

超音波モータを用いた超高真空対応回転導入器

——摩擦駆動面の形状変更による駆動性能の向上——

Ultra-High Vacuum Compatible Rotary Feedthrough Using Ultrasonic Motor

—— Improvement of driving performance by geometric modification of stator-rotor interface ——

遠 藤 康 博*・新 野 俊 樹*

Yasuhiro ENDO and Toshiki NIINO

1. はじめに

近年、半導体技術などの進展に伴い、ナノメートルオーダーの微細な加工や観察に対する要求が高まっている。このような作業には超高真空環境が必要とされる場合が多く、超高真空に対応した機械要素が必要とされる。また、電子線やイオン線を用いる作業が多いために、電磁モータのような電子線やイオン線の制御に影響を与えるものは使用を制限される。以上の条件を満たす機械要素として、超音波モータ¹⁾が注目されている。超音波モータは、圧電素子で励振された振動子との摩擦力によって回転子を駆動するモータであり、低速で高トルク、プレーキレスで保持力を持つといった特徴がある。また、振動子や回転子などは金属の部品から構成されるため、電磁ノイズを発生せず、超高真空環境にも耐えるといった利点がある。

筆者らは、超音波モータを利用して、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、 $5 \times 10^5 \text{Pa}$ の高真空中で最大トルク 30 mNm^2 、 $1 \times 10^6 \text{Pa}$ の高真空中で24時間の連続駆動²⁾を実現した。本回転導入器は、電子線を用いる機器内での位置決めや把持をはじめ、超高真空環境を要求される機器や半導体プロセスでの汎用駆動源として需要を見込んでいる。よって、トルクや寿命はできるだけ大きく、長いことが好ましい。

本報では、これまで振動子と回転子の摩擦駆動面で生じていた滑り損失を抑制する摩擦駆動面形状を設計し、変更することで真空中でのトルク増大及び駆動時間の延長を目指した。

2. 回転導入器の構成と駆動原理

2.1 回転導入器の構成

本回転導入器の構成を図1に示す。回転導入器の基本部分は、圧電素子により励振される振動子と、その振動を受

けて回転運動する回転子によって構成される。振動子は、図1(a)に示すように真空容器に固定するための規格フランジ(ICF-70)に溶接され、大気と真空は完全に隔離されている。モータは、振動子に定在波を励振することで駆動力を発生させているが、図1(b)に示すように、定在波の節を振動子保持点としてフランジに溶接固定することで、振動子の保持と真空シールの機能を一体化する構造になっている。この構造によって、アウトガスの原因になるような圧電素子や導線などの振動発生源を大気中に配置することができ、かつ振動を損失なく真空中に伝えることができるのである。

2.2 超音波モータ駆動原理

本回転導入器で用いている超音波モータは、モード回転型超音波モータ³⁾である。圧電素子によって振動子に位相が90°ずれた定在波を励振し、振動子をたわみ運動させると、その端面に周方向の進行波が励振される。回転子を振動子端面に押し付けると、進行波を受けて摩擦力により

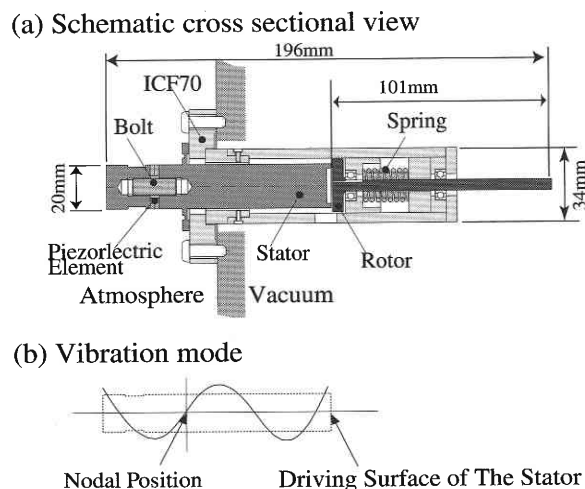


図1 回転導入器の構成
(a) 断面図 (b) 振動モード

*東京大学生産技術研究所 情報・システム部門

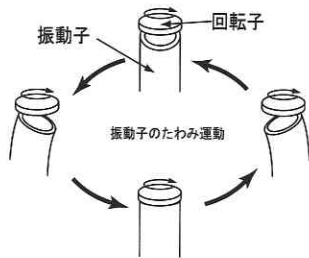


図2 モード回転

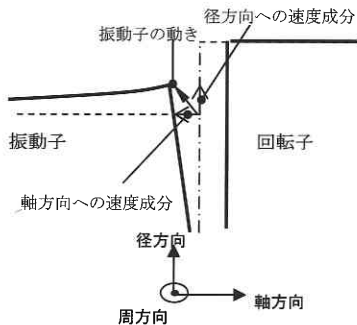


図3 振動子端面の運動

図2のような回転運動を行う。

駆動中、振動子は首振り運動になるため、図3に示すように端面のある1点は、回転子摩擦面に対して中心軸から径方向の速度成分を持つ。回転子は径方向に対しては拘束されているため、振動子による径方向の運動は滑り損失になる。この径方向の滑りを抑制する摩擦駆動面を設計し変更することで、トルクや寿命など回転導入器の駆動性能が向上すると考えられる。

3. 摩擦駆動面形状の変更

径方向の滑りを抑制する摩擦駆動面形状を設計するには、まず振動子端面上の任意の点の振動軌跡を計算する必要がある。その振動軌跡と直行する線の集合が、求める摩擦駆動面となる。

3.1 振動子端面の振動軌跡

振動子の保持点と中立軸の交点を原点として図4のような座標系を取る。長さℓの円筒型振動子が両端自由の境界条件のもとでたわみ振動をした場合、振動モードは

$$u(z) = C \left(\sin \frac{\lambda z}{2} \cosh \frac{\lambda z}{\ell} - \sinh \frac{\lambda z}{2} \cos \frac{\lambda z}{\ell} \right) \dots \dots \dots (1)$$

となる。ここで、Cは振幅によって決まる定数、λは振動モードの次数によって決まる定数である。

振動子端部の各点の変位は、中心軸から径方向の距離を r

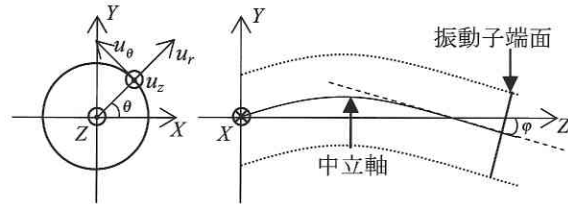


図4 振動子の座標系

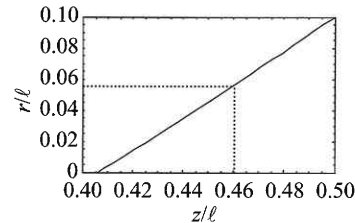


図5 滑りのない接触面のプロファイル

として

$$\mathbf{u} = (u(z) \cos(\omega t - \theta) \quad u(z) \sin(\omega t - \theta) - \frac{du(z)}{dz} r \cos(\omega t - \theta))^T \dots (2)$$

で表される。これらのベクトルは

$$\hat{\mathbf{n}} = \left(\frac{du(z)}{dz} \quad 0 \quad u(z) \right)^T \dots \dots \dots (3)$$

を法線とする平面状にあり、nと平行な方向には振動していないため、nと駆動方向であるu_0方向のベクトルが張る面が求める駆動面となる。滑りのない駆動面はrとzの関係式で表され、その微分方程式は

$$\frac{dr}{dz} = \frac{\hat{n}_r}{\hat{n}_z} = \frac{du}{u} \dots \dots \dots (4)$$

となり、解析的に解ける。ここでn_r, n_zはnのr, z成分である。本回転導入器の振動子寸法及び、定数λに2波長共振の場合の10.996を代入して上式を解くと図5となり、その傾きはほぼ1となる。以上から、本回転導入器において、滑りを起こさない振動子と回転子の接触駆動面形状は45°のテーパであることがわかった。

3.2 回転子及び振動子の加工

45°のテーパを付けた振動子と回転子を図6に示す。回転子はSUS 304で作製して、表面に摩擦材として動特性に実績のある²⁾真空対応接着剤 (Torr Seal[®]) を塗布し、0.2 mm厚になるようダイヤモンドカッターで切削加工した後、振動子のテーパと擦り合わせをすることで振動子と回転子のテーパ角を合わせている。

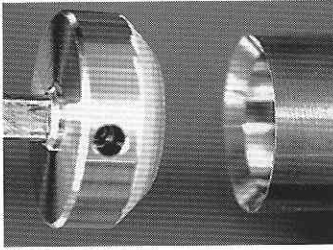


図6 テーパー付き回転子と振動子

4. 真空中での駆動試験と結果

滑りを抑制する 45° テーパー形の摩擦駆動面を用いて、高真空中で駆動性能の評価を行った。真空容器の排気過程において、100°C で 48 時間のバーク処理を行い、最終的に容器内圧力が 1.0×10^{-7} Pa に達した後、回転導入器のトルク特性試験と無負荷連続駆動試験を行った。

4.1 トルク特性試験

図7に、真空中での速度とトルクとの関係を形状変更前の平面形摩擦駆動面で行った試験結果と共に示す。駆動条件は、入力電圧：800 Vp-p、駆動周波数：32.2 kHz、与圧：11.7 Nとした。摩擦駆動面の形状を変更したことで、最大トルクが 30 mNm から 43 mNm へ 1.4 倍に増大した。また、負荷トルクに対する回転速度は全体的に低下した。駆動中の真空容器内圧力は、駆動面形状変更前と同等で 5×10^{-5} Pa であった。

くさびの面圧効果により、45° のテーパーを付けることで振動子と回転子の接触面の垂直抗力は $\sqrt{2}$ 倍になり、摩擦力が $\sqrt{2}$ 倍になる。得られた最大トルクは、テーパーを付ける前と比べて 1.4 倍であったことから、テーパーによる実効与圧の増加が、最大トルク増加の原因と考えられる。回転速度が全体的に低下したことについては、これも垂直抗力の増加が考えられる。これまでの実験でも予圧の増加による垂直抗力の増加で回転速度の低下が見られた⁴⁾。しかし、試験中に振動子の周方向への振動速度が 240 mm/s であるのに対し、回転子の周方向速度が 153 mm/s と周方向への滑りが見られた⁴⁾。この滑りはトルクに対する回転速度の低下に影響を与えられられるが、平面形摩擦駆動面における周方向の滑りに関するデータがないために、今回見られた周方向の滑りが全体的な回転速度低下に影響があるかどうかはわからなかった。この滑りを抑制するためには、与圧を増加するなどして振動子と回転子の摩擦力を大きくすることが考えられる。今後、与圧と回転速度・振動子振動速度の関係を考慮し、周方向の滑りを抑制する必要がある。

4.2 連続駆動試験

図8に連続駆動試験中の回転速度と真空容器内圧力を示

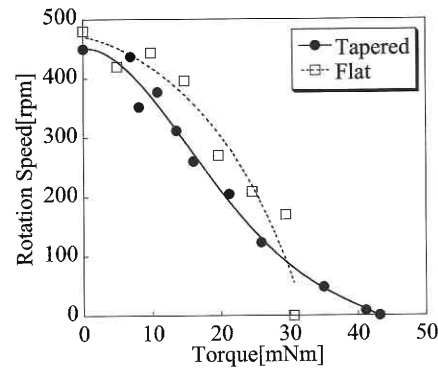


図7 真空中でのトルクと速度の関係

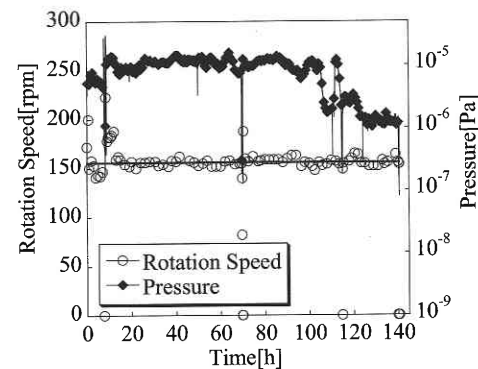


図8 回転速度と真空容器内圧力 (テーパー)

す。駆動条件は、入力電圧：250～500 Vp-p、駆動周波数：31.3～32.6 kHz、与圧：11.7 Nとした。図8中の真空容器内圧力で、瞬間的な圧力の低下が見られるが、これは回転導入器の一時的な停止によるものである。駆動開始 7.5 時間後と 69.5 時間後に、圧電素子と電極の破損による交換のため一時的に駆動を停止した。また、現在は駆動周波数を手で調整しているために、入力周波数と共振周波数のずれによって起こる数秒間の停止が試験中数度起こった。一時的な駆動停止を除いた完全な連続駆動で 37 時間、真空を維持した状態で 140 時間の駆動時間に成功した。140 時間過ぎから、摩擦駆動面の滑りと一時的な停止が時折起るようになり、連続駆動の延長が得られなくなったため駆動を停止した。変更前の摩擦駆動面で行った同様の連続試験の結果を図9に示すが、157 rpm で 24 時間の連続駆動と比較して、形状変更によって大きな成果が得られたことがわかる。ただし、圧電素子の破損や共振周波数のずれによる一時的な駆動停止を抑えることができれば、連続駆動時間はより延長するはずである。今後は、圧電素子や電極の長寿命化を図ったり、共振周波数を自動で追従する制御系を構築したりすることで連続駆動時間の増加を図る

研究速報

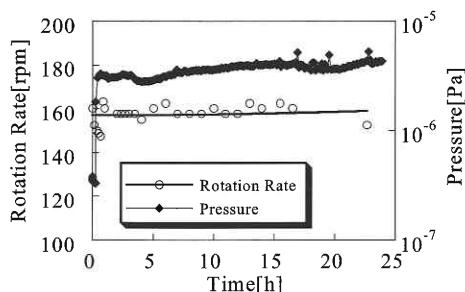


図9 回転速度と真空容器内圧力(平面)

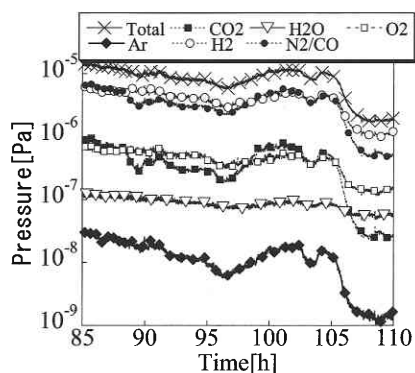


図10 全圧低下時の真空容器内分圧

必要がある。

真空容器内圧力は、100時間まで 1×10^{-5} Paと摩擦駆動面変更前の 5×10^{-6} Paと比べて高い値だった。しかし、100時間以降は圧力が下がり始め、停止前には 10^{-7} Paオーダでの駆動も見られた。図10に、圧力低下が見られた100時間前後の真空容器内の分圧を示す。H₂Oの分圧は変化がないが、それ以外のN₂やH₂、O₂などの分圧の低下に伴って、全圧が低下していることがわかる。駆動中のアウトガスは、大きく分けて回転導入器の発熱に起因する⁵⁾ものと振動子と回転子の摩擦に起因する⁵⁾ものがある。H₂Oは、圧電素子の発熱によって回転導入器の温度が上昇し、真空容器内壁や回転導入器に付着している水分がガスとして放出されると考えられる。よって、圧力低下時も、圧電素子周辺温度が一定であったために、H₂Oは全圧に関係なく一定であった。N₂やO₂などH₂O以外のガスは、回転子に塗布した摩擦材に内包されている気泡が回転子との摩擦によって露出することが原因と考えてきた。そのため、通常摩擦に起因するガスは回転速度に支配されるのだが、図10中で圧力が低下した時間帯の回転速度は安定していた。よって、この圧力低下は、摩擦駆動面の摩擦材になんらかの変化が生じたために起こったのではないかと考えられる。また、図10中の各分圧は大気の組成と異なり、そ

の変化の推移は必ずしも一定でなく、H₂とO₂、N₂/COとCO₂がそれぞれ連動して変化していることがわかる。希ガスのArは気泡の露出が原因であると考えられるが、その他のガスには気泡露出以外の発生原因があることが考えられる。気泡露出以外のアウトガスの原因としては、例えば摩擦材の炭化といった化学的なものが考えられるが、現在のところその要因を特定するものはなく、今後摩擦面や試験後に出た黒色の磨耗粉などの分析によって説明する必要がある。

5. ま と め

本報では、振動子端面における振動軌跡を求めることによって、径方向の滑り損失を抑制する摩擦駆動面形状を設計した。本回転導入器において、滑りを抑制する摩擦駆動面形状は45°のテーパ形であることがわかり、真空中でトルク特性試験と無負荷連続駆動試験を行ったところ、得られたことは以下のとおりである。

- テーパのくさび面圧効果による実効与圧の増加によって、高真空中で従来の1.4倍の最大トルク43 mNmが得られた。
- 高真空中で、140時間の駆動時間を達成し、形状変更による駆動性能の向上が得られた。
- 周方向に滑りが生じていることがわかり、今後与圧と回転速度の関係を検討する必要がある。
- 長時間の駆動により摩擦面の状態が変化し、アウトガスが大幅に減少したことから、超高真空での駆動の可能性が示された。
- 熱や摩擦材内気泡の露出以外にも何らかの摩擦起因のガスが発生することがわかり、その原因を調べる必要がある。
- 駆動時間の増加によって、圧電素子の寿命延長や最適な駆動入力自動制御を図る必要性が大きくなった。

(2003年9月22日受理)

参 考 文 献

- 1) Takeshi Morita, Toshiki Niino, Hajime Asama, Vacuum, Vol. 65, Issue 1, pp. 85-90, (2002)
- 2) 高橋俊一, 森田剛, 新野俊樹: 第14回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp. 525-528(2002)
- 3) Kurosawa M, Nakamura K, Okamoto T and Ueha S: IEEE Trans. UFFC, 36, 5, pp. 517-521 (1989)
- 4) 高橋俊一, 森田剛, 新野俊樹: 2001年度精密工学会秋季大会講演論文集, p. 578 (2001)
- 5) 遠藤康博, 高橋俊一, 森田剛, 浅間一, 新野俊樹: 第15回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp. 557-562 (2003)