

# 積層型圧電素子を用いた多自由度マイクロ超音波アクチュエータ

66802 高瀬 龍馬

指導教員 森田 剛 准教授

Recently, demands for actuators with multi degree-of-freedom are increasing in medical and industrial field. In this study, we realized multi degree-of-freedom ultrasonic motor. This motor has various advantages such as quiet and direct drive mechanism without reduction gear. It is because this motor obtains high torque in comparison with a general electromagnetic motor. In addition, with the usage of multilayered piezoelectric actuators, the simple control system and the miniaturization are easy in comparison with a conventional resonance type ultrasonic motor. In the future, this motor is expected for applications of medical endoscopes.

Key words: Multi degree-of-freedom, Ultrasonic motor, Multilayered piezoelectric actuators

## 1. 緒言

近年、医療や産業の分野で、より小型で多自由度のアクチュエータの要求が高まっている<sup>1~2)</sup>、本研究では小型の多自由度超音波アクチュエータの実現を試みた。本研究のアクチュエータは、一般の電磁アクチュエータと比べて高トルクが得られるため、減速機構を必要とせず、静穏で小型であるという特長がある。また積層型圧電素子を用いて、非共振型に設計した為、従来の共振型超音波アクチュエータの様に、振動の節に支持点を設ける必要が無く、小型化や周波数の制御が容易である。将来的には医療用内視鏡などへの応用が期待される。

## 2. 構造と原理

### 2.1 積層型圧電素子

本研究に用いた積層型圧電素子は、株式会社日本セラテックの PAC-233J-C である。この素子は、 $3\text{mm} \times 3\text{mm} \times 10\text{mm}$  ( $90\text{mm}^3$ ) と小型でありながら、 $150\text{V}$  の入力電圧で約  $8\mu\text{m}$  の変位量が得られる。また素子の外装樹脂が無い為、 $100^\circ\text{C}$  で使用可能であり、 $10\mu\text{sec}$  以下の応答性がある。

### 2.2 多自由度超音波アクチュエータの構造

本研究で提案する多自由度超音波アクチュエータの構造を Fig.1 に示す。積層型圧電素子4つを導電性接着剤 (FA-705A) で接着し、ロータとして直径  $20\text{mm}$  の鋼球を用いた。また、ロータとの接触部には直径  $1\text{mm}$  ルビーボールを使用した。

Fig. 1 の多自由度アクチュエータの圧電素子部の構造の分極方向はすべて同一にしてある。Fig. 1 の電極 A と D, B と C をつなぎ、それぞれに同振幅で位相差  $90^\circ$  の交流電圧を印加すると、ステータ上部のロータ接触部は  $yz$  平面で楕円軌跡を描く。その結果、ロータは Fig. 1 の①のように  $x$

軸まわりに回転する。同様にして、電極 A と B, C と D にそれぞれに同振幅で位相差  $90^\circ$  の交流電圧を印加すると、ロータは Fig. 1 の②の  $y$  軸まわりに回転する。また、電極 A→B→C→D と順々に同振幅で位相差  $90^\circ$  の交流電圧を印加すると、ステータはモード回転型超音波アクチュエータの原理より、ロータは Fig. 1 の③の  $z$  軸まわりに回転する。①から③の各軸まわりの回転において、印加電圧の位相差を  $-90^\circ$  にすると、ロータ接触部の楕円軌道は逆向きになり、ロータは逆回転する。

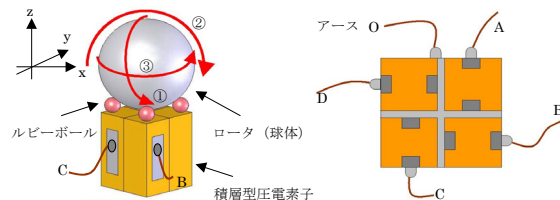


Fig.1 Structure of multi-DOF ultrasonic actuator

### 2.3 一軸超音波アクチュエータの構造

多自由度アクチュエータの実験の前にその基本特性を調べるため、一軸超音波アクチュエータの特性を調べた。本研究で提案する一軸超音波アクチュエータの構造を Fig. 2 に示す。

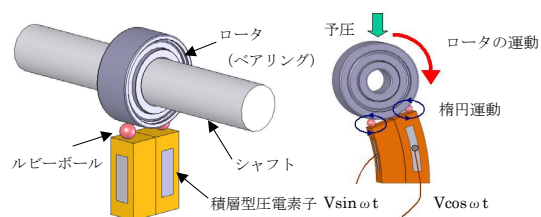


Fig. 2 Structure of one-DOF ultrasonic actuator

積層型圧電素子を2個接着し、ロータとして直径  $8\text{mm}$  のベアリングを用いた。それぞれの素子

に同振幅で位相差が  $90^\circ$  の電圧を印加することにより、ステータ上部のロータ接触部において楕円運動が発生し、ロータを押し付けることで、摩擦によりロータが回転する。印加電圧の位相差を  $-90^\circ$  にすると、ロータ接触部の楕円運動は逆向きになり、ロータは逆回転する。

#### 2.4 一軸超音波アクチュエータの設計

本研究で提案する一軸超音波アクチュエータを Fig. 3 に示す。ロータ回転軸がベアリングホルダによって支えられている。ステータを乗せた台にはリニアガイドが設置されており、垂直に移動可能である。その下部にはスプリングが取り付けられており、スプリングの他端は Z 軸ステージに固定されている。Z 軸ステージを調整することで、ステータをロータに押し付け、スプリングが伸縮し予圧が調整できる機構になっている。

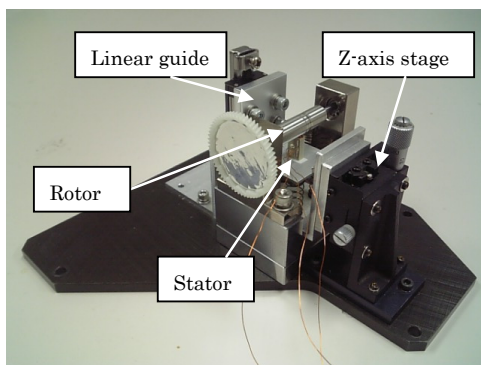


Fig. 3 The one-DOF ultrasonic motor

#### 2.5 多自由度超音波アクチュエータの設計

本研究で提案する多自由度超音波アクチュエータを Fig. 4 に示す。一軸アクチュエータと同じ予圧機構を用いた。球体に芯を出しながら穴を開け、回転軸を通し接着したロータをベアリングユニットで固定する。これにより、多自由度アクチュエータの回転を x 軸および y 軸まわりに分けて回転速度を測定する。

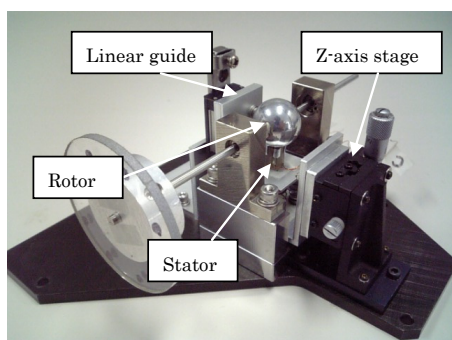


Fig. 4 The multi-DOF ultrasonic motor

### 3. 実験

#### 3.1 一軸超音波アクチュエータ

##### 3.1.1 アドミタンス測定

製作した一軸超音波アクチュエータの共振周波数を調べるため、振動子にインピーダンスアナライザを接続し、アドミタンス特性を測定した。その結果を Fig. 5 に示す。測定の結果、250kHz 以下では 2 つの曲げモードと 1 つの縦モードが得られた。これらのモードの周波数は、駆動電極を変えてそれぞれ単独で発生させたときと一致する。

第 1 縦モードでは 138kHz, 第 1, 第 2 曲げモードではそれぞれ 92kHz, 200kHz 付近で共振した。この結果より、一番低い第一曲げモードの共振周波数 92kHz 以下でアクチュエータを駆動させればよいことが分かった。

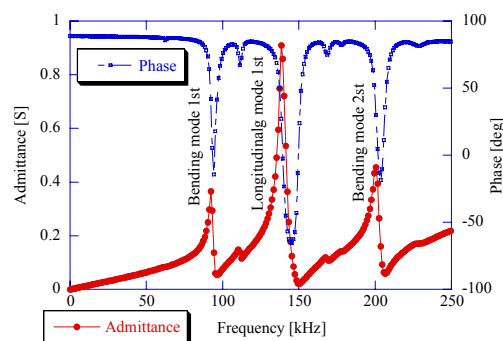


Fig. 5 The admittance and the Phase of the stator transducer

##### 3.1.2 駆動実験および各電圧における回転速度

製作した一軸超音波アクチュエータを駆動させ、各電圧におけるロータの回転速度を測定した。予圧 0.8N, 駆動周波数 15kHz での実験結果を Fig. 6 に示す。駆動電圧を大きくするにつれて回転速度は上昇する。これは、駆動電圧が大きくなるとステータの振動変位が大きくなり、ロータ接触部での楕円運動も大きくなるので、ロータを回転させる推進力が強くなるからである。

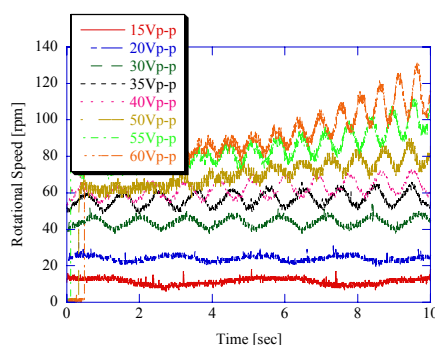


Fig. 6 Rotational speed of rotor

## 3.2 多自由度超音波アクチュエータ

### 3.2.1 アドミタンス測定

製作した多自由度超音波アクチュエータの共振周波数を調べるため、アドミタンス特性を測定した。その結果を Fig. 7 に示す。測定の結果、150kHz 以下では、最も低い共振周波数 79kHz 以下で駆動すればよいことが分かった。

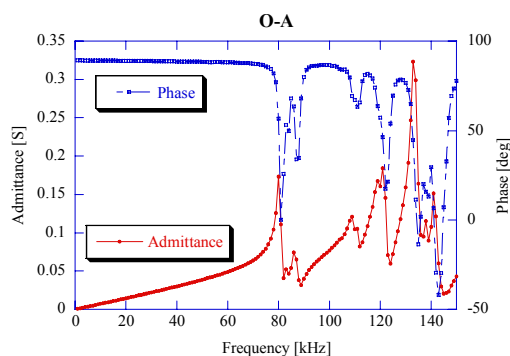


Fig. 7 The multi-DOF ultrasonic actuator

### 3.2.2 駆動電圧測定

多自由度超音波アクチュエータの x 軸まわりの駆動電圧特性を測定した。実験では 0.2, 0.4, 0.6N の各予圧において、駆動周波数を 6.6kHz とし、駆動電圧を 0 から 75V<sub>p-p</sub> までの 5V<sub>p-p</sub> ずつ回転速度を測定した。その結果を Fig. 8 に示す。駆動電圧を 0 から徐々に上げていっても、0.2, 0.4N では 15V<sub>p-p</sub> まで、0.6N では 20V<sub>p-p</sub> までロータが回転せず、それぞれ 20, 25 V<sub>p-p</sub> で回転し始めた。アクチュエータが回転するためには圧電素子の変位が必要となる。予圧が大きくなるとこの変位を得るためには大きな力が必要となり、より高い電圧をかけないと回転しないためにこのような結果となった。各予圧において回転し始めると、高電圧になるにしたがって推進力が増し、回転速度は速くなる。

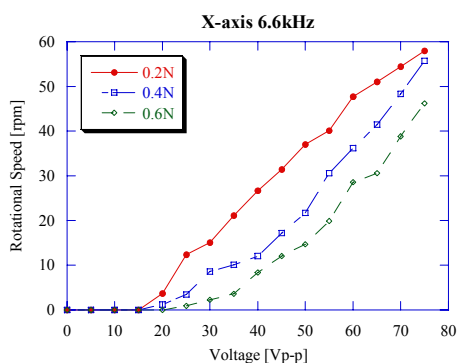


Fig. 8 The ratio of speed to voltage

### 3.2.3 位相特性

多自由度超音波アクチュエータの x 軸まわりの位相特性を測定した。実験は予圧 0.2N で駆動電圧 60V<sub>p-p</sub>、駆動周波数 6.6kHz でアクチュエータを x 軸まわりに駆動しながら、2つの入力電圧の位相差を-180 から 180° まで測定した。測定結果を Fig. 9 に示す。

位相が 0 のとき回転速度は 0 である。これは、4つの積層型圧電素子が同時に伸縮を繰り返し、縦モードを発生しているだけで楕円運動を発生していないからである。

位相差を 0 から徐々に大きくしていくと、ロータは回転し始める。位相差を大きくするにつれて回転速度は増していき、位相差 90° のとき回転速度は最大になる。これは、位相差が 90° のとき、4つの素子の変位差が最大になり、ロータ接触部での楕円運動も最大になる。その後、さらに位相差を大きくしていくと、回転速度は徐々に減少し、位相差 180° で 0 になる。これは、位相差が 180° のとき、4つの積層型圧電素子が逆位相で伸縮を繰り返し、曲げモードを発生しているだけで楕円運動が発生しないためである。

次に、位相差を 0 からマイナス側に徐々に大きくしていくと、ロータは逆方向に回転し始める。位相差をマイナス側に大きくするにつれて逆方向に回転速度は増していき、位相差 -90° のとき回転速度は最大になる。さらに位相差をマイナス側に大きくしていくと、逆方向の回転速度は徐々に減少し、位相差 -180° で 0 になる。これも位相差 -180° のときはモードを発生しているだけで、楕円運動が発生しないためである。

また正回転と逆回転の回転速度を比べると、正回転では逆回転より 10%程度回転速度が遅い。これは、多自由度アクチュエータの製作精度の問題上、様々な箇所での損失が発生しているためと考えられる。

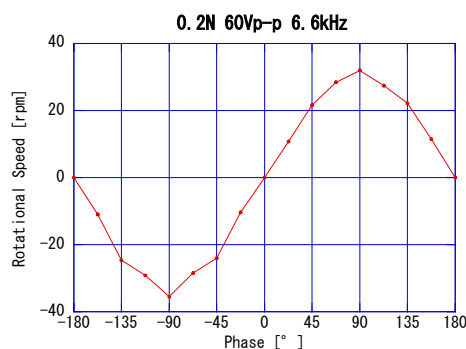


Fig. 9 The ratio of speed to phase

### 3.2.4 トルク特性

多自由度超音波アクチュエータの  $x$  軸まわりのトルク特性を測定した。実験は 0.2, 0.4, 0.6N の各予圧において、駆動電圧 60V<sub>p-p</sub>, 駆動周波数 6.6kHz でアクチュエータを駆動させながら、様々な荷重を与えたときの駆動トルクと回転速度を測定し、プロットした。実験結果を Fig.10 に示す。測定結果より、各予圧において、負荷が増加すると、それにともない回転速度は減少した。

低負荷のうち、予圧が小さいほうが回転速度は速いが、予圧が小さい場合、トルクを大きくしていくと急激に回転速度が失速する。そして高トルクに達する前に回転は止まってしまう。しかし、予圧を大きい場合、低トルクのうち回転速度が小さいが、トルクを大きくしていくと回転速度は低トルクほど減少しない。予圧が大きい場合はトルクを増加していったとき、ある点で予圧が低い場合より回転速度は大きくなる。そして高トルク時は、予圧が高い場合のほうが回転速度が速い。

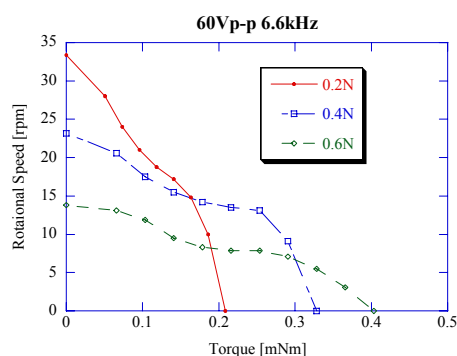


Fig. 10 The ratio of speed to torque

### 3.2.5 駆動効率

3.2.5 項で求めたトルク特性より求めた多自由度超音波アクチュエータの  $x$  軸まわりの駆動効率を Fig. 11 に示す。

各予圧において、トルクを大きくしていくと駆動効率は上昇していき、あるトルクにおいて駆動効率は最大に達し、その後はトルクを増加させると駆動効率は減少し、やがて 0 になる。これは、低トルクのうちロータ接触部ですべりが生じていて、その損失により効率が低い、トルクを増加させていくとすべりが減少し効率は高くなっていく。効率が最高になった後はトルクを増加させていくとロータ接触部で発生する摩擦損失が大きくなり効率は減少する。そして最終的にはロータを回転させている推進力よりトルクが大きくなり回転は止まり、効率は 0 になる。

また、低トルクのうち予圧が低いほうが効率

が高い。これは低トルク時はロータのすべり損失の影響が大きい、予圧が低いほうが、積層型圧電素子への押し付け負荷が小さく、変形が容易でロータ接触部での楕円運動が得やすいためと思われる。しかし予圧が小さいと駆動力が小さいため、ある程度トルクを大きくしていくと、予圧が大きい場合のほうが回転速度は大きくなる。

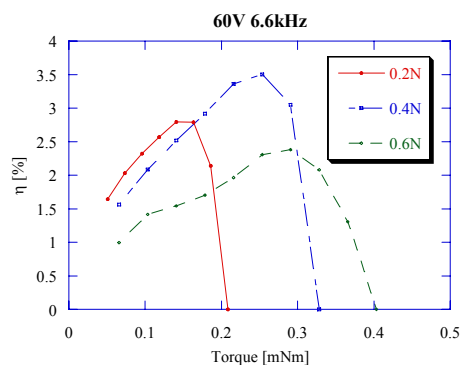


Fig. 11 Efficiency-torque curve

## 4. 研究の結果と今後の課題

本研究では、低電圧で大きい変位量が得られる積層型圧電素子に着目し、それを用いて一軸および多自由度駆動用超音波アクチュエータを試作した。それらのステータ振動子の周波数と速度、変位および温度の関係性を測定し、ロータ駆動の動作確認を行った。

今後は  $z$  軸周りの特性の測定を行った後、アクチュエータの予圧を制御する機構を製作し、ロータの回転数および駆動トルクを測定する予定である。

### 参考文献

- 1) K. Otokawa, T. Maeno, "Development of an arrayed-type multi-degree-of-freedom ultrasonic motor based on a selection of reciprocating vibration modes", *Proc. IEEE International UFFC 50th Anniversary Joint Conference*, 2004
- 2) T. Maeno: "Novel ultrasonic motors and their applications", *1st International Symposium on Next-Generation Actuator Leading Breakthroughs*, pp. 123-126, 2006