

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656153

研究課題名(和文)多重モード強力超音波振動子の革新的デバイスへの応用

研究課題名(英文)High power ultrasonic application using a multi-mode ultrasonic transducer

研究代表者

森田 剛 (MORITA, Takeshi)

東京大学・新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：60344735

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円、(間接経費) 780,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、強力超音波応用として近距離場音響浮揚を取り上げ、単一正弦波駆動に対して、高調波振動を重ね合わせた振動波形とする効果についての検討をした。多重モード超音波振動子を設計、試作し、高周波共振周波数と基本周波数の比を2:1とすることを確認し、基本波と高調波振動モードの位相差が浮上量を変化させることを見出した。この実験結果を説明するため、ギャップ間の空気非線形体積弾性率に関してポアソンの法則を導入した。その結果、多重モード超音波振動子によって制御された振動波形を用いることで、特にギャップが小さく高負荷状態の場合に浮上量増加に有効であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Near-field acoustic levitation (NFAL) is one of the high-power ultrasonic applications that are based on the nonlinear phenomena. The NFAL enables non-contact transportation by levitating kg-order objects. Until now, various NFAL researches had been reported; however they used only the simple sinusoidal vibration wave for a levitation force.

In this study, we propose to utilize various wave forms to improve NFAL performances. For this purpose, we designed ultrasonic transducer was fabricated, whose resonant frequencies ratio can be controlled precisely,  $f_3/f_1 = 2$ . Using this transducer, fundamental and second vibration modes are easily combined. From the experimental results, we confirmed the nonlinear bulk modulus of air contributes to NFAL significantly and found the appropriate model using Poisson's law. According to this calculation, it was clarified that the form controlled wave is effective especially in the case of highly-loaded conditions.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 機械力学・制御

キーワード：音響エネルギー 超音波工学

### 1. 研究開始当初の背景

胆石粉碎などの超音波医療や、超音波加工、化学反応促進、化学的滅菌、半導体デバイス表面洗浄などへの応用に対して、強力超音波振動子の性能向上は極めて重要な要素技術である。また、圧電トランスや、強力超音波アクチュエータ等、小型でハイパワー出力の超音波デバイスへの期待は大きい。本研究では、強力超音波応用に際して、従来の単一正弦波振動波形を用いるのに対して、高次振動モードを重ね合わせることによって、新たな効果を創成することを目的に研究を行っている。その中でも、本報告では、近接音場浮揚を取り上げた。

近接場音波浮揚とは、強力超音波の利用により数キログラムの固体を浮上させる現象である。近接場音波浮揚は非線形現象を利用していることから、励振する超音波の波形を変化させることによる効果の向上が期待できる。今までにキャピテーション生成において、励振波として周波数比 1:2 の重ね合わせ正弦波を利用した例が報告されており、本研究でも超音波ポンプ技術における有効性を確認している。

### 2. 研究の目的

本研究ではこれを応用し、同様に非線形現象を利用している近接場音波浮揚でこの重ね合わせ波を用いることを提案する。また重ね合わせ正弦波励振のため、最適化された多重モード振動子を新たに開発した。また今回の実験により観測された現象は従来の近接場音波浮揚モデルでは説明できなかったため、空気軸受で用いられていたモデルを応用することを試みた。

### 3. 研究の方法

従来型多重モード振動子は周波数比 1:2 の重ね合わせ波を励振できるように設計されており、段付き円柱形状をしている。しかし、今回振動子設計について再検討したところ、設計上共振周波数比調整精度が不十分であることがわかった。そこで、新型振動子の改良案として、従来型振動子に追加リングを取り付け、段の位置を変化させることで共振周波数比を精密に制御することを考案した。

この基本構造に対して、実際の振動子に近い詳細モデルを有限要素法でモーダル解析した。これにより、0.1 mm の段位置変化により共振周波数比  $f_3 / f_1$  が 0.001 の割合で変化することが明らかとなった。これは、目標の共振周波数比  $f_3 / f_1$  を  $2 \pm 0.003$  以内とすることを十分達成可能な精度であった。よってこの解析モデルを元に設計、試作を行った。

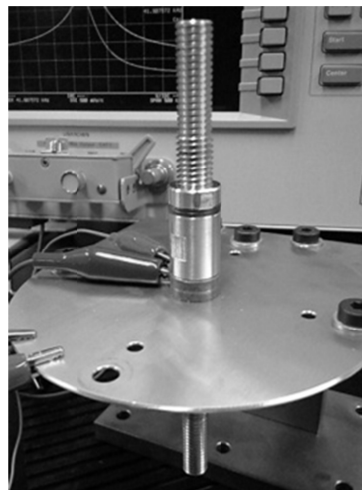


Fig.1 多重モード振動子

組み立てた振動子を Fig.1 に示す。Fig.1 振動子の全長は 144.8 mm、初期の段の位置はフランジから 25.9 mm にある。これにステンレス製の追加リングを積み重ねて共振周波数比を調節した結果が Fig.2 である。段の高さを 7.3 mm 増加させた時点で、共振周波数比  $f_3 / f_1 = 2.001$  を実現することができた。

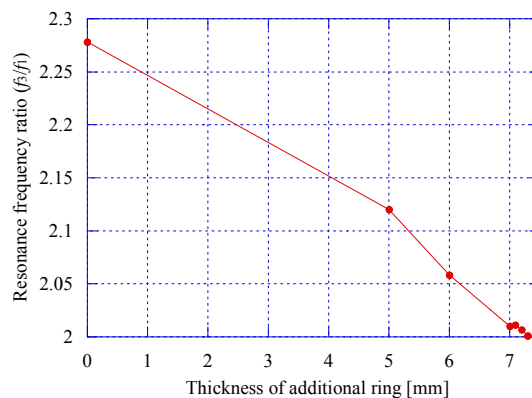


Fig.2 追加リングによる共振周波数比制御

次に、試作した多重モード振動子を用いて、周波数比 1:2 の重ね合わせ正弦波を利用した近接場音波浮揚実験を行った。入力電圧を一定とすることで振動子の振幅を固定し、入力電圧の 1 次モードに対する 3 次モードの位相差を変化させ、波形を制御したときの浮上量の結果を Fig.3 に示す。この位相制御により、励振波形はのこぎり波や台形波状に変化する。浮上量は波形が下向き台形波状になったとき最大となり、上向き台形波状のとき最小となった。なお、共振により振動子の振動は入力電圧に対して位相がずれるため、振動波形と入力電圧波形は必ずしも一致しない。

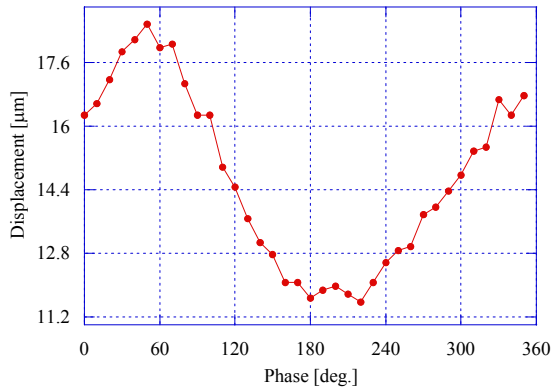


Fig. 3 位相差に対する浮上量の変化

まず、従来から用いられている近接場音波浮揚モデルにより本研究で得られた実験結果を考察した。従来型モデルの単一周波数による近接場音波浮揚は音響放射圧によって説明されており、この理論によると浮上体上部と、浮上体下部と振動子振動面のエネルギー密度の差が音響放射圧と等しくなる。振動子が平面波を励振し、浮上物体は距離  $h$  の位置で静止して浮揚しているとき、ギャップ間の空気の振動速度分布を  $v(x,t)$  とする。このとき、空気の密度を  $\rho$  とする。従来の計算式に本研究における振動子の振動変位

$v_0(t) = v_1 \cos(\omega t) + v_2 \cos(2\omega t + \phi)$  を代入し、音響放射圧  $p$  を求めると、

$$p = \frac{\rho}{2} \left( \left( \frac{v_1}{\sin k_1 h} \right)^2 \left( \frac{1}{2} - \frac{\sin 2k_1 h}{4k_1 h} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{v_2}{\sin k_2 h} \right)^2 \left( \frac{1}{2} - \frac{\sin 2k_2 h}{4k_2 h} \right) \right)$$

となり、この計算式はモード同士の位相差  $\phi$  に依存しない。すなわち、この考え方では本研究の実験結果を説明することはできないので、従来とは異なる説明が必要となった。

そこで本研究では、空気軸受で用いられていたモデルに着目した。浮上体と振動面間の音圧振幅は一定と考え、その値を断熱変化におけるポアソンの法則

$$PV^\gamma = \text{const.}$$

に基づいて計算した。  $\gamma$  は比熱比を表し、空気では 1.4 である。式(6.1)において、大気圧  $P_0$  からの変化を  $\Delta P$ 、初期ギャップ体積  $V_0$  からの変化を  $\Delta V$  とすると、

$$\Delta P = \frac{P_0}{\left(1 + \frac{\Delta V}{V_0}\right)^\gamma} - P_0$$

が得られる。この式は、体積変化に伴う圧力変化の非線形性を示している。

このような振動によってギャップ間体積

が 2 次の高周波を含む変化をすると、Fig.4 に示すように 1 次と 2 次の位相差  $\phi$  の変化に対して圧力変化が見られる。ここにおいても、振動波形が下向き台形状となったときに圧力が最大となる。すなわち、提案したモデルにより、本研究による実験結果を定性的に説明できた。

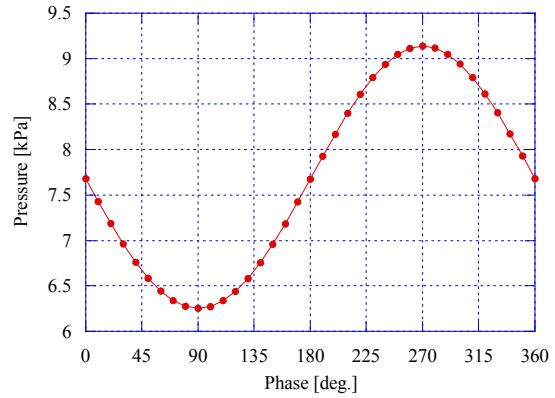


Fig. 4 位相差に対する増加圧力の変化

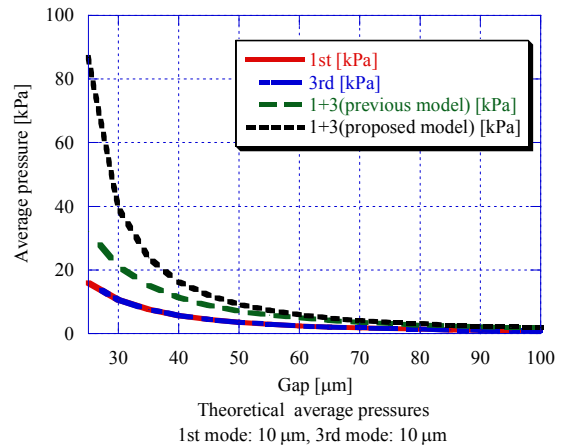


Fig. 5 浮上距離と時間平均圧力の関係

また、一定の高さにおいて浮上物が静止していると仮定した場合の、時間平均浮上圧を表したグラフが Fig.5 である。横軸は浮上物が静止している高さを表す。このグラフから、重量物を浮上させる場合に波形制御が効果的である可能性が示された。

#### 4. 研究成果

周波数比 1:2 の重ね合わせ波の励振に最適化された多重モード振動子を設計した。この多重モード振動子を用いて近接場音波浮揚実験を行い、1 次モードと 3 次モードの位相差による波形制御が浮上量に影響することを明らかにした。また本現象は、ポアソンの法則を用いて定性的に説明できることを確認し、重量物浮上において波形制御が効果的である可能性を示した。

## 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計2件)

1. 武藤将史, 森田 剛, "多重モード振動子を用いた近接場音波浮揚の基礎的研究", 第25回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp.120-121, 箱根ホテル小涌園 (2013.05.15)
2. 武藤将史, 森田 剛, "多重モード振動子を用いた近接場音波浮揚現象に関する研究", 精密工学会 2013 年度春季大会プログラム&アブストラクト集, p.55, 東京工業大学(2013.03.13)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ems.k.u-tokyo.ac.jp/morita/>

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

森田 剛 (MORITA, Takeshi)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科

科・准教授

研究者番号：60344735