

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04525

研究課題名（和文）水中超音波により生じる気泡の音響信号を用いた気泡の発生量及び運動状態の計測制御

研究課題名（英文）Study on measurement of motional state and amount generated of bubbles using acoustic signals from bubbles produced by high power ultrasound

研究代表者

内田 武吉（Uchida, Takeyoshi）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員

研究者番号：70455434

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：水中超音波に付随して生じる気泡の衝撃波は、産業や医療の超音波洗浄で使用されている。しかし、気泡の発生量や運動状態を定量且つ簡易に計測制御する技術が無いため、気泡の衝撃波が洗浄対象を破壊してしまうリスクがある。そこで我々は気泡から生じる音響信号を用いて気泡の発生量及び運動状態の計測制御を検討し、最終的に気泡の音響信号が超音波洗浄機の洗浄能力の新しい指標になることを目指した。結果として、気泡の音響信号と超音波洗浄機の従来の評価法の間には正の相関が確認できた。これは、気泡の音響信号が新しい洗浄能力の評価指標となる可能性を示している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、気泡の音響信号である広帯域雑音が、超音波洗浄機の洗浄能力の新しい定量且つ簡易な評価方法として使用できることを示した。超音波洗浄は、産業や医療の分野で普及しているが、洗浄能力の定量且つ簡易な評価方法が無く、今後の発展の妨げになっている。例えば、産業の半導体製造では、今後の性能向上のためには直径1 μm以下の微粒子を除去する必要があり、一方医療ではCOVID-19などの感染防止のためには、器具のこれまで以上の清浄度が必要である。私たちの気泡の音響信号による評価方法は、定量且つ簡易な評価が可能であるため、これらの分野の今後の発展に寄与できる。

研究成果の概要（英文）：Shock waves of bubbles generated by high-powered ultrasound are used in ultrasonic cleaning of industrial processing parts and medical instruments. However, the problem is that the bubbles destroy the ultrasonic cleaning object because there is no technology to measure and control the amount generated of bubbles. Therefore, we investigated the measurement control of bubbles using acoustic signals generated from bubbles, and we aimed for that acoustic signals from bubbles become a new indicator for the cleaning performance of the ultrasonic cleaning. As a result, a positive correlation was found between the acoustic signal of the bubbles and the conventional evaluation method of ultrasonic cleaners. This indicates that the acoustic signals of bubbles can evaluate the cleaning capacity of bubbles.

研究分野：超音波工学

キーワード：超音波 音響キャピテーション 超音波洗浄 広帯域雑音 分調波

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 超音波により溶液中に気泡が発生する現象は音響キャビテーションと呼ばれている。

(2) 音響キャビテーションにより生じた気泡は、発生、膨張収縮、圧壊(気泡が壊れること)の運動状態を繰り返し、気泡周辺には、数千度、数百気圧以上の局所的な反応場が形成され、衝撃波が発生する。この気泡による反応場や衝撃波が、多くの分野で利用されている。

(3) 産業分野では、半導体基板や一般加工部品などの洗浄に利用されている。特に半導体では、性能向上のため付着物が無い高品質の基板が求められており、直径 1 mm 以下の微粒子を除去できる音響キャビテーションによる洗浄は必要不可欠になっている(参考文献:橋本芳樹, 日本音響学会, Vol. 61, No. 3, pp. 160-165)。

(4) 医用分野では、音響キャビテーションによる治療方法が開発されている。例えば、がん細胞内にアポトーシス(生体細胞の自滅作用を指し、がん細胞では自然に発生しない)を強制的に発生させる治療が開発されている(T. Kondo, et. al., Sonochemistry and the Acoustic Bubbles, pp. 207-230, 2015)。

(5) 一方、音響キャビテーションは超音波の照射対象を破壊してしまうリスクがあるため、洗浄分野での歩留まりや治療の生体安全性が問題となっている。

(6) 問題の解決には、気泡の発生量や気泡から生じる衝撃波の強度を精密に計測制御する技術が必要不可欠である。

(7) 気泡の評価法は、高速度カメラによる定性的な気泡観察やレーザ回折散乱法などによる気泡の個数測定などがあるが、これらの方法は高コスト且つ大規模な装置による方法であるため、低コスト且つ簡易的な定量計測技術が求められている。

(8) 申請者は、気泡から生じる音響的な信号(以後、気泡信号と呼ぶ)を用いた低コスト且つ簡易な定量評価技術を検討しており、これまでに気泡信号を構成する分調波(照射周波数の整数分の1の信号)と広帯域雑音に注目し、広帯域雑音とソノケミルミネッセンス(音響キャビテーションにより生じる活性酸素種とルミノールとの発光現象)の発光強度の間に正の相関があることを実証した。また、分調波と広帯域雑音は、それぞれ異なる超音波出力で発生することを実験的に明らかにした。

(9) しかし、分調波と広帯域雑音が気泡の運動状態である発生、膨張収縮、圧壊の何を反映した信号であるかという学術的な課題は明らかにされていない。そこで本研究では、気泡信号が気泡の運動状態の何を反映した信号であるかという問題を解決することで、音響キャビテーションの定量評価を確立し、超音波洗浄機の洗浄能力の新しい指標になることを目指す。

2. 研究の目的

(1) 広帯域雑音は、“気泡の個数つまり発生量”を反映した信号であることを実験で明らかにする。気泡の発生時と圧壊時から生じる2度のインパルス的な信号が混合した結果、広帯域雑音のレベルは気泡の発生個数に比例した量になると考えられる。

(2) 分調波は、気泡の膨張収縮時に発生する周期的な信号が反映したものと捉え、“気泡の膨張収縮時に生じる衝撃波の強度”に関係する信号であることを実験で明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 本研究は、これまでと異なり、振動子への入力電圧と超音波パワー(音源から発生するエネルギー)の関係を精密に評価し、得られた超音波パワーを指標として音場(超音波が照射された場)を精密に制御する必要がある。そのため、水の温度上昇から超音波パワーを算出するカロリメトリ法用の測定装置を新しく製作する。カロリメトリ法は難しい場合は、他の超音波パワーの測定方法を試みる。

(2) 気泡信号である広帯域雑音と気泡の個数との関係を明らかにするために、気泡の個数計測を行う。そのために、高精度計測が可能なナノトラッキング法を用いる。気泡の粒子径が測定範囲より大きい場合には、レーザ回折散乱法を用いる。レーザ回折散乱法は、レーザを照射したときに気泡から発せられる散乱光強度の角度依存性を利用した方法であり、広範囲な粒子径の計測が可能である。

(3) 高速度カメラで観察した気泡の膨張収縮状態と気泡信号である分調波の関係を検討し、気泡から生じる衝撃波と分調波の関係を明らかにする。

(4) 気泡の運動状態の観察には多数の気泡の動きを観察することも必要であるため、超音波診断装置による観察も検討する。

4. 研究成果

(1) 当初予定していたカロリメトリ法による方法は、水槽を分割する膜の影響を十分に検討することができず、超音波パワーの測定精度に問題が残った。そこで、天秤法による測定方法を検討した。低周波数用吸音材を天秤法の受圧板として応用することで、50 kHz～1 MHz までの超音波パワーを高精度に測定できる低周波数用超音波パワー測定装置を開発した。この方法は定量且つ簡易な方法であり、世界で先駆けて開発したため、超音波洗浄の世界で注目されている。

(2) 超音波洗浄器の周波数帯域で発生する気泡信号に対応した円筒形キャピテーションセンサを試作し、この円筒形センサを用いて気泡信号である分調波と広帯域雑音の測定に成功した。広帯域雑音は安定且つ高い再現性で測定が可能であったため、広帯域雑音の検討を進め、分調波は今後の課題とした。

(3) 高速度ビデオカメラと超音波診断装置を用いて水槽内の気泡の運動を観察した結果、気泡は超音波照射により発生、膨張収縮、圧壊を繰り返し、多くの気泡が固まりながら運動していることを確認した。ナノトラッキング法による個数計測は、これまでに実験で使用してきた水槽を改良する必要があるため、今後の課題とした。

(4) (1)で構築した低周波数用超音波パワー測定装置を用いて、水槽内の超音波パワーを一定に制御し、その音場中で発生する広帯域雑音と金属片上に塗布した微粒子の除去率の関係を検討した。図1及び図2に示したように、両者に正の相関があることが確認できた。この結果は、円筒形キャピテーションセンサにより広帯域雑音を計測制御することで、超音波洗浄器の洗浄能力を制御できる可能性を示している。

(5) この方法は、定量且つ簡易な計測方法であるため、どのような場面でも使用可能であり、超音波洗浄を使用する分野の発展に貢献することができる。

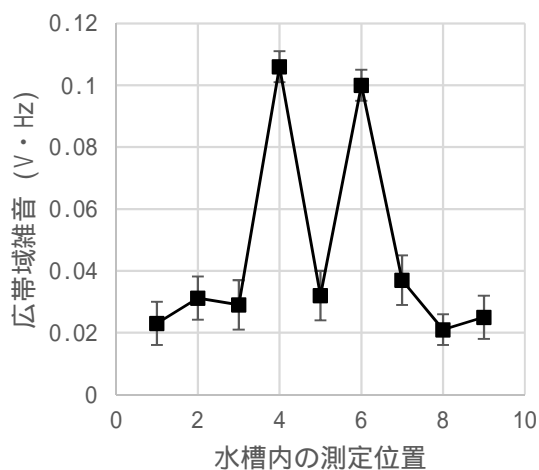


図1 広帯域雑音の測定

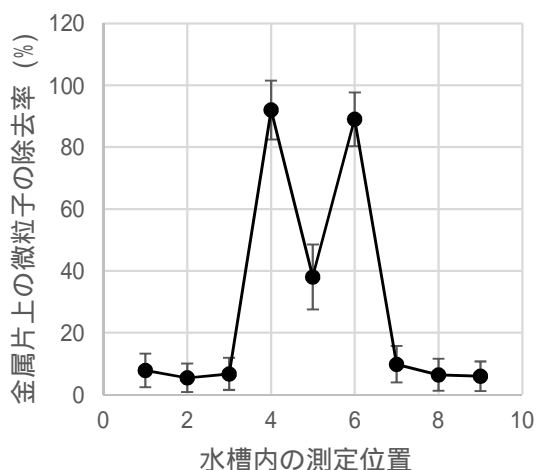


図2 金属片上の微粒子による測定

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 0件）

1. 著者名 Uchida Takeyoshi	4. 巻 60
2. 論文標題 Quantitative evaluation of ultrasonic cleaning ability using acoustic cavitation signal	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SDDD04 ~ SDDD04
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/abec5d	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Takeyoshi Uchida
2. 発表標題 Study on measurement technique of ultrasonic power for low frequency by radiation force balance method
3. 学会等名 The 42th Symposium on Ultrasonic Electronics（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takeyoshi Uchida
2. 発表標題 Study on relationship between ultrasonic cleaning and acoustic cavitation signal
3. 学会等名 The 41th Symposium on Ultrasonic Electronics（国際学会）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

産業技術総合研究工学計測標準研究部門材料強度標準研究グループ
<https://unit.aist.go.jp/riem/ms-std/>

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
---------	---------