

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：82723

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15000

研究課題名（和文）大規模一気泡振動計測による音響キャビテーションダイナミクスの解明

研究課題名（英文）Revealing the dynamics of a bubble in acoustic cavitation

研究代表者

黒山 喬允（Kuroyama, Takanobu）

防衛大学校（総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群）・応用科学群・講師

研究者番号：40781737

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、強力な超音波によって液中に発生する音響キャビテーション気泡の一つ一つが、どのように振動（膨張・収縮）しているかを明らかにすることである。そのために、気泡にレーザービームを照射し生じた散乱光の強度変化から振動を計測する光学系を構築した。また、この光学系を用い超音波ホーン下に生じた気泡の計測を行った。その結果、ホーン近傍に、単一気泡（単独で振動する気泡）と類似した振動を呈する気泡が多く、その数はホーンから離れるにつれて減少することがわかった。また、ホーン近傍のどの領域においても、単一気泡とは異なる振動を呈する気泡の割合が多いことを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では音響キャビテーション中の気泡の一つ一つの振動を計測する手法を確立した。計測結果は機械学習の手法を用いて解析を行うことが容易であり、これまで解析が困難であった気泡振動のばらつきの評価を可能とする。また本手法により得られた計測結果は、化学汚染物質除去等の音響キャビテーションの応用研究を進める上で重要な知見を与えるものである。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to clarify the oscillation of acoustic cavitation bubbles generated in liquid by ultrasound. An optical system for measurement of the bubble oscillation was constructed. This system measures the bubble oscillation from the intensity change of scattered light generated by irradiating a laser beam onto the bubbles. We measured bubbles generated under an ultrasonic horn using the system. The results show that there are bubbles near the horn that exhibit vibrations similar to those of a single bubble, and the number of such bubbles decreases as the distance from the horn increases. It is also found that at all positions in the vicinity of the horn, a large percentage of the bubbles oscillate differently from single bubble.

研究分野：強力超音波

キーワード：音響キャビテーション 気泡ダイナミクス レーザ散乱 超音波ホーン

## 1. 研究開始当初の背景

音響キャビテーションとは超音波による負圧によって液体中に気泡が生じる現象である。生じた気泡は超音波による圧力変動に伴い膨張収縮を繰り返す。生じた気泡の一部は、その最収縮時に内部の温度が 5,000 K 以上に達する。このような他の手法では達成困難な高温環境と、これに伴う化学的作用が得られるため、音響キャビテーションは化学汚染物質除去、ナノマテリアル製造などへの様々な応用が試みられている。応用においては、内部温度が高温となる気泡を高い割合で発生させる必要がある。気泡内部の最高温度は気泡の振動態様によって変化するため、この振動と超音波入射条件等の関係を明らかにすることが応用研究を推進する上で重要である。しかし、微小な気泡が超音波の周波数で振動しながらランダムに移動する音響キャビテーションにおいて、気泡振動を実験的に解析することは容易ではなく、個々の気泡振動の詳細、また気泡間での振動態様のばらつきは明らかになっていない。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、超音波によって生じ振動する多数の微細な気泡のうち、何個がどのような半径振動を行なっているかを明らかにし、気泡個々の半径振動と音響キャビテーションによる作用の関係を解明することである。そのために、光応用計測とクラスタ解析を用いる新たな気泡振動計測法を実現する。

## 3. 研究の方法

本研究では、まず音響キャビテーション中の一つ一つの気泡の半径振動を計測可能にする新たな光学計測法を確立する。次に、計測条件を変化させながら気泡の計測を行い、音響キャビテーション場中の気泡の振る舞いを明らかにする。

提案手法では、図 1(a)に示すように、水中に生じた気泡にレーザービームを照射し、気泡によって側方に散乱されたレーザをレンズで集光し光検出器で計測する。また同時にイメージセンサにより気泡の画像を取得することができる。側方散乱光の光強度は気泡半径の 2 乗に比例することが知られており、その時間変化から気泡半径の時間変化を知ることができる。また、高倍率のレンズ系によって小さな受光面を持つ光検出器に散乱光が集光するよう光学系を構成することで、レンズ光軸とレーザービーム光軸の交差する点近傍に存在する気泡のみからの散乱光を検出でき、個々の気泡の振動を計測することが可能である。本研究ではこの工学系の設計、構築を行い、その特性評価を行ったのち、条件を変化させながら気泡の計測を行う。

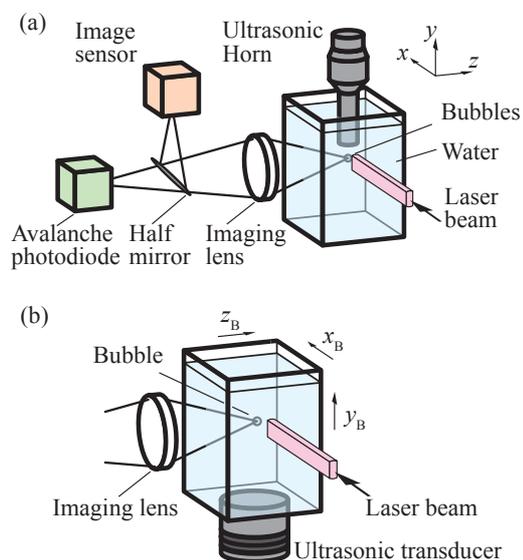


図 1 提案手法の実験系(a)ホーン下に生じた気泡の計測のための構成 (b)単一気泡測定のための構成。

## 4. 研究成果

### (1) 気泡の光学的計測手法の評価

本研究では、まず音響キャビテーション中の気泡個々からのレーザ散乱光を取得し、気泡振動を計測できる光学系を構築した。光学系は上述の通り、図 1(a)のように気泡に照射するレーザービーム、気泡によって生じた散乱光を集光するレンズと光検出器(Avalanche photodiode)およびイメージセンサからなる。気泡に照射するレーザービームは、直径 0.8mm の赤色円形レーザービームをレンズ光軸方向にのみ 100  $\mu\text{m}$  の厚さを持つよう整形され、レンズの物体面(ピントが合う面)を通過する。レンズ系の撮像倍率は 4 倍であり、光検出器の受光面は半径 250  $\mu\text{m}$  のピンホールによって開口制限されている。このため、散乱光は物体面から 50  $\mu\text{m}$  以内の気泡のみから生じ、またレンズで検出される散乱光はレンズ光軸から 62.5  $\mu\text{m}$  以内で生じたもののみとなる。したがって、本光学系では半径 62.5  $\mu\text{m}$ 、高さ 50  $\mu\text{m}$  の円筒状の領域で生じた散乱光のみが検出される。加えて、レンズを通過した光の半分はハーフミラーで反射され、イメージセンサに導かれる。イメージセンサではストロボ光源による透過照明により、気泡の影像と気泡によって生じた散乱光が同時に撮影される。

次に、単一気泡系を用い、構築した光学系の評価を行った。単一気泡系では、図 1(b)に示すように水中の定在波超音波中にただ一つの気泡が生じ、その気泡が一定箇所にとまり球形を保ったまま振動する。このため、気泡を保持する水槽を走査しながら、散乱光を計測することで、構築した光学系を評価することができる。定在波超音波の周波数は 28 kHz、気泡位置における音圧振幅は約 1.3 気圧、超音波非入射時の気泡半径は約 4.5  $\mu\text{m}$  である。

図2に単一気泡系での計測結果を示す。図2(a)は計測した散乱光強度から背景光強度を差し引いて平方根をとり、最大値で正規化したものである。散乱光強度は気泡半径の2乗に比例するため、この図の縦軸は気泡半径に相当する。この気泡半径の変化は、単一気泡振動の実験系においてよく見られるものである。気泡振動の数値解析結果との比較から気泡振動を正しく計測できていると評価した。加えて、同時にイメージセンサで取得した最膨張時の気泡像を図2(b)に示す。球形の気泡像が取得できていること、また矢印で示した箇所のように、赤色レーザーの散乱光が検出されていることがわかる。

図3に単一気泡系の水槽を走査しながら計測した散乱光強度の最大値(気泡最膨張時の散乱光強度)を示す。図3中の $x_B, y_B, z_B$ は図2(b)中に示した向きの水槽および気泡の移動距離を表す。原点( $x_B, y_B, z_B$ ) = (0, 0, 0)はレンズ光軸とレーザービーム光軸との交点に対応する。この図から、気泡が原点から離れるに従って散乱光強度が低下し、どの方向にも概ね100  $\mu\text{m}$ 以上変位すると散乱光強度が検出されなくなることがわかる。これは、気泡がレーザービームと交差せず散乱光が生じなくなること、また生じた散乱光がピンホールを通過せず、光検出器の受光面に到達しなくなるためである。気泡による散乱光の強度が最大値の半分となる領域の幅(半値全幅)は、 $x, y, z$ 軸方向にそれぞれ110, 101, 98 ( $\mu\text{m}$ )となった。この半値全幅の値は、光学系の設計値と概ね等しい。散乱光が検出される領域が、この半値全幅で与えられる長軸半径、短軸半径、高さを持つ楕円柱であると仮定すると、その体積は $0.855 \times 10^{-12} \text{ m}^3$ となる。仮に気泡が数密度(単位体積あたりの気泡数)100  $\text{mm}^{-3}$ で均一に分布しているとする、この領域内に時間平均的に存在する気泡の個数は0.0855個となる。ある瞬間に領域内に気泡が $k$ 個存在する確率は、平均値をこの0.0855とするポアソン分布に従うと考えられる。このとき、領域内に気泡が存在しない確率は0.918、1個存在する確率は0.0784、2個以上存在する確率は0.00345となる。すなわち、気泡が領域内に存在し散乱光が生じる時、その散乱光が気泡1個からのものである確率は、2個以上の気泡によるものである確率より高くなるといえる。以上から、音響キャビテーション中の気泡一つ一つの半径振動を計測可能な光学系を構築できたといえる。

## (2) 超音波ホーン下に生じた気泡の計測

構築した光学系を用い、図1(a)のように超音波ホーン下の気泡を計測した。超音波ホーンは振動振幅が大きく、ホーン先端近傍に高い数密度で気泡が生じ、気泡同士が相互に作用し合うため、単一気泡系とは異なる振る舞いをする気泡が多いことが知られている。実験に用いたホーン出力面の直径は12.7 mmであり、計測に先立ってカロリメトリにより求めた超音波出力が7 Wとなるよう調整した。超音波の周波数は19.8 kHzである。

ホーン中心軸上で、ホーン出力面より2 mm離れた位置における気泡の代表的な計測結果を図4に示す。図4(b)中の波線は気泡による散乱光が光検出器で検出される領域を示している。また、矢印で示した部分で散乱光が撮影されていることがわかる。気泡は多数撮影されているが、そのうち散乱光を生じているのは画像の奥行き方向(レンズ光軸方向)にずれがなくレーザービームと交差しているもののみである。また図4(a)より、単一気泡系の場合と同様に、気泡が膨張収縮している様子が見てとれる。ホーン下には多数の気泡が生じ、また個々の気泡は並進運動しているため、気泡が波線で示した領域を通過する際に間欠的に散乱光が生じる。このため、本手法は生じた気泡をランダムに抽出して計測していることに等しい。

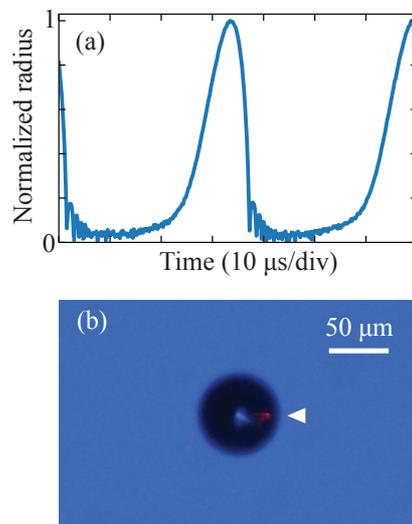


図2 単一気泡系を用いる提案手法の光学系評価(a)散乱光強度から求めた正規化気泡半径 (b)散乱光と同時に取得した気泡像。

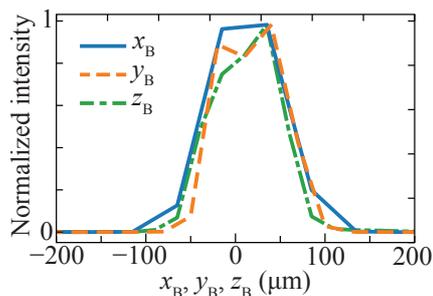


図3 単一気泡を走査して計測した散乱光強度の気泡位置依存性。

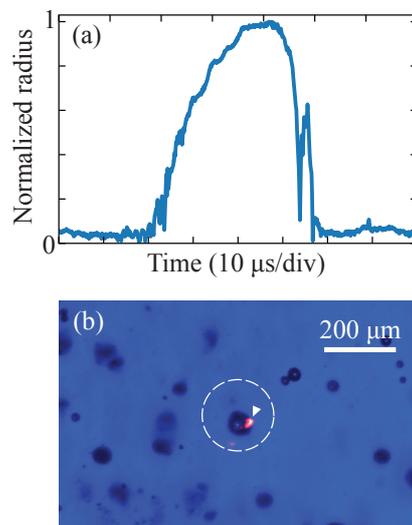


図4 ホーン下の気泡計測結果の代表的な例 (a)散乱光強度から求めた正規化気泡半径 (b)散乱光と同時に取得した気泡像。

超音波ホーン下における気泡振動の位置依存性を調べるために、計測領域をホーン出力面より 2, 3, 4, 5 (mm) と変化させながら、各距離において 1,000 回ずつ散乱光計測と気泡像の撮影を行った。超音波出力は、すべての条件で 7W に調整した。得られた散乱光強度波形を離散フーリエ変換し絶対値を取って得た振幅スペクトルを、教師なし分類(クラスタリング)手法である k 平均法により 5 クラスタに分類した。

クラスタリングの結果を図 5 に示す。図中の各色はホーン出力面から計測領域までの距離に対応している。クラスタ番号は、距離 2 mm の計測結果が分類された数が降順となるよう整理した。この結果から、クラスタ#1 に分類される気泡振動を伴う気泡は、ホーン出力面からの距離が増加するに伴い減少し、逆にクラスタ#3 に分類される気泡は増加することがわかる。クラスタ#1 に分類された気泡の代表的な計測結果を図 6 に示す。図 6(a) より、気泡は 1 周期(約 50  $\mu\text{m}$ )の中で比較的緩やかに膨張し、急激に収縮しており、図 2(a) に示した単一気泡系における結果に類似していることがわかる。また、図 6(b) より、気泡は球形を保っていることがわかる。次にクラスタ#3 に分類された気泡の代表的な計測結果を図 7 に示す。図 7(a) より、気泡の振動は単一気泡系やクラスタ#1 の場合と異なり、1 周期の中で数回の半径ピークを持つことがわかる。これは、図 7(b) に示す通り、気泡が非球形振動する、あるいは複数の気泡が隣接して振動をしているためであると考えられる。クラスタ#1 のように、球形を保ち単一気泡系と同様の振動を呈する気泡は、最収縮時に気泡内部が高温高压となり、化学反応に寄与することが知られている。一方で、クラスタ#3 では気泡は十分に収縮しておらず、気泡内部は高温高压とならず化学反応への寄与は低いものと考えられる。以上から、ホーン下に生じている気泡は、出力面から離れるに従ってその数が減少すると考えられる。また、ホーン近傍においても、クラスタ#3 の様に十分に収縮しない振動を呈する気泡は半数以上であり、超音波ホーン下に生じる気泡の多くが単一気泡系におけるものとは異なる振動を呈するものと考えられる。以上から、超音波ホーン下のように複数の気泡が生じる通常の音響キャビテーションでは気泡振動は気泡ごとにばらつきが大きく、また単一気泡系と異なる振動を呈するものが多いことがわかった。従来、音響キャビテーションの解析には気泡の振動として、その取り扱いやすさから単一気泡系におけるものを仮定することが広く行われてきたが、正確な評価のためには実際の気泡振動を加味する必要があるといえる。

本研究では音響キャビテーション中の個々の気泡の振動を計測可能な光学的手法を確立し、本手法を用いて超音波ホーン下の気泡の計測を行った。その結果、気泡振動態様の分布を明らかにできた。以上により、本研究はその目的を達成できたと言える。

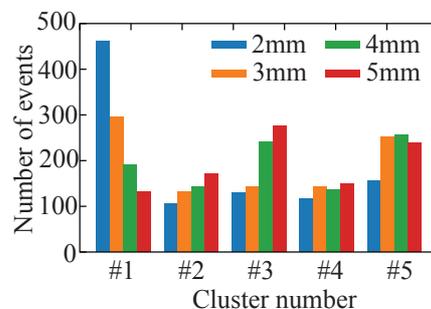


図 5 K-means 法による気泡振動のクラスタリング結果。

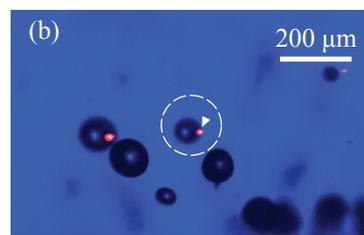
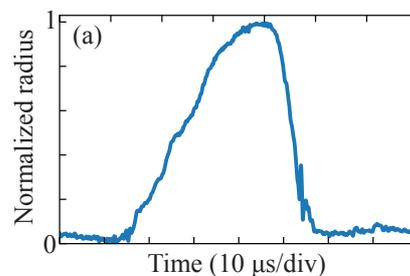


図 6 クラスタ#1 に分類された計測結果の代表的な例 (a)散乱光強度から求めた正規化気泡半径 (b)散乱光と同時に取得した気泡像。

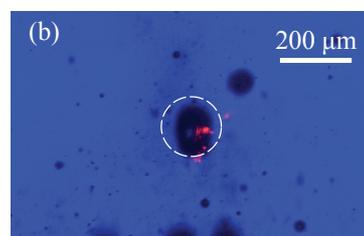
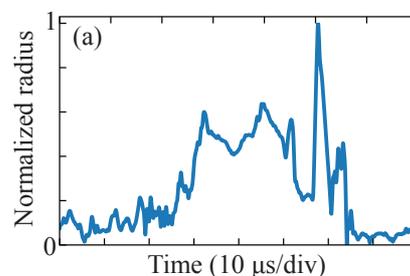


図 7 クラスタ#3 に分類された計測結果の代表的な例 (a)散乱光強度から求めた正規化気泡半径 (b)散乱光と同時に取得した気泡像。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3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 1件）

1. 著者名 黒山 喬允	4. 巻 34
2. 論文標題 超音波ホーン下に生じた音響キャビテーション気泡の振動	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 超音波テクノ	6. 最初と最後の頁 00-00
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 Kuroyama Takanobu	4. 巻 60
2. 論文標題 Number density of bubbles under ultrasonic horn measured from stroboscopic images	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SDDD03
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/abe99c	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 Takanobu Kuroyama	4. 巻 40
2. 論文標題 Spatial distribution measurement of acoustic cavitation bubbles by laser backscattering with confocal optics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Acoustical Science and Technology	6. 最初と最後の頁 279-282
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1250/ast.40.279	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 古田 雄大, 黒山 喬允
2. 発表標題 トップハットビームを用いるレーザ散乱による音響キャビテーション気泡振動の計測
3. 学会等名 日本音響学会2021年秋季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋 亮輔, 黒山 喬允
2. 発表標題 形成直後のシングルバブル半径振動の時間変化
3. 学会等名 日本音響学会2021年秋季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takanobu Kuroyama
2. 発表標題 Initial growth and subsequent unstable oscillation of single bubble
3. 学会等名 The 42nd symposium on ultrasonic electronics
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Fumitaka Yokoyama, Takanobu Kuroyama, Naoto Wakatsuki, Tadashi Ebihara, and Koichi Mizutani
2. 発表標題 Laser diffraction caused by shockwaves from acoustic cavitation bubbles
3. 学会等名 The 42nd symposium on ultrasonic electronics
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takanobu Kuriyama
2. 発表標題 Stroboscopic imaging to determine number density of acoustic cavitation bubbles
3. 学会等名 The 41st symposium on ultrasonic electronics (USE2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takanobu Kuroyama
2. 発表標題 Light scattering observation of oscillation of a bubble in acoustic cavitation cloud
3. 学会等名 23rd International Congress on Acoustics (ICA2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takanobu Kuroyama
2. 発表標題 Classification of radial oscillation characteristics of acoustic cavitation bubbles measured by laser scattering method
3. 学会等名 The 40th symposium on ultrasonic electronics (USE2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Fumitaka Yokoyama and Takanobu Kuroyama
2. 発表標題 Transient characteristics of acoustic cavitation noise after starting ultrasound irradiation
3. 学会等名 The 40th symposium on ultrasonic electronics (USE2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 黒山 喬允
2. 発表標題 超音波ホーン下に生じた音響キャピテーション気泡の分数調波振動
3. 学会等名 日本音響学会 2019年秋季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大野 高史, 黒山 喬允
2. 発表標題 音響キャビテーションノイズと気泡によるレーザー後方散乱波形の比較
3. 学会等名 日本音響学会 2019年秋季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 北川 雅千弥, 黒山 喬允
2. 発表標題 レーザー透過法による単一気泡振動のシングルショット計測
3. 学会等名 日本音響学会 2019年秋季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横山 史高, 黒山 喬允
2. 発表標題 流れに伴う超音波ホーンによる音響キャビテーションノイズの変化
3. 学会等名 日本音響学会 2019年秋季研究発表会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------