研究速報

結晶格子を基準としたリニアエンコーダ

A linear encoder using a crystal as a reference

星　泰雄*・川勝英樹*
Yasuo HOSHI, Hideki KAWAKATSU

1. はじめに

1982年にBinnigらが走査型トンネル顕微鏡[1]（STM：Scanning Tunneling Microscope）を発表して以来，さまざまな走査型プローブ顕微鏡（SPM: Scanning Probe Microscope）が発表されている．中でも原子間力顕微鏡[2]（AFM: Atomic Force Microscope）の進展は著しく，ダイナミックモードと呼ばれる非接触の方法ではほぼSTMにも匹敵する原子分解能を達成しつつある[3]．またこれらの技術は，物性の測定だけでなく原子・分子を操作する超微細加工技術への応用も盛んであり，半導体プロセスや生体分子を扱う研究者からも注目を集めている．

このようなサブナノメータの観察・加工を再現性よく行うには，プローブと試料の相対位置を正確に把握する必要がある．現状では走査に用いるピエゾ素子の特性をオフラインで校正する手段が採られており，走査中に生じる熱ドリフトの影響を除去するのは困難である．サブナノメータの変位を測定するには，レーザー干渉計を用いる方法が一般的であるが，3自由度の光学系を組むため，走査機構に比べて大きな機構となりやすい．本研究では比較的小さな機構ですむ方法として，試料と同一のテーブルに貼付した結晶を基準として変位を測定するリニアエンコーダについて，その可能性を検討したので報告する．

2. 基本構想

リニアエンコーダの基本構想を図1に示す．テーブルに結晶を貼付し，SPMにより検出する結晶の規則性からテーブルの変位量を測定する．SPMとしては，従来より検討してきたSTMの他，今回は接触モードAFMについて検討している．

*東京大学生産技術研究所　第2部

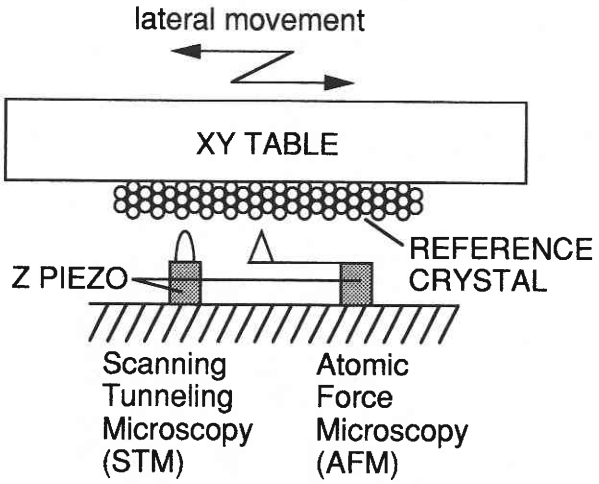

図1　結晶格子を基準に用いたリニアエンコーダの想定図．面方向に駆動されるxyテーブルの変位をテーブルに貼付した結晶を基準に測定する．測定には走査型プローブ顕微鏡を用いる．

3. AFMを用いた実験

実験に用いたAFMの概要を図2に示す[4]．一般にAFMではカンチレバーの先端にプローブをつけ，カンチレバーのたわみおよびねじれからプローブと試料の間に働く力を検出する．本AFMは，光てこによりカンチレバーの変位を検出する機構を2つ持っている．一方はカンチレバーの先端，もう一方はカンチレバーの中央部の変形を観察することにより，接触モードにおけるたわみおよびねじれだけでなくバックリングも検知することを可能にしている．大気中で雲母の結晶をラスタ走査した場合について，プローブ先端の実際の位置をカンチレバーの変形から計算してxy平面に対して等時間間隔でプロットしたものを図3に示す．濃くなった部分が規則的に見られるのは，プローブ先端が長く停留している場所があることを示している（以下，これを吸着点と呼ぶ）．このままでは原子分解能のリニア

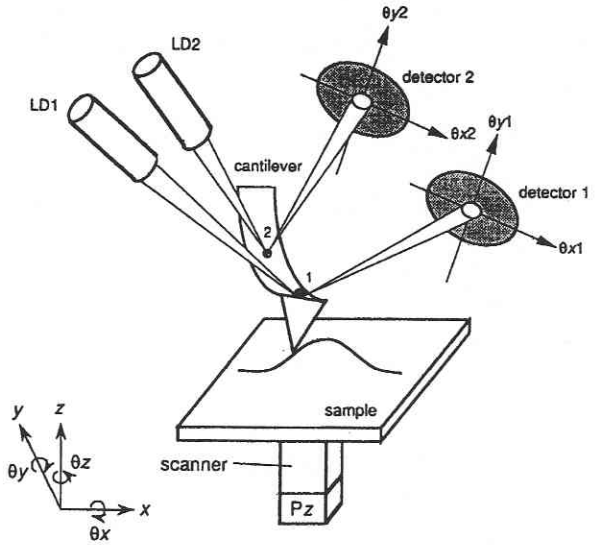

図2　Dual optical lever AFMの構成．カンチレバーの先端部と中央部の変位を光てこで検出してプローブ先端の変位を算出する．

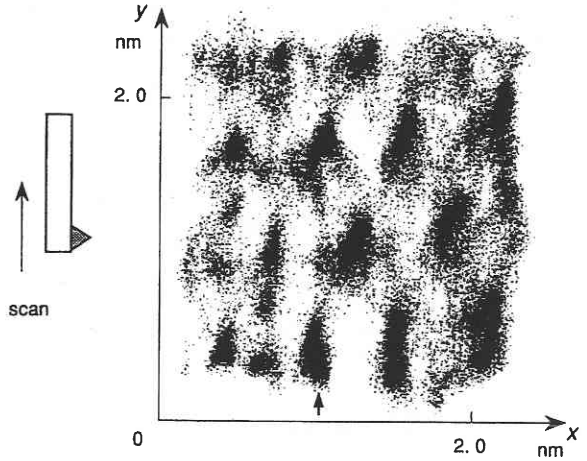

図3　ラスタ走査時のプローブ先端の動き．大気中で雲母をラスタ走査した256×256のデータ採取点についてカンチレバーの変位から算出したプローブ先端の位置をxy座標に対してプロットしたもの．

エンコーダを作ることは不可能にも思えるが，ここでは逆にこの性質を利用する方法を考える．

図4はカンチレバーをその軸と垂直な方向に走査した場合のねじれ信号を示したものである．図中には，のこぎり状の信号に合わせてカンチレバーのねじれを模式的に示してある．図3で見たように，プローブ先端は吸着点に停留するため，走査につれてカンチレバーのねじれが増加してゆく．そして，ある限界値を超えたとき急激な動きで次の吸着点へプローブ先端が移動する．この吸着点から吸着点へのジャンプは走査しつづけている間はほぼ規則的に観察

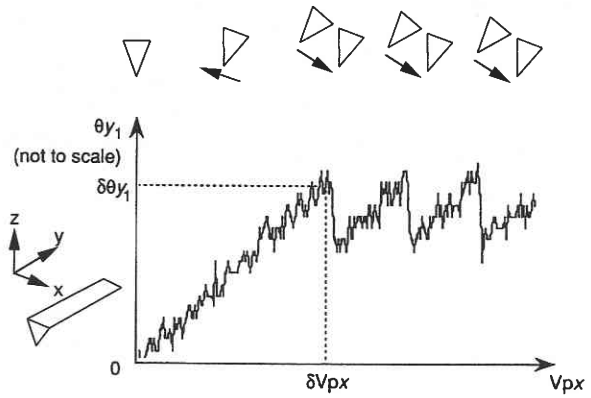

図4　カンチレバーのねじれ信号の特徴．一方向に走査を行うと規則正しいのこぎり波形が観察される

されるので，この信号を微分することによりリニアエンコーダのパルスを発生することができる．また，走査方向が逆の場合ねじれ信号のパターンも反転するため，それを微分したパルスの符号も逆になり，変位の量だけでなく方向も認識することができる．課題としては，走査方向を逆転したときにヒステリシスを生じる問題，プローブと試料が常に接触していることにより両者に摩耗が生じる問題などが挙げられる．また，実用的な速度はカンチレバーの機械的特性により制限されると考えられる．本実験におけるカンチレバーの固有振動数は22 kHzであり，雲母結晶の吸着点の周期が約0.5 nmであることを考慮して導かれる限界速度は約11 μm/secとなる．速度を上げるためには，固有振動数が高くバネ定数の低いカンチレバーの開発が重要である．

4. STMを用いた実験

STMで像のS/N比を上げるためにプローブにディザ振動を加える方法がよく知られており，位置決めなどにも用いられている[5]．図5にこの方法の概要を示す．プローブに走査方向のディザ振動を与え，その結果得られる信号をロックインアンプに通すことで，プローブ位置の試料面の傾きに相当する信号（以下，gradient信号と呼ぶ）が得られる．結晶格子上を走査する場合，形状信号の最大値と最小値でかならず傾きはゼロとなるので，ゼロをクロスする回数をカウントすることにより変位量を計測することができる．図6では，グラファイトの結晶の上でプローブを一方向に走査したときの走査信号，形状信号（ピエゾ素子への出力）およびgradient信号を示している．この方法の問題点は，方向に関する情報が欠けていることである．また，STMは原子分解能を持つ反面，常に制御を必要とする．実用的な速度は制御回路の電気的特性により制限されると

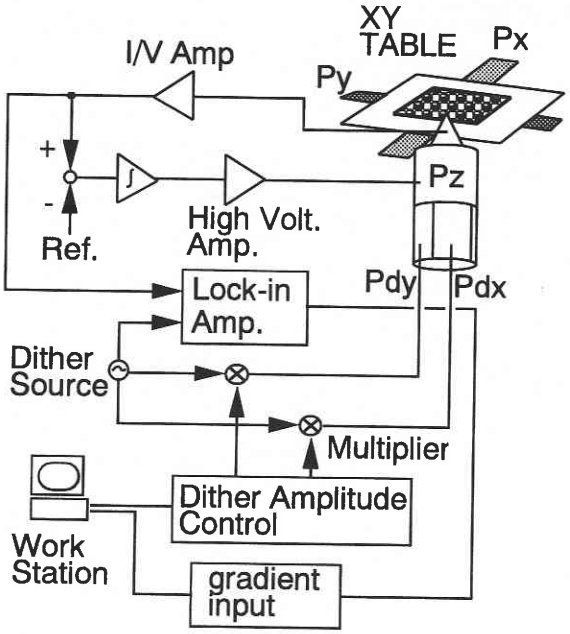

図5　STMを用いたリニアエンコーダの構成．走査方向にディザ振動を加えて得られる信号をロックインアンプに通してgradient信号を得る．

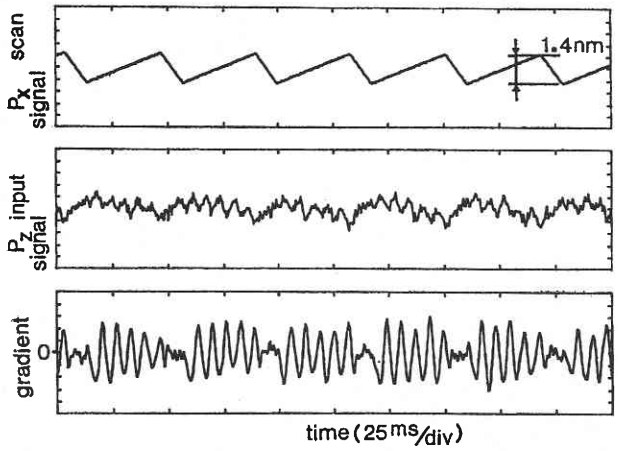

図6　走査信号と形状信号およびgradient信号の関係．gradient信号はゼロを閾値にして容易にパルス化できる

考えられる．本実験におけるトンネル電流を増幅する電流-電圧アンプの帯域は10 kHz程度であり，グラファイトの格子間隔が約0.25 nmであることを考慮して導かれる限界速度は約2.5 μm/secとなる．実際にはさらにロックインアンプを通して信号を得るので，実用的な速度は1 μm/sec以下になると予想される．

表1　リニアエンコーダとしての特徴比較

	AFM	STM
Tip-sample interaction	large	small
Lattice detection	simple (due to atomic stick-slip)	complex (dithering)
Accuracy	atomic resolution	atomic resolution
Velocity	limited by (1) mechanical characteristics of the cantilever; (2) natural frequency of the setup;	limited by (1) electrical characteristics of the control circuit; (2) natural frequency of the setup;

5. おわりに

結晶格子を基準に用いたリニアエンコーダについて検討した．AFM，STMそれぞれを用いた場合の特徴を表1に示す．どちらを用いた場合でも原子分解能でのリニアエンコーダの実現が可能と考えられるが，限界速度や信号処理の簡便さを考えるとAFMを用いる方法が有利である．AFMを用いる場合については，固有振動数が高くバネ定数の小さいカンチレバーの開発や，摩耗しにくいプローブと試料の組み合わせ，往復動作時のヒステリシスの補間方法の検討が必要である．STMを用いる場合については，移動方向を検出する手段の検討が必要である．

（1998年12月24日受理）

参　考　文　献

1)　G. Binnig and H. Rohrer, Helv. Phys. Acta, 55, 726 (1982).
2)　G. Binnig, C. F. Quate and C. Gerber, Phys. Rev. Lett., 12, 930 (1986).
3)　F. J. Giessibl, Science, 267, 68 (1995).
4)　H. Kawakatsu and T. Saito, J. Vac. Sci. Technol. B, 14 (2), 872 (1996).
5)　H. Kawakatsu, Y. Hoshi, H. Bleuler, H. Kougami, M. Bossardt and N. Vezzin, Appl. Phys. A, 66, S 853 (1998).