

# 圧電素子を内部に組込む円環状超音波振動体の検討 III

——実験的検討と超音波モータへの応用——

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

(平成24年10月31日受付)

## Study on Ultrasonic Vibration Rings with Piezoelectric Elements Embedded Inside III ——Experimental study and application to ultrasonic motor——

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

(Received Oct. 31, 2012)

### 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/longitudinal vibration embedded in four arcuate metal blocks was designed and theoretically investigated via finite element analysis. This paper presents an experimental study on previous designed systems and an application to the travelling wave ultrasonic motor using the piezoelectric elements for torsional vibration.

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

### 1. 緒言

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超音波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）を励振する振動系や、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について有限要素法解析による理論的検討を行ってきた<sup>(1)(2)</sup>。

本論文では、これらについて試作による実験的検討を行った結果を報告し、ねじり圧電素子を組込んだ円環状振動体を用いた新しい超音波モータの構成を提案する。

### 2. ねじり圧電素子を組込む振動系の検討

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。図2にねじり圧電素子を組込むシステム構成の概略、および圧電素子の分極方向と配置を示す。圧電素子は周方向に分極したものをモザイク状に接着した円環状の構成となる。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 $\pi/2$ の角度で配置し、その間を円弧状の金属ブロックとキャップボルトで結合する。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のペアを配置し、同相電圧で駆動することで、奇数次の面外たわみ振動モード、もしくはねじり振動モードの定在波を励振する。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込まれる。 $\pi/2$ 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り、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

\* 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(現 ㈱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(現 ㈱北川鉄工所)

\*\*\*\* 広島大学大学院工学研究科

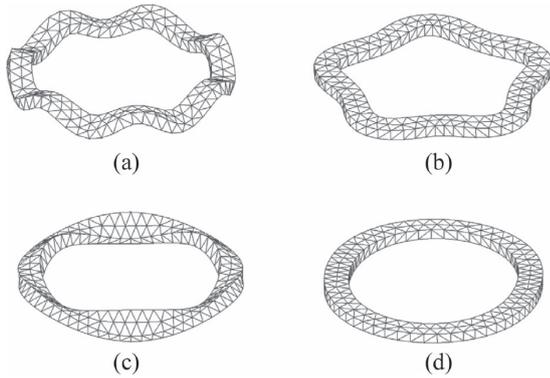


図1 円環の振動モード例 (a) 面外たわみ振動, (b) 面内たわみ振動, (c) ねじり振動, (d) 縦振動

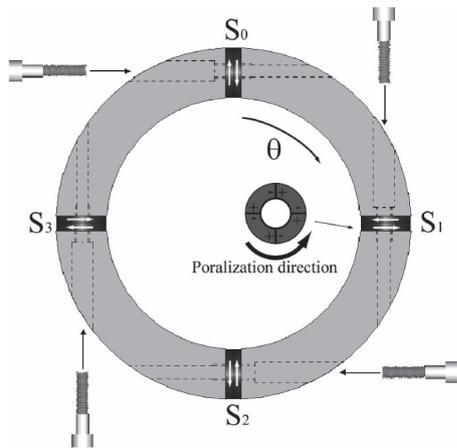


図2 ねじり圧電素子を組込むシステムの構成

選択的に励振することも可能である。

設計・試作したねじり圧電素子を組込むシステムは、全体の外径を 140 mm とし、外径 20 mm、内径 10 mm、厚さ 3 mm の圧電素子 8 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で挟み込み、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。

図 3 に試作したシステムの  $S_0$ 、および  $S_{02}$  時のアドミタンス特性測定結果を示す。アドミタンス特性は、単位入力電圧あたりの入力電流振幅と、入力電圧に対する入力電流の位相を駆動周波数の関数として測定したもので、複数の振動モードの共振周波数の位置や励振しやすさなど大まかな傾向を確認することができる。 $S_0$  の時には 3 つの大きな共振ピーク (グラフ中 (a)~(c)) が観察された。この 3 つの共振周波数でそれぞれ駆動した時に励振される定在波に含まれる次数の測定結果を図 4 に示す。この結果は円環外

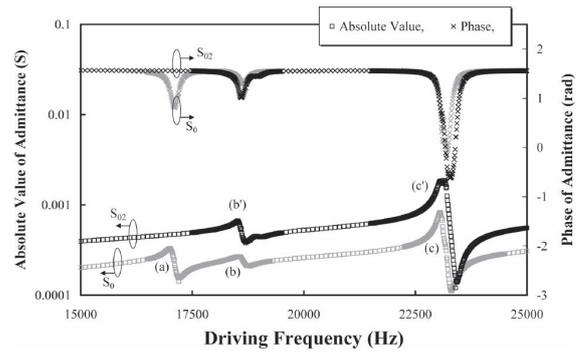


図3 アドミタンス特性の測定結果

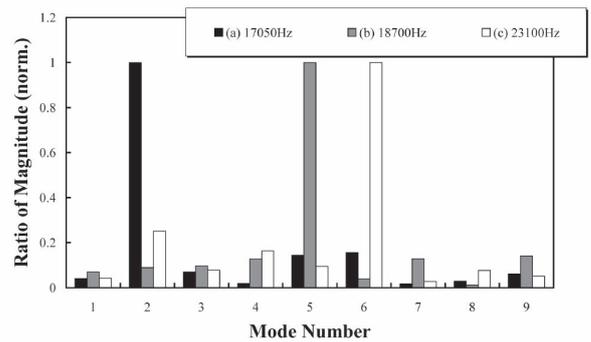


図4 定在波モード次数の測定結果 ( $S_0$  駆動時)

周部の軸方向振動の分布を位置の関数として測定し、フーリエ解析を行ったものである。この結果から、周波数の低い方からそれぞれ 2 次、5 次、6 次の成分を多く含む定在波であることが分かり、理論解析結果と一致する<sup>(1)</sup>。

$S_{02}$  の時のアドミタンス特性からは 2 つの共振ピークしか現れず、2 次の成分を多く含んでいた (a) 17,050 Hz のピークが消滅している。残った 2 つの共振周波数 (b) (c) でそれぞれ駆動した時に励振される定在波に含まれる次数を図 5 に示す。(b) 18,700 Hz で励振される定在波は  $S_0$  の時と同様に 5 次の成分を多く含むものであることは変わらないが、(c) 23,100 Hz で駆動した時は 3 次の成分の割合が増加している様子が分かる。これらの結果から  $S_{02}$  の時は偶数次モードの励振が抑制されることが確認できる。

さらに対象振動モードを 5 次の面外たわみ振動とし、進行波の励振を実験的に確認した。進行波を最適に励振するには 2 つの定在波を、(i) 空間的位相差  $\pm \pi/2$ 、(ii) 時間位相差  $\pm \pi/2$ 、(iii) 同じ振動振幅、の条件で重ね合わせる必要がある。このうち (i) の条件は圧電素子の配置で実現されるが、時間的位相差と振動振幅には周波数特性があり、実機では 2 つの振動系  $S_{02}$  と  $S_{13}$  の状態間で周波数特性に差が生じる。よって (ii) (iii) の条件が実現されるように圧電素子駆動電圧の振幅と位相を駆動周波数に応じて最適に設定する必要がある。

図 6 に  $S_{02}$ 、 $S_{13}$  の時にそれぞれ励振される定在波の振幅の比と位相差を駆動周波数の関数として測定した結果を示

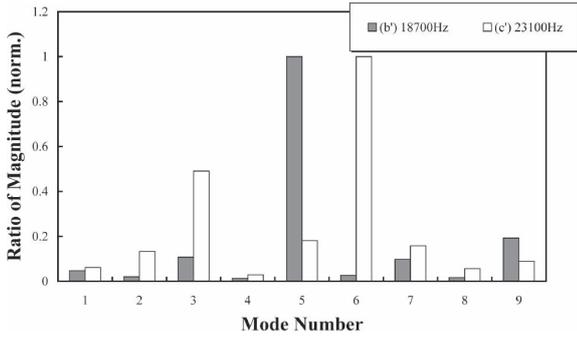


図5 定在波モード次数の測定結果 ( $S_{02}$  駆動時)

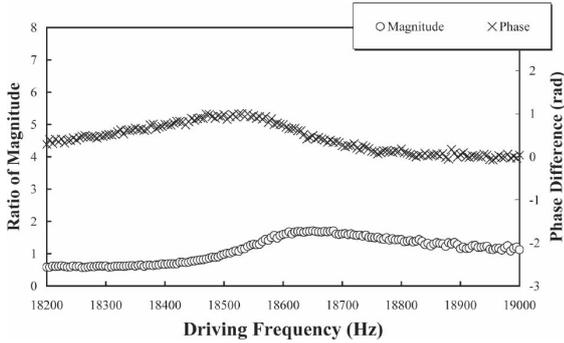


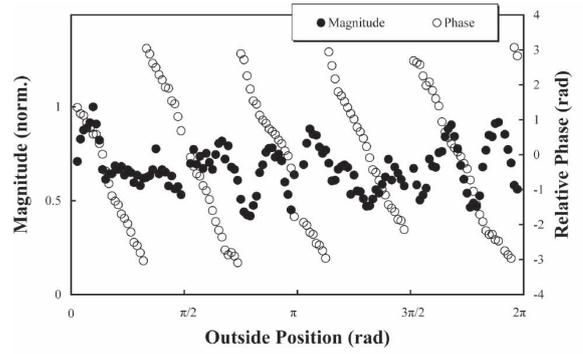
図6 定在波の振幅比と位相差の測定結果

す。いずれも  $S_{13}$  の時を基準としてプロットしている。  $S_{02}$ ,  $S_{13}$  の周波数特性が一致していれば、駆動周波数によらず振幅比は常に 1、位相差は常に 0 となり、進行波の最適駆動条件も駆動周波数によらず単純に同振幅の電圧を時間的位相差  $\pm \pi/2$  で印加することになる。

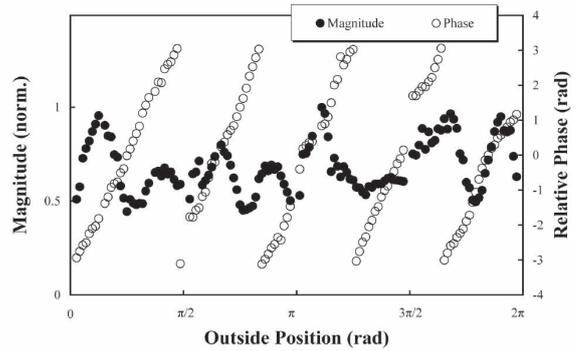
実機では 2 つの振動系の周波数特性が若干異なるため、駆動周波数ごとに最適な駆動電圧比と電圧位相差を設定する必要がある。ここでは振動振幅比が 1 となる 18,510 Hz を駆動周波数とした時の進行波励振の測定結果を図 7 に示す。この駆動周波数で 2 つの駆動電圧を同相とした場合、2 つの定在波には 0.93 rad の時間的位相差が生じることが図 6 から読み取れる。これを考慮して 2 つの定在波の時間的位相差  $\pm \pi/2$  を実現するための  $S_{02}$  の電圧位相差は、0.64 rad,  $-2.50$  rad となる。図 7 からは時間的位相差を  $\pi$  変化させることで、空間的位相変化の傾きの正負が逆転し、進行方向が逆転する進行波が励振されていることが確認できる。

### 3. 縦圧電素子を組込む振動系の検討

縦圧電素子を組込むシステム構成を図 8 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、奇数次の面外/面内たわみ振動モードの定在波を励振する。縦圧電素子を組込むシステムは、全体の外径 140 mm、内径 100



(a) 時計回り進行波



(b) 反時計回り進行波

図7 面外たわみ振動進行波分布の測定結果

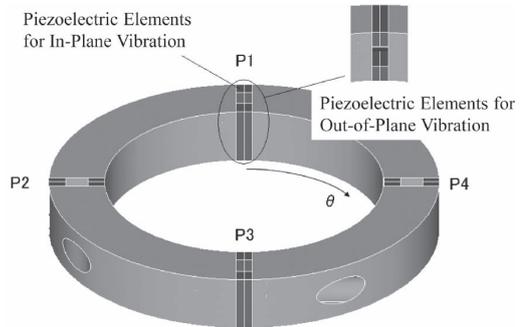
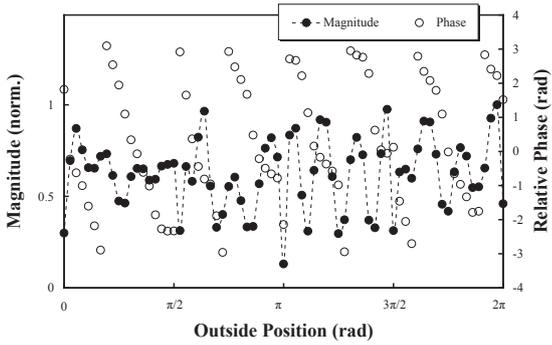


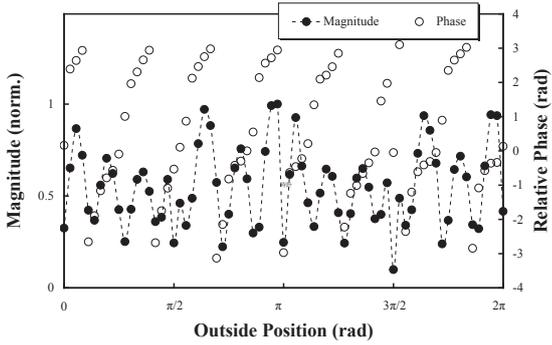
図8 縦圧電素子を組込むシステム構成

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で挟みこみ、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。

このシステムについても、先のねじり圧電素子を組込むシステムと同様、アドミタンス特性などの測定を行った後、7 次の面内/面外たわみ振動について最適駆動条件下で進行波励振の測定を行った。図 9 / 図 10 に  $P_{24}$ ,  $P_{13}$  の組合せで面内/面外振動の進行波励振を行った結果を示す。ねじり圧電素子を組込むシステムと比較して振幅に凸凹が

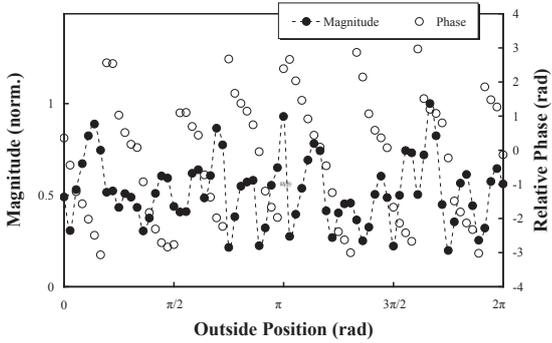


(a) 時計回り進行波

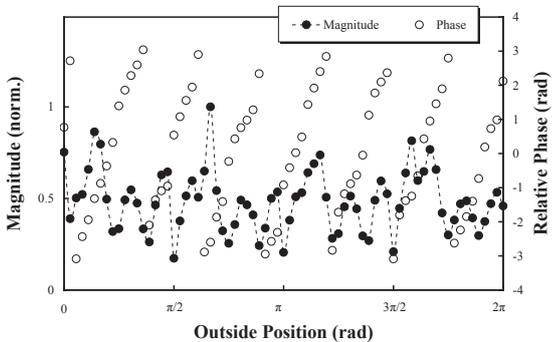


(b) 反時計回り進行波

図9 面内たわみ振動進行波分布の測定結果



(a) 時計回り進行波



(b) 反時計回り進行波

図10 面外たわみ振動進行波分布の測定結果

見られ、多くの定在波成分が含まれていることが推測されるが、位相の直線的变化は進行波の存在も示唆している。

#### 4. 進行波型超音波モータの設計・試作

ねじり圧電素子を組込む外径 140 mm の円環状振動体を用いて、進行波型超音波モータの設計・試作を行った。図 11 に、試作モータの写真を示す。ロータと接触する側の円環表面には櫛歯加工が施してある。またステータである円環を固定するために、円環内部にはスポーク状の突起が設けられている。このモータにおいて振動の時間的位相差を  $\pi$  変えることによりロータの回転方向が変わり、原理通り動作していることが確認された。

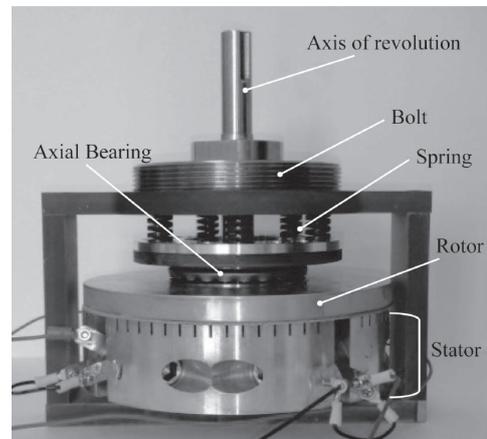


図11 試作した超音波モータの写真

#### 5. 結言

ねじり／縦圧電素子を内部に組込む円環状超音波振動体の試作検討を行い、原理通りの動作を確認した。また、ねじり圧電素子を組込む振動体を用いた進行波型超音波モータを試作し回転動作を確認した。今後、試作したモータの振動系としての基本特性やモータ特性の検討を行っていく。

#### 文献

- (1) 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, 33-36 (2011).
- (2) 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 II——縦圧電素子による面内／面外振動の励振——, 広島工業大学紀要 研究編, 46, 81-84 (2012).