

薄型超音波スピンドルモータの実用化に向けた 高性能化と耐久性向上の研究

室蘭工業大学 青柳 学

東北工業大学 高野剛浩

山形大学 富川義朗, 田村英樹, 広瀬精二

1. はじめに

超音波モータの特徴の一つとして、低速時に高トルクを発生できるため、減速機が不要であり、直接駆動が可能であることがあげられる。しかし、ファンやディスクドライブなどの軽負荷で長時間連続して高速回転が要求される用途では高トルクは必要ない。近年、ノート PC や小型音楽機器などのモバイル製品の小型化や省電力化が望まれており、搭載されている電磁スピンドルモータの更なる高性能化、小型化が必要とされているが容易でない。一方、超音波モータは形状選択の自由度が大きく、特に平板状の超音波モータは薄型構成に適している。また、小型の超音波モータは同様の大きさの電磁モータよりも大きな出力を発生でき、小型化の面で有利である。

本研究の目的は高速回転で連続動作可能な超音波モータを開発し、新しい応用分野の可能性を見出すことである。本報告では考案した幾つかの高速超音波スピンドルモータの設計概念と試作結果について述べ、さらに、実用化に向けて、性能および耐久性の向上のための試みについて報告する。

2. 設計概念、検討項目および検討に用いた超音波モータ

高速超音波スピンドルモータの研究は次の設計概念に基づいている。また、表 1 に検討した幾つかの薄型超音波モータと設計概念の対応を示す。

- 1) 小型、単純構造、単純駆動（単相駆動モータ）
- 2) 低電圧化（積層圧電セラミックス利用モータ）
- 3) 非鉛化（ LiNbO_3 単結晶矩形板モータ）
- 4) 新動作原理（ジャイロモーメント・モータ）

表1 本研究プロジェクトにおける超音波モータの設計概念および検討項目

Concepts and Items Motor types	1) Simple drive & structure	2) Low drive voltage	3) Lead free	4) New operating principle
A: PZT plate with shim	◎			
B: Multilayer ceramics	◎	◎		
C: Single crystal (LiNbO_3)	◎		◎	
D: Gyro-moment motor	○	○	○	◎

3. 各種超音波モータの動作原理と実験結果

3.1 タイプA (複合振動子型, 振動片型)

振動片を有するタイプは高速回転に適しており, 圧電板と金属などの恒弾性体と貼り合わせる複合振動子構成により, 支持部や振動片の形成が容易で, 1mm未滿の厚さにも製作が可能である[1] 図1に示す円環振動子型モータは円環振動子の非軸対称((1,1))振動モードにより, 内側に設けた振動片でロータを突くことにより一方向に回転させる. 回転軸の周囲に配置できるためスペース効率が良い. 図2にL字形振動子超音波モータを示す. 局所配置が可能で予圧バネを内蔵しているため部品点数が少なく, 高速回転が得られる特徴を持つ. 約500rpsの超高速回転が得られている.

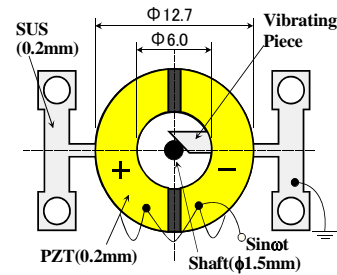
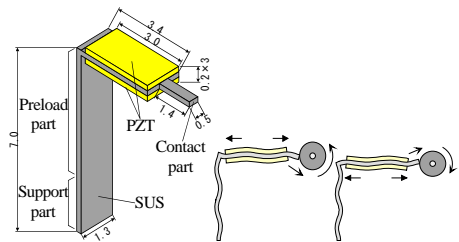


図1 円環振動子と回転特性例
(ロータ直径: 1.5mmφ)



(a)振動子 (b)結合振動モード

3.2 タイプB (積層圧電セラミックス型)

図3および図4に斜対称積層圧電振動子と動作原理を示す. 斜対称の圧電板の縦振動モードと曲げ振動モードが結合する現象を利用している[2]. 単相駆動により両モードが同時に励振され, ロータを回転させる. また, 電極分割がなく単純な構造である. 12枚の圧電板を積層している(厚み2mm). 図5に回転特性例を示す. 3V, 400mWの低電圧, 小電力で駆動できることがわかる.

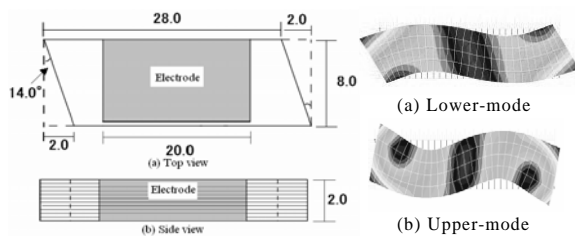


図3 斜対称積層圧電振動子と振動モード

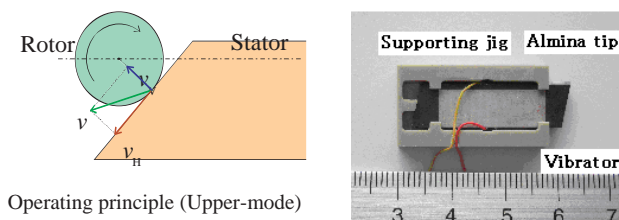


図4 斜対称積層圧電振動子と動作原理

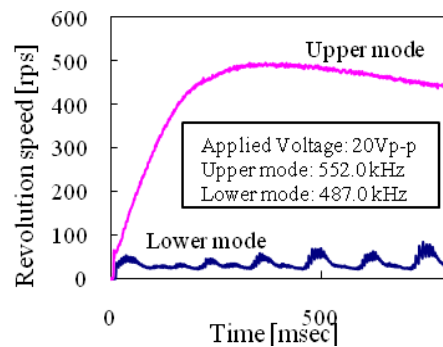


図2 L字形振動子と回転特性例
(ロータ直径: 1.0mmφ)

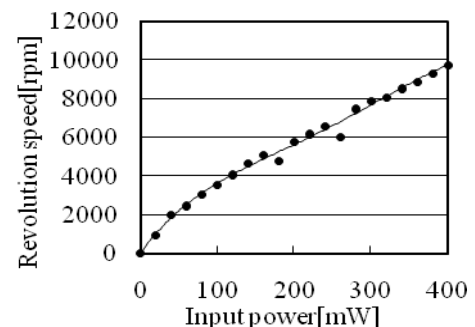


図5 斜対称積層モータの回転特性
(ロータ直径: 1mmφ) 側面駆動時

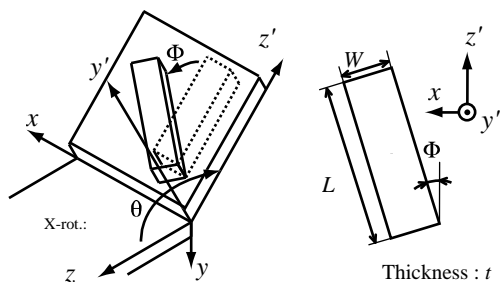
3.3 タイプC (LiNbO₃単結晶矩)

形板モータ)

LiNbO₃単結晶板を用いた L₁-F₂ 矩形振動子, 正方形振動子, 斜対称結合振動子 (図 6), 結晶異方性による結合を用いた 矩形板 L₁-F₂ 結合振動子 (図 7, 8) などを利用して超音波モータを数種類考案・検討している. X 軸 140° 回転 Y 板で面内にさらに $\Phi=15^\circ$ 回転させると L₁-F₂ 結合モードが得られる^[3]. 印加電圧 5.5Vrms で約 8,500rpm の高速回転が得られている (図 9).



図 6 LiNbO₃斜対称結合振動子



(a) Cut angle definition (b) Parameters

図 7 X 軸 140° 回転 Y 板 L₁-F₂ 結合矩形振動子の設計

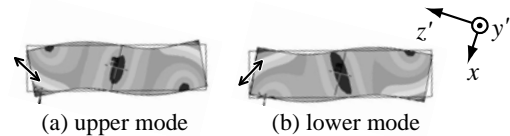


図 8 結合矩形振動子の結合振動モード

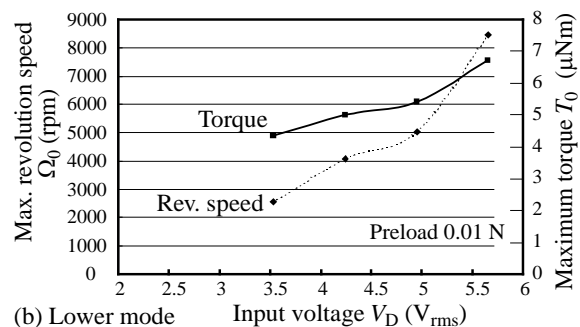


図 9 回転特性例 (ロータ直径: 1mmφ)

3. 4 タイプD (ジャイロモーメント・モータ: GMM)

GMM の動作原理を図 10 に示す. ジャイロの原理を基にした構成で摩擦力を利用しない. 同図(b)のようなパルスによって円盤にモーメント(M1, M2)を加えることにより, 回転モーメント M3 が得られる. 駆動源は電磁力, 静電力, 光波力などが利用できる. 数種類を作成し高速回転が得られている^[4].

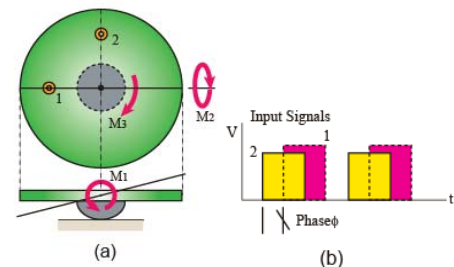


図 10 ジャイロモーメント・モータ

4. 性能向上と耐久性向上の検討

4. 1 ロータの耐摩耗について

多孔質炭素系セラミックスである RB セラミックスでロータを作成し磨耗の低減効果を検討した. 潤滑油で含浸処理している. 図 11 に 2,400 時間までの回転数の変化を示す. 定電圧駆動であり, 回転数の制御は行っていない. ロータの摩耗量の計測より, 直径 1.5mm のロ

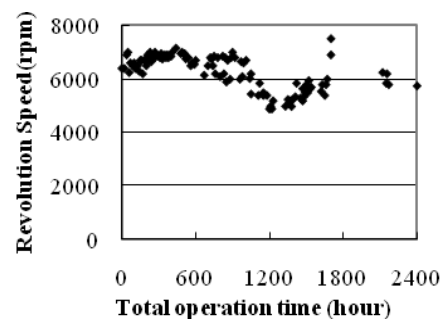


図 11 耐久試験結果 (含浸処理 RB セラミックスロータ)

一タが直径 1mm まで摩耗するのに約 1 万時間を要すると推定された。しかし、試料により図 12 に示すように摩耗が大きい場合もあり、原因の特定が今後の課題である。

4. 2 性能向上の検討

(1) LiNbO₃ 結合モータの電極パターンニング

左右の回転特性の差の原因の一つは、結合係数が大きく異なることである。Upper mode で $k=0.41$ 程度に比べて、lower mode では 0.12 程度しかない。これは lower mode は屈曲振動から誘起される結合モードであるから、全面電極では励振効率が悪い。従って、特に lower mode の駆動効率を改善するために、屈曲モードの歪みパターンに適合するように、歪み極性が逆になる電極部位を削減して、図 13 に示すような鍵型にパターンニングを行った。その結果、双方の結合係数を約 0.3 付近で同程度にできた。

(2) 予圧可変駆動

超音波モータは予圧により、ロータの回転速度やトルクが変わる。予圧が大きい場合、高トルク、低速回転の特性が得られ、立ち上がり時間は短くなる。一方、予圧が小さい場合、低トルク、高速回転特性が得られ、立ち上がり時間は長くなる。したがって、立ち上がり時に予圧を大きくし、その後弱めると短い立ち上がり時間で高速回転が得られる。図 14 に示すように積層圧電アクチュエータを用いた予圧制御によって、最高速度を変えずにロータの回転の立ち上がり時間を 37%短縮させることができた。

文献)

- [1] M. Aoyagi, F. Suzuki, Y. Tomikawa and I. Kano, "High Speed Thin Ultrasonic Spindle Motor and Its Application," Jpn.J.Appl.Phys., vol.43, no.5B, pp. 2873-2878, 2004.
- [2] T.Takano, H.Tamura, Y.Tomikawa and M.Aoyagi : "Ultrasonic motor using a piezoelectric ceramic multilayer vibrator with diagonally symmetric form", Special Issue of the journal Revista de Acustica, vol.38, 3-4, (Proc. of 19th ICA2007 Madrid), No.ULT-07-009, 4pages, Madrid, Spain(2007-09).
- [3] H.Tamura, K.Shibata, M.Aoyagi, T.Takano, Y.Tomikawa, and S.Hirose : "Single Phase Drive Ultrasonic Motor Using LiNbO₃ Rectangular Vibrator," Jpn. J. of Appl. Phys., Vol.47, No.5B pp.4015-4020 (2008-5).
- [4] Y.Tomikawa, C.Kusakabe, T.Takano, M.Aoyagi and H.Tamura, ACTUATOR 2006. 10th International Conference on New Actuator, 14-16 June 2006, Bremen, Germany, pp.576-579, 2006.

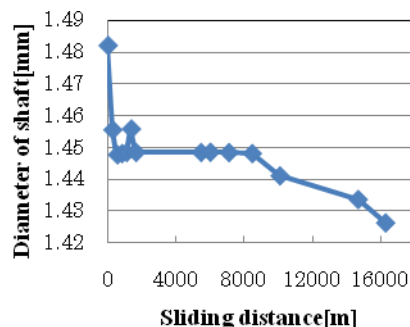


図 12 耐摩耗試験 (含浸処理 RB セラミックス) 1000rpm 一定回転時

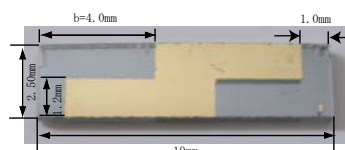
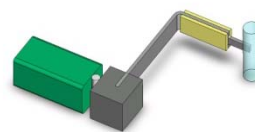
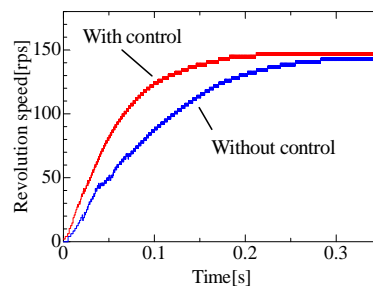


図 13 電極のパターンニングによる結合係数の調整



(a) MPA による予圧制御



(b) 立ち上がり特性

図 14 予圧制御による立ち上がり時間の高速化