

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：11501

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18848

研究課題名(和文)点集中型パラメトリックスピーカの振動現象の解明と細胞培養用力学刺激装置への応用

研究課題名(英文)Elucidation of vibration phenomenon of point-concentrated parametric speaker and its application to mechanical stimulator for cell culture

研究代表者

有我 祐一(Ariga, Yuichi)

山形大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：40372338

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：提案している点集中型パラメトリックスピーカから発生する低周波加振力の振る舞いを把握するために、非線形音響シミュレーション環境を構築するとともに、計測装置を開発して実験的に評価することで、焦点距離が異なるスピーカの加振力発生原理を調べた。CIP法を適用した2次元音場解析の結果、および、実測の結果から、長焦点での加振力発生原理は非線形音響学で説明できることが示唆された。また、短焦点での加振力発生原理は線形音響学の世界における音と加振する物体との連成振動であると推察できることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

音によって物体が振動する現象を説明する場合、一般的には線形音響学の分野での「音と物体の連成振動」の考え方が使われる。一方、最近発展した超音波を利用した非線形音響は主に指向性の強いスピーカーとして用いられているが、適切に用いることで物体を非接触で振動させられることをシミュレーションと実験の両方から明らかにした。微弱ではあるが、人は聞こえない低周波の力で物体に触れることなく加振することができるため、眼圧計など様々なものへの応用が期待される。

研究成果の概要(英文)：In order to understand the behavior of the low-frequency excitation force generated from the proposed point-concentrated parametric loudspeaker, we constructed a nonlinear acoustic simulation environment, developed a measurement device, and evaluated it experimentally. We investigated the principle of generating the excitation force of the speakers with different values.

From the results of the two-dimensional sound field analysis using the CIP method and the results of actual measurements, it was suggested that the principle of exciting force generation in the long focus can be explained by nonlinear acoustics. It was also suggested that the principle of generating the exciting force in the short focus can be inferred to be the coupled vibration between the sound and the exciting object in the world of linear acoustics.

研究分野：振動学

キーワード：非線形音響学 線形音響学 加振装置 超音波

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

我々の研究グループでは、点集中型パラメトリックスピーカ (Point-focus-type parametric speaker . 以下 PPS .) に搬送波 40 kHz, 低周波成分 10Hz の変調信号からなる被変調波を印加し, 発生する低周波加振力を用いて, 角膜を 10Hz で振動させ, そのときの振幅を計測することで眼圧を測定する方式を提案している. 提案方式では, 変調信号に可聴域以下である 10 Hz の低周波成分を用いることで, 眼圧を測定する際, 周囲に騒音を発生させることなく, 快適に眼圧を測定することができる長所がある. また, 超音波を用いることで, 被検眼への空気吹き付け無しに非接触で眼圧を測定できることから, ストレスフリーな眼圧計として期待される.

パラメトリックスピーカから再生される信号の音場についての研究は今までに, 差音を用いた研究や, 変調を用いた研究が行われている. 差音を用いた研究では, 異なる周波数をもつ二つの超音波を空間に放射したとき, 空気非線形性により生じる, 二つの超音波の周波数の差音を用いて可聴音を再生させるときの音場の研究が行われている. 変調を用いた研究では, 超音波を再生したい信号で振幅変調して放射し, 空気非線形性により可聴音を再生させるときの音場の研究が行われている. また, パラメトリックスピーカの実用的な研究としては, 超音波を再生したい信号で変調し, 空気非線形性を利用して可聴音を再生させる手段が用いられている. ただし, どの研究についても再生される信号は可聴音領域であり, 我々が使用している可聴音以下の低周波成分を対象にしていない.

音場のシミュレーションソフトとして, ComWAVE などの超音波解析ソフトなどが市販化されている. しかし, 市販化されているソフトウェアは, 線形音響学を対象にしたものであり, パラメトリックスピーカのような非線形音響学に属する領域を解析することはできない.

以上の理由から, 我々が使用している PPS から発生する低周波加振力の振る舞いを十分に把握するためには, 非線形音響シミュレーション環境を独自に構築する必要がある.

2. 研究の目的

本研究では以下を目的とする.

(1) PPS の低周波加振力の振る舞いを数値解析から明らかにすることを目的とする. また, 数値解析を行うために, 本研究では Python を用いた CIP 法による非線形音響シミュレーション環境の構築を行う.

(2) 点集中型パラメトリックスピーカが発生する加振性能を実験的に把握する. 特に, 加振力の分布を確認して点集中型パラメトリックスピーカの設計上の焦点において想定通りの強い加振力が得られているのかを評価する.

本論文では構築した非線形音響シミュレーション環境を用いて, PPS から発生する低周波加振力と集束について明らかにする. また, PPS の変調方式や曲率半径による違いで低周波加振力と集束にどのような変化が生じるのかを明らかにしていく.

3. 研究の方法

(1) 非線形音響学シミュレーションによる検証

CIP 法を適用した 2 次元音場解析環境を Python を使用して構築し, 焦点距離の違う PPS が発生している音圧を求め, 比較検討した.

(2) 加振力計測装置の開発と計測

特性がわかっている物体 (以後ターゲットと呼称) を振動させて, その振動波形の両振幅から加振力を評価する方法を開発したターゲットは, 片持ち梁状態に固定したものとし, これを点集中型パラメトリックスピーカに対して平行に位置するように設置し, 加振させる. その振動波形の両振幅はレーザー変位計を用いて計測する. ターゲットが移動すれば, 圧力の変化に伴って振動波形の両振幅が変化するはずである. この振動波形の両振幅を記録することで, 音響放射圧の分布を両振幅の大小に変換して評価することが可能になる.

4. 研究成果

(1) 非線形音響学シミュレーションによる検証

シミュレーションの結果, 以下の事項が確認された.

焦点位置付近で音圧が集束する. この結果は, 先行研究での実験結果と一致する. また, 位相制御無しで音圧を集束することが可能であることが示された.

曲率半径 R200 の点集中型パラメトリックスピーカでは, 振幅変調方式, パルス幅変調方式ともに, 焦点位置より手前側の位置で音圧が最大になる.

パルス幅変調方式は振幅変調方式と比べ, 半値幅にはほとんど差は出ないが, 音圧は強くなることが示された.

点集中型パラメトリックスピーカの曲率半径を小さくすると, 半値幅は狭くなり, また, 音圧は強くなることが示された.

さらに, シミュレーションでの時刻歴応答を検討したところ, 以下のことが確認された.

長焦点型 PPS の場合 (Fig. 1), 焦点距離の 200mm で音圧が集中していることが分かった. また, 各点での時刻歴応答から, 音源から 1/4, 1/2 焦点距離で観測した時刻歴波形は伝播するにつれ波形がひずんでいることが確認された.

一方, R40 のときの場合(Fig.2), 伝播につれて波形はひずまず高調波成分もほとんど増えていないことが明らかになった.

以上のシミュレーション結果から, 長焦点での加振力発生原理は非線形音響学で説明できることが示唆された. また, 短焦点での加振力発生原理は線形音響学の世界における音と加振する物体との連成振動であると推察できることが示唆された.

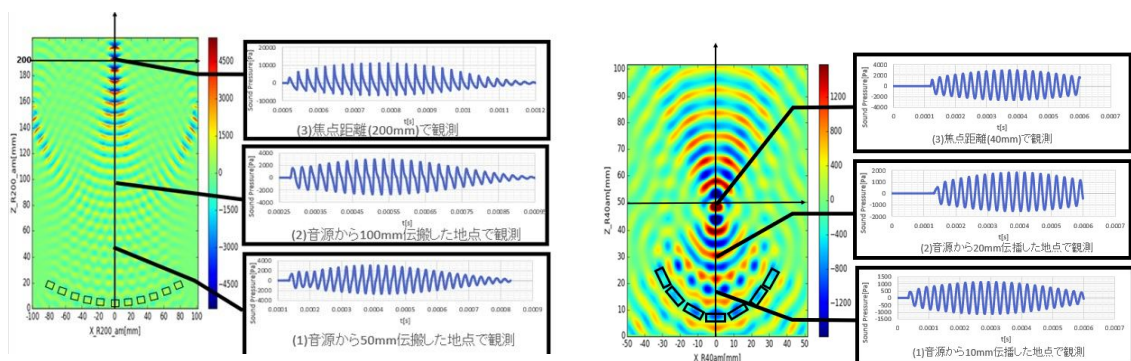


Fig.1 R200 の場合のコンター図と時刻歴応答 Fig.2 R40 の場合のコンター図と時刻歴応答

(2)加振力計測装置の開発と計測

点集中型パラメトリックスピーカから発生する加振力は, 高い音圧が空間に発せられた場合に生じる音響放射圧に起因すると考えられる. しかし, 空間の音響放射圧を数 mm 刻みで計測可能な装置は一般的に存在しない. そこで, 本研究では初めに加振力の分布を計測するための簡易的な方法を考案した. それは, 特性がわかっている物体(以後ターゲットと呼称)を振動させて, その振動波形の両振幅から加振力を評価する方法である.

ターゲットは, 片持ち梁状態に固定したものとした. これを点集中型パラメトリックスピーカに対して平行に位置するよう設置し, 加振させる. その振動波形の両振幅はレーザー変位計を用いて計測する. ターゲットの移動は電動スライダーで行い, 計測位置での振動波形の両振幅を記録することで, 音響放射圧の分布を両振幅の大小に変換して評価することを可能にした.

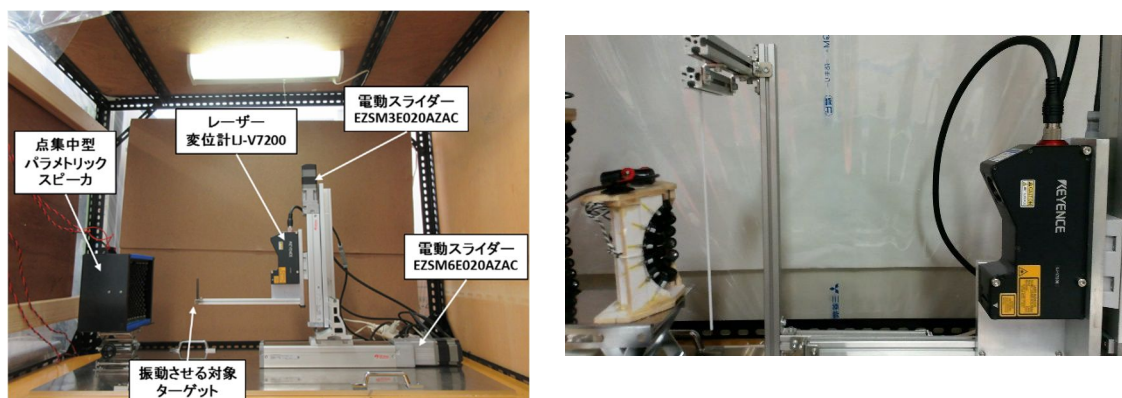


Fig.3 実験装置全体の外観と加振ターゲットの例 (2 プラスチック丸棒)

焦点位置に加振ターゲットを配置し, 加振時の振幅を計測する. その後 1mm ずつ PPS との距離を変えながら分布を測定した. 今回は 10Hz の加振力を発生させた.

R40 の場合

焦点位置 $Z=40$ を中心に $\pm 15\text{mm}$ の範囲で動かし, その位置での振幅の変化を記録した結果を Fig.4 に示す. 設計上の焦点 $Z=40$ から 1mm 程度ずれるものの, 焦点位置周辺に強い加振力が生じており, 焦点から離れるほど振動しなくなることが示された. このときの時刻歴応答の例を Fig.5 に示す. ほぼ正弦波状に振動していることが見て取れる.

R120 の場合

焦点位置 $Z=120$ を中心に $-30 \sim +20\text{mm}$ の範囲で動かし, その位置での振幅の変化を記録した結果を Fig.6 に示す. 設計上の焦点 7mm 程度ずれるものの, 焦点位置周辺に強い加振力が生じており, 焦点から離れるほど振動しなくなることが示された. このときの時刻歴応答の例を Fig.7 に示す. 波形は大きくひずんでいることが確認できた PPS を駆動させるためのアンプの設定は同

じとしていることから、PPSの違いにより振動波形に違いがでたと考えられる。

以上の結果から、R40の単焦点PPSの場合、波形が正弦波状であるため、線形な加振力を発していると思われる。一方、R120の長焦点PPSの場合、振動波形にひずみが見られるため、非線形音響学における音響放射圧で加振力が発現している可能性があることが示唆された。これらのことから、PPSの焦点距離の違いにより力の発現原理が異なることが示唆された。

まとめ：

CIP法による非線形音響シミュレーションで得た結果と、実測の結果が似た傾向を示したことから、提案している点集中型パラメトリックスピーカは可聴域以下の加振力を発現することが可能であることが証明された。また、焦点距離が違えば加振力の発現原理が異なることが示唆された。このことから、従来の線形音響学で論じられていた音響と物体の連成による振動の発生だけでなく、非線形音響学を利用することにより任意の空間に低周波加振力を発現できる新たな方法が確立されたと考える。

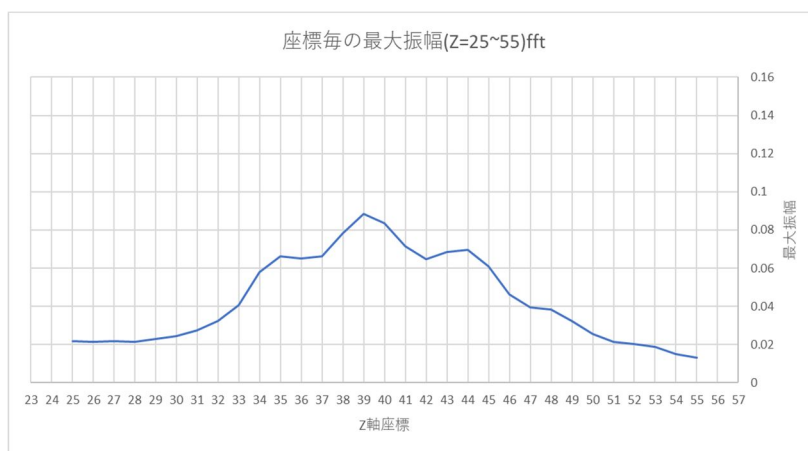


Fig.4 R40で加振時の加振力の分布

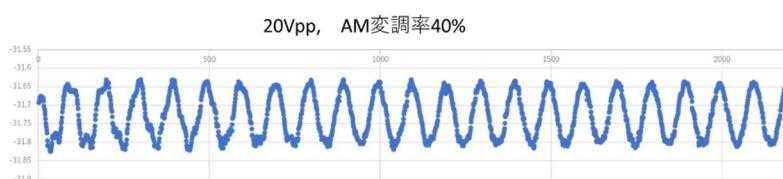


Fig.5 R40で加振時の振動波形の例

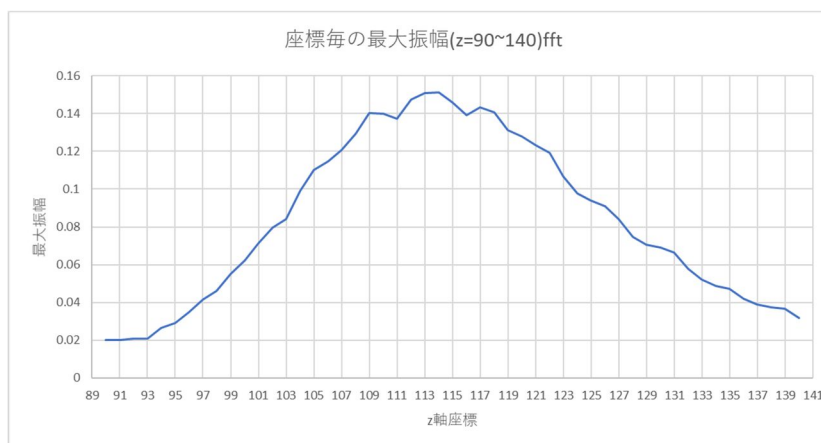


Fig.6 R120で加振時の振動波形の例

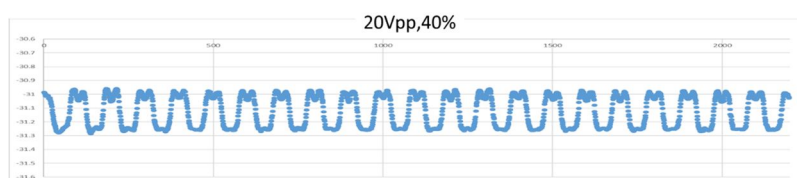


Fig.7 R120で加振時の振動波形の例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔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 有我 祐一, 浜沢 啓太
2. 発表標題 角膜加振型眼圧計における加振方向に起因した角膜振動形態の変化
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 有我 祐一, 飯 島 俊裕
2. 発表標題 摘出豚眼を用いた角膜加振型眼圧計用試験体の眼圧再現精度の評価
3. 学会等名 2018 年度日本機械学会年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 有我祐一
2. 発表標題 点集中型パラメトリックスピーカが発する角膜加振力の評価
3. 学会等名 日本機械学会2017年度年次大会
4. 発表年 2017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
---------------------------	-----------------------	----