

## ループ状だ円振動子の動作特性\*

笹木 亮<sup>\*1</sup>, 小泉 邦雄<sup>\*1</sup>, 佐々木 基文<sup>\*1</sup>

## Motion Characteristics of Loop Type Elliptic Resonator

Tohru SASAKI<sup>\*2</sup>, Kunio KOIZUMI and Motofumi SASAKI<sup>\*2</sup>Toyama Univ., Dept. of Mech. and Intellectual Systems Engg.,  
3190 Gofuku, Toyama-shi, Toyama, 930-8555 Japan

This paper deals with characteristics of the elliptic resonator. The resonator consists of loop and leg part, respectively. Each part was actuated by bimorph type piezoelectric member. The deflection of loop part and the bending of leg part generated by piezoelectric bimorphs makes an elliptic motion at the center point of the upper member. If resonators are put in a train and are actuated at the same frequency, it can feed objects on the upper surface of its train. There are two type of resonator, arch type and pentagonal type. Arch type resonator generates big amplitude on the center of upper surface. Bending its under member, pentagonal type resonator generates amplitude on the whole upper surface. Calculated results show that a shape of resonator influences on natural modes and natural frequencies. The trial one could generate elliptic motion in arbitrary phase with both type resonator. A pentagonal type resonator with notch reinforces its torsional stiffness and can generate necessary natural modes and an elliptic vibration without generating other natural modes.

**Key Words** : Dynamics of Machinery, Vibration of Mechanism, Forced Vibration, Piezo-Element

## 1. 緒 言

エレクトロニクス及び精密機器の小型化に伴って、デバイスや部品における微細化と構成要素の薄箔化が急速に進んでいる。特にマイクロメカニズムなどの研究分野ではアクチュエータやメカニズム要素の微小化・薄箔化のため、従来の機構とは異なる駆動要素を用いることで、構成要素を簡易化し、微小化が可能なメカニズムが考案されている。最近の研究では、高分子フィルムを用いることで振動子自体を柔軟なものとするアクチュエータ<sup>(1), (2)</sup>や、 piezo素子を用いた研究では、振動子のように挙動する4つのアームを持つステータでロータを回転させる新しいタイプの超音波モータ<sup>(3)</sup>が開発されている。これらの技術は、既存のハンドリングや駆動機構に更なる付加価値を与えるものとして期待されている。

本研究では、微小・薄箔材ハンドリングの駆動要素として、上下方向に振動する門形部材と水平方向に振動する脚部材を接合するか、または均一部材を門形に

成形し、柱となる部分を直交にひねることで、別方向の2つの振動が独立に駆動できる振動子を考案した。上下・水平方向の固有振動を同じ振動数にし、入力位相を変化させることで、だ円振動を発生させ、軌跡の主軸の長さ、傾き、軌跡の回転方向が任意に変えられる。アクチュエータであるバイモルフ型 piezo素子の曲げに弱い性質をカバーするため、バイモルフ部材のたわみが小さくとも、出力点である上部材面が大きく振動する変位拡大機構としての機能も有している。この振動子を並べて位相をずらせて駆動することで、振動子上面で搬送するフィーダなどへの応用が望める。

本報では、有限要素法解析により振動子形状が動特性に与える影響を調べ、試作機を用いて任意の形状・回転方向のだ円振動を発生実験を行った。

## 2. 記 号

振動子の基礎的特性を解析するため、図1の振動子モデルにおいて、上部材中央点を  $P_1$ 、上部材端点を  $Q$  とし、記号を次のように定義する。

添字  $i$  : 部材要素番号 (①~④),  $(EI)_i$  : 部材  $i$  の曲げ剛性,  $(EI)_{pi}$  : バイモルフ部材の曲げ剛性,  $l_i$  : 部材  $i$  の長さ,  $l_{ps}$  : 下部材の固定端長さ,  $\bar{m}_i$  : 部材  $i$

\* 原稿受付 2001年6月19日。

\*1 正員, 富山大学工学部 (〒930-8555 富山市五福3190)。

E-mail: tsasaki@eng.toyama-u.ac.jp

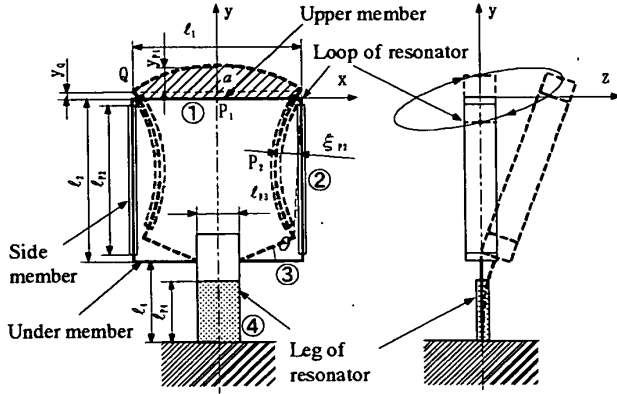


Fig. 1 Loop type resonator

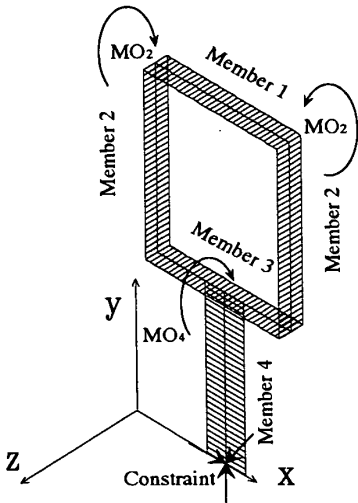


Fig. 2 FEM model of resonator

の線密度,  $t_i$ : 部材  $i$  の厚さ,  $t_{Ni}$ : 弾性関節部材の切欠き部分の厚さ,  $b_i$ : 部材  $i$  の幅,  $\omega_{Pj}$ : ループ部の第  $j$  次固有角振動数,  $\omega_{Rn}$ : 振動子全体の第  $n$  次固有角振動数,  $\kappa_i$ : バイモルフ部材  $i$  の貼り付け部材に対する長さの比,  $\theta$ : 下部材の水平からの傾き角,  $y_{P1}$ : 上部材中央点  $P_1$  における上下方向振幅,  $y_Q$ : 上部材端点  $Q$  における上下方向振幅,  $\xi_{P2}$ : 部材  $i$  の最大たわみ,  $a$ : 上部材の振幅面積,  $mo_i$ : バイモルフ部材の入力モーメント,  $\xi_{Fj,Rn}$ : ループ部および振動子全体の固有モードの減衰比. 上部材を基準にとり, 以下のように無次元化する.

$$K_i = (EI)_i / (EI)_1, K_{Pi} = (EI)_{Pi} / (EI)_1, L_i = l_i / l_1,$$

$$L_{F3} = l_{F3} / l_1, \bar{M}_i = \bar{m}_i / \bar{m}_1, T_i = t_i / l_1, T_{Ni} = t_{Ni} / t_i,$$

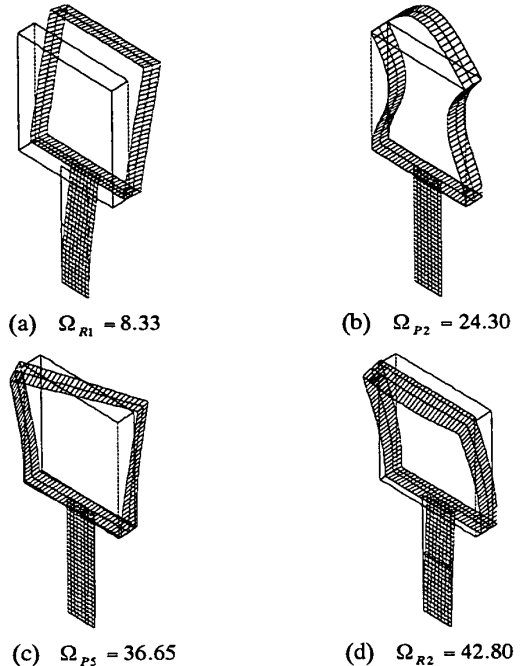
$$MO_i = mo_i / \{(EI)_i / l_1\}, \Omega_{Pj,Rn} = \omega_{Pj,Rn} / \sqrt{3(EI)_1 / \bar{m}_1 / l_1^2}$$

$$Y_{F1,Q} = y_{F1,Q} / l_1, \Xi_{P2} = \xi_{P2} / l_1, A = a / l_1^2, \gamma = y_{P1} / \xi_{P2}$$

ここで,  $A$ : 平均振幅,  $\gamma$ : 振幅拡大率を示す.

### 3. 構造と動作原理

振動子はループ部と脚部から成る. ループ部は板材を



$$L_2 = L_4 = 1, \kappa_2 = \kappa_4 = 1, K_2 = 1, K_4 = 300, \bar{M}_2 = \bar{M}_4 = 1$$

Fig. 3 Natural modes of resonator

門形に曲げ成形したものであり, 脚部も板材で構成される. 脚部は  $x$  方向に対して十分剛性が高く, またループ部は  $z$  方向に対して十分剛性が高い. よって, ループ部は両端固定の門形はりとして, 脚部は先端に質量を付加した片持ちはりと考えることができる. ループ部は横部材に構成されたバイモルフ型 piezo 素子により駆動され, 面内方向にたわみ振動し, 上部材は  $y$  方向に振動する. この時, ループ部を支える脚部は  $x$ - $y$  方向には十分剛性が高いため, たわみ振動に影響を受けない. また, 脚部も同様に駆動され, ループ部が  $z$  方向に剛体とみなせるほど十分剛性が高いことから, 先端に質量を付加した片持ちはりの基本モードで曲げ振動する. したがって, 同一振動数で両方のバイモルフ部を駆動すれば, 垂直 ( $y$ )・水平 ( $z$ ) 方向振動を同時に発生させることができ,  $y$ - $z$  面内でだ円振動を行うことができる. この振動子はループ部と脚部が互いに独立に駆動できることから, 両者への入力位相を変化させることで, 発生するだ円振動の主軸の長さ, 方向, 軌跡の回転方向を任意に変化できる. この振動子を並列に複数個並べ, 同一振動数で駆動し, 上部材を搬送面として  $z$  方向に物体を搬送することができる. また, 各々の振動子への入力位相を変化させることで, 搬送面上に任意のだ円振動を発生でき, 搬送方向を切替えたり, 搬送物に応じた搬送形態を作り出すことが可能である.

振動子の有限要素法モデルは図 2 のように, 振動子は脚部である部材 ④ の下端で全方向に完全に拘束を受

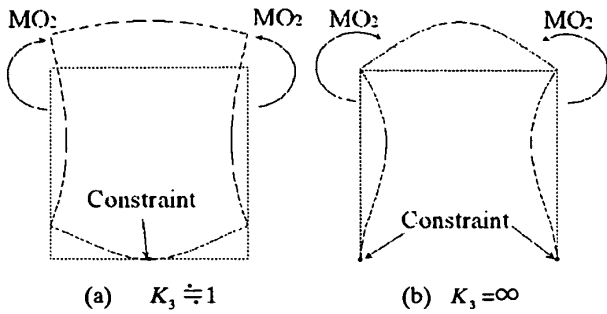
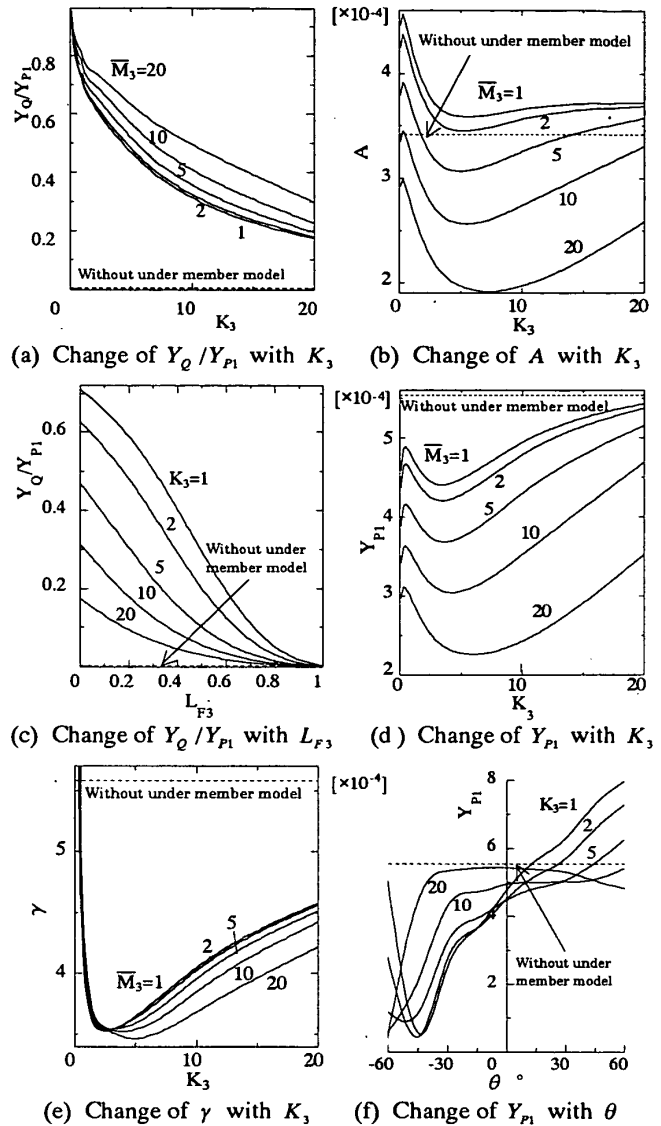


Fig. 4 Natural modes of loop member

け、強制振動解析を行う場合、バイモルフ部材に電圧を印加したときに発生する曲げモーメントは脚部上端に  $x$  軸周りに、ループ部横部材である部材②上のバイモルフ部材の上端の両節点において  $z$  軸周りに対称にかかるものとする。計算から求めた振動子の固有モードを、図 3 に示す。このうち、だ円振動の発生には (a) と (b) を用いる。だ円振動するためには、この 2 つのモードが同じ振動数で発生しなければならない。また、(c) はループ部が  $y$  軸周りにねじれるモード、(d) は 2 次の片持ちはりのモードである。これらはだ円振動を発生させる際、振動面全体が同位相にならないことや、振幅が減少することから、(c)、(d) のモードが干渉しないようにする必要がある。

4. 動作特性

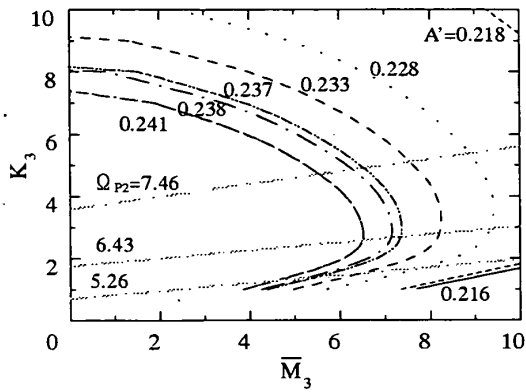
ループ部が曲げ成形された剛性を持つ部材で構成されると考えると、ループ部は脚部曲げ振動方向である  $z$  方向に十分高い剛性を持つため、脚部と接続する点で固定される門形はりとみなせる。ループ部と脚部の振動は互いに独立とみなせることから、ループ部のみのモデルとして扱うことができる。下部材の剛性  $K_3$  が比較的小さい場合では、面内たわみ振動において下部材が曲げ振動することで、図 4(a) のように上部材中央点だけでなく上部材端点も  $y$  方向振動し、上部材中央点の振幅  $Y_{p1}$  は小さくなる。しかし、下部材が曲げ振動することから、端点振幅  $Y_Q$  が  $Y_{p1}$  に近い値となり、 $K_3$  が小さくなると図 5(a) のように上部材のたわみを表す比  $Y_Q/Y_{p1}$  は大きくなる。これは剛性が小さくなることで、上部材全体が振動し、平滑な振動面が得られることを示している。上部材全体が振動することから、上部材長さ方向の平均振幅  $A$  は  $K_3$  が小さくなり  $Y_{p1}$  が減少しても、図 5(b) のようにほぼ一定となる。逆に、 $K_3$  を大きくしていくと、上部材端点はほとんど振れなくなり  $Y_Q/Y_{p1}$  が小さくなる一方、 $Y_{p1}$  は増大する。固有振動数  $\omega_{p2}$  は極端に大きくなるが、これは面内たわみ振動において、ループ部が横部材の下端を固定部とした門型はりに近づくためである。また、図 5(c) の



$\theta = 0, L_2 = 1, \kappa_2 = 1, K_2 = 1, \bar{M}_2 = 1,$   
 $MO_2 = 5 \times 10^{-4}, \zeta_{p2} = 0.02$

Fig. 5 Change of natural frequency

ように、脚部の幅  $L_{F3}$  を大きくした場合と同じである。 $L_{F3}$  を大きくすることは下部材を短くすることであり、等価的に  $K_3$  を大きくすることと同じである。このように、 $K_3$  が極大となれば、下部材が剛体とみなせる。 $K_3 = \infty$  ならば点線で示すような下部材がない構造と同じであるため、ループ部の  $z$  方向剛性を高く保てる利点を有する。下部材がない構造ではループ部は図 4(b) のように、上部材端点が  $y$  方向振動せず、たわみも大きくなり、下部材が曲げ振動する場合に比べ、図 5(d) のように  $Y_{p1}$  は大きくなる。ゆえに、中央点のみにおいて最大の振幅を得たい場合には、 $K_3 = \infty$  とする方が有利である。また、図 5(e) のように、 $\gamma$  も大きくなる。 $\gamma$  は横部材のたわみに対する中央点振幅の比であることから、入力に対する出力の振幅拡大率を示し、 $\gamma$  が



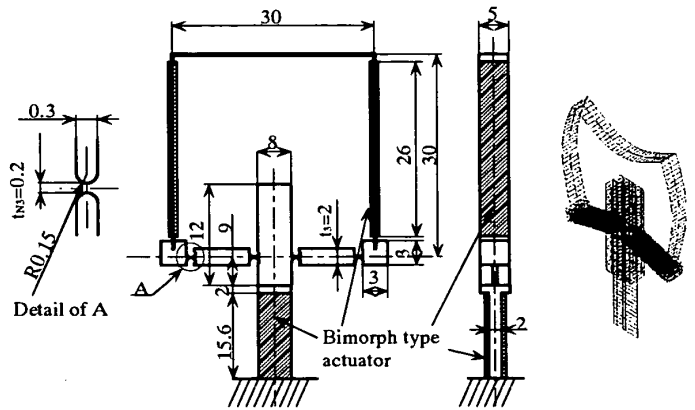
$$\theta = 0, L_2 = 1, L_{F3} = 0.3, \kappa_2 = 1, K_2 = 5, \\ \bar{M}_2 = 1, \zeta_{P2} = 0.02, T_3 = 6.67 \times 10^{-2}$$

Fig.6 Contour map of  $\Omega_{p2}$  and  $A$  on  $K_3 - \bar{M}_3$  plane

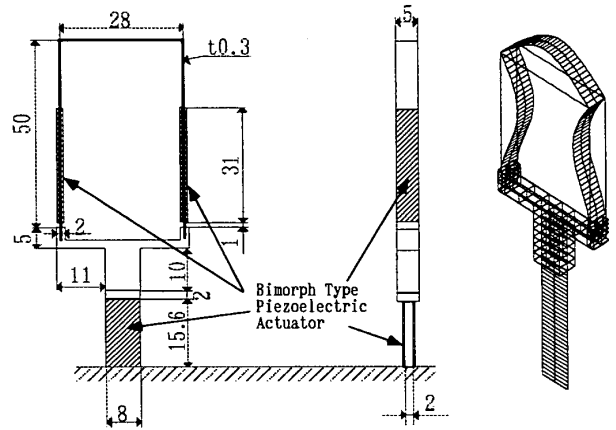
大きくなることで、アクチュエータである大変位に弱いバイモルフ部材の変位を減らすことができ、破壊の危険性を低減することがきる。よって、 $K_3$  を変えることで、上部材振幅分布が変化でき、任意の振動面積を得ることができる。 $K_3 = 10$  程度である場合、下部材の傾き  $\theta$  を大きくすると下部材の曲げ振動が上部材を振動させるのに付与し、図 5(f) のように  $Y_{p1}$  が増大する。 $\theta$  を負にすることで  $Y_{p1}$  は小さくなるがバイモルフ部材のたわみ振幅  $\xi_{p2}$  も小さくなることから  $Y_{p1}$  に対する振幅比  $\gamma$  は大きくなる効果が望め、また、脚部がループ部内側に入り込み、寸法を抑えられる。

### 5. 弾性関節の均一部材への置き換え

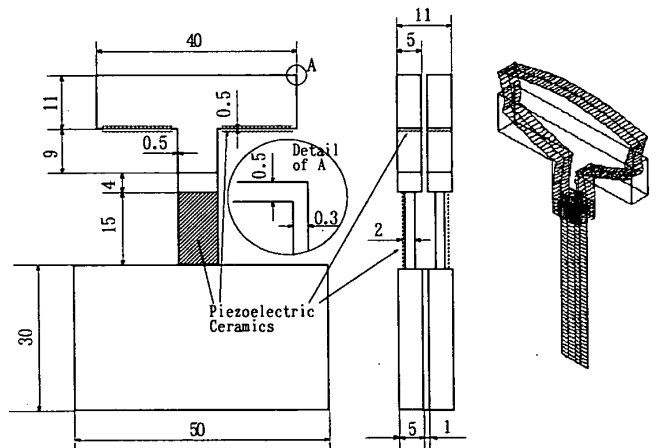
後述において、下部材のねじり剛性を高く保ったままで曲げ剛性を低下させる方法として、切欠きを用いているが、所要の能力を持つ振動子进行設計する場合、切欠き構造の部材の均一部材への置き換えが必要となる。4. 動作特性の項におけるループ部の駆動特性に対する有限要素法解析は、すべての部材を均一部材モデルとしており、これを適用して設計手法をより簡易にするためには均一部材への置き換えが必要である。弾性関節部材の下部材を、切欠きのない均一な断面の下部材に等価な曲げ剛性で置き換える場合、後述の評価量であるループ部の 2 次固有振動数  $\Omega_{p2}$  と上部材の平均振幅  $A$  を一致させることを考える。評価量として考慮される振幅速度・加速度はそれぞれ  $A \cdot \Omega_{p2}$ 、 $A \cdot \Omega_{p2}^2$  となるものとする。弾性関節部材の形状をモデリングした解析モデルについて、上の評価量を有限要素法より求めた。図 6 は切欠きの無い均一な断面の下部材を持つループ部だけのモデルで下部材曲げ剛性  $K_3$ 、下部材線密度  $\bar{M}_3$  を変化させて解析を行い、 $K_3 - \bar{M}_3$  平面上で  $\Omega_{p2}$  と  $A'$  についての等高線である。この等高線上で、所要の切欠きのある振動子の  $\Omega_{p2}$  と



(a) Pentagonal type resonator with notch



(b) Arch type resonator



(c) T script type resonator

Fig.7 Construction of resonators

$A$  の値を読み取ることで、等価な均一部材振動子の  $K_3$  と  $\bar{M}_3$  を得ることができる。

これにより、弾性関節部材の下部材を、等価な曲げ剛性を持つ均一部材に置き換えることができる。

## 6. 実験

### 6.1 振動子形状

以上の FEM 計算結果より、図 7(a)~(c) のような振動子を試作した。振動子は下部材剛性  $K_3$  が有限で

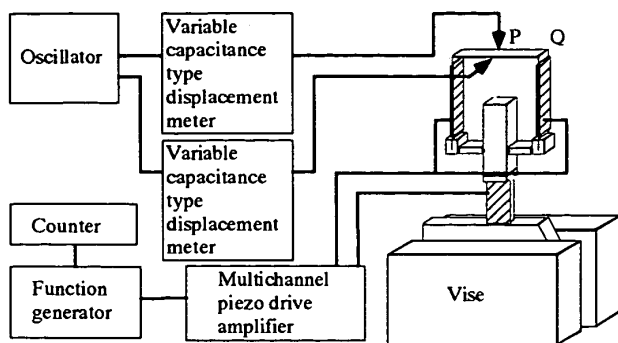
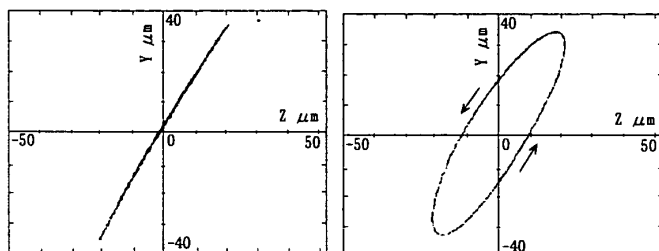


Fig. 8 Experimental apparatus

(a)  $\phi = 0$  (b)  $\phi = -\pi/4$ 

$$\Omega_{P2} = 5.98, L_2 = 1, K_2 = 5.13, \bar{M}_2 = 2.2, \kappa_2 = 0.87, \\ L_{F3} = 0.28, L_4 = 0.52, K_4 = 1.06 \times 10^3$$

Fig. 9 Elliptic vibration of resonator

ある場合、下部材に角度を持たせるれば五角形になることから、下部材が振動するものをペンタループ型と呼ぶ。同図(a)は $\theta=0$ の場合である。ペンタループ型は搬送面となる上部材面を平坦に振ることができ、搬送可能な面積を大きくする場合に有利である。一方、 $K_3 = \infty$ とすれば、下部材が剛体とみなせる構造が考えられ、同図(b)のような形状をアーチ型と呼ぶ。アーチ型はループ部が円形のみで簡易な構造であるため、板材を曲げ加工するだけで容易に製作できる。また、一体構造化も容易であるため、高振動数・高剛性が望め、振動子の微小化が望める。下部材がない構造のため、ペンタループ型に比べループ部の $z$ 方向剛性を高く保てる利点を有する。また、ペンタループ型より派生したタイプとして、同図(c)のようなT字型をしたものも考えられる。これは平坦な振幅面を得るために、下部材を振動させる振動子であるが、ペンタループ型と異なるのは下部材の下にさらに面内たわみ方向に剛性の弱い部材を付け足すことで、弾性関節を用いずに2次のモードを低下させることを狙ったものである。だ円振動を発生させる場合、この構造ではループが平たく潰れた形状となるため、ペンタループ型より大きな振幅は望めないがループ部を始め、すべての部材を均一部材にできることから、振動子全体を一体成形できるというメリットがある。

試作した振動子は、アーチ型とペンタループ型の場合、ループ部の上部材と横部材には共に、りん青銅板

( $5 \times t 0.3\text{mm}$ )を曲げ成形したものを用い、下部材は弾性関節部材とするため、黄銅材( $t5\text{mm}$ )にワイヤ放電加工により切欠きを設けている。横部材にピエゾセラミックス板( $t0.2\text{mm}$ )を両側から挟み込むように導電型接着剤を一部用いて接着し、バイモルフ構造とした。ピエゾセラミックスはその極性を対向させることで、逆向きのモーメントを発生させて2次の面内たわみ振動を発生させやすくしている。脚部は鋼材( $t5\text{mm}$ )と同じく両側からピエゾセラミックス板を貼り合わせ、バイモルフ構造とし駆動する。T字型の場合は、振動子全体を鋼材( $t5\text{mm}$ )をワイヤ放電加工で一体成形し、ループ部は $t=0.5\text{mm}$ である。横部材が極端に短い構造であるため、アクチュエータの面積を大きくする必要があり、下部材をバイモルフ部材とした。脚部は他のタイプと同様にバイモルフ部材としている。

## 6.2 だ円振動実験

試作した振動子を用いて、だ円振動を発生させたときの上部材中央P1点の変位の軌跡を測定した。図8に実験装置の構成を示す。振動子のアクチュエータ部であるバイモルフ部材は、発振器からの正弦波入力を位相が可変な多チャンネルアンプを介して駆動する。振動子の固定部をバイスで固定し、ループ部のバイモルフ部材と脚部のバイモルフ部材を入力位相を変化させて駆動した。振動子各部変位の測定には、静電容量型変位計を用いた。上部材中央で $y$ 方向の振幅を検出する。 $z$ 方向はループ部が剛体とみなせ、上部材上では振幅がほとんど変化しないことから、上部材と横部材との角部にりん青銅板( $t0.1, 2 \times 2\text{mm}$ )を取り付け測定点とし、 $z$ 方向の振幅を検出した。図9に下部材を弾性関節としたペンタループ型振動子を用いた場合の、 $y-z$ 平面における上部材中央の点の軌跡を示す。駆動周波数はループ部、脚部とも480Hzである。脚部、ループ部共に $\pm 10\text{V}$ の電圧振幅で駆動し、 $z$ 方向振動の脚部への入力に対し、 $y$ 方向振動のループ部への入力の位相遅れを $\phi=0 \sim 180^\circ$ に変化させた。また、アーチ型やT字型も同様に入力の位相を変化させることで、だ円振動の傾きを変化させることができ、だ円の $y, z$ 方向の大きさも入力振幅によって変化できた。また、入力の位相遅れの変化に対し、だ円の傾きは比例的に変化し、入力位相遅れを逆転させれば、だ円の回転方向を逆にする切換えも可能であった。

## 6.3 切り欠きによる弾性関節

本研究における振動子は、だ円振動するために、ループ部の2次の面内たわみ振動と振動子全体の片持ちはりの基本モードが同一振動数で発生しなければならず、他のモードは搬送能力を低下させるため干渉しな

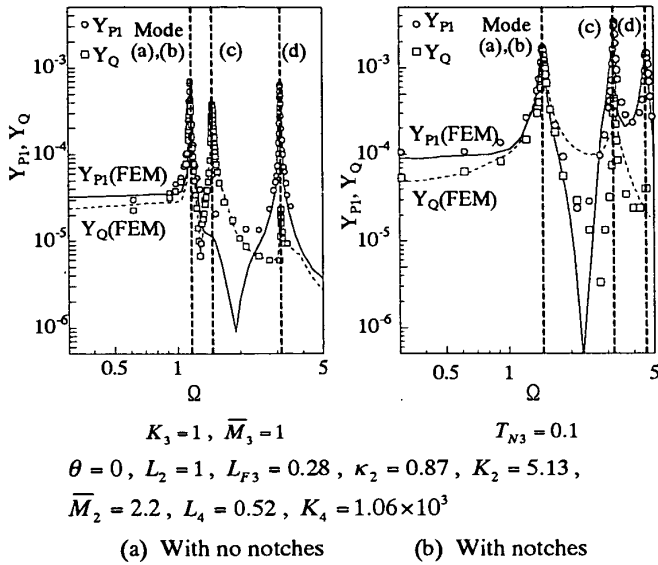


Fig.10 Natural frequency of pentagonal type resonator

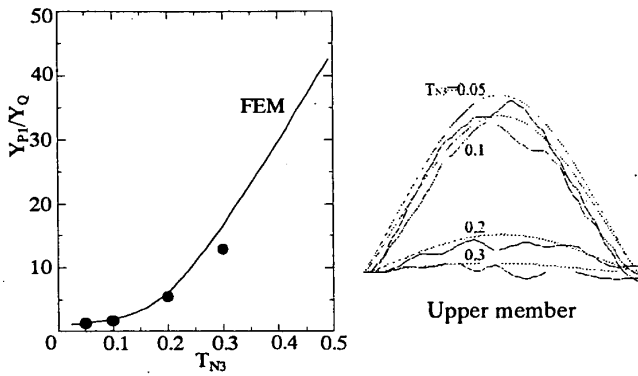


Fig.11 Change of  $Y_{P1}/Y_Q$  with  $T_{N3}$

いようにしなければならない。しかし、下部材剛性が小さく、ループ部下部材を上・横部材と一体部材にするとねじれ剛性が不足し、ループ部は  $x$  方向に対して剛体とみなせなくなる。そのため、2 次の面内たわみ振動のモードに対し、片持ちりの基本モードが低く離れ、振動子図 3(c) のように全体が  $y$  軸周りにねじれるモードが近づいて干渉してしまう。そこで、ループ部の下部材のねじり剛性を高くすることを考える。下部材剛性を大きくしたとき、ループ部の 2 次の面内たわみ振動モードの振動数が高くなるとは、振動子全体の片持ちりの基本モードの振動数と合わせられないため、下部材の曲げ剛性は低く抑える必要がある。このため、下部材に弾性関節部材を用い、曲げ剛性に対しねじり剛性を十分高くすることを考える。下部材を均一部材とした場合と、弾性関節部材にした場合の比較を図 10 に示す。切欠き厚さ  $t_{N3}$  の調整により、ループ部の 2 次元内たわみ振動と振動子全体の片持ちり

のモードが同一振動数にでき、かつ、ねじれモード等の固有振動数が十分離れ、干渉することがなく、容易にだ円振動を発生させることができる。図 11 は上部材の平坦さを表す  $Y_{P1}/Y_Q$  の  $t_{N3}$  による変化を示す。 $t_{N3}$  が小さくなるに従い、曲げ剛性が低下し、上部材が平坦に振動している。 $t_{N3}$  を大きくしていくと等価的に  $K_3$  が大きくなりアーチ型に近づく。これにより、極端に曲げ剛性が低いとループ部の面内たわみ振動モードの振動数が低下し、片持ちりのモードを一致させるのが困難になるが、上部材が平坦に振れるためには下部材の曲げ剛性を低下させればよいことがわかる。

7. 結 言

本報で、だ円振動子の形状が及ぼす動作特性への影響について調べた結果を以下にまとめる。

- ループ部の  $y$  方向の 2 次たわみ振動と脚部の曲げによる片持ちりの  $z$  方向の基本振動数とを一致させ、非連成振動することができた。
- アーチ型、ペンタループ型、T 字型の振動子を試作し、それぞれの振動子でだ円振動を発生でき、 $y, z$  方向に  $100 \mu m$  の複振幅を得た。
- 試作した全ての振動子で、任意形状のだ円振動を発生でき、入力電圧の位相変化に応じた傾き・回転方向のだ円振動を得た。
- ペンタループ型振動子でループ部下部材に弾性関節を用いることで曲げ剛性を低下させつつ、ねじり剛性を高く保ち、ねじり振動を抑えて、変位出力部となる上部材の振幅分布を平坦にできた。
- 切り欠きの深さを変えて下部材剛性を変えることで、上部材の平坦さを  $Y_{P1}/Y_Q = 1.3 \sim 13.0$  まで変化させることができた。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、協力された当時の学生、堀田秀和氏(現・東京タグレス(株))、澁井将興氏(現・CKD(株))、日南敦史氏(現・住友I-IL(株))に感謝致します。

文 献

- (1) 菅野, 田所, 服部, 高森, 小黑: ICPF (イオン導電性高分子ゲル膜) アクチュエータのモデル化 (第 1 報, 基礎的特性とブラックボックスモデリング), 日本機械学会論文集 (C), 62, 598 (1996) 2299.
- (2) 菅野, 田所, 高森, 小黑: ICPF (イオン導電性高分子ゲル膜) アクチュエータのモデル化 (第 3 報, 応力発生特性と線形近似アクチュエータモデル), 日本機械学会論文集 (C), 63, 611 (1997) 2345.
- (3) B.Koc, P.Bouchilloux and K.Uchino: Piezoelectric Micromotor Using a Metal-Ceramic Composite Structure, IEEE Transactions of Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency control, 47, 4 (2000) 836.