

令和 2 年 5 月 28 日現在

機関番号：32612

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H04905

研究課題名（和文）粘弾性体キャビテーションの静的・動的力学特性を解像するプリセット型計測法の開発

研究課題名（英文）Experiment and Plesset-type analysis of cavitation bubble dynamics in viscoelastic materials

研究代表者

安藤 景太（Ando, Keita）

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・准教授

研究者番号：30639018

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 18,200,000 円

研究成果の概要（和文）：粘弾性体におけるキャビテーション気泡の静的・動的力学特性を定量評価するための、実験・プリセット型球形気泡力学モデル連成による粘弾性計測法を開発した。パルスレーザー集束照射により生成した粘弾性ゼラチンゲル中の球形ガス気泡核のサイズを、溶存ガスの物質移動に基づき準静的に制御した。生成した気泡核を起点とするキャビテーション気泡の自由振動および超音波照射下の強制振動を高速度カメラで撮影し、気泡の動的応答に対する気泡核サイズの影響を実験的に取得した。気泡の静的・動的力学応答とプリセット型モデルの比較により、ゲル粘弾性の周波数応答を超広域に算定した上で、気泡の非線形力学における粘弾性効果の定量評価を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で提案した超音波気泡の体積振動の可視化と気泡力学モデルの連成に基づく気泡周囲媒質の粘弾性特性の取得手法により、商用レオメータの計測限界（100 Hz程度）を大幅に超える高ひずみ速度下での粘弾性計測が可能となった。医療分野では、非侵襲の治療法として超音波が用いられており、高ひずみ速度下における粘弾性特性の取得は医療応用上も極めて重要と言える。

研究成果の概要（英文）：A measurement technique in combination with theory and simulation was developed, which enables one to quantify statics and dynamics of cavitation bubbles in viscoelastic solids. Micron-sized bubble nuclei were produced by focusing laser pulses into a gelatin gel under dissolved-gas supersaturation and their size was controlled based on mass diffusion. Statics of these nuclei and ultrasound-induced dynamics of spherical cavitation bubbles were obtained from a series of visualization experiments with varying the nucleus size. Effects of viscoelasticity on nonlinear dynamics of spherical bubbles in the gel can be quantified, with comparison to nonlinear bubble dynamics model of Plesset type.

研究分野：熱流体工学

キーワード：キャビテーション 気泡核 物質移動 気泡力学 超音波 粘弾性体

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

液相圧力の低下に伴う発泡現象であるキャビテーションは、ポンプ性能低下の主要因であることから流体力学分野では最重要課題の一つとして長らく研究されてきた。一方、近年ではキャビテーションの積極活用として、メスを使わない低侵襲性の超音波治療法の開発が医療分野で進展している。高音圧の MHz 帯超音波を照射した患部の近傍では音響キャビテーション気泡が発生し、音響エネルギーから力学・熱エネルギーへの効率的変換が発現することにより、(腎臓結石の破碎、腫瘍の加熱凝固などの)治療の効率化が実現される。キャビテーションの有する力学・熱力学的治療効果を定量評価するためには、キャビテーション気泡の力学に対する粘弾性効果の定式化が必須と言える。

音響キャビテーションは通常、マイクロ径のガス気泡核を起点に発生する。キャビテーション気泡核は、人体組織すなわち粘弾性媒質中にランダムに存在するため、その位置やサイズを予め制御することは困難である。音響キャビテーション気泡の力学に対する粘弾性効果を定量評価するためには、気泡核の位置およびサイズを制御する実験手法が不可欠と言える。代表研究者は、若手研究(A)採択課題(平成25年度～平成28年度)において、粘弾性媒質であるゼラチンゲルにパルスレーザーを集束照射するとにより球形ガス気泡を生成し、物質拡散による準静的成長に基づき気泡核サイズを制御する手法を構築した。本研究課題では、超音波照射下の気泡の動力学に着目し、粘弾性体中気泡の周波数応答を広域に評価することを目指した。粘弾性体におけるキャビテーション気泡の静的・動的力学計測法の構築は、医療分野にとどまらず、非ニュートン流体力学の分野開拓として最重要課題と位置付けた。

2. 研究の目的

粘弾性体におけるキャビテーション気泡の静的・動的力学特性を定量評価するための、実験・プリセット型気泡力学モデル連成による粘弾性計測法の開発を行う。パルスレーザー集束照射により生成した粘弾性ゼラチンゲル中の球形ガス気泡核のサイズを、溶存ガスの物質移動を利用し準静的に制御する。生成した気泡核を起点とするキャビテーション気泡の自由振動および超音波照射下の強制振動を高速カメラで撮影し、気泡の動的応答に対する気泡核サイズの影響を特定する。気泡の静的・動的力学応答とプリセット型モデルの比較により、ゲル粘弾性の周波数応答を超広域に算定し、キャビテーション気泡の力学に対する粘弾性効果の定量評価を実現する。

3. 研究の方法

(1) ガス気泡核の静的成長に基づく静的条件下のゲル弾性の取得

冷却凝固したゼラチンゲルを室温に戻し、ガス過飽和状態を生成する。レーザー誘起プラズマを利用しガス過飽和ゲル中に球形ガス気泡核を生成する。物質拡散による気泡核の成長を CCD カメラで撮影する。弾性体中気泡の準静的成長を記述する拡張エプスタイン・プリセットの式との比較により、ゲル弾性、および気泡核生成による予ひずみ量を算定する。

(2) 28 kHz 超音波照射下の球形気泡の体積振動の可視化に基づく粘弾性効果の定量評価

周波数 28 kHz の超音波洗浄槽内に、球形ガス気泡を含むゲル試料を設置する。気泡の強制振動を、高速カメラで撮影する。気泡振動に伴う放射音響波を、超音波用ハイドロフォンで測定する。物質拡散を介して気泡核のサイズを制御することにより、各周波数に対する微小振幅・有限振幅振動の周波数応答を特定する。線形振動の周波数応答を、線形粘弾性体気泡に対する拡張レイリー・プリセットの式の線形解と比較することにより、ゲル粘弾性を算定する。プリセット型解析を適用し、高ひずみ速度下におけるゲル粘弾性の周波数特性を評価する。気泡の有限振幅振動の時間履歴を、非線形粘弾性体中気泡に対する拡張レイリー・プリセットの式の数値解と比較し、使用ゲルの粘弾性特性を適切にモデル化する構成式を選定する。

4. 研究成果

(1) レーザー誘起ガス気泡核のエプスタイン・プリセット解析

ゼラチン濃度をパラメータとする実験から、ゼラチン濃度の増加、すなわちゲル弾性の増大により、ガス過飽和下の物質拡散に基づく気泡の成長速度が阻害されることが確認された。この傾向は、線形弾性を考慮した拡張エプスタイン・プリセットの式に基づくシミュレーション結果とも一致した。さらに、エプスタイン・プリセット解析から、ゼラチンの質量濃度が 5% よりも低い場合、パルスレーザー照射により生成される気泡核の予ひずみの影響は限定的であることが示唆された。

(2) 超音波気泡のレイリー・プリセット解析

低音圧超音波照射下のゲル中気泡の微小振幅振動を、粘弾性を考慮した拡張レイリー・プリセットの式の線形解と比較することにより、ゲルの粘性係数・弾性係数の取得が可能となった。高音圧超音波を用いた実験では、球形気泡の非線形体積振動の振幅に対する応答曲線に軟化バネの特徴が発現した。この特徴は、ゲルの非線形弾性を neo-Hookean モデルに基づき考慮することで、レイリー・プリセット型の運動方程式でも再現できることが確認された。加えて、さらに高音圧の超音波音圧を用いた実験を行うと、非球形の形状振動モードが発現し、体積振動の振幅が低減することがわかり、形状振動による減衰機構をレイリー・プリセット解析に組み込むことが工学上重要となることが示唆された。(弾性のない)水中気泡では現れない 1 次モード形状振動

がゲル中気泡の場合には生じると理論では指摘されていたが、それを実験的に示したことも特筆すべき点である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 R. Oguri and K. Ando	4. 巻 30
2. 論文標題 Cavitation bubble nucleation induced by shock-bubble interaction in a gelatin gel	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 051904-1~6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5026713	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Ando and E. Shirota	4. 巻 31
2. 論文標題 Quasistatic growth of bubbles in a gelatin gel under dissolved-gas supersaturation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 111701-1~4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5128887	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 K. Ando and R. Oguri
2. 発表標題 Cavitation inception induced by interaction between a laser-induced shock and a gas bubble in a gelatin gel
3. 学会等名 19th International Symposium on the Application of Laser and Imaging Techniques to Fluid Mechanics（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Yamakawa, K. Murakami, E. Johnsen, and K. Ando
2. 発表標題 Ultrasound-induced nonlinear oscillation of a spherical bubble in gels of different gelatin concentrations
3. 学会等名 71st Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics, American Physical Society（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 安藤景太, 小栗良太
2. 発表標題 ゼラチンゲル中の衝撃波とマイクロバブルの干渉により誘起されるキャピテーション初生の可視化
3. 学会等名 可視化情報学会 第46回可視化情報シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山川雄士, 安藤景太
2. 発表標題 28 kHz超音波照射下のゼラチンゲルにおける単一ガス気泡の非球形振動
3. 学会等名 日本機械学会 第96期流体工学部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Ando and E. Shiota
2. 発表標題 Epstein-Plesset-type analysis of quasistatic growth of bubbles in gas-supersaturated gelatin gels
3. 学会等名 3rd International Symposium on Multiscale Multiphase Process Engineering (MMPE 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山川雄士, 安藤景太
2. 発表標題 超音波照射下のゼラチンゲルにおける単一球形ガス気泡の非線形振動
3. 学会等名 混相流シンポジウム2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 N. Nakamura and K. Ando
2. 発表標題 Effects of nonlinear elasticity on the Rayleigh collapse of bubbles in elastic media
3. 学会等名 9th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (TFE9) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 N. Nakamura and K. Ando
2. 発表標題 Experiment and analysis of shock waves radiated from pulse laser focusing in a gelatin gel
3. 学会等名 70th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics, American Physical Society (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究室ホームページ http://www.kando.mech.keio.ac.jp
--

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