

結晶格子を用いた測長と位置決め

Crystalline Lattice for Metrological Applications and Positioning Control

川 勝 英 樹*・樋 口 俊 郎*・星 泰 雄**・川 合 稔***
北 野 齊****・西 沖 暢 久*****Hideki KAWAKATSU, Toshiro HIGUCHI, Yasuo HOSHI, Minoru KAWAI,
Hitoshi KITANO and Nobuhisa NISHIOKI

1. はじめに

近年、ナノメータオーダの研究が自然科学と工学の両分野において盛んに行われている。例として、原子間力顕微鏡 (AFM)¹⁾、ナノバイオロジ²⁾、ナノメータオーダの加工や位置決めなどが挙げられる。これらの分野にほぼ共通して重要なことは厳密な長さの基準の導入である。

この課題に対して、われわれは結晶の格子構造を物差しを目盛りとして用いることを考え、その構想に従って実験を行っている。

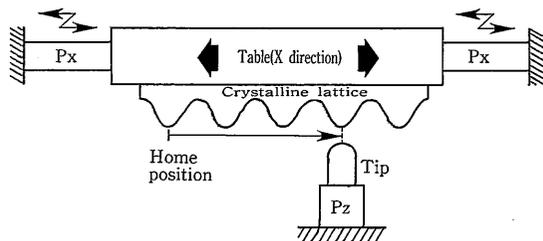
実験は、走査型トンネル顕微鏡 (STM)³⁾ で得られる結晶像を用いて行われる。結晶像をもちいて、(1) 結晶格子を用いた位置決め制御の実験と、(2) 結晶を用いた比較測長法の精度の評価実験を行った^{4,5)}。本報では、以下のことがらについて報告する。

(1) XYテーブルを格子定数をピッチ (約0.25nm) として歩進動作させることに成功した。XYテーブルに固定した結晶中の原子1個と、STMの探針を10分以上相対ドリフトなく位置決めさせ続けることに成功した。

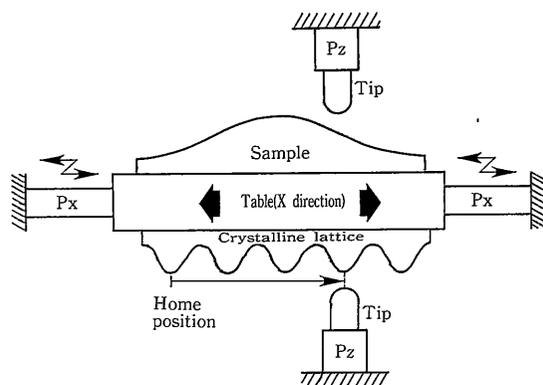
(2) 比較測長に関しては、結晶像に含まれる熱ドリフトとコサイン誤差の影響を考慮して像の補正を行った。この補正を通じて測定精度が向上することを確認した。

2. 基本構想

図1 (a) に結晶を用いた位置決めの基本構想図を、図1 (b) に結晶を用いた比較測長の基本構想図を示す。図1 (a) に示した装置では、 piezo素子によって支持されたXYテーブルがあり、そのテーブルの下面にグラファ



(a) 結晶格子を基準に用いた位置決め方法に関する基本構想図



(b) 結晶格子を基準に用いた比較測長に関する基本構想図

図1

イトの結晶がスケールとして固定してある。結晶の下には、piezo素子によってZ方向に駆動されるSTMの探針がある。この探針を用いて結晶像を観察することによって、XYテーブルの変位をサブnmのオーダで制御することが可能になると考えられる。図1 (b) に示した装置では、図1 (a) に示したXYテーブルの上面にも、下面と同様の探針とZ方向駆動用piezo素子を配置している。上

*東京大学生産技術研究所 第2部

**川崎製鉄㈱

***東京大学大学院

****松下電工㈱

*****㈱ミットヨ

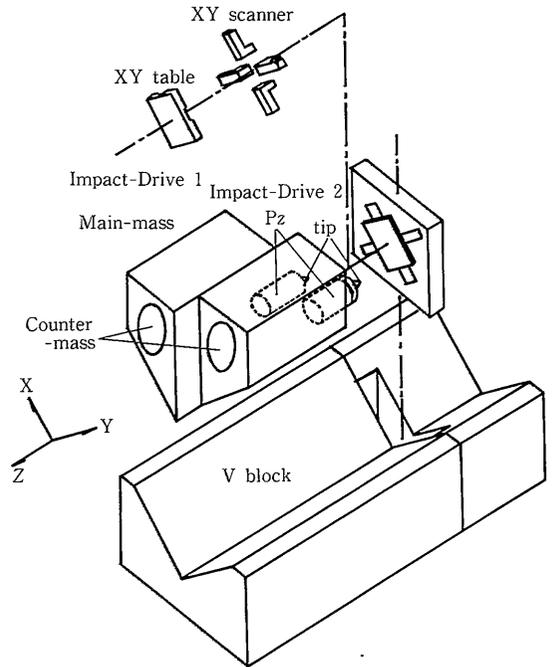
研究速報

面に試料を、下面に基準となる結晶を固定することによって1度の走査で1組の像を得ることが可能となる。1組の像を比較することによって、XYテーブルの動きのリニアリティやヒステリシスに影響されない比較測長が可能となる。なお、図1(b)に示したような、トンネルユニットを2個有するSTMをdual tunneling-unit STM (DTU STM)⁹⁾と呼ぶことにする。

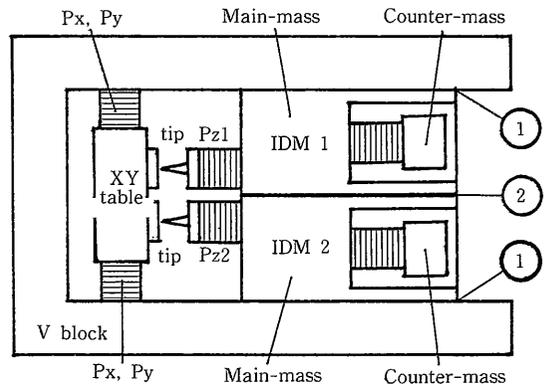
3. 装置構成

本章においては、実験に用いたDTU STMの構造と、能動位置決めのための制御回路の説明を行う。図2(a)にDTU STM (Ver 1.5) の見取り図を、図2(b)に上面からの概念図を示す。XYテーブルの上に試料を固定し、粗動機構を用いて2個の探針をトンネル状態まで位置決めする。その後、XYテーブルを走査すれば、1組の像が得られる。一方の探針で結晶を観察すれば比較測長が可能となる。このDTU STM (Ver 1.5) は、探針が平行に同一の向きから試料にちかづく形式で、さきに報告されているDTU STM (Ver 1.0)⁹⁾のように、基本構想図1(b)のような形式とは異なる。構造を変更した理由は、比較測長において大きな誤差要因となる探針相互の相対ドリフトを低減するべく、探針を近接させたためである。なお、DTU STM (Ver 1.5) で用いた探針の粗動機構は、 piezo素子による衝撃力を用いたインパクトドライブメカニズム (IDM) の作動原理を応用したもので、2個の探針それぞれのIDM移動体が相互に摺動する構造になっている。これにより、2個の探針が熱的にも機械的にもより安定な配置となる。

図3に能動位置決めのための制御回路の概要を示す。制御回路は能動位置決めのためにXYテーブルに微小な振幅のディザ振動(振幅35pm, 周波数3.3kHz), を印加し、トンネル電流の変化分から結晶像の微分像が得られるようになっている。微分像のゼロクロスは生の結晶像の凸部もしくは凹部に相当する。そのため、微分信号がゼロになるようにXYテーブルの制御を行えば、原子ごとの位置決めが可能となると考えられる。図3に示した回路は、トンネル電流を一定に保つための積分回路と、トンネル電流の変調分の振幅(生像の微分)を検出するためにトンネル電流とディザ信号を掛け合わせる部分からなる。コンピュータは、得られた微分信号を用いて、位置決めに関するPID制御や、結晶を基準とした歩進動作をXYテーブルに行わせるための信号を発生する。なお、ディザ振動をSTMへ応用した研究の例としては、Pohlのトラッキングトンネリングマイクロスコープ⁷⁾、Abrahamの微分像取得の実験⁸⁾が挙げられる。



(a) デュアルトンネルユニットSTMの概略図



(b) デュアルトンネルユニットSTMの簡略化した上面からの断面図

図2

4. 実験と考察

4.1 位置決めに関する実験

図3の制御回路を一方のトンネルユニットに用いて位置決めの実験を行った。もう一方の探針は用いなかった。図4に探針と結晶との位置決め実験の結果を示す。実験はY方向に関する1自由度のものである。XYテーブルのYスキャナに鋸波状の走査信号とディザ信号を与えた。

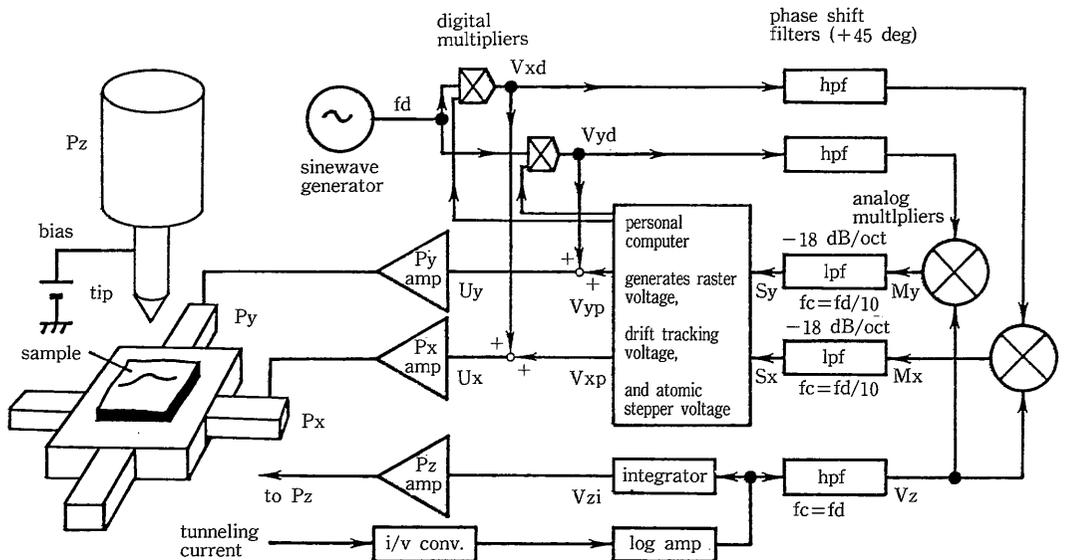


図3 XY方向の位置決めのための制御回路構成図

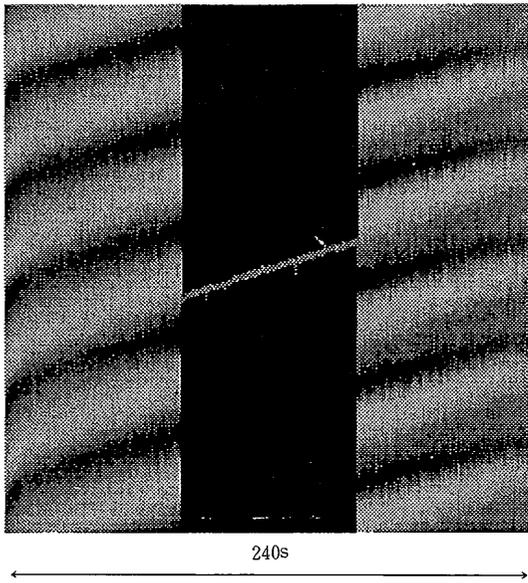


図4 1自由度の位置決め実験の結果。Yスキャナを制御し、Xスキャナの電圧は一定に保った。印加したディザ振動は、Y方向に振幅35pm、周波数3.3kHz

ディザ信号は振幅35pm、周波数3.3kHzであった。図4の縦軸はYスキャナ電圧、横軸は時間である。図4において、はじめとあとの80s間はワンラインスキャンによる像

の取り込みが行われる。ワンラインスキャンであるため、原子の周期的配列を反映した白黒のストライプが観察される。ストライプが時間に対して斜めであるのは探針と試料の相対ドリフトのためである。中間の80s間、コンピュータを用いて微分信号の帰還をYスキャナに行い、微分信号がゼロを維持するように制御した。この間、スキャナの電圧はワンラインスキャンのストライプの傾きと同じ傾きで増加した。この実験結果は、探針がドリフトで動いていく結晶中の原子1個をトラッキングし続けたことを表している。10min以上の探針と原子の位置決め成功している。本制御方法は結晶像が観察できる場合、常に安定して作動することが確認された。

4.2 結晶を基準とした歩進動作

第4.1節の位置決め実験と同様の条件でY方向への自由度の実験を行った。図5に実験結果を示す。縦軸はYスキャナの電圧、横軸は時間である。歩進動作の実験においては、探針の位置を1sごとにオープンループでステップ状に変位させた。変位の量は結晶格子の間隔とほぼ一致する値とした。探針と近傍の原子のアライメントを行う制御が行われているため、探針はステップ状に変位した後、近傍の原子とアライメントを行う。図5において、ステップ状の変位のあとのYスキャナ電圧の軌跡に“ひげ”が観察される。このひげは探針のアライメント動作に対応する。図5(a)ではフィードバックゲインが大きく、図5(b)ではフィードバックゲインが小さい。観察される軌跡のひげはフィードバックゲインの大小を反映したものとなっており、意図した制御が実現されて

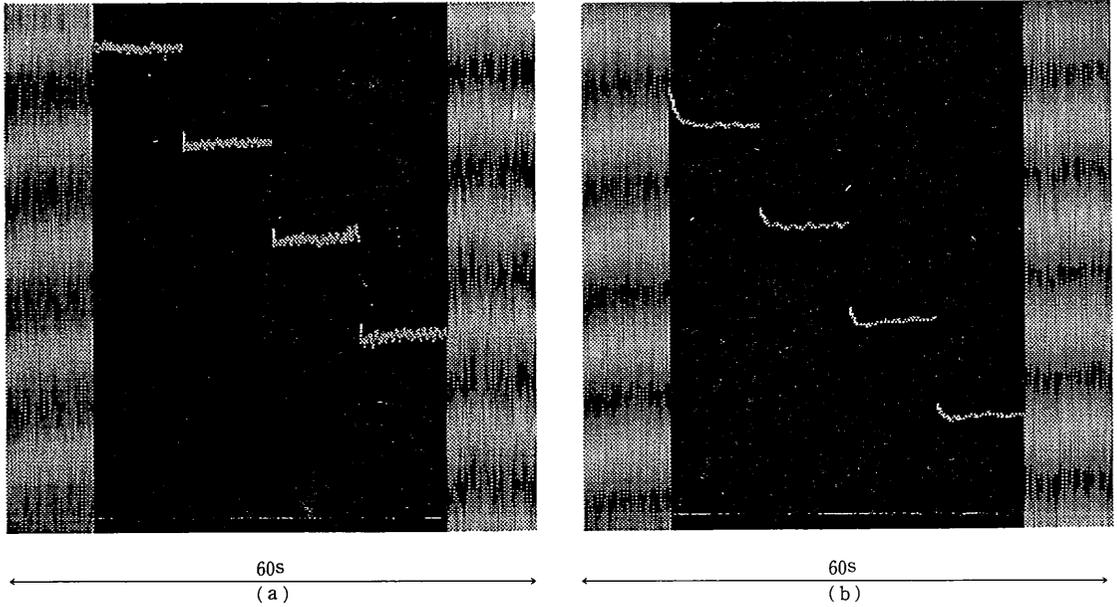


図 5 1 自由度の歩進動作の実験の結果。(a)フィードバックゲイン大、(b)フィードバックゲイン小、Yスキャナを制御し、Xスキャナの電圧は一定に保った。はじめとあとの1s間はワンラインスキャンによる像の取得、中間の部分では、1sごとの歩進動作を行わせた

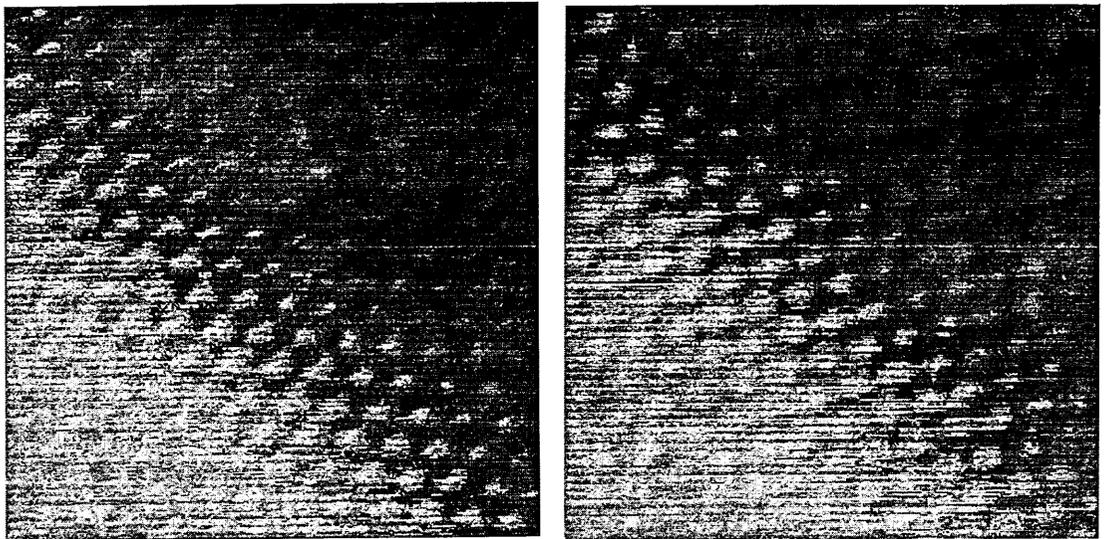


図 6 グラファイトの生像

いることがわかる。上記の歩進動作を2次元に拡張することによって結晶を基準としたXYテーブルの位置決めが可能となる。

4.3 比較測長に関する実験と誤差の補正

結晶を用いた比較測長の精度を評価する実験を行った。精度の評価にはDTU STMの2個の探針を用いて結晶を同時に観察することが有効であると考えた。実験にお

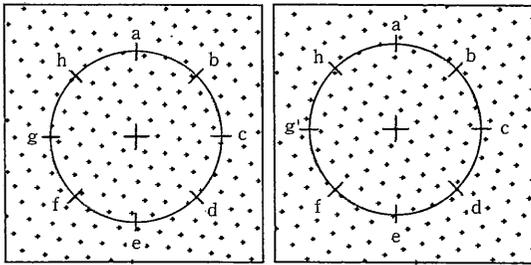


図7 グラファイトの生像から抽出された特徴点

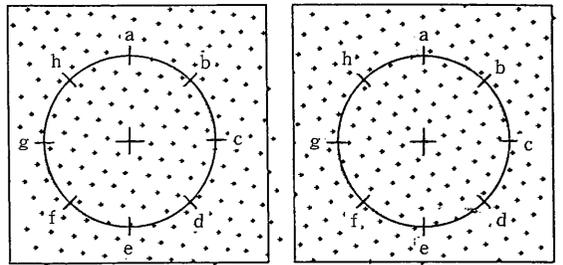


図8 ドリフトと試料の傾きを補正した後の特徴点

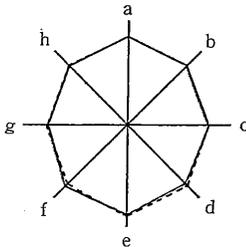


図9 ドリフトと試料の傾きの補正を行った後の見かけの半径の大きさ

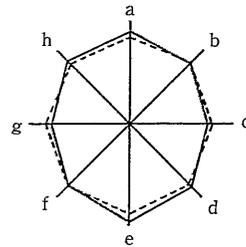


図10 補正を行う前の見かけの半径の大きさ

いては、1個のグラファイト小片に2個の探針を同時に近接させて像の取り込みを行った。今までの報告では、2個の生像の比較を行っていた。本報では、比較の誤差要因として考えられる、探針と試料のドリフトと試料のXY平面に対する傾きによって生じるコサイン誤差に対する補正を行った。なお、熱ドリフトの測定にはワンラインスキャンを行い、像の流れから時間に対するドリフト量を算出した。図6に1組のグラファイトの生像を、図7に特徴点を抽出した図を、図8には熱ドリフトとコサイン誤差の影響を補正した結果を示す。図8においては、補正の結果、抽出点が枠の外にはみ出している。像の補正によって2個の結晶像の見かけの長さの一致がどの程度改善されるかを調べた。そのために結晶像中に円を描き、その見かけの半径を図中のa, b, …, hの8方位に関して結晶格子を数えて算出した。図9に、補正後に関する算出結果を、図10に補正前に関する算出結果を示す。

図9と図10の8角形を比較すると、補正によって見かけの長さが改善されることがわかる。なお、8角形はa-eの方向に長くなっている。これはY方向のスカナがX方向のスカナよりも電圧に対する感度が低いことに起因すると考えられる。X, Yの方向に適当な倍率を掛けて8角形が正8角形に近くなるようにすることによって、方位による差を低減することが可能になると考えられる。表1に補正前後の見かけの半径の長さの相違を%で表したものを記す。

表1 各方位の見かけの半径の誤差

	a	b	c	d	e	f	g	h
補正前 (%)	6.6	1.2	5.1	4.5	9.2	1.2	7.7	4.5
補正後 (%)	0	0	0	3.7	2.2	3.5	2.5	1.2

5. 今後の課題

位置決めに関しては、制御を2自由度に発展させ、規則正しいXYテーブルの動きを加工などに応用する。比較測長に関しては、ハードとソフトの両面の改良から走査に要する時間を短縮する。これは、熱ドリフトが比較測長の精度に与える影響を低減するためである。100nmオーダで結晶同士の比較測長を行って測定の精度を把握し、その後、加工物の寸法評価に応用する。本報で行った像の補正では、XYスカナの相互干渉の影響を考慮していなかった。今後の課題として、XYスカナの干渉を推定し、比較測長の精度を高める必要がある。以上の位置決め技術および比較測長法をAFMに適用することが可能である。デュアルAFMの開発もあわせて行う。

6. あとがき

本報では平行並進型の新しい粗動機構を用いたデュアルトンネルユニットSTM (DTU STM (Ver 1.5)) を用

研究速報

いて実験を行った。XYテーブルに35 μ mの微小振幅のディザ振動を印加して像の微分をリアルタイムで取得し、その信号を用いてXYテーブルの位置決め制御を行った。その結果、10 μ mオーダの変動で位置決め点を保持することと、結晶を基準としてXYテーブルに歩進動作を行わせることに成功した。比較測長に関しては、生像に対して熱ドリフトと試料の傾きに関する補正を行い、補正によって比較測長の精度が向上することを確認した。

謝 辞

矢野健氏(株)トーキン)にはスキヤナ用ピエゾ素子の提供をいただきました。渡辺和俊氏(セイコー電子工業(株))には探針の提供などさまざまなご指導をいただきました。両氏に深く御礼申し上げます。本研究は、その一部を東京大学生産技術研究所の選定研究費によって行われました。(1991年8月7日受理)

参考文献

- 1) G. Binning, Ch. Gerber, T.R. Albrecht and C.F. Quate, Phys. Rev. Lett. 56, 930 (1986).
- 2) eg. Molecular Nanotechnology, Palo Alto, Calif. Nov 1991.
- 3) G. Binning and H. Rohrer, Helv. Phys. Acta 55, 726 (1982).
- 4) H. Kawakatsu, Y. Hoshi, T. Higuchi and H. Kitano, J. Vac. Sci. Technol. B 9, Mar/April (1991).
- 5) H. Kawakatsu, Y. Hoshi, H. Kitano and T. Higuchi, in Proceedings of the 4th IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, Nara, Japan (IEEE 1991).
- 6) H. Kawakatsu, T. Higuchi, J. Vac. Sci. Technol. A 8, Jan/Feb (1990).
- 7) D.W. Pohl and R. Möller, Rev. Sci. Instrum. 59, 840 (1988).
- 8) D.W. Abraham, C.C. Williams and H.K. Wickramasinghe, J. Microsc. 152, 599 (1988).