

# 圧電素子を内部に組込む円環状超音波振動体の検討

里信 純\*・山本 昇\*\*・岩田 章宏\*\*\*・和泉 真澄\*・関口 泰久\*\*\*\*

(平成22年10月27日受付)

## A Study on an Ultrasonic Vibration Ring with Piezoelectric Elements Embedded Inside

Jun SATONOBU, Noboru YAMAMOTO, Akihiro IWATA, Masumi IZUMI and Yasuhisa SEKIGUCHI

(Received Oct. 27, 2010)

### Abstract

This paper presents a new mechanism for excitation of ultrasonic vibration in a metal ring. Four pairs of piezoelectric elements were embedded in four arcuate metal blocks and configured an annular vibration system. The proposed method is effective for compact and high power ultrasonic system design, and for excitation of two degenerate vibration modes spatially and temporally orthogonal to each other to produce the traveling wave. The system, composed of 20-mm diameter piezoelectric ceramic disks for torsional vibration embedded in four 140-mm diameter aluminum blocks, was designed via finite element analysis to operate using out-of-plane vibration modes and their traveling waves, and the expected motions were confirmed theoretically.

**Key Words:** ultrasonic vibration, torsional vibration, piezoelectric element, traveling wave, ring

## 1. 緒言

円環状超音波振動体は、様々な音響・振動エネルギー応用で利用されている。特に円環には空間的に縮退した振動モードが存在するため、それらを制御して周方向に移動する進行波を用いる応用例が多い。例えば進行波型超音波モータでは、空間的、時間的に直交する2つのたわみ振動の定在波を金属円環上に重ね合わせることによって進行波を励振し、その結果生じる円環表面の楕円運動によりロータを摩擦駆動している<sup>(1)</sup>。

金属円環を超音波振動させる方法としては、薄い圧電素子円環を金属円環表面に接着する構造が多く用いられてきたが<sup>(2)</sup>、圧電素子の破壊や接着の劣化を防ぐために、一般的な強力超音波用振動系に比べ高電圧・大振幅動作できないなどの問題点もある。

筆者らは、大振幅動作できる円環状振動体を実現するために、ボルト締めランジュバン型振動子で金属円環を駆動する構成を検討し、超音波モータや洗浄機などに応用している<sup>(3)-(5)</sup>。この方法では、ボルト締めランジュバン型振動子の共振周波数と、円環の対象振動モードの共振周波数が一致するように寸法を調整する必要があるなど、設計上の煩雑さがある。また、たわみ振動、ねじり振動など円環に存在する振動形態の中の1つの次数(共振周波数)を対象として設計するため、その共振周波数で駆動するための振動系となる。このため駆動周波数を変えることにより、様々な次数の振動モードを励振することはできない<sup>(6)(7)</sup>。

本論文では、様々な次数の振動モードを同一の振動系で励振でき、共振周波数設計が容易かつ大振幅動作が可能な円環状振動体を実現する新しい構成を提案する。今回は軸方向に変位を持つ面外振動(軸方向たわみ振動、ねじり振

\* 広島工業大学工学部知能機械工学科

\*\* 広島工業大学大学院工学研究科(現(株)ニッケイ加工)

\*\*\* 広島工業大学大学院工学研究科機械システム工学専攻

\*\*\*\* 広島大学大学院工学研究科

動)を対象とし、周方向にせん断力を発生するねじり圧電素子を用いてこれら振動モードを励振する振動系を理論的に検討し、対象とする振動モードの定在波と進行波励振の可能性を有限要素法解析により確認した。

## 2. 振動系の構成

円環に励振される振動モードは、面外振動/面内振動、または図1に示すような(a)軸方向たわみ振動(軸方向変位と回転を伴う振動)、(b)面内たわみ振動、(c)ねじり振動、(d)縦振動などに大別される<sup>(8)</sup>。円環上同じ半径位置  $r$  でのそれぞれの振動の対象方向の振動振幅を  $U(r)$ 、モードの次数を  $k$ 、円振動数を  $\omega$  とすると、例えば円周方向の角度  $\theta = 0$  位置を振動の腹とする定在波の分布は、

$$u_1(r, \theta, t) = U(r) \cos k\theta \sin \omega t \quad (1)$$

であらわされる。また、上式で表される定在波と空間的および時間的に直交する定在波は、例えば、

$$u_2(r, \theta, t) = U(r) \cos(k\theta + \frac{\pi}{2}) \sin(\omega t \pm \frac{\pi}{2}) \quad (2)$$

となる。この2つの定在波を重ね合わせると、

$$u_1 + u_2 = U(r) \sin(\omega t \mp k\theta) \quad (3)$$

となり、円周方向に時間的とともに移動していく進行波を表す式となる。つまり空間的に直交する2つの定在波を時間的な位相差  $\pm\pi/2$  で重ね合わせることによって進行波が励振される。この進行波は時間的な位相が  $+\pi/2$  と  $-\pi/2$  の時で進行方向が逆転する<sup>(2)</sup>。

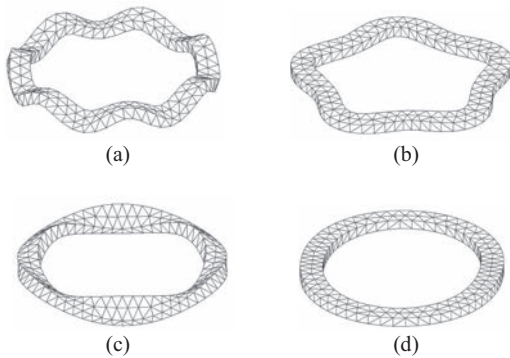


図1 円環の振動モード例 (a) 軸方向たわみ振動、(b) 面内たわみ振動、(c) ねじり振動、(d) 縦振動

図1(a)に示される軸方向たわみ振動を対象とし、縦振動するボルト締めランジュバン型振動子を用いる構成例を図2に示す。進行波を励振する振動系とする場合は、振動子2は振動子1に対して4分の1波長もしくは4分の3波長分ずれた位置に配置する。

奇数次の振動モードを対象とする場合は、円環上の中心に対して対称な位置の定在波の振動は逆相となる。従って

この2つの位置に振動子を配置し、それらを1組として互いに逆相で駆動すれば、同じ振動分布の定在波を励振することができる。また振動子1から  $\pi/2$  ずれた位置が振動モードの4分の1波長もしくは4分の3波長分ずれた位置になるので、別の1組の振動子をこの位置に取り付ければ進行波を励振できる振動系となる。つまり奇数次の振動モードの進行波を励振する場合には、  $\pi/2$  ずれた位置に4本の振動子を取り付ける対称性のよい構成が実現できる<sup>(4)</sup>。

図2に示すような構成では、ボルト締めされた圧電素子は引っ張り応力に強いので大振幅動作が期待できる。しかし設計においては、振動子の共振周波数と円環の対象振動モードの共振周波数が一致するように振動子と円環を個別に設計したのち両者を結合させ、振動系全体の共振周波数を駆動周波数とする。このため円環の共振周波数と振動子の共振周波数、および両者を結合させた振動系全体の共振周波数の3つの共振ピークをできるだけ接近させることが必要であるが、機械Q値の高い実機においてこれらを正確に実現することは難しい。また、特定の振動形態における特定の次数を対象として設計するため、駆動周波数を変えることで様々な次数の振動モードを選択的に励振することはできない。

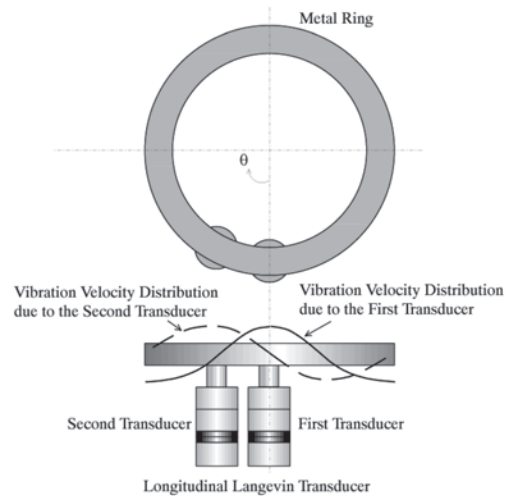


図2 ランジュバン型縦振動子で駆動するシステムの基本構成

これらの問題点に対して、新しく検討した構成を図3に示す。分極方向を互い違いにした最低2枚の圧電素子を1組として、それら4組を円上互いに  $\pi/2$  の角度で配置する。その間を円弧状の金属ブロックで結合することで、全体として円環状振動体として構成する。圧電素子を挟む互いに隣り合った金属ブロックはキャップボルトで結合する。実機では、圧電素子の接合面には電圧を印加するための電極板が組み込まれる。

分極方向の異なる圧電素子を用いることで、たわみ・ねじり・縦振動など様々な振動を対象とすることが可能であるが、今回は、図1(a)に示される軸方向たわみ振動、お

よび図1(c)に示されるねじり振動の2つの面外振動を対象とし、周方向にせん断力を発生するねじり圧電素子を用いた構成を検討する。軸方向たわみ振動、ねじり振動は共に円環断面の回転を伴う振動であるため、ねじり圧電素子により直接円環断面に回転力を加える構成で励振可能であると考えられる。ねじり圧電素子は大きなせん断力を発生させることができるが、その基本的な振動系設計法や応用の検討例が少ない。

圧電素子は図4に示すように周方向に分極したものをモザイク状に接着した構成となる。円環中心に対して対称的位置には、分極方向を逆転させた圧電素子を配置し、同相電圧で駆動することで、奇数次の振動モードの定在波を励振する。さらに $\pi/2$ 位置のずれた2組の圧電素子を時間的位相差 $\pm\pi/2$ で駆動すれば進行波となる。円環中心に対して対称位置の振動が同相である偶数次の振動モードを励振するには1組の圧電素子だけで駆動、もしくはトランスなどにより対称位置の圧電素子に逆相電圧を印加することが必要であるが、この場合でも4組の圧電素子を用いて進行波とすることはできない。提案する構成では、図2の振動系設計のような共振周波数を一致させるための寸法調整は必要なく、駆動周波数を変えれば、次数および共振周波数の異なる振動モードを選択的に励振することも可能と考えられる。

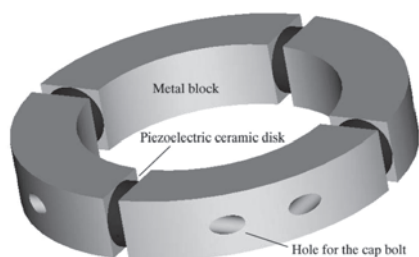


図3 圧電素子を内部に組込むシステム構成

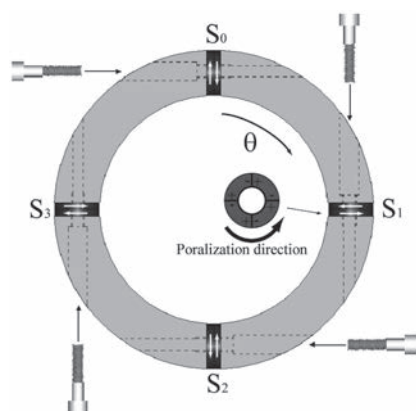


図4 ねじり圧電素子の位置と分極方向

### 3. 振動系の理論的検討

設計した円環状振動体は、全体の外径を140mmとし、外径20mm、内径10mm、厚さ3mmの圧電素子8枚を厚

さ0.2mmの電極板とともに4つの円弧状のアルミニウム金属ブロックに組み込み、M6のステンレス製キャップボルトで固定する構成とした。以後、位置 $\theta = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ に組み込んだ圧電素子の組をそれぞれ0, 1, 2, 3の番号で表し、駆動する圧電素子番号をシステムSの添え字として表現することにする。例えば、位置 $\theta = 0$ の圧電素子に電圧を印加する状態は $S_0$ 、位置 $\theta = 0, \pi$ の圧電素子に並列に電圧を印加する状態は $S_{02}$ の様に表す。まず対象周波数範囲を15~25kHzとし、有限要素法(ANSYS)を用いて自由振動解析を行った。次に、自由振動解析により対象周波数範囲に存在する振動モードを計算し、その共振周波数を駆動周波数として強制振動解析したときに現れる定在波の次数を確認した。図5に面外振動の自由振動モードを、軸方向変位の位相の正負で色分けし(色の境目は振動の節位置を表す)、共振周波数の低い順に並べたものを示す。円環外周部と内周部で位相が反転しているものはねじり振動が、位相が同相であるものは軸方向たわみ振動がそれぞれ大きく励振される振動モードである。さらに周方向に数えた節の数により、それぞれ(a)ねじり振動2次(17892Hz)、(b)軸方向たわみ振動5次(19709Hz)、(c)ねじり振動3次(24370Hz)、(d)軸方向たわみ振動6次(26359Hz)が大きく含まれる振動モードであることが推測できる。

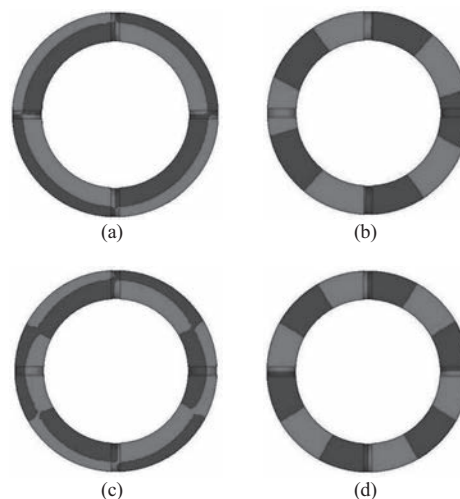


図5 自由振動モードの計算例 (a) 共振周波数17892Hz, (b) 19709Hz, (c) 24370Hz, (d) 26359Hz

図6に、それぞれの共振周波数で1組の圧電素子 $S_0$ の状態では駆動したときに励振される定在波に含まれる次数の割合を計算したものを示す。この計算は、円環外周部の軸方向振動変位分布を強制振動解析により計算し、その結果をフーリエ解析したものである。各共振周波数で駆動した時に最も大きく現れる次数の割合で規格化して表示している。これらの結果からも、先のモード図で推測される次数が最も大きく現れていることを確認することができるが、ねじり振動とたわみ振動は互いに共振周波数が接近してお

り、実機ではこれらを完全に分離して励振することができない可能性もある。

図5 (b)の軸方向たわみ振動5次(19709Hz)を対象とし、進行波を励振した時の円環外周部の振動振幅分布と位相の計算結果を図7に示す。計算は、 $S_{02}$ ,  $S_{13}$ の状態それぞれ励振される定在波が同振幅となるような駆動周波数を設定し、 $S_{13}$ で励振される振動を基準にした $S_{02}$ で励振される振動の位相差が $+\pi/2$ または $-\pi/2$ になる様に2つの駆動電圧位相差を調整した。グラフは、最大振幅で規格化した振動振幅と位相差を周方向位置 $\theta$ の関数としてプロットしたもので、位相差は $S_{13}$ の駆動電圧を基準とした。理想的には、振幅は位置によらず一定、位相差は直線的に変化し、駆動電圧の位相を $\pi$ 変化させると、位相変化の傾きの正負が逆転する。図6の計算結果が示すように、対象とする次数以外も若干結合しているため、進行波の振幅分布にも若干の凹凸があり、位相差も完全な直線の変化ではない。

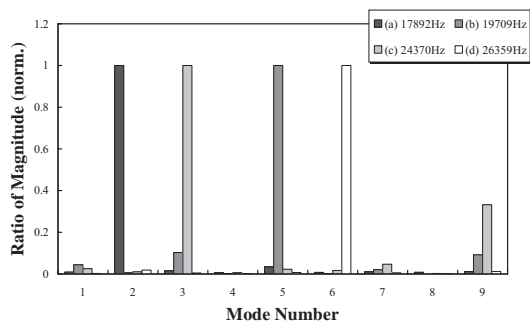
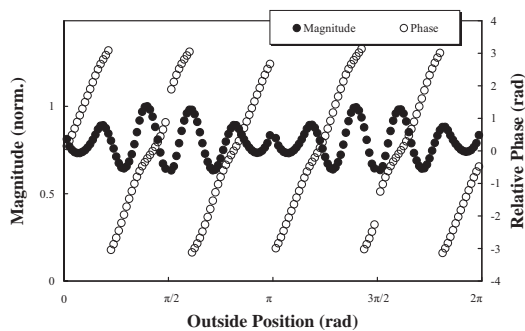
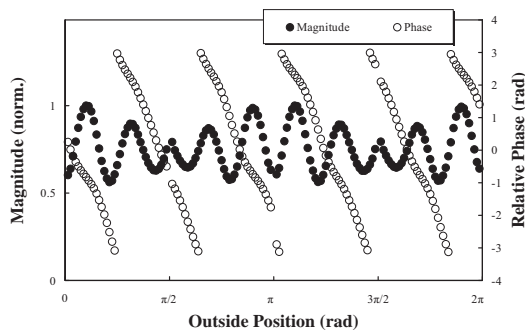


図6 定在波分布の次数解析結果 ( $S_0$  駆動時)



(a)



(b)

図7 進行波励振時の振動分布計算結果  
(a) 駆動位相差 $+\pi/2$ , (b)  $-\pi/2$

しかし定在波の場合は、位相が0か $\pi$ の離散的な値をとり、正弦波を整流した振幅分布となることを考えると、図7の計算結果は進行波の励振を示唆するものといえる。

#### 4. 結言

圧電素子を内部に組み込む円環状超音波振動体の構成を提案し、周方向に分極されたねじり圧電素子を用いて面外振動を励振する振動体の理論的検討を行った。本研究で確認された結果を以下にまとめる。

- (1) ねじり圧電素子を組み込むことにより、円環状振動体に軸方向たわみ振動、ねじり振動の両方を励振できる振動系を構成できる可能性がある。
- (2) 円環対称位置に配置する圧電素子の分極方向が異なるように、4組の圧電素子を配置することで、奇数次の振動モードの進行波を励振する振動系を構成できる。

今後、対象を面内振動に拡張するとともに、実験的検討を行い、振動系の電氣的等価回路モデル、大振幅動作時の特性について検討することで、従来のボルト締めランジュバン型振動子を用いる方法との比較を行っていく。

#### 文 献

- (1) T. Sashida and T. Kenjo, An Introduction to Ultrasonic Motors, Clarendon Press (1993).
- (2) S. Ueha and Y. Tomikawa, Ultrasonic Motors: Theory and Applications, Oxford Science Publications (1993).
- (3) 里信純ほか, 円環の進行波を用いた超音波洗浄器の試作(1), 日本音響学会秋季研究発表会, 1-P-17, pp. 893-894 (1988).
- (4) 里信純ほか, ボルト締めランジュバン型振動子を駆動源とする高トルク進行波型超音波モータ, 日本機械学会論文集 (C編), 67, 657, 1235-1240 (2001).
- (5) J. Satonobu et. al., Traveling Wave Ultrasonic Motor Using A Flexural Composite Transducer, Japan Journal of Applied Physics, Part 1, Vol. 42, No. 5B, pp. 3007-3011 (2003).
- (6) T. Yamazaki et. al., Trial Construction of a Noncontact Ultrasonic Motor with an Ultrasonically Levitated Rotor, Japan Journal of Applied Physics, Part 1, Vol. 35, No. 5B, pp. 3286-3288 (1996).
- (7) J. Satonobu and J. R. Friend, Traveling Wave Excitation in a Flexural Vibration Ring by Using a Torsional-Flexural Composite Transducer, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 48, No. 4, pp. 1054-1059 (2001).
- (8) S. P. Timoshenko et. al., Vibration problems in engineering, Forth edition, John Wiley & Sons, Inc. (1974).