

学術論文
------

## 縦振動と横振動の縮退に基づく多自由度超音波モータの開発

前野 隆 司<sup>\*1</sup> 竹村 研 治 郎<sup>\*2</sup> 小 島 信 行<sup>\*3</sup>

### Development of Ultrasonic Motors using Longitudinal and Bending Natural Vibration for Multi-Degrees of Freedom Motion

Small and precise actuators for multi-degrees of freedom (DOF) motion is needed to construct a dexterous robot arms and manipulators. Ultrasonic motors are suitable for the multi-DOF actuation of the robot arms and manipulators because of its characteristics such as its output power per unit volume, high stationary limiting torque, high maximum operating torque, simple design, silence, and high controllability. In this study we develop a three DOF ultrasonic motor. It is found that the three DOF ultrasonic motor can be constructed when natural frequencies of two second bending modes and a first longitudinal mode of a bar-shaped stator correspond. A spherical rotor in contact with the stator head rotates around three perpendicular axes. Geometry and structure of the ultrasonic motor in detail is determined using finite element analysis. Measured natural frequencies and natural modes of bending and longitudinal vibrations of the stator agree well with calculated ones. The rotational speed of the spherical rotor around three perpendicular axes are measured.

**Key Words:** Ultrasonic Motor, Multi-Degrees of Freedom, Vibration, Actuator, Manipulator, Finite element method

#### 1. はじめに

生物のように複雑で巧みな運動を行える機構を実現することは、ロボット工学の目標のひとつである。今後、医療・福祉、家庭、アミューズメントのための人間親和性の高い動作を行うロボットや、医療工学、生物工学の分野における高度かつ微細な作業を行えるマニピュレータを具現化するために、巧みな運動機構の重要性はますます増大してゆくと考えられる。

ロボットハンドやマニピュレータの設計は、これまで、アクチュエータの性能と大きさ、重量に制限されてきた。たとえば、最も一般的なアクチュエータである回転式電磁モータを用いる場合、モータに減速器を直列接続することによる駆動機構の大型・重量化を免れない。保持トルク発生のための電力消費、減速器のノイズ、電磁ノイズなどの問題も生じる。また、機構の運動自由度の数だけアクチュエータが必要であることによる機構全体の大型化・重量化も免れない。このように、従来のアクチュエータを用いて複雑で巧みな運動を生成する小型軽量機構を設計することは困難であった。

このため、単一のアクチュエータで多軸まわりの運動を生成し得る様々な多自由度アクチュエータの開発が試みられてきた[1]。特に、超音波モータは、低速高トルク特性を有するため減速器が不要で回転軸を直接駆動できること、高保持トルク特性を有し停止時に通電が不要であること、高速高精度レスポンス、静粛性、単純構造、電磁ノイズレスなどの特徴を有することから、ロボットアームやマニピュレータの関節に配置して多自由度運動を生成するために適している。したがって、多自由度運動が可能な小型超音波モータを製作することができれば、Fig. 1に示したような多自由度運動機構の実現が可能となる。しかし、従来の超音波モータは1軸まわりの回転または1軸方向の直動しか行えなかった。そこで、遠山ら[2]は、円環状の振動子を球状の回転子のまわりに複数個配置することにより、多軸まわりの回転を生成する超音波モータを提案した。しかし、本モータは、複数の振動子を用いているため小型化には適していない。また、ある軸まわりの回転を生成する際に他の振動子が回転子に接触し抵抗トルクが生じることに伴う損失を無視できない。Bansevicius[3]は、球殻状または円筒状振動子の内面に球状の回転子が接する構造の圧電マニピュレータを提案している。しかし、構造が複雑であるため設計が困難であること、大出力が得られないことなどの問題が残されている。

著者らは、単一の振動子に固有振動数の等しい複数の固有振動を励振すれば、振動子表面に3軸まわりの楕円振動を生成して回転子を3軸まわりに回転させ得ることに着目し、新たな小型多自

原稿受付 1997年12月

<sup>\*1</sup> 慶応義塾大学理工学部

<sup>\*2</sup> 慶応義塾大学大学院

<sup>\*3</sup> キヤノン(株)

<sup>\*1</sup> Faculty of Science and Engineering, Keio University

<sup>\*2</sup> Graduate School of Science and Engineering, Keio University

<sup>\*3</sup> Canon, Inc.

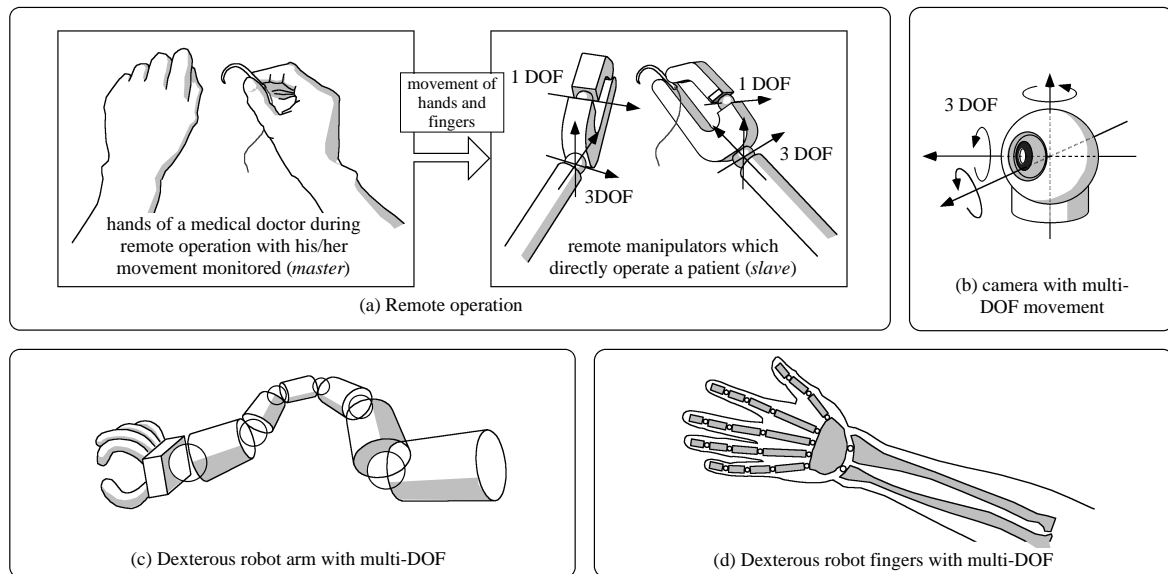


Fig. 1 Application of actuators with multi-degrees of freedom

Table 1 Classification of ultrasonic motors

degrees of freedom	wave type	shape of stator	modes	references
1	traveling wave	ring	bending+bending	[4],[5]
1	traveling wave	bar	bending+bending	[6],[7],[8]
1	traveling wave	plate	bending+bending	[9]
1	standing wave	bar	longitudinal+torsional	[10]
1	standing wave	plate	bending+longitudinal	[11]
1	standing wave	hybrid	hybrid	[12]
3	traveling wave	ringx3	bending+bending	[2]
3	unknown	sphere	hybrid	[3]
3	traveling wave+standing wave	bar	bendingx2+longitudinal	this study

由度超音波モータの構造を考案した。また、振動子の詳細構造を有限要素法を用いて設計するとともに、実際にモータを製作し、その基本特性を確認した。

## 2. 超音波モータの設計

### 2.1 振動子形状の提案

Table 1 に超音波モータの分類を示す。従来の1自由度型超音波モータは、振動子に固有振動数が等しい2つの固有振動を時間的に位相を遅らせて励振し、移動子(回転子、直進子)との接触面に楕円運動を生成することによって移動子を駆動する摩擦駆動型のモータであり、振動子の振動状態により進行波型と定在波型に分類される。進行波型振動子では、移動子との接触部に進行波状の振動が生成されており、振動子上のいずれかの点が常に移動子と接触する。一方、定在波型振動子では、移動子との接触部全体が時間的に同位相で振動し、振動子と移動子は間欠的に接触する。一般に、進行波型振動子では相似形の2つの横(曲げ)振動モードが、定在波型振動子では異なる2つの固有モードが用いられる。両者にはそれぞれ長所、短所がある[13]が、現在量産されているのは進行波型[5],[6],[7]のみである。

一方、これまでに提案された多自由度超音波モータには、円環状の振動子を球状の回転子のまわりに複数個配置することによって多軸まわりの回転を行うもの[2]、あるいは、球殻状または円筒状振動子の内面に球状の回転子が接する構造のもの[3]がある。前者は複数の振動子を用いており、単一の振動子により多軸運動を実現したものではない。後者は、高次の固有振動を利用しており、振動子の設計法が十分に確立されていない。また、圧電素子が球殻状または円筒状であるなど構造が複雑なため設計が困難である。

小型、軽量、単純構造の単一の振動子を用いた多自由度超音波モータを実現できれば、小型、軽量な多自由度運動機構を構築することができると思われる。そこで、本研究では、以下のような考え方に基いて振動子を設計する。

1自由度超音波モータでは、単一の振動子に励起する2つの振動の固有振動数を一致(縮退)させて、ある平面内の楕円振動を生成している。この考え方を3つの固有振動に拡張することによって、任意の平面内に楕円振動を生成できる多自由度振動子を製作できるのではないかと考えられる。すなわち、以下の条件を満たす振動子を設計すればよい。

1. 相異なる3つの固有振動の固有振動数が一致(縮退)すること。
2. 3つの直交する軸まわりの楕円振動を生成するために、振動子表面のある点(移動子との接触点)の振動方向がそれぞれ直交するような3つの固有モードを用いること。
3. 加工、組立が容易で小型化に適するように、振動子形状は単純であること。
4. 不要な振動を励振しないように、3つの固有モードはいずれも低次の単純なモードであること。
5. 圧電素子は、製造が容易なように平板状とし、ランジュ

バン型振動子のように振動子に挟持する，または円環型振動子のように振動子表面に接着する構造とすること。

以上のように，単一の振動子表面の一部に直交した3つの振動を生成できれば，そのうちの任意の2つを選択し，2つの振動を時間的に位相差を持たせて励振することによって，任意の軸まわりの楕円運動を発生させ得る。楕円運動を発生させた点に移動子を接触させれば，移動子は多自由度運動を行う。

上記の設計条件を満たす振動子の形状は一義には定まらないが，以下の条件を付加することによって選択が可能となる。すなわち，3の条件を満たす振動子形状は，従来の1自由度振動子と同様，棒状[6]，[7]，[8]，[10]，平板状[9]，[11]，円環状[4]，[5]などの単純形状とする。また，4の振動モードは，振動励振の容易さの観点から，空間的に直交する2つの横（曲げ）振動モードと，縦振動モードの組み合わせとする。筆者らは，これらの条件を満たす様々な振動子形状を検討した。その結果，単純な円柱の低次の横振動モード2つと縦振動モード1つを縮退させる方式が，振動子の構造や振動モードの単純さ，製造の容易さなどの点から最も適していることがわかった。

まず，連続体の振動の理論解を用いて上記の振動モードの妥当性を検討する。長さに対し直径が十分細い両端自由の円柱の横振動および縦振動の固有振動数は，それぞれ，

$$f_{bending} = \frac{\lambda_b^2 D}{8\pi L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (\lambda_b = 4.730, 7.853, 10.996, \dots) \quad (1)$$

$$f_{longitudinal} = \frac{\lambda_l}{2\pi L} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (\lambda_l = 1, 2, 3, \dots) \quad (2)$$

のように表される。ただし， $\lambda_b$ ， $\lambda_l$ は振動モード固有の定数， $L$ は円柱の長さ， $D$ は円柱の直径， $E$ は縦弾性係数， $\rho$ は密度である。

式(1),(2)より，縦振動1次モード（中央に節を有し，上端と下端が逆位相で伸縮するモード）と横振動1次モード（2カ所の節を有し，上端と下端が同位相，中央の腹が逆位相で振動するモード）の固有振動数が一致するのは，

$$L/D=1.78 \quad (3)$$

の場合である。縦振動1次モードでは，円柱の先端の点は長軸方向に振動する。横振動1次モードでは，先端の点は長軸を含む面内で長軸に直交した方向に振動する。もう1つの横振動1次モードでは，先端の点は上述の2つの振動方向と直交した方向に振動する。3つのモードにおける円柱先端の点の振動方向は直交しているので，これら3つの振動を組み合わせることによって，円柱の先端部に任意の平面内の楕円運動を生成できる。例えば，縦振動と横振動のうちの1つを，時間的位相を90度遅らせて励振すれば，横振動面内の楕円運動を生成できる。これは，横振動と縦振動を利用した定在波型超音波モータ[11]と同様な振動状態である。また，横振動2つを，時間的位相を90度遅らせて励振すれば，

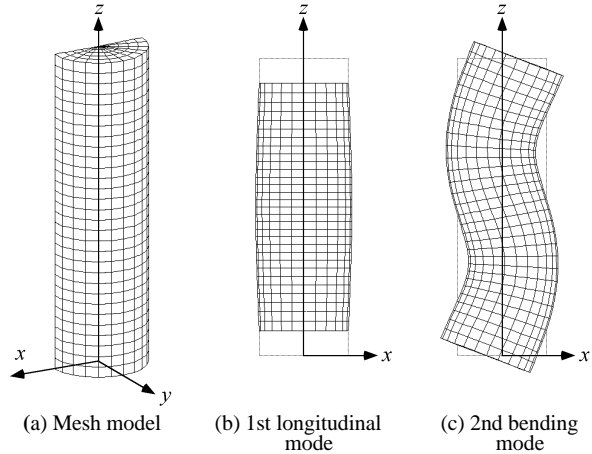


Fig. 2 Natural modes of a column ( $D = 10\text{mm}$ ,  $L = 33.30\text{mm}$ )

長軸まわりの楕円運動を生成できる。これは，横振動2つを利用した進行波型超音波モータ[6],[7],[8]と同様な振動状態である。したがって，このような振動子の先端部に球状の回転子を接触させて回転子の中心を含む3軸まわりの回転を生成する，あるいは，平板状の移動子を接触させて，長手軸まわりの回転と直交する二軸方向の直動を行わせることが可能であると考えられる。本研究では，球状の回転子を3軸まわりに回転させることとする。

式(1),(2)は円柱が十分に細い場合の近似式であるが，式(3)の解をみると，円柱の長さに対して直径が十分に小さいとは言えず，実際には式(1),(2)とは固有振動数が異なること，表面の点の振動方向が異なることが予想される。このため，次に，有限要素法を用いて円柱の固有振動数・固有モード解析を行った。有限要素解析には汎用有限要素コードMARC K6.1を用いた。解析モデルをFig. 2(a)に示す。縦・横モードは，長軸を含む平面に対して対称であるので，解析モデルは $z-x$ 平面で切り取った半円柱モデルとし， $z-x$ 平面内の節点の $y$ 方向の変位を拘束した。なお，縦弾性係数は $2.01 \times 10^{11}\text{Pa}$ ，ポアソン比は0.3，密度は $7.91 \times 10^3\text{kg/m}^3$ とした。

有限要素解析の結果，円柱の長さ $L$ と直径 $D$ の比を変化させても，縦振動1次モードと横振動1次モードの固有振動数が一致する解は存在せず，縦振動と横振動の固有振動数が一致する最も低次の振動モードは，縦振動1次モードと横振動2次モードの組み合わせであることがわかった。両振動モードの固有振動数が一致するのは，

$$L/D=3.330 \quad (4)$$

の場合である。Fig. 2(b),(c)に直径10mm，長さ33.30mmの場合の $z-x$ 平面内の振動モードを示す。固有振動数はいずれも75.34kHzであった。円柱先端部の点の振動方向は，縦振動1次モードでは長軸（ $z$ 軸）の方向に一致している。これは，棒状の振動子の端部は自由端であり，半径方向には伸縮しないことによる。一方，横振動2次モードでは，円柱先端外周点（ $x=5$ ， $z=33.3$ ）の振動方向は，長軸から46.2度傾いている。 $z$ 軸方向の振幅は，円柱の中立軸（中心軸）から観測点までの距離に依存する。すな

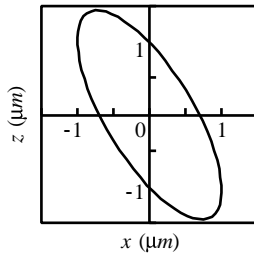


Fig. 3 Lissajous figure at the edge of the column when a first longitudinal mode and a second bending mode are excited

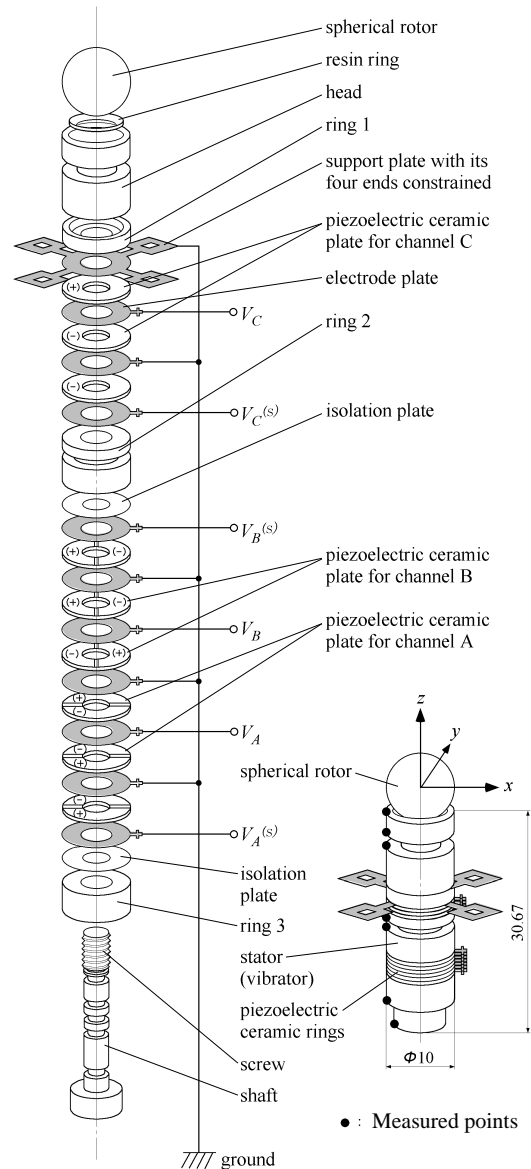
わち、中立軸上では $z$ 軸方向変位は0であり、外周に近づくにつれて増加する。前述のように、これらの振動を組み合わせることによって、円柱の先端部に任意の平面内の楕円運動を生成できる。振幅 $1\mu m$ の縦振動(b)と振幅 $1\mu m$ の横振動(c)を、時間的位相を90度違えて励振した場合の、円柱先端の外周上の点( $x=5, z=33.3$ )の楕円軌跡を Fig. 3 に示す。用いている振動モードの組み合わせは、前述のように、横振動と縦振動を利用した定在波型超音波モータ[11]と同様な振動モードの組み合わせである。ただし、楕円の長軸と短軸は、前述の理論計算の場合とは異なり、 $z$ 軸、 $x$ 軸から傾いている。このため、実際の振動子を設計する際には、回転子との接触面をテーパ状にする必要があることがわかった。この点については次章で述べる。また、図(c)の横振動と、紙面に垂直な面内の横振動を、時間的位相を違えて励振すれば、長軸まわりの楕円振動を生成できる。これは、前述のように、横振動2つを利用した進行波型超音波モータ[6],[7],[8]と同様な振動モードの組み合わせである。

以上のように、縦振動1次モードと横振動2次モード2つを組み合わせることで、互いに直交する3つの平面内の楕円運動を生成し、移動子を多自由度運動させ得ることが明らかになった。ただし、以上の解析は単純な円柱の場合である。実際の超音波モータの振動子には、円環状振動子表面の突起(くし歯)[5]や棒状振動子の軸凹部(くびれ)[6],[7]のように、移動子との接触部の変位を拡大するために剛性を低下させた部分が設けられている。また、物性値は均一ではなく、金属、圧電セラミックスなどの複合部材から成る。このため、次節では、有限要素法を用いて振動子の詳細形状の設計を行う。

## 2.2 有限要素法による振動子の設計

以下の点を考慮して、実際の円柱状振動子を設計する。

1. 縦振動モードと横振動モードのひずみが大きい部分に振動励振用の圧電素子を配置すること。
2. 製造が容易なように、ボルト締めランジュバン型[6],[7]とする。すなわち、圧電素子を金属部品間に挟持する構造とすること。
3. 円環状振動子の突起(くし歯)あるいは棒状振動子の軸凹部(くびれ)に相当する変位拡大機構を設けること。
4. 振動子の固有振動数・固有モードへの影響が小さい支持部材を設けること。
5. 回転子との接触部に弾性、耐摩耗性を有する摩擦部材を配すること。



(a) Parts of motor

(b) Entire view

Fig. 4 Structure of a bar-shaped ultrasonic motor

有限要素法を用いて設計した振動子の部品図を Fig. 4(a)に、全体図を Fig. 4(b)に示す。圧電素子は、横振動を励振するA、B相と、縦振動を励振するC相、横振動と縦振動の振動を検出する3つのセンサ相から成る。横振動励振用および横振動検出用圧電素子は、左右反転して分極されており、縦振動励振用および検出用圧電素子は全体が同一方向に分極されている。それぞれの圧電素子の分極方向を、図中に(+), (-)で示した。横振動を励振するA、B相と、縦振動を励振するC相にそれぞれ交流電圧 $V_A, V_B, V_C$ を印加して、振動を発生させる。グランド電位は支持板から取り

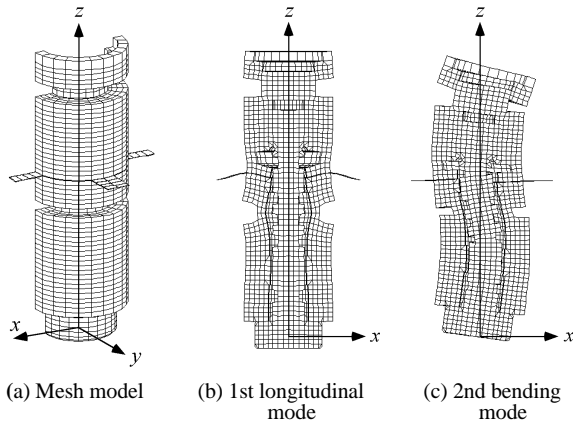
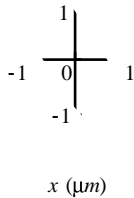
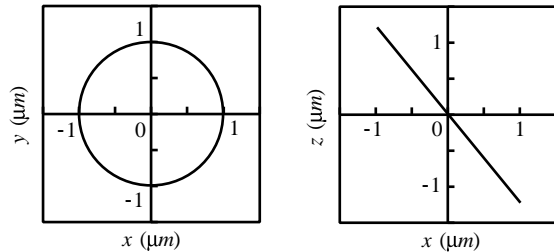


Fig. 5 Natural modes of a bar-shaped multi-DOF stator



(a) Lissajous figure when a first longitudinal mode and a second bending mode are used



(b) Lissajous figure when two second bending modes are used

Fig. 6 Lissajous figure at the contact interface of the bar-shaped stator when a first longitudinal mode and a second bending mode are excited

出す。図中、電圧  $V_A^{(s)}$ ,  $V_B^{(s)}$ ,  $V_C^{(s)}$  は、センサ相の検出電圧である。振動励振用の圧電素子は、縦振動モードと横振動モードのひずみが大きい部分に配置されている。ヘッド、リング1、リング2およびシャフトには、振動子の固有振動数の調整および振幅拡大のために、外周あるいは内周に凹部を設けた。リング1からリング3までの全25部品は、シャフトをヘッドにねじ込むことによって挟持する。振動子ヘッド上面の回転子との接触部には、弾性、耐摩耗性を有する摩擦部材である樹脂リングを接着する。十字状の支持板は、先端4カ所を図示しない支持台に固定する。なお、有限要素解析により、振動子の固有振動数・固有モードへの影響が小さい支持板寸法および支持板取り付け位置を決定した。



Fig. 7 Picture of a multi-DOF ultrasonic motor

また、振動子ヘッドは鉄、リング1～3は黄銅、電極板および支持板はリン青銅、シャフトはステンレス鋼、圧電素子はチタン酸ジルコン酸鉛である。

支持板の最外周部を固定し、 $z-x$  面内の節点の  $y$  方向変位を拘束して有限要素解析を行った結果、縦振動1次モードと横振動2次モードの固有振動数は Fig. 4 の寸法のとくに一致し、48.05kHzであった。Fig. 5 に解析モデルと振動モードを、Fig. 6 に有限要素解析結果より算出した、振動子表面の点の楕円軌跡を示す。なお、有限要素モデルは  $z-x$  平面で切り取った2分の1モデルとし、 $z-x$  面内の節点の  $y$  方向変位と支持板の外周側の節点の全方向変位を拘束した。Fig. 6(a) は、縦振動と横振動の振幅を  $1 \mu\text{m}$ 、時間的位相差を90度とした場合の回転子との接触点 ( $x=4.5\text{mm}$ ,  $z=30.17\text{mm}$  の点) の楕円運動である。Fig. 6(b) は、2つの横振動の振幅を  $1 \mu\text{m}$ 、時間的位相差を90度とした場合の楕円軌跡である。Fig. 6 より、振動子の楕円軌跡の軸は、いずれのモードの場合にも、 $z-x$  面内で傾いていることがわかる。一方、 $x-y$  面内の軌跡は、縦振動と横振動を用いた場合には点、縦振動と横振動を用いた場合には真円となる。

縦振動と横振動を組み合わせた場合、回転子の駆動に関与するのは、接触点における回転子の接線方向の速度である。このため、振動子の回転子との接触部は45度のテーパ状とし、テーパ面の方向と楕円振動の軸の方向をなるべく一致させた。

振動子と回転子が点接触すると仮定すれば、回転子の無負荷回転数は、振動子の楕円軌跡の接線方向速度の最大値より求まる。それぞれの振動による振動方向の振幅を  $1 \mu\text{m}$  とすると、無負荷回転数は、縦-横振動駆動時には405rpm、横-横振動駆動時には577rpmとなる。実際には、回転子が接触部の弾性摩擦部材に沈み込むため、無負荷回転数は上述の値よりも小さくなると考えられる[14], [15], [16]。

### 3. 超音波モータの製作と評価

#### 3.1 超音波モータの製作

2章で設計した超音波モータを製作した。Fig. 7 に写真を示す。なお、製造誤差等により、縦振動、横振動の固有振動数が設計値と一致しないことが考えられるため、ヘッド部の長さおよび

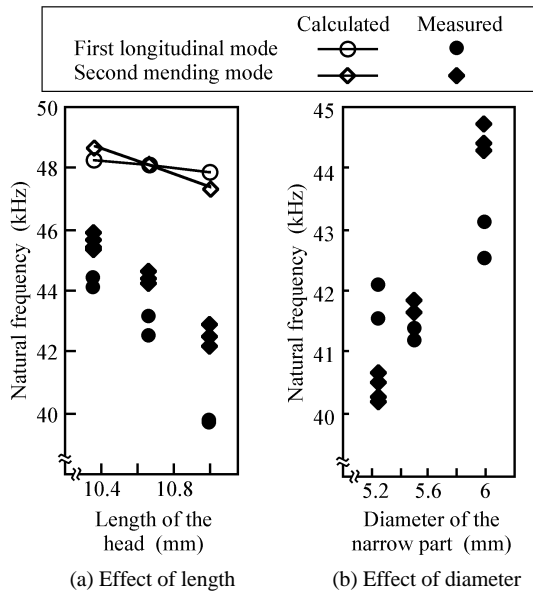


Fig. 8 Comparison between measured and calculated natural frequencies of the stator

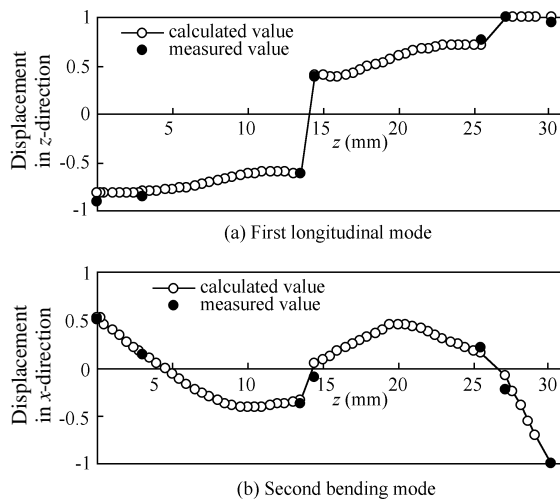
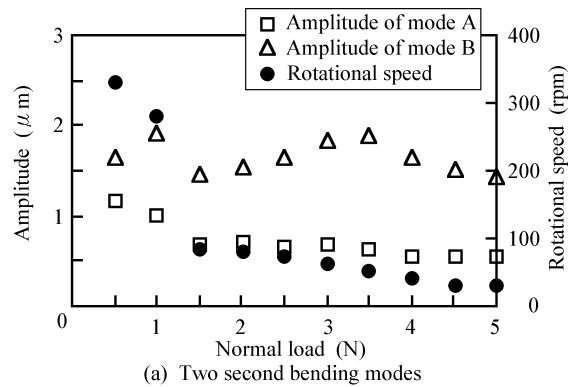


Fig. 9 Comparison between measured and calculated natural modes of the stator

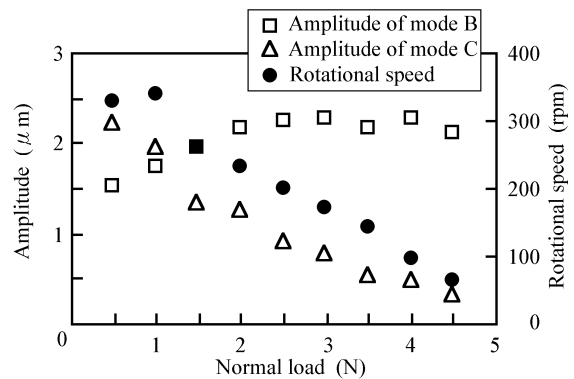
凹部の直径を設計値の前後で変化させたものを数種類作成した。

### 3.2 振動子の振動状態の測定

Fig. 8(a)に、ヘッド部の長さを変えることによって振動子の全長を変えた場合の、固有振動数の測定値と計算値の比較を示す。なお、ヘッド凹部の直径は6mmとした。固有振動数の測定は、インピーダンスゲイン・フェーズアナライザをA、BまたはC相に順に接続し、アドミタンスループから求めた[17]。計算上はヘッド部の長さが10.665mmのときに縦振動と横振動の固有振動数が一致しているが、実際にはこの範囲では一致しなかった。また、測定値は計算値よりも数kHz小さい。これらの原因とし



(a) Two second bending modes



(a) A second bending mode and a first longitudinal mode

Fig. 10 Rotational speed of the rotor when normal load is changed

て、実際の振動子では加工誤差や挟持時の変形に多くの挟持面(部品間の接触面)全面が接触しているとは言えないため、モード剛性が小さくなったこと、また、モード剛性の変化率が縦振動モードと横振動モードでは異なっていたことなどが考えられる。また、シャフトの挟持圧力の個体差も影響していると考えられる。このため、次に、ヘッド部の長さを10.665mmとして、ヘッドの凹部の直径を変化させた振動子を作成し、固有振動数を測定した。結果をFig. 8(b)に示す。図より、振動子ヘッド凹部の直径を変えてゆくと縦振動と横振動の固有振動数の値が交差していることがわかる。今回作成した振動子の中では、凹部の直径が5.5mmの場合に縦振動と横振動の固有振動数の差が最も小さく、500Hz以下となった。以下の測定ではこの振動子を用いるものとする。

Fig. 9には、振動子表面における固有モードの測定結果と計算結果の比較を示す。固有モードは、Fig. 4(b)に黒丸で示した位置の振動振幅を光学式変位計で測定することにより求めた。結果はそれぞれの最大変位が1となるように無次元化して示す(縦振動1次モードおよび横振動2次モードは、最大変位がそれぞれ2.577 μm、1.885 μmの場合の測定結果である)。Fig. 9より、製作した振動子の縦振動と横振動の固有モードは計算値とよく一致していることがわかる。

### 3.3 モータの回転特性の測定

振動子の上面に直径10mmの球状回転子を接触させ、振動子・回転子間の長軸方向の加圧力を変化させて無負荷回転数の測定を行った。励振する2つの相への入力電圧を20Vとした場合の加圧力と無負荷回転数および2つの相の回転子との接触部における振幅の関係を Fig. 10 に示す。(a)は  $y-z$  平面内の横振動モード (mode A) と  $z-x$  平面内の横振動モード (mode B) を用いて回転子を長軸周りに回転させた場合である。(b)は縦振動モード (mode C) と横振動モード (mode B) を用いて回転子を長軸と直交した軸周りに駆動した場合である。Fig. 10 より、振動子・回転子間の加圧力の増加に伴い、回転数が減少していることがわかる。また、振幅も加圧力の増加に伴い減少することが予想されるが、(a)(b)ともに B 相の振幅がこの傾向と一致しない。これは、加工誤差などにより測定時の加圧力が接触部全体で均一でないために、接触むらが生じ、負荷の各モードへの寄与率が異なっていることが原因であると考えられる。今後は加工・組立法および測定法の改良を行う必要がある。

### 3.4 考察

まず、振動子の固有振動数・固有モードに関する考察を行う。製作した振動子の固有振動数を計測した結果、有限要素法による計算値と同様に、縦振動と横振動の固有振動数を一致させることが明らかになった。ただし、部品の加工精度やシャフトの挟持圧力の違いにより固有振動数は変化する。このため、性能の揃った振動子を多数個製作するためには、縦振動と横振動の固有振動数を一致させるための何らかの工夫が必要であろう。また、回転子の加圧力が大きくなると、加圧力の縦振動と横振動への寄与度が異なるために、両者の固有振動数が一致しなくなる可能性がある。この点の検討は今後の課題である。なお、固有モードは設計値通りとなっており、本設計法の妥当性を確認することができた。

次に、回転子の回転特性に関する考察を行う。同様な形状の棒状超音波モータ [6],[7] では横振動 2 つを用いて回転子を長軸まわりに回転させており、本超音波モータで長軸まわりの回転を得る場合と駆動原理は同じである。棒状超音波モータの場合、固有振動数約 40kHz、振動子の振幅  $5\mu\text{m}$ 、回転子の加圧力約 400g のとき、無負荷回転数は約 1000rpm、最大トルクは約 100gf-cm ( $0.01\text{N}\cdot\text{m}$ )、最大効率は約 50% である [6],[7]。これに対し、本モータの振動子の無負荷回転数は小さい。また、トルクや効率の計測は行っていないものの、上述のモータよりもかなり小さいものと思われる。これは、振動子と回転子の接触部構造と加圧力の値の関係が最適化されていないためであると考えられる。このため、接触部構造の最適化を行い、大出力化、高効率化を図る必要がある。そのために、速度負荷特性を測定する装置を製作する必要もある。なお、現在は球を回転させただけであるが、今後は軸を取り付けて自在な運動を実現する予定である。さらに、回転子の加圧力を制御する機構を考案する必要があり、今の所、電磁力による吸引加圧が有効であると考えている。振動子ヘッド部に永久磁石 ( $3\times 1$ ) を配置したところ、70gf 程度の吸引力が得られ、振動子の方向を自在に傾けても回転子を駆動し得ることを確認した。

また、本超音波モータは、回転子を長軸まわりに回転させる際

には進行波型、他の 2 軸まわりに回転させる際には定在波型の駆動を用いるハイブリッド型であることが特徴である。つまり、回転子は長軸まわりに回転する際には常にいずれかの点が振動子と接触しているのに対し、他の 2 軸まわりに回転する際には振動子と間欠的に接触する。このため、振動子と移動子の接触状態は複雑であり、従来の解析手法 [13],[14],[16] を拡張した詳細な解析に基づく接触特性の把握が必要であると考えられる。

さらに、多自由度超音波モータの駆動制御手法を開発する必要がある。多軸まわりに回転する回転子を精密位置決めするために、多自由度機構に適した角度センサの開発も不可欠である。

単一の振動子で回転子の多自由度回転を実現できる本モータの特徴を生かすためには、モータの小型化も必要であろう。本超音波モータは直径 10mm であるが、本モータと同様な加工・組立法を用いて、直径数 mm 程度への小型化は十分可能であると考えられる。

以上のように、実用化への課題は残されているものの、単一の振動子に縮退した 3 つの固有振動を発生させることによって、回転子を多自由度回転させる超音波モータを設計するとともに、その妥当性を確認することができた。本モータは、1 つの振動子に複数の機能を持たせているため、単位体積当たりの出力が大きいという従来の超音波モータの特徴をさらに一歩進めたものであるといえよう。このため、将来的には、Fig. 1 に示したような小型多自由度運動機構用アクチュエータとして用いることが可能になると考えられる。例えば、Fig. 1(a) は、遠隔腹腔鏡下手術のイメージ図である。医師は、患者の腹腔内の実画像のモニタを見ながら、遠隔地で手術動作を行う。医師の手の動きはデータグローブなどを用いて検出され、多自由度ハンドに送られる。多自由度ハンドは、実際の患者の腹腔内で医師の手の動きに応じて運動し、手術を行う。このような遠隔腹腔鏡下手術では、医師の手の動きを正確に再現する必要がある。特に、手首の 3 軸まわりの回転を再現するためには、本超音波モータのような小型多自由度アクチュエータが適していると考えられる。この例のように、複雑で巧みな動作を実現するために、本モータの残された課題を解決し、実用化を図る予定である。

## 4. おわりに

本研究で得られた諸点は以下の通りである。

1. 単一の振動子に固有振動数の等しい複数の固有振動を励振すれば、直交した 3 軸まわりの楕円振動を回転子との接触部に発生し、回転子を 3 軸まわりに回転させ得ることに着目し、縦振動 1 次モードと 2 つの横振動 2 次モードを用いる多自由度超音波モータ用振動子の構造を考案した。
2. 振動子の詳細構造を有限要素法を用いて設計するとともに、実際にモータを製作し、その基本特性を確認した。すなわち、3 つの振動の固有振動数を一致させ、球状回転子を 3 軸まわりに回転させることができた。

ただし、モータの出力、効率は小さかったため、今後、接触部構造の最適化を行い、大出力化、高効率化を図る予定である。また、小型化や制御手法の開発も行うとともに、遠隔手術用多自由度ハンドなどのロボットへの応用を行ってゆく予定である。

キヤノン(株)UAプロジェクトの方々には、超音波モータの設計、製作、評価に関し多大な協力を頂いた。なお、本研究は、平成9年度文部省科学研究費補助金(奨励研究(A))およびメカトロニクス技術高度化財団研究助成金の援助を受けて行なわれた。

### 参考文献

- [ 1 ] 矢野：“多自由度アクチュエータ”，日本ロボット学会誌，vol.15，no.3，pp. 330-333，1997。
- [ 2 ] 遠山，張，杉谷，長谷川，中村，宮谷：“超音波モータを用いたロボット用アクチュエータの開発（第2報）”，日本ロボット学会誌，vol.13，no.2，pp.235-241，1995。
- [ 3 ] R. Bansevicius：“Piezoelectric Multi-Degree-of-Freedom Actuators/Sensors”，Proc. JSME 3rd International Conf. on Motion and Vibration Control，pp. K9-K15，1996。
- [ 4 ] 指田：“超音波振動を利用したモーター装置”，特開昭55-125052，1980。
- [ 5 ] 細江：“超音波モータの自動焦点レンズへの応用”，東北大通研シンポジウム資料，pp.117-118，1989。
- [ 6 ] I. Okumura：“A design Method of a Bar-Type Ultrasonic Motor for Autofocus Lenses”，Proc. IFToMM-jc Intl. Symp. on Theory of Machines and Mechanisms，pp.75-80，1992
- [ 7 ] “キヤノン11×25mmの小型超音波モータ開発”，日経メカニカル，no. 377，pp.66-67，1992
- [ 8 ] 中村，黒澤，上羽：“両端自由の円筒のたわみ振動を用いた超音波モータの試作”，日本音響学会昭和63年度春季研究発表会講演論文集II，pp. 795-796，1988。
- [ 9 ] 伊勢：“超音波モータ”，日本音響学会誌，vol.43，no.3，pp. 184-188，1987。
- [ 10 ] 黒澤，上羽：“振動子と積層圧電アクチュエータを用いた超音波モータ”電子情報通信学会技術報告 SU81-87，pp. 27-32，1981。
- [ 11 ] 高木：“リニア型超音波アクチュエータの実用化”，'97モータ技術シンポジウム資料(B-1)，pp. B-1-3-1 - B-1-3-11，1997。
- [ 12 ] 大西，田中，木村：“超音波リニアアクチュエータ駆動XYステージの基本特性”，1990年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，pp. 21-22，1990。
- [ 13 ] T. Maeno and D. B. Bogy：“Effect of the Rotor/Stator Interface Condition including Contact Type, Geometry, and Material on the Performance of Ultrasonic Motors”，Transactions of the ASME, Journal of Tribology，vol. 116，no. 4，pp. 726-732，1994。
- [ 14 ] T. Maeno, T. Tsukimoto and A. Miyake：“Finite Element Analysis of the Rotor/Stator Contact in a Ring-Type Ultrasonic Motor”，IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control，vol. 39，no. 6，pp. 668-674，1992。
- [ 15 ] T. Maeno and D. B. Bogy：“FE Analysis and LDA Measurement of the Dynamic Rotor/Stator Contact in a Ring-Type Ultrasonic Motor”，Trans. ASME, Journal of Tribology，vol. 115，no. 4，pp. 625-631，1993。
- [ 16 ] 前野：“固着・滑りを考慮した超音波モータの接触解析”，日本音響学会誌，vol. xx，no. xx，pp. xx-xx，1998（投稿中）。
- [ 17 ] 実吉，菊池，能本：超音波技術便覧 新改訂版，pp. 334-337，日刊工業新聞社，1978

#### 前野 隆司 (Takashi Maeno)

1962年1月19日生。1986年東京工業大学機械工学専攻修士課程修了。同年キヤノン(株)入社。1990-1992年カリフォルニア大学バークレー校客員研究員。1995年慶応義塾大学専任講師，現在に至る。工学博士。アクチュエータ，センサ等の研究に従事。日本機械学会 計測自動制御学会等の会員。(日本ロボット学会正会員)

#### 竹村 研治郎 (Kenjiro Takemura)

1975年12月17日生まれ。1998年慶応義塾大学機械工学科卒業。同年慶応義塾大学理工学研究科修士課程入学，現在に至る。多自由度超音波モータの研究に従事。日本機械学会学生会員。(日本ロボット学会学生会員)

#### 小島 信行 (Nobuyuki Kojima)

1966年2月20日生。1990年中央大学精密工学専攻修士課程修了。同年キヤノン(株)入社，現在に至る。1995年日本音響学会技術開発賞受賞。超音波モータの研究開発に従事。