

超音波によるがん治療を高速シミュレーションできる数理モデルを開発

切開手術に代わるがん治療法として、集束超音波が用いられるようになってきました。この方法では、体外から超音波を腫瘍に集束させながら照射し、正常な細胞を傷つけることなく、腫瘍のみをピンポイントで加熱除去させることができます。近年、腫瘍付近に微小な気泡（マイクロバブル）を注入し、超音波の加熱作用を劇的に向上させる方法が注目されていますが、安全かつ効果的に治療を行うためには、体内の温度分布を事前にシミュレーションすることが欠かせません。

従来のシミュレーションでは、多くの方程式を用いて、超音波の伝播とマイクロバブルによる影響をそれぞれ解く方法が主流でした。しかし、複雑な人体組織を表すために空間多次元での計算が必要な上、マイクロバブルの膨張・収縮運動を扱うことから計算が複雑化するため、計算時間が極めて膨大になるという問題点があります。治療法や治療効果を素早く提示するためにも、シミュレーションの高速化は重要です。

本研究では、超音波の伝播と、マイクロバブルの膨張・収縮運動による影響を、1本の方程式だけで表す新たな数理モデルの開発に成功しました。このモデルを用いてがん治療を想定したシミュレーションを実施したところ、患部の温度上昇がピンポイントで示されただけでなく、マイクロバブル内の気体の種類を変更すると、温度上昇を約10度も向上できることが分かりました。本研究結果により、超音波によるがん治療の効果を最大限に発揮するための、最適な治療条件の提示が可能になると期待されます。

研究代表者

筑波大学システム情報系

金川 哲也 助教

研究の背景

集束超音波（HIFU: High Intensity Focused Ultrasound）によるがん治療は、切開手術に代わる低侵襲的な治療法として用いられるようになってきました（図 1）。体組織の細胞は一定温度で加熱し続けると壊死するという性質を利用し、体外から超音波を腫瘍に照射し、正常な細胞を損傷させることなく、腫瘍のみをピンポイントで加熱除去させることができます。

さらに近年、腫瘍付近に微小な気泡（マイクロバブル）を注入すると、超音波の加熱作用を劇的に向上できることが注目されています。超音波を照射すると、気泡内部の気体と外部の体組織の密度差により、気泡が激しく膨張・収縮運動します。この運動のエネルギーが減衰することで、熱が発生します。このような作用を利用すれば、超音波を吸収する脂肪や、超音波を反射する骨の奥に存在する腫瘍に対しても、十分な熱を与えることが可能になります。

マイクロバブルを安全かつ効果的に利用するためには、気泡の大きさ・量・内部気体の種類を最適に設定する必要があり、そのために、さまざまな条件下でのシミュレーションが行われます。その計算手法として、従来は、約 10 本もの方程式を解く方法や、超音波の伝播を表す方程式とマイクロバブルの膨張・収縮運動を表す方程式をそれぞれ解く手法が主流でした。しかし、これらの方程式はいずれも複雑で、シミュレーションモデルの構築は容易ではなく、さらに、複雑な人体組織を反映するためには、空間多次元での計算が必要となり、計算に膨大な時間がかかるという課題がありました。治療法や治療効果を素早く提示するためにも、シミュレーションの高速化は重要です。

研究内容と成果

本研究では、がん治療の高速シミュレーションのための数理モデルとして、約 10 本もの複雑な方程式をただ一つの方程式に集約し、これによってマイクロバブルの膨張・収縮運動とそれに伴う熱的效果の影響を表現することに成功しました。この方程式は、複雑な人体組織を反映できるよう、空間多次元での計算に対応しています。従来の超音波とマイクロバブルの式をそれぞれ独立に解く手法では、計算に数日かかることもあるのに比べて、本方程式では、空間多次元であっても半日程度と、高速でシミュレーションを行うことが可能となります。

得られた方程式を用いて、がん治療を想定したシミュレーションを実際に行ったところ、超音波の焦点付近におけるピンポイントな温度上昇が確認されました（図 2）。また、マイクロバブル内の気体の種類による温度上昇の違いも求めることができ、例えば、空気よりもアルゴンの方が、10 度程度高温に達することが分かりました。

今後の展開

本研究で開発した方程式では、マイクロバブルの膨張・収縮運動に伴う熱的效果の影響のうち、気泡内部の熱伝導の影響の導入には成功しましたが、気泡内部における相変化などの物理現象を考慮できていません。また、頭蓋骨越しのがん治療を想定すると、骨などにおける超音波の反射を扱う数理モデルも重要となります。これらを含め、今後、より実用的な数理モデルの開発を進める予定です。

将来的には、本手法の利点である高速でのシミュレーションを生かし、さまざまな条件下でのシミュレーションを実施し、がん治療の最適条件を導くための具体的な指針の確立を目指します。

また、集束超音波は、がん治療の他、美容分野でも用いられており、この方程式の幅広い展開が期待されます。

参考図

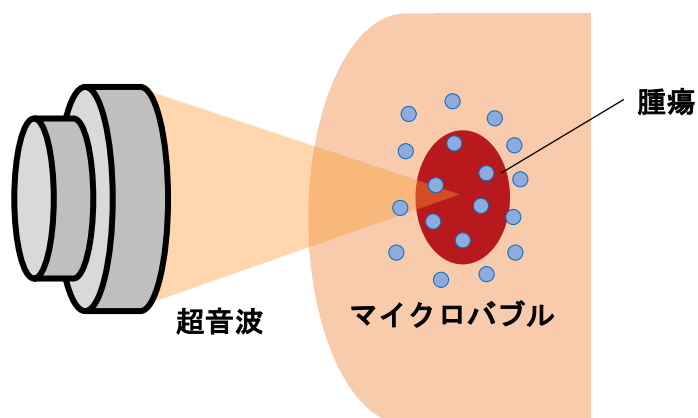


図1 超音波によるがん治療の概念図

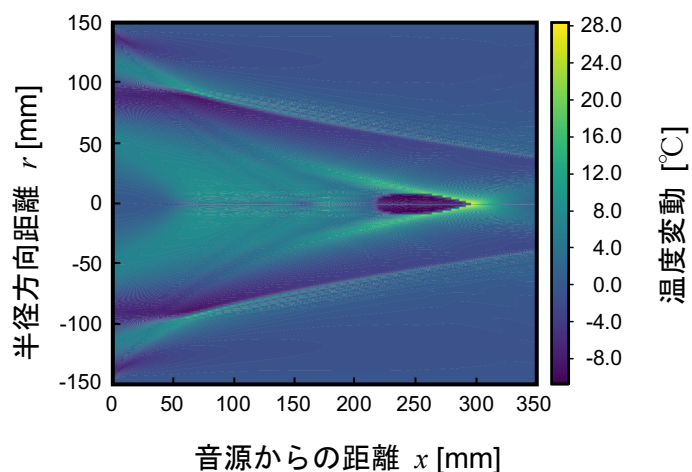


図2 超音波照射による温度変化のシミュレーション結果

マイクロバブル内気体としてアルゴンを使用した場合のシミュレーション結果。超音波の焦点付近の点 ($x=300\text{mm}$ 、 $r=0\text{mm}$) において、約 28.1 度まで温度が上昇した。

研究資金

本研究の一部は、科研費およびカシオ科学振興財団の助成を得て実施されました。

掲載論文

- 【題名】 Weakly nonlinear propagation of focused ultrasound in bubbly liquids with a thermal effect: Derivation of two cases of Khokolov–Zabolotskaya–Kuznetsov equations
(気泡を含む媒質中における集束超音波を表現する 2 種類の非線形発展方程式の構築)
- 【著者名】 Shunsuke Kagami and Tetsuya Kanagawa
- 【掲載誌】 Ultrasonics Sonochemistry
- 【掲載日】 2022 年 7 月 7 日
- 【DOI】 10.1016/j.ultsonch.2022.105911

問合わせ先

【研究に関すること】

金川 哲也（かながわ てつや）

筑波大学システム情報系 助教

URL: <https://kanagawa.kz.tsukuba.ac.jp>

【取材・報道に関すること】

筑波大学広報室

TEL: 029-853-2040

E-mail: kohositu@un.tsukuba.ac.jp