

# パラレルメカニズムを用いたXYZステージの開発

山川耕志郎 古谷克司 毛利尚武

## Development of XYZ-Stage by Using Parallel Mechanism

K. YAMAKAWA K. FURUTANI N. MOHRI

This paper presents the development of a xyz-stage by using a parallel mechanism with 6 degrees of freedom. Multilayer piezos are used to change the link length in the prototype. The movable range of the prototype is 100 $\mu$ m in the x- and y- directions and 10 $\mu$ m in the z- direction. The resonant frequency of the prototype is approximately 100Hz in the x- and y- directions and 50Hz in the z- direction. The motion of the stage is controlled by the induced charge feedback control to allow compact SPM designs. The motion error is 16nm in the z- direction by the induced charge feedback control. The displacement of the prototype can be controlled by the induced charge feedback control as well as by the displacement feedback control. This stage is applied to a positioning device of an atomic force microscope (AFM). The grooves of a diffraction grating are observed under high linearity with the AFM.

- |                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>1. はじめに</li> <li>2. 誘導電荷を用いた変位測定の原理</li> <li>3. 実験装置の構成</li> <li>4. 変位制御例</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>5. 原子間力顕微鏡の微動機構への適用               <ul style="list-style-type: none"> <li>5.1 実験装置の構成</li> <li>5.2 フォースカーブ</li> <li>5.3 AFM像</li> </ul> </li> <li>6. おわりに</li> </ul> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

## 1. はじめに

近年，先端技術に用いられる要素部品では，要求される加工精度がマイクロメータからナノメータスケールになりつつある．このような領域における加工現象を解明するために，原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope, 以下AFMと称す) などの走査型プローブ顕微鏡 (Scanning Probe Microscope, 以下SPMと称す) を用いたナノメータスケールの加工に関する研究が盛んに行われている<sup>1)~4)</sup>．

一般に，SPMの微動機構にはトライポッド型やチューブ型圧電素子がよく用いられている．しかし，これらは3自由度しか持たないため，軸間の干渉を避けることができない．一方，スチュワート型パラレルメカニズム<sup>5)</sup>は6自由度を持つため，干渉を避けることが可能で，高い運動精度を持つことが期待できる．

本研究は，SPMの機構を利用したナノメータスケールの形状を創成できるような加工機のため

の微動ステージの開発を目的とする．

本報では，まず誘導電荷を用いた変位測定の方法<sup>6)</sup>を紹介し，次いで試作した微動機構の構成，評価結果について述べる．最後に，試作した微動ステージをAFMに適用した結果について述べる<sup>7)</sup>．

## 2. 誘導電荷を用いた変位測定の原理

圧電素子は小型で，微小変位が可能で，かつ高応答性を持つアクチュエータである．そのため，各種の位置決め機構に適用されている．一般に圧電素子の変位は印加電圧を変化させることにより制御される．しかし，印加電圧と変位量との間にはヒステリシスが存在する．そのため変位をフィードバックする方法<sup>8)~9)</sup>，電流源で駆動し電荷量で制御する方法<sup>10)</sup>などが提案されている．変位をフィードバックする方法は完全なクローズドループを構成できるが，センサ部が大きくなる 경우가多く，機構の小型化の障害になる場合がある．電流源で駆動し電荷量で制御する方法は線形性が非

常に良いが、電流源の出力インピーダンスが大きいため、大電流で出力することが困難である。したがって圧電素子の高速駆動には適さないと考えられる。

一方、古谷らは圧電素子の両端に接着した導体に生じる誘導電荷をフィードバックすることにより、圧電素子の変位を制御する方法を提案している<sup>6)</sup>。この方法は、構造が簡単なため機構全体を小型に構成することができるという特長があり、パラレルメカニズムの持つ高速性を損なうことがない。

図1に誘導電荷を利用した積層型圧電素子の変位の測定原理を示す<sup>6)</sup>。

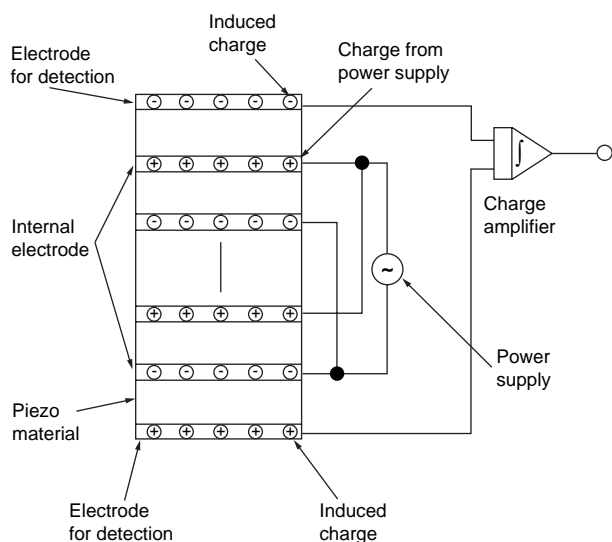


図1 誘導電荷を用いた変位測定原理  
Principle of displacement measurement by using induced charge

積層型圧電素子は、圧電材料と内部電極が交互に積み重ねられている。圧電材料は、ジルコンチタン酸鉛、チタン酸バリウムなどを主成分としたセラミックスが用いられる。内部電極は、電源から正電荷と負電荷が交互に印加されるようになっている。したがって、積層型圧電素子は平板コンデンサと同様の構造を持つ。

圧電素子の両端に金属板を貼り付け、これを誘導電荷検出用電極とする。圧電素子に電圧を印加すると、内部に電荷が蓄えられる。圧電素子の内部電極と平行な外壁には、この電荷によって誘導電荷が発生する。図1の場合、上側電極に負、下側電極に正の電荷が発生する。静電誘導により発生した誘導電荷は、電源によって内部に充電された電荷に比例すると考えられる。

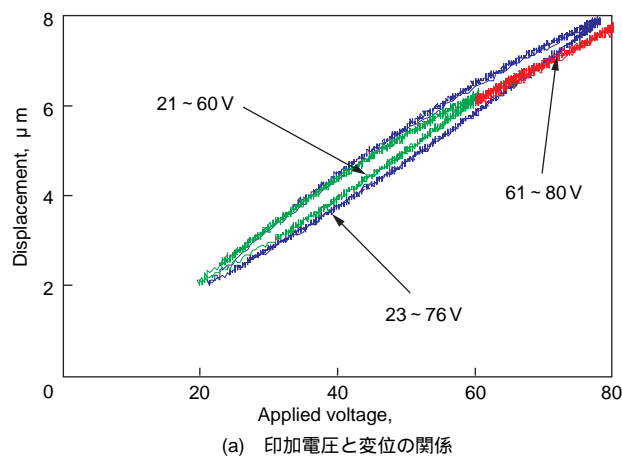
電圧源から圧電素子への注入電荷量と変位量の間には、ヒステリシスが存在しないことが知られ

ている<sup>10)</sup>。したがって、誘導電荷と圧電素子の変位量の間にも、ヒステリシスが存在しないことが期待できる。

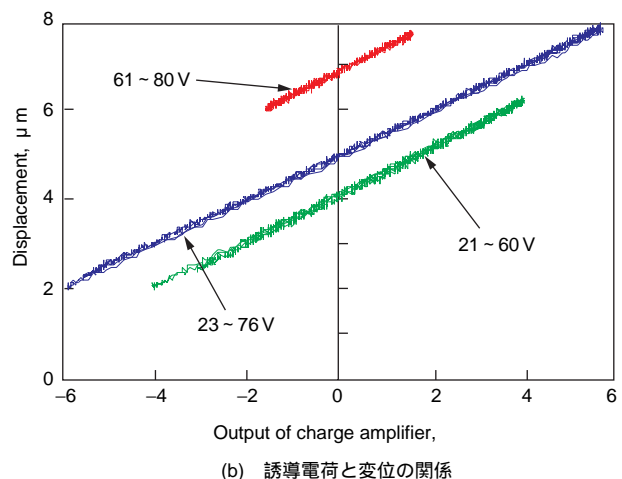
誘導電荷検出用電極に導電性接着剤でケーブルを接続し、チャージアンプを用いて電荷を測定する。その結果から誘導電荷と変位の関係をあらかじめ校正しておけば、誘導電荷を測定することによって圧電素子の変位が推定できると考えられる。

圧電素子への印加電圧と変位量との関係および誘導電荷と変位量との関係を図2に示す。

印加電圧と変位量の間には最大14.0%のヒステリシスが観察されているのに対し、誘導電荷と変位量との間のヒステリシスは最大1.0%であった。



(a) 印加電圧と変位の関係



(b) 誘導電荷と変位の関係

図2 圧電素子のヒステリシス

Hysteresis loop of displacement of piezoelectric element

### 3. 実験装置の構成

図3に実験装置の概観を示す<sup>11)</sup>。

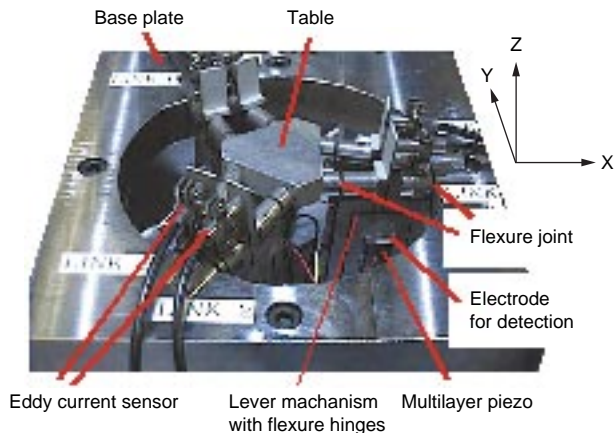


図3 試作機の外観

Prototype overview

全体の寸法は160×160×85mmである。テーブルはアルミニウム製で、質量は24gである。テーブルは6本のリンクで支持されている。高い走査速度が得られるようにxy方向の剛性を高め、高いz方向の分解能を得られるように、リンクの角度を6°にした。各リンクは積層型圧電素子で伸縮される。積層型圧電素子の寸法は5×5×20mmで、150V印加時に16μm伸びる。

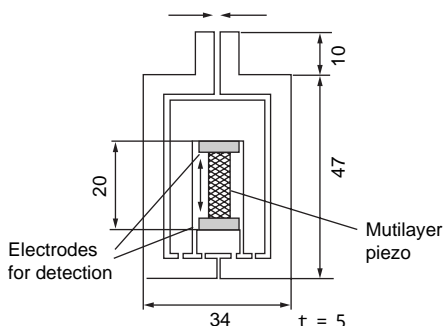


図4 変位拡大機構

Lever mechanism with flexure hinges

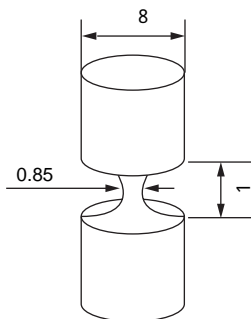


図5 弾性ヒンジ

Flexure joint

積層型圧電素子は、図4に示す変位拡大機構により200μm(拡大率12.5倍)以上の変位量が得られるようになっている。各リンクとテーブル、ベースプレートとの接続には図5に示す弾性ヒンジを用いた。変位拡大機構と弾性ヒンジはともにSUS304製で、放電加工により製作した。誘導電荷の測定には圧電式加速度センサ用のチャージアンプ(周波数範囲0.2Hz~1kHz)を用いた。また、チャージアンプの出力が外来ノイズの影響を受けることがあったため、自作コンデンサにチャージアンプを接続し、その出力と誘導電荷の出力を差動アンプで合成することでノイズを低減した。

システムのブロック線図を図6に示す。

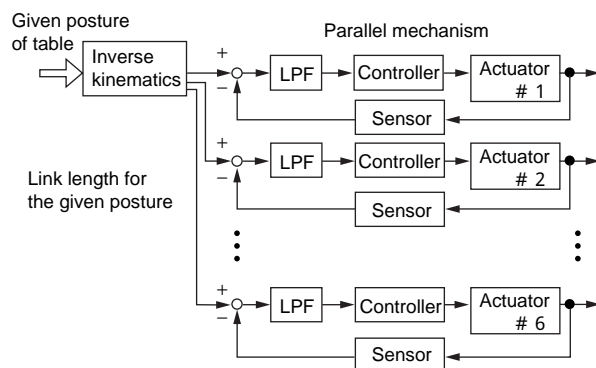


図6 パラレルメカニズム制御のブロック線図

Block diagram of parallel mechanism control

微動機構の制御は、テーブルの目標位置・姿勢を各アクチュエータの変位に分解し、各アクチュエータに目標値として与え、それぞれのサーボ系で比例制御した。したがって、系全体としてはセミクロードループ制御である。コントローラにはパーソナルコンピュータ(80586, 100MHz)を用いた。サンプリング時間は0.2msである。リンク単体の固有振動数が187Hzであったため、補償器の前に遮断周波数100Hzのデジタルローパスフィルタを挿入した。D/AおよびA/D変換器の分解能は12bitである。圧電素子駆動アンプの倍率は20倍で、周波数範囲は7kHzである。

#### 4. 変位制御例

試作した微動テーブルをy方向に変位させた例を図7に示す。

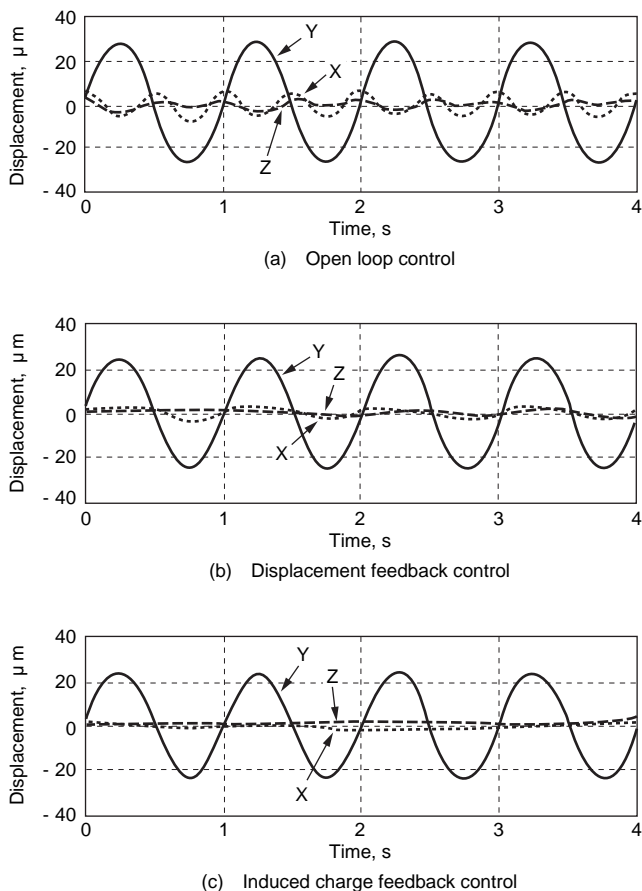


図7 変位制御の例

Examples of displacement control

同図(a)はオープンループ制御, 同図(b)は変位フィードバック制御, 同図(c)は誘導電荷フィードバック制御の場合である. 目標値はy軸方向に周波数 1 Hz, 振幅25 μmの正弦波とした. xy方向の変位は各軸に取り付けられたうず電流式変位センサと同種のものを用い, z軸方向は静電容量式変位センサ(測定範囲: ±10 μm, 分解能: 5 nm, 周波数範囲: DC ~ 40kHz)で測定した. コントローラの比例ゲインは1とした.

逆運動学計算の際に設計時のパラメータを用いたため, 組立時の歪みにより軸間の干渉が観察された. 表1に図7におけるxz方向の干渉量と振幅の比を示す.

表1 干渉量とピッチング誤差  
Cross-talk ratios and pitching errors

| Feed back      | Cross-talk ratio |     | Pitching error<br>[rad] |
|----------------|------------------|-----|-------------------------|
|                | x:y              | z:y |                         |
| None           | 19.6             | 8.2 | $1.2 \times 10^{-5}$    |
| Displacement   | 11.7             | 3.9 | $1.7 \times 10^{-5}$    |
| Induced charge | 3.5              | 4.7 | $1.7 \times 10^{-5}$    |

誘導電荷フィードバック制御は変位フィードバック制御と同等の性能を示した. ピッチング誤差の測定結果を図8に示す.

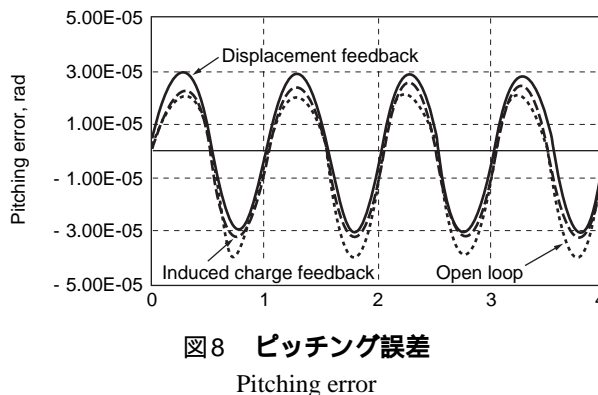


図8 ピッチング誤差

うず電流式変位センサをz軸方向に20mm離して配置し, 微動テーブル上に垂直に立てた板の傾きを測定し, ピッチング誤差を計算した. 図8はそれぞれの場合の原点におけるピッチング誤差を0として表示してある. 同程度の駆動範囲を持つチューブ型圧電素子では計算値で $10^{-4}$ rad程度の値であるのに対し, 試作したステージではいずれの制御方法でも $10^{-5}$ radのオーダーであった.

## 5. 原子間力顕微鏡の微動機構への適用

### 5.1 実験装置の構成

次に試作した微動ステージをAFMに適用した結果について述べる.

AFMに適用する場合の構成を図9に示す.

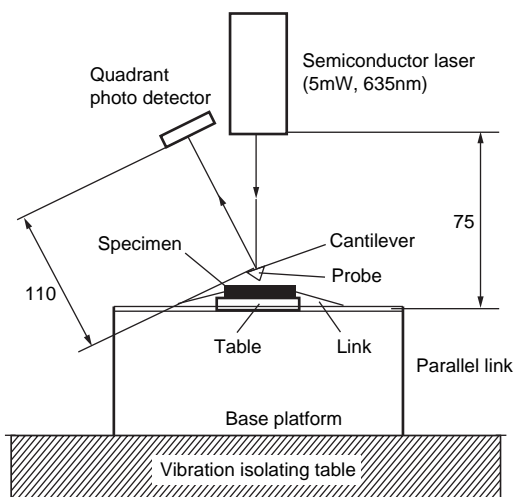


図9 AFMの構成

Schematic view of AFM

プローブには市販のコンタクトモード用カンチレバー(材質:  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , 長さ:  $200\ \mu\text{m}$ , ばね定数:  $0.16\text{N/m}$ )を用いた. カンチレバーのたわみは光てこ方式で検出した. 光源には波長 $635\text{nm}$ , 出力 $5\text{mW}$ の半導体レーザを用いた. 受光素子には4分割フォトダイオードを用いた. 除振のため装置全体を固有振動数 $2\text{Hz}$ の空気ばね式除振台の上に構成した.

### 5.2 フォースカーブ

z軸方向の運動精度を評価するために, フォースカーブ<sup>12)</sup>を大気中で測定した. 試料にはシリコンの(100)面を使用した. テーブルは振幅 $10\ \mu\text{m}$ , 周波数 $5\text{Hz}$ の三角波で駆動した. 測定例を図10に示す.

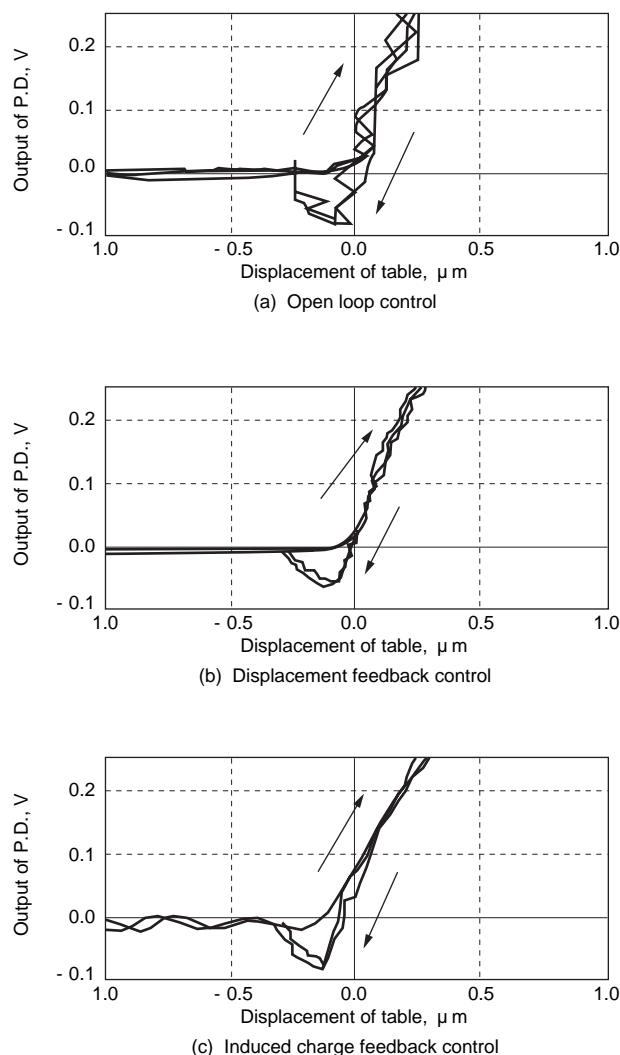


図10 フォースカーブ  
Force curve

同図(a)はオープンループ制御の場合, 同図(b)は変位フィードバック制御の場合, 同図(c)は誘導電荷フィードバック制御の場合である. 横軸はz軸方向の変位を示し, 縦軸はフォトダイオードの出力電圧である. 縦軸が正の領域ではプローブと試料間に斥力が働いていることを示し, 負の領域では引力が働いていることを表している. 横軸は, 値が正に大きくなるほど, プローブと試料間の距離が小さくなることを表している.

$0 \sim 0.3\ \mu\text{m}$ の範囲でフォースカーブの測定を40回繰り返して, ばらつきを測定した. 斥力領域の回帰直線を求め, そのまわりの標準偏差を求めた結果, オープンループ制御の場合には $78\text{nm}$ であったが, 変位フィードバック制御の場合で $17\text{nm}$ , 誘導電荷フィードバック制御の場合で $16\text{nm}$ であった.

### 5.3 AFM像

テーブルをxy平面内で走査することで回折格子の表面形状を観察した. 図11にその一例を示す.

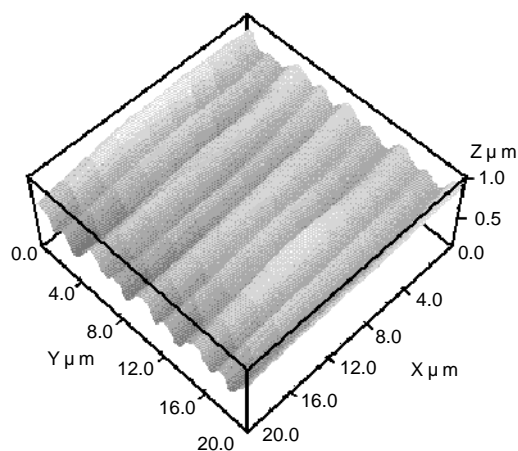


図11 回折格子のAFM像  
AFM image of diffraction grating

回折格子のピッチは $3.3\ \mu\text{m}$ , ブレーズ角は $2^\circ 34'$ である. xy軸は変位の指令値を表し, z軸はフォトダイオード出力から計算したカンチレバーの変位である. テーブルの変位は誘導電荷フィードバック方式で制御した. 走査の振幅の指令値は $10\ \mu\text{m}$ , 周波数はx軸方向で $10\text{Hz}$ , y軸方向で $0.5\text{Hz}$ とした. 格子溝が直線性良く観察されており, 試作した微動ステージがAFMに適用可能であることが明らかになった.

### 6. おわりに

シュワート型パラレルメカニズムを用いた微動ステージを開発した. 試作したステージの可動

範囲は $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ であった。誘導電荷のフィードバックによりテーブルの変位制御を行なった結果、変位のフィードバックと同等かそれ以上の運動精度が得られた。ピッチング誤差は、同程度の可動範囲を持つチューブ型圧電素子よりも小さかった。また、試作したステージを用いてAFMを構成し、フォースカーブを測定した結果、 $z$ 軸方向で $17\text{nm}$ の繰り返し精度を持つことが明らかになった。さらに回折格子の表面形状の観察を行ない、格子溝が直線性良く観察できた。

本研究を遂行するにあたり東京大学生産技術研究所の川勝英樹助教授に有益なご教示をいただきました。本研究の一部にはメカトロニクス技術高度化財団、マイクロマシンセンター、日産科学振興財団の研究助成および文部省科研費基盤研究(C)(2)(09650282)を用いました。記して感謝いたします。

## 参考文献

- 1) D. M. Eigler and E. K. Schweizer : Positioning Single Atoms with Scanning Tunneling Microscope, Nature, no. 334 (1990) 524.
- 2) B. Bhushan and V. N. Koinkar : Tribological Studies of Silicon for Magnetic Recording Applications, J. Appl. Phys., no. 75 (1994) 5741-5746.
- 3) K. Asamoto, K. Furutani, N. Mohri : A Basic Study on Nanometer Cutting of Brittle Materials, Proc. 12th Ann. Meeting of Am. Soc. Prec. Eng., no. 16 (1997) 466-469.
- 4) 三宅正二郎, 石井正紀, 大竹利明, 津嶋尚武 : 原子間力顕微鏡によるマイカのナノメータスケールの機械加工, 精密工学会誌, vol.63, no. 3 (1997) 426.
- 5) D. Stewart : A Platform with Six Degrees of Freedom, Proc. Inst. Mech. Eng., Part 1, 1965-1966, no. 180 (1965) 15.
- 6) 古谷克司, 漆畑満則, 毛利尚武 : 誘導電荷のフィードバックによる圧電素子の変位制御, 精密工学会誌, vol. 64, no. 4 (1998) 562.
- 7) 古谷克司, 山川耕志郎, 毛利尚武 : 誘導電荷のフィードバックによる圧電素子の変位制御(第2報) - パラレルメカニズム制御への適用 - , 精密工学会誌, vol. 65, no. 10 (1999) 1445
- 8) 岡崎祐一 : 圧電素子を用いた微小変位工具台, 精密工学会誌, vol. 54, no. 7 (1988) 1375.
- 9) K. Mizutani, T. Kawano and Y. Tanaka: A Piezoelectric-Drive Table and Its Application to Micro-Grinding of Ceramic Materials, Prec. Eng., vol. 12, no. 4, (1990) 219.
- 10) C. V. Newcomb and I. Flinn: Improving the Linearity of Piezoelectric Ceramic Actuators, Electron. Lett., vol. 18, (1982) 442.
- 11) K. Yamakawa, K. Furutani and N. Mohri : XYZ-Stage for Scanning Probe Microscope by Using Parallel Mechanism, Proceedings of 1999 ASME Design Engineering Technical Conferences (International Symposium on Motion and Vibration Control 99), Las Vegas, USA (in press).
- 12) A. L. Weisenhorn, P. K. Hansma, T. R. Albrecht and C. F. Quate : Forces in Atomic Force Microscopy in Air and Water, Appl. Phys. Lett., vol. 54, no. 26 (1989) 2651.

## 筆者



山川耕志郎\*  
K. YAMAKAWA

古谷克司\*\*  
K. FURUTANI

毛利尚武\*\*\*  
N. MOHRI

\* 軸受事業本部 軸受技術センター  
技術管理部

\*\* 豊田工業大学 機械システム工学科 助教授

\*\*\* 豊田工業大学 機械システム工学科 教授