

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02070

研究課題名(和文) 集束超音波によるキャビテーション初生と気泡クラウドの成長崩壊機構の解明

研究課題名(英文) Cavitation inception and the growth and collapse of bubble clouds in high-intensity focused ultrasound

研究代表者

高比良 裕之(Takahira, Hiroyuki)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80206870

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：集束超音波の気泡界面での後方散乱を利用してキャビテーションを発生させ、水中でのキャビテーション初生圧力を計測するとともに、その温度依存性を実験及び理論的に明らかにした。また、水中及びゼラチン中での気泡クラウドの成長・崩壊を解析し、超音波の散乱体として用いる気泡の大きさや形状が、気泡クラウドの成長・崩壊に及ぼす影響を明らかにした。さらに、気泡力学による微視的解析とGhost Fluid法とLevel Set法による巨視的解析を融合したマルチスケール計算手法を開発した。本手法により、実験で観測された気泡クラウドの形成過程を予測可能であることを示すとともに、気泡クラウドの形成機構を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

極めて短い時間内に非常に局所的に強力な負圧を作用させる方法として、集束超音波(HIFU)のレーザ誘起気泡界面での後方散乱を利用して、キャビテーションを発生させる方法を確立した。本実験手法により、キャビテーション初生圧力の計測、ならびに、HIFU中での気泡クラウドの成長崩壊の解析が可能となった。また、気泡力学に基づき実験における気泡核の成長を理論的に予測する手法ならびに気泡核の成長モデルとGhost Fluid法を組み合わせたマルチスケール計算手法を開発した。本実験ならびに数値計算結果は、キャビテーション初生の予測に有用であり、キャビテーションを用いた医療応用に有用な知見を与えるものである。

研究成果の概要(英文)：The cavitation inception due to the backscattering of high-intensity focused ultrasound (HIFU) from bubble interfaces in water and gelatin, leading to growth and collapse of bubble clouds, has been investigated experimentally. The dependency of the cavitation inception pressure on temperature has been revealed both experimentally and numerically. Also, the influence of bubble size as a reflector of HIFU on the bubble cloud formation has been investigated. A multiscale numerical simulation method which consists of the bubble dynamics in microscopic fields and the ghost fluid method and the level set method in macroscopic fields has also been developed for the growth of bubble nuclei and the bubble cloud formation in HIFU. The bubble cloud formation observed in experiments has been successfully simulated using the present method, which reveals the mechanism of the bubble cloud formation.

研究分野：流体力学

キーワード：混相流 気泡 キャビテーション初生 集束超音波 後方散乱 マルチスケール解析 準安定状態

1. 研究開始当初の背景

キャビテーション気泡崩壊時に発生する高速液体ジェットや衝撃波は、結石破碎などの医療技術に応用されている。また、高強度集束超音波(HIFU)を利用した医療技術では、がん組織などの患部を超音波による高温・高圧で治療する際、一度に治療できる範囲が狭いことが問題となっており、この対策として、キャビテーション気泡クラウドの崩壊の有効利用が検討されている。これは、集束超音波のみで作られられる焦点近傍の高圧領域よりも広い範囲を、キャビテーション気泡クラウドの崩壊時の高温・高圧を利用して治療し、高効率化を図るものである。一方、気泡クラウドは、超音波の進行を阻害し、逆に効率が低下する可能性や、気泡クラウドの崩壊が正常細胞までも破壊する負の側面も指摘されている。したがって、キャビテーション気泡クラウドの成長崩壊を制御することは重要な課題であるが、そもそも気泡クラウドの発生源であるキャビテーションの初生を予測することが困難であるため、多くの未解決な問題が残されているのが現状である。また、キャビテーションの初生予測において、実験と理論予測とが一致しない要因には、実験における溶存気泡核の存在も大きく影響しており、キャビテーションが時空間で確率論的に初生することと無関係ではない。溶存気泡核の影響を完全に排除することは容易ではないが、その影響を十分小さくするために、極めて短い時間内に非常に局所的に強力な負圧を作用させて、キャビテーション初生実験を行うことが重要である。

2. 研究の目的

本研究では、極めて短い時間内に非常に局所的に強力な負圧を作用させる方法として、集束超音波のレーザ誘起気泡界面での後方散乱を利用して、キャビテーションを発生させる方法(図1)を利用する。一般に、集束超音波の正圧(最大圧力)は、超音波振動子に印加する電圧の上昇に対して増加するのに対し、最小圧力はある限界圧力で飽和するため、正圧に比べて負圧の振幅は小さくなる。これに対して、自由界面での反射を利用すれば、強力な正圧が界面での反射により位相が反転し、後続の負圧との重ね合わせにより、正圧の振幅よりも大きな振幅の負圧を形成することができる。さらに、集束パルスレーザのブレイクダウンにより生成したレーザ誘起気泡を利用することにより、キャビテーション初生位置を制御できること、キャビテーション気泡クラウド先端の圧力を測定することにより、キャビテーション初生の限界圧力を直接計測することが可能となる。そこで、本研究では、気泡界面での集束超音波の後方散乱を利用して、極めて短時間に局所的に液体中に準安定状態を作り、キャビテーション初生圧力を算出するとともに、集束超音波による気泡クラウドの成長崩壊機構を解明する。また、実験における気泡核の成長を理論的に予測するとともに、気泡核の成長モデルとGhost Fluid法を組み合わせた数値解析手法を開発し、集束超音波の後方散乱によるキャビテーション初生と気泡クラウドの形成をシミュレートする手法を確立する。

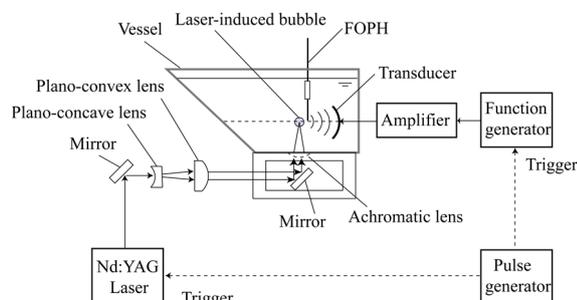


図1 キャビテーション初生実験装置

3. 研究の方法

(1) キャビテーション初生と気泡クラウドの成長・崩壊に関する実験

図1に実験装置の概略図を示す。キャビテーションを初生させる媒体として、脱気した蒸留水、グリセリン、またはゼラチンを用いる。レーザ誘起気泡は以下のように生成する。Nd:YAGレーザから照射されたパルスレーザを、コリメータにより拡大平行光にした後、水槽底面に設置されたアchromaticレンズにより媒体中に集光し、レーザブレイクダウンによりレーザ誘起気泡を生成する。また高強度集束超音波(HIFU)は、関数発生器により生成した正弦波状の電圧信号をアンプにより増幅した後、共振周波数1.1MHzの超音波振動子に印加することで発生させる。超音波振動子とレーザ誘起気泡との相対的な位置は、シャドウグラフ法を用いて決定する。また、水中の実験では、光ファイバプローブハイドロフォン(FOPH)により液体圧力を計測する。FOPHとHIFUとの相対的な位置は、FOPHの先端がHIFUの伝播軸(z軸)上に来るように決める。キャビテーションの初生ならびに気泡クラウドの成長の様子は、バックライト光源としてストロボ照明を用い、高速度ビデオカメラにより観察する。

(2) キャビテーション初生と気泡クラウド形成シミュレーション

実験によって得られた圧力データを用いて、球形気泡の運動方程式を数値計算し、HIFU中での気泡核の成長過程を解析する。そして、実験で存在したと考えられる気泡核の大きさを推定する。次に、Euler格子で捕えることができない気泡核の成長を気泡力学(球形気泡の運動方程式)に基づき予測し、その後の巨視的な気泡運動をLevel Set関数で捕えるというマルチスケール解析手法を開発し、実験結果の再現を試みる。実験との比較を通して、キャビテーション初生位置

の予測ならびに気泡クラウドの成長予測を行う。

4. 研究成果

(1) キャビテーション初生と気泡クラウドの成長・崩壊に関する実験

(1-1) 水中での実験

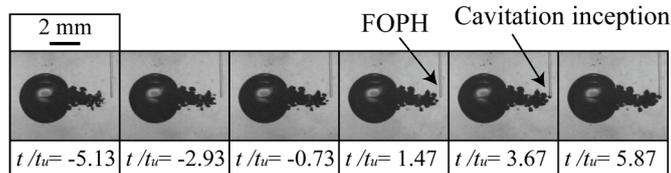


図2 レーザ誘起気泡界面でのHIFUの後方散乱による気泡クラウドの形成

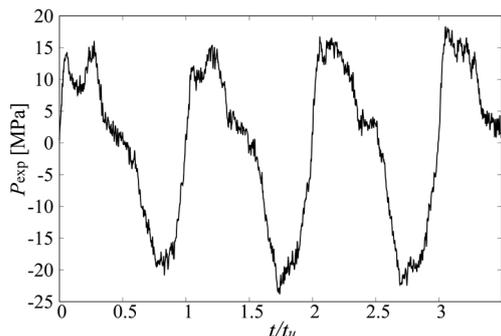


図3 液体圧力の時間履歴

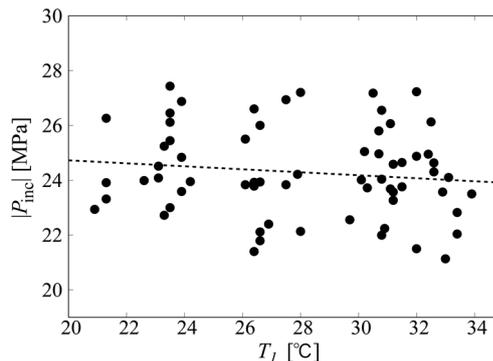


図4 キャビテーション初生圧力と温度との関係

集束超音波のレーザ誘起気泡界面での後方散乱に起因するキャビテーション気泡クラウドの成長を可視化するとともに、キャビテーション初生圧力を計測し、キャビテーション初生圧力の温度ならびに溶存酸素濃度に対する依存性を示した。実験結果の一例を図2に示す。図2の画像は50万フレーム/秒で撮影されている。超音波の周波数は1.1MHzであり、その周期 t_u は0.91 μs である。図2の大きな気泡がレーザ誘起気泡であり、超音波は図の右から左に照射され、レーザ誘起気泡界面で後方散乱し、気泡クラウドが図の右方向に成長していく。図3の液体圧力の時間履歴は、気泡クラウドの成長が止まる位置にて光ファイバーハイドロフォン(FOPH)により測定している。その圧力はキャビテーションが初生する限界の圧力となっていることから、図2のキャビテーション初生時の時刻と対応させることにより、キャビテーション初生圧力を求めることができる。図4は、実験で得られた温度 T_l とキャビテーション初生圧力の絶対値 $|P_{\text{inc}}|$ との関係である。図中の破線は実験データから得られた最小二乗近似直線であり、 $|P_{\text{inc}}| = -0.54T_l + 25.82$ である。以上、キャビテーション初生圧力の温度依存性が示された。

また、水中で成長した気泡クラウドの崩壊を観測した結果、その形態には、散乱体の大きさに応じて、先端部分から徐々に崩壊する形態と、気泡クラウドが2つに分裂しながら崩壊する形態があることが示された。さらに、グリセリン水溶液中でのキャビテーション初生と気泡クラウドの成長に及ぼすグリセリン水溶液の濃度の影響を調査した。

(1-2) ゼラチン中での実験

人体組織に近い粘弾性を有するゼラチン中において集束超音波の焦点に散乱体となるレーザ誘起気泡を生成し、気泡界面からの後方散乱による気泡クラウドの形成を対象とした実験を行った。特に、散乱体となる気泡サイズがキャビテーションの初生ならびに気泡クラウドの成長に及ぼす影響を調査した。本実験では、最大気泡半径が約2 mmのレーザ誘起気泡が生成される。一次キャビテーションを模擬した気泡としてこのレーザ誘起気泡を用いる。また、レーザ誘起気泡崩壊後にゼラチン内に半径0.3 mm程度の微小気泡が残存する。本実験ではこの残存気泡も散乱体として用いる。以下では、レーザ誘起気泡の場合にはその最大半径を、残存気泡の場合には集束超音波照射時の等価半径を、散乱体の半径 R_{rfc} と

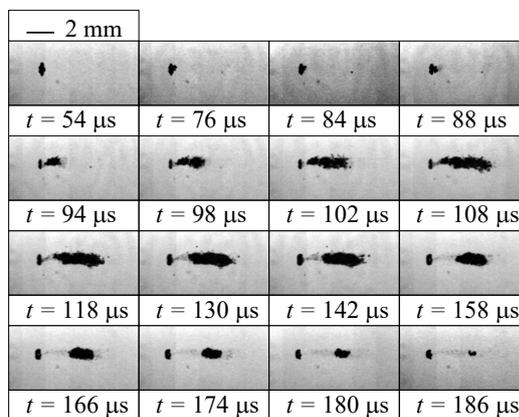


図5 残存気泡界面でのHIFUの後方散乱による気泡クラウドの形成

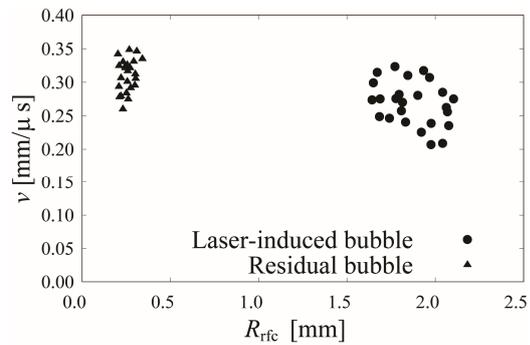
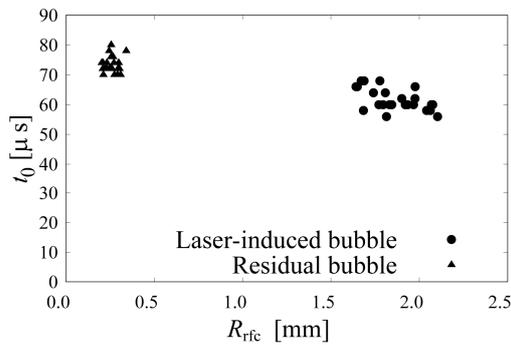


図6 散乱体の気泡半径 R_{rfc} と最初のキャビテーション初生時間 t_0 との関係
 図7 散乱体の気泡半径 R_{rfc} と気泡クラウドの先端の成長速度 v との関係

定義する。

図5は、残存気泡界面でのHIFUの後方散乱による気泡クラウドの形成の様子である。図5では、 $t = 76 \mu s$ で最初のキャビテーションが初生している。その後、約 $t = 88 \mu s$ まで散乱体の気泡界面にてキャビテーションが初生しているが、図2に示したレーザー誘起気泡の場合とは異なり、気泡クラウドは円錐状の形状をなしていない。 $t = 88 \sim 118 \mu s$ で気泡クラウドは伝播軸方向に大きく成長し、約 $t = 118 \mu s$ でその成長が停滞している。また、約 $t = 118 \mu s$ から散乱体の気泡界面付近の気泡クラウドが崩壊し、超音波の入射が終了すると $t = 158 \mu s$ のようにクラウドの先端部が崩壊し始めている。

気泡径 R_{rfc} と最初のキャビテーション初生時刻 t_0 との関係を図6に示す。図6より、残存気泡の場合の初生時刻 t_0 は $70 \sim 80 \mu s$ であるのに対して、レーザー誘起気泡の場合、 t_0 は $56 \sim 68 \mu s$ であり、レーザー誘起気泡の場合の方が初生時刻 t_0 は約 $10 \mu s$ 早いことがわかる。これは、散乱体のサイズが大きいレーザー誘起気泡の場合、より広い面で集束超音波は後方散乱され、その結果、後方散乱による負圧が大きくなり、最初のキャビテーションが初生する時刻が早くなるためと考えられる。気泡径 R_{rfc} と気泡クラウド先端の成長速度 v との関係を図7に示す。前述したように初生開始時刻は、気泡径の大きなレーザー誘起気泡の方が早かったが、その後のクラウドの成長速度は、残存気泡の方が若干速くなった。この原因として、レーザー誘起気泡の場合には、気泡クラウドの成長の初期段階において、気泡クラウドが円錐状に成長し、その先端が鋭くなる状態が存在するのに対して、残存気泡の場合には、気泡クラウドの先端が比較的平坦であることから、クラウド先端での後方散乱による負圧の強度が、残存気泡を散乱体とする方が強くなった可能性が考えられる。なお、レーザー誘起気泡と残存気泡の気泡クラウド先端の最大到達点に関して、両者に大きな差異は認められなかった。これは、以下の理由による。気泡クラウドが成長し、クラウド先端界面が集束超音波の幾何焦点から離れると、クラウド先端界面に入射する正圧が弱まるため、クラウド先端界面からの後方散乱による負圧がキャビテーション初生圧力に達しなくなり、気泡クラウドの成長が停止する。これより、クラウド先端の最大到達点は、超音波の最大正圧分布により決定されるため、散乱体のサイズによらずほぼ同じとなる。

(2) キャビテーション初生と気泡クラウド形成シミュレーション

(2-1) 気泡核の成長と安定性に関する解析

図3の例に示す実験で得られた圧力履歴を、気泡の運動方程式に入力した際の、種々の初期気泡核半径に対する気泡半径の時間履歴を調査した。初期半径 $R_0 = 2.36 \text{ nm}$ の気泡核に、図3の圧力履歴を与えた際の気泡半径の時間履歴を図8に示す。図8から、1周期目の負圧が入射しても

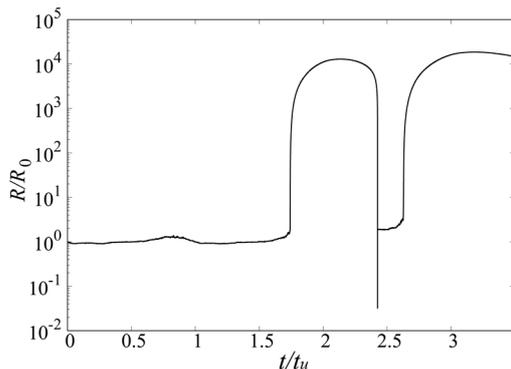


図8 気泡核の成長

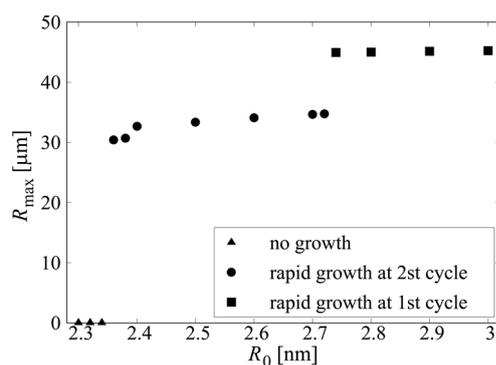


図9 気泡核半径と最大気泡径との関係

気泡核は急成長することはないが、2周期目の負圧に反応して気泡核は急激に $R/R_0 = 1.29 \times 10^4$ ($R = 30.4 \mu\text{m}$)まで成長ししていることがわかる。2周期目の負圧が入射した際の気泡半径の極大値 R_{max} と初期半径 R_0 との関係を図9に示す。図9から、 $2.36 \text{ nm} \leq R_0 < 2.74 \text{ nm}$ では、2周期目の負圧に反応して急激に成長することがわかる。図2の実験では図3の1周期目の負圧には反応せず、2周期目の負圧に反応して気泡核が急激に成長したと考えられるので、実験の水中には、 $2.36 \text{ nm} \leq R_0 < 2.74 \text{ nm}$ の気泡核が存在したと推定できる。なお、図4のすべての実験(実験ごとに液体中に存在する気泡核の分布は異なる)に対して同様の解析を行い、図4の実験において存在したと考えられる気泡核のサイズを推定したところ、 $R_0 = 2.1 \sim 2.7 \text{ nm}$ 程度であることが確認された。また、図9のように、 R_0 を大きくしていくと、ある初期気泡核半径のしきい値を超えると気泡核は急激に成長する。その初期半径を R_{0min} (図9では 2.36 nm)と定義した。様々な温度に対して、 R_{0min} とキャビテーション初生圧力について調査した結果、以下の知見を得た。(1) 高温ほど気泡核は成長しやすいという解析結果は、高温ほどキャビテーションが初生しやすいという実験結果と符合した。また、 R_{0min} の温度依存性は温度の違いによる液体の物性値の違いに起因しており、表面張力の影響が支配的である。(2) 本解析から得られた温度とキャビテーション初生圧力との相関式の傾きは、実験から直接得られた相関式の傾きと約7%の誤差で一致した。また、気泡の運動方程式に与える物性値を適切に与えることにより、圧力履歴によらず、実験の初生圧力と温度の関係を概ね予測することができる。

さらに、実験によって得られた圧力波形ならびに正弦波を用いて、球形気泡の運動方程式を数値計算し、HIFU中での気泡核の成長過程を解析した。その結果、実験で計測された圧力波形を気泡核に与えた際に見られた半径の単調な増加は、圧力の時間平均値が負であることが要因であるなどの知見を得た。

(2-2) 集束超音波中での気泡クラウド形成シミュレーション

開発したマルチスケール解析手法の概要は以下の通りである。まず、Ghost Fluid法により計算されたHIFUの圧力場に微小な気泡核を配置し、単一球形気泡の運動方程式であるKellerの式を解き、気泡核の成長を予測する。配置した気泡核が十分大きく成長し、気泡界面をEuler格子で解像できるようになれば、界面をLevel Set関数で表し、Ghost Fluid法を用いた巨視的な場の計算に引き継ぐ。したがって、微視的な場の解析では、気泡成長は圧力場に何ら影響を与えないが、巨視的な場の計算では、気泡とHIFUとの干渉が考慮されることになる。なお、巨視的な場の気液界面の捕獲には、Hybrid Particle Level Set法を用いた。実験を予測するには、微視的な場から巨視的な場への計算手法の切り替えのタイミングが重要になる。本解析では、気泡核の最大半径によらずに、気泡が特定の閾値以上に成長した時刻に手法を切り替えることとした。なお、この条件の場合には、切り替え時に気泡核は速度と加速度を持って成長している状態であるから、気泡核によって形成される速度場と圧力場が巨視的な場に影響すると考えられる。そこで、Kellerの式から計算される切り替え時の速度場ならびに圧力場を、それぞれGhost Fluid法で計算されるHIFUの速度場および圧力場に重畳し、その効果を検討した。解析結果、十分な質量保存性を確保した上で、球形気泡の運動方程式であるKellerの式を用いた微視的な気泡の運動解析から、Level Set関数で界面を表現した巨視的な場の解析への計算手法の良好な移行が行えることが明らかとなった。その際、巨視的な場の計算へ切り替る際に、Kellerの式から得られる速度を、巨視的な速度場に重畳することが有用であることが示された。

開発した解析手法を用いて、実験で見られた気泡クラウドの形成が予測できるか調査した。解析の結果の一例を図10に示す。図10では、気泡核を、 r 方向 $r/R_1 = 0 \sim 0.700$ に8個、 z 方向 $r/R_1 = 1.185 \sim 2.785$ に17個(合計136個)、等間隔に配置した。ただし、 R_1 は図10のbubble1の半径である。また、図10は、気泡クラウドが形成された様子と周囲の圧力分布を表している。初めに、bubble1界面でのHIFUの後方散乱によって、bubble1近傍の伝播軸上に気泡界面が出現する(i)。その後、最初に現れた気泡を中心に気泡界面が複数出現し、伝播軸垂直方向に気泡列が形成される(i~iii)。形成された気泡列に、HIFUの正圧部が後方散乱され、気泡列前方の伝播軸を中心に連続して気泡界面が出現し、再度気泡列が形成される(iv,v)。この一連の気泡列形成を繰り返して、最終的に気泡クラウドは図10(vi)に示すような円錐状の形状となる。以上の一連の気泡クラウド形成のプロセスは実験と定性的に一致しており、本手法により、気泡クラウドの形成を予測できる可能性が示された。

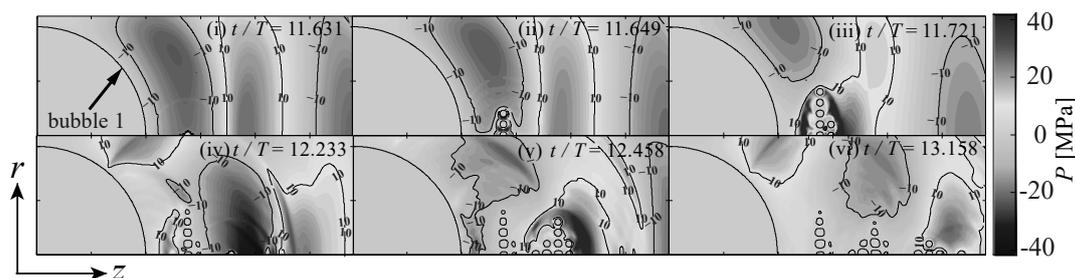


図10 気泡クラウドの形成の様子と圧力分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 5件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

| | |
|--|------------------------|
| 1. 著者名 TAMURA Tomoya, NAKAO Mebuki, OGASAWARA Toshiyuki, TAKAHIRA Hiroyuki | 4. 巻 36 |
| 2. 論文標題 Numerical Simulation for Cavitation Inception by Focused Ultrasound Using the Ghost Fluid Method Coupled with Bubble Dynamics | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 JAPANESE JOURNAL OF MULTIPHASE FLOW | 6. 最初と最後の頁 95 ~ 106 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3811/jjmf.2022.008 | 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 KISHIMOTO Koshi, NAGANO Syuhei, OGASAWARA Toshiyuki, TAKAHIRA Hiroyuki | 4. 巻 36 |
| 2. 論文標題 Effect of Bubble Size on Cavitation Cloud Formation by the Backscattering of Focused Ultrasound from a Bubble Interface in Gelatin | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 JAPANESE JOURNAL OF MULTIPHASE FLOW | 6. 最初と最後の頁 86 ~ 94 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3811/jjmf.2022.007 | 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 - |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 S. Ngano, Y. Chen, T. Ogasawara, H. Takahira | 4. 巻 1 |
| 2. 論文標題 Bubble cloud formation in gelatin by the backscattering of high-intensity focused ultrasound from a laser-induced bubble | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Proceedings of 11th International Symposium on Cavitation | 6. 最初と最後の頁 457-460 |
| 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 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 SHINKAI Yuki, ISHIDA Shoma, OGASAWARA Toshiyuki, TAKAHIRA Hiroyuki | 4. 巻 35 |
| 2. 論文標題 Analysis for the Growth and Stability of Bubble Nuclei in High-Intensity Focused Ultrasound Fields | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 JAPANESE JOURNAL OF MULTIPHASE FLOW | 6. 最初と最後の頁 28 ~ 35 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3811/jjmf.2021.006 | 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 - |

| | |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名 Taisei Horiba, Toshiyuki Ogasawara, Hiroyuki Takahira | 4. 巻 147 |
| 2. 論文標題 Cavitation inception pressure and bubble cloud formation due to the backscattering of high-intensity focused ultrasound from a laser-induced bubble | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 The Journal of the Acoustical Society of America | 6. 最初と最後の頁 1207 ~ 1217 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1121/10.0000649 | 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17件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 田村知也, 中尾芽吹, 山内秀紀, 小笠原紀行, 高比良裕之 |
| 2. 発表標題 気泡力学とGhost Fluid法に基づく集束超音波中でのキャビテーションクラウド形成シミュレーション |
| 3. 学会等名 第66回理論応用力学講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 田村知也, 中尾芽吹, 小笠原紀行, 高比良裕之 |
| 2. 発表標題 気泡力学と Ghost Fluid 法を融合したキャビテーション初生に関する数値計算手法の開発 |
| 3. 学会等名 日本混相流学会 混相流シンポジウム2021 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 岸本航知, 長野周平, 小笠原紀行, 高比良裕之 |
| 2. 発表標題 ゼラチン内での集束超音波によるキャビテーション初生ならびに気泡クラウドの形成に関する実験的検討 |
| 3. 学会等名 日本混相流学会 混相流シンポジウム2021 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 中尾芽吹, 田村知也, 小笠原紀行, 高比良裕之 |
| 2. 発表標題 気泡力学とGhost Fluid法を融合した集束超音波中でのキャビテーション初生に関する数値シミュレーション |
| 3. 学会等名 日本流体力学会 年会2021 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 石田将真, 高比良裕之, 小笠原紀行 |
| 2. 発表標題 超音波中での気泡核の単調成長に関する数値的検討 |
| 3. 学会等名 日本機械学会 第99期 流体工学部門講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 中上惣太郎, 長野周平, 岸本航知, 小笠原紀行, 高比良裕之 |
| 2. 発表標題 集束超音波によって水中に形成された気泡クラウドの成長崩壊に関する実験的解析 |
| 3. 学会等名 日本機械学会 第99期 流体工学部門講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 長野周平, 岸本航知, 中上惣太郎, 小笠原紀行, 高比良裕之 |
| 2. 発表標題 ゼラチン内における気泡からの集束超音波の後方散乱により形成されるキャビテーションクラウドに対する気泡の大きさ及び超音波強度の影響 |
| 3. 学会等名 日本機械学会 第99期 流体工学部門講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 岸本航知, 中上惣太郎, 長野周平, 小笠原紀行, 高比良裕之 |
| 2. 発表標題 ゼラチン中における集束超音波の気泡界面での後方散乱により形成されるキャビテーション |
| 3. 学会等名 キャビテーションに関するシンポジウム (第20回) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 眞海勇輝, 石田将真, 小笠原紀行, 高比良裕之 |
| 2. 発表標題 気泡界面での集束超音波の後方散乱により形成される圧力場における気泡核の成長と安定性 |
| 3. 学会等名 混相流シンポジウム2020 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 長野周平, 陳儀, 小笠原紀行, 高比良裕之 |
| 2. 発表標題 ゼラチン内に残存する気泡が集束超音波によるキャビテーションクラウド形成に及ぼす影響 |
| 3. 学会等名 日本流体力学会年会2020 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 田村知也, 眞海勇輝, 小笠原紀行, 高比良裕之 |
| 2. 発表標題 Ghost Fluid法を用いた気泡界面での集束超音波の後方散乱による気泡核の成長に関する数値シミュレーション |
| 3. 学会等名 日本流体力学会年会2020 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 陳儀, 長野周平, 小笠原紀行, 高比良裕之 |
| 2. 発表標題 高強度集束超音波の気泡界面での後方散乱によるキャピテーション気泡クラウド形成の実験的検討 |
| 3. 学会等名 日本機械学会第98期流体工学部門講演会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 石田将真, 眞海勇輝, 高比良裕之, 小笠原紀行 |
| 2. 発表標題 気泡核の成長に及ぼす圧力波形の影響 |
| 3. 学会等名 日本機械学会第98期流体工学部門講演会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yuki Susa, Taisei Horiba, Toshiyuki Ogasawara, Hiroyuki Takahira |
| 2. 発表標題 Cavitation Cloud Formation by High Intensity Focused Ultrasound Caused by Backscattering from a Laser-Induced Bubble in Glycerol-Water Solutions |
| 3. 学会等名 ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2019 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 眞海勇輝, 堀場大生, 小笠原紀行, 高比良裕之 |
| 2. 発表標題 集束超音波中の気泡界面での後方散乱により形成される圧力場での気泡核の成長 |
| 3. 学会等名 日本流体力学会年会2019 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 陳義, 堀場大生, 小笠原紀行, 高比良裕之 |
| 2. 発表標題 レーザー誘起気泡界面での集束超音波の後方散乱によるキャピテーションクラウドの形成に及ぼす温度と溶存酸素量の影響 |
| 3. 学会等名 日本流体力学会年会2019 |
| 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 |
|-------|---|---|----|
| 研究分担者 | 小笠原 紀行 (Ogasawara Toshiyuki) (00552184) | 大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授 (24403) | |

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 |
|---------|---------|