

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04253

研究課題名(和文)音響放射圧による液面形状変化を利用した超音波プローブ評価システムの開発

研究課題名(英文)Development of ultrasonic probe evaluation system using change in liquid surface shape due to acoustic radiation pressure

研究代表者

野村 英之(Nomura, Hideyuki)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：90334763

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)：超音波プローブの新たな評価方法の確立を目的を目指し、音響放射圧による水面形状変化計測に基づく手法の提案と評価を行った。

まずはじめに、水面変位の大幅特性を考慮した理論モデルを構築し、測定と比較を行った。その結果は、測定結果で示す音圧の3乗に比例する水面変位を説明するのに不十分であった。次に、不安定な水面の代わりに薄膜を対象に、放射圧に起因する変位測定を行い、その安定性を検証した。最後に得られた水面変位から放射パワー測定を行った。その結果は、ハイドロホン法で推定される値より大きな値を示した。今後、水面変位と音圧の関係や、より精度の高い測定法の検討が必要である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

放射圧による水面変位計測によって音響パワーと放射圧分布の同時計測が可能となる点が、社会的に意義ある成果である。この手法が確立されることで、現場における超音波プローブの評価が容易になる。音響パワーに比例する放射圧が、今回の研究では示されなかった。このことは今後解決する必要があるが、同時に新たな物理メカニズムが潜んでいる可能性を示唆している。したがって、この現象の追求は新たな超音波現象の発見につながる可能性がある点で、学術的意義を有する。

研究成果の概要(英文)：To establish a new evaluation method for ultrasonic probes, we proposed and evaluated a method based on the measurement of water surface shape change by acoustic radiation pressure.

First, a theoretical model that takes into account the large-amplitude of water surface displacement was developed and compared with measurements. The results were not sufficient to explain the water surface displacement proportional to the cube of the sound pressure as shown in the measurement results. Next, instead of an unstable water surface, a thin film was used to measure the displacement due to radiation pressure, and its stability was verified. Finally, radiant power was measured from the obtained water surface displacement. The results showed larger values than those estimated by the hydrophone method.

Further studies on the relationship between water surface displacement and sound pressure and more accurate measurement methods are needed.

研究分野：音響エレクトロニクス

キーワード：音響放射圧 音響流 音響パワー 音圧 超音波プローブ

1. 研究開始当初の背景

我々の身の回りでは超音波を応用した技術が多く用いられている。例えば、固体材料の非破壊検査や、超音波診断や治療がある。これら超音波応用技術において、超音波の送受信を行う超音波プローブの出力評価は、重要検査項目のひとつである。

超音波プローブの出力測定法は主に 2 種類ある。ひとつはプローブから放射される超音波の音響パワーの測定で、超音波から発生する直流的な力である音響放射力(もしくは単位面積あたりの力である音響放射圧)を、精密な電子天秤などで測定する天秤法である。これは音響パワーと音響放射力が比例することを利用している。もうひとつはプローブから放射される音波の空間分布(音圧分布)をハイドロホン(空中で用いるマイクロホンに相当)で空間を走査しながら測定するハイドロホン法である。

申請者らは医療応用を目的とした超音波の非線形現象の基礎と応用技術開発、特に媒質内で発生する波形歪みを応用した画像法の研究を行ってきた。超音波プローブからの出力パワーも重要だが、医療分野ではプローブからの音響エネルギーがどの位置に、どのくらい集中しているかの評価が、安全面で重要である。しかし、現状のハイドロホン法もしくは天秤法単独では、これらを短時間で同時に評価することは困難であるといった問題に直面した。

2. 研究の目的

超音波プローブから放射される超音波が物体に入射する際の音響放射圧分布を計測し、音響パワーと音圧分布を短時間で同時に評価するシステムの開発を目指す。本申請課題では、変形が主としてその位置の音響放射圧に依存する液面を対象に、音響放射圧分布を測定する方法を提案する。システム開発にあたり、超音波の水面入射時における放射圧による、水面形状変化(水面変位)の測定技術を確立水面変位分布から音響放射圧分布、音圧分布、音響パワーを推定する方法を確立を行う。

3. 研究の方法

(1) 大振幅駆動時の水面変位モデルの検討

水面に放射圧が作用すると、水面変位にともなう表面張力と放射圧、さらに重力が釣り合う。一般に水面変位は小さいものとして検討が行われうことが多い(図 1)。ここでは、水面変位が大振幅変形、すなわち微小振幅変位条件を取り払い、入射音圧と水面変位の関係についての理論的検討を行った。

周波数を 2.2 MHz、素子開口径 2.6 cm とし、放射圧による水面変位の理論予測を行った。その際に、水面変位の大振幅特性の影響考慮の有無を比較した。

(2) 放射圧による薄膜変位測定

水面は不安定であり、放射圧に起因する水面形状変化は安定しないことが多い。そこで、安定した対象物として薄膜(ラップ素材)をターゲットとした放射圧(変位)の測定を行い、測定法の検討を行った。

周波数を 2.6 MHz、曲率半径 10 cm、開口径 2.5 cm の収束型音源を用いた。放射音波を数 kHz で変調し、動的な放射圧を発生させた。動的放射圧による薄膜の振動変位をレーザドップラー振動計で測定し、膜の振動理論と比較を行った。

(3) 放射圧による音響パワー測定

放射圧による水面形状のレーザによる測定を行った。レーザを用いることで、より正確な水面変位測定を試みた(図 2)。

また、水面変位分布測定から、音源の放射音響パワーを推定した。推定結果とハイドロホン法による測定パワーを比較し、その妥当性を確認した。なお、水面変位測定は光学カメラにより行

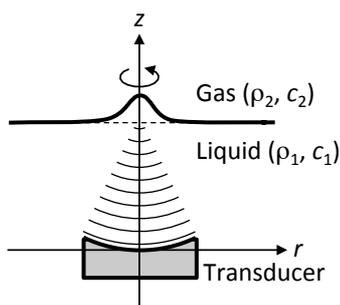


図 1 理論モデル

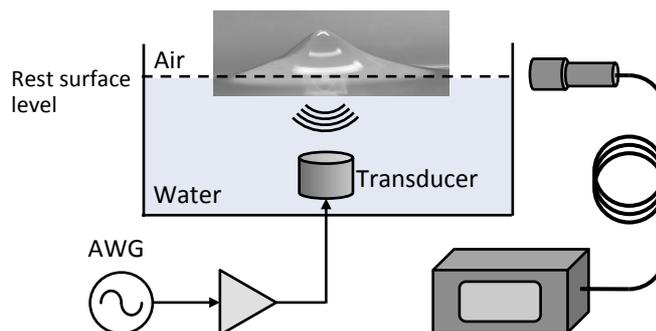


図 2 測定系

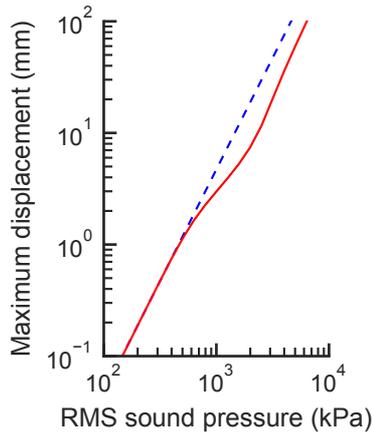


図 3 大振幅駆動時の水面変位予測. 実線は大振幅特性を考慮, 破線は無視した予測結果である.

った.

周波数 2.3 MHz, 曲率半径 10 cm, 開口径 2.5 cm の収束型音源を利用した. 音源の放射音圧を変化させ, 測定を行った. また, パワー測定では平板型の音源も利用した.

4. 研究成果

(1) 大振幅駆動時の水面変位モデルの検討

図 3 に大振幅変位時の放射圧による水面変位特性を示す[1]. 水面変位は放射圧に比例する. また, 放射圧は音響パワー, すなわち音圧の 2 乗に比例する. そのため, 水面変位は音圧の 2 乗に比例することが期待される. 大振幅変形を無視した理論では, このことが示されている. 一方, 大振幅変形を考慮した理論では, 音圧の上昇とともに一度変化が緩やかになり, その後, 幾分 2 乗より急激な特性を示している.

我々の予備実験では, 水面変位は音圧の 2 乗よりむしろ 3 乗に近いカーブを示した. 結果として, 本理論モデルでは, 予備実験の結果を説明するにいたらなかった.

(2) 放射圧による薄膜変位測定

水面の代わりにラップ素材をターゲットとした放射圧による変位測定を行った結果を図 4 に示す. ラップ素材は安定しており, 変位が電圧(入射音圧に相当)の 2 乗に比例する結果となった. この特性は理論どおりである. ただし, 水面変位が最大 2 mm 程度であるのに対し, 薄膜は 0.1 μm 程度であった. そのため, ラップ素材で正しく測定ができているとあって, 水面変位計測も正しく測定ができているとは限らない. また, 水面変位は光学的に, ラップ素材はレーザドップラー振動計で測定するという, 元々の測定精度(分解能)の違いも指摘される[2].

なお, 本測定により, 振動材料のモード測定を容易に行うことが可能になるという, 副次的な成果も得られている(図 5)[3].

(3) 放射圧による音響パワー測定

まずはじめに, レーザ変位計による水面変位測定結果を図 6 に示す. この結果は図 4 のラップ素材とは異なり, 変位が電圧の約 1.6 乗で変化しており, 2 乗特性を示さなかった. レーザ変位計は精密測定が可能となったが, 変位分布は移動しながら測定が必要となる. そのため, 測定開始時と終了時の条件にばらつきが生じるため, 安定した測定が困難であった. そこで, 以降の測定は光学的な測定にもとづく結果を示す.

図 7 は入射音圧と水面変位の関係の測定結果および, そこから推定される放射圧の関係を示す[4]. なお, 水面変位および放射圧ともに空間的に分布する. ここではそれらの最大値をプロットしている. この結果から, 予備実験同様に水面変位, 放射圧ともに音圧の約 3 乗に比例していることがわかる. また, 水面変位量は図 1 のような特性ではないことも示されている.

図 8 に提案法および hidroホン法による音響パワー測定の結果を示す. なお, ここでは収束型の音源の他に, 平板型の音源での測定結果も示す. 収束型, 平板型いずれの測定においても,

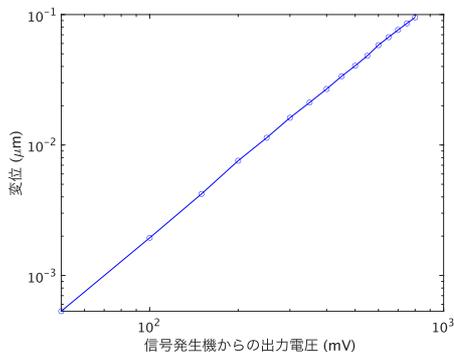


図 4 薄膜変位の測定結果と音圧(音源駆動電圧)の関係

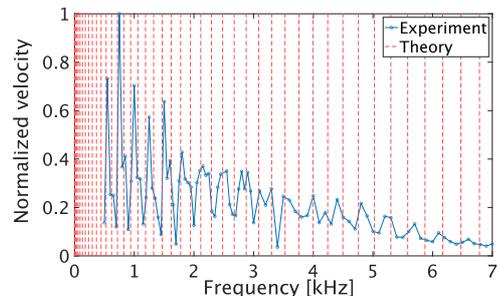


図 5 薄膜の振動モード測定

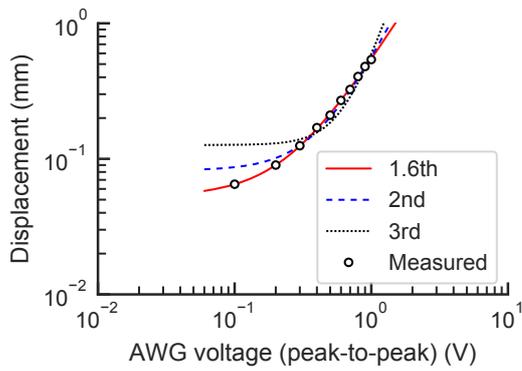


図 6 レーザによる水面変位の精密測定

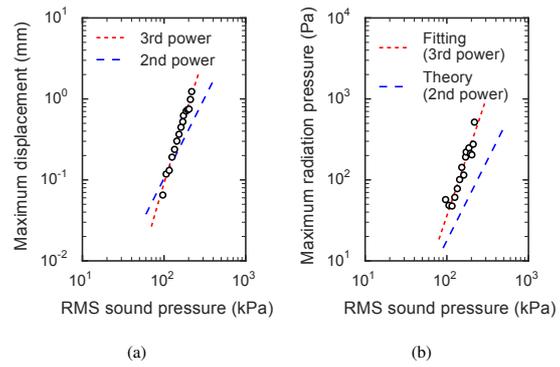


図 7 変位と放射圧測定結果

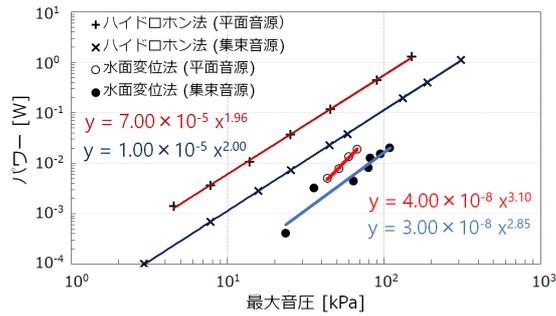


図 8 提案法およびハイドロホン法による音響パワー測定の比較。

提案法がハイドロホン法より小さな値を示している。これにはいくつか原因が考えられる。1 店目は測定範囲である。提案法は放射圧の空間分布を測定し、その値を面積分することで得る。その際に、積分範囲(測定範囲)を適切にする必要があるが、その範囲が不十分だった可能性がある。2 点目にハイドロホンの校正が経年劣化により、ずれていた可能性がある。3 点目として、水面変位測定の精度が低かった可能性がある。いずれにしても、今後、より正確な水面変位の測定が望まれる。

参考文献

- [1] 野村 英之, 下村 諒哉, “集束超音波の音響放射圧による液面変位,” 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講演論文集, 3P4-8 (2019. 11).
- [2] 北村 香子, “振動音響画像法における音響放射取得法の検討,” 電気通信大学卒業論文 (2021. 3).
- [3] 北村 香子, 野村 英之, “音響放射によって加振された膜の振動特性の測定と評価,” 日本音響学会 2021 年春季研究発表会予稿, 2-7P-2 (2021. 3).
- [4] H. Nomura, M. Shimomura, “Water surface displacement induced by acoustic radiation pressure of focused ultrasound acting on air-water interface,” Proc. Mtgs. Acoust., **38**, 045025 (2019).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2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 野村 英之, 下村 諒哉 | 4. 巻 32 |
| 2. 論文標題 液面の形状変化計測を用いた集束超音波の音響放射圧・音圧測定法 | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 超音波TECHNO | 6. 最初と最後の頁 59-63 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 無 |
| 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 - |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 Nomura Hideyuki, Shimomura Masaya | 4. 巻 38 |
| 2. 論文標題 Water surface displacement induced by acoustic radiation pressure of focused ultrasound acting on air-water interface | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Proc. of Meetings on Acoustics | 6. 最初と最後の頁 45025 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1121/2.0001145 | 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3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 北村 香子, 野村 英之 |
| 2. 発表標題 音響放射力によって加振された膜の振動特性の測定と評価 |
| 3. 学会等名 日本音響学会2021年春季研究発表会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 野村 英之, 下村 諒哉 |
| 2. 発表標題 集束超音波の音響放射圧による液面変位 |
| 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 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 下村 諒哉, 野村 英之 |
| 2. 発表標題 界面における集束超音波の音響放射圧と超音波パワー |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会超音波研究会 |
| 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 |
|---------|---------|
| | |