

# アレイ型ステータ振動子を用いた浮揚物体の移送制御 (第1報)

## — 移送と位置決めの実験的検討 —

室蘭工業大学大学院 ○矢野 龍人, 青柳 学 東北工業大学 田村 英樹, 高野 剛浩

### Transfer control of levitated object by array-type stator vibrator (1st Report)

- The experimental consideration of transfer and positioning -

Ryuto Yano, Manabu Aoyagi, Muroran Institute of Technology

Hideki Tamura, Takehiro Takano, Tohoku Institute of Technology

A levitated object above stator vibrators can be held by the acoustic viscous force generated by near-field acoustic levitation is phenomenon. The holding force yields at the edge of a vibration plate and nodes of a bending vibration mode, and it is in proportion to vibration amplitude of the vibration plate. This paper describes methods of transfer and positioning of a levitated object above many aligned stator vibrators, some experimental results and the proposition of the application as a non-contact-stepping ultrasonic motor (NCS-USM). A linear type and rotary one of a NCS-USM can be flexibly constructed. The NCS-USM has a possibility of high torque performance compared with an ordinary non-contact USM using traveling wave.

#### 1. はじめに

音響放射圧を直接受けた板状物体が放射面から数十～数百  $\mu\text{m}$  の距離で浮揚する現象 (近距離場音波浮揚現象) は, 非接触搬送技術や非接触超音波モータなどへの応用として, 実験および理論的報告が行われてきた<sup>[1,2]</sup>.

近距離場音波浮揚現象において浮揚物体に働く力を Fig.1 に示す. 浮揚物体は音響放射圧により浮揚し, 振動板と浮揚物体の間に音響流が発生し, その粘性により水平方向に保持力が働く. この保持力は振動板の端, および, 振動節で発生する. 定在波振動している振動板では, 振幅の大きい腹部では振動エネルギーのポテンシャルが大きくなり, 節部ではそれが小さくなるため, エネルギーポテンシャルが高い部分から低い部分に向かって音響流が発生する. すなわち, 振動腹から振動節に向かって保持力が発生する<sup>[3]</sup>. また, 保持力の大きさは振動板の振動振幅に比例する<sup>[4]</sup>.

筆者らは, この保持力を浮揚物体の移送と位置決め制御に応用することを考案した. 本研究の目的は, 保持力を用いてステップングモータのような動作が可能な新しい非接触移送方法を実現し, 浮揚物体の位置決めを行うことである. さらに, この技術を用いて, 非接触ステップング超音波モータ (NCS-USM) を実現することである. 試作実験より, 浮揚物体の移送制御と保持が可能であったため, 実験結果を本報において報告する.

#### 2. 非接触移送技術と NCS-USM の原理

浮揚物体を一列に並べられた複数枚の振動板 (ステータ) の上で浮揚させ, それぞれのステータの振動振幅を浮揚物体の移動方向や移動量に応じて変化させることで非接触移送を行うことを考案した. その概要図を Fig.2 に示す. この浮揚物体の移送と位置決めを NCS-USM に応用するための駆動原理を以下に述べる.

- (1) ステータの上に浮揚物体を浮揚させる.
- (2) 移動させる方向のステータの振動振幅を上げることで, 浮揚物体をそのステータに移動させ, そこで保持する.
- (3) 振動振幅を浮揚・保持に必要な程度まで減少させる.
- (4) (2), (3)を繰り返すことで移送する.

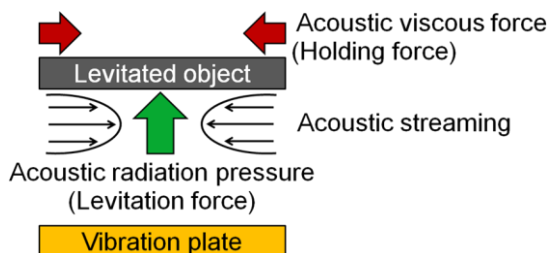


Fig.1 Forces around levitated object.

#### 3. 実験方法および結果

浮揚物体の非接触移送と位置決めを確認するために, 本研究で用いた実験装置の構造を Fig.3 に示す. 3つのステータ (ステータ A・B・C) がベースの上で一列に並んでおり, ステータとベースはネジで固定される. それぞれのステータの間隔は約  $60 \mu\text{m}$  である. Fig.4 に示すように, ステータは SUS304 に二つの圧電セラミクス板 (PZT) を張り付けたものである. 有限要素法解析 (ANSYS 12.0) を行ったステータの振動モードと, 浮揚物体が節の間で浮揚し保持される範囲を Fig.5 に示す. 2つの節直線に挟まれた振動腹で浮揚が確認できた. ステータ A・B・C の共振周波数はそれぞれ 22.52 KHz, 22.61 KHz, 22.64 KHz であった.

今回の実験において, 以下の2つの点に着目して実験した.

- (1) 浮揚物体をステータの上に置いたときの浮揚物体の長さとの関係.
- (2) 隣接したステータの振動振幅の差の影響.

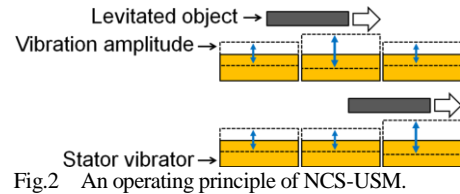


Fig.2 An operating principle of NCS-USM.

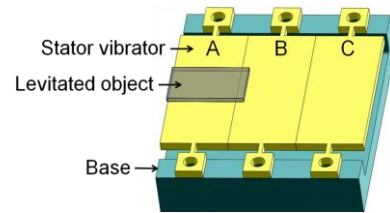


Fig.3 Experimental setup.

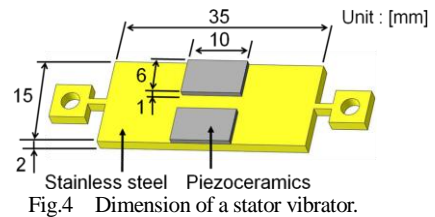


Fig.4 Dimension of a stator vibrator.

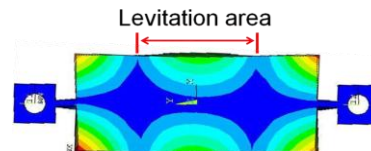


Fig.5 Analyzed vibration mode.

浮揚物体の非接触移送・位置決めの実験において、浮揚物体の長さが 16.0~18.0 mm のときに隣接したステータを乗り継ぎ、さらに往復することができた。浮揚物体の長さが 17.5 mm の場合のステータ A・B・C の振動振幅と浮揚距離の測定結果を Fig.6 に示す。これらはレーザードップラー振動計と変位計 (LV-1710, ONO SOKKI CO., LTD.) を用いて測定した。この実験結果より、浮揚物体が乗り継ぐ条件が以下のように得られた。

- (1) 浮揚物体の移動側のステータの振動振幅が、物体が浮揚していたステータの振動振幅よりも大きいこと。
- (2) 隣接したステータ間の振動振幅の差を約 1.57 倍以上にすること。
- (3) 浮揚物体の長さをステータの幅よりも 1.07~1.20 倍大きくすること。

浮揚物体がこれらの条件で隣の振動振幅が大きいステータに乗り継いだとき、浮揚物体はそのステータ上で数秒間だけ揺動するため、浮揚物体の素早い位置決めにはこの揺動を減少させる必要がある。この揺動を減少させるには、浮揚物体がステータに乗り継いだときの位置に応じてステータ間の振動振幅を制御することで可能だと考えられる。

4. 保持力の評価

保持力を Fig.7 に示すような方法で測定し、その角度から保持力  $F$  を以下のように計算した。M は浮揚物体の質量、g は重力加速度、 $\theta$  はステータを傾けた角度である。

$$F=Mg\sin\theta$$

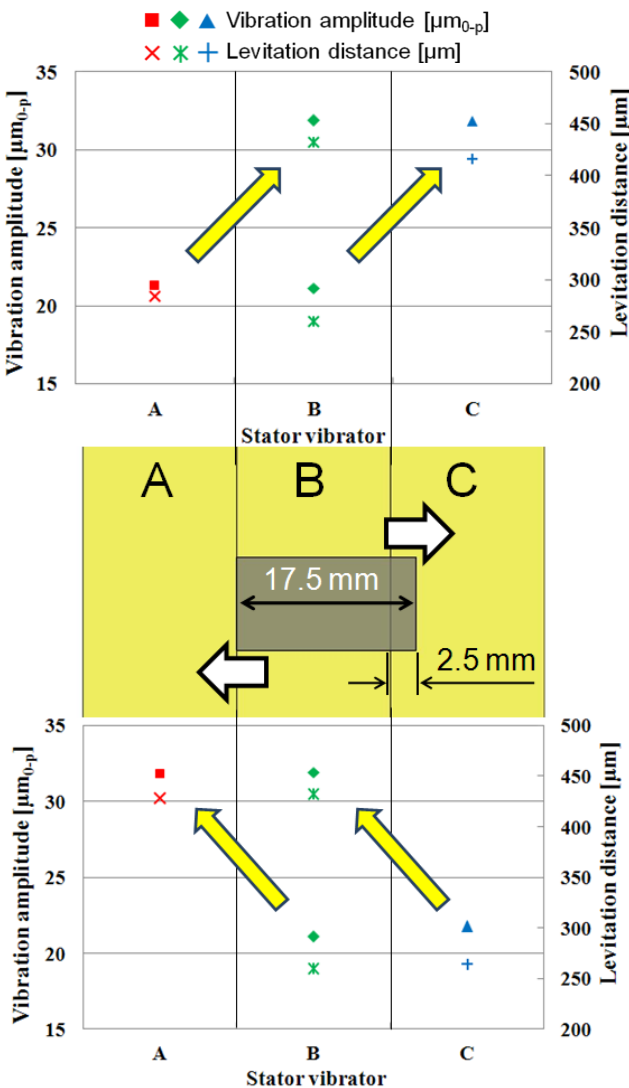


Fig.6 Vibration amplitude and levitation distance in the case of the levitated object 17.5 mm long.

実験において、浮揚物体が隣のステータに乗り継ぐことができるステータの振動振幅の値が 31.8  $\mu\text{m}_{0-p}$  であったため、この値における保持力の測定を行い、その単位面積当たりの推力に換算すると、浮揚物体の長さが 17.5 mm のときに 348.6  $\text{mN}/\text{mm}^2$  であった。

換算値と山形大学の山吉らが測定した進行波を用いた非接触超音波モータの特性<sup>[2]</sup>を比較した。この非接触超音波モータの始動トルクをロータの最外半径の推力とその単位面積当たりの推力に換算したところ、126.0  $\text{mN}/\text{mm}^2$  であった。この結果から、進行波を用いた非接触超音波モータよりも測定結果の単位面積当たりの推力が大きいことがわかる。よって、NCS-USM の駆動力は隣接したステータの振動振幅の差を大きくすることで、進行波を用いた非接触超音波モータよりも大きいトルクが得られると期待できる。

また、リニア型 NCS-USM のみならず、NCS-USM の動作原理を用いて、Fig.8 に示すような回転型 (円環型) の NCS-USM が可能であると考えられる。

5. 結論

並べられた複数のステータ上で浮揚物体の非接触移送・位置決め制御する方法を考案し、試作実験を行った。その結果、以下のような条件において浮揚物体の乗り継ぎが可能であった。

- (1) 物体が浮揚している隣のステータの振動振幅が約 1.57 倍以上であること。
- (2) 浮揚物体の長さがステータの幅よりも 1.07~1.20 倍大きくすること。

今後は、浮揚物体が振動振幅の大きいステータに乗り継ぐ精細なメカニズムの解明が必要である。また、素早い位置決めを行うために、浮揚物体の揺動を減少させる制御方法を検討し、浮揚物体の非接触移送・位置決め制御をリニア型・回転型 NCS-USM で実証する。

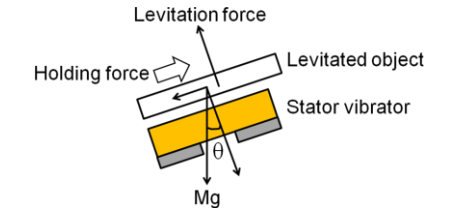


Fig.7 The measurement method of holding force.

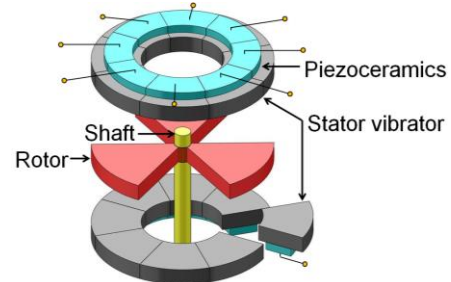


Fig.8 An example of rotary type NCS-USM.

参考文献

- [1] 橋本芳樹, 小池義和, 上羽貞行: 近距離場音波浮揚現象による非接触搬送技術, 日本音響学会誌 53 巻 10 号 (1997), pp. 817-821
- [2] 山吉康弘: 非接触型超音波モータの最適設計と定在波駆動方式による特性改善に関する研究, 学位論文, (2010), pp. 139
- [3] 磯部浩巳, 久曾神煌, 岡田学, 大塚雅美, 宮島伸一: 超音波音響粘性力と空気静圧力を組み合わせたフラットパネル基板の非接触搬送技術の開発 (第 4 報) -非接触脱落防止ガイドの開発-, 2007 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2007), 767-768
- [4] 大八木岳人, 諸熊洋輔, 小池義和, 上羽貞行, 高三正巳: 近距離場音場浮揚を用いた板状物体の非接触搬送法の検討 -40kHz 振動子による小型化・軽量化の検討-, 日本音響学会講演論文集, (2003), 1133-1134