超音波モータとピエゾ駆動機構を用いた SEM 用試料ホルダ*

初沢 毅**

Key words: ultrasonic motor, piezodriven spindle, specimen holder, rotary table, inchworm mechanism, traveling wave, piezoelectric element

1. はじめに

走査型電子顕微鏡 (SEM) 真空試料室内で試料の姿勢を調整するには、通常マイクロメータを用いた手動マニピュレータが使用されているが、ロッドなどの機械結合部分があるため室内での移動が制限をうける。筆者らのグループは SEM をベースとした IC パターンなどの絶対測定装置を開発中であり¹⁾、外部からの機械的な結合が無く、試料室内に自由に設置可能で角度分解能 1° 程度をもつ試料姿勢変化機構が必要になった。特に試料を保持しティルトを調整する ϕ 軸、水平面内の回転を行う θ 軸の機構については、電子ビームの直下に置かれるため、軸の駆動源として既存のモータなど磁気を帯びた機器を使用することができない。これは漏洩磁束が電子ビームを偏向し、観測データに悪影響を及ぼすからである。そこで磁気を用いないアクチュエータとして圧電セラミックスに着目し、 ϕ 軸については積層ピエゾ素子を用いた回転型インチウォーム機構を開発、また θ 軸には超音波モータを応用することにより、上記の要求を満足する試料ホルダを製作した。

2. ϕ 軸駆動機構

図 1 は ϕ 軸駆動機構の構成で、試料を載せるための切欠きを持つスピンドルと、これに対して対称に配置された 2 組のアクチュエータユニット

トから成っている。1つのユニットはスピンドルに対して上下動し、スピンドルの回転を拘束する (クランプ動作) とともに前後にも動く (フィード動作) ことができるように、ピエゾ素子とてこ機構を組み合わせてある。ピエゾ素子は積層型のもので、150 V かけたとき図中の長い方は $16\mu\text{m}$ 、短い方は $7\mu\text{m}$ 程度伸縮する。この伸縮量をそのまま本機構に用いると、スピンドル-クランプ部分の部品の工作精度が非常に厳しくなると同時に、フィード量が小さくなり回転が遅くなるので、板ばねによるてこ機構により変位を拡大している。拡大量はフィード側が約 5 倍、クランプ側が 1.6 倍程度である。

スピンドルの回転は、(1) 一方のユニットのクランプ状態を解除し、他方をスピンドルに接触させる、(2) 接触側のユニットを前進すると摩擦によりスピンドルが回転する、(3) 現状を維持するため他方をクランプ状態にするとともに、送り動作をしたユニットのクランプを解除する、(4) クランプしたユニットを前進す

図1 ピエゾ駆動機構の概略図

* 原稿受付 昭和62年1月25日

** 計量研究所 (茨城県新治郡桜村梅園 1-1-4)

ると同時にもう一方を後退させる，という4つのシーケンスの繰返しにより行われる。回転の向きを変えるにはアクチュエータを前後するタイミングをクランプのタイミングに対して反転すればよい。

この機構による1ステップ当たりのフィード動作平均送り量は，駆動電圧150Vのとき40 μ mであり，スピンドル直径が6mmなので回転角度では7.6''に相当する。最高回転速度は，ドライブ周波数48Hzのとき38.3''/秒（1回転当たり9.4''）であり，これ以上になるとこの部分の機械的な応答速度やスピンドルとの接触部分のスリップロスが増大し，回転速度は頭打ち傾向になる。スピンドルの位置決めは，ロータリーエンコーダによる位置検出を用いてNC仕様になっており，位置決め角度分解能は0.9°（1/400回転）が得られている²⁾³⁾。

3. θ 軸回転テーブル

θ 軸回転テーブルの駆動要素として要求される仕様は，前述した磁気を用いない条件のほかには試料室のスペース的な制約から極力薄型形状のものが必要になった。そこで指田により開発された超音波モータの一種である回転型表面波モータ⁴⁾の採用を検討し，同モータの速度制御特性を調べ，位置決め制御に最適な制御パラメータを決定するとともに，分解能5.4'（1/4000回転）の位置決め制御系が構成できることを確認した^{5)~7)}。

このモータは，環状のピエゾ素子により励振されるステータとダイヤフラム状のロータからなる。ロータは加圧力調整ナットにより中心部を固定されるとともに適当な圧力でステータに圧接され，図2に示したようにステータ上に発生した進行波に対し波乗りをするようにして回転する。ステータの裏側にはピエゾ振動子がエポキシ系接着剤で貼り付けられており，2相の高周波電圧， $\cos \omega t$ および $\sin \omega t$ を印加する。それぞれの励振により位相の異なる2つの定在波がステータ上に生じ，この重ね合わせにより進行波が発生する。このような進行波発生メカニズムをモデル化し，超音波モータの回転速度を制御するためのパラメータには

図2 超音波モータの駆動原理図

どのようなものがあるかを理論的に検討した結果，2つの励振源の振幅比 B/A ，位相差 ϕ ，励振周波数 f ($=\omega/2\pi$) の3つのパラメータで制御できるということがわかった。これをもとに実験系を構成し一つ一つのパラメータについて特性を調査した結果から，回転テーブル駆動の制御を行うパラメータとして，スロースタートが可能な励振周波数可変方式を用いるのが適当であることが明らかになった^{5)~7)}。

超音波モータを用いた θ 軸位置決め制御系は，ロータリーエンコーダによる回転角度検出を用いた一般的な構成である。コントローラとして8087数値演算プロセッサ付きのPC9801を用い，パラレルI/Oポートにより入出力を行っている。制御には一般的な比例制御を用いたが，回転テーブルへの使用が目的なので，急な加速を避けるため，スタートからある時間内だけ等加速を行うことができるようにスロースタートルーチンを組み込んだ。なおサンプリングタイムは10ms，1サンプリング当たりの制御プログラムのオーバーヘッドは約120 μ sである。

超音波モータとピエゾ駆動機構の位置決めは同一のソフトウェアで行っており，ドライブ部分のみをソフトウェアの仕様に合わせて作成している。

4. 全体の構成

本ホルダは真空中で使用するためほとんどの部材にSUS材を用いている。そのほかの部分も接着剤からはんだ，電線に至るまですべてアウトガスが少なく，かつある程度の温度のベーキングに耐える部材を吟味して使用している。これはSEM使用時に測定試料表面に付着するカーボンなどによる汚染を低減するのが主たる目的であるが，一般真空用機器に関しても清浄な環境を保障するために非常に重要な検討事項である。

図3に本ホルダの組立図を示す。底部に超音波モータを配置し，ここからシャフトを立ち上げ，ピエゾ駆動機構が装備されている回転テーブルに結合されている。超音波モータのロータ上にはエンブラ製の平衡車が固定されており，側方に設置されたロータリーエンコーダの軸を駆動し，位置情報を与えるようになっている。シャフトを支えているベアリングには，真空用に銀のイオンプレーティングが施されたものを用いた。

超音波モータと回転テーブルの間には，テーブル上のピエゾ素子に電力を供給すると同時に ϕ 軸のロータリーエンコーダの信号を伝送するための10極のスリップリングが設けられている。このスリップリングの円板は快削性のセラミックス板により製作されてお

図3 試料ホルダの組立図

図4 製作中の試料ホルダの写真

り、電極部分は金めっきされた銅合金を使用している。ロータリーエンコーダは ϕ , θ 軸とも 1 回転当たり 300 パルスのものを用いているが、市販のものから目盛板だけ取り出し、ケーシングはステンレスで作直してある。

摩擦部分の摩耗については、超音波モータはしゅう動面にポリイミドアミドがコーティングされており、まず問題はないと考えられる。またピエゾ駆動機構については、スピンドルと接触するシェーの部分を取換え可能なチップ状に製作してあり、適宜交換することにより対処することになっている。

現在までのところ、空気中の動作についてはすべて良好であることを確認しており、テスト用真空チェンバの完成を待って本格的な性能試験に入る予定である。 ϕ , θ 軸とも摩擦を駆動源としたものであるが、真空中では摩擦は増大方向に働くので所期の性能を発揮してくれるものと確信している。

5. おわりに

SEM 真空試料室で使用する試料姿勢制御機構について述べた。このような装置の製作においては、環境を汚染しない材料の選定作業がかなりのウェイトを占め、日常当然のように使用している電子部品や機械材料が使えず、思わぬ苦勞をすることが多い。最近ではさまざまな新材料が出回っており、これらを用いて一層の性能向上を図っていきたい。

参考文献

- 1) 豊田幸司ほか：微細形状のナノメートル計測技術，計測と制御，**25**，5 (1986) 417.
- 2) T. Hatsuzawa et al.: Piezodriven Spindle for a Specimen Holder in the Vacuum Chamber of a Scanning Electron Microscope, Rev. Sci. Instrum., **57**, 12, (1986) 3110.
- 3) 初沢 毅ほか：回転型表面進行波モータの速度制御特性と位置決め制御，第 25 回計測自動制御学会学術講演会予稿集，JS 53-2 (1986) 581.
- 4) 指田年生：超音波モータ，応用物理，**54**，6 (1985) 589.
- 5) 初沢 毅ほか：ピエゾ駆動機構を用いた試料ホルダー，第 47 回応用物理学会学術講演会講演予稿集，28 a-Y-6, 35 (1986).
- 6) T. Hatsuzawa et al.: Speed Control Characteristics and Digital Servosystem of a Circular Traveling Wave Motor, Rev. Sci. Instrum., **57**, 11, (1986) 2886.
- 7) 初沢 毅：超音波モータの位置決め制御系，計測技術，**15**，2 (1987) 35.