

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：10103

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630076

研究課題名(和文)近距離音場に発生する音響流の制御と高出力音響アクチュエータへの応用

研究課題名(英文)Control of acoustic streaming in near acoustic field and its application into high power acoustic actuator

研究代表者

青柳 学 (AOYAGI, Manabu)

室蘭工業大学・工学研究科・教授

研究者番号：80231786

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：近距離音場における音響放射圧および音響流を動力源とする，制御可能な新型音響アクチュエータの実現を試みた。

有限要素法による非線形性を考慮した構造・音響・流体の連成解析によって，音響流の発生を把握し，音響粘性力による浮揚物体に働く搬送力を見積もることに成功した。また，浮揚物体が振動振幅の大きい振動板上に搬送される際に生じる非線形運動をスライディングモード制御により改善した。さらに，同様の搬送原理を応用して，音響タービンおよび無弁音響空気ポンプを試作した結果，動作原理の確認がなされた。今後，音響流解析を有効に活用して，性能の改善が期待できる。

研究成果の概要(英文)：The realization of controllable novel acoustic actuator utilizing acoustic radiation force and acoustic streaming in near acoustic field as power source was examined.

By structure-sound-fluid coupled analysis taking nonlinearity into account in finite element method, it succeeded to grasp the generation of acoustic streaming and to estimate conveying force to act on acoustic levitation object. The nonlinear motion of a levitated object which occurs when the levitated object is transported onto a vibration board with larger amplitude was improved by a sliding mode control. An acoustic turbine and acoustic air pump without any valves which apply a similar transportation principle were made as a trial, and the operating principle was confirmed experimentally. Hereafter, the improvement of their performance is expected by using the analysis of acoustic streaming effectively.

研究分野：超音波工学

キーワード：音響アクチュエータ 音響流 音波浮揚 タービン 空気ポンプ 音響放射圧 音響粘性力 有限要素解析

1. 研究開始当初の背景

(1) 先行研究として、図1に示すような音響放射圧・音響流を利用したリア搬送や回転動作について報告されている。非接触動作であるため被搬送物に磨耗が生じない利点があるが、搬送力が小さく、位置決め制御が容易でないなどの問題があり、実用化にあたり改善が求められている。

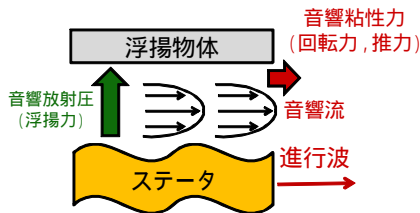


図1 非接触浮揚搬送・モータ (従来型)

(2) 図2に示すように振動板上からずれた位置にある浮揚物体には、音響粘性力により保持力が働き、浮揚物体は振動板から落下しにくい。申請者は図3に示すような複数の振動板のアレイ化により、保持力を搬送力に容易に転換する方法を考案している。つまり、浮揚物体は各振動板から保持力を受けるが、保持力差により振動振幅が大きい方へ搬送されることを見出した。これまでに従来の約3倍の搬送力が得られ、位置決めが可能なことが明らかにされている^[1]。搬送力は音響流により得られ、振動板と浮揚物体の位置関係で音響流の大きさ、方向を容易に変えられるため、音響流の制御と様々な動力への応用(音響アクチュエータ)は検討がなされていなかった。

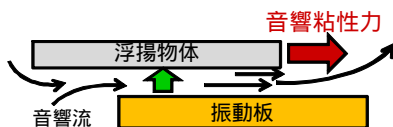


図2 音響流と保持力の発生



図3 振動板のアレイ化 (考案型)

2. 研究の目的

申請者は近距離音場の音響放射圧・音響流を利用した物体の非接触搬送において、簡便かつ拡張性に優れた方法を考案している^[1]。本研究の目的は本手法を発展させ、音場の工夫により音響流の発生と制御および動力への変換を行うことである。次に具体的な検討項目を示す。

- (1) 【音響流解析】アレイ状振動板の近距離音場および音響流の解析と増大化の検討。
- (2) 【音響アクチュエータ】アレイ状振動板による非接触ステップ移送と位置制御。

- (3) 【無弁音響ポンプ】音響流の流路設計による弁無し空気ポンプの実現。

3. 研究の方法

研究目的ごとに以下のように検討を進める。
(1) 近距離音場・音響流解析と移送力の増大化

有限要素法解析(FEA)ソフトウェアにより、非線形性を考慮した構造-音響-流体連成解析を購入した高速計算機により行う。振動板と浮揚物体の配置による近距離音場音圧の変化を把握し、音響流および音響粘性力の発生を把握する。浮揚物体と振動板の様々な条件において音響放射圧および音響流(音響粘性力)の発生を把握し、移送力増大の条件を探る。

- (2) 音響アクチュエータの構成法と制御の検討

回転型アクチュエータの試作を行う。扇状振動板を円環状に配置し、ステータを構成する。ロータと対をなすように振動板を2~n組に分け、同じ組を同時駆動する。隣接する振動板組の振幅を増加させ、音響流がロータ上円周方向に発生し、ステップ回転が可能かどうか実験的に確認する。ロータの位置に励振振動板を同期させ、連続回転の可能性を検討する。

ダンピング制御による運動制御を行う。振動板で物体を浮揚させ、隣接の振動板の励振により搬送を行う。移送時の揺動振幅を低減させる。

- (3) 無弁音響空気ポンプの試作

浮揚搬送構成における浮揚物体と振動板間には音響流が容易に発生する。浮揚物体を固定し、音波の反射体とすると音響流を発生する構成が可能である。空気ポンプの可能性を試作により検討する。音響流の流速は購入した熱線流速計により測定する。

4. 研究成果

- (1) 音響流・搬送力の解析

図4に示すように異なる振動振幅を持つ振動源を並べ、浮揚物体が両者に跨っているとき、発生保持力の差により、振動振幅の大きい方(+x方向)に浮揚物体は動く。搬送時の振動源間の浮揚力の差から浮揚物体は傾くと考えられる。この傾斜により搬送力は変化すると考えられるため、搬送原理に考慮される必要がある。

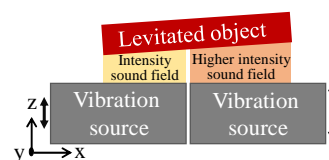


図4 浮揚物体の傾斜を考慮した浮揚搬送の動作原理

数値解析方法

FEA による空気粘性の影響を考慮した音響 - 構造連成解析により、音場、粒子速度を得る^[2]。音響駆動力と音響放射圧の二次近似項を得て、体積力を代入した非圧縮性流体方程式を解き、音響流を得る^[3,4]。最後に、得られた音響流による流体-構造相互作用解析より浮揚物体底面に生じる搬送力の計算を行った。

浮揚物体の位置と搬送力の関係性

図 5 に示す複数振動源間の隙間中心部と浮揚物体中心部の距離 L_x [mm] と搬送力の関係を調べた。 $L_x = \pm 15.5\text{mm}$, $\pm 5.5\text{mm}$ 付近で浮揚物体が静止した。振動源間の振動振幅比 a による浮揚物体の静止位置の変化は確認できなかった。測定した浮揚物体の傾斜角 θ [deg] の考慮および未考慮時の浮揚物体底面に生じる搬送力 F_t の FEA 結果を図 6 に示す。 $L_x = -14.7\text{mm}$ 付近で $F_t = 0$ となり、その前後で搬送方向および逆方向に F_t が生じた。上述の L_x 付近で浮揚物体が静止する解析結果が得られ、実験と解析結果が定性的に一致した。 $F_t = 0$ となる L_x の変化は θ 考慮時の方が小さく、実験により近い結果が得られた。

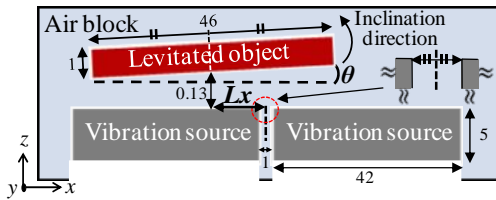


図 5 解析モデル.[unit:mm]

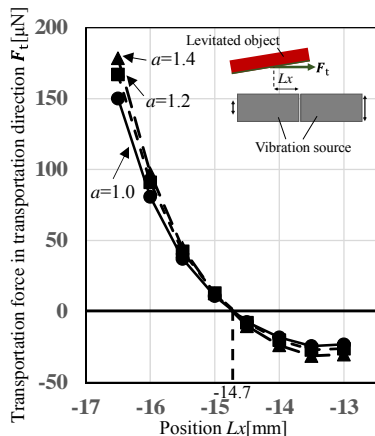


図 6 浮揚物体の傾斜を考慮した、位置に対する搬送力の解析結果 ($-16.5 \leq L_x \leq -13$)

浮揚物体の傾斜角と搬送力の関係性

重心の異なる 2 種類の浮揚物体の移動の様子を比較した。浮揚物体の揺動により $L_x = \pm 5.5\text{mm}$ 付近でよく浮揚物体が静止したため、浮揚物体の最大揺動距離と振動振幅比 a の関係を測定した。また、 $L_x = -15.5\text{mm}$ 付近における 2 種類の浮揚物体底面にかかる搬送力の差 ($F_{t2} - F_{t1}$) の解析結果を図 7 に示す。同図に示すように、 θ が減少するよう傾斜した方が搬送力は強くなる解析結果が得られ、実験と解

析結果が定性的に一致した。

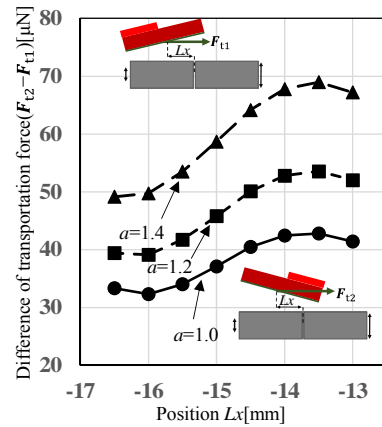


図 7 浮揚物体の傾斜による搬送力の差の解析結果 ($-16.5 \leq L_x \leq -13$)

(2) 挟み込み & 無弁音響ポンプ

挟み込みによる効果

2 つの振動板で物体を挟み込んだときの状態を図 8 に示す。下振動板上で物体を浮揚させた状態で、励振した上振動板を近づけていくことで音響放射力により物体を上から押しつけ、浮揚距離が縮まると考えられる。音響放射力は浮揚距離の 2 乗に反比例し、音響放射力の大きさは保持力の大きさと関係性があると考えられるため、挟み込みによって浮揚距離を縮めることで音響放射力を増大させ、保持力を増大できると考えられる。

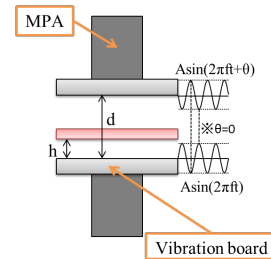


図 8 サンドイッチ構成

振動板を反射体で挟み込んだときの状態を図 9 に示す。振動板と反射体をずらして配置することで保持力発生時と同様に反射体を振動板に引き寄せると音響流が発生し、吸入口から吐出口へ向かって空気の流が生じ音響ポンプができると考えられる。

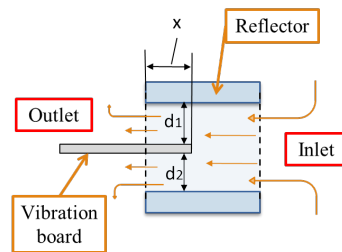


図 9 音響ポンプのモデル

サンドイッチ構成による保持力増加実験
 振動子は積層圧電アクチュエータ (MPA, $6 \times 6 \times 10 \text{ mm}^3$), 振動板は超ジュラルミン ($10 \times 10 \times 3 \text{ mm}^3$) を用いた。周波数 20kHz で, $0.65 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 程度の振幅で励振させた。浮揚物体はアクリル板 ($10 \times 10 \times 0.5 \text{ mm}^3$) を用いた。保持力は振動子を傾けたときの重力の保持成分との力の釣り合いにより求めた。

振動板間隔 d に対する保持力を図 10 に示す。上下逆位相で励振させ、間隔を狭めたときに、挟み込まない場合に比べて 1.15 倍の保持力および 1.28 倍の推力が得られた。

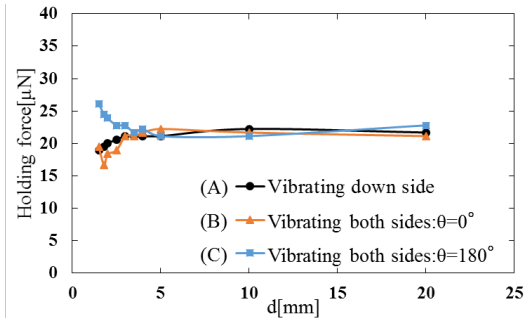


図 10 距離 d に対する保持力の測定値

音響ポンプの検討

振動板はステンレス ($20 \times 60 \times 1 \text{ mm}^3$) を用いた。周波数 27.2kHz, 電圧 60V を印加して屈曲振動を励振し, 熱線式風速計を用いて音響ポンプ吐出口の風速を測定した。

$d_1=1 \text{ mm}$, $d_2=1 \text{ mm}$ で固定し, 挿入量 x を変化させたときの風速特性を図 11 に示す。振動板を 11mm, 23mm 程度挿入したとき風速が測定できた。また, 振動板の端部よりも中央部のほうが, 速い風速が得られた。

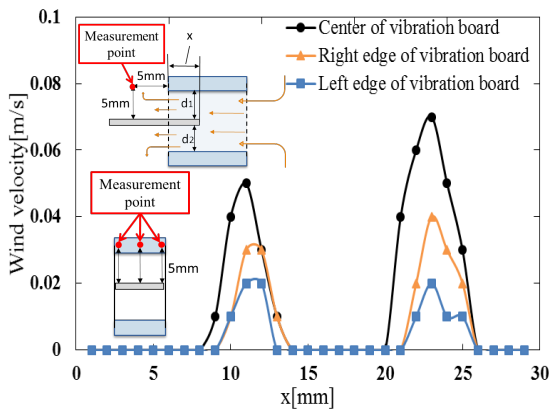


図 11 振動子挿入位置による風速の変化

(4) 運動制御

非接触移送・位置制御方法

近距離場音波浮揚にて浮揚させた物体の非接触移送・位置制御の方法を図 12 に示す。それぞれ個別に駆動できる振動板(ステータ)をリニアに複数枚並べている。この各ステータの振動振幅を相対的に変化させることで物体の

非接触移送・位置制御を行った。

- 各ステータ共, 板状物体が浮揚するレベルで駆動させる。
- 物体の搬送方向のステータの振動振幅を増大させる。隣接したステータ間の振動振幅差によって浮揚物体に推進力が発生し, 移送が始まる。
- 移送された物体は保持力の釣り合う点で保持される。

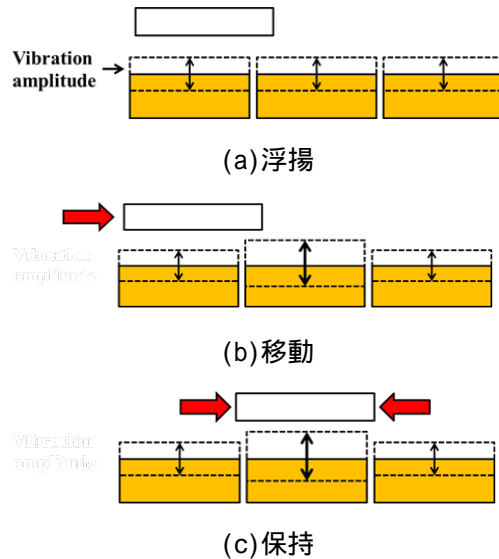


図 12 浮揚搬送の動作原理

運動制御システムとプログラム

運動制御を行うにあたり, 制御におけるフィードバック値をどうするかが重要である。フィードバックさせる値としては浮揚物体の位置情報を取り込み, 制御を行うことにする。カメラを用いた運動制御システム概略図を図 13 に示す。CCD カメラにて浮揚物体を真上から撮影し, 撮影画像を PC に接続されている画像処理ボードに NTSC 信号で送る。送られた画像は PC 内で画像処理を行い浮揚物体の位置データを抽出する。得られた位置データと目標となる位置データとを比較し PID 制御によって移送先の振動子を駆動する制御信号を生成, 送信する。PC 内での画像処理および制御信号の生成においては, MATLAB/Simulink を用いて構成した。

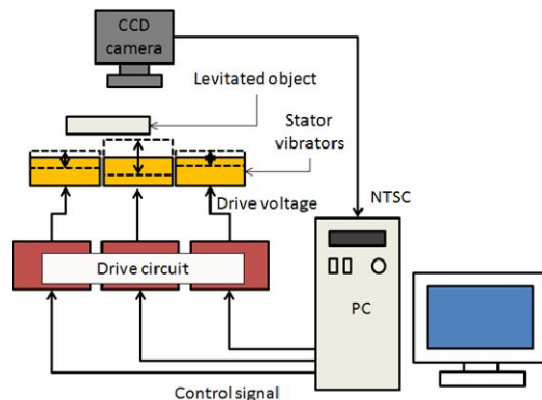


図 13 浮揚物体の位置検出と制御システム

伝達関数の推定と制御結果

3枚のステータをそれぞれA, B, Cとして、図14に示すように浮揚物体は矢印の方向に移動する。CCDカメラの画素数は(640×480)である。浮揚物体として長さ17×10×1(mm³)、重さ0.17gのプラスチック板を使用した。ステータA, B, Cを一定の振幅で振動させ、ステータBの振動振幅のみを大きくする。また、浮揚物体の時間応答は時間により揺動周期が異なるため、複数の伝達関数で近似できると推測した。そこで2次遅れ過渡特性の時間帯ごとに伝達関数を推定し、異なるモデルとしてスライディングモード制御(比例微分先行型PID制御)を行った。ステータA, Cを一定振幅で振動させ、ステータBの振幅のみ変えて制御を行った結果を図15に示す。揺動が抑制され、整定時間の短縮及び、オーバーシュート量の低減に成功した。しかし、遅れ時間が長いことや、移送速度が遅くなる問題があり応答速度の改善の検討が必要である。

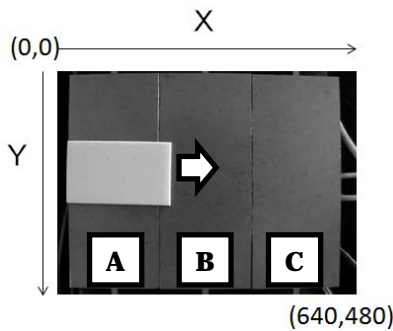


図14 浮揚物体の位置と座標の関係

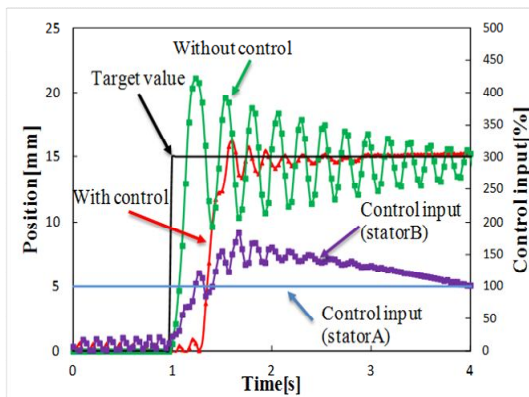


図15 微分先行型PID制御を用いた結果

(5)音響ステッピングアクチュエータ

動作原理及び装置構成

試作した実験装置を図16に示す。対称に配置している振動子をA, B, C, Dとし、A B C Dと励振する振動子を順次切り替えていくことによりロータが回転する仕組みである。外角44°の振動子が8つ円環状に配置されており、2つの振動子に跨るように外角60°のロータが軸と連結されている。軸受けねじを回

すことで、ロータと振動子間の距離が調整できる。

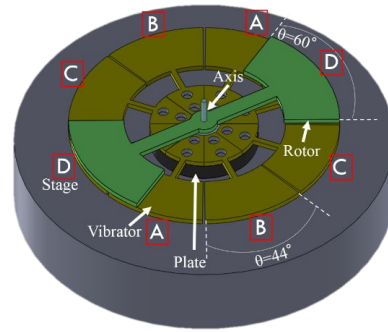


図16 音響ステッピングアクチュエータ

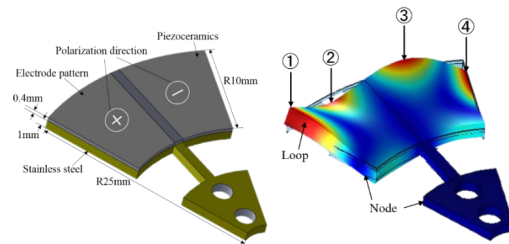


図17 ステータと振動モード

実験結果

図17に試作したステータとその振動モード(54.5kHz)を示す。扇形振動子の屈曲振動モードが振動振幅の面積が一番大きいため移送に適していると考えられることから、実験に用いた。対称に配置している振動子に同じ振動振幅値を与え、図16に示すように2つの扇形部を有するロータの移送実験を行った。しかし、2°の回転しか得られなかった。次に、1つの扇形部を有するロータで同様の実験を行った。34°の回転が得られた。2つの扇形部を有するロータに比べて移送量は増えたが、連続的な回転をするための移送量には満たなかった。音響流の解析の結果、円周方向の流速が弱く、多くが径方向への流れであったため、必要な搬送力が得られなかったためと考えられる。回転に適したステータの形状と振動モードが見出されており、今後試作を行う予定である。

(6)まとめ

音響流の発生による音響粘性力を応用した音響アクチュエータの実現を試みた。音響空気ポンプと音響ステッピングアクチュエータを試作した結果、十分な性能が得られなかった。しかし、本研究で用いた音響流の解析方法は、先行研究の解析手法を基に近距離場音波浮揚現象に合わせて改良したものであるが、浮揚搬送の実験結果を十分に解析で再現できるレベルにまでになった。したがって、音響アクチュエータの設計、性能改善の強力なツールになり得るものであり、本研究の中で最も大きな成果である。今後、音響アクチ

ユエータの設計に適用し、性能改善を行う予定である。

<引用文献>

- [1]R.Yano et al.,JJAP,50,07HE29,2011.
- [2]山吉他,音講論(春),1467-1468,2011.
- [3]Yuji Wada et al.,Acoust.Sci.&Tech.34,5,2013.
- [4]和田他,音講論(春),1147-1148,2016.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計 6件)

和田 顕次, 青柳 学, 梶原 秀一, 田村英樹, 高野 剛浩, 浮揚物体の傾斜が搬送に与える影響
近距離場音波浮揚による非接触ステップング搬送(5), 日本音響学会 2017 年春季研究発表会講演論文集, 2017, pp.1047-1048

中尾 晃大, 青柳 学, 梶原 秀一, 田村英樹, 高野 剛浩, 複数円筒を用いた音場形成方法の検討, - 金属円筒を用いた強力音場形成と浮揚搬送への応用(2) -, 日本音響学会 2017 年春季研究発表会講演論文集, 2017, pp.1065-1066

高野 剛浩, 田村 英樹, 青柳 学, 対向する進行波音波による微小物体のトラッピング - 屈曲減衰振動により励振される 2本のパイプの進行波音波利用の構成 -, 日本音響学会 2016 年秋季研究発表会講演論文集, 2016, pp.1029-1030

和田 顕次, 青柳 学, 梶原 秀一, 田村英樹, 高野 剛浩, 音響流解析による搬送力の検討 近距離場音波浮揚による非接触ステップング搬送(4), 日本音響学会 2016 年春季研究発表会講演論文集, 2016, pp.1229-1232

中尾 晃大, 青柳 学, 田村 英樹, 高野剛浩, 金属パイプ内の強力音場形成と浮揚搬送応用の検討, 日本音響学会 2015 年秋季研究発表会講演論文集, 2015, pp.1153-1154

青柳 学, 大村 洋平, 梶原 秀一, 田村英樹, 高野 剛浩, 挟み込み構造による搬送力・保持力の増大化, - 近距離場音波浮場による非接触ステップング搬送(3) -, 日本音響学会 2014 年秋季研究会発表講演論文集, 2014, pp.1407-1408

6. 研究組織

(1)研究代表者

青柳 学 (AOYAGI, Manabu)
室蘭工業大学・工学研究科・教授
研究者番号: 80231786