

# 圧電素子の急速変形を利用した精密位置決め機構

Precise Positioner Utilizing Rapid Deformations of a Piezoelectric Element

樋口俊郎\*・渡辺正浩\*・工藤謙一\*

Tosiro HIGUCHI, Masahiro WATANABE and Kenichi KUDOH

## 1. はじめに

近年、半導体製造装置、SEM、STM<sup>1)</sup>等の試料台など、サブミクロン～ナノメートルオーダの位置決め機構に対する要求が高まっている。筆者らは、圧電素子や電歪素子の急速変形に伴う慣性力を利用して、微小移動を起こす機構を考案した<sup>2)</sup>。移動体と慣性体を圧電・電歪素子で結合し、移動体をベース上に置いて摩擦力で保持しただけという単純な機構でありながら、4nmから10 $\mu$ m程度のステップ状の微動を可能にすることが確認された。

## 2. 移動原理

この機構の移動原理を図1に示す。移動体はベース上

におかれて、摩擦力で保持されている。この端面に、慣性体が圧電素子を介して接着されている。圧電素子または電歪素子に対する印加電圧パターンを制御することによって、慣性体に任意の加速度のパターンを加え、その反動を利用して、移動体の移動を引き起こす。ここでは、圧電素子を使用した場合について説明するが、電歪素子を使用しても、印加電圧パターンを変更すれば同様の原理に基づく移動が可能である。

移動体を左方に駆動するときの、圧電素子の長さの制御パターンの例を図1-aに示す。

### I. 移動ステップ①～②

(以後これを駆動パターンNo.1と呼ぶ)

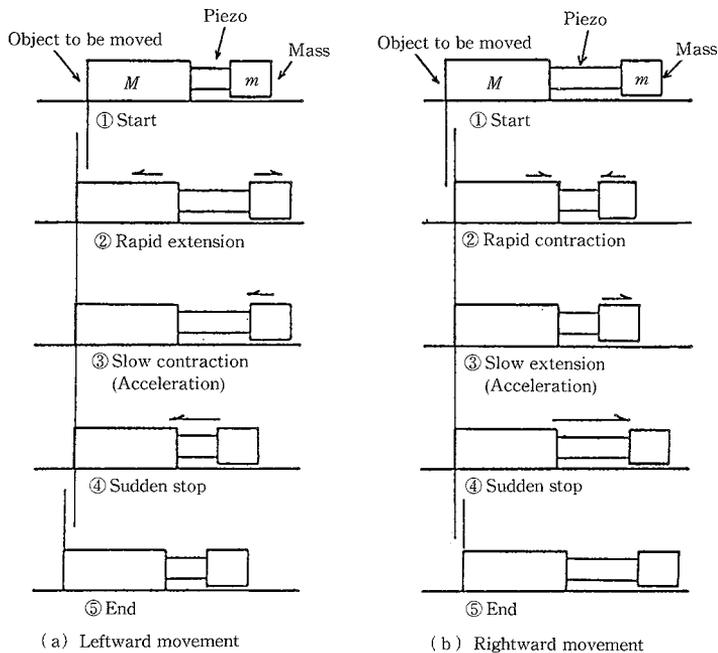


Fig. 1 Mechanism of movement

\*東京大学生産技術研究所 第2部

①：圧電素子を一定の状態にしてからサイクルを開始する。②：急激に電圧を印加すると、移動体と慣性体が、逆方向に移動する。ここで、③：ゆっくりと素子の長さを元に戻せば、静止摩擦力によって移動体の動きは阻止されて、慣性体のみを引き戻すことができる。

II. 移動ステップ③～⑤

(以後これを駆動パターンNo.2 と呼ぶ)

さらに、慣性体の引き戻しかたによって、移動ステップ①～②とは別に、これと同じ向きの移動を起こすことができる。③：慣性体を、一定の加速度で加速しながら引き戻してやる。このとき、移動体が静止した状態に保つ必要があるため、慣性体の加速による慣性力が、移動体とベースの間の静止摩擦力よりも小さくなるように、加速度を制御する。④：素子が元の長さに戻ったところで、慣性体の動きを急に止めてやれば、慣性体が、移動体に衝突するような形になり、移動機構全体が、静止摩擦力に打ち勝って、運動を始める。⑤：移動機構はここで得た運動エネルギーを、動摩擦力によって失うまで移動して停止する。

以上①～⑤で1サイクルの移動が完了するので、これの繰り返しによって、長い距離の移動が実現できる。

III. II と I を相乗した駆動

(以後これを駆動パターンNo.3 と呼ぶ)

加速しながら素子を縮め(延ばし)、④で移動体の運動を引き起こすと直ちに、急激に素子を延ばし(縮め)て元の長さに戻すという、駆動方法も考えられ、この場合は、II と I における移動量の和に相当する移動が1回で起こり、1サイクルを早く終了することができる。

以上の3種類の駆動パターンに対する、圧電素子の印加電圧パターンを図2に示す。

IV. 逆方向への駆動

図1-bのように、I, IIのサイクルを伸びと縮みの関

係が反対になるように行えば、逆方向への移動もまったく同様にして、引き起こすことができる。

3. 移動現象の解析

圧電素子を、自然長が印加電圧によって制御される硬いばねと考え、その両端に、移動体と慣性体という質量が取り付けられたものだと考えれば、以下のように運動方程式を導ける。

I. 慣性体の運動方程式

$$m\ddot{x} = -\lambda(\dot{x} - \dot{X}) - k(x - X - \Delta L(t)) \quad (1)$$

II. 移動体の運動方程式は摩擦の状態によって、次の2つの場合に分かれ、静止摩擦状態のときは、

$$\dot{X} = 0 \quad \text{かつ} \\ |\lambda(\dot{x} - \dot{X}) + k(x - X - \Delta L)| > \mu_0(M + m)g \quad (2)$$

の条件を満たす場合で、

$$M\ddot{X} = 0 \quad (3)$$

動摩擦状態のときは、式2の条件を満たされない場合で、

$$M\ddot{X} = \lambda(\dot{x} - \dot{X}) + k(x - X - \Delta L(t)) - \mu(M + m)g \operatorname{sign}(\dot{X}) \quad (4)$$

ただし、 $m, x$ は、それぞれ、慣性体の質量と、位置、 $M, X$ は、それぞれ、移動体の質量と、位置を表す。

$\mu_0$ と $\mu$ はベースと移動体のあいだの、それぞれ、静止摩擦係数と動摩擦係数を表す。 $K$ と $\lambda$ は、圧電素子の端子短絡時の、それぞれ、ばね定数とダンピングを表す。

$\Delta L(t)$ は、時間 $t$ における印加電圧によって制御される圧電素子の自然長の変化である。

以上の運動方程式に基づいて、移動現象の数値シミュレーションを行うことができる。

また、おおよその移動量の見積りは、仮定においてモデルを単純化することにより以下のように得られる。

I. 印加電圧パターンNo. 1による移動量

圧電素子にかかる電圧を急激に変化させると、その電圧のステップによって定める長さ $\Delta L$ だけ延びよう(縮もう)として、力： $k\Delta L$ を発生する。この力が、移動体とベースとの間の摩擦力に比べて、十分大きいと仮定すると、摩擦力の影響は無視できる。運動量保存則から、移動機構全体の重心の位置は、変わらないと考えられるので、移動量 $\Delta x$ は次式のようなになる。ただし、 $m$ は慣性体の質量、 $M$ は移動体の質量である。

$$\Delta x = \frac{m}{M + m} \Delta L \quad (5)$$

II. 印加電圧パターンNo. 2による移動量

慣性体を引き戻すときの加速度 $a$ は、このときの慣性力が、移動体とベースの間の静止摩擦力よりも、小さくなるように保つ必要があるため、次式を満たすようにす

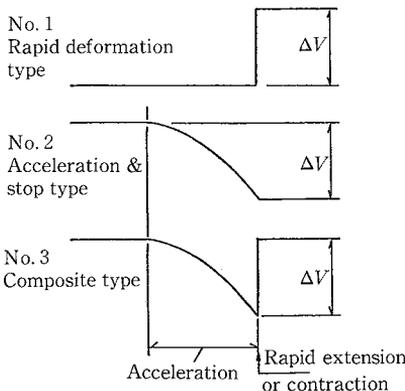


Fig. 2 Voltage patterns

研究速報  
 ．ただしここでは簡略化のため $\mu_0$ は $\mu$ に等しいとする．

$$\alpha \leq \frac{\mu(M+m)g}{m} \quad (6)$$

図1-a④の段階で、移動体の得た速度 $V$ は、運動量保存側により、

$$V = \frac{m \sqrt{2 \alpha \Delta L}}{M+m} \quad (7)$$

となる．ここで得た運動エネルギーを摩擦力によって失うまで移動するので、ここでの移動距離 $\Delta x$ は次のようになる．

$$\Delta x = \frac{V^2}{2 \mu g} = \frac{\alpha \Delta L m^2}{\mu g (M+m)^2} \quad (8)$$

式6より、このステップでの移動量の最大値は

$$\alpha_{\max} = \frac{\mu(M+m)g}{m} \quad (9)$$

のときに得られ、式8より

$$\Delta x_{\max} = \frac{m}{(M+m)} \Delta L \quad (10)$$

となる．これは、式5の移動量と等しくなる．

以上の結果を見ると、2つの重要な特性が予測できる．移動量が、 $\Delta L$ 、すなわち、 $\Delta V$ に比例することと、慣性体の質量の、移動体の質量に対する比率の大きいほうが、移動量が大きくなることである．

#### 4. 実験装置

表1に示したような質量の移動体と慣性体を組み合わせて、7種類の実験装置を製作した．図3が、移動体質量が165gの実験装置の概観図である．移動体と、ベース

table 1 Mass of the object to be moved and the element for inertial mass

object	165g	165g	165g	910g	910g	910g	910g
mass	70g	106g	135g	50g	100g	200g	300g

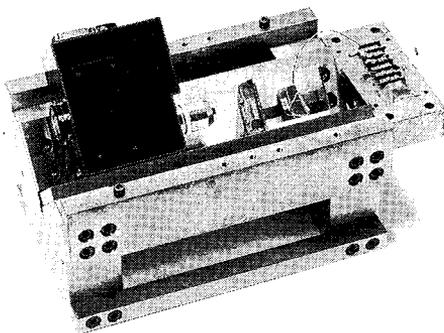


Fig. 3 Schematic view of the equipment

の摩擦面として、S45Cと、SUS304をそれぞれ用いている．一方、移動体質量が910gの実験装置の形状は箱型ではなく、図4にあるような単純な形状を採用しており、摩擦面の材質はS45C-S45Cである．使用した圧電素子は、PMN系積層型素子で、静電容量 $6 \mu\text{F}$ であり、最大印加電圧150Vにおいて $16 \mu\text{m}$ の伸びを生じ、伸びを抑制した場合には、350kgfの力を発生するものである．一軸位置決め実験装置の全体の構成を図4に示す．ここで、移動体の変位の計測には、次の3種類のセンサを目的に応じて使い分けている．渦電流式変位計（測定範囲1mm、分解能 $0.5 \mu\text{m}$ ）、静電容量式変位計（測定範囲 $\pm 30 \mu\text{m}$ 、分解能50nm）、光学式（非点収差法）変位計（測定範囲 $\pm 1 \mu\text{m}$ 、分解能2nm）の3種類である．圧電素子駆動アンプは、圧電素子の容量性負荷にたいして高速充放電を行うことが可能なものを設計・製作した．スルーレイトは、 $5 \mu\text{F}$ 負荷時で、 $2 \text{V}/\mu\text{sec}$ と高速である．これをマイクロコンピュータにより制御し、さまざまな電圧パターンを圧電素子に加えられるようにしている．また、変位センサの出力を、A/Dコンバータを介してコンピュータに取り込んで、データ収集や、フィードバック制御に利用している．

#### 5. 実験結果および考察

##### 5.1 3種類の駆動パターンによる移動の様子

駆動パターンNo. 1, No. 3, No. 2による移動の様子を、図5-aに示す．図5-bのように電圧パターンを正負逆にすれば、逆方向の移動が同様に得られることが確かめられる．

##### 5.2 連続駆動

図6に、電圧ステップ幅 $(\Delta V)$ が100Vの駆動パターンNo. 3による、連続駆動の結果を示す．パルスレート100Hzで駆動し、移動速度1.3mm/secを得ている．

##### 5.3 微小移動

図7に示すように、光学式センサ使用の測定により、最小の移動ステップとして4nmというデータが得られている（電圧振幅 $\Delta V = 1 \text{V}$ の電圧パターンNo. 3による連

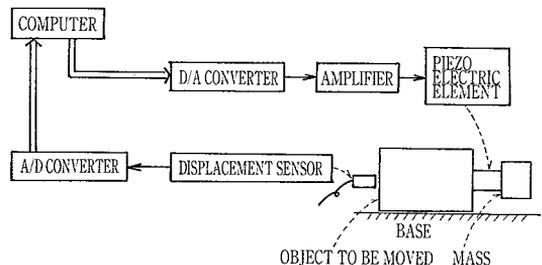
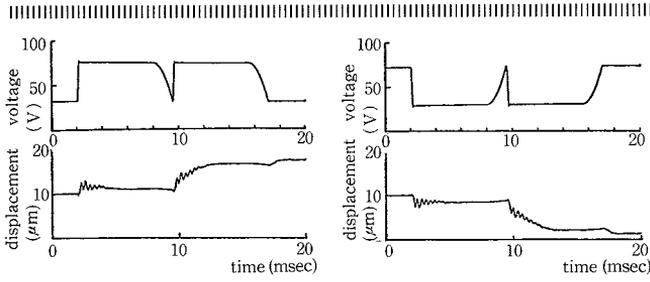


Fig. 4 Construction of the precise positioner



(a) An example of forward movements (b) An example of reverse movements

Fig. 5 Example of forward movements

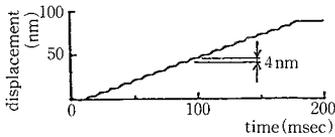


Fig. 7 Micro step movement  
 $\Delta V = 1.00\text{v}$ , voltage pattern: No. 3  
 $M = 165\text{g}$ ,  $M = 70\text{g}$

続移動実験).

5.4 電圧ステップ $\Delta V$ と1ステップ移動量 $\Delta x$ との関係

図8から、 $\Delta V$ と $\Delta x$ とは、ほぼ比例しており、第3節の式5, 10の移動量の推定が妥当であるといえる。

6. おわりに

圧電素子の急速変形を利用した超精密位置決め機構の利点としては、次のようなことがあげられる。非常に単純な機構で10nmオーダの位置決めができる。しかもこの機構を、適当なセンサと組み合わせると、フィードバックシステムを構成すれば、センサの精度および分解能と同程度の、位置決め精度および位置決め分解能を実現できる。また、この機構では静止位置が摩擦力で保存されるので、位置決め完了後は、パワーを必要としない。しかも、通常のサーボ機構による精密位置決め機構で問題となる静止位置保持時に微細な振動を起こすという現象が、起こらないという利点がある。この機構と似た機構として、インチワームが挙げられるが、インチワームでは、伸縮する圧電素子のほかに、2個のチャックが必要である<sup>45)</sup>。それに対して、この機構では、慣性体にかかる加速度を制御することによって、移動体とベースの間の摩擦現象を利用して、インチワームのチャックに相当する動作を行う。そのため、圧電素子1個だけで、圧電素子の伸縮長に制限されない広範囲の位置決めを実現できる。さらに、従来の圧電素子を使った精密位置決め機構では、微動機構と粗動機構を組み合わせる必要があったのに対して<sup>6)</sup>、この機構は一種の自走機構であるため、微動機構と粗動機構の働きを兼ねることができる。また、

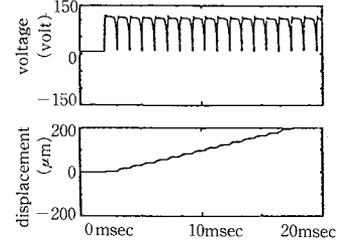


Fig. 6 Continuous movement by pattern: No. 3  
 $\Delta V = 100\text{v}$ , pulse rate = 100Hz  
 obtained velocity = 1.3mm/sec

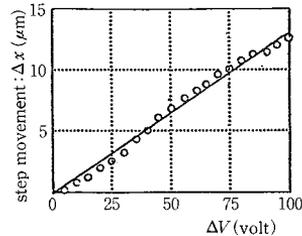


Fig. 8 Step movement vs. height of voltage pattern: No. 3

従来から筆者らが研究を行ってきた、衝撃電磁力を利用した微小位置決め機構<sup>7a)</sup>に比べても、電磁ノイズを発生しにくく、駆動パルスレートを上げられる、といった利点がある。  
 (1988年7月11日受理)

参考文献

- 1) G. Binnig and H. Rohrer: Scanning Tunneling Microscopy, Helvetica Physica Acta, 55(1982)726
- 2) 樋口, 渡辺, 工藤: 圧電素子の急速変形を利用した超精密位置決め機構, 昭和62年度精密工学会秋季大会講演論文集, (1987) 325
- 3) 樋口, 渡辺, 工藤: 圧電素子の急速変形を利用した超精密位置決め機構, 昭和63年度精密工学会春季大会講演論文集, (1988) 919
- 4) (米)Burley Instrument社カタログ, Micropositioning Systems
- 5) 杉原和佳, 東条徹: 圧電素子を用いたXYθテーブル, 精密工学会誌, 52, 8 (1986) 161
- 6) 森山茂夫, 原田達男, 高梨明紘: 圧電素子アクチュエータを備えた超精密X-Y移動台, 精密機械, 50, 4 (1984) 80
- 7) 樋口俊郎, Hojiat Yusof, 渡辺正浩: 衝撃電磁力を利用した微小位置決め機構の開発(第6報) - 移動現象の解析 -, 昭和61年度精密工学会春期大会講演論文集, (1986) 895
- 8) 樋口俊郎, 渡辺正浩, Hojiat Yusof: 衝撃電磁力を利用した微小位置決め機構の開発(第7報) - XYθ精密位置決めテーブルの制御 -, 昭和61年度精密工学会春期大会講演論文集, (1986) 897