影剤として用いる造影超音波が注目されている。さらに、その微小気泡造影剤を治療にも応用しようという研究も盛んに行われてきている。したがって、現在の超音波医療においては、このような微小気泡および微小気泡群の挙動を明らかにすることが求められている。

本論文は、「超音波音場における気泡および気泡クラウドの挙動」と題し、全6章からなる。

第1章は「序論」であり、前述の研究の背景と目的について述べている。

第2章は「球形気泡モデル」であり、単一気泡の解析に用いたモデル、およびそのモデルの検証について述べている。解析に用いた単一球形気泡モデルは、研究目的に沿った、精度の高い詳細な既存のモデルを組み合わせることによって構築されている。そのモデルの検証には、既存の直接数値計算と比較することによって行っている。その結果、直接数値計算結果の気泡半径の時間履歴を、より低い計算負荷で精度良く再現することに成功している。また、本論文において重要となる気泡界面での物質・熱輸送についても、同様に直接数値計算結果を精度良く再現できている。

第3章は「気泡の非線形振動」であり、超音波医療での様々な場面を想定して、気泡の非線形音響特性、気泡の成長、気泡振動によって発生するエネルギー、気泡を覆うシェルの影響、について調べている。気泡の非線形音響特性については、連続的に超音波を照射したとき、短パルス照射したときの結果を示し、既存の造影超音波手法の有効性について考察している。また、気泡のカオス的な挙動も扱っている。気泡の成長については、rectified diffusion を計算し、様々な超音波波形による rectified diffusion の効果

の違いについて考察している。特に、2種類の異なる周波数を重畳した波形について様々な計算を行い、2周波数を重畳した波形の有効性について考察している。気泡振動によって発生するエネルギーについては、気泡中のガスの熱的物性値に注目し、それが発生するエネルギーにどのような影響を与えるかについて考察している。

第4章は「球形気泡クラウドモデル」であり、多数の気泡からなる気泡クラウド中の圧力波伝播を解析するために採用した、気泡流の平均化方程式を用いるモデルについて述べている。

第5章は「気泡クラウドの非線形崩壊挙動」であり、気泡クラウド中の圧力波伝播について様々な周波数領域で解析している。気泡クラウドの崩壊がその内部に生じた衝撃波の集束に因ること、その衝撃波は圧力振幅の増大に伴って固有振動数から低周波数帯域へ容易に拡大することなどを明らかにしている。また、気泡クラウド周囲の液の圧力変動波形について、正弦波による波形とHIFUの焦点波形とを比較しており、気泡クラウドの崩壊には負圧からの圧力回復の時間が重要であることを明らかにしている。さらに、気泡クラウドにおける個々の気泡に関するモデルの影響について考察を行っている。

第6章は「結論」であり、以上の考察によって明らかになった、超音波音場における気泡および気泡群の挙動についてまとめている。

先に述べたような背景から、詳細な気泡モデルを用いて、超音波音場における気泡および気泡群の非線形挙動を明らかにすることの意義は大きい。さらに、実際の超音波医療の場面を想定した数値計算結果から物理的な解釈までを考察しており、非常に優れた論文となっている。

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。