

令和元年6月20日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04270

研究課題名(和文)位相反転膨張波により実現される液体の準安定状態とキャビテーション初生の動力学

研究課題名(英文) Cavitation inception and metastable state in liquid due to backscattering of HIFU from a bubble interface

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) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、液体の準安定状態とキャビテーション初生の物理を解明することを目的に、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初生圧力計測とキャビテーション気泡クラウドの成長過程の可視化を行った。気泡クラウド先端位置での液体圧力を計測することにより、キャビテーション初生圧力の算出に成功した。また、実験に対応した数値計算ならびに気泡核の成長シミュレーションを通して、気泡クラウドの形成機構を解明するとともに、実験で計測されたキャビテーション初生圧力に対する気泡核のサイズを決定し、非平衡蒸発・凝縮が気泡の膨張・収縮に及ぼす影響を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

集束超音波によるキャビテーションの初生圧力ならびに気泡クラウドの形成機構を解明することにより、液体の準安定状態に関する理解が深まり、相変化や相分離の物理学の発展に寄与するとともに、流体機器内のキャビテーションの初生予測に有用な知見を与える。さらに、超音波治療法の一つである高密度焦点式超音波法において、治療の効率化を図るためにキャビテーション気泡クラウドの崩壊を有効利用する方法が考えられているが、本研究成果は、キャビテーション気泡クラウドの制御に関する有用な知見を与える。

研究成果の概要(英文)：The cavitation inception and the following bubble cloud formation due to the backscattering of HIFU from bubble interfaces are investigated experimentally and numerically. A laser-induced bubble in the vicinity of the geometrical focus of HIFU is utilized as a primary cavitation. Optical observation with a high-speed video camera and pressure measurement with a fiber optic probe hydrophone (FOPH) are conducted simultaneously in the present experiments. Also, the minimum negative pressure distribution around the bubble cloud is calculated with the ghost fluid method to investigate the forming process of the bubble cloud in the experiments. The results show that the bubble cloud grows accompanied with the formation of multiple layers composed of tiny bubbles, and becomes a cone-shape. The pressure measurement reveals that the cavitation inception pressure is about -26 MPa when $2.0 \text{ mg/L} < D_0 < 3.5 \text{ mg/L}$ at about 296 K.

研究分野：流体工学

キーワード：混相流 キャビテーション初生 気泡 相変化 準安定状態 集束超音波 後方散乱

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

キャビテーションは、液体中での相変化を伴う気泡の核生成(初生)、成長、崩壊現象であり、特に初生は、古くから工学のみならず物理における重要な課題である。微細気泡や微細粒子等の不純物を核とした不均質核生成では、飽和蒸気圧程度の低い圧力低下のもとで、キャビテーションが容易に発生する。しかし、均質核生成においては、飽和蒸気圧以下の準安定状態が存在し、液体はかなりの張力(負圧)に耐えるため、キャビテーション初生圧力は、飽和蒸気圧よりも低くなる。実際、均質核生成理論によると、約20°Cの水の場合、確率50%でキャビテーションが発生する圧力(初生圧力)は、約-130MPa という非常に低い値となる。しかしながら、実際に実験で観測されるキャビテーション初生圧力は、-20MPa から-40MPa 程度であり、均質核生成理論よりも高い。こうした実験と理論予測との不一致には、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には、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て、キャビテーション初生の実験を行うことが重要である。さらに、その後の気泡核の成長を厳密に取り扱うには、気泡界面での非平衡蒸発・凝縮を考慮した気泡核成長モデルの構築が不可欠である。

2. 研究の目的

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を考案した。一般に、集束超音波を用いることにより、一定の負圧(最小圧力)を作ることができる。しかし、正圧(最大圧力)が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、自由界面での後方散乱を利用すれば、強力な正圧が界面での後方散乱により位相が反転し、後続の負圧との重ね合わせにより、大きな振幅の負圧を形成することができる。実際、集束パルスレーザのブレイクダウンにより集束超音波の焦点近傍にレーザ誘起気泡を作り、バースト集束超音波がレーザ誘起気泡の界面で後方散乱する際の位相反転膨張波を利用して、集束超音波のみではキャビテーションが発生しない条件のもとで、キャビテーションが初生することが確認された。

本研究では、液体の準安定状態とキャビテーション初生の物理を解明することを目的に、気泡界面での集束超音波の後方散乱に起因する位相反転膨張波を用いた実験により、キャビテーション初生圧力を決定するとともに、キャビテーション気泡クラウドの形成機構を明らかにする。また、実験により得られたキャビテーション初生圧力から気泡の臨界半径を算出するとともに、非平衡蒸発・凝縮を考慮して臨界半径を有する気泡核の成長をシミュレートする。

3. 研究の方法

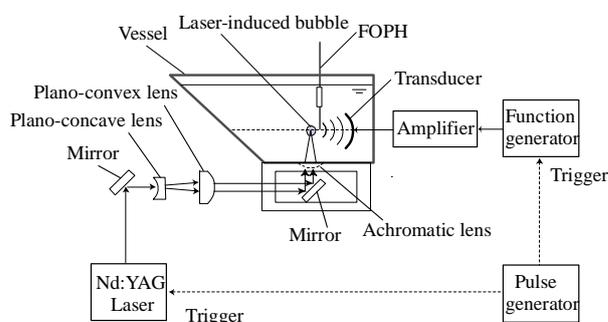


図1 実験装置

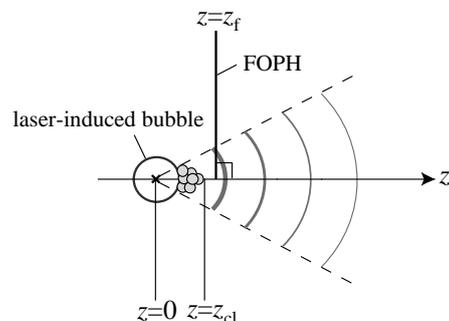


図2 座標系

(1) キャビテーション初生と気泡クラウドの形成に関する実験

図1に実験装置の概略図を示す。また、図2に本解析で用いる座標系を示す。水槽は脱気された蒸留水で満たされている。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レンズにより水中に集光し、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1.1 MHz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、HIFUの幾何的な焦点(図2における $z=0$)がレーザ誘起気泡の中心と一致するように決める。また、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。FOPH先端の z 座標を z_f とする。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。Nd:YAGレーザ、HIFUとストロボ照明の照射開始、カメラの起動および圧力測定トリガ信号はパルスジェネレータにより同期されている。なお、実験では水温と溶存酸素量をモニタしており、溶存酸素量を水中に溶けている気

泡核の量を推定する指標として用いる。以下に示す結果では、 $t=0$ はレーザ誘起気泡を生成した時間を示している。

(2) 気泡界面での HIFU の後方散乱に関する数値解析

レーザ誘起気泡からの HIFU の後方散乱による気泡クラウド周辺の圧力場を数値計算により求め、気泡クラウドの形成過程を調査する。数値計算手法には Ghost Fluid 法を用いる。HIFU の周波数は実験と同様に 1.1 MHz である。HIFU は 16 周期分照射され、その幾何学焦点における最大正圧と最小負圧は、それぞれ約 30 MPa と約 -19 MPa である。レーザ誘起気泡は HIFU の幾何学的な焦点に配置されており、その右側から HIFU が入射する。後述する実験での観測結果を踏まえ、HIFU の伝播軸上にレーザ誘起気泡 (bubble 1) の 1/10 の半径を持つ微小気泡またはリング状の気泡を配置し、集束超音波の後方散乱により形成される圧力分布を求め、実験でのキャビテーション初生位置と計算で得られた負圧との関連を調査し、気泡クラウドの形成過程を明らかにする

(3) 気泡核の成長シミュレーション

非平衡蒸発・凝縮を考慮して得られた気液境界条件を用いて、気泡核成長をシミュレートする。また、実験で得られたキャビテーション初生圧力から気泡核の大きさを推定する。

4. 研究成果

(1) キャビテーション初生と気泡クラウドの形成に関する実験

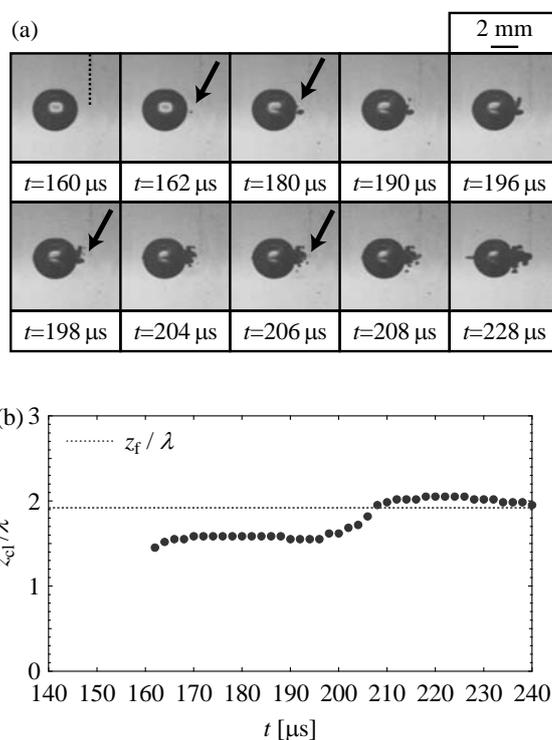


図3 気泡クラウドの形成 ($z_f / \lambda = 1.92$): (a) 気泡クラウドの成長の様子, (b) 気泡クラウドの先端座標 z_{cl} (λ で無次元化)の時間履歴

(a) 気泡クラウドの形成

図 3(a)は、レーザ誘起気泡に対して HIFU を 72.73 μs 間照射した際の気泡クラウドの成長の様子の一例を示している。球形の大きな気泡はレーザ誘起気泡であり、FOPH は $z_f / \lambda = 1.92$ (λ : HIFU の波長)の位置に設置してある ($t=160 \mu\text{s}$ の画像における破線は FOPH の位置を示している)。HIFU はレーザ誘起気泡に約 $t=150 \mu\text{s}$ に入射する。まず、 $t=162 \mu\text{s}$ に、最初のキャビテーションがレーザ誘起気泡の右側で初生する。キャビテーション初生位置は矢印で示されている。多数の実験を行ったところ、この初生位置は概ね 0.3λ であった。平面自由境界での正弦波の後方散乱の場合、 0.25λ の位置で負圧の重ね合わせで負圧が最小になるが、HIFU の場合、入射波の非線形性により、最小負圧位置は正弦波の場合よりも気泡界面から遠ざかる。次に、 $t=180 \mu\text{s}$ では、伝播軸に対して垂直方向の、最初のキャビテーション初生位置の近傍に新たなキャビテーションが初生する。同様に伝播軸に対して垂直方向に複数のキャビテーション気泡が初生し、 $t=196 \mu\text{s}$ で見られるような複数のキャビテーション気泡により構成される層状の気泡群が形成される。その後、 $t=198 \mu\text{s}$ では気泡の層の前方に新たなキャビテーションが初生する。これらのキャビテーション初生のプロセスを繰り返すことで、気泡クラウドは HIFU の伝播方向と逆向きの方向に成長していき、最終的に円錐状の気泡クラウドが形成すると考えられる。図 3(b)は気泡クラウドの先端座標 z_{cl} (λ で無次元化)の時間履歴を示している。図中の破線は FOPH の位置を示している。時間経過に伴い気泡クラウドは段階的に成長し、FOPH の位置に達する。

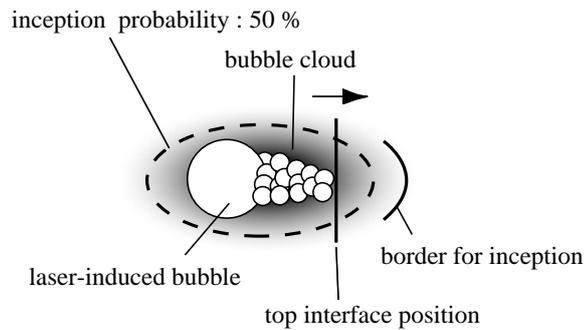


図4 気泡クラウド周辺の正圧分布の概念図

z_{cl} における $162 \mu\text{s}$ から $196 \mu\text{s}$ までのほぼ平坦な領域は、レーザ誘起気泡の右側にキャビテーションが初生してから層状の気泡群が形成されるまでに対応している。その後の z_{cl} の増加は、気泡の層の前方に複数のキャビテーション気泡が初生したことに対応している。その後、本条件では、 $t=208 \mu\text{s}$ で気泡クラウドの先端が FOPH に到達し、気泡クラウドは、それ以降は成長しない。同様の実験を、水温を変化させて行ったところ、水温の増加に伴い、気泡クラウドも増大することが確認された。

また、グリセリン水溶液で気泡クラウドの形成実験を行った結果、蒸留水の場合と同様に円錐状の気泡クラウドが形成されたが、蒸留水の場合と比べて、実験結果のばらつきが大きかった。これは、グリセリンと水の混合に伴う溶液の不均一性が溶存気泡核の分布に影響を与えているためと考えられる。

(b) キャビテーションの初生圧力計測

図3(b)では、HIFUが $t=220 \mu\text{s}$ まで入射し続けるのにもかかわらず、 $t=210 \mu\text{s}$ 後の気泡クラウドの成長は停滞している。その理由は以下のように考えられる。図4に、気泡クラウドの成長の様子を概念図で示す。図4における濃淡は正圧の強さを表しており、濃くなるほどにより強い正圧を表している。HIFUの焦点に近づくほど強い正圧を持つ圧力領域が形成されている。そのため、気泡クラウドが成長し、気泡クラウドの先端の界面が焦点から離れていくにつれて、先端の界面に入射する正圧は弱まる。その結果、後方散乱により気泡クラウド先端の界面近傍に形成される負圧も弱まる。やがて、後方散乱と入射波との重ね合わせによる負圧の絶対値がキャビテーション初生圧力の絶対値を下回ると、キャビテーションがほとんど初生しなくなり、気泡クラウドの成長は停止する。すなわち、気泡クラウドの成長にはキャビテーションが初生

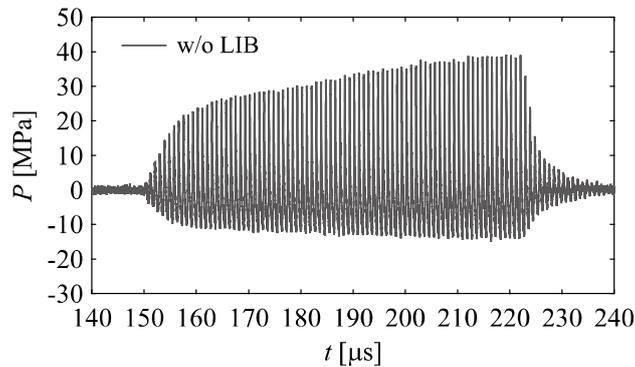


図5 レーザ誘起気泡がないときの液体圧力の時間履歴

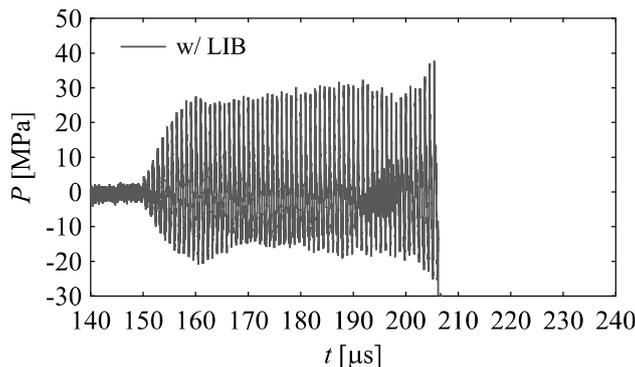


図6 レーザ誘起気泡界面での後方散乱による液体圧力の時間履歴

するか否かの境界となる圧力領域があり、気泡クラウドの先端がその圧力領域に達すると気泡クラウドの成長が停滞することになる。そのため、その境界付近での最小負圧はキャビテーション初生圧力と同等であると考えられる。そこで、気泡クラウド先端近傍における圧力測定を行った。

図5はレーザ誘起気泡を生成せずに、図3(a)におけるFOPHの位置と同じ場所で圧力計測した際の、入射波の圧力の時間履歴を示している。入射波の最大正圧と最小負圧はそれぞれ39.2 MPaと-14.9 MPaである。一方、図6は図3(a)の際に計測された圧力の時間履歴を示している。t=206 μs以降において圧力計測ができなくなっているのは、FOPHのグラスファイバ先端にキャビテーションが初生したためである。図5と図6を比較してみると、t=160 μsや205 μs付近の波形に顕著に見られるように、レーザ誘起気泡の界面での超音波の後方散乱が生じる場合には、明らかに強い負圧が観測されている。また、図3(a)のキャビテーション初生の様子と図6の圧力履歴との関連を見てみると、気泡クラウド先端の界面がFOPHに近づくほど、強い負圧が計測されていることがわかる。図6ではt=206 μsでFOPHのグラスファイバ先端にキャビテーションが初生しており、その時刻に対応する最小負圧は-25.4 MPaであった。本圧力は、FOPHがキャビテーションに覆われる直前の最小負圧であり、キャビテーション初生圧力と見なせる。

図6と同様に、様々な溶存酸素量における気泡クラウド先端のキャビテーションが初生する限界の圧力を測定した。その結果、水温23℃でのキャビテーション初生圧力は約-26 MPaであった。また、同程度の水温で、約2.0 mg/L < DO < 3.5 mg/LであればDO(酸素濃度)によらずにキャビテーション初生圧力はほぼ一定であった。

(2) 気泡界面でのHIFUの後方散乱に関する数値解析

Ghost Fluid法を用いて数値計算した実験結果に対応する気泡周囲の最小圧力(負圧)の分布を図7(a), (b)に示す。図7(a)では、bubble 1の右側、HIFUの伝播軸上にbubble 1の1/10の半径を持つbubble 2を配置している。これは、図3(a)のt=162 μsのようにレーザ誘起気泡の右側にキャビテーションが初生した状況を想定している。一方、図7(b)では、図7(a)の気泡に加えてbubble 2の近傍で伝播軸に対して垂直方向(r軸の方向)にリング状の気泡を配置している。これは、図3(a)のt=196 μsのようにレーザ誘起気泡の右側にキャビテーションによる気泡の層が形成された後の状態を想定している。図7(a)における最も強い負圧は、bubble 2の近傍で伝播軸に対して垂直方向に観測され、その値は-27 MPaであった。この結果は、伝播軸の垂直方向の強い負圧域に新たなキャビテーション気泡が初生し、それらが成長した結果、層状のキャビテーション気泡群が形成されることを示唆している。一方、図7(b)の場合には、-40 MPa以下の強い負圧が気泡の層の右側の伝播軸上に観測された。この負圧により、気泡の層の前方に次のキャビテーションが初生することが示唆される。以上のキャビテーション初生のプロセスを繰り返す

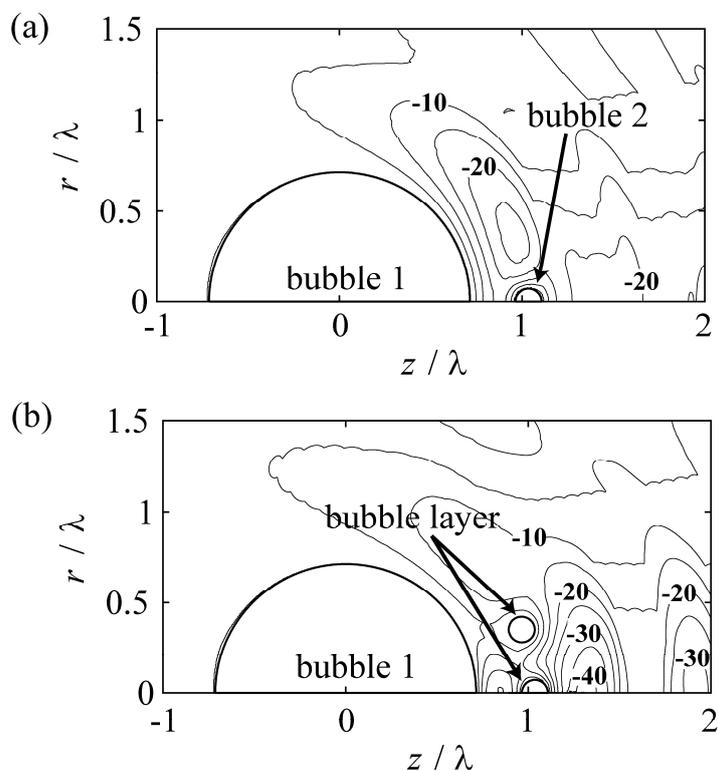


図7 気泡周囲の最小圧力の分布: (a) レーザ誘起気泡 (bubble 1) の前方に微小気泡 (bubble 2) を配置した場合, (b) レーザ誘起気泡 (bubble 1) の前方に微小気泡とリング気泡を配置した場合

ことにより、複数の気泡の層で構成された円錐状の気泡クラウドが形成されると考えられる。

(3) 気泡核の成長シミュレーション

平衡理論に基づき、臨界圧力を -26 MPa をとしたときの気泡核のサイズを推定したところ、 2.15 nm であった。また、実験で得られた圧力の時間履歴を用いて、気泡核の成長過程を調査した。さらに、単一気泡が大振幅振動圧力場で膨張・収縮する場合について、気泡半径、気泡内部の温度及び圧力、質量流束等の時間変化を非平衡蒸発・凝縮を考慮した気泡の運動方程式により調査した結果、気泡径の時間変化については非平衡、平衡による相違は大きくないが、気泡内部の温度と圧力、気液界面での質量流束については非平衡蒸発・凝縮の影響が現れることが示された。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 15 件)

- (1) 高比良裕之, 堀場大生, 須佐有起, 小笠原紀行, 高強度集束超音波の気泡界面での後方散乱によるキャビテーション初生, キャビテーションに関するシンポジウム (第 19 回) 講演論文集, USB-flash, (2018), 全 6 ページ, 査読無.
- (2) T. Horiba, T. Ogasawara, H. Takahira, Cavitation inception pressure and bubble cloud formation by backscattering from bubble interfaces in HIFU, Proceedings of Meetings on Acoustics, 34, (2018), Total 5 pages, doi: 10.1121/2.0000919, 査読有.
- (3) T. Ogasawara, T. Horiba, T. Sano, H. Takahira, Pressure measurement and high-speed observation on the cavitation bubble cloud due to the backscattering of HIFU from a laser-induced bubble, Fluid Dynamics Research, 50, (2018), Total 16 pages, doi: 10.1088/1873-7005/aae7e4, 査読有.
- (4) 堀場大生, 佐野太亮, 小笠原紀行, 高比良裕之, 集束超音波による気泡クラウド形成に関する圧力計測, 混相流, 32, (2018), 49-58, 査読有.
- (5) T. Horiba, T. Sano, T. Ogasawara, H. Takahira, Observation of the growth of cavitation bubble cloud by the backscattering of focused ultrasound from a laser-induced bubble, Proc. SPIE, Selected Papers from the 31st International Congress on High-Speed Imaging and Photonics, 10328, (2017), Total 6 pages, doi:10.1117/12.2270465, 査読有.

[学会発表] (計 13 件)

- (1) 田中雅人, 江頭竜, 藤川俊秀, 藤川重雄, 大振幅振動圧力場で非平衡蒸発・凝縮を伴う水蒸気泡の膨張・収縮の気泡力学解析, 日本機械学会九州支部第 72 期総会講演会, (2019).
- (2) 須佐有起, 堀場大生, 小笠原紀行, 高比良裕之, グリセリン水溶液中における集束超音波によるキャビテーションクラウドの形成, 混相流シンポジウム 2018, (2018).
- (3) T. Horiba, T. Ogasawara, H. Takahira, Cavitation inception pressure and bubble cloud formation by backscattering from bubble interfaces in HIFU, 21st International Symposium on Nonlinear Acoustics, (2108).
- (4) T. Horiba, T. Sano, T. Ogasawara, H. Takahira, Simultaneous pressure measurement using FOPH with high-speed imaging of a cavitation bubble cloud in HIFU, 10th International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flows, (2017).
- (5) T. Sano, T. Horiba, T. Ogasawara, H. Takahira, Cavitation cloud formation by the backscattering of focused ultrasound from a laser-induced bubble, The Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, (2017).

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：小笠原 紀行
ローマ字氏名：Ogasawara Toshiyuki
所属研究機関名：大阪府立大学
部局名：工学研究科
職名：助教
研究者番号 (8 桁)：00552184

研究分担者氏名：藤川 重雄
ローマ字氏名：Fujikawa Shigeo
所属研究機関名：北海道大学
部局名：工学研究院
職名：名誉教授
研究者番号 (8 桁)：70111937