

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289034

研究課題名(和文) 圧力波によるキャビテーション気泡の初生及び崩壊の物理の解明

研究課題名(英文) Physical investigation of the inception and collapse of cavitation bubbles by pressure waves

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) 14,700,000円

研究成果の概要(和文)：界面での非平衡相変化を考慮したGhost Fluid法を用いて、入射衝撃波とキャビテーション気泡の干渉問題を解析した。また、集束超音波を気泡に照射した際の、気泡界面での超音波の後方散乱によるキャビテーション初生を、実験とGhost Fluid法による数値計算により調査し、キャビテーション初生位置と圧力場との関係やキャビテーションクラウドの成長機構を明らかにした。さらに、狭い流路を模した平行な剛体壁面間でのレーザ誘起気泡の成長崩壊実験ならびにGhost Fluid法および境界要素法を用いた数値計算を遂行し、平行な剛体壁面間での気泡の崩壊形態を分類し、壁面損傷に及ぼす気泡崩壊の影響を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The shock wave-bubble interaction was investigated numerically using an improved ghost fluid method by considering the nonequilibrium phase transition through the bubble interface. The simulation was in good agreement with the corresponding experiment. Also, the cavitation inception by the backscattering of ultrasound from a bubble was investigated experimentally and numerically. The relationship between the cavitation inception location and the pressure field around the bubble was characterized. The growth mechanism of cavitation cloud by the backscattering of ultrasound was clarified. The growth and collapse of a bubble between two parallel rigid walls were also investigated experimentally and numerically. The regimes of bubble collapse between the walls were obtained, and the influence of liquid jets and shock waves by bubble collapse on the material damages was clarified.

研究分野：機械工学・流体工学

キーワード：流体工学 キャビテーション 気泡 圧力波 相変化

### 1. 研究開始当初の背景

高強度の超音波を液体中に照射すれば、負圧時にキャビテーション気泡が生成し、気泡は相変化を伴いつつ溶存気体の整流拡散により成長する。このように成長した気泡が激しく崩壊する際には、気泡内部の気体が超高温・超高压になるため、気泡周囲には、局所的に高温の場が形成される。このような場合は、High-Intensity Focused Ultrasound (HIFU)における治療効果を高めるといふ見解がある。特に、集束超音波により発生したキャビテーション気泡界面で、超音波が反射することにより生じる二次キャビテーションの効果が注目されている。また、J-PARC で進行中の核破砕中性子源の開発では、キャビテーションに起因する装置寿命の低下が深刻な問題となっている。これは、水銀ターゲットに陽子ビームを照射する際に生じる圧力波の反射によって形成される負圧により水銀キャビテーション気泡が発生し、キャビテーション気泡が崩壊する際に生じる衝撃波と液体ジェットにより水銀容器の壁面が損傷するためである。この対策として水銀中に微小なガス気泡を注入し、圧力波の減衰させる方法が検討されている。このように、キャビテーションの初生とその後の崩壊は、流体機械の損傷などの工学的な問題に留まらず、最新の科学技術に対して重要な問題を提起している。

### 2. 研究の目的

本研究では、非平衡相変化を考慮した改良 Ghost Fluid 法による直接数値解析や壁面近傍でのレーザ誘起気泡の成長崩壊実験及び集束超音波によるキャビテーションの初生及び崩壊実験を通して、様々な液体中でのキャビテーション気泡の力学を扱う解析手法の確立を目指す。そして、HIFU における集束超音波によるキャビテーション初生機構を解明し、キャビテーション気泡が HIFU に及ぼす影響を調査するとともに、核破砕中性子源の開発における水銀中でのキャビテーション気泡の初生及び崩壊の物理を解明することを目的としている。

### 3. 研究の方法

#### (1) 非平衡相変化を考慮したキャビテーション気泡の力学に関する解析手法の構築

Ghost Fluid 法を改良し、蒸気と非凝縮性気体が混入した気泡の成長崩壊挙動を扱う手法を構築する。また、入射衝撃波とキャビテーション気泡の干渉を Ghost Fluid 法を用いて数値計算する。

#### (2) HIFU におけるキャビテーション気泡の力学解析

正弦波状のパルス波を気泡に照射した際の、気泡界面での後方散乱による圧力場を、Ghost Fluid 法を用いてシミュレートし、気泡径と入射波の波長との比が液体中の負圧の形成に及ぼす影響、ならびに入射波の波形とキャビテーション初生との関係を調査する。

また、集束超音波を気泡に照射した際の、気泡界面での後方散乱によるキャビテーションの初生機構を、集束音波発生装置を用いた実験ならびに Ghost Fluid 法による数値計算により解明する。実験では、気泡核として集束超音波の焦点付近に生成したレーザ誘起気泡を用い、集束超音波がレーザ誘起気泡の界面で後方散乱することにより形成されるキャビテーションの成長機構の解明を主眼とする。数値計算では、入射超音波の波形が、気泡界面での後方散乱による負圧の形成に及ぼす影響を明らかにする。

#### (3) 核破砕中性子源の開発におけるキャビテーション気泡の初生と崩壊に関する解析

狭い流路を模した平行な剛体壁面間にレーザ誘起気泡を生成し、その成長崩壊挙動を高速度ビデオカメラで可視化する。壁面間距離と気泡生成位置を変化させた実験を行い、壁面間距離と気泡径との比が、気泡の崩壊形態と材料損傷に及ぼす影響を明らかにする。また、剛体壁面間での気泡の成長崩壊過程を、Ghost Fluid 法及び境界要素法を用いてシミュレートし、実験における気泡の変形挙動及び壁面衝撃圧力を数値的に予測する。

### 4. 研究成果

#### (1) 非平衡相変化を考慮したキャビテーション気泡の力学に関する解析手法の構築

気泡界面での相変化を考慮した Ghost Fluid 法を用いて、蒸気泡と集束衝撃波との干渉に関する数値シミュレーションを遂行した。Sankin ら及び Klaseboer らの実験結果と比較した結果、本シミュレーションにより、実験を予測できることが示された。

また、蒸気と非凝縮性気体が混入した気泡の成長崩壊挙動を扱う手法を構築した。本手法では、界面での相変化と非凝縮性気体の拡散が考慮されている。本手法を用いて気泡崩壊を数値計算した結果、非凝縮性気体が界面近傍に蓄積し、気泡崩壊が緩和されることが示された。

#### (2) HIFU におけるキャビテーション気泡の力学解析

##### ① 気泡界面での圧力波の後方散乱シミュレーション

図 1 に解析モデルの概略図を示す。圧力  $p_0$  の水中で静止状態にある初期半径  $R_0$  の単一空気気泡の左側から最大圧力  $p_s$ 、密度  $\rho_s$  の半波長の正弦波が入射する。入射波の初期波形を式(1)に示す。

$$p = p_A \sin \left\{ -\frac{2\pi}{\lambda} (z - z_0) \right\}, \quad z_0 - \frac{\lambda}{2} \leq z \leq z_0 \quad (1)$$

ここで、 $\lambda$  は波長、 $p_A$  は圧力振幅を表しており、 $p_A = \Delta p = p_s - p_0$  である。また  $z_0$  は波面の先頭の位置である。本問題は、気泡の崩壊時間に関連する特性時間  $t_0 = R_0 / \sqrt{\Delta p / \rho_s}$  と入射波の周期  $T$  により特徴づけられる。本解析では、半波長の入射波を想定したので、波

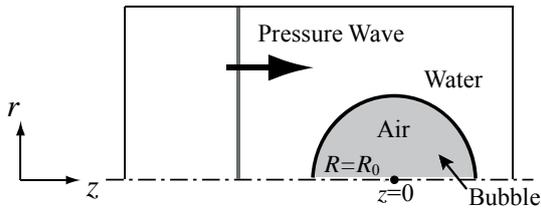


図1 気泡界面での圧力波の後方散乱

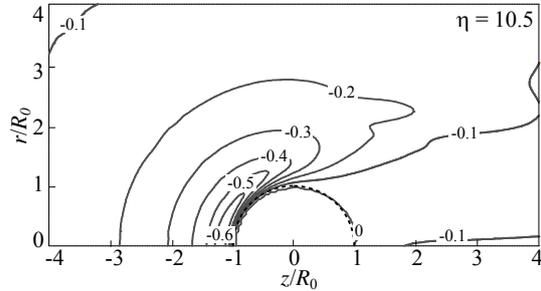


図2 各点での圧力の最小値の分布

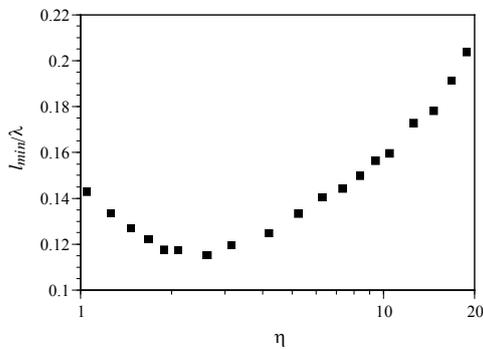


図3 圧力が極小値をとる位置（気泡界面からの距離）とηとの関係

動の代表時間として  $t_s = T/2$  を用いる。このとき、二つの特性時間の比は、 $c$  を音速とするとき、 $\eta = t_0/t_s = (R_0/\lambda)(2c/\sqrt{\Delta p/\rho_s})$  となる。本解析では、 $R_0/\lambda$  をパラメータとして解析を行い、 $\eta$  を用いて結果を整理した。

数値解析では、軸対称 Euler 方程式を、Ghost Fluid 法を用いて解いた。なお、水及び気泡内気体（理想気体）は、Stiffened Gas 状態方程式でモデル化した。

図2に気泡周辺の各格子点における時間履歴において観測された圧力の最小値の分布を示す。なお、 $\eta = 10.5$  としており、圧力は  $\Delta p$  で無次元化されている。図2より、気泡の上流側に負圧が形成されていることがわかる。図3は、図2のような圧力分布において、圧力が極小値をとる位置（気泡界面からの距離）を  $l_{\min}$  とするとき、 $\eta$  と  $l_{\min}$  との関係を示す。 $l_{\min}$  は超音波の波長で無次元化されている。図3より、 $l_{\min}$  は約  $\eta = 2$  で極小値をとり、 $\eta > 2$  では、 $\eta$  に対して増加関数であることがわかる。また、図2のような負圧の分布において、適切な閾値を定めて算出した負圧領域の体積を  $V$ 、負圧の持続時間を  $\tau$  と定義し、両者の積  $V\tau$  と  $\eta$  との関係进行调查した結果、 $V\tau$  は  $\eta$  に対して極大値をとることが明らかとなった。 $V\tau$  は均質核生成理論におけ

るキャビテーション初生の指標であり、 $V\tau$  が大きいということは、キャビテーションが発生しやすいことを表している。

## ② 集束超音波によるキャビテーション初生実験とその解析

実験装置の概略図を図4に示す。脱気水で満たされた容器中に集束超音波発生装置（口径：80 mm、曲率半径：80 mm、共振周波数：1.1 MHz）を設置する。集束超音波の焦点付近に、Nd:YAG レーザを集光し、レーザ誘起気泡を生成する。撮影には、最大で125万コマ毎秒まで設定できる高速度ビデオカメラとストロボライトを使用して、気泡を高時間解像度で撮影する。また、Nd:YAG レーザとカメラ及び集束超音波のトリガタイミングはパルスジェネレータにより制御する。集束超音波の照射時刻を変化させることにより、

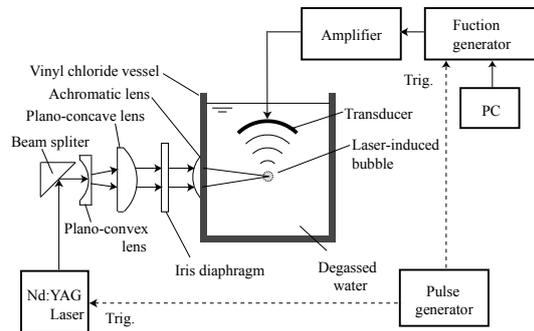


図4 集束超音波によるキャビテーション初生実験

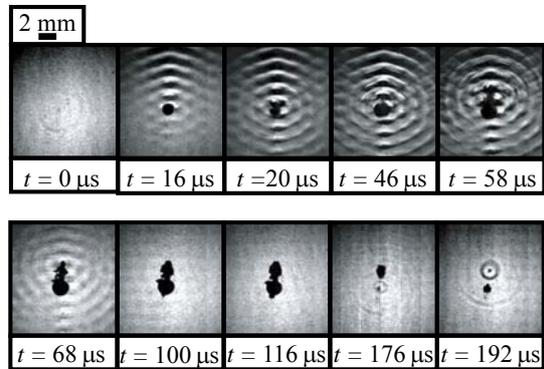


図5 レーザ誘起気泡界面での集束超音波の後方散乱によるキャビテーションの初生と崩壊

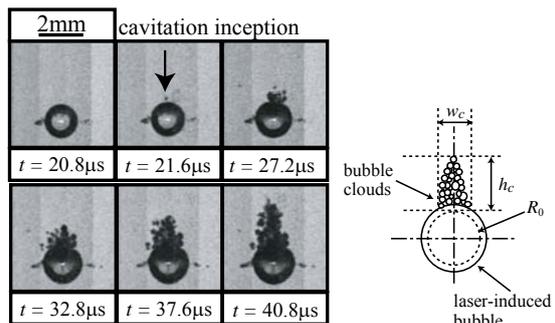


図6 キャビテーションの初生と気泡クラウドの成長

超音波が気泡に入射する際の気泡径をコントロールする。

図5は、レーザ誘起気泡に集束超音波を照射した際の、超音波の後方散乱により生じるキャビテーション気泡クラウドの成長と崩壊の様子である。なお、本実験では、レーザ誘起気泡がなく、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を設定している。本実験により、気泡クラウドが、最初に焦点付近に発生するキャビテーション気泡の界面において超音波が後方散乱することにより形成されることが証明された。

図6に $\eta=9.5$ のときの気泡クラウドの成長過程の観測画像を示す。高速度カメラの撮影速度は125万コマ毎秒である。また、本条件での焦点での最大圧力は35MPa程度である。図6より $t=21.6\ \mu\text{s}$ で矢印に示した位置にキャビテーション初生が確認できる。その後、キャビテーションはレーザ誘起気泡上側界面近傍で波の伝播軸方向及び横方向へ成長し、その領域が円錐状に拡大することがわかる。図6の模式図に示す気泡クラウドの成長を調査した結果、その高さ $h_c$ 、幅 $w_c$ はいずれも階段状に成長し、一定値に漸近することが明らかとなった。なお、本条件においては、レーザ誘起気泡がない場合に、キャビテーションは生成されないことから、入射集束超音波の負圧と集束超音波の気泡界面での後方散乱により生じる負圧が重ね合わされた結果、強い負圧領域が形成されることにより、キャビテーションが生成したと考えられる。また、様々な $\eta$ に対して、気泡界面からキャビテーション初生位置までの距離（波長で規格化）を、実験的に求めた。その結果、 $\eta$ が大きくなる（波長が短くなる）につれて、キャビテーションの初生位置は遠ざかる傾向が見られた。これは $\eta$ が大きくなるにつれて、キャビテーション閾値を超す負圧領域が気泡界面から遠ざかるためだと考えられる。

集束超音波が気泡界面で後方散乱する際の負圧の形成をGhost Fluid法を用いて数値解析し、実験結果と比較した。その結果、キャビテーション初生位置での圧力は約-24MPaであること、超音波の音圧が高く、その波長が短くなるにつれて、波の非線形性の効果により、波長で無次元化したキャビテーション初生位置は気泡界面から遠ざかることが示された。

### (3) 核破砕中性子源の開発におけるキャビテーション気泡の初生と崩壊に関する解析

#### ① 剛体壁面間での気泡の成長崩壊実験

核破砕中性子源の水銀ターゲット容器のキャビテーション損傷の低減策として狭い流路の設置が検討されている。そこで、狭い流路を模擬した平行な剛体壁面間での気泡の成長崩壊挙動を実験的に解析した。壁面間距離を $w$ 、各実験における気泡の体積等価半径の最大値を $R_{\text{max}}$ 、壁面間の中心軸から気泡生成位置までの距離を $\zeta_0$ としたとき、無次元

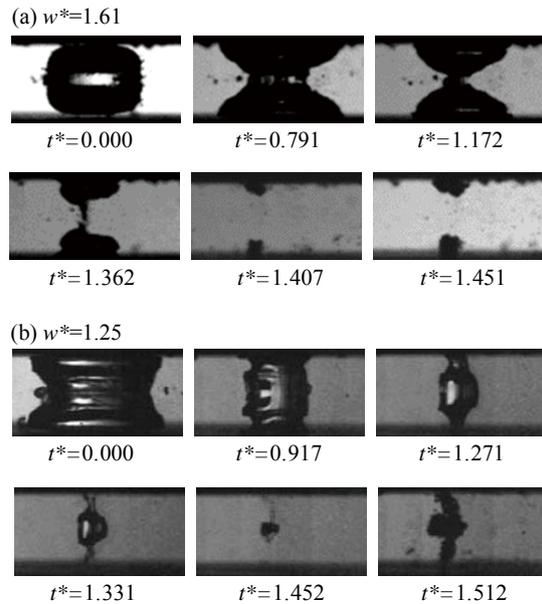


図7 平行な剛体壁面間でのレーザ誘起気泡の成長崩壊実験

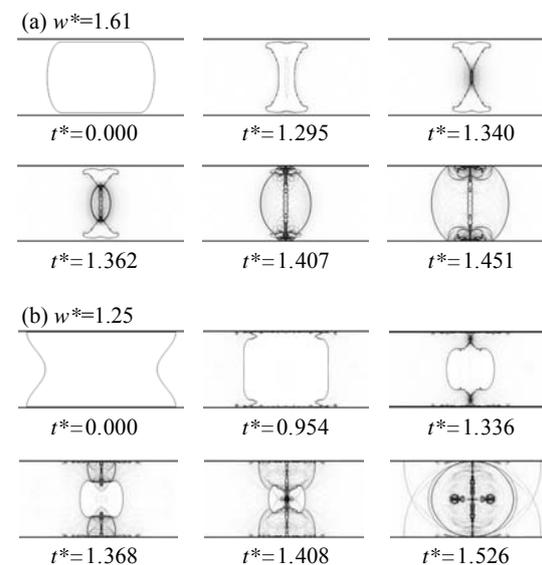


図8 平行な剛体壁面間でのレーザ誘起気泡の成長崩壊シミュレーション

パラメータ $w^* = w/R_{\text{max}}$ 、 $\zeta_0^* = \zeta_0/R_{\text{max}}$ を用いて気泡の崩壊挙動を整理した。

まず、壁面間中央( $\zeta_0^* \cong 0$ )に生成した気泡に関して述べる。 $w^*$ が十分大きい場合には、気泡は壁面の影響を受けずに壁面間中央で単一の気泡の状態で崩壊する。 $w^*$ が小さくなると、図7(a)のように、壁面間で気泡は二つに分離し、分離した気泡はそれぞれ、上下壁面に向かって並進移動しつつ、液体ジェットが発生を伴って崩壊する。この場合、気泡崩壊時には、上下壁面近傍で衝撃波の発生が観測された。さらに $w^*$ が小さい場合には、図7(b)のように、気泡は最大膨張時に砂時計状になり、その後の収縮過程で、気泡は壁面から離脱する。離脱の際に、衝撃波が観測さ

れた。壁面から離脱した気泡は、衝撃波の発生を伴いながら壁面間中央で中立崩壊する。

壁面間の中心軸から偏心した位置 ( $\zeta_0^* \neq 0$ ) に気泡を生成した際には、 $w^*$  が大きい場合には、気泡は、生成位置から近い側の壁面 (近傍壁面) に並進移動しながら近傍壁面上で崩壊する。それに伴い近傍壁面付近で衝撃波が発生する。 $w^*$  がより小さくなると、気泡生成位置から遠い側の壁面 (遠方壁面) に向かいながら移動崩壊する挙動が観測された。この崩壊形態においては、気泡が近傍壁面から離脱する際に、気泡界面の衝突に起因する衝撃波が発生し、その後、遠方壁面上で崩壊する際にも、衝撃波の発生が観測された。

以上の結果から、平行な剛体壁面間での気泡崩壊は、気泡の最大半径と流路幅との比と、気泡初生位置の流路中央からの偏心量に応じて、(a) 中立崩壊、(b) 気泡初生位置から近い側の壁面に向かう移動崩壊、(c) 気泡初生位置から遠い側の壁面に向かう移動崩壊、(d) 分離崩壊の四つに分類できることが明らかとなった。また、気泡の崩壊形態・衝撃波発生機構の変化に伴い、中立崩壊において、壁面損傷が低減される可能性が示唆された。

## ② 剛体壁面間での気泡の成長崩壊シミュレーション

上記実験に対応する数値シミュレーションを、Ghost Fluid 法及び境界要素法を用いて行った。図 8 は、Ghost Fluid 法により得られた図 7 に対応する計算結果である。最大膨張時に水平方向に伸びた楕円状の気泡の場合 ( $w^* = 1.61$ ) には、気泡はその崩壊時に二つに分離し、液体ジェットの発生を伴いながら、上下壁面に向かい崩壊する。一方、最大膨張時に気泡が砂時計形状の  $w^* = 1.25$  の場合には、実験と同様に中立崩壊することが確認された。さらに、壁面に作用する圧力を調査した結果、分離崩壊の場合には、分離したそれぞれの気泡界面を液体ジェットが貫く際に発生する衝撃波により壁面圧力が急上昇し、壁面損傷の要因となること、中立崩壊の際にも衝撃波が発生するが、壁から遠い位置で発生するため、壁面上での圧力は、分離崩壊の場合に比べて低下することが示された。

また、境界要素法を用いて、壁面間中央から偏心した位置での気泡の成長崩壊をシミュレートした。その結果、気泡初期位置が剛体壁面間の中央から大きく偏心している場合には、気泡は分離することなく、近い側の壁面に向かって液体ジェットの発生を伴いつつ崩壊し、その壁面上で高い圧力が観測されることが確認された。さらに、実験と同様に壁面間における気泡の崩壊挙動を分類したところ、境界要素法によるシミュレーションにより、実験で観測された気泡崩壊形態を概ね予測できることが示された。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 24 件)

1. 関大輝, 大久保直哉, 小笠原紀行, 高比良裕之, 集束超音波の気泡界面での後方散乱に関する数値解析, 第 29 回数値流体力学シンポジウム講演予稿集, USB-flash (B01-4), 2015, 全 8 ページ, 査読無.
2. Y. Jinbo, K. Kobayashi, M. Watanabe, H. Takahira, Numerical simulation of bubble collapse and the transfer of vapor and noncondensable gas through the bubble interface using the ghost fluid method, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 656, 012021, 2015, Total 4 pages, doi: 10.1088/1742-6596/656/1/012021, 査読有.
3. T. Ogasawara, N. Tsubota, H. Seki, Y. Shigaki, H. Takahira, Experimental and numerical investigations of the bubble collapse at the center between rigid walls, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 656, 012031, 2015, Total 4 pages, doi:10.1088/1742-6596/656/1/012031, 査読有.
4. 坪田直樹, 小笠原紀行, 高比良裕之, 剛体壁面間におけるレーザ誘起気泡の崩壊挙動に対する初期生成位置の影響, 日本流体力学会年会 2015 講演論文集, USB-flash, 2015, 全 4 ページ, 査読無.
5. 藤田圭亮, 小笠原紀行, 高比良裕之, 境界要素法を用いた平行平板間での気泡の成長・崩壊に関する数値計算, 日本流体力学会年会 2015 講演論文集, USB-flash, 2015, 全 5 ページ, 査読無.
6. H. Seki, K. Fujita, T. Ogasawara, H. Takahira, Numerical simulations of growth and collapse of a bubble between two parallel walls, Proceedings of the ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2015, USB-flash (No. AJKFluids2015-05175), 2015, Total 6 pages, 査読有.
7. H. Takahira, T. Ogasawara, N. Mori, M. Tanaka, Cavitation inception by the backscattering of pressure waves from a bubble interface, AIP Conference Proceedings Vol. 1685, 050009, 2015, Total 4 pages, doi:10.1063/1.4934425, 査読有.
8. 田中萌子, 小笠原紀行, 高比良裕之, 気泡界面での圧力波の後方散乱に関する数値シミュレーション, 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 825, 2015, 全 14 ページ, DOI: 10.1299/transjsme.15-00034, 査読有.
9. Y. Jinbo, T. Ogasawara, H. Takahira, Influence of the nonequilibrium phase transition on the collapse of inertia nonspherical bubbles in a compressible liquid, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 60, 2015, pp. 374-384, http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.07.021, 査読有.
10. 関大輝, 小笠原紀行, 高比良裕之, 平行平板間での気泡崩壊に関する数値解析, 第 28 回数値流体力学シンポジウム講演予稿集, USB-flash (No. C01-3), 2014, 全 8 ページ, 査読無.

11. 小笠原紀行, 坪田直樹, 関大輝, 高比良裕之, 剛体壁面間における単一気泡の崩壊挙動に関する実験および数値解析, キャビテーションに関するシンポジウム(第17回)講演論文集, USB-flash, 2014, 全6ページ, 査読無.
12. 坪田直樹, 野田達矢, 小笠原紀行, 高比良裕之, 剛体壁面間におけるレーザ誘起気泡の崩壊に伴う衝撃波の可視化, 混相流シンポジウム2014講演論文集, USB-flash (No. E154), 2014, 全2ページ, 査読無.
13. H. Seki, S. Itatani, T. Ogasawara, H. Takahira, Numerical simulations of bubble collapse in a narrow liquid mercury channel by the ghost fluid method, Extended Abstracts of the 1st International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (COMPSAFE 2014), CD-ROM, 2014, pp. 562-565, 査読無.
14. 板谷翔平, 関大輝, 小笠原紀行, 高比良裕之, Ghost Fluid法を用いた狭い流路内での気泡崩壊に関する数値シミュレーション, 第27回数値流体力学シンポジウム講演予稿集, USB-flash (E06-2), 全8ページ, 2013, 査読無.

[学会発表] (計22件)

1. 森直人, 佐野太亮, 小笠原紀行, 高比良裕之, レーザ誘起気泡界面での集束超音波の後方散乱によるキャビテーションクラウドの成長, 日本機械学会関西支部第91期定時総会講演会, 2016年3月11日, 大阪電気通信大学, 寝屋川市.
2. 関大輝, 大久保直哉, 小笠原紀行, 高比良裕之, 集束超音波の気泡界面での後方散乱に関する数値解析, 第29回数値流体力学シンポジウム, 2015年12月15日, 九州大学, 福岡県春日市.
3. Y. Jinbo, K. Kobayashi, M. Watanabe, H. Takahira Numerical simulation of bubble collapse and the transfer of vapor and noncondensable gas through the bubble interface using the ghost fluid method, 9th International Symposium on Cavitation, 2015年12月9日, Lausanne, Switzerland.
4. T. Ogasawara, N. Tsubota, H. Seki, Y. Shigaki, H. Takahira, Experimental and numerical investigations of the bubble collapse at the center between rigid walls, 9th International Symposium on Cavitation, 2015年12月8日, Lausanne, Switzerland.
5. 坪田直樹, 小笠原紀行, 高比良裕之, 剛体壁面間におけるレーザ誘起気泡の崩壊挙動に対する初期生成位置の影響, 日本流体力学会年会2015, 2015年9月27日, 東京工業大学, 東京都.
6. 藤田圭亮, 小笠原紀行, 高比良裕之, 境界要素法を用いた平行平板間での気泡の成長・崩壊に関する数値計算, 日本流体力学会年会2015, 2015年9月27日, 東京工業大学, 東京都.
7. H. Seki, K. Fujita, T. Ogasawara, H. Takahira, Numerical simulations of growth and collapse of a bubble between two parallel walls, The ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2015, 2015年7月30日, Seoul, Korea.
8. H. Takahira, T. Ogasawara, N. Mori, M. Tanaka, Cavitation inception by the backscattering of pressure waves from a bubble interface, 20th International Symposium on Nonlinear Acoustics, 2015年7月1日, Lyon, France.
9. 関大輝, 小笠原紀行, 高比良裕之, 平行平板間での気泡崩壊に関する数値解析, 第28回数値流体力学シンポジウム, 2014年12月9日, タワーホール船堀, 東京都.
10. 小笠原紀行, 坪田直樹, 関大輝, 高比良裕之, 剛体壁面間における単一気泡の崩壊挙動に関する実験および数値解析, キャビテーションに関するシンポジウム(第17回), 2014年11月20日, 東京大学生産技術研究所, 東京都.
11. T. Ogasawara, H. Takahira, T. Naoe, M. Futakawa, A remark on cavitation damages in a narrow gap: The bubble collapse in a narrow gap and the corresponding shock wave emissions, 12th International Workshop on Spallation Materials Technology, 2014年10月21日, Bregenz, Austria.
12. 坪田直樹, 野田達矢, 小笠原紀行, 高比良裕之, 剛体壁面間におけるレーザ誘起気泡の崩壊に伴う衝撃波の可視化, 混相流シンポジウム2014, 2014年7月28日, 道民センター「かでの2・7」, 札幌市.
13. H. Seki, S. Itatani, T. Ogasawara, H. Takahira, Numerical simulations of bubble collapse in a narrow liquid mercury channel by the ghost fluid method, The 1st International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (COMPSAFE 2014), 2014年4月16日, 仙台国際センター, 仙台市.
14. Y. Jinbo, S. Itatani, T. Ogasawara, H. Takahira, Influence of the nonequilibrium phase transition on the nonspherical bubble collapse in a compressible liquid, 8th International Conference on Multiphase Flow (ICMF 2013), 2013年5月27日, Jeju, Korea.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高比良 裕之 (TAKAHIRA HIROYUKI)  
大阪府立大学・工学研究科・教授  
研究者番号：80206870

### (2) 研究分担者

小笠原 紀行 (OGASAWARA TOSHIYUKI)  
大阪府立大学・工学研究科・助教  
研究者番号：00552184