



薄型高速回転超音波モータ -単純構成で過酷なアプリケーションへ-

メタデータ	言語: jpn 出版者: 日本音響学会 公開日: 2012-10-02 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 青柳, 学, 高野, 剛浩, 田村, 英樹, 富川, 義朗 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/1689

薄型高速回転超音波モータ -単純構成で過酷なアプリケーションへ-

その他（別言語等） のタイトル	Thin-type high-speed ultrasonic motor: Challenge to severe applications by simple structure.
著者	青柳 学, 高野 剛浩, 田村 英樹, 富川 義朗
雑誌名	日本音響学会誌
巻	66
号	3
ページ	119-124
発行年	2010
URL	http://hdl.handle.net/10258/1689

小特集—最近の超音波モータの研究とその動向—

薄型高速回転超音波モータ

—単純構成で過酷なアプリケーションへ—*

青 柳 学 (室蘭工業大学)**・高野 剛 浩 (東北工業大学)***・

田村 英 樹, 富川 義 朗 (山形大学)****

43.38.Fx

1. はじめに

超音波モータ (USM) は低速時の高トルク特性より、減速機を用いない直接駆動が可能であり、自己保持力を持ち、静粛性、応答性に優れている [1]。また、質量当たりの出力が電磁モータに比べて大きいことから、小型分野への応用に強みがある。実用例として、小型カメラのレンズ駆動、手ぶれ補正、腕時計の日車駆動やサイレントアラームなどがある。しかし、小型スピンドルモータが多用される情報記録メディアのドライブやファンなどへの応用は高速回転で長時間駆動が要求されるため、動作原理上、摩擦駆動を行う超音波モータにとっては非常に酷な用途である。

しかし、超音波モータはステータ振動子の形状選択の自由度が大きく、細棒、薄型、円板など様々な形状が構成可能であり、出力も大きい。また、一方向回転で良い場合は、(1) 単相駆動電源、(2) 圧電材の電極パターンの簡素化、(3) ロータ・ステータ間のすべり減少による摩擦の低減、などが期待でき、好都合な条件が得られる。実現できれば応用分野が広がり、高速回転型超音波モータは検討の価値があると思われる。本稿では高速回転動作を目的とした超音波モータの構成・特性・応用例について幾つか解説する。

2. 高速回転型超音波モータ

2.1 動作原理

図-1 に突つき型超音波モータの動作原理を示す。縦振動子又は端部に配置した振動片の伸び変位によりロータを突く際に、回転に伴う曲げ変位が発生し、ロータの外周が移送される。縮む時はロータとは強く接触しない。この動作を短周期で繰り返すとロータは慣性で滑らかに回転する。この種の超音波モータは「振動片型」とも呼ばれ、1970年代に海外で考案された [1]。その後、指田氏によって図-2 に示すような、ボルト締めランジュバン型振動子端面に振動片を配置した超音波モータが開発され、高速回転を実現している [2]。本構成では図-3(a) に示すように縦振動と振動片の曲げ振動の共振周波数を近接させることで橢円軌跡を得ている。一方、本稿で取り上げる超音波モータは図-3(b) に示すように振動片と振動子本体の双方に曲げ振動モードが励振され、橢円軌跡が更に得易いように、振動モード縮退型の超音波モータの設計手法が用いられている [3]。

2.2 薄型・高速回転の実現

- 1) 薄型化：ステータ振動子に平板振動子を用いる。ロータの回転軸外に直交して配置させることで、薄型構成を得る。
- 2) 高速化：ステータ振動子の振動速度を高速回転に変換するため、小径のロータの側面を駆動し、高速回転を実現する。ロータ径を変えることで回転特性を変えることができる。
- 3) 単純化：駆動電極、駆動回路を簡単にするため、単相駆動にする。

3. 各種構成

3.1 矩形板振動子を用いた構成 [3]

図-4(a) に高速超音波モータの基本構成と振動

* Thin-type high-speed ultrasonic motor: Challenge to severe applications by simple structure.

** Manabu Aoyagi (Muroran Institute of Technology, Muroran, 050-8585)
e-mail: maoyagi@mmm.muroran-it.ac.jp

*** Takehiro Takano (Tohoku Institute of Technology, Sendai, 982-8577)

**** Hideki Tamura and Yoshiro Tomikawa (Yamagata University, Yonezawa, 992-8510)

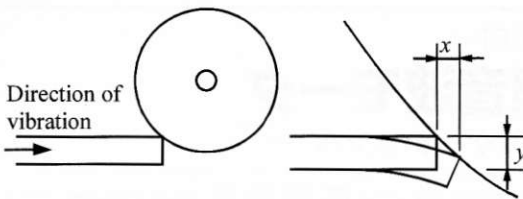


図-1 突っつき型超音波モータの動作原理

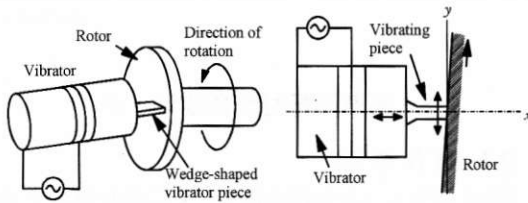


図-2 振動片型超音波モータ

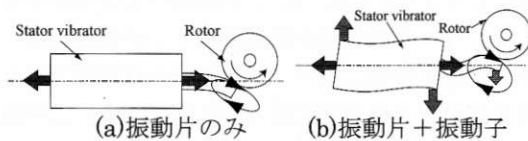


図-3 屈曲変位への振動変換方法

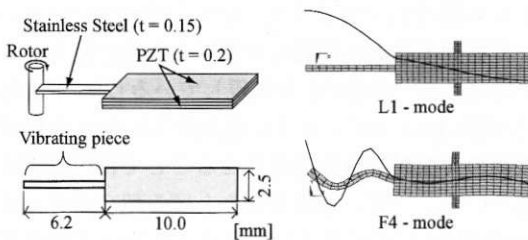


図-4 ステータ振動子

図-4 ステータ振動子

子形状を示す。ステンレス板（厚さ0.15 mm）の両面を厚み方向に分極された2枚のPZT板（厚さ0.2 mm）で挟み込む構造である。振動片の長さは1/4波長であり、縦振動の速度変換を行う。増大された縦振動速度の一部はロータによって屈曲方向の速度に変換される。つまり、図-4(b)に有限要素法（FEM）による振動モードの解析結果を示す。振動子全体の縦振動1次モードと面内屈曲4次振動モードと縮退・結合させ、ロータによる振動方向変換を促進し、屈曲方向の速度の増大を図っている。縦1次振動モードと屈曲4次振動モードの共振周波数は170 kHzであった。

図-5に示すような実験装置を用い回転特性を測定した結果、印加電圧30 V_{pp}時に無負荷回転速

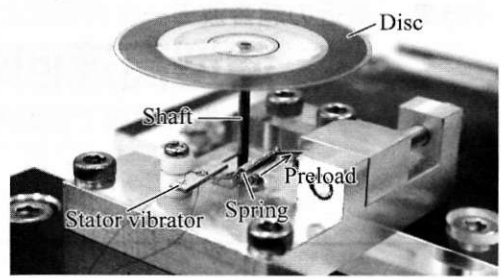


図-5 実験装置

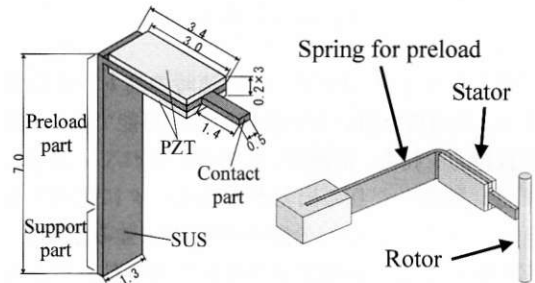


図-6 L字形結合振動子

図-6 L字形結合振動子

度約8,000 rpm、消費電力160 mW、最大トルク0.06 mNm、最高効率は約8.6%が得られている。振動子先端の振動速度を測定した結果、縦方向が718 mm/s、曲げ方向が576 mm/sであった。ロータの周速度は330 mm/sであり、振動速度の半分以下であることから、すべりが大きいことが低効率の原因の一つと考えられる。

3.2 L字形振動子を用いた構成

3.2.1 L字形振動子 [4]

超音波モータの予圧機構にはバネの他に幾つかの部品が必要となる。超音波モータの小型化には予圧機構の簡素化が必要となる。図-6に示すステータ振動子はL字形弾性板の両面に図-6(a)に示すようにPZT板を貼り付けた、簡単な予圧機構と支持機構を有する。前述の平板縦振動子と同様に速度変換用振動片を有している。振動子端を挟み込んで振動子を固定する。固定部から折り曲げ部分までが板ばねとして予圧機構の役割を果たし、コーナ配置可能な構造を持つ。

3.2.2 動作原理

ステータ振動子の折り曲げ部分から先端の間に生じる縦振動モードと、全体に生じる厚み方向の屈曲振動モードの共振周波数を接近させ結合させる

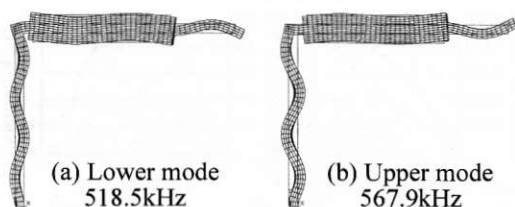


図-7 結合振動モード (FEM 解析結果)

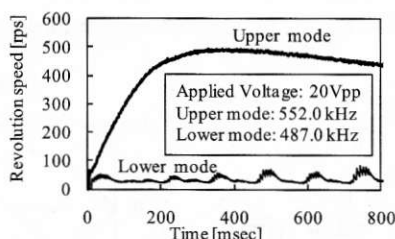


図-8 回転速度の立ち上がり特性

と、図-7に示すような伸びに伴う曲げの方向が異なる二つの結合振動モード (Lower mode, Upper mode) が励振され、モード選択により回転方向を切替えることができる。

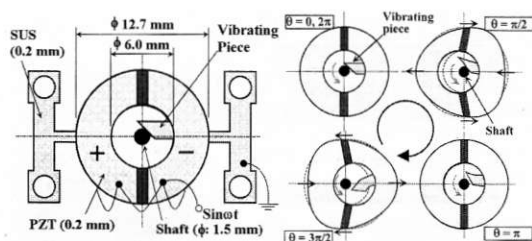
3.2.3 回転速度過渡特性

ステータの端部から 3 mm の部分を固定し、直径 1.0 mm のロータに接触させ駆動した。図-8に立ち上がり特性の測定結果の一例を示す。Upper mode では 496 rps の高速回転が得られている。トルク特性は以下のとおりである。

Upper mode: 6.0 mNm, Lower mode: 3.0 mNm

3.3 円環振動子を用いた構成

円環振動子はロータの周囲に PZT を配置できるため、空間を有効に利用できる。図-9にステータ振動子と動作原理を示す [5]。外径 12.7 mm の円環部は左右の T 形部分で支持されている。円環振動子の両面に PZT 板 (0.2 mm 厚) が接着され、ステータ全体の厚みは 0.6 mm である。従って、同位相の電圧を印加すると、円環部には同図 (b) に示すような非軸対称振動 $((1, 1))$ モードが励振され、円環内側に配置された振動片が振動する。直径 1.5 mm のロータが面内方向に振動片の先端に予圧されており、振動片はロータと接触により屈曲振動方向にも変位する。また、 $((1, 1))$ モードの直交方向の $((1, 1))'$ モードも励振されるため、同図 (b) に示すように振動片先端に楕円変位が形成され、ロータを突いて回転させる。ステータ振動子と直径 1.5 mm のロータを用いて図-10に示す



(a) 円環振動子 (b) 動作原理

図-9 振動片を持つ円環振動子と動作原理

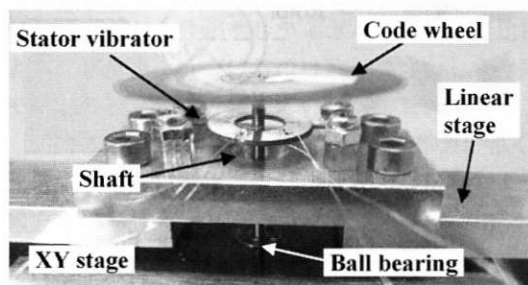


図-10 測定装置 (面内予圧)

ような装置上に配置し、超音波モータを構成した。駆動周波数 170.9 kHz、印加電圧 30 V_{pp} において、回転速度 6,300 rpm、最大トルク約 10 mNm、入力電力 0.91 W が得られている。

また、振動片を二つにし、ロータを二つの振動片の先端に厚み方向から予圧する構成も可能であり、回転特性は大きくは変わらない [6]。

3.4 積層型斜対称振動子を用いた構成

3.4.1 構成と動作原理

斜対称形状の積層圧電セラミック振動子の縦 1 次-屈曲 2 次モードの結合振動を利用した構成である [7, 8]。振動子の構造を図-11に示す。振動子 ($L: 15 \text{ mm}$, $W: 4 \text{ mm}$, $T: 1 \text{ mm}$) ($W/L = 0.267$) の両端を同図のように 14° 傾けている。積層数は 8 枚である。電極は長さ 11 mm 幅で塗布され、それぞれの電極が振動子両側面に引き出されている。電極分割はなく、1~3 V 程度の低電圧駆動が可能である。ロータとの接触面に厚さ 0.6 mm のアルミナ薄板を接着している。

図-12(a)に有限要素法解析 (FEM) による振動モードを示している。Upper-mode と Lower-mode の共振周波数の差は約 2.5 kHz である。図-12(b)に斜対称振動子利用モータの動作原理を示している。長さ方向の端面にロータを加圧接触さ

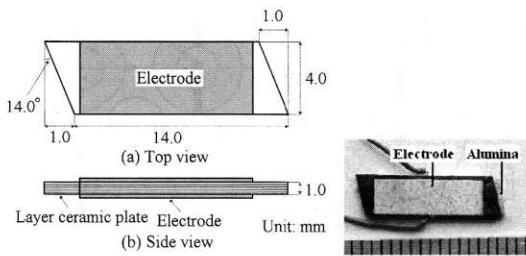


図-11 積層型斜対称振動子

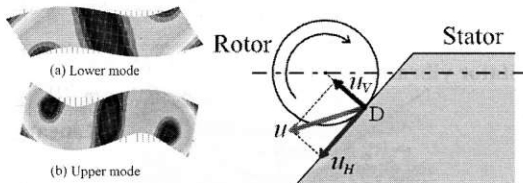


図-12 結合振動モードとモータ動作原理

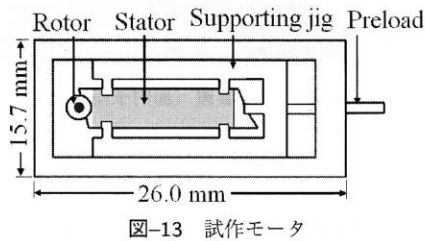


図-13 試作モータ

せ駆動力を取り出している。両モードの切り換えにより双方向回転が可能である。

3.4.2 試作モータの構造と特性

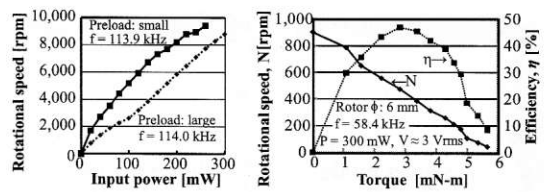
図-13に試作したモータの構造を示す。側面から振動子の屈曲振動の節近傍を挟み込み、短端面の中央部に直径1~6mmのロータを押し付け、回転力を取り出す構造である。

図-14(a)に試作モータの特性を示す。Lower-modeで、直径1.0mmのロータを用いた時の入力電力と回転速度の特性である。入力が300mW (3.3V_{rms})程度で9,000rpmを超える回転数が得られた。図-14(b)は2倍の大きさの振動子(長さ30mm, 幅8mm, 厚み2mm, 積層数12枚)を用いて直径6mmのロータを用いた場合の構成の負荷特性である。同図の条件では、回転速度が約500rpm, 負荷3mNmの時に最高効率46%が得られている。このとき入力電圧は3V_{rms}, 電力は300mWであり、低電圧でよく動作する。

3.5 LiNbO₃ 振動子を用いた構成

3.5.1 モード結合原理

ステータ振動子に非鉛圧電材料である圧電単結



(a) 入力電力-速度特性 (ロータ直径: 1.0mm) (b) 負荷特性 (振動子長: 30mm)

図-14 試作モータの特性 (Lower-mode)

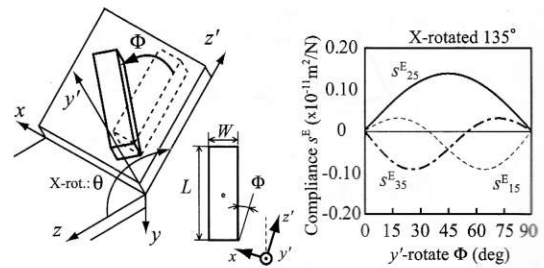


図-15 カット角の定義と弾性コンプライアンス

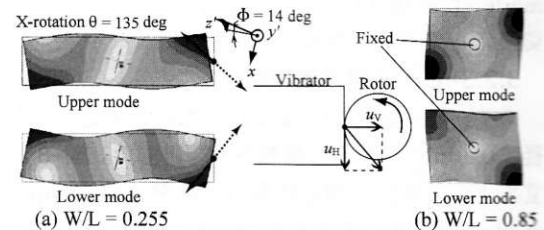


図-16 結合振動モードと動作原理

晶 LiNbO₃ の X 回転 Y 板を用いて、PZT のバルク振動を使用した場合と同様な縮退型、形状結合型のステータ振動子が構成できる [9]。特徴は、非鉛材料で環境負荷が少なく、温度特性が良く、低振動損失などである。更に、LiNbO₃ の X 回転 Y 板から振動子を切り出す際、図-15 左側に示すように y' 軸で更に回転角 ϕ を与えると、同図右側に示すように ϕ が 0.90 以外では弾性コンプライアンス s^E_{35} などが非ゼロ値となり、面内の結晶異方性より縦振動と横振動のモード結合が生じ、矩形状の結合・単相駆動モータが実現できる [10]。

L_1 - F_2 縮退・矩形板振動子を元に、結晶回転切り出しでモード結合させた単相駆動モータを設計した。 L_1 - F_2 の縮退、結合条件は十文字らが示したように、矩形板の辺の幅 (W)・長さ (L) の比について $W/L = 0.255$, $W/L = 0.85$ の二つの条件がある [11]。図-16 に示すように、どちらに

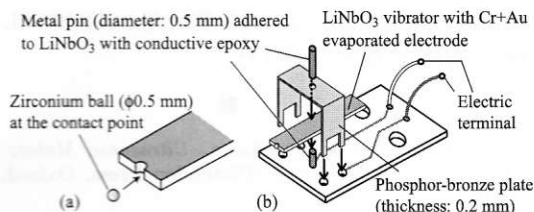


図-17 ステータ振動子の構造と支持方法

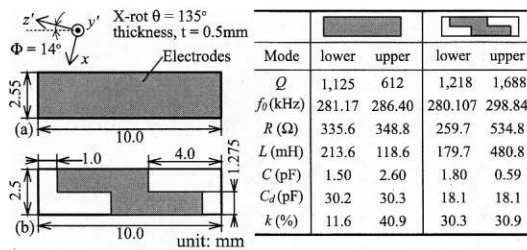


図-19 電極形状による結合係数の近接化

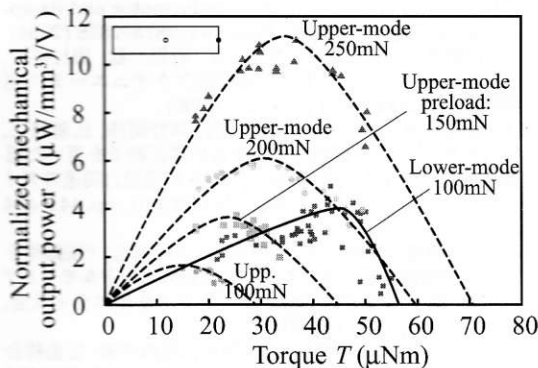
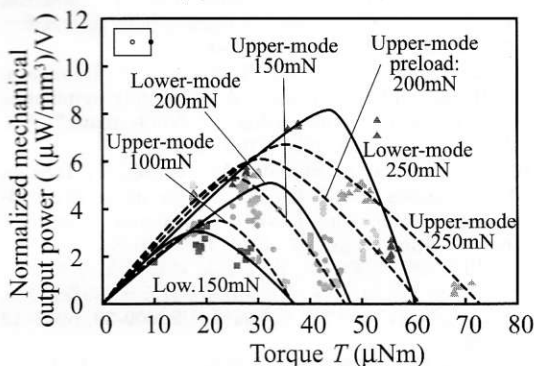
(a) $W/L=0.255$ (b) $W/L=0.85$

図-18 規格化機械出力

も二つの結合振動モードが存在する。図-17に示すようにステータ振動子単面にジルコニア球をはめ込み、中央部をピンで支持し、ロータに押し付け回転させる。モード選択で回転方向を変えることができる。

3.5.2 $W/L = 0.255$ 付近の形状の場合

機械的駆動点の振動振幅比に注目して振動子条件をFEMにより設計した。直径5mmのロータを用いた結果、良好な回転動作が確認されたが、回転速度は200rpm程度であった。図-18に振動子体積及び電圧で規格化された機械出力の測定結果を示す。同図(a)より、回転方向による特性に

著しい差があった。振動子辺比を調整して特性調整を試みたが条件がクリティカルであり、辺比による回転特性を近づけるのは容易でない。また両モードの周波数が近接して使用しにくい。

屈曲モードから生じるモードの結合係数が悪く、改善するために電極パターンを図-19に示すようにカギ形にすると両モードの結合係数が近づく。両モード間の周波数余裕が広がり、モード選択が容易になる。しかし、電極面積が半分近くになるため、高い駆動インピーダンスになる。

3.5.3 $W/L = 0.85$ 付近の形状の場合

$W/L = 0.85$ 付近は辺比による特性変動が緩やかな寸法条件である。全面電極使用でも結合係数が両モードでほぼ均等である。また、モード間の周波数間隔の余裕も十分であり、図-18(b)に示すようにモータ特性も広い予圧で左右回転特性が接近し、 $W/L = 0.255$ 形状よりも良好な結果が得られている。

4. 応 用 例

4.1 マイクロ・フライングロボット

高速回転型 USM により、図-20に示す世界最小のマイクロ・フライングロボット (μ FR-II) が実現されている [12, 13]。手の平よりも小さく、電池を含んだ重量は12.3gである。電源も含んでおり、無線で操縦する。災害時など人が入れない場所を探索する用途を想定している。図-21に示す薄型の超音波モータがロータ回転用に用いられており、矩形板の縦・屈曲の縮退振動モードを利用している [14]。約4,500rpm, 0.12mNm, 0.9W, 効率30%程度の性能を有している。

4.2 マイクロファン

薄型 USM を使用することにより、図-22に示すような CPU 冷却用マイクロファンが実現できる。ファン中央部の開口部が広くなり、風路を大

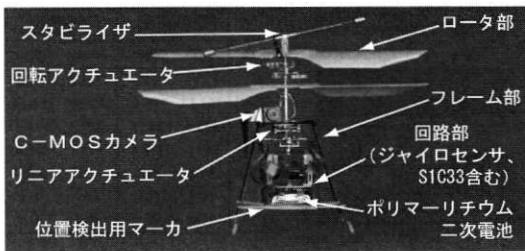


図-20 マイクロ・フライングロボット [12]

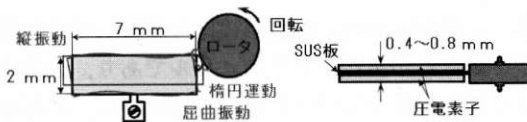


図-21 縦・屈曲振動縮退モード利用 USM [14]

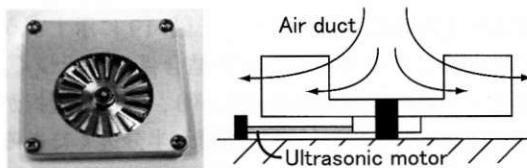


図-22 マイクロファンの試作例

きくすることができる。また、羽根をより適した形状に設計できる。同回転数において、代表的な市販品 (2003 年当時) の 2 倍の風量 (9,000 rpm, $0.03 \text{ m}^3/\text{mm}^3$) が得られている [3]。

5. おわりに

圧電セラミックスと圧電単結晶を用いた高速回転型超音波モータについて解説した。様々な形状が実現でき、積層化により低電圧化が容易に得られることを示した。通常の超音波モータと比較すると 1 桁以上早い回転特性が得られる。実用に際して、形状、駆動電圧に関する問題は少ないと考えられる。今後の耐摩耗性の向上が期待される。

謝 辞

本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金

(特定領域研究: No.438) (公募研究: 17040006, 19016001) の援助を受けた。

文 献

- [1] S. Ueha and Y. Tomikawa, *Ultrasonic Motors: Theory and Applications* (Clarendon Press, Oxford, 1993).
- [2] T. Sashida and T. Kenjo, *An Introduction to Ultrasonic Motors* (Clarendon Press, Oxford, 1993).
- [3] M. Aoyagi, F. Suzuki, Y. Tomikawa and I. Kano, "High-speed thin ultrasonic spindle motor and its application," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **43**, 2873-2878 (2004).
- [4] 川嶋伸明, 関 舞子, 青柳 学, 石黒 稔, 田村英樹, "L 字型結合振動子を用いた超音波アクチュエータ," 信学技報, US2006-46, pp. 17-22 (2006).
- [5] 青柳 学, 木村俊彦, 富川義朗, 高野剛浩, 広瀬精二, 田村英樹, "一つの振動片を有する円環振動子を用いた超音波スピンドルモータの構成," 第 18 回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム講演, No.B2A10, pp. 441-444 (2006).
- [6] 木村俊彦, 青柳 学, 富川義朗, 高野剛浩, "振動片を有する円環振動子を用いた薄型超音波スピンドルモータ," 2005 年電子情報通信学会基礎・境界ソサイエティ大会, No.A-11-2, p. 216 (2005).
- [7] 青柳 学, 富川義朗, "斜対称形圧電板の縦-屈曲結合振動子を利用した超音波モータ," 信学論 J78-C-I, 560-566 (1995).
- [8] 高野剛浩, 田村英樹, 富川義朗, 青柳 学, "積層圧電セラミックスを用いた斜対称形圧電振動子利用の超音波モータ," 音講論集, pp. 905-906 (2006).
- [9] H. Tamura, K. Kawai, T. Takano, Y. Tomikawa, S. Hirose and M. Aoyagi, "A diagonally symmetric form ultrasonic motor using a LiNbO_3 plate," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **46**, 4698-4703 (2007).
- [10] H. Tamura, K. Shibata, M. Aoyagi, T. Takano, Y. Tomikawa and S. Hirose, "Single phase drive ultrasonic motor using LiNbO_3 rectangular vibrator," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **47**, 4015-4020 (2008).
- [11] 田村英樹, 青柳 学, 山吉康弘, 高野剛浩, 広瀬精二, "モード結合型 LiNbO_3 単相駆動超音波モータの振動子辺比による特性について," 信学技報, US2009-39, pp. 7-12 (2009).
- [12] $\mu\text{FR-II}$ 公開飛行テスト資料, エプソン株式会社 (2004.8).
- [13] 野波健三, 宮沢 修, "世界最小・最軽量のマイクロフライングロボット," 機械学会誌, **108**(1042), 698-699 (2005).
- [14] 宮沢 修, 橋本泰治, 岩本 剛, "薄板で構成した超音波モータ," 2002 年度精密工学会春季大会学術講演会講演集, p. 430 (2002).