

# ねじり振動方向変換体を用いた超音波モータの設計・試作

里信 純\*・岩田 章宏\*\*・和泉 真澄\*

(平成21年10月28日受理)

## Design and Trial Production of an Ultrasonic Motor Using the Torsional Vibration Converter

Jun SATONOBU, Akihiro IWATA and Masumi IZUMI

(Received Oct. 28, 2009)

### Abstract

This paper presents a new type ultrasonic motor operated with a Langevin transducer for the torsional vibration and its direction converter. The vibration converter changes the torsional vibration (circumferential direction vibration) to the vibration in an oblique direction, which pushes the rotor and gives the rotation. The 30-mm-diameter prototype motor was designed with the FEM and constructed. The maximum torque of 0.14 Nm was achieved with the maximum efficiency of 4.1%.

**Key Words:** vibration converter, Langevin transducer, ultrasonic motor, torsional vibration

### 1. 緒言

超音波モータ/アクチュエータは、圧電素子により励振された弾性振動によりステータ表面の粒子を運動させ、そこにロータ/スライダを加圧接触させることで回転を得るもので、多くはステータ表面の楕円運動を利用する。

図1にその代表的な構成である縦振動（軸方向振動）とねじり振動（周方向振動）の協調で動作する複合振動子型超音波モータの概略を示す。空間的に直交する独立した2つの振動を時間位相差 $\pi/2$ で励振し、ステータ表面に楕円運動を実現することで、そこに加圧接触させたロータを摩擦駆動するこのモータの基本概念は1987年に上羽らによって提案され<sup>(1)</sup>、以後、動作メカニズムのモデル化、設計法などの検討が行われてきた<sup>(2)(3)</sup>が、特に大口径化による高出力化の試みが中心となっている。

ねじり圧電素子の出力トルクは直径の3乗にほぼ比例するため、高出力化、特に高トルク化においてねじり振動を用いることは有効な方策の一つとされている。図2にこれまでに試作された様々な直径の複合振動子型超音波モータ

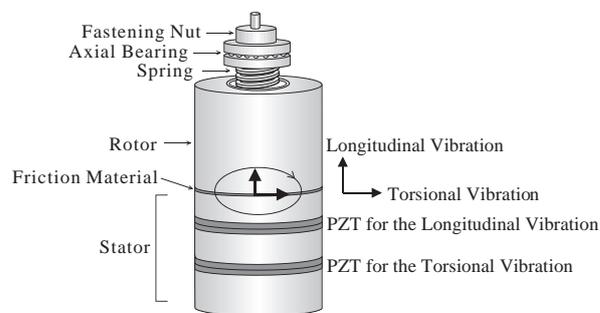


図1 複合振動子型超音波モータの構成

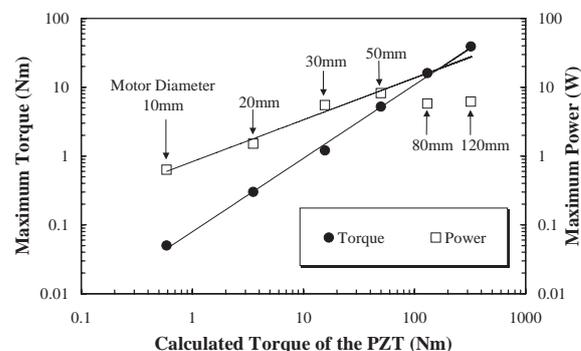


図2 複合振動子型超音波モータの出力特性

\* 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系研究科

におけるねじり圧電素子出力トルクとモータの最大トルクおよび最大パワーの実測値の関係を示す<sup>(4)(5)</sup>。最大トルクはねじり圧電素子出力トルクと比例関係にあり、現在までに直径120mmで40Nmの最大トルクを出力できるものが実現されている。また、最大パワーも原理的には大口径化に伴って増加する。

このモータの設計では、高出力動作させるために、ねじり振動系と縦振動系の共振周波数を接近させる必要があるが、大口径化により特に縦振動モードが複雑化し、共振周波数設計が困難になってくるといった問題が生じている。本報告では、高トルク化が期待できるねじり圧電素子と、その振動方向変換体を利用することにより、2つの異なる振動系の共振周波数一致といった振動設計における問題点を解決できる超音波モータの設計・試作を行った結果を報告する。

## 2. モータの動作原理と設計

図3にねじり圧電素子と振動方向変換体を用いた超音波モータの概略図を示す。ねじり圧電素子は周方向に分極された円環状のもの2枚を、分極方向が互い違いになるように設置し、円筒状の金属ブロック（ナット）でボルト締めしている。振動方向変換体は、羽状をした直方体の弾性体をねじり振動方向と角度を持つように取り付けたもので、ねじり圧電素子が発生する周方向振動を、斜め方向の振動に変換する。この斜め方向に振動する振動方向変換体の上部がロータを突くことにより、ロータは回転力を得る。振動方向変換体が突く方向は、モータの形状を変更することでしか変えられないため、本モータでは基本的に回転方向が図3に示す一方に固定される。振動方向変換体に取り付けてあるステータ上部の形状は立方体となっているが、これは加工のしやすさを考慮したもので、可能であれば円柱上のブロックに振動方向変換体を取り付けたものであっても問題はない。

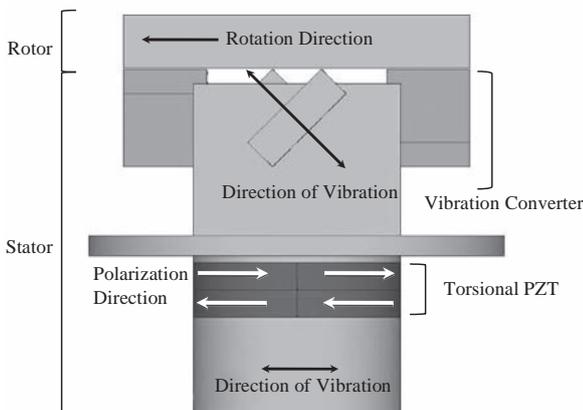


図3 モータの概略図と動作原理

本研究では、有限要素法解析を用いて試作機の設計を行った。図4に設計したステータ部分の寸法を、図5に振動の様子を示す。試作機の寸法は試行錯誤的に行ったもので、振動方向変換体の形状や取り付け角度などは最適化されたものではないが、圧電素子が組み込まれた下半分が周方向振動（ねじり振動）しているのに対して、振動方向変換体は斜め方向に振動している様子が確認できる。

図6に試作機の全体写真を、図7に振動方向変換体部の写真をそれぞれ示す。ロータが振動方向変換体と接触する部分には摩擦材として硬質ゴムが取り付けられている。また振動方向変換体が摩擦材に食い込んで回転しにくくなるのを防ぐため、振動方向変換体の上部は面取りしてある。ロータをステータに加圧接触させるためにコイルばねを用い、ステータから出した軸と回転方向に固定されないようにスラストベアリングを介してナットでばねを押さえる構造とした。

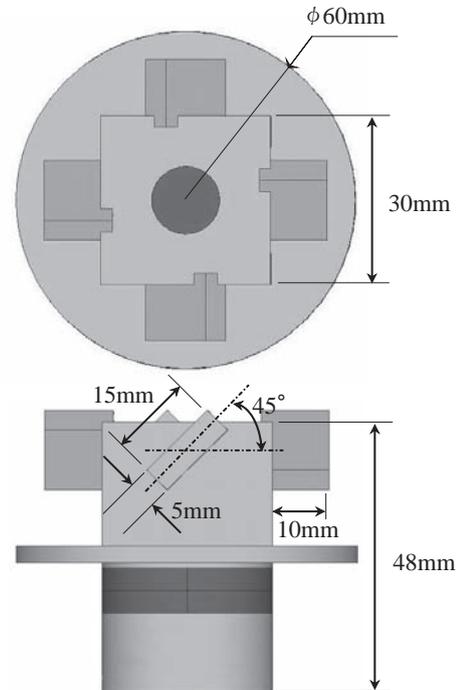


図4 設計した試作機のステータ寸法

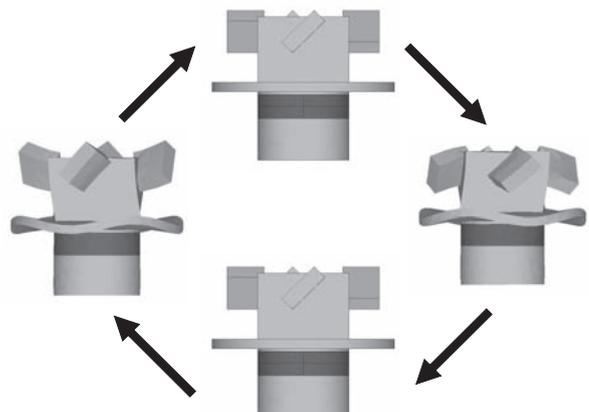


図5 ステータ部分の振動モード計算結果

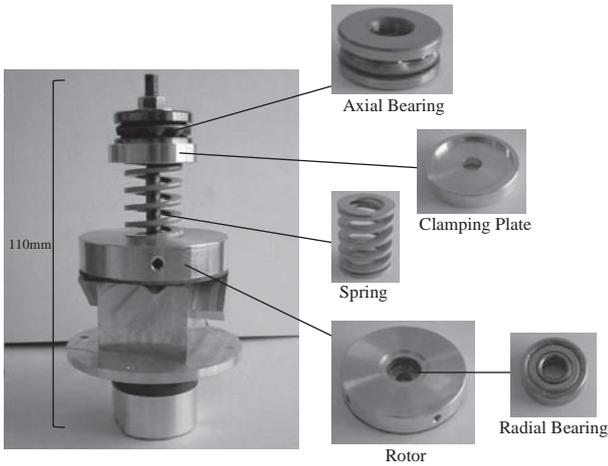


図6 試作機の全体写真

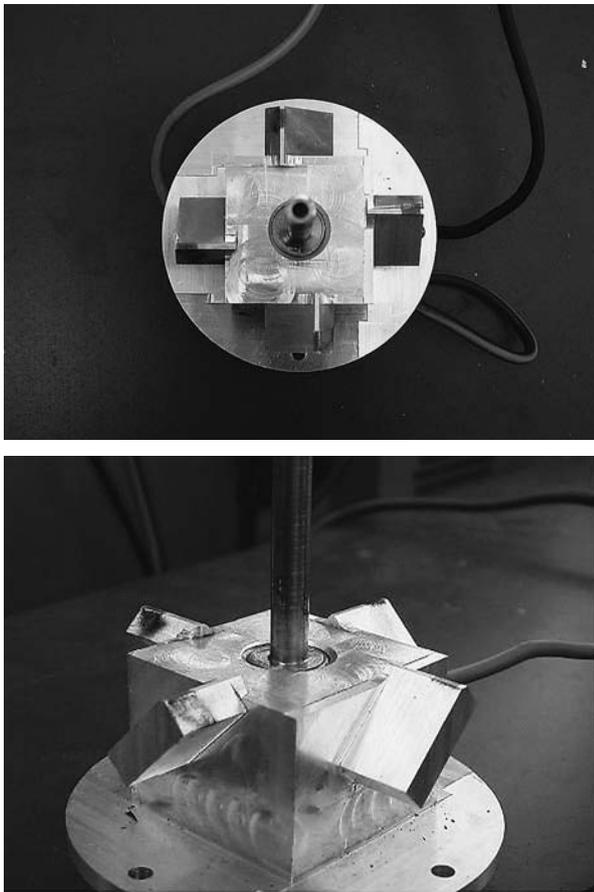


図7 振動方向変換体部の写真

### 3. モータの特性測定

図8に圧電素子電気入力端子からみたアドミタンス特性の測定結果を示す。アドミタンス特性は、電気端子に単位電圧を印加したときの入力電流の振幅と電圧との位相差を、駆動周波数の関数として測定したもので、振幅のピーク付近が振動系の共振周波数となり、振動系は共振周波数近傍を駆動周波数としたときに大きな振動振幅を得ることができる。20～30kHzを駆動周波数として、ロータをはずした状態で測定したとき2つの共振が現れたが、一般的

に実機では設計よりも共振周波数が低く現れやすいことを考慮すると、設計周波数23.97kHzに近い22.56kHzが試作機の対象振動モードの共振周波数であると推測される。

この22.56kHz付近を駆動周波数として、モータを動作させたところ、原理どおり図3で示す矢印の方向にロータは回転した。図9に印加電圧を変化させたときのロータの回転速度を、2種類のばね予圧について測定した結果を示す。予圧なしは、ばねの縮みなしでロータをのせただけの状態で、もう一方の50Nは、ばねの縮み量とばね定数から推定した値である。いずれの場合も印加電圧の増加に伴ってロータの回転速度が増加するが、電圧が大きくなりすぎると回転速度が飽和していく様子も確認できる。また電圧の低いところでは回転が得られない不感帯があり、ある程度の電圧を印加しないと動作しないことも分かる。回転速度が飽和していくのは、電圧の増加→振動振幅の増加→共振周波の低下→振動振幅の低下という、圧電素子の非線形特性のためと推定される。

図10に印加電圧 $200V_{0-p}$ で測定したモータの負荷特性を示す。回転速度をゼロにする負荷トルクが、モータが出力できる最大トルクを表しており、試作モータでは約0.14Nmであった。負荷トルクとモータの回転速度の積がモータの出力パワーで、入力電力に対する出力パワーの割合が効率である。出力パワーや効率は、ある負荷トルクに対して最大となり、試作モータの最大効率は約4.1%であった。図2から複合振動子型超音波モータの場合、同径30mmでは6Nm程度の最大トルクが見込めることから、今回試作したモータは、ねじり圧電素子の持つトルク性能を十分に発揮していないことになる。複合振動子型超音波モータでは、ねじり圧電素子出力は回転力のみに使われるが、本研究で試作したモータでは、斜め方向に方向変換されたねじり振動の周方向成分のみが回転力に使われることになる。このため複合振動子型に比べ出力トルクが劣るのは原理的なものであるが、実験的に得られたトルクはこれを考慮しても低い値である。また複合振動子型が15%以上の最大効率を得ているのに対しても、本試作モータは低効率である。

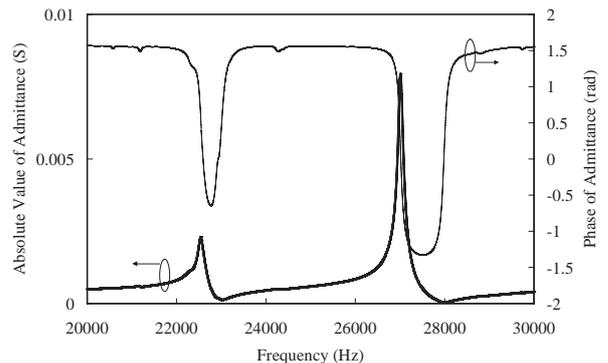


図8 ステータのアドミタンス特性

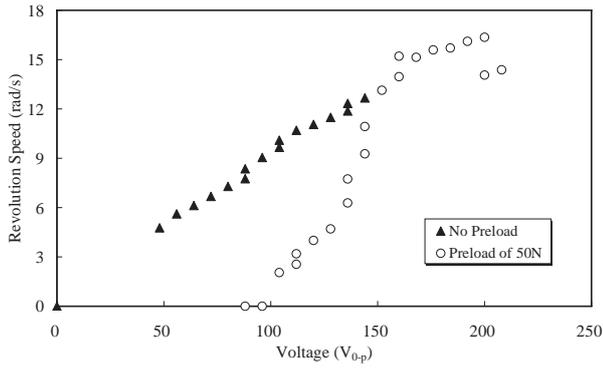


図9 モーターの速度特性

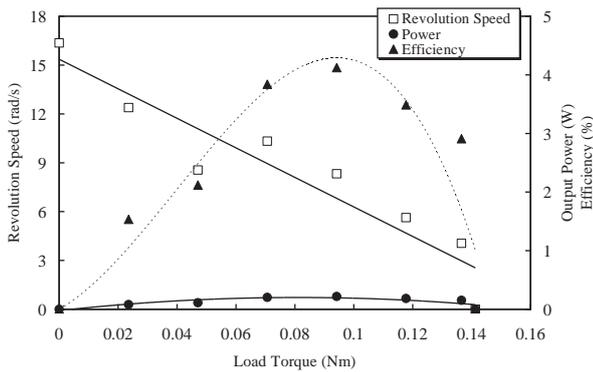


図10 モーターの負荷特性

#### 4. 結言

本研究では、ねじり振動圧電素子とその振動方向変換体を用いた直径 30 mm の超音波モーターの設計・試作を行い、原理どおりの回転動作を確認した。また、負荷特性を測定した結果、同じねじり振動を利用する複合振動子型に比べ

高い性能は確認できなかった。しかし、現状では複合振動子型に関しては直径 120 mm 以上のものは報告例がない。複合振動子型が振動設計的に大口径化が難しいことを考えれば、今回提案した構成では、原理的にこのような問題はなく、今後、大口径化の可能性を検討していく。

#### 文 献

- (1) M. Kurosawa and S. Ueha, Hybrid Transducer-type Ultrasonic Motor, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr., Vol. 38, No. 2, pp. 89-92 (1991).
- (2) K. Nakamura, M. Kurosawa, and S. Ueha, Characteristics of a Hybrid Transducer-type Ultrasonic Motor, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr., Vol. 38, No.3, pp. 188-193 (1991).
- (3) K. Nakamura, M. Kurosawa, and S. Ueha, Design of a Hybrid Transducer-type Ultrasonic Motor, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr., Vol. 40, No. 4, pp. 402-406 (1993).
- (4) K. Nakamura and S. Ueha, Performance of a hybrid transducer-type ultrasonic motor as a function of the size, Proc. of IEEE Ultrason. Symp., pp. 557-560 (1994).
- (5) J. Satonobu, N. Torii, K. Nakamura, and S. Ueha, Construction of Megatorque hybrid transducer type ultrasonic motor, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 35, Part 1, No. 9B, pp. 5038-5041 (1996).