

## 審査の結果の要旨

氏名 加藤光章

本論文では、強力集束超音波(High Intensity Focused Ultrasound; HIFU)に対して、圧縮性ナビエ・ストークス(Navier Stokes; NS)方程式を適用し、「高次の非線形性」「吸収の多次元性」「時間平均化の妥当性」に注目した解析を行い、非線形性、吸収・減衰、音響流・温度上昇の発生機構を明らかにすることを目的としている。

HIFU 治療法中の、体内の超音波伝播過程においては、非線形性による波形の歪みや吸収・減衰などの複数の現象が存在する。また、超音波伝播と、その連続的な照射により発生する音響流・温度上昇は、時間スケールを大きく異とする。これまでに、以上の問題を克服する上で、多くの数値解析法が開発されている。しかし、従来手法では近似流体方程式を用いるため、非線形性、吸収・減衰や幾何的条件等に制限を持つ。そこで本研究では、近似を用いない圧縮性 NS 方程式を支配方程式に適用し、非線形性、吸収・減衰、音響流・温度上昇に着目した解析を行い、その発生機構を明らかにする。本論文は「集束超音波における非線形現象の解析」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 HIFU 治療法の数値解析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「計算手法」であり、音場の時間スケールの現象、音響流・温度上昇の時間スケールの現象それぞれについて、支配方程式、及び、数値解析手法を述べている。まず、本研究で用いた支配方程式である、圧縮性 NS 方程式を示し、移流項に適用した Weighted-ENO 法、拡散項に適用した二次精度中心差分、時間発展に適用した三次精度 TVD ルンゲクッタ法、流出境界に適用した PML 法、及び、振動子に適用した境界条件について述べている。次に、音響流・温度上昇の解析のために用いた時間平均化手法について述べ、圧縮性 NS 方程式から導出した時間平均化式・及び時間平均化値を示している。

第 3 章は「音波の時間スケールの現象」であり、超音波伝播過程の現象について述べている。まず、集束超音波場のメカニズムとして、音場形成に深く関わる非線形性・回折波の性質について述べ、次に、一次元平面波の解析結果から、本解析手法を用いた場合の、音波伝播、及び吸収・減衰を捕獲するために必要な格子解像度について述べている。次に、低圧力振幅における線形方程式との比較から、本解析手法が回折波について、高い再現性を有することを示している。次に、高圧力振幅における本解析手法と実験との比較から、HIFU で表れる強い非線形性に関しても、非常に良く再現できることを示している。次に、

高圧力振幅における圧縮性 NS 方程式と、速度微小として導いた非線形近似式との比較から、HIFU において発生する非線形性は、状態方程式の非線形性のみで支配される事を明らかにしている。さらに、集束超音波場において、吸収係数内部のずり粘性・体積粘性を変更した場合に、温度上昇の分布に大きな変化が生じる事を示し、その要因が粘性発熱項内部の伸縮に関する項にあることを明らかにしている。

第 4 章は「音響流・温度上昇の時間スケールの現象」であり、長時間の超音波照射によって表れる音響流・温度上昇の発生要因を調べるため、第 2 章で示した全エネルギー、内部エネルギー、運動エネルギーの時間平均値について議論している。まず、時間平均した計算結果と、線形解との比較を行い、本計算手法を用いることで、音響流の発生や温度の上昇に対する、粘性摩擦仕事や圧力勾配による仕事の影響を評価できることを確認している。また、エネルギー収支における各項の空間分布から、温度上昇・音響流速が最大値を取る位置の差異を説明できることを示している。

第 5 章は「結論」であり、本研究で得られた結果を総括している。

先に述べたような背景から、HIFU 治療における集束超音波場について、圧縮性 NS 方程式を用いた解析によって、「高次の非線形性」「吸収の多次元性」「時間平均化の妥当性」に関する知見を明らかにしたことの意義は大きい。特に、非近似の支配方程式を用いて、音場の高い再現性を示し、高次の非線形性、吸収・減衰の発生機構に関する知見を得たという点で非常に優れた論文である。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。