

超音波モータによる超高真空対応回転導入器

— 真空中での速度-負荷特性および真空特性 —

Ultra-high Vacuum compatible rotary feedthrough utilizing ultrasonic motor

— Speed-torque characteristics in vacuum condition and evacuation process —

高 橋 俊 一*・森 田 剛**・新 野 俊 樹*

Shunichi TAKAHASHI, Takeshi MORITA and Toshiki NIINO

はじめに

半導体技術やナノテクノロジーの進展に伴い、微細な構造の加工や観察への要求が高まっている。このような作業には超高真空が必要とされる場合が多いが、現在そのような超高真空に対応するメカトロニクス要素は少ない。超高真空中に試料ステージなどのメカトロニクス要素を導入しようとする、アウトガスやベーキング処理に耐えなくてはならない等の問題が生じる。さらに、真空を扱う加工や観察を行う機器には電子線やイオン線を用いるものが多く見られるため、電子線やイオン線の制御に影響を与える磁場の漏洩や磁性体の使用を制限する場合がある。以上のような条件を満たす超高真空中の動力源として超音波モータが注目されている^{1,2)}。超音波モータは高トルクで保持力を持ち、摩擦力によるダイレクトドライブであるため、ブレーキ機構を必要としない。また、金属ブロックと圧電素子からなる振動子と回転子、あるいはスライダから構成されるシンプルな構造である。以上に述べた構造上の特徴から、潤滑油を必要としない、電磁ノイズを発生しないなど真空中の動力源として多くの利点を持つ。

筆者らは、超音波モータの原理を利用して真空容器内で回転運動を発生する回転導入器を開発している。これまでに、真空中での無負荷運転に成功しているが、70 minと駆動時間は短く、さらに、大気中で測定した最大トルクは5.5 mNmと非常に弱かった³⁾。真空中で、長時間駆動しなかった原因は、振動子と回転子の凝着による駆動停止であった。十分なトルクが得られなかった原因は、振動子に励振される超音波振動の共振状態の分離などから振動のQ値が低く、駆動への影響を考慮して予圧は2.6 Nと低い値しか与えることができなかったことが挙げられる。超音波モータは摩擦駆動であるため、より大きなトルクを得るために

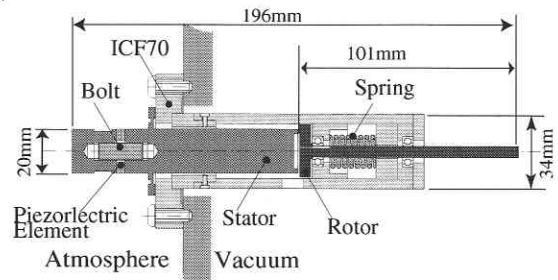
はより大きな予圧が必要である。

本報では、始めに振動子長さの調整を行うことで共振状態を改善し、予圧を高めた後、凝着防止のためにセラミックスや金属と比較して柔らかい真空用接着剤を、摩擦表面に被覆した回転子を用いて、以下の実験を行った。真空チャンバに回転導入器を取り付けた状態で、大気中と真空中での速度-負荷特性の測定。チャンバ全体を過熱するベーク処理を行うことで、回転導入器を真空チャンバに取り付けた状態で真空チャンバ内の最高到達真空度を向上させるとともに、ベーク処理後、回転導入器が正常に動作することを、無負荷の連続運転をすることで確認した。

1. 構 成

Fig. 1 (a) に試作した回転導入器の基本構造を示す。回転導入器は圧電素子によって振動を励振される振動子とその振動を受けて摩擦駆動する回転子によって構成される。振動子は真空容器に固定するための規格フランジ (ICF-70)

(a) Schematic cross sectional view



(b) Vibration mode

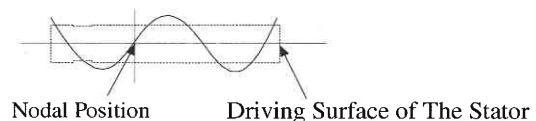


Fig. 1 Rotational feedthrough

*東京大学生産技術研究所 情報・システム部門

** EPFL (スイス連邦工科大学) / 理研

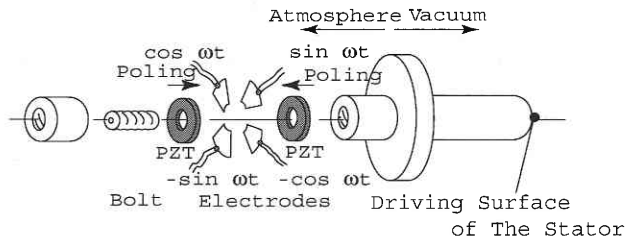


Fig. 2 Detailed schematic view of the stator

に溶接され、大気と真空は完全に隔離されている。振動子にはたわみモードを励起するが、溶接固定部分を定在波の節に一致させることにより (Fig. 1 (b)) 圧電素子より励起される振動を効率よく真空容器内部の回転子へと伝達できる。超音波モータの駆動原理としてはモード回転型を利用している⁴⁾。圧電素子を二枚用いて、それぞれに90°位相の異なる電圧を印加し (Fig. 2)、縦方向と横方向の定在波を励起する。そうすることで振動子がたわみ振動するとともに振動子の端面に周方向の進行波が励振されて、振動子端面に押し付けられた回転子が、摩擦駆動によって回転する仕組みである。なお、ハウジングと回転子出力軸の間にシールはなく、ハウジング内外部とも真空である。圧電素子及び電極と接続する導線を除くすべての構成部品はSUS 304で作製されている。圧電素子はハード系PZT (トーキン製, N-61) を用い、締め付けトルクは24.5 Nmとした。真空中では大気中に比べて物体表面の状態が著しく異なることから、摩擦状態も大気中と比べて変化する⁵⁾。特に金属材料に関して、真空中では金属表面に酸化膜が形成されないため、金属同士の摩擦による凝着が起りやすいと考えられる。そこで、真空中での振動子と回転子の凝着を防ぐため、回転子表面に真空用接着剤 (Torr Seal[®]) の塗布を施した。圧電素子が大気側に配置されることにより、素子や素子への給電線の塗布からのアウトガス及び給電線内の残存気体に注意を払う必要がなく、またベーク処理時にはこれらの素子はずすことができるため、高温でのベーク処理が可能であり、高い真空を実現できる可能性がある。また磁場の漏洩も少なく、磁性体も必要としないので電子線を使用する機器 (SEM, TEM等) に対しても問題なく実装することができる。

2. 実験及び結果

これまでの実験では、共振状態の分離から最大トルクは5.5 mNmと弱く、真空中の駆動も振動子と回転子の凝着から連続駆動時間は70 minと短かった。以下の実験では、始めに振動子長さを変化させることで共振状態の改善を目指し、その後、回転子摩擦表面材料を変更した上で、大気

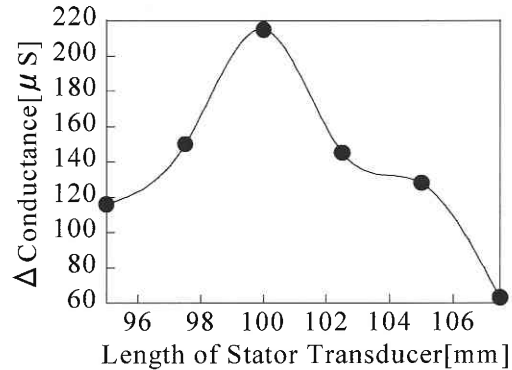


Fig. 3 Relationship between (Conductance and Length of Stator Transducer

中及び真空中での速度-負荷特性を測定した。更に、ベーク処理をすることによって最高到達真空度を高め、ベーク処理後にモータが長時間連続駆動可能であることを確かめた。

2.1 共振状態の調整

共振状態が分離する理由としては、振動子に励振される定在波の節が、振動子の固定点と一致していないことが推測される。本回転導入器は振動子上で2波長共振するように設計されているが、実機の製作過程で理論通りの共振状態が得られなくなってしまった可能性がある。そこで、共振状態を改善するために、振動子長さを変化させることで、定在波の節が振動子の固定点と一致するよう調整した。

共振周波数でのコンダクタンスの最大値と、非共振周波数でのコンダクタンスの値の差はQ値に比例するので、この値Δコンダクタンスが最大のときに定在波の節が固定点に一致するとみなせる。コンダクタンスはアドミッタンスの実数部分であり、振動子長さに対する値の変化がアドミッタンスよりもコンダクタンスの方が明確に現れたため、本実験では共振状態の優劣を決定する際の比較にΔコンダクタンスを用いた。

結果をFig. 3に示す。振動子長さが100 mmの時最もΔコンダクタンスが大きくなった。この振動子長さにおいて、共振状態が改善されているか確認するために、回転子と接触する振動子の端点で振動速度を入力周波数に対してプロットすることにより共振曲線を得た (Fig. 4)。振動子長さを最適化する前に比べて、共振点が1点のピークで得られ、振動速度も大きくなっていることから共振状態は改善されたといえる。以下の実験では、調整後の振動子を用いた。

2.2 速度-負荷特性

真空チャンバを大気開放した状態、真空に引いた状態それぞれで速度-負荷特性測定した。モータ出力軸 (直径

研究速報

5 mm) にナイロン線を介しておもり(分銅)を吊り下げ負荷をかけ、ICF 203のビューポートより出力軸に記したマークをビデオカメラで撮影し、VTR画像(1秒当り30フレーム)から回転速度を算出した。それぞれの荷重を測定するごとにICF 203フランジを取り外しておもりを交換したこと、おもり吊り下げのためにナイロン線を使用したことから、 10^{-6} Paオーダを超える高真空状態での測定は困難であると考え、 10^{-5} Paオーダ下での測定を目標とした。駆動条件は、入力電圧800 Vp-p、駆動周波数32.1 kHz、予圧11.7 N、真空度 $4(\pm 0.5) \times 10^{-5}$ Paである。今回は、共振状態が改善された結果11.7 Nの予圧をかけて駆動することが可能になった。振動子と回転子の固着や、超音波振動による跳ねを防止するため、摩擦表面材料として回転子表面に真空用接着剤(Torr Seal[®])を被覆した。測定結果をFig. 5に示す。大気中での最大トルクは34 mNm、最大回転速度は510 rpm。真空中での最大トルクは30 mNm、最大速度は480 rpmであった。これは、市販されている代表的な小型超音波モータUSR 30シリーズ(新生工業製:

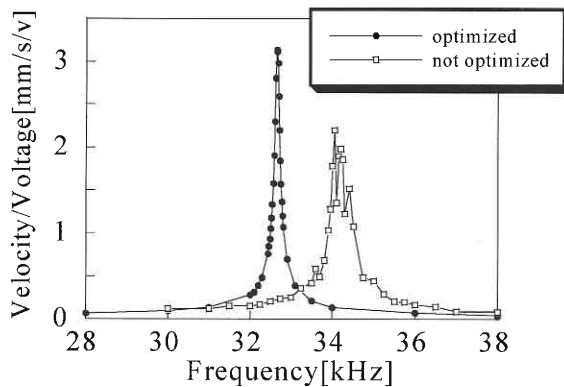


Fig. 4 Resonance curve

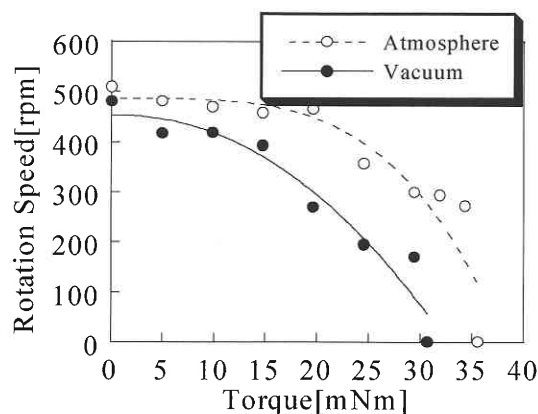


Fig. 5 Relationship between rotation speed and load torque in atmospheric condition and vacuum condition.

定格トルク 50 mNm, 定格回転速度 250 rpm, 振動子直径 30 mm, 重量 20 ~ 45 g) と比べて、振動子直径等を考慮すると、回転速度、トルクとも遜色のない出力が得られた。真空中では大気中より最大トルク、最大速度が減少し、各荷重に対する回転速度も真空中の方が大気中に比べて低い値となった。

真空中で回転導入器の駆動性能が低下したことについて考察する。真空中では大気中に比べて摩擦係数が大きくなることが知られている。よって、摩擦力により駆動する超音波モータは、真空中でトルク特性が向上することが予測されるが、実際には真空中でのトルク及び回転速度が大気中の結果に比べて低い値となってしまった。原因として考えられることは以下の点である。

1. 摩擦係数の増加による摩擦抵抗の増加にともない、回転子表面材料である真空用接着剤の剪断変形が大気中より大きくなると推測される。
2. 真空中では真空断熱状態と同じ状態で摩擦が起きることから、摺動部が大気中よりも高温になりやすく、熱によって剪断変形が容易に起こる可能性が考えられる。
3. 摩擦表面に被覆した材料は、ある程度の弾性を持たせる目的で、金属やセラミックスと比べて柔らかい樹脂系の材料である真空用接着剤を用いている。
4. 以上1.2.3より、真空状態での駆動は、摩擦表面材料の剪断変形が大気中よりも大きくなることによる、振動エネルギーの伝達損失の増加が、出力の低下を招いたと推測される。

2.3 真空特性

回転導入器を容積 35l の真空容器に固定し、排気および昇温脱ガス(ベーク処理)を行った。昇温に際して圧電素子及び端子部分はモータから取り外した。排気には400l/sのターボ分子ポンプを用い、100°C、48時間のベーク処理を行った(Fig. 6)最終的なチャンバ内圧力は 3.3×10^{-7} Paに到達した。排気終了後直ちに無負荷運転を開始し、24時間以上の連続運転に成功した。25時間を過ぎたあたりから断続的に滑りを生じるような音とともに定常回転しなくなったこと、それに伴いガス放出が増加したことから運転を停止した。回転速度については駆動停止までほぼ一定であったが、容器内の気圧は、駆動開始後短時間で 4×10^{-6} Paまで上昇した(Fig. 7)。その後、徐々に圧力は上昇し、 5×10^{-6} Paで安定した。今回の実験では駆動開始と同時に圧力が上昇し、ガスの放出が確認された。しかし、駆動を停止すると直ちに真空度が回復している(Fig. 8)。放出ガスは N_2 、 H_2 、 CO_2 、 H_2O の順に多く存在し、駆動開始後の C_xH_y の増加が少ないことから、塗布材料(真空対

応接着剤) 内の微小な気泡が摩耗により表面に露出することがガス放出の主原因であると考えた。真空中での駆動試験後回転子表面を観察したところ、茶褐色の摩耗粉がみられ、振動子との摩擦摺動面も茶褐色に変色していた。これらの変色は大気中の駆動試験では見られなかった現象であることから、摩擦面で大気中とは異なる摩擦状態が起きていたことが推測されるが、摩耗粉の成分や変色に伴う駆動特性への影響など、詳細な分析はこれからの課題である。

ま と め

振動子長さを調整することで共振状態が改善され、回転子にかけられる予圧が2.6 Nから11.7 Nにすることができた結果、大気中での最大トルクは5.5 mNmから34 mNmと大幅に向上させることができた。しかし、真空中での速度-負荷特性を測定した結果、大気中に比べ回転速度が低下した。その原因は、大気中に比べて真空中では摩擦係数が増加することや、摩擦熱の上昇に伴う回転子摩擦表面材料の剪断変形による、振動エネルギーの損失が出力の低下につながったと考えた。真空中での動特性改善には、剪断変形に強い材料の導入が考えられるが、真空中の摩擦状態をより詳しく検討する必要がある。

真空特性については、回転導入器を真空容器に固定した状態で 10^{-7} Paオーダの到達圧力を実現し、連続駆動時間もこれまでの70分から、24時間以上に延長することができた。その間、回転速度の低下はほとんど見られなかった。回転子塗布材料からのガス放出があったことは問題であるが、ベーク処理を経て、超高真空状態から本試作機が長時間の回転駆動が可能であることを確認できたことは有用な結果であった。ベーク処理に際して回転子表面に塗布した真空対応接着剤の耐熱性を考えて、 100°C までしかベーク温度を上げることができなかったことから、さらに真空度を上げるためには、回転子の耐熱性及び回転子摩擦表面材料からのアウトガスを抑制することが最も重要な点であると言える。

今後の課題としては、真空中で回転導入器の出力がなぜ低下したのかを裏付けるため、回転子表面の分析や真空中での振動状態の測定を行うこと。その結果を踏まえて、回転子もしくは回転子表面材料を変更することで、真空中での出力の向上、更に高い真空度の達成、長時間駆動の実現が挙げられる。また、モータの位置決め制御や、真空に対応した回転角速度センサの開発にも取り組む予定である。

(2002年3月14日受理)

参 考 文 献

- 1) S. Ueha and Y. Tomikawa: Ultrasonic Motors Theory and Applications, (Oxford University Press, 1993) p. 7.
- 2) T. Ishii, E. Matsuo, K. Nakamura and S. Ueha: J. Appl. Phys. 37 (1998) 2956-2959.
- 3) T. Morita, T. Niino: Technical Report of IEICE US 2000-57 (2000) 45-49 [in Japanese].
- 4) Kurosawa M., Nakamura K., Okamoto T. and Ueha S: IEEE Trans. UFFC 36 (5) (1989) 517-521.
- 5) G. Horikoshi: Shinku Gijutu. (University of Tokyo Press, 1994) 195-197 [in Japanese].

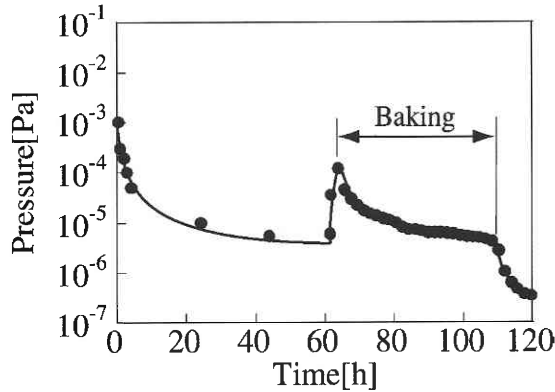


Fig. 6 Relationship between gas pressure and evacuation time

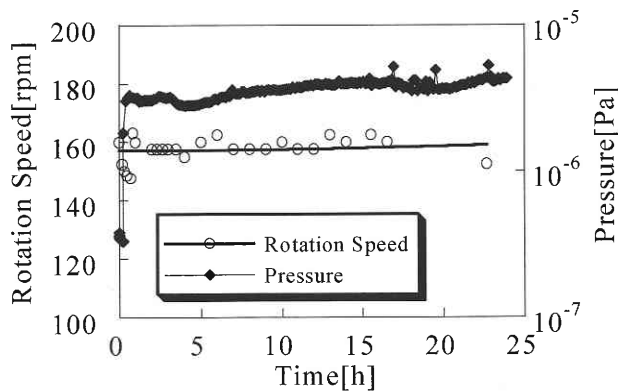


Fig. 7 Relationship between rotation speed, pressure and operating time

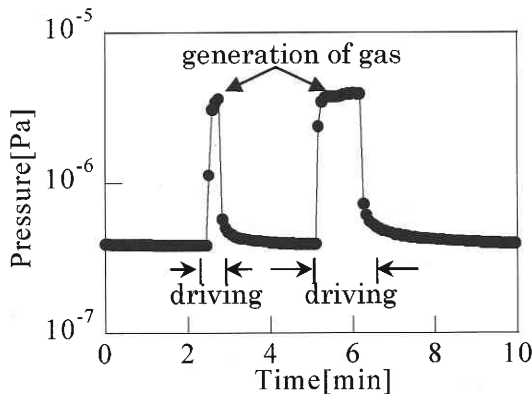


Fig. 8 Change of gas pressure when the rotational feedthrough operated