

令和 2 年 6 月 29 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18821

研究課題名(和文) プラズマ帯電気泡の崩壊圧縮による極微小X線点源の開発

研究課題名(英文) Development of Micro X-ray Point Source by Collapse and Compression of Plasma-Charging 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) 4,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、プラズマ誘起気泡を帯電させ収縮時の高電荷密度を利用したX線発生法の開発を目的とした。電荷の高密度化のために不可欠な液体中の電荷輸送機構について検証し、帯電域からの逃走電荷により形成される電位ポテンシャルや遅れ時間を詳細に明らかにした。また、絶縁油を利用し電荷密度の増大を目指した。絶縁油と水を比較した場合、崩壊時の収縮速度が水の方が速く、高密度化に直結する最小気泡径も水の方が小さいことから電荷の蓄積による影響があることを示した。また、崩壊時の最小気泡径を左右する気泡内圧力の計測法をパッシェンの法則に基づき新たに開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、未だ十分に解明されていない液中の電荷輸送現象の一端を明らかにし、帯電気泡を収縮させ高電荷密度領域を形成する手法を提案した。レーザー誘起気泡の最大径時に気泡内で放電させ帯電し、気泡収縮を利用した高電荷密度化は世界でも初めての手法であり、生体の高解像度可視化に不可欠なX線発生源を極微小化の開発に資する研究で大きな社会的意義を有する。さらに、崩壊時の最小気泡径に大きな影響を与える気泡内圧力をパッシェンの法則を利用し新たに提案した。これは、キャビテーション研究で未知であった気泡内圧力情報を明らかにする手法であり、学術的意義は極めて大きい。

研究成果の概要(英文)：This study aimed at development of an X-ray generation method using high charge density at the time of collapse by charging plasma-induced bubbles. We validated the charge transport mechanism in a liquid which is essential for charge densification, and clarified the details of electric potential and delay time formed by escape of charges from the accumulated charged area. We also aimed at enhancement of charge density by using insulating oil. Comparing insulating oil and water, water has a higher shrink velocity at the time of collapse and a smaller minimum bubble diameter which is directly linked to densification. This result indicated that the charge accumulation in the bubble has the influence on the shrink velocity and the minimum bubble size. Also, based on the Paschen's law, we newly developed a measurement method of the pressure inside the bubble which strongly affects the minimum bubble diameter at the time of collapse.

研究分野：プラズマ流体工学

キーワード：帯電 電荷輸送 気泡圧力 気泡収縮 気泡崩壊 最小気泡径

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究は、流体工学におけるキャビテーション気泡力学を基盤に、電気工学や静電気工学における放電工学と帯電現象を利用して、従来数十 kV 以上の電圧印加が必要であった X 線発生法を数 kV 程度まで低減するとともに、高解像度の X 線像に必要な X 線発生源の極微小化、極端紫外光から X 線までの任意波長の発生、さらには装置自体の超小型化を行うことができる革新的な X 線発生法の原理・手法を提案することを目的とする。

キャビテーション気泡は、液中で周囲圧力が低くなることで、液体が気体に相変化し生じる。周囲圧力が回復すると収縮し崩壊する。単一キャビテーション気泡の生成には、高温スポットにレーザー収束やスパーク放電が使われることも多く、この場合は高温により蒸発した気体が気泡を成長させ、その後気体の凝縮などに伴い収縮し崩壊する。高温スポットによるキャビテーション気泡の挙動は、レイリー・プレセット方程式に従うことが知られている。この気泡は、崩壊時に秒速 10 km 以上の速度で収縮することが報告されており、10 ns 程度で体積を急速に圧縮できる。すなわち、気泡表面積も同様に急速に減少させることができるため、気泡界面に帯電させることができれば、電荷密度を極短時間で大きく増大させることが可能である。電荷密度が高まれば、気泡が形成する電位ポテンシャルも大きくなり、数十 kV 程度まで電位を上昇できれば、X 線の生成が可能であると考えた。

本手法が実現できれば、生体内への微小 X 線源の導入による次世代ガン治療法、軟 X 線による生体組織・細胞の観察装置の開発、超高解像度 X 線画像の撮影、家庭用健康診断装置など、流体工学を基盤とし電気工学や医療工学を融合する新しい科学分野の創成だけでなく、次世代の格段に進化した科学技術の創成につながる成果となる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、キャビテーション気泡の膨張・収縮過程において電気絶縁性の高い液体において気泡内に放電し帯電させ、帯電気泡の挙動について明らかにするとともに、崩壊圧縮時に形成される高電界により加速された電子を気泡内の金属ターゲットに衝突させ X 線を発生させる革新的な極微小 X 線点源の原理を提案し実証することにある。実証に向けて、重要なステップである絶縁性液体中の気泡挙動について明らかにすることも目的とする。さらに、崩壊時の最小気泡径に大きな影響を与える気泡内圧力を計測する方法をあらたに考案し検証する。

3. 研究の方法

(1) 基礎過程である収縮放電時の挙動の検証を、導電性のある超純水と絶縁油の液中においてスパーク放電を発生させ帯電させ、気泡崩壊時の気泡の挙動や気泡内の状態について超高速カメラ等を用いて明らかにした。超純水中および 2 種類のシリコンオイル（オイル 1 およびオイル 2）中で、スパーク放電によって帯電したプラズマ誘起気泡を生成し、その崩壊過程における気泡挙動を可視化した。ただし、水、オイル 1 およびオイル 2 の動粘度はそれぞれ 20℃で 1 mm²/s, 25℃で 2 mm²/s および 50 mm²/s であり、比熱はそれぞれ 20℃で 4.2 kJ/(kg·K), 25℃で 1.8 kJ/(kg·K) および 1.5 kJ/(kg·K) である。液体の物性の違いが崩壊挙動にどのような影響を与えるかを明らかにするために気泡径の時間変化の解析を行った。気泡径の解析では撮影した気泡画像の投影面積を円形に換算して面積相当径とした。また、気泡の最大径から崩壊に至るまでの時間は Rayleigh 崩壊時間と呼ばれ、Rayleigh-Plesset 式を積分することで解析的に求めた。図 1 に実験装置の概略図を示す。30 mm×63 mm×22 mm の容器を超純水/シリコンオイルで満たし、直径 0.3 mm のステンレス製の針状電極を 1 対容器内に設置する。電極間距離はおよそ 0.1 mm に調整してある。高圧電源でコンデンサーを充電し、設定した電圧になると、電荷がスパークギャップ間で絶縁破壊を生じ、液体中の電極間でスパークが発生する。この時の電圧は高電圧プローブを通してオシロスコープで読み取られ、電圧の急激な変化に伴う信号をディレイジェネレータを介して高速度カメラに入力する。ディレイジェネレータによりトリガー信号のタイミングを制御することで、撮影と気泡崩壊のタイミングを同期させた。また、同様にオイル 1 およびオイル 2 も可視化した。

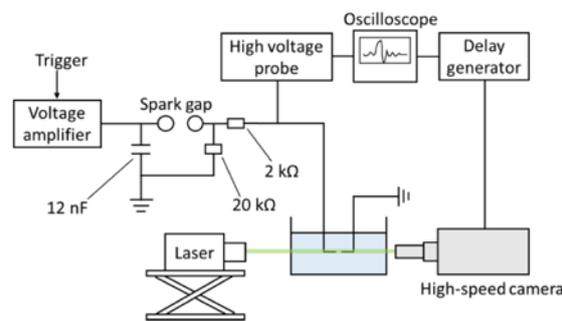


図 1 実験装置の概要

(2) 本研究で開発した圧力測定法は、パッシェンの法則を利用した。この法則は絶縁破壊電圧 V が圧力 p と電極間距離 d との積のみに依存する関係を示す。圧力測定は次の手順で行う。1. 水中に電極を設置し、電圧を印加させる。2. 電極間にレーザー誘起気泡を生成する。気泡が大きくなるにつれて、気泡内の圧力 p は下がる。この時、電極間距離 d は一定なため、 pd は減少する。3. pd の減少に伴い絶縁破壊電圧 V も低下するため、印加電圧が V を超えたとき、電極間で放電が発生する。4. 放電時の V より pd が求まるため、 d が一定なことより p が算出できる。5. 同期して気泡の成長を可視化することで、最大径に対してどの程度の大きさの気泡であるのか解析

し、半径比に対する圧力が求まる。本実験では気泡中の気体を水蒸気もしくは水素と仮定したパッシェンのカーブを用いる。予備実験として空気中の放電開始電圧を測定し、過去の報告と照合しその妥当性について検討した。

放電には平行ワイヤ電極を用いた。電極間にて放電を行い、その絶縁破壊電圧 V を測定した。電極間距離は 0.1 から 1 mm まで 0.1 mm 刻みとした。

4. 研究成果

図 2 に撮影した連続写真を示す。撮影は 1 Mfps で行った。気泡の平均最大半径は水、オイル 1 およびオイル 2 でそれぞれ $724 \mu\text{m}$, $687 \mu\text{m}$ および $619 \mu\text{m}$ である。これはエネルギー投入量の違い、沸騰までに必要なエネルギーおよび粘性などが初期気泡径の大きさに影響すると考えられる。Rayleigh-Plesset 式との比較のために、それぞれ Rayleigh 崩壊時間および最大半径で規格化した無次元化時間に対する無次元化気泡半径の変化より、崩壊まではそれぞれの気泡径の時間変化が同様であることが示された。崩壊時間が Rayleigh 崩壊時間よりも長くなるのは気泡の電極との接触や放電による気泡内温度の上昇、電荷の蓄積の影響などが原因と考えられる。

図 3 に撮影した気泡画像の投影面積の時間変化を示す。気泡は崩壊時に非球形にひずむために、円換算半径ではなく投影面積の変化を示した。撮影速度は 10 Mfps である。また、極微小な崩壊時の様子をとらえるために顕微鏡レンズを用いた。図 4 より、崩壊時は投影面積の時間変化率が動粘度の小さい順に大きくなる。また、平均最大半径と合わせて考えると、水は最大投影面積に対する崩壊時の投影面積が最も小さくなる。これらの成果により、帯電域からの逃走電荷により形成される電位ポテンシャルや遅れ時間を詳細に明らかにすることができた。また、絶縁油を利用し電荷密度の増大を目指した。絶縁油と水を比較した場合、崩壊時の収縮速度が水の方が速く、高密度化に直結する最小気泡径も水の方が小さいことから電荷の蓄積による影響があることを示した。本研究で実施している X 線発生を検証についても実験を引き続き継続しており、結果が得られ次第公表する予定である。

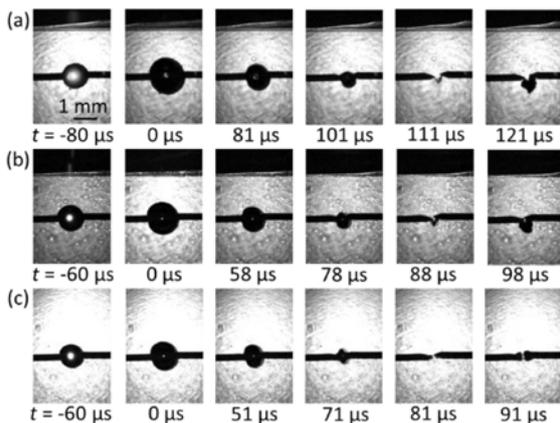


図 2 気泡生成・収縮・崩壊過程の連続写真：(a) 超純水、(b) オイル 1、(c) オイル 2

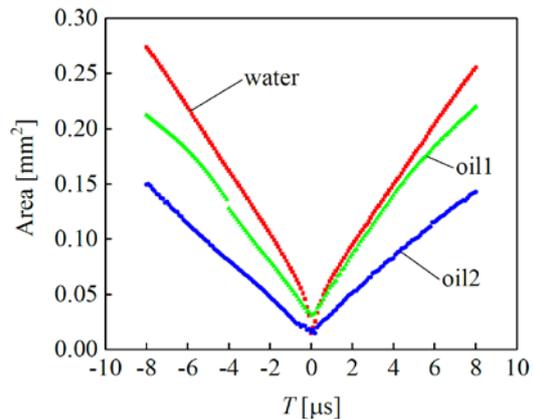


図 3 気泡崩壊時の投影面積の時間変化

図 4 にワイヤ電極間で生成される気泡の様子を連続写真を示す。放電は正極性放電であり、印加電圧は 1.7 kV、電圧印加時間は 30 μs 、電極間距離は 725 μm 、スケールは 0.5 mm、フレームレート 50 kfps である。画像左からレーザーを入射し、電極間に気泡を生成した。気泡は成長するにつれて電極に接触する。レーザー誘起気泡は電極に接触し変形が見られるが、画像 5 枚目までは Rayleigh-Plesset 式で求めた崩壊過程を反映させ成長過程としてみなした変化の式とよく一致する。したがって、画像 5 枚目すなわち気泡生成後 80 μs までは電極との接触や衝撃波の影響がない一般的な気泡挙動を示していると言える。放電は 50 μs 前後で発生し、そのときの放電開始電圧を計測する。電極間距離は既知のため、パッシェンの法

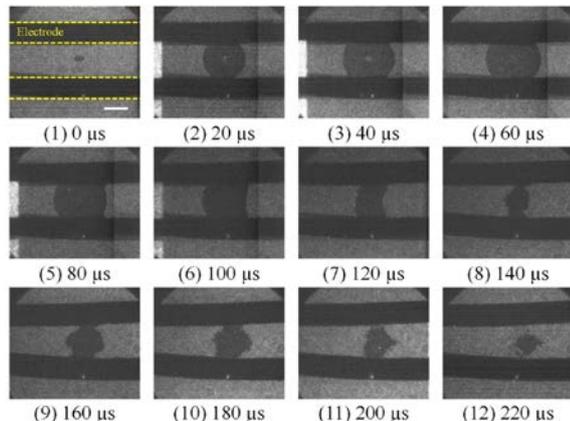


図 4 ワイヤ電極間に発生させた気泡の成長・収縮過程の連続写真。スケールバーは 0.5 mm.

則より圧力を算出する。

図5に電界強度と放電時の最大気泡径で無次元化した気泡径の関係を示す。電界強度は放電開始電圧を電極間距離で除して求めた。電界が増加するにつれて無次元化気泡径が減少していることが示された。すなわち、無次元気泡径が大きくなるほど放電開始に必要な電界強度が小さくなり、気泡内圧力が低下していることを示している。ここで、気泡内部の熱力学的変化を断熱と仮定すると、無次元気泡径と圧力の関係が求まる。図6にレイリー崩壊時間で無次元化した時間と気泡内圧力の関係を示す。これより、気泡内圧力は 5×10^5 Pa程度まで減少することが示された。気泡内の圧力は、気泡崩壊時の最小径を決定するため重要なパラメータであり、本研究で開発した手法により、今まで未知であった気泡内圧力の推定に成功した。

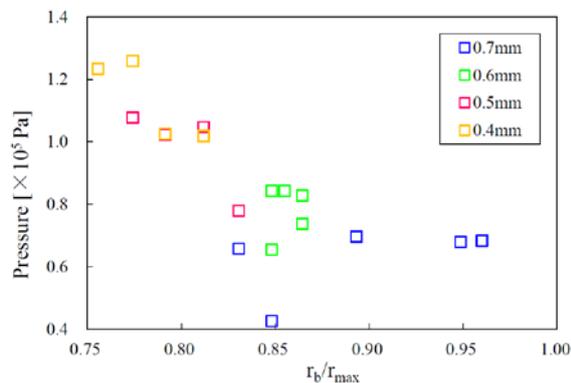


図5 無次元化気泡径と圧力の関係。

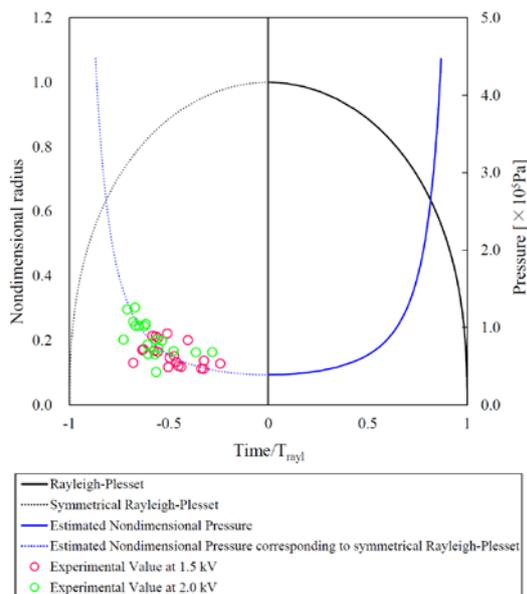


図6 無次元化時間に対する圧力変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件(うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件)

| | |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名 Satoshi Uehara, Akira Sato, Tetsuji Shimizu, and Takehiko Sato | 4. 巻 103 |
| 2. 論文標題 Non-contact measurement of electric charges on water surface supplied with plasma | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Electrostatics | 6. 最初と最後の頁 103414(6 pages) |
| 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.elstat.2019.103414 | 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 - |

〔学会発表〕 計6件(うち招待講演 0件/うち国際学会 5件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 Satoshi Uehara, Haruki Ishizuka, Takehiko Sato |
| 2. 発表標題 Spectroscopic measurement of streamer discharge in water for water purification |
| 3. 学会等名 International Workshop on Environmental Engineering 2019 (IWEE2019) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Satoshi Uehara, Haruki Ishizuka, and Takehiko Sato |
| 2. 発表標題 Spectroscopic measurement of needle discharge in pure water |
| 3. 学会等名 XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases (XXXIV ICPIG) and the 10th International Conference on Reactive Plasmas (ICRP-10) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名 佐藤旭, 上原聡司, 清水鉄司, 佐藤岳彦 |
| 2. 発表標題 針 水面放電に伴う水中電荷の挙動 |
| 3. 学会等名 第43回静電気学会全国大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Satoshi Uehara, Takahito Akimura, Tomoki Nakajima, Kiyonobu Ohtani, Outi Supponen, Mohamed Farhat, Takehiko Sato |
| 2. 発表標題 Characteristics of Jetting from Micro Cavitation Bubbles Under Multiple Pressure Waves |
| 3. 学会等名 19th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI2019) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Takehiko Sato, Ryo Kumagai, Satoshi Uehara, Tomoki Nakajima, Kiyonobu Ohtani, Takashi Miyahara, Tatsuyuki Nakatani |
| 2. 発表標題 Measurement of Electrical Charge in Fine Bubbles Generated by Plasma in Water |
| 3. 学会等名 19th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI2019) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Satoshi Uehara, Sayaka Kamata, Tomoki Nakajima, Yuka Iga, Seiji Kanazawa, Takehiko Sato |
| 2. 発表標題 Development of Pressure Measurement Method in a Laser-Induced Cavitation Bubble |
| 3. 学会等名 19th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI2019) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

| | | |
|--------------------------------|--------------------------------|---------------|
| 産業財産権の名称 水中気泡内圧力測定法 | 発明者 佐藤岳彦, 鎌田さやか, 中嶋智樹, 伊賀由佳 | 権利者 同左 |
| 産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-83335 | 出願年 2019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 |
|-------------------|---|--|----|
| 研究 分 担 者 | 上原 聡司 (UEHARA Satoshi) (70742394) | 東北大学・流体科学研究所・助教 (11301) | |