

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22656057

研究課題名（和文） ハイパワー出力可能な超小型リニア圧電アクチュエータの研究

研究課題名（英文） Micro high power linear piezoelectric actuator

研究代表者

保坂 寛（HOSAKA HIROSHI）

東京大学・新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：50292892

研究成果の概要（和文）：

スムーズインパクト駆動方法(SIDM)は小型圧電リニアアクチュエータの一つであり、すでに実用化されている。しかし、Q 値の低い積層圧電体が使われていたため、高速駆動や小型化に問題があった。そこで、本研究では共振駆動型 SIDM を提案し、Q 値の高い圧電単板を用いた駆動方法を試みた。長さ 10mm で幅 2mm の振動子を試作し、原理通りの駆動を確認することにより、小型化に有利となる本手法の有用性を実証した。

研究成果の概要（英文）：

Smooth Impact Drive Mechanism (SIDM) is one of the compact linear piezoelectric actuators, which has been practically used. In this study, we propose a resonant-type SIDM, which enables much simpler structure and easy miniaturization because it utilizes a single PZT plate instead of a multi-layered PZT. Furthermore high power output operation becomes possible. As a fundamental research, we studied about the design strategy for this R-SIDM stator transducer and demonstrated the proposed principle with the transducer whose dimensions were 10 mm long and 2 mm width.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	900,000	0	900,000
2011 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
総計	3,000,000	630,000	3,630,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：マイクロ・ナノメカトロニクス・圧電アクチュエータ・共振駆動

## 1. 研究開始当初の背景

近年のモバイル機器や医療機器の小型化に対して、小型かつハイパワーなアクチュエータが求められている。コニカミノルタの吉田氏らが開発した SIDM は、精密な小型アクチュエータとして携帯電話搭載のデジタルカメラレンズ駆動部や手振れ補正機構として応用されて注目を集めている。今後、この機構をさらに小型化しようとする、積層圧電素子をさらに小型化しなくてはならないという問題点がある。また、従来の駆動原理では、圧電定数が大きく Q 値の低いソフト系

圧電材料を用いなくてはならなかったため、高速化(ハイパワー化)が困難であった。これに対して、著者らのグループでは、全長 150mm 程度の比較的大型のランジュバン振動子を用いて、2 つの縦振動モードを組み合わせる新しい駆動原理を提案し、共振型 SIDM アクチュエータと名付けた。

## 2. 研究の目的

本研究では、従来の SIDM をさらに小型化する基礎的検討を行うことを目的とし、プレート形状のハード系単層圧電素子を用いた

小型アクチュエータに関する研究を行った。

### 3. 研究の方法

**SIDM** はスティックスリップアクチュエータとも呼ばれ、摩擦と慣性を利用した駆動原理である。その基本構造を図 1 に示す。ステータ部分は、一端を固定された積層圧電素子と棒状の摩擦部材によって構成される。スライダは、この摩擦部材に予圧負荷した状態となる。

まず圧電素子に加える電圧を徐々に大きくするとスライダは摩擦力によりステータの摩擦部材と一体化して移動する。その後、電圧を急激に小さくすると、スライダの慣性力が摩擦力に打ち勝ち、そこに留まろうとするためにすべりを生じ、相対的にスライダは前方に移動する。この一連の動作を摩擦部材のノコギリ変位により連続して行うことでスライダを駆動する原理が **SIDM** である。

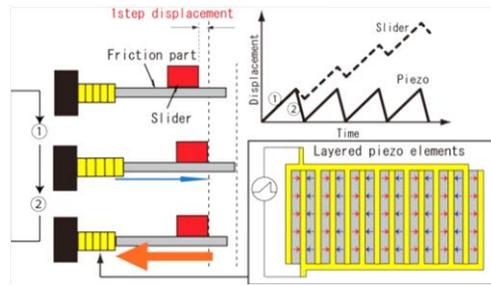


図 1 従来の SIDM の駆動原理

従来の **SIDM** では、摩擦部材にできるだけ大きな振幅のノコギリ波形を実現させるため、低周波領域で大変位が得られるソフト系積層圧電素子が用いられていた。しかし、これは高速駆動時に振動損失が大きくなる上、積層圧電素子は複雑構造なので小型化に不利である。一方で、DC 駆動での変位はソフト系より小さいが  $Q$  値が高く共振時に非常に大振幅を得られるハード系 **PZT** がある。

本研究の提案原理ではプレート形状のハード系単層圧電素子を共振駆動させることでシンプル構造と高速駆動を両立させる。すなわち、図 2 に示すようにプレート型縦振動子の基本振動モードと高次モードの 2 つの共振モードを重ね合わせ、その結果生じる先端部分のノコギリ波形変位を利用するのが共振型 **SIDM** の駆動原理である。

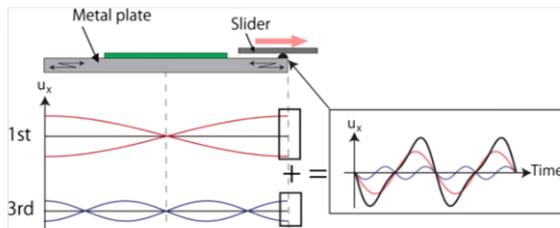


図 2 共振型 SIDM の駆動原理

このような縦振動の重ね合わせによってノコギリ波形を実現するためには、フーリエ級数展開に基づき、図 2 の様に共振周波数が 1:2 である 2 つの正弦波を重ね合わせる必要がある。

本研究では振動子の中心部にプレート型 **PZT** を張り付けてステータ振動子とする。しかし、両端自由の縦振動子の基本共振周波数と、その次の高次モードの共振周波数は 1:3 となってしまう、振動を重ね合わせてもノコギリ波形とならない。そこで、図 3 のように振動子を段付構造として中心部と先端部の断面積比を変えることで 1 次モードと 3 次モードの周波数比を 1:2 へと制御することを考えた。まず、その妥当性を考えるため、単一材料の段付構造における共振周波数の計算を行った。

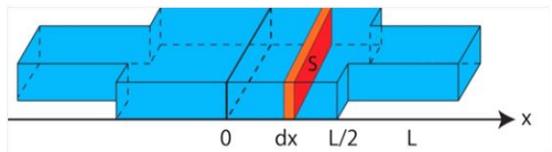


図 3 振動子の基本構造

図 3 のような構造で、密度を  $\rho$ 、ヤング率を  $E$ 、 $0 \leq x \leq L/2$  の断面積を  $S_1$ 、変位  $u_1(x, t)$ 、 $L/2 \leq x \leq L$  の断面積を  $S_2$ 、変位  $u_2(x, t)$  とすると、微小部分  $dx$  における波動方程式は

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$u(0, t) = 0 \quad (2)$$

$$ES_1 \frac{\partial u_1(L/2, t)}{\partial x} = ES_2 \frac{\partial u_2(L/2, t)}{\partial x} \quad (3)$$

$$u_1(L/2, t) = u_2(L/2, t) \quad (4)$$

$$\frac{du(L, t)}{dx} = 0 \quad (5)$$

を用いると、 $n$  次モードの固有振動数  $f_n$  は

$$f_n = \frac{1}{\pi L} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{S_1}{S_2}} \quad (6)$$

となる。横軸に  $S_1/S_2$  を、縦軸に 1 次と 3 次の共振周波数の値及びその比をプロットした結果を図 4 に示す。

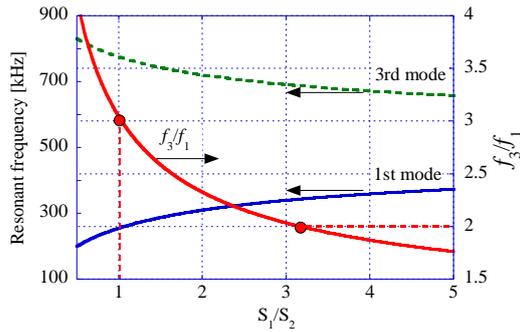


図4 振動子断面積比と共振周波数比の関係

この結果、先端を細くしていくに従って、1 次の共振周波数は単調増加し、3 次の共振周波数は単調減少することが分かる。また、段付が無い場合( $S_1/S_2=1$ )には、両者の比は 1:3 となり、これを 1:2 にするには、 $S_1/S_2$  を 3.2 とすればよいことが分かった。ただし、この計算では、圧電素子部分を含んでいない単純化したモデルであるため、有限要素法解析を以下のように行った。

段付構造の設計を目的として、有限要素法解析ソフト ANSYS を用いて振動子のモーダル解析を行った。振動子の金属部分はジュラルミンとし、長さ 10mm、中心幅 2mm、厚さ 0.5mm である。圧電素子は、日本セラテック社製 C 材で長さ 5mm、幅 2mm、厚さを 0.2mm とした。モーダル解析結果の一例を図 5 に示す。また、両先端 2.5mm の部分の幅を変化させた場合の各共振周波数の関係は図 6 に示すようになり、数値計算結果と同様の傾向を示した。また、先端幅を最適化することにより、1 次モードの共振周波数と 3 次モードの共振周波数が 1:2 に制御できることを確認した。

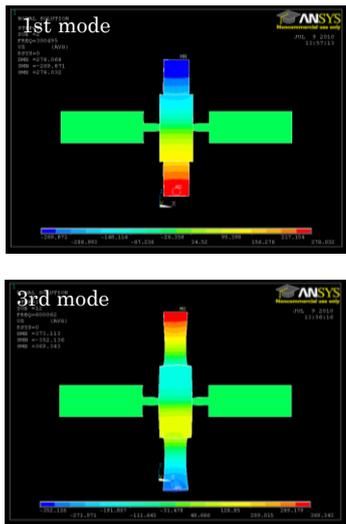


図5 有限要素法による縦振動モーダル解析

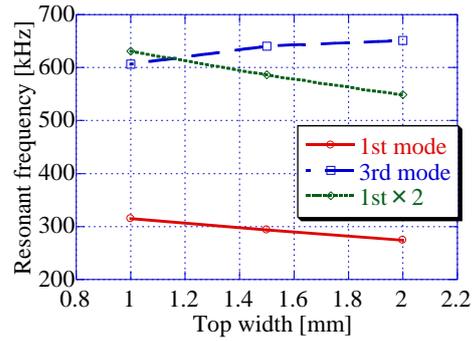


図6 有限要素法による縦振動モーダル解析

有限要素法によって縦振動の共振周波数比が 1:2 の付近となることが予想される振動子として、段付部の先端幅は 1.0mm、1.5mm、2.0mm とした。このような形状のジュラルミン板を図 7 のようにワイヤ放電加工で製作し、その中心付近に圧電素子を張り付けてステータ振動子とした。

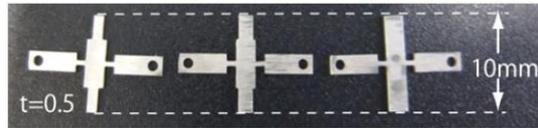


図7 圧電素子を張り付ける前の振動子

このステータ振動子の先端の縦振動特性をレーザードップラー速度計 (Polytec NLV-2500) で測定した。駆動周波数と振動子先端速度の関係から求めた、各振動子の 1 次モードと 3 次モードの共振周波数を求めた結果を図 8 に示す。この結果はモーダル解析結果と近く、1 次と 3 次の共振周波数比が 1:2 に近い、先端幅 1.5mm の振動子をステータ振動子として以下の駆動実験を行うこととした。

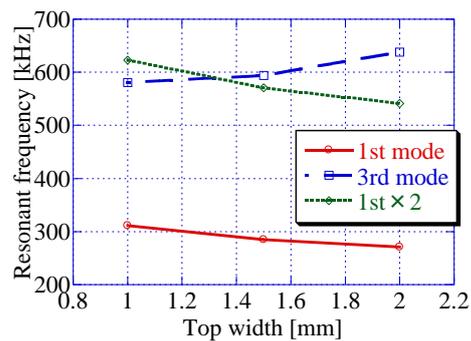


図8 試作した振動子の各共振周波数

共振型 SIDM の駆動には理想的には正確に 1:2 の周波数比を持つ印加電圧で振動子を駆動させる必要がある。しかし、実際には、図 8 で分かるように、これらの共振周波数比は先端幅 1.5mm の振動子を用いても、完全にはこの比とはなっていない。そこで、どちらの振動モードに対しても共振ピークが完全に

一致したわけではなかったが、双方の共振の効果が得られる周波数として 288.3kHz と 576.6kHz を選び、それぞれ 2.4V<sub>p-p</sub> と 13.0V<sub>p-p</sub> で入力した結果、図 9 に示すように台形速度が得られ、ノコギリ波形変位をしていることが確認できた。

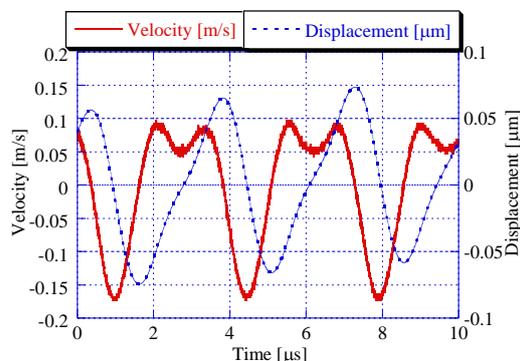


図 9 共振モードの重畳によるノコギリ波形

SIDM 駆動の際にはスライダをステータ振動子に予圧負荷する。このことにより共振周波数は変化するので、この変化をインピーダンスアナライザ(Agilent 4294A)で測定した。この結果、予圧を与えることで 1 次と 3 次の共振周波数は無負荷時に比べて共に上昇し、その比は 1:2 に近づき、1 次共振周波数は約 300kHz、3 次共振周波数は約 600kHz となった。

共振周波数付近において、1:2 となる二つの駆動周波数を持つ正弦波電圧を足し合わせ、0.1kHz(0.2kHz)ずつ変化させながら振動子に入力し、駆動実験を行った。スライダとして、図 10 のように小型ベアリングを用いた。その結果、297.9kHz とその 2 倍の 595.8kHz の正弦波電圧をそれぞれ 42V<sub>p-p</sub> と 24V<sub>p-p</sub> とし、予圧を調節したところ、180rpm で図 10 の方向にベアリングを回転させることに成功した。さらに、3 次モードの入力電圧の位相差を制御することで反対方向に 110rpm で回転させることができた。以上より、本研究の小型アクチュエータが提案原理に基づいて駆動していることが確認できた。

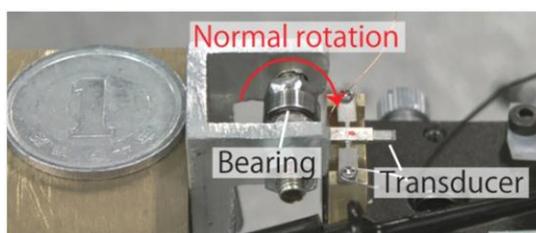


図 10 モータ駆動実験図

#### 4. 研究成果

本研究ではプレート形状ハード系単層圧電素子と段付構造の金属板のみで構成される非常なシンプルな振動子を用いて、小型な共振型 SIDM アクチュエータを試作した。その上で、駆動原理に基づく 1 次モードと 3 次モードの共振周波数比を制御するために、振動子先端幅を制御すれば良いことを示した。しかし、予圧を与えた場合の共振周波数の変化や、発生力や速度の見積もりや実験などを今後行っていくことが必要である。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

- ① Takuma Nishimura, Hiroshi Hosaka and Takeshi Morita, "Resonant-type SIDM actuator using a bolt-clamped Langevin transducer", *Ultrasonics*, vol. 52, pp. 75-80, 2012, 査読有り
- ② Munesuke Suzuki, Hiroshi Hosaka and Takeshi Morita, "Resonant type SIDM actuator with two Langevin transducers", *Advanced Robotics*, vol. 26, pp.227-290, 2012, 査読有り
- ③ Takeshi Morita, Hiroaki Murakami, Takami Yokose and Hiroshi Hosaka, "A miniaturized resonant type smooth impact drive mechanism actuator", *Sensors and Actuators*, vol. 178, pp. 188-192, 2012, 査読有り

〔学会発表〕(計 10 件)

- ① 横瀬 誉実, 吉田 龍一, 保坂 寛, 森田 剛, "小型 R-SIDM の設計法に関する研究", 2012 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2012 年 3 月 14 日, 八王子
- ② 横瀬誉実, 保坂 寛, 森田 剛, "共振駆動型 SIDM アクチュエータの小型化に関する研究", 電子情報通信学会技術研究報告会(超音波), 2011 年 11 月 22 日, 長津田
- ③ Munesuke Suzuki, Hiroshi Hosaka and Takeshi Morita, "Resonant type SIDM actuator with two Langevin transducers", *International Congress on Ultrasonics*, 2011 年 9 月 5 日, ポーランドグダンスク
- ④ 村上弘明, 保坂 寛, 森田 剛, "小型 R-SIDM アクチュエータの基礎的検討", 第 23 回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム, 2011 年 5 月 19 日, 名古屋
- ⑤ Takeshi Morita, Takuma Nishimura, Munesuke Suzuki and Hiroshi Hosaka, "Resonant type smooth impact drive mechanism", *57th ICAT International Smart*

*Actuator Symposium*, 2010年10月5日, アメリカ ペンステート

- ⑥ 鈴木宗佑, 保坂 寛, 森田 剛, ”2つのランジュバン振動子による共振型SIDMの開発”, 2010年度精密工学会秋季学術講演会2010年9月28日, 名古屋
- ⑦ 鈴木宗佑, 保坂 寛, 森田 剛, “2つのランジュバン振動子を用いた共振型SIDMの基礎的検討”, 第28回日本ロボット学会学術講演会, 2010年9月22日, 名古屋
- ⑧ Takuma Nishimura and Takeshi Morita, “Resonant-Type SIDM Actuator”, *12th International Conference on New Actuators (Actuato2010)*, 2010年6月16日, ドイツ ブレーメン
- ⑨ 鈴木宗佑, 森田 剛, “2つのランジュバン振動子を用いた共振型SIDMアクチュエータ”, 第22回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム, 2010年5月20日, 門司港
- ⑩ 西村卓真, 森田 剛, “モード設計したランジュバン振動子による共振型SIDM”, 第22回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム, 2010年5月19日, 門司港

[その他]

ホームページ等

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

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

保坂 寛 (HOSAKA HIROSHI)

東京大学・新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：50292892

### (2) 研究分担者

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