

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 19 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13864

研究課題名(和文) 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

研究課題名(英文) Development of ultrahigh density charge accumulation method using the growth and the contraction of plasma-induced bubbles

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) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、プラズマ誘起気泡の崩壊時に超高密度電荷を集積させることで、エネルギー収束を飛躍的に高めることを目的とし、以下の成果を得た。ナノパルスレーザーを収束し気泡を純水中に発生させ、気泡径が最大になったときに気泡内に放電する装置ならびに可視化・計測装置の開発に成功した。放電により気泡内に電荷を供給し、気泡が崩壊する際に表面積が急速に減少することを利用して電荷密度を高めると、気泡から水中へストリーマ状のチャンネルが形成されることが明らかになった。この結果は、液体の絶縁性を向上させると高密度を上昇させることができることを示唆しており、高密度電荷集積法の開発の基盤となる発見である。

研究成果の概要(英文)：This research aimed at forming very high density of electric charge by using a collapse process of a plasma-induced bubble. The bubble was formed by a nano-pulse laser of 532 nm and a discharge was generated using a submerged narrow electrode with application of positive or negative voltages. The collapse process of the bubble was visualized by a high speed camera of 10 Mfps in frame rate. Thus, a device which can discharge in a laser-induced bubble and can visualize the phenomenon was successfully developed. It was found that streamer channels were generated when the diameter of the bubble decrease in the cases of positive and negative voltage although the streamer was not generated without the discharge. This result implies that the elevated density of the charge probably generated a high potential which is greater than the threshold of inception electric field strength for the streamer. This is an important founding to develop a method to accumulate high density of electric charge.

研究分野：プラズマ流体工学

キーワード：気泡内放電 可視化 レーザー誘起気泡 放電電流 帯電 数値解析 高密度電荷

1. 研究開始当初の背景

本研究は、キャビテーション気泡の崩壊時のエネルギー収束を飛躍的に高め、エネルギーに指向性を持たせる手法を開発し、キャビテーション気泡利用の領域を医療、環境、材料などの分野から小型の高エネルギー源や高輝度光源などに広げ、キャビテーション気泡を利用した技術革新を提案することを目的とする。

キャビテーション気泡は崩壊する時に、衝撃波やマイクロジェット、化学反応、発光、微細気泡生成などが発生する。これらの現象を解明するために、今までの多くの研究では、パルスレーザを水中に収束させたり[1]、浸沈させた電極間スパーク放電により[2]水中の一点に高温プラズマを形成し、球状の蒸気気泡を生成し利用してきた。気泡は成長すると冷却され、最大径に達した後、崩壊過程に入り収縮する。収縮が限界に達し崩壊すると、気泡内の圧力と温度が急激に上昇し、化学反応や発光、衝撃波などが発生する[3]。このように気泡崩壊現象は物理現象が重畳する極めて複雑な場を形成するが、この極限現象を支配する重要なパラメータが気泡内ガス量とガス特性であることが知られている。例えば、リバウンド気泡の大きさや衝撃波のエネルギーは気泡内の不凝縮ガス量に影響を受ける[4]。また、ソノルミネッセンスの発光強度は気泡内に含まれるガス種に依存する[5]。申請者は、レーザとスパークについてプラズマ誘起気泡内に水素ガスが含まれていることを明らかにしている[6]。これらの研究を通して、申請者は電荷を気泡に導入できれば、収縮過程において、極めて高密度の電荷を気泡内に集積できるのではないかと考えた。また、電荷の高密度化とマイクロジェットの形成によりエネルギー密度を高め、指向性も得られると考えた。

2. 研究の目的

本研究は、プラズマ誘起気泡の崩壊時に超高密度電荷を集積させることで、エネルギー収束を飛躍的に高め、マイクロジェットの形成を利用したエネルギーに指向性を持たせる手法を開発することを目的とする。電荷の集積は、気泡が成長し最大径の時に帯電させ、気泡が崩壊する時に電荷を逃がさないようにすることで行う。これにより、キャビテーション気泡利用の領域を医療、環境、材料などの分野から小型の高エネルギー源や高輝度光源などに広げ、プラズマ誘起気泡を利用した技術革新を提案することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、高密度電荷集積法を開発するために以下の項目について研究を行う。レーザ誘起気泡を液体中に発生させ、気泡径が最大になったときにのみ気泡内に直接電極が露出するように電極位置を調整し、気泡内にプラズマを生成制御する手法を開発する。

電荷内包気泡の崩壊過程を可視化する。高密度電荷が崩壊過程に与える影響を考察する。高電荷集積時の気泡収縮の数値解析を行う。キャビテーション気泡を利用した超高密度電荷集積法を提言する。

4. 研究成果

レーザで誘起したキャビテーション気泡内への放電を行う装置を製作した。実験装置は、ナノパルスレーザおよびミラー、レンズ、フィルターからなるレーザ収束光学系を構築した。ナノパルスレーザは波長 532 nm パルス幅 8 ns を単発で発振させ、導電性が低い超純水で満たした容器内の中心に収束させ、プラズマ誘起気泡を発生させることに成功した。次に、背景光、レンズ、超高速カメラからなる可視化システムを構築した。レーザで誘起した気泡内に、先端を研磨した直径 0.5 mm の電極を露出させることに成功するとともに、先端径 30 μm で直 0.1 mm の針状電極を 0.5 μm 単位で位置調整し、気泡の中心に針が位置するように制御できるようにした。さらに、このナノパルスレーザから発せられた光をフォトダイオードで感知しトリガとして、超高速カメラと放電装置を同期し、ファンクションジェネレータで立ち上げたパルス電圧を電圧増幅器で増幅し、気泡内で放電を行うことに成功し、図 1 に示すように、気泡内の放電の自発光を、イメージインテンシファイアを用いて撮影することにも成功した。

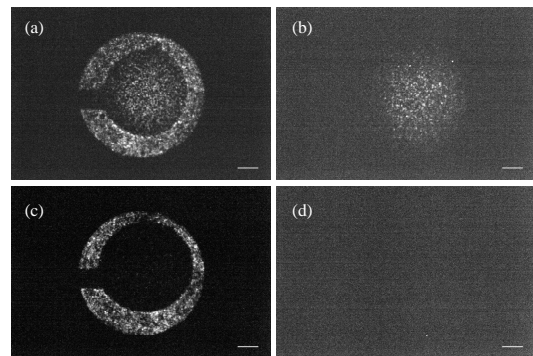


図1 気泡内放電の様子。(a)背景光有りの場合に放電させた場合。左側の影は電極。(b)背景光無しの場合に放電させた場合。(c)背景光有りの場合に放電させない場合。(d)背景光無しの場合に放電させない場合。スケールバーは 0.5 mm。

また、ナノパルスレーザにより生成したキャビテーション気泡の変化の様子を図 2 に示す。放電した場合、特に負極性電圧印加時には、気泡崩壊後の再膨張時に気泡が変形していることが示されている。この気泡径の変化を解析した結果を図 3 に示す。崩壊後の気泡径は、放電した場合の方が大きくなることが明らかになった。これは、放電による電荷のクーロン力により再膨張時の気泡径が大きくなることが推察される。そこで、電荷を考慮した気泡径の変化の数値解析を行い、電荷の影響について検証した。図 4 に電荷を考

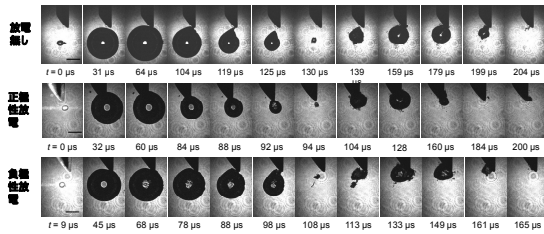


図2 レーザ誘起気泡の生成崩壊中の気泡の変形の様子。(上段)放電しない場合。(中段)正極性電圧を印加し放電させた場合。(下段)負極性電圧を印加し放電させた場合。背景光有りの場合に放電させた場合。スケールバーは0.5 mm。

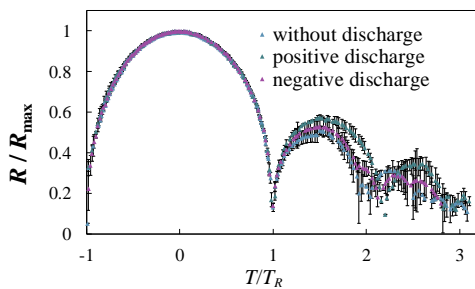


図3 無次元化した気泡径の時間変化。

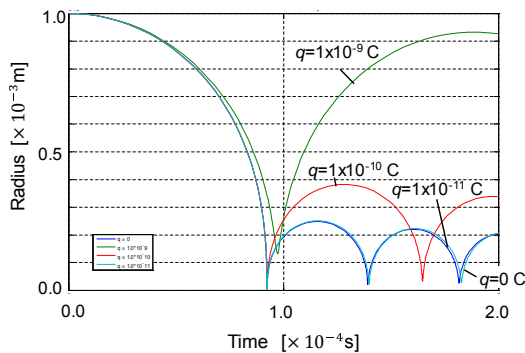


図4 気泡内電荷を考慮した崩壊過程の数値解析結果。

慮した結果を示す。これより、気泡内の電荷量が多いほど再膨張時の気泡径が大きくなることが示された。すなわち、気泡内帯電の影響は気泡の崩壊過程に影響を与えることが明らかになった。また、気泡内に電荷が存在する場合は、気泡内に不凝縮ガスが存在しなくても崩壊後に再膨張を起こすことも示した。

電極径を0.1 mmにすると、針電極の影響をほとんど受けずに気泡は崩壊する。崩壊過程を100 ns間隔で連続撮影し気泡挙動を解析した結果、放電により気泡内に帯電した電荷密度が高まると、気泡から水中へストリーマ状のチャネルが形成されることが明らかになった。この結果は、液体の絶縁性を高めることで、気泡内の電荷密度を高められることを示唆しており、高密度電荷集積法の開発の基盤となる現象を発見し、本方法を用いた高密度エネルギー生成法を提案することができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

Tetsuji Shimizu, Masashi Hara, Naoya Kishimoto, Daisuke Yoshino, Gregor E. Morfill and Takehiko Sato, Gas Flow Formation by Plasma Discharge on Water Surface, International Journal of Plasma Environmental Science and Technology, 査読有, Vol.10, No. 1, 2016, pp.83-87.

Hidemasa Fujita, Seiji Kanazawa, Kiyonobu Ohtani, Atsuki Komiya, Toshiro Kaneko and Takehiko Sato, Role of Continuous Discharge Current for Secondary Streamer in Water, International Journal of Plasma Environmental Science and Technology, 査読有, Vol.10, No. 1, 2016, pp.16-19.

Takehiko Sato, Tatsuyuki Nakatani, Takashi Miyahara, Shiroh Ochiai, Masanobu Oizumi, Hidemasa Fujita and Takamichi Miyazaki, Study on Formation of Plasma Nanobubbles in Water, Journal of Physics: Conference Series, 査読有, Vol. 656, 2015, Article No. 012036 (4 pages).

DOI:10.1088/1742-6596/656/1/012036

[学会発表](計11件)

鎌田さやか, Outi Supponen, 金澤誠司, 伊賀由佳, 中嶋智樹, Mohamed Farhat, 佐藤岳彦, プラズマ誘起気泡の崩壊過程における放電の影響, 日本機械学会東北支部第52期総会・講演会, 2017年3月14日, 東北大学(仙台)。

Sayaka Kamata, Outi Supponen, Tomoki Nakajima, Seiji Kanazawa, Yuka Iga, Mohamed Farhat, and Takehiko Sato, Effect of Discharge in a Plasma-induced Bubble on Cavitation Dynamics, 3rd Taiwan-Japan Workshop on Plasma Life Science and Technology (2016TJPL), 2016年12月16日, Ming Chi University of Technology, New Taipei City(台湾)。

熊谷諒, 金澤誠司, 大谷清伸, 小宮敦樹, 金子俊郎, 中嶋智樹, 佐藤岳彦, 負極性水中放電の進展過程の可視化, 日本機械学会東北支部第51期総会・講演会, 2016年3月11日, 東北大学(仙台)。

Takehiko Sato, Hidemasa Fujita, Seiji Kanazawa, Kiyonobu Ohtani, Atsuki Komiya, and Toshiro Kaneko, Initiation and propagation processes of underwater streamers, Joint

Symposium of the 9th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology (APSP-9) and the 28th Symposium on Plasma Science for Materials (SPSM-28), 2015年12月13日, 長崎大学(長崎)。(招待講演)

Takehiko Sato, Tatsuyuki Nakatani, Takashi Miyahara, Shiroh Ochiai, Masanobu Oizumi, Hidemasa Fujita, and Takamichi Miyazaki, Study on Formation of Plasma Nanobubbles in Water, 9th International Symposium on Cavitation (CAV-2015), 2015年12月7日, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Lausanne (スイス)。

佐藤岳彦, 水中正ストリーマの進展開始電圧に及ぼす放電パラメータの影響, 静電気学会 2015年度シンポジウム - 環境負荷低減に寄与するコーティング/表面処理技術 -, 2015年11月13日, 東京理科大学(東京)。(招待講演:平成27年静電気学会論文賞記念講演)

南共哉, 中嶋智樹, 金子俊郎, 佐藤岳彦, 水中衝撃波を用いた指向性マイクロジェットの生成, 日本機械学会第93期流体工学部門講演会, 2015年11月7日, 東京理科大学(東京)。

Tomoya Minami, Takehiko Sato, Kiyonobu Ohtani, Tomoki Nakajima, Toshiro Kaneko, and Mohamed Farhat, Microjet Formation Mechanism in a Cavitation Process, 15th International Conference on Advanced Fluid Information (AFI2015), 2015年10月28日, 仙台国際センター(仙台)。

Takehiko Sato, Yohei Nagasawa, Kiyonobu Ohtani, Takashi Miyahara, and Tatsuyuki Nakatani, Development of Bubble Generation Method by Plasma, 15th International Conference on Advanced Fluid Information (AFI2015), 2015年10月28日, 仙台国際センター(仙台)。

Hidemasa Fujita, Seiji Kanazawa, Kiyonobu Ohtani, Atsuki Komiya, Toshiro Kaneko, and Takehiko Sato, Effect of Electric Fields on the Inception of Primary and Secondary Streamers in Water, 15th International Conference on Advanced Fluid Information (AFI2015), 2015年10月28日, 仙台国際センター(仙台)。

佐藤岳彦, 藤田英理, 金澤誠司, 大谷清伸, 小宮敦樹, 金子俊郎, 水中ストリーマの進展開始電界強度への放電条件の影響, 2015年度第39回静電気学会全国大会, 2015年9月24日, 首都大学東京(東京)。

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

金澤 誠司 (KANAZAWA, Seiji)
大分大学・工学部・教授
研究者番号: 70224574

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし