

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：32612

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2016

課題番号：25709008

研究課題名(和文)粘弾性体キャビテーションの時空間多重スケール解析を実現する非侵襲ハイブリッド計測

研究課題名(英文) Noninvasive measurement and multiple-scale analysis of cavitation bubbles in viscoelastic materials

研究代表者

安藤 景太 (Ando, Keita)

慶應義塾大学・理工学部・講師

研究者番号：30639018

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,100,000円

研究成果の概要(和文)：粘弾性体キャビテーションにおける多重スケール現象の解明を目的とした、実験・数値シミュレーション連成の非侵襲ハイブリッド計測法の開発を行った。ゼラチンゲルに対するパルスレーザーの集束照射によりマイクロ径の気泡核を生成し、溶存ガスの物質移動に基づき気泡核のサイズを制御した。生成した気泡核を起点とする単一キャビテーション気泡のマイクロ観察から、ゲル粘弾性の定量評価を行った。さらに、ゲル中のレーザー誘起衝撃波と単一気泡との干渉により生じる負圧を利用したキャビテーション気泡群のマクロ観察を行った。圧縮性流体シミュレーションより構築した圧力場と実験観察の直接比較から、キャビテーション初生圧力を算定した。

研究成果の概要(英文)：An experimental technique in combination with numerical simulation was developed, which allows one to study multiple-scale characteristics in the dynamics of cavitation bubbles in viscoelastic materials. Micron-sized bubble nuclei were produced by focusing infrared laser pulses into gelatin gels and their size was precisely controlled through mass transfer of dissolved gases; the gel viscoelasticity was measured from microscopic observation of individual cavitation bubbles arising from these nuclei and its comparison to Rayleigh-Plesset-type calculation. Furthermore, a cloud of cavitation bubbles arising from shock-microbubble interaction in gelatin gels was visualized as macroscopic observation. The threshold pressure of the cloud cavitation inception was inferred from comparison of the experiment to compressible fluid flow simulation.

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 レーザー誘起衝撃波 粘弾性体

1. 研究開始当初の背景

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機械分野では最重要課題の一つとして古くから研究されてきた。近年では、医療応用としてキャビテーションを積極的に活用した非侵襲的治療法の開発が進められている。工学的観点からは、生体内におけるキャビテーション気泡(群)の力学に関する基礎的理解が不可欠である。研究代表者は、キャビテーションの実験および理論・数値シミュレーションに関する研究にこれまで携わり、主に水におけるキャビテーション現象の物理解明に貢献してきた。一方、医療応用で対象となる人体組織は粘弾性体であり、人体組織内のキャビテーション現象の定量評価には粘弾性効果の定式化が必須と言える。

本研究では、粘弾性体におけるキャビテーションの単一気泡および気泡群の力学に関する解析手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

粘弾性体キャビテーションにおける多重スケール現象の解明を目的とした、実験・数値シミュレーション連成の非侵襲ハイブリッド計測法の開発を行う。ゼラチンゲル中の集束パルスレーザー誘起現象を用いたキャビテーション気泡(群)の実験観察と圧縮性流体シミュレーションを連成させることで、実流動場にプローブを挿入しない理想的な非侵襲計測法を提案する。提案した計測法に基づき、以下に示すマイクロおよびマクロ観察に基づく解析を行う。

- (1) ゼラチンゲルに対するパルスレーザーの集束照射によりマイクロ径の気泡核を生成し、溶存ガスの物質移動に基づき気泡核のサイズを制御する。生成した気泡核を起点とする単一キャビテーション気泡のマイクロ観察から、ゲル粘弾性の定量評価を行う。
- (2) ゼラチンゲル中のレーザー誘起衝撃波と単一気泡との干渉により生じる負圧を利用したキャビテーション気泡群のマクロ観察を行う。圧縮性流体シミュレーションより構築した圧力場と実験観察の直接比較から、キャビテーション初生圧力を算定する。

3. 研究の方法

- (1) 単一キャビテーション気泡のマイクロ解析
粘弾性体試料として、ゼラチンゲルを用いた。ゼラチン水溶液(ゼラチンの質量濃度 3%~10%程度)冷蔵庫内で一晩冷却し、ゲルを生成した。冷却後、室内に放置し、ゲル温度を室温に戻した。溶存ガス(空気)の物質拡散は、熱拡散と比較し緩やかであるため、熱平衡に到達した時点では、ゼラチンゲルはガス過飽和状態にある。ガス過飽和ゲル中に、赤外線(1064 nm)のナノ秒レーザーパルスを集束照射し、ガス気泡核の初生を促した。

初生した気泡の平衡半径は、過飽和溶存ガスの流入により増大する。気泡の体積振動と比較し、物質拡散による気泡半径の変化は非常に緩やかである。すなわち、物質拡散を介して、力学的平衡時における気泡半径を調節することが可能と言える。

ゼラチンゲル試料に、周波数 28 kHz の微小音圧超音波を照射することで、微小振幅の球形気泡(平衡半径 50 μm -150 μm)の振動を駆動した。その様子を、LED 照明を光源に、高速度カメラにより撮影した。取得した画像から気泡の面積等価半径 R を計算した。実験から取得した気泡振動の平衡半径応答を、粘弾性を考慮した球形気泡力学を記述するレイリー・プリセット型モデルの線形解と比較することにより、高ひずみ速度下(28 kHz)のゲル粘弾性を算定した。

(2) キャビテーション気泡群のマクロ解析

レーザー誘起現象を用いたキャビテーション気泡群の初生を可視化するための光学系(Nd:YAG レーザー、倒立顕微鏡、CCD カメラ)を構築した。Nd:YAG レーザーからは波長 532 nm (緑色)、1064 nm (赤外線)の 2 種類のパルス(パルス幅: 6 ns)が同時に射出される。赤外線パルス(エネルギー: 1 mJ 程度)をゼラチンゲルに集束照射することによりプラズマが発生する。そのプラズマが急激に断熱膨張することで球形衝撃波が生成し、その背後に局所加熱による球形気泡が現れる。上述のレーザー誘起現象を、緑色パルスを光源として CCD カメラで 1 回の実験操作につき 1 枚の画像を取得するストロボ撮影を行った。緑色パルスの光路長を光ファイバーにより変化させ、ストロボのタイミングをナノ秒スケールで調節した。

ゼラチン質量濃度 10%のゲル中に予め生成した球形ガス気泡(研究の方法(1))の近傍に、赤外線パルスの集束照射により球形衝撃波を生成した。衝撃波と気泡界面との干渉により生じる負圧下で発生するキャビテーション気泡群の初生を、上述のストロボ撮影法に基づき可視化し、初生確率を取得した。非粘性オイラーの式に基づく圧縮性流体シミュレーションから構築した圧力場と実験観察の直接比較から、キャビテーション初生圧力を算定した。

4. 研究成果

(1) 高ひずみ速度下におけるゲルの粘弾性

レイリー・プリセット型気泡力学モデルに基づく気泡振動の解析により、商用レオメータで計測可能なひずみ速度の上限(100 Hz 程度)を大幅に超える高ひずみ速度下のゲル粘弾性の取得を可能にした。医療応用で用いられる超音波の周波数帯域は MHz であり、本提案手法による高ひずみ速度下の粘弾性体組織の力学特性評価は有用と言える。

(2) 初生圧力に対するゲル粘弾性の影響

実験と数値シミュレーションの連成による非侵襲圧力計測から、ゼラチンゲルのキャ

ビテーション初生圧力は約20 MPa と算定された。この初生圧力は水と同程度であり、キャビテーション初生に対する粘弾性の効果は限定的であることが示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計9件)

- ① 安藤景太, 超音波キャビテーション気泡の力学の基礎と応用, 学術の動向, Vol. 22, No. 3, pp. 32-37 (2017) 【査読無】
- ② T. Kondo, K. Ando, One-way-coupling simulation of cavitation accompanied by high-speed droplet impact, *Physics of Fluids* **28**, 033303 (2016) 【査読有】
- ③ R. Oguri, K. Ando, Cloud cavitation induced by shock-bubble interaction in a viscoelastic solid, *Journal of Physics: Conference Series* **656**, 012032 (2015) 【査読有】
- ④ E. Shirota, K. Ando, Estimation of mechanical properties of gelatin using a microbubble under acoustic radiation force, *Journal of Physics: Conference Series* **656**, 012001 (2015) 【査読有】
- ⑤ F. Hamaguchi, K. Ando, Linear oscillation of gas bubbles in a viscoelastic material under ultrasound irradiation, *Physics of Fluids* **27**, 113103 (2015) 【査読有】
- ⑥ Z.G. Li, S. Xiong, L.K. Chin, K. Ando, J.B. Zhang, A.Q. Liu, Water's tensile strength measured using an optofluidic chip, *Lab on a Chip* **15**, 2158-2161 (2015) 【査読有】
- ⑦ S. Xiong, L.K. Chin, K. Ando, T. Tandiono, A.Q. Liu, C.D. Ohl, Droplet generation via a single bubble transformation in a nanofluidic channel, *Lab on a Chip* **15**, 1451-1457 (2015) 【査読有】
- ⑧ O. Vincent, P. Marmottant, S.R. Gonzalez-Avila, K. Ando, C.D. Ohl, The fast dynamics of cavitation bubbles within water confined in elastic solids, *Soft Matter* **10**, 1455-1461 (2014) 【査読有】
- ⑨ P.A. Quinto-Su, K. Ando, Nucleating bubble clouds with a pair of laser-induced shocks and bubbles, *Journal of Fluid Mechanics* **733**, R3 (2013) 【査読有】

〔学会発表〕(計30件)

- ① R. Oguri, K. Ando, Cavitation induced by shock-microbubble interaction in a viscoelastic material, International Symposium on Micro-Nano Science and Technology, Japan Society of Mechanical Engineers, 2016年12月16日~12月18日, Tokyo (Japan)
- ② 安藤景太, 中村信之, ゼラチンゲルにおけるレーザー誘起ガス気泡の成長および崩

壊, キャビテーションに関するシンポジウム(第18回), 2016年12月8日~12月9日, 九州大学医学部・百年講堂(福岡県・福岡市)

- ③ E. Shirota, K. Ando, Diffusion-driven growth of a spherical gas bubble in gelatin gels supersaturated with air, 69th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics, American Physical Society, 2016年11月20日~11月22日, Portland (USA)
- ④ K. Ando, N. Nakamura, Growth and collapse of laser-induced bubbles in gas-supersaturated gelatin gels, 69th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics, American Physical Society, 2016年11月20日~11月22日, Portland (USA)
- ⑤ 城田恵理子, 安藤景太, ガス過飽和ゼラチンゲルにおける球形気泡の準静的成長, 日本機械学会・第94期流体工学部門講演会, 2016年11月12日~11月13日, 山口大学・常盤キャンパス(山口県・宇部市)
- ⑥ 小栗良太, 安藤景太, 衝撃波と気泡の干渉によるゼラチンゲルのキャビテーション初生, 日本機械学会・第94期流体工学部門講演会, 2016年11月12日~11月13日, 山口大学・常盤キャンパス(山口県・宇部市)
- ⑦ 安藤景太, 超音波照射下の粘弾性体における球形気泡の力学に関する理論および実験, 第25回ソノケミストリー討論会(招待講演), 2016年10月21日~10月22日, 富山大学・五福キャンパス(富山県・富山市)
- ⑧ 安藤景太, 物質拡散による気泡核のサイズ制御と超音波キャビテーションの可視化, 日本機械学会・RC270: 流れの知的制御とそれを実現するための先進計測法に関する研究分科会(招待講演), 2016年8月29日~8月30日, 北海道大学・札幌キャンパス(北海道・札幌市)
- ⑨ 中村信之, 安藤景太, 粘弾性体中のキャビテーション気泡とガス気泡の干渉に関する実験, 混相流シンポジウム, 2016年8月8日~8月10日, 同志社大学・今出川キャンパス(京都府・京都市)
- ⑩ 安藤景太, 浜口文弥, 粘弾性体における球形ガス気泡の線形振動に関する実験, 混相流シンポジウム, 2016年8月8日~8月10日, 同志社大学・今出川キャンパス(京都府・京都市)
- ⑪ 安藤景太, 超音波照射下の粘弾性体における気泡力学の基礎とその医療応用, 第2回理論応用力学シンポジウム(招待講演), 2016年3月8日, 日本学術会議講堂(東京都・港区)
- ⑫ R. Oguri, K. Ando, Cloud cavitation induced by shock-bubble interaction in a viscoelastic solid, 9th International

- Symposium on Cavitation, 2015年12月6日～12月10日, Lausanne (Switzerland)
- ⑬ E. Shirota, K. Ando, Estimation of mechanical properties of gelatin using a microbubble under acoustic radiation force, 2015年12月6日～12月10日, Lausanne (Switzerland)
- ⑭ T. Nakajima, K. Ando, Experimental technique for observing free oscillation of a spherical bubble in highly viscous liquids. 68th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics, American Physical Society, 2015年11月22日～11月24日, Boston (USA)
- ⑮ 近藤智貴, 安藤景太, 高速液滴衝突に付随したキャビテーションに関する One-way-coupling 解析, 日本機械学会・第93期流体力学部門講演会, 2015年11月7日～11月8日, 東京理科大学・葛飾キャンパス (東京都・葛飾区)
- ⑯ 中島剛大, 安藤景太, 高粘性液体中のレーザー誘起ガス気泡の自由振動, 日本機械学会・第93期流体力学部門講演会, 2015年11月7日～11月8日, 東京理科大学・葛飾キャンパス (東京都・葛飾区)
- ⑰ T. Kondo, K. Ando, Numerical study of cavitation and water-hammer erosion caused by high-speed droplet impact, 13th Asian International Conference on Fluid Machinery, 2015年9月7日～9月10日, 早稲田大学・早稲田キャンパス (東京都・新宿区)
- ⑱ 小栗良太, 安藤景太, 粘弾性体中における衝撃波と気泡の干渉に付随するキャビテーション, 混相流シンポジウム, 2015年8月4日～8月6日, 高知工科大学・香美キャンパス (高知県・香美市)
- ⑲ 城田恵理子, 安藤景太, 気泡を用いた音響放射法による粘弾性体の力学特性評価, 混相流シンポジウム, 2015年8月4日～8月6日, 高知工科大学・香美キャンパス (高知県・香美市)
- ⑳ 宮内智史, 安藤景太, 高粘性流体中における球形衝撃波伝播の数値解析, 衝撃波シンポジウム, 2015年3月9日～3月11日, 伊香保温泉 (群馬県・渋川市)
- ㉑ K. Ando, R. Oguri, T. Oda, Cavitation resulting from shock-bubble interaction in viscoelastic media, Meeting of the Institute of Physics Singapore, 2015年3月4日～3月6日, Singapore (Singapore)
- ㉒ K. Ando, E. Shirota, F. Hamaguchi, Translation of a microbubble interacting with megasonic waves in viscoelastic media, Meeting of the Institute of Physics Singapore, 2015年3月4日～3月6日, Singapore (Singapore)
- ㉓ K. Ando, F. Hamaguchi, Linearized dynamics of gas bubbles in gelatin under ultrasound forcing, Meeting of the

- Institute of Physics Singapore, 2015年3月4日～3月6日, Singapore (Singapore)
- ㉔ F. Hamaguchi, K. Ando, Role of viscoelasticity in the dynamics of a collapsing gas bubble in gelatin, 2nd International Symposium on Multiscale Multiphase Process Engineering, 2014年9月24日～9月27日, Hamburg (Germany)
- ㉕ 浜口文弥, 安藤景太, 粘弾性体中の物質拡散による気泡の成長と収縮, 日本流体力学会年会, 2014年9月15日～9月17日, 東北大学・川内北キャンパス (宮城県・仙台市)
- ㉖ F. Hamaguchi, K. Ando, Effect of viscoelasticity on spherical bubble dynamics under ultrasound irradiation, 17th U.S. National Congress on Theoretical & Applied Mechanics, 2014年6月15日～6月20日, East Lansing (USA)
- ㉗ P.A. Quinto-Su, K. Ando, Bubble cloud nucleation induced by the interaction between multiple laser-induced shocks and bubbles, 66th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics, American Physical Society, 2013年11月24日～11月26日, Pittsburg (USA)
- ㉘ 安藤景太, キャビテーション初生に関する基礎的研究, ターボ機械協会・特別会員交流会, 2013年11月22日, 早稲田大学・西早稲田キャンパス (東京都・新宿区)
- ㉙ 安藤景太, レーザー誘起衝撃波と気泡の干渉による水中キャビテーションの初生, 日本流体力学会年会, 2013年9月12日～9月14日, 東京農工大学・小金井キャンパス (東京都・小金井市)
- ㉚ K. Ando, The inception and collapse of cloud cavitation in shock-structure interaction problems, 8th International Conference on Multiphase Flow, 2013年5月26日～5月31日, Jeju (Korea)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.kando.mech.keio.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安藤 景太 (Ando, Keita)

慶應義塾大学・理工学部・講師

研究者番号: 30639018