

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：32670

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2023

課題番号：19K15452

研究課題名（和文）音響キャビテーション気泡の極性とソノルミネセンス測定からのメカニズム解明

研究課題名（英文）Mechanism elucidation of acoustic cavitation bubble from measurements of polarity and sonoluminescence

研究代表者

李 香福（LEE, Hyang-Bok）

日本女子大学・理学部・助教

研究者番号：50836632

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：音響キャビテーション気泡の電気的性質を調べるために、発光する単一気泡（Single-bubble sonoluminescence, SBSL）に電界を印加した。電界下のSBSL気泡の位置ずれから、水中のSBSL気泡が正に帯電していることがわかった。また、電界を印加することで気泡振動が変化した。さらに、電界下でのSBSL気泡の位置ずれは発光の継続時間に依存した。この結果は、気泡内部の高温高圧下で生成させる化学反応生成物がSBSL気泡の帯電の要因であることを示唆している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究はこれまで報告例がなかった音響キャビテーション気泡の電気的性質を実験的に明らかにした。また、電界印加によって気泡振動を制御できることがわかった。本研究によって音響キャビテーション気泡の新たな応用場への活用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：We investigated, for the first time, the charge of a single-bubble sonoluminescence (SBSL bubble) that exhibits spatiotemporally stable light emission by applying an electric field to the SBSL bubble. The translation results of the SBSL bubble under an electric field suggests that it is positively charged. Also we measured the electric field effects on bubble expansion and contraction by a light scattering technique. The measurement results suggest that bubble oscillation can be controlled by applying an electric field. Furthermore, the amount of bubble translation under an electric field depended on the elapsed time of sonoluminescence, suggesting that the products generated inside the SBSL bubble affect the mechanism of bubble charging.

研究分野：超音波物理学

キーワード：音響キャビテーション ソノルミネセンス 帯電

1. 研究開始当初の背景

液体へ強力な超音波を照射すると音響キャビテーションと呼ばれる、微細気泡が発生する現象が起こる。発生した音響キャビテーション気泡は超音波の圧力変動と同期して膨張収縮を繰り返したのちに急激に圧壊される。その時、気泡内部は数千度、数百気圧以上という極限状態になる。極限状態の気泡内部では水蒸気が熱分解され、反応性の高いOHラジカルなどが生成される。また、気泡が急激に収縮する時、周りに衝撃波やジェット流を放射する。同時にソノルミネセンス (Sonoluminescence, SL) と呼ばれる発光現象が起こる場合がある。音響キャビテーション気泡は半導体基板の洗浄や化学汚染物質除去、ナノ粒子の合成、材料の凝縮と分散など工業分野や環境分野、さらに、がん治療や細胞内への遺伝子導入など医用分野まで幅広い分野で応用が期待され、研究が行われているが、まだ十分に解明されていない。

2. 研究の目的

音響キャビテーションは様々な分野で応用が期待されており、効果的な応用のためには機構解明が必須であるがまだ不明な点が多い。特に、音響キャビテーション気泡の電気的性質については報告例がない。本研究の目的は、音響キャビテーション気泡へ電界を印加し、その時の気泡運動やソノルミネセンスの発光信号から音響キャビテーション気泡の電気的性質を明らかにし、応用場を広げることである。

3. 研究の方法

通常、液体へ強力な超音波を照射すると複数の気泡が発生する。複数の気泡の間では相互作用が強いため、電界印加時に気泡に作用する静電気を評価することは難しい。本研究では、1個の気泡を用いて実験を行う。溶液は電気分解が起こりにくい、電気伝導率が $1 \mu\text{s/cm}$ 以下のイオン交換水を利用する。また、複数の気泡が発生しないように溶存酸素濃度が 15% になるまで脱気をする。図 1 に実験装置の概略図を示す。円筒型石英ガラスセルの底面に付いているランジュバン型振動子よりセル内へ 28 kHz の超音波を伝搬させると水中に定在波が形成される。気泡は水に浸かっているニクロム線に短時間電流を流し、ニクロム線の周りの水を蒸発させることで生成する。生成された気泡はビヤークネス力によって定在波の音圧の腹へ移動しそこにトラップされる。気泡へ電界を印加するために直径 0.5 mm の白金電極を使用する。電極は気泡の左右に先端が気泡を向くように配置する。電極間の距離は 12 mm である。電極へ直流電圧を極性と強度を変えながら印加し、その時の気泡の位置の変化より気泡の帯電を評価する。気泡が帯電していない場合は、電界を印加しても気泡の位置は変化しないが、帯電している場合は、気泡の位置がずれるはずである。かつ、気泡の移動方向は電解の極性によって異なるはずである。また、気泡が帯電している場合、電界の影響によって気泡振動が変化する可能性がある。電界印加による気泡振動の変化を確認するために、気泡へレーザーを照射し、その散乱光を測定する。散乱光の強度は気泡の半径の 2 乗に比例するので、散乱光測定より気泡半径の時間変化を調べることができる。

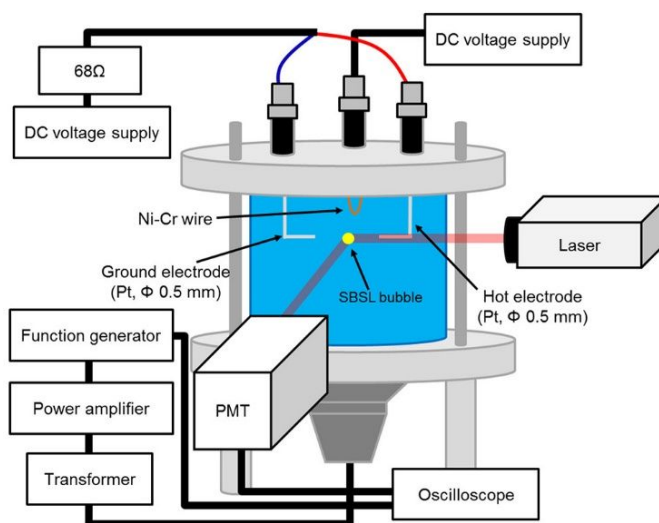


図 1 実験装置の概略図

生成された気泡はビヤークネス力によって定在波の音圧の腹へ移動しそこにトラップされる。気泡へ電界を印加するために直径 0.5 mm の白金電極を使用する。電極は気泡の左右に先端が気泡を向くように配置する。電極間の距離は 12 mm である。電極へ直流電圧を極性と強度を変えながら印加し、その時の気泡の位置の変化より気泡の帯電を評価する。気泡が帯電していない場合は、電界を印加しても気泡の位置は変化しないが、帯電している場合は、気泡の位置がずれるはずである。かつ、気泡の移動方向は電解の極性によって異なるはずである。また、気泡が帯電している場合、電界の影響によって気泡振動が変化する可能性がある。電界印加による気泡振動の変化を確認するために、気泡へレーザーを照射し、その散乱光を測定する。散乱光の強度は気泡の半径の 2 乗に比例するので、散乱光測定より気泡半径の時間変化を調べることができる。

4. 研究成果

(1) 音響キャビテーション気泡の電気的性質の評価

図 2 は電界を印加した時に暗室の中で撮影した SL 気泡である。一番上の写真は電界を印加していない時の SL 気泡で、この位置を基準として白色の点線で図に印している。左側は SL 気泡の右側にある電極に正電圧を印加した場合、右側は負電圧を印加した場合で、印加電圧は写真の中に示している。電極に正電圧を印加した場合は電極から反発を受けたように気泡の位置がずれた。反対に、負電圧を印加した場合は、電極から引力を受けたように気泡の位置がずれた。印加電圧を増加させると気泡の位置ずれは大きくなった。もし、SL 気泡自身の帯電ではなく気泡周辺の水分子の誘電が気泡の位置ずれの要因だとすると、印加した電圧の極性に関係なく、同じ方向へ気泡の位置がずれるはずである。この測定結果は、SL 気泡は正に帯電していることを示

唆する。帯電している SL 気泡へ電界を印加すると、ビヤークネス力と静電気力のつり合う位置へ気泡が移動したと考えられる。

(2) 電界の音響キャビテーション気泡への影響測定

図3はSL気泡へレーザーを照射した時の散乱光強度の時間変化である。(a)は、電界を印加していない場合である。気泡が膨張収縮した後、20 μ s 付近で急激に収縮したことが分かる。挿入図は20 μ s 付近を拡大したものである。気泡が急激に収縮した時に発光パルスも観察された。(b)は電極に+20 V を印加した場合である。電界を印加していない場合と比べて最大径は減少、発光を示すタイミングは早まった。(c)は電極に-30 V を印加した場合で、気泡の最大径は増加、発光を示すタイミングは遅くなった。この測定結果は、帯電しているSL気泡の振動を電界印加によって制御できることを示唆する。

(3) SL 継続時間の帯電への影響

図4はSL気泡の発光継続時間の帯電への影響を示す。SL気泡を生成してすぐに電極に+70 V を印加した場合は、気泡の位置に変化がなかった。しかし、SL気泡が発光を示してから1秒後に電界を印加した場合は気泡の位置がずれた。さらに、1分、5分とSL気泡の継続時間が長いほど電界印加によって気泡の位置がより大きくずれた。この測定結果は、SLを示す気泡の条件が気泡の帯電に関係していることを示唆する。SL気泡内部は急激な収縮時に高温高圧の極限状態になり、水蒸気や窒素、酸素などが熱分解され、ラジカル種が生成される。さらに、反応が進むと過酸化水素や亜硝酸など液体に溶けやすい物質が生成される。これらが気泡壁を通して液体側へ拡散された後に解離されると、気泡壁付近の局所的な領域で水素イオン濃度が増加する。これが現時点で考えられるSL気泡の帯電のシナリオである。

本研究では、音響キャビテーション気泡の電気的性質について、電界下での気泡の位置観察より水中のSL気泡は正に帯電していることを実験的に示した。また、電界印加によってSL気泡の振動を制御できることがわかった。さらに、SL気泡の帯電量はSL継続時間に依存することから音響キャビテーション気泡特有の気泡内部の極限状態で起こる反応が帯電の要因と関連していることがわかった。

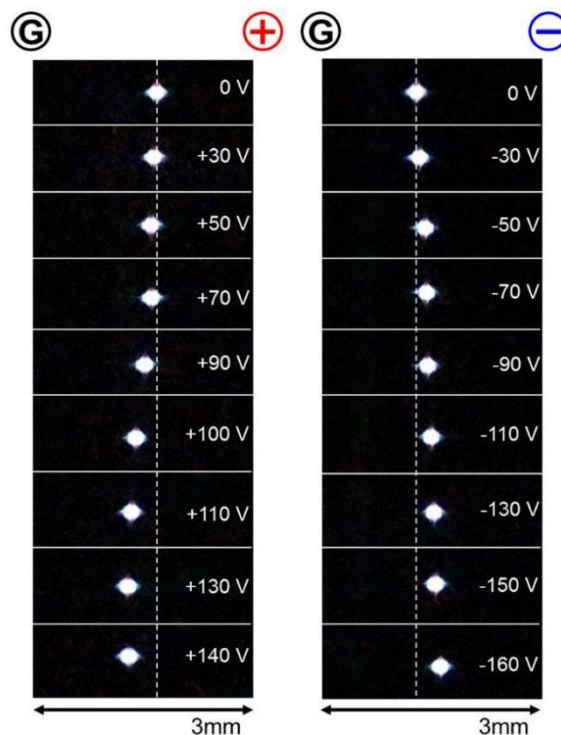


図2 電界印加による気泡位置の変化（左側は正電圧を印加した場合、右側は負電圧を印加した場合）

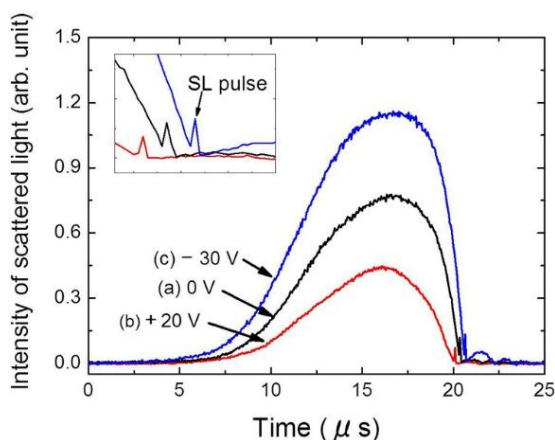


図3 電界印加による散乱光強度の変化（(a)は電界を印加していない場合、(b)は電極に+20 V を印加した場合、(c)は-30 V を印加した場合）

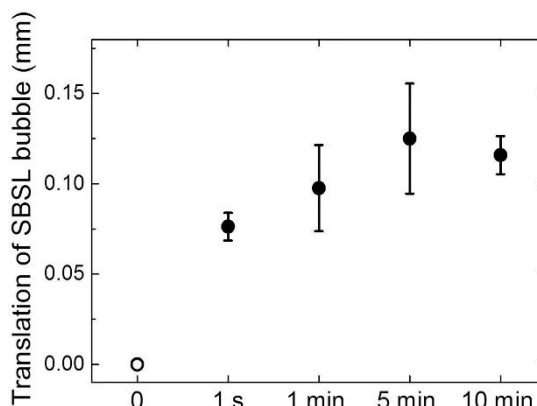


図4 SL 継続時間の気泡帯電への影響

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 Lee Hyang-Bok, Choi Pak-Kon	4. 巻 124
2. 論文標題 Electrification of Sonoluminescing Single Bubble	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry B	6. 最初と最後の頁 3145 ~ 3151
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acs.jpccb.0c00956	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7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Hyang-Bok Lee
2. 発表標題 Charge of sonoluminescing single bubble in water
3. 学会等名 Nanobubble 2024（国際学会）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Hyang-Bok Lee, Pak-Kon Choi
2. 発表標題 Estimation of charges of a sonoluminescing bubble under electric field
3. 学会等名 第42回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 影山祐弥, 李香福, 崔博坤
2. 発表標題 音響発光する単一気泡にはたらくBjerknes力と帯電
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 李香福, 崔博坤
2. 発表標題 ソノルミネセンス気泡の帯電
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hyang-Bok Lee, Pak-Kon Choi
2. 発表標題 Charges of sonoluminescing bubble at the liquid-bubble interface
3. 学会等名 4th Asia Oceania Sonochemical Society Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 李香福, 崔博坤
2. 発表標題 ソノルミネセンス気泡の帯電と気泡ダイナミクスに及ぼす電場の影響
3. 学会等名 第28回ソノケミストリー討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hyang-Bok Lee, Pak-Kon Choi
2. 発表標題 Effects of electric fields on sonoluminescence intensity and bubble dynamics
3. 学会等名 第40回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
---------	---------