

超音波振動子を利用した超高真空対応回転導入機の試作

Rotational feedthrough using ultrasonic vibration transducer for ultra-high vacuum condition

森田 剛**・新野 俊樹*

Takeshi MORITA and Toshiki NIINO

1. 緒 言

エネルギー分散型 X 線分析装置 (EPMA) や電子顕微鏡 (SEM) をはじめとする材料計測装置には真空環境が不可欠であり、真空を高めることによりその測定分解能を高めることが望まれている。真空環境はクリーンな環境であるために計測に適しているが、試料ステージなどのメカトロニクス要素を導入することは、アウトガスが問題となる上にベーク処理に耐えなくてはならないために困難である。さらに、電子線やイオン線を曲げてしまう電磁ノイズは抑さえなくてはならない為、電磁アクチュエータの使用は避けたい。

一方、超音波モータは高トルクで保持力を持つためにダイレクトドライブが可能である上、ブレーキを必要としない。また、金属ブロックと圧電素子からなる振動子とロータ、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。さらに潤滑油を必要としない、電磁ノイズを発生しない等の利点から、超音波モータは真空対応に適した駆動源であると言われている¹⁾。しかし実験結果はほとんどなく、唯一、石井らが真空中での超音波モータの駆動実験について報告している²⁾だけである。彼らは、複合振動子型超音波モータ全体を真空環境に入れているために、真空度は 10^2 [Pa] のレベルであった。圧電素子や配線からのアウトガスが問題となり、超高真空を実現することは難しいと思われる。

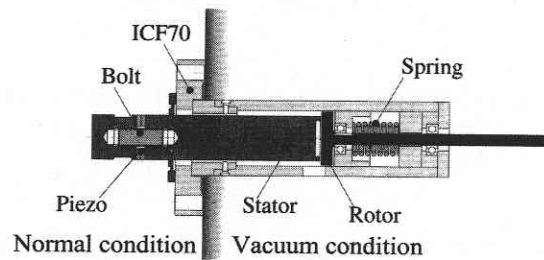
そこで、本研究では、超音波モータを超高真空回転導入器としてとらえて駆動することを試みた。大気中で発生させた超音波振動エネルギーは金属ブロックを介して伝搬して真空チャンバ内で回転駆動の原動力として用いられる。本報告では、その駆動原理の説明の後、駆動実験と得られた結果について述べる。この研究を進めることで真空中で

の摩擦面材料の検討を行えば、真空対応ステージへの応用以外にも宇宙環境で超音波モータを開発する際に役立つはずである。

2. 構 成

超高真空環境内での駆動を実現させるためには、アウトガスを発生させないこととベーク処理に耐えうることが必

(a) Structure



(b) Vibration mode

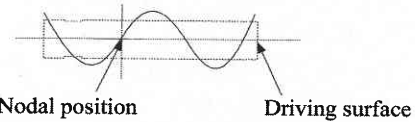


Fig. 1 (a) Structure of rotational feedthrough and (b) vibration mode

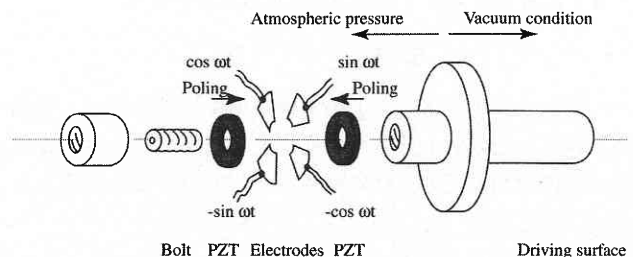


Fig. 2 Bolted Langevin transducer

*東京大学生産技術研究所 情報・システム大部門

**理化学研究所 工学基盤研究部

須である。超音波モータの構成部品の中で、問題となるのが圧電素子及び電極部である。ロータを含む駆動部を真空容器内に、圧電素子による超音波発生部分を大気中に配置した。従って、真空環境内は、金属と摩擦駆動面に溶射したアルミナのみであるためにアウトガスの発生を抑えることができると考えた。振動子はボルト締めランジュバン型とし、圧電素子及び電極部分はボルトにより容易に脱着が可能である。よって、バーク処理の際には圧電素子を取り外せばよい。

駆動原理はモード回転型超音波モータと全く同じである。回転導入器の構造と励振たわみ振動モードを Fig. 1 に示す。圧電素子と電極を除く部品は全て SUS 304 で製作した。ただし、真空中での駆動によって凝着してしまうことを防ぐため、ロータの駆動面には厚さ 0.5 [mm] 厚のアルミナ溶射をしてある。振動部分の直径は 20 [mm]、長さは 95 [mm] で励振振動の節となる面が真空チャンバに取り付けるフランジ (ICF 70) に溶接してある。従って、真空領域と大気領域は完全にシールされている。出力軸を含む全体の長さは 196 [mm] で、直径 34 [mm] の円筒ハウジング内部においてロータ (直径 27 [mm]) がスプリングで押さえつけられている。圧電素子はトーキン製のハード系 PZT (N 61) で外径 20 [mm]、内径 12 [mm]、厚さ 2 [mm] で厚み方向に分極処理されている。これを 2 枚、分極方向が対向するようにして 4 分割された駆動電極を挟み、250 [kgfcm] でボルト締めした、いわゆるボルト締めランジュバン振動子がステータ振動子である。Fig. 2 に示すように、4 電極のうち向かい合う 2 電極に位相の反転した交流電圧を入力することにより、たわみ振動を励振させる。振動モードは 2 波長共振とした。この場合、振動の節となる面が 4 つ存在し、その内のひとつを固定面とする必要がある。この固定面を真空用フランジとすることを特徴としている。また、圧電素子による発生力を有効に利用するために、振動の腹の部分に圧電素子を配置した。

残りの 2 電極に入力する電圧位相差を 90 度、もしくは 90 度とすることにより、モードの縮退してモード回転を行うので、振動子の端面には周方向に進行波が励振される。この端面に平滑なロータを押さえつけることにより、進行波とは逆方向の摩擦力により回転駆動させるのが駆動原理である。各電極間に入力される電圧位相差を反転させることにより、ロータの駆動方向も逆転させることができる。

3. 実験及び結果

3.1 振動特性及び力係数の計測

超音波モータは多くの場合、圧電逆効果によって電気エネルギーを機械振動エネルギーに変換する。その変換効率

を示す指標が力係数であり、この値が大きいほどパワフルな駆動が可能となる。圧電素子の場合、力係数は①駆動部を固定した場合、つまり振動振幅を 0 とした場合の駆動点での発生力を入力電圧で除するか、②共振周波数において、出力端を開放したときの動電流を振動速度で除することにより計測ができる。圧電素子は基本的にコンデンサであるために、入力電流はコンデンサに流れ込む分と機械振動駆動源として流れる分に分けて考えることができる。ここで、前者の電流を制動電流、後者を動電流と呼ぶ。制動電流は共振点から離れた周波数での電流を計測すればあまり、一方、動電流は振動振幅に比例するので共振周波数付近で最大値を示す。

ここでは、上記の②により力係数を計測した。4 つある電極のうち一つに電圧を入力し、他を開放した。ロータ及び、ハウジングははずした状態で計測している。圧電素子への入力電圧は常に 20 [V_{p-p}] となるようにし、圧電素子と直列に接続した抵抗 1 [kΩ] の抵抗間の電圧から電流値を求めた。このときに励振される振動速度を測定するために、レーザドップラ速度計のレーザを振動子の駆動面の極近辺側面部に照射した。結果を Fig. 3 に示す。共振周波数は 34 [kHz] であり、インピーダンスアナライザ (HP 4194 A) による計測結果と一致している。振動速度の結果から振動モードが分離していることが伺え、Q 値の計測はできない。このときの最大振動振幅は 22 [mm_{p-p}/s] で、制動電流を 3 [mA] として計算すると、力係数は 0.175 [N/V] が得られる。この値は、直径 30 [mm] のボルト締めたわみ振動子について、小池らの報告している結果³⁾ と比べて遜色のないものであり超音波モータとして駆動するのに十分である。変換される発生力は、ロータを回転させる力だけに用いられるわけではなく、予圧に抗してロータを押し上げる力にも用いられるために、どれだけ

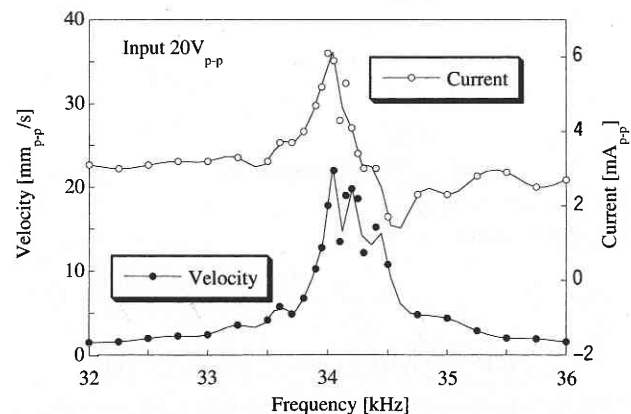


Fig. 3 Vibration velocity and current versus driving frequency

研究速報

のトルクが得られるのかは一概には言えない。発生力の半分がトルクに変換されると仮定すると、800 [V_{p-p}] の入力電圧のとき最大トルクは360 [mNm] となる。ただし、この値は今後振動系を改良し、Q値を十分に大きくできた場合の値である。振動振幅に関しては、振動速度を積分することにより求まる。実験結果から1 [V_{p-p}] あたり0.01 [um_{p-p}] の振幅となり、100 [V_{p-p}] 程度でも1 [um_{p-p}] が得られるので十分である。

3.2 大気中での負荷速度曲線

モータ出力軸に負荷をつり下げ、これを持ち上げるとき速度を計測することにより計測した速度と負荷の関係を図4に示す。駆動条件は、電圧800 [V_{p-p}]、駆動周波数は33.4 [kHz] である。予圧は2.6 [N] であるので、摩擦係数を1として限界最大トルクを計算すると26 [mNm]

である。実測による最大トルクは5.5 [Nm]、最大速度は400 [rpm] であった。駆動周波数が振動速度計測時の共振周波数と異なるのは、ロータの予圧による境界条件の変化に起因する。通常、超音波モータの速度負荷特性は垂下特性となるが、実験結果では5 [mNm] の付近で急に回転が停止している。これは、振動子の発生力に対して、予圧が十分ではなくロータとステータが滑っているためである。力係数から計算される発生トルクとの違いは予圧が不十分であることと、振動のQ値が小さいことが主原因と思われる。予圧を大きくすれば、より大きな発生トルクを示すことが可能であるが、本研究の目的はまず真空中でロータを回転駆動させて、その特性を評価することである。後で示されるように、現状ではロータにあまり大きな予圧をかけてしまうと、駆動に悪影響を及ぼすので、今回の予圧はこの値に止めている。なお、各電極に印加する入力電圧の位相差を90度から-90度に変更することにより回転方向を逆転することを確認した。

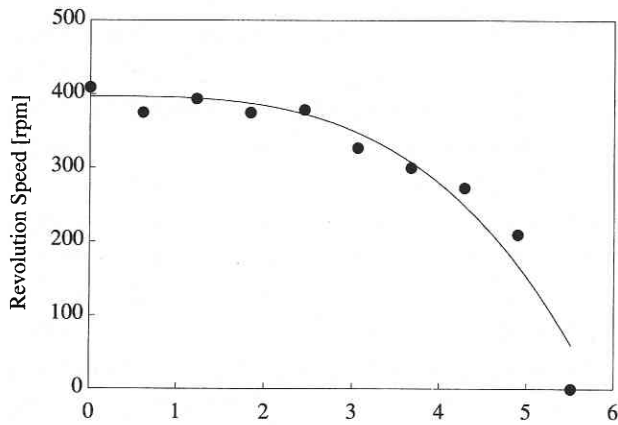


Fig. 4 Relationship between revolution speed and load in normal pressure condition

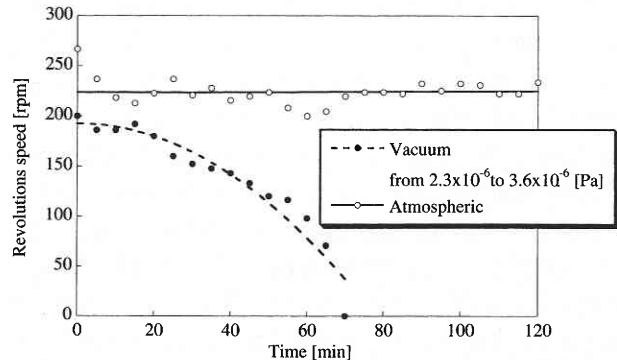


Fig. 6 Change of revolution speed versus operating time in vacuum and normal condition

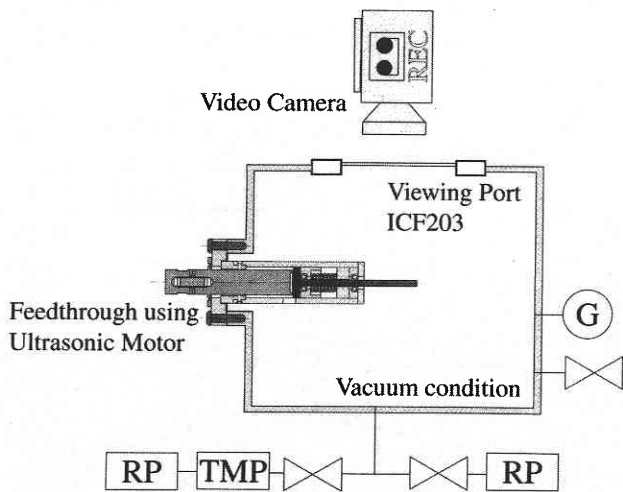


Fig. 5 Experimental setup for operation of rotational feedthrough using ultrasonic motor

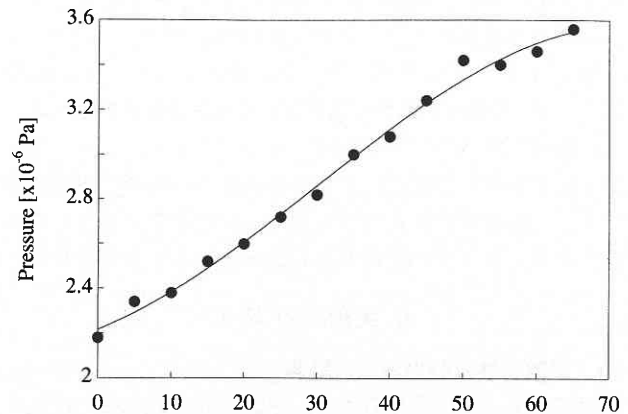


Fig. 7 Relationship between pressure and operation time

3.3 真空中での駆動実験

大気中で駆動が可能であることがわかったので、真空中での駆動実験を行った。Fig. 5に示すように、真空ポンプは粗引き用にロータリーポンプ、本引き用にターボ分子ポンプを用いている。真空引きに際して、今回の実験ではベーク処理は行っていない。また、超高真空対応の回転エンコーダが現状では手に入らなかったため、ビューポート(ICF 203)からビデオ撮影を行い、出力軸につけた印をもとに回転数を測定した。大気中でも同様の測定を行っている。測定に先立ち、ロータは新しいものとし、ステータ駆動面は# 2000で研磨を行っている。大気中と真空中での駆動時間と速度変化の結果をFig. 6に示す。Fig. 4で大気中での無負荷速度が400 [rpm]であるのに対して、Fig. 6に示す大気中での回転速度が250 [rpm]付近であるのは、真空チャンバ取り付けにより振動モードが若干変化したことと、ロータの個体差によるものと思われるが詳細は不明である。いずれにせよ、この結果から大気中での駆動では、回転数の変化はほとんどないのに対して、真空中では約70分後に回転が止まってしまっていることがわかる。回転駆動ができなくなった後に、駆動周波数を少し変化させることによって、若干の回転が確認されたが、しばらくするとやはり止まってしまった。

これは、摩擦駆動面において、振動子の表面が削れてロータ側のアルミナ表面に固着し、振動子駆動表面とロータとが凝着してしまった結果であると考えられる。大気中では、振動子表面が削れてしまっても、すぐに酸化膜が形成されるために、このような現象は見られない。回転数の変化と共にイオニックゲージ(LEYBOLD IM 520)により、駆動による真空度の変化を測定した。その結果をFig. 7に示す。この結果から駆動に伴い真空度が 2.2×10^{-6} [Pa]から 3.6×10^{-6} [Pa]と悪くなっていることがわかる。ロータの駆動面はアルミナ溶射が施してあるが、これはポーラスであり、ステータと擦れることによりアウトガスが生じた結果真空度が悪くなったと思われる。他の原因としては、ステータ振動子に含まれていたガスがたわみ振動を励振されることにより外部に出てきたということが考えられるが、これはベーク処理を行えば防ぐことができる。

4. 結 言

2波長共振のボルト締めランジュバンたわみ振動子を製作し、モード回転型超音波モータと同様の原理で回転導入器として駆動させることができた。節の位置をフランジとして振動子を溶接固定したので真空がリークすることはない。また、圧電素子を大気中に配置することにより、圧電素子からのアウトガスを防止することができる。また、ボルトにより圧電素子の脱着が可能であるので、ベークも容易にできる。

この回転導入器を用いて、真空中での回転駆動を行った。大気中の速度負荷特性から、最大速度400 [rpm]、5.5 [mNm]の最大トルクを測定した。真空中での駆動実験では 10^{-6} [Pa]という従来の研究結果に比べて4乗高い真空度での駆動に成功した。今回の実験ではベーク処理をしていないが、今後ベーク処理を行うことで、より高い真空度の駆動実験が可能となる。しかし、今回の実験結果から、回転駆動が70分で停止してしまうことと、真空度が駆動により悪くなってしまうことが明らかとなった。これは、摩擦駆動面をSUS 304とアルミナという組み合わせにしたために、ステータ側で摩耗が起こり削りかすがアルミナ内部に入り込んだ結果、凝着してしまったと考えられる。また、真空度に関しては励振により振動子からアウトガスが発生したとも考えられるが、ロータの摩擦駆動面に溶射したアルミナがポーラスであるために、内部のガスが駆動時に出てしまったことが主因であると思われる。今後は、摩擦駆動面の材質を検討し、より高い真空度での駆動実験をしていく予定である。また、超高真空に対応した回転角度センサの開発も行っていきたい。

(2000年7月5日受理)

参 考 文 献

- 1) S. Ueha and Y. Tomikawa, *Ultrasonic Motors Theory and Applications*, OXFORD SCIENCE PUBLICATIONS, (1993) p. 7.
- 2) Takaaki Ishii, Eiichi Matsuo, Kentaro Nakamura and Sadayuki Ueha, *Characteristics of Ultrasonic Motors Driven in Vacuum*, J. J. Appl. Phys. Vol. 37, (1998), pp. 2956-2959.
- 3) Yoshikazu Koike, Takeshi Tamura and Sadayuki Ueha, *Electrical Equivalent Circuit of Loaded Thick Langevin Flexural Transducer*, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 36 Part. 1 No. 5 B (1997) pp. 3121-3125.