

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K20969

研究課題名（和文）プラズマを利用したキャビテーション気泡内圧力・ガス種リアルタイム同時計測

研究課題名（英文）Real-time simultaneous measurement of pressure and gaseous species inside cavitation bubbles by using plasma

研究代表者

佐藤 岳彦（Sato, Takehiko）

東北大学・流体科学研究所・教授

研究者番号：10302225

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、単一キャビテーション気泡の気泡崩壊時に発生する衝撃波、化学反応、発光などの物理現象を支配する重要な因子である気泡内圧力やガス種を実験的に計測する手法を開発し計測することに成功した。単一キャビテーションの気泡内圧力は、放電現象を利用した新しい圧力測定法の開発により、気泡最大径における気泡内圧力が 0.39×10 [Pa] であることを明らかにした。また、気泡内にプラズマを発生させ発光を分光することで含まれるガス種を特定する手法を開発し、水蒸気を起因とするOHラジカルや水素原子、酸素原子の他に、窒素分子や酸素分子が含まれている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

本研究は、単一キャビテーション気泡の物理化学現象を理解する上で重要な気泡内圧力や含まれているガス種を明らかにした。これにより、飽和蒸気圧を仮定した理論・数値解析をさらに発展させ、未解明であったキャビテーション現象をより深く理解することが可能になるなど学術的意義のある成果となった。また、産業分野においても計測困難なキャビテーション現象を計測する手法を提供するとともに、より精緻な予測による産業機械の設計などへの展開が期待できることから、社会的意義が高い成果となった。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed the method and successfully measured the internal bubble pressure and identified gas species experimentally, which are important factors governing physical phenomena such as shock waves, chemical reactions, and luminescence generated at the bubble collapse in single cavitation bubbles. The pressure inside a single cavitation bubble was found to be 0.39×10 [Pa] at the maximum bubble diameter by developing a new pressure measurement method using the discharge phenomenon. A method was also developed to identify the gas species contained in the bubble by generating plasma inside the bubble and spectroscopy of the luminescence, and we clarified that the gas contained nitrogen and oxygen molecules in addition to OH radicals, hydrogen, and oxygen atoms originating from water vapor.

研究分野：プラズマ流体工学

キーワード：気泡 圧力 放電 分光 水素 酸素 窒素 OHラジカル

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

キャビテーション現象は流体機械だけでなくバイオ・医療や農業・食品など幅広く応用が進められている。しかしながら、その現象は極めて複雑なため、キャビテーション現象の挙動を理解するために、レーザーやスパークにより生成される単一キャビテーション気泡を用いた研究が進められてきた。この気泡は、液中の一点を瞬間的に高温に加熱し、発生した蒸気が気泡を膨張させることで形成される。気泡の収縮過程は理論から導出されたレイリー・プレセット方程式に従うため、単一キャビテーション気泡として利用されてきた。一方、気泡生成時に高温で加熱するため気泡内の圧力や含まれているガスが、実際のキャビテーション現象における気泡の状態と異なっている可能性が指摘されていた。一方、気泡の生成・膨張・収縮・崩壊の一連の過程は、1 ms 以下と短時間であることが多く、かつ圧力範囲は水の飽和蒸気圧である 2300 Pa (20) から数十 MPa (推算値)までと広範囲であり、気泡径も 1 mm 程度小さいため、計測が極めて困難であった。単一キャビテーション気泡内の圧力の計測やガス種特定ができれば、キャビテーション現象の理解をより深めることが可能となる。

申請者は、水中でレーザーとスパークによる単一気泡の生成実験をしているとき、気泡崩壊後の残留微細気泡量が異なることに気付き、気泡内に水素ガスが含まれていることを突き止めたが、このとき窒素や酸素については特定できなかった。その後、「プラズマ誘起気泡の成長・収縮を利用した超高密度電荷集積法の開発」(H27-28 挑戦的萌芽)において、レーザー誘起気泡内で放電させ可視化することに成功した。気泡内で一様に発光する様子から、発光分析によりガス種を特定できること、そして気泡内の圧力が低いことに気が付いた。気泡内が大気圧の場合、プラズマは内面上を枝状に進展するため、発光の様子で圧力の高低が判別できると考えた。さらに、パッシェン曲線を用いれば、気泡内の圧力を放電開始電圧から算出できることに思い至った。以上の経緯により、圧力・ガス種リアルタイム同時計測法開発の提案をすることとした。

2. 研究の目的

本研究では、レーザーやスパークにより生成する単一キャビテーション気泡内の圧力や含有ガス種を特定するために、レーザー誘起気泡中の圧力やガス種を同時にリアルタイムで定量計測する革新的手法を開発・計測することを目的とする。本手法を確立することで、将来キャビテーション気泡内の熱流体・反応特性を明らかにすることや、流体機械のキャビテーション、燃料噴霧装置内のキャビテーション、沸騰などの気液相変化を利用する産業機器などの圧力や化学種をリアルタイムで計測し、微細気泡・超微細気泡の生成過程や安定化機構などの解明に貢献する基盤技術を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

研究は以下の手順で行った。(1)実験装置作製と放電開始電圧の計測：電極間距離 d の平行平板電極を水中に設置し、一方の電極に電圧 V を印加する。電極間にレーザー誘起気泡を発生させると、気泡は膨張し電極間をガスで満たすようになる。気泡が大きくなり気泡内の圧力が十分に下がると、電極間で放電が発生する。このとき、放電開始電圧は V となる。(2)気泡内のガス種の特定と気泡内圧力計測：気泡内のガス種は、放電時の発光分析で特定し、そのガス種のパッシェン曲線を作成することで、 V と d より p を求める。(3)現象の一般化：放電時と最大径の時の気泡の可視解析より気泡径と時間を無次元化する。なお、高時間分解能の分光器を導入する。これにより現象が一般化され、レーザーの出力のばらつきなどによる気泡径のばらつきの影響を排除することが可能である。また、計測された圧力と不凝縮ガス分圧の値を用いて、気泡の運動方程式を解析し、実験結果との比較を行う。(4)特定ガスリアルタイム計測プローブの作製：光ファイバーと微小電極を組合せた微小域圧力・ガス種リアルタイム同時計測プローブを作製する。

4. 研究成果

本研究で開発した圧力計測装置を図1に示す。気泡発生部、可視化部、放電部からなり、水を満たした容器内に平行するワイヤ電極を設置し、電極間にナノパルスレーザーを収束することで、気泡を発生させた。気泡が成長すると2つのワイヤ電極を包含するが、ワイヤ電極間距離 d と電極に印加する電圧 V を適宜設定すると、電極間で放電が発生する。このときの気泡の変化を高速度カメラで撮影し、放電時の気泡径と最大径を計測する。ここで、電極間距離 d と圧力 p の積 pd と放電開始電圧の関係を表すパッシェン曲線を用いると、既知の d と測定した V から p を求めることができる。さらに、放電時の気泡径を最大径で無次元化することで、気泡径と圧力の相関を求める。印加電圧は 1.5 kV と 2.0 kV とした。最大径の時の圧力は、放電時の圧力から断熱変化を仮定して求めた。これにより、気泡が最大となるときの圧力の推定に成功した。気泡最大径における気泡内圧力は、電極間距離および印加電圧にかかわらず、概ね一定の値となり、平均値は 0.39×10^5 [Pa] であることが示された。さらに、圧力計測の精度を高めるため、一様電界の形成が可能な平面電極間でも計測し、ワイヤ電極間の結果と概ね同じであることを確認した。

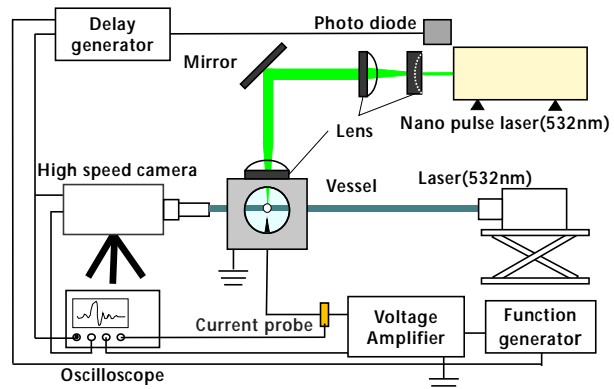


図1 新たに開発した気泡内圧力計測装置

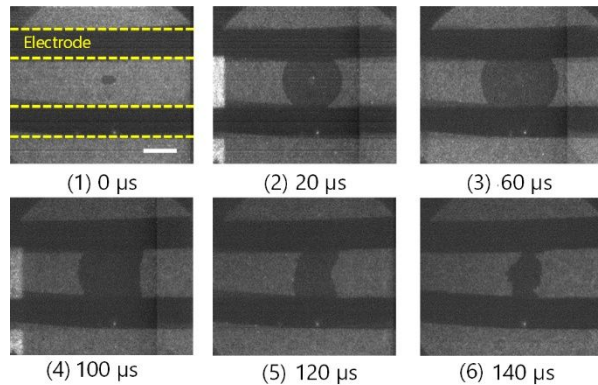


図2 ワイヤ電極間で膨張・収縮する気泡

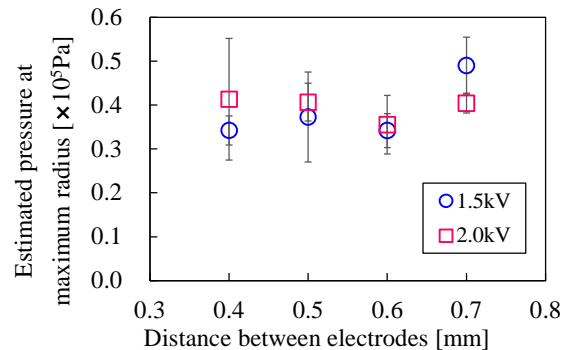


図3 異なる電極間距離における圧力計測結果

気泡内ガス種の特定に、ゲートトリガー付きの高感度分光器を利用し、水蒸気が解離して生成されたOHラジカルや水素原子、酸素原子の発光を確認した。さらに、発光分光を積算させることで、発光分光の詳細な解析を進め、窒素分子や酸素分子の発光を確認することができた。この結果は、溶存していた空気が気泡内に取り込まれていることを示唆する結果であり、キャビテーション研究を進める上で重要な知見となった。さらに、気泡が膨張・収縮する過程においてどのように気泡内ガス種が変化するのかについても解析を進めた。これにより、水蒸気を起因とする化学種は気泡の収縮と共に大きく減少するが、気泡生成時に取り込まれたと考えられる窒素分子の減少は比較的緩やかであることが示された。これは、気泡内を占める主たる化学種である水蒸気が凝縮により急速に減少する一方、気泡内の窒素分子は、気泡収縮時の気泡内圧力の増加により水中に溶解していることを示唆しており、気泡内の現象を理解する大きな知見となった。特定ガスリアルタイム計測プローブは、光ファイバー先端に放電部を設け、放電時に発生する発光を光ファイバーで伝送し、出口に特定のガス種が発光する光の波長を中心波長にしたバンドパスフィルターを設置し、特定波長のみを高感度フォトダイオードで検出できる。本研究では、窒素ガスの特定波長を抽出し検出できるようにし、出力信号を計測することでリアルタイム計測が可能であり、非定常現象に利用できる新しい計測手法を提案した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 堀内堅斗, 橋洋司, 中嶋智樹, 劉思維, 倅田正浩, 佐藤岳彦
2. 発表標題 水蒸気中の冷却管近傍における不凝縮ガス計測
3. 学会等名 第32回環境工学総合シンポジウム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takehiko Sato, Marc Tinguely, Masanobu Oizumi, Mohamed Farhat
2. 発表標題 Formation of post-collapse bubbles of laser- or spark-induced bubbles
3. 学会等名 The International Symposium on Plasma & Fine Bubbles (ISPFB2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Siwei Liu, Tomoki Nakajima, Takehiko Sato
2. 発表標題 Degradation of Chlorinated Compounds by Treatment of Repetitive Plasma Discharges
3. 学会等名 12th International Symposium on Nonthermal/Thermal Plasma Pollution Control Technology and Sustainable Energy & International Symposium on Electrohydrodynamics 2022 (ISNTP-12 and ISEHD 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takehiko Sato, Hidemasa Fujita, Seiji Kanazawa, Kiyonobu Ohtani, Atsuki Komiya, Toshiro Kaneko
2. 発表標題 Propagation processes of underwater streamers
3. 学会等名 National Conference on Recent Developments and Evolving Trends In Plasma Science and Technology & Pre-Conference Workshop on Modelling and Simulation of Industrial Plasmas (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Marc Tinguely, Kiyonobu Ohtani, Mohamed Farhat, Takehiko Sato
2. 発表標題 Visualization of Collapse Processes of Laser-Induced Cavitation Bubble
3. 学会等名 22nd International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤田英理, 佐藤岳彦, 金澤誠司, 大谷清伸, 中嶋智樹, 劉思維
2. 発表標題 水中放電による気泡生成における水の導電率の影響
3. 学会等名 日本機械学会第100期流体工学部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤岳彦, 中嶋智樹, 堀内堅斗, 劉思維, 矢野猛
2. 発表標題 水蒸気中の不凝縮ガス計測法の開発
3. 学会等名 第31回環境工学総合シンポジウム2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Satoshi Uehara, Sayaka Kamata, Tomoki Nakajima, Yuka Iga, Seiji Kanazawa, Mohamed Farhat, Takehiko Sato
2. 発表標題 Pressure Measurement in Laser-Cavitation Bubbles
3. 学会等名 21st International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takehiko Sato, Satoshi Uehara, Ryo Kumagai, Takashi Miyahara, Masanobu Oizumi, Tatsuyuki Nakatani, Shiroh Ochiai, Takamichi Miyazaki, Hidemasa Fujita, Seiji Kanazawa, Kiyonobu Ohtani, Atsuki Komiya, Toshiro Kaneko, Tomoki Nakajima, Marc Tinguely, Mohamed Farhat
2. 発表標題 Formation and Measurement of Plasma Fine Bubbles
3. 学会等名 12th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology (APSPT-12) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Satoshi Uehara, Sayaka Kamata, Tomoki Nakajima, Yuka Iga, Seiji Kanazawa, Takehiko Sato
2. 発表標題 Improvement of Pressure Measurement Method in a Laser-Induced Cavitation Bubble
3. 学会等名 20th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上原聡司, 佐藤岳彦, 鎌田さやか, 中嶋智樹, 金澤誠司, 伊賀由佳, ファーラット モハメッド
2. 発表標題 レーザー誘起気泡中の圧力測定
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

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 凝縮ガス中の不凝縮ガスの制御方法及び制御ユニット並びに判別方法及び判別ユニット	発明者 佐藤岳彦, 五十嵐敬 他6名	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-071783	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
---------	---------