



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	超音波生体作用研究用照射容器の内部音場の可視化と制御に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	相川, 武司
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第15216号
Issue Date	2022-09-26
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/87192
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Takeshi_Aikawa_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (情報科学) 氏名 相川 武司

審査担当者 主査 准教授 工藤 信樹
副査 教授 渡邊 日出海
副査 教授 平田 拓
副査 教授 橋本 守

学位論文題名

超音波生体作用研究用照射容器の内部音場の可視化と制御に関する研究
(Studies on visualization and control of ultrasound fields inside exposure chambers used for
evaluation of ultrasound-related biological effects)

診断や治療で広く利用されている超音波の分野では、強度や圧力をはじめとする種々の照射量と生体作用を関連づける研究が古くから行われている。安全な超音波診断の実現には、生体に作用を与えない超音波出力の上限値を、確実な超音波治療の実現には生体に作用を与える下限値を、様々な機序毎に明らかにする必要がある。

低強度超音波の生体作用を明らかにする基礎実験として、シャーレ内の培養細胞に超音波を照射しその作用を調べる実験が広く行われているが、実験の再現性が低いという問題がある。これは、超音波が音響インピーダンスの境界で容易に反射・屈折することでシャーレ内に複雑な定在波音場が生じ、細胞が受ける照射量が空間的に変化するためと考えられている。しかし、小型容器内に生じる複雑な音場の計測は技術的に困難であり、十分な検討は行われていない。

また、高強度超音波を用いた治療に関する基礎実験では、主要な作用機序であるキャビテーションの発生閾値を調べる実験が行われているが、報告されている閾値には大きなばらつきがある。これは、キャビテーションの発生閾値が定在波音場内で低下することに起因する。その影響を調べるには音場を十分に把握する必要があるが、ハイドロホン自体が壊れるような高強度超音波の音場計測は難しい。キャビテーションには、発生した気泡が膨張、収縮することで周囲に激しい機械的作用をもたらすことと、断熱収縮時に生じるフリーラジカルが音響化学的作用をもたらすことの2つの主要な生体作用機序があることが知られている。

そこで本研究では、超音波の生体作用研究に用いられる2つの標準的な超音波照射条件、すなわちシャーレ内に低強度超音波を照射する条件と水面に向けて高強度超音波を照射する条件において、照射環境による超音波音場の変化をフォーカストシャドウグラフ法を用いて明らかにし、生体作用の発生機序の理解を深めることを目的としている。

第一に、低強度超音波を用いる実験において、小型容器内で反射・伝導する超音波と水面の波立ちで反射する超音波が内部音場に与える影響を可視化により明らかにし、これらの全てが定在波の発生要因となることをはじめ指摘した。従来より知られている水面での反射波に加え、壁内を伝搬する超音波の容器内への漏れ出し、容器による開口制限が生じる回折波の容器側壁での反射が容器内に定在波音場を発生させること、水面に生じる波立ちの内部に音圧の高い集束点が生じることが確認された。さらに、これらの影響を受けない超音波照射容器を新たに提案し、均一性の高い内部音場

が形成できることを音場可視化により実証した。

第二に、水面に向けて照射した高強度超音波の音響放射圧により生じる水面盛り上がり内部音場の可視化にはじめて成功し、盛り上がりが高くなるとともに、その内部に生じる定在波のパターンが線状から格子状に集束し、ピーク音圧が増強されることを明らかにした。また、有限要素法を用いた音圧分布シミュレーションを行い、シャドウグラフ法により可視化された定在波音場のパターンや変化の傾向が音圧分布をよく反映していることを確認した。特に、高音圧条件下で盛り上がりの水面直下に音圧の集束点群が発生することを見いだしたことは、気液界面での作用発生にキャビテーションが重要な役割を果たすことを示している。

最後に、超音波による生体作用の重要な発生機序であるキャビテーションをフリーラジカルの産生で定量し、フリーラジカルの発生、霧化の発生、水面盛り上がりから水柱への水面形状の移行の超音波強度閾値が全て一致することを示した。この結果は、これら全ての現象の発生機序にキャビテーションが深く関わっていることを示しており、水面形状の変化によるキャビテーション発生閾値の見かけ上の変化が重要な意義を持つことを示している。

これを要するに、本論文では、超音波の生体作用研究に用いられる超音波照射容器内で超音波の反射・屈折により生じる不均一な音場をフォーカストシャドウグラフ法によりはじめて明らかにし、音場を乱す要因を制御することで音場の均一性を向上する照射法を新たに提案した。また、水面の盛り上がり内部に生じる格子状の定在波音場をはじめて可視化し、水面形状の変化によるキャビテーション発生強度閾値の見かけ上の低下が、生体作用の発生閾値を決定する重要な要因となることを示した。これらの知見は、超音波の生体作用研究の促進に向けて貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(情報科学)の学位を授与される資格あるものと認める。