

# 圧電素子を内部に組込む円環状超音波振動体の検討 II

——縦圧電素子による面内／面外たわみ振動の励振——

里信 純\*・青野 真也\*\*・影山 裕起\*\*\*・堀内 裕貴\*\*\*\*・和泉 真澄\*・関口 泰久\*\*\*\*\*

(平成23年10月28日受付)

## Study on Ultrasonic Vibration Rings with Piezoelectric Elements Embedded Inside II —— Excitation of in-plane/out-of-plane flexural vibration using the piezoelectric elements for longitudinal vibration ——

Jun SATONOBU, Shinya AONO, Hiroki KAGEYAMA, Hirotaka HORIUCHI,  
Masumi IZUMI and Yasuhisa SEKIGUCHI

(Received Oct. 28, 2011)

### Abstract

In previous works, the authors have proposed a new method to excite the ultrasonic vibration in a metal ring. The system composed of four pairs of piezoelectric elements for torsional vibration embedded in four arcuate metal blocks has designed via finite element analysis to operate with the out-of-plane vibration mode and its traveling wave. This paper presents the method to excite in-plane/out-of-plane flexural vibration mode in an annular vibration system using the piezoelectric elements for longitudinal vibration. The system for 7th vibration mode, composed of 3-mm thick piezoelectric ceramics embedded in four 140-mm diameter aluminum blocks, was analyzed theoretically.

**Key Words:** ultrasonic vibration, longitudinal vibration, piezoelectric element, traveling wave, metal 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おり、特に空間的に縮退した2つのたわみ振動モードを制御して励振される進行波を用いる応用例が多く報告されている<sup>(1)-(7)</sup>。

筆者らは先に、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構成を提案し、周方向にせん断力を発生するねじり圧電素子を用いて、円環軸方向に変位を持つ振動(面外たわみ振動、ねじり振動)を励振する振動系を有限要素法解析により理論的に検討した<sup>(8)</sup>。

本論文ではさらに、厚み方向に分極され縦振動する圧電素子を用い、円環に面内／面外たわみ振動を励振する構成の実現性について、有限要素法解析を用いた理論的検討を行った結果を報告する。

## 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)面外たわみ振動(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。今回、対象としているのは、(a)の面外たわみ振動と(b)の面内たわみ振動で、これらを厚み振動する圧電素子を用いて励振する。図2は

\* 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機械システム工学専攻  
\*\*\* 広島工業大学工学部知能機械工学科(現 ㈱ダイクレ)

\*\*\*\* 広島工業大学工学部知能機械工学科(現 ㈱日本製鋼所)  
\*\*\*\*\* 広島大学大学院工学研究科

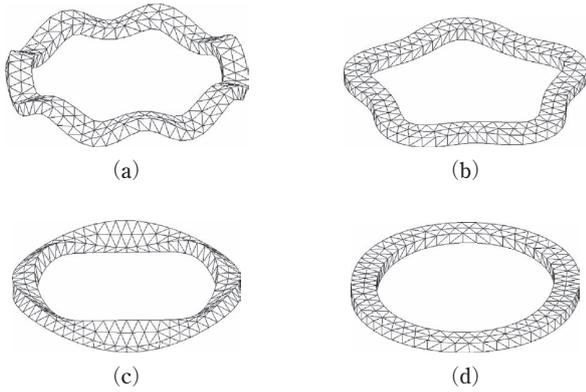


図1 円環の振動モード例 (a) 面外たわみ振動, (b) 面内たわみ振動, (c) ねじり振動, (d) 縦振動

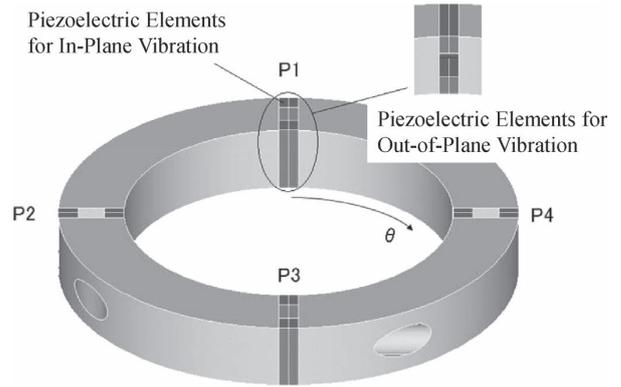


図3 縦圧電素子を用いるシステム構成

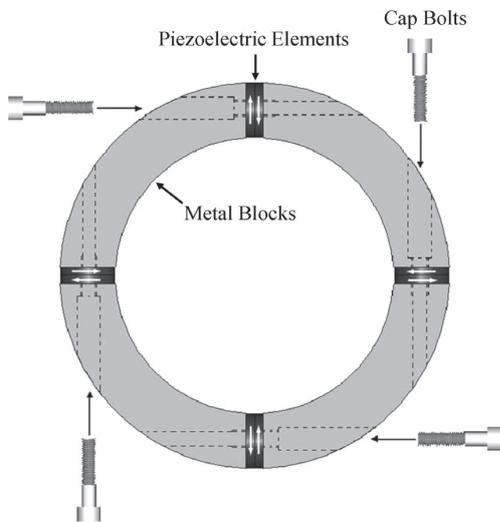


図2 圧電素子を内部に組み込むシステム構成

基本的なシステム構成で、圧電素子の分極は励振する振動の種類によって異なるが、分極方向を互い違いにした最低4枚の圧電素子を1組として、それら4組を円上互いに $\pi/2$ の角度で配置し、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している。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。

今回検討した振動系の基本構成を図3に示す。圧電素子は厚み方向に分極された直方体のもの16枚を、励振する面外/面内振動に応じて組み込む方向を $\pi/2$ 入れ替える。円環中心に対して対称の位置には、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。提案する構成では、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。

設計した円環状振動体は、全体の外径 140 mm、内径 100

mm、径方向厚さ 20 mm、高さ 20 mmとし、 $20 \times 6 \times 3$  mmの圧電素子16枚を、厚さ 0.2 mm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 $\theta = 0, -\pi/2, \pi, \pi/2$ に組み込んだ圧電素子の組をそれぞれ1, 2, 3, 4の番号で表し、駆動する圧電素子番号をP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 $P_1$ 、位置 $\theta = 0, \pi$ の圧電素子に並列に電圧を印加する状態は $P_{13}$ の様に表示することにする。今回は7次の面内/面外たわみ振動モードを対象とし、有限要素法 (ANSYS) を用いて理論的検討を行った。

### 3. 解析結果

#### 3.1 面内振動の解析

まず、面内振動の自由振動モード解析を行い、設計した円環状振動体に対象とする振動モードが存在するか確認した。さらに求めた共振周波数を駆動周波数として、圧電素子に電圧を印加する強制振動解析を行い、励振される定在波振動の分布を確認した。図4に自由振動モードの計算結果を示す。共振周波数は 35299 Hzであった。図5に1組の圧電素子に対して $P_1$ の状態駆動したときに励振される定在波振動分布の計算結果を示す。このグラフは、円環外周部の径方向の振動変位分布をプロットしたもので、振幅は最大値で規格化し、位相は最初の位置を基準にした相対位相でプロットしている。さらに図6は、図5の結果の

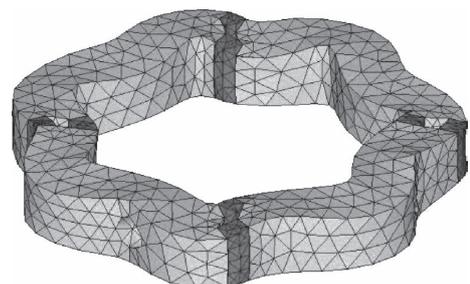


図4 面内振動の自由振動モード計算例

位相の正負を考慮した振幅分布を次数解析した結果である。これらの結果から対象とする7次の振動モードが大きく励振されていることが確認できる。

図7は進行波を励振した時の円環外周部の振動変位分布

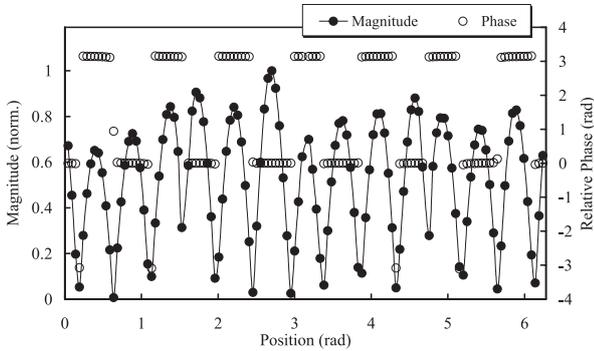


図5 定在波分布の計算結果

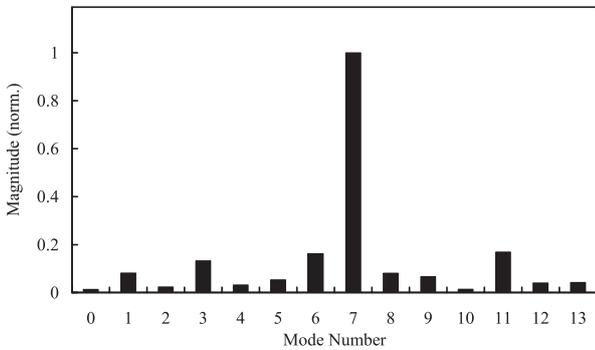


図6 定在波分布の次数解析結果

と位相の計算結果である。計算は、 $P_{13}$ ,  $P_{24}$  の状態で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、さらに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。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、進行波の変位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。しかし定在波の場合は、図5に示すように位相が0か $\pi$ の離散的な値をとり、変位分布が正弦波を整流したようになることを考えると、図7の計算結果は多くの進行波の励振を示唆するものといえる。

### 3.2 面外振動の解析

同様な解析を面外振動についても行った。図8に自由振動モードの計算結果を示す。共振周波数は32754 Hzであっ

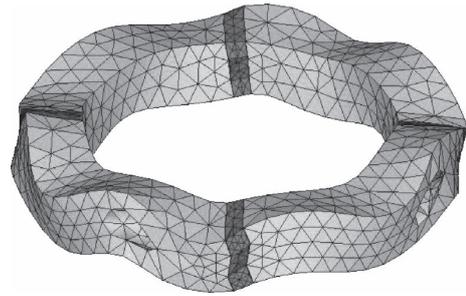
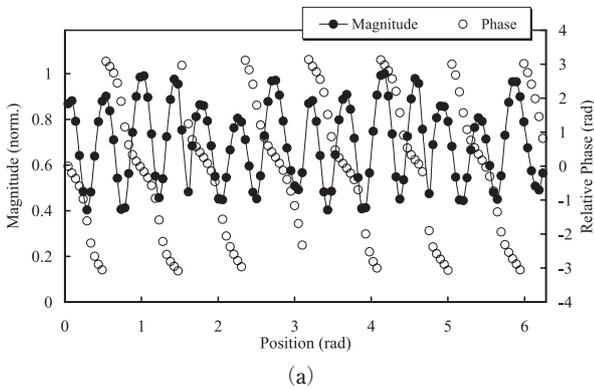
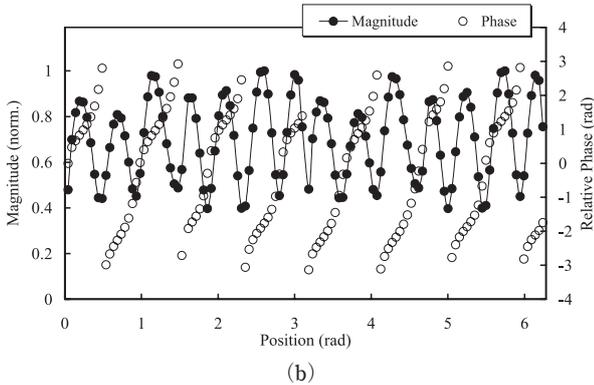


図8 面外振動の自由振動モード計算例



(a)



(b)

図7 進行波励振時の変位分布計算結果  
(a) 時計回り, (b) 反時計回り

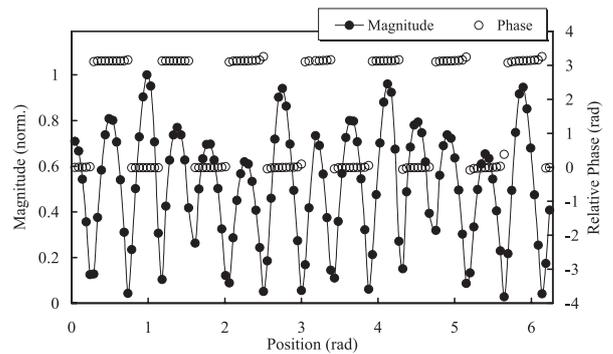


図9 定在波分布の計算結果

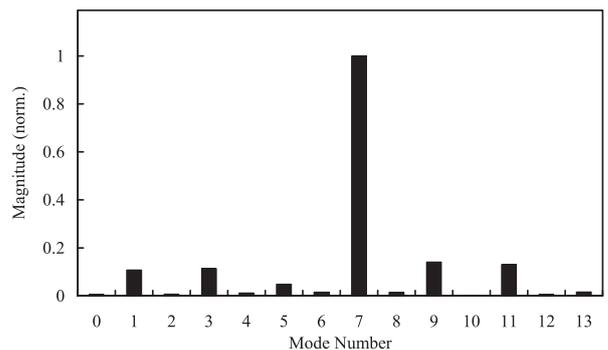


図10 定在波分布の次数解析結果

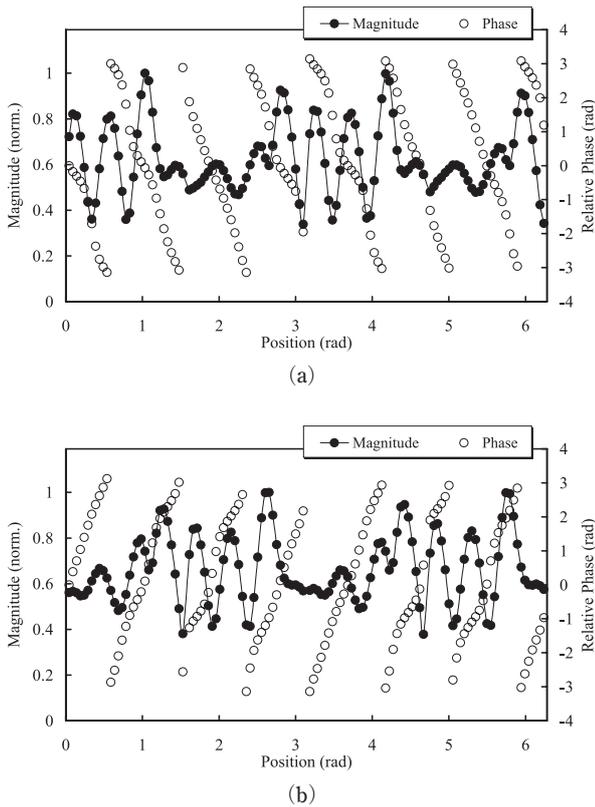


図11 進行波励振時の変位分布計算結果  
(a) 時計回り, (b) 反時計回り

た。定在波分布，次数解析，進行波の励振についての結果を図9，図10，図11にそれぞれ示す。変位分布は，円環外周部の垂直方向変位である。面内振動の場合と同様に対象とする振動モードとその進行波の励振が確認できる。

#### 4. 結 言

厚み方向に分極された直方体の縦圧電素子を用いて面内／面外たわみ振動を励振する円環状超音波振動体の構成を提案し，有限要素法解析を用いて実現性の理論的検討を行った。先に報告したねじり圧電素子を用いる構成と同

様，円環状振動体に面外たわみ振動の定在波，進行波を励振できること，および圧電素子を配置する向きを直交する方向に変えることで，面内振動の励振にも対応できることを確認した。今後，さらに実験的検討を行い超音波モータなどへの応用を検討する。

#### 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, pp. 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) 里信純ほか，圧電素子を内部に組込む円環状超音波振動体の検討，広島工業大学紀要 研究編，45, pp. 33-36 (2010).