

令和 2 年 7 月 14 日現在

機関番号：82305

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14597

研究課題名（和文）光音響トモグラフィのための光音響特性解析モデルの構築

研究課題名（英文）Study on theoretical model of the photoacoustic effect for development of the photoacoustic tomography

研究代表者

川原 潤也（Kawahara, Junya）

群馬県立産業技術センター・その他部局等・主任

研究者番号：30792444

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、光音響トモグラフィの理論的基盤の整備を目的としており、光音響効果に関する高精度な解析モデルの構築を目指すものである。本研究では、音響散乱体として振る舞う複数の気泡が存在する媒質中における光音響波の伝播を理論・数値的に解析した。本解析により、音響散乱体として存在する気泡が音響波の伝播挙動に与える影響を明らかにした。また、この解析結果を踏まえて、光吸収体及び気泡が存在する媒質中における光音響波の伝播を記述する数値モデルを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光音響効果を利用した生体の可視化技術に関する数値シミュレーションは数多く行われている。しかし、それらの解析に使用される数値モデルにおいては、その妥当性に関する検証が十分でないため、数値解析による定量評価の信頼性が高いとは言い難いのが現状である。これに対して、本研究では、光音響波の伝播を高精度に記述する数値モデルを構築し、その伝播挙動を明らかにするなど、光音響効果に関する解析の信頼性の向上に資する成果が得られている。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to propose an advanced theoretical model of the photoacoustic effect for development of the photoacoustic tomography. We theoretically and numerically examined photoacoustic wave propagation in a medium containing multiple bubbles, in which these bubbles generate acoustic scattering. The present study reveals the influence of acoustic scattering generated by bubbles on acoustic wave propagation. Based on this result, we formulated the theoretical model of photoacoustic wave propagation in a medium containing optical absorbers and bubbles.

研究分野：流体工学

キーワード：光音響 音響波 生体イメージング 音響 混相流

1. 研究開始当初の背景

(1) 医療現場において、患者の身体に影響が少ない超音波を利用して生体内部をイメージングする超音波造影技術の普及が進んでいる。超音波造影技術においては、イメージングされる生体画像の解像度が低いことが技術的課題となっており、解像度の向上に向けた研究が数多く行われている (e.g., 森安, 飯島, *映像情報メディカル*, 2006)。近年では、光の照射によって細胞が生じる音響波 (以後、光音響波と呼ぶ) を観測することで、生体画像の解像度が飛躍的に向上することが報告されている (e.g., Wang & Hu, *Science*, 2012)。光音響波の観測によるイメージング技術は、光音響トモグラフィとして知られている。光音響トモグラフィでは、生体表面にパルスレーザー光を照射し、光の照射に起因する細胞の熱膨張によって生じる光音響波を生体表面で観察する (e.g., 佐藤, 小原, *光学*, 2009; 石原, *光学*, 2012)。ここで観測された光音響波の波形を逆解析することで、生体内部のイメージングが可能となる。このとき、逆解析に使用する解析モデルの信頼性がイメージングの精度に直結するため、生体組織の光音響特性値 (吸収係数、散乱係数等) を高精度に推定できる解析モデルを構築することが切望されている。

(2) 光音響トモグラフィによって生体内部の構造を定量評価するためには、生体表面で観測される光音響波の波形から生体組織の光音響特性値を推定する逆解析が不可欠である。このため、光の伝播を記述する輻射輸送方程式と光音響波の伝播を記述する光音響波動方程式 (e.g., Wang & Wu, *Biomed. Opt.: Principles and Imaging*, 2007) を連成した数値シミュレーションが行われている。しかし、従来の研究では、光音響効果に関する解析において重要な要素となる光と音響波の相互作用が簡略的なモデルによって扱われており、そのモデルの妥当性の検証も十分ではないため、逆解析による定量評価の信頼性が高いとは言い難いのが現状である。また、生体組織においては、単相媒質とは異なり、光吸収体や音響散乱体等が分散して存在するため、それらが光音響波の伝播に与える影響を高精度に解析できる数理モデルを構築することも大きな課題となっている。そこで、本研究では、吸収体や散乱体が存在する媒質中における光音響波の伝播を高精度に記述する数理モデルの構築のための理論・数値解析を実施する。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、媒質中に分散して存在する吸収体や散乱体が光音響波の伝播に与える影響を明らかにすることを目的とした理論・数値解析を実施する。ここでは、音響散乱体として気泡を想定し、気泡が分散して存在する媒質中における音響波の伝播を解析する。

(2) 吸収体や散乱体が分散して存在する媒質中における光音響波の伝播を記述するための数学モデルを構築する。ここでは、輻射輸送方程式と気泡力学に基づく音響解析モデルを組み合わせた連成解析モデルの提案を行う。

3. 研究の方法

(1) 複数の気泡が分散して存在する媒質中における音響波の伝播を理論・数値解析する。気泡の振動の解析には、気泡間相互作用を考慮した気泡の運動方程式を用いる。音響波の伝播挙動を体系的に調査するため、数値解析は、音響波の振幅や周波数等の条件ごとに実施する。また、音響波の伝播に関する理論解析を実施することで、音響散乱体としての気泡の存在が音響波の位相や伝播速度に与える影響を明らかにする。

(2) 吸収体や散乱体が存在する媒質中における光音響波の伝播を理論解析する。本解析では、複数の気泡が存在する媒質中を光音響波が伝播することで、気泡の振動が誘起され、その振動によって生じる圧力場が光音響波に影響を与える問題を想定する。本解析により、気泡の体積変化による影響を考慮した光音響波動方程式を構築する。

4. 研究成果

(1) 音響散乱体が存在する媒質中を伝播する光音響波の解析モデルの構築に向けた基礎的検討として、液体中に分散する気泡と音響波の干渉に関する解析を実施した。本解析では、音響散乱体として初期静止状態にある複数の球形気泡を想定しており、それらの気泡の振動が音響波によって誘起される問題を数値解析した。本解析では、相互作用しながら振動する多数の球形気泡の運動方程式を用いており、気泡の振動によって生じる圧力場が音響波の位相に与える影響を調べた。解析結果から、媒質中に離散的に存在する複数の気泡が、その周囲に連続的な音響特性を作り出すメカニズムを解明した。

(2) 光音響波が伝播する媒質中に存在する複数の気泡の膨張・収縮を記述する数学モデルを構築した。本モデルでは、相互作用する複数の球形気泡の振動が、光音響波によって生じる圧力変動によって誘起される問題を想定している。このため、本モデルにおける圧力の関係式では、気泡間の相互作用による圧力変動項のみならず、光音響波による圧力変動項が付加される。

(3) 光吸収体や音響散乱としての気泡が存在する媒質中における光音響波の伝播を記述する数

学モデルを構築した。本モデルにおける熱膨張方程式では、気泡の体積変化を考慮する。このため、本モデルにおける光音響波動方程式では、気泡の体積変化に関する項が付加される。

(4) 音響散乱体として存在する気泡が、音響波の伝播に与える影響を理論解析し、音響波の伝播速度に関する新しい数理モデルを構築した。代表者が過去に提案した数理モデル (Kawahara *et al.*, *Mech. Eng. Lett.*, 2015) は、気泡間相互作用を考慮した解析には適用できなかった。これに対して、本研究では、気泡間相互作用を考慮した解析においても適用できる新しい数理モデルを構築した。このため、本解析で構築した数理モデルは、従来のモデルと比較して、より高いポイド率で適用可能な伝播速度のモデルとなっている。

(5) 本研究により構築した光音響波に関する数理モデルの検証のため、音響散乱体としての気泡が存在する媒質中における音響波の伝播の数値解析を行った。本解析では、媒質中において生じる音響波の伝播挙動について、音響波の振幅や周波数等の条件ごとに解析した。また、気泡径が媒質中の任意の位置の圧力変動に与える影響について解析した。さらに、数値解析によって得られた伝播速度と数理モデルの比較を行い、両者がよい一致を示すことを明らかにした。

(6) 国内外問わず、光音響効果を利用した生体イメージング技術に関する数値シミュレーションは数多く行われている。しかし、それらの解析に使用される数理モデルの妥当性の検証は十分でないため、数値解析による定量評価の信頼性が高いとは言い難いのが現状である。これに対して、本研究では、吸収体や散乱体が分散して存在する媒質中の光音響波の伝播を高精度に記述する数理モデルを構築した。また、光音響波の伝播挙動に関する数値的な検証を実施した。これらの成果は、光音響効果に関する解析の信頼性の向上に資するものである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Junya Kawahara, Masao Watanabe, Kazumichi Kobayashi
2. 発表標題 Reduction in the Propagation Speed of Linear Pressure Wave in a Square Duct Filled with a Compressible Liquid Containing Multiple Spherical Bubbles
3. 学会等名 71st Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川原潤也, 渡部正夫, 小林一道
2. 発表標題 複数の球形気泡を配置した矩形管内の音響特性に関する理論的研究
3. 学会等名 キャピテーションに関するシンポジウム (第19回)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川原潤也, 渡部正夫, 小林一道
2. 発表標題 圧縮性液体で満たされた矩形管内の球形気泡の振動が生じる音速の低下に関する解析
3. 学会等名 日本流体力学会年会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川原潤也, 渡部正夫, 小林一道
2. 発表標題 多数の球形気泡を配置した矩形管内における圧力波の位相速度の低下に関する理論的研究
3. 学会等名 日本流体力学会年会2017
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

researchmap
<https://researchmap.jp/junyakawahara/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	渡部 正夫 (Watanabe Masao)		
研究協力者	藤井 宏之 (Fujii Hiroyuki)		