結晶格子と走査型トンネル顕微鏡を用いた 原子トラッキング制御の高安定化*

— 原子エンコーダの検証 —

外川陽一** Pongpun Rerkkumsup** 本田 裕** 明田川正人† 高田孝次††

Highly stable atom-tracking control of using regular crystalline lattice and scanning tunneling microscope
— Validation of Atomic Encoder —

Yoichi TOGAWA, Pongpun RERKKUMSUP, Hiroshi HONDA, Masato AKETAGAWA and Koji TAKADA

In this article, we propose a technique for highly stabilized atom-tracking control of a scanning tunneling microscope (STM) tip by referring to an atomic point (or atomic array) on a regular crystalline surface. Graphite crystal, whose lattice spacing is approximately 0.25 nm, was utilized as the reference. To enhance stability of the atom-tracking control against external disturbances, a new atom-tracking controller, which consists of integrator, tracer and limiter units, was developed. The integrator unit is designed to eliminate the steady-state error due to thermal drift. A phase-lag low-pass filter is utilized as the tracer unit to compensate the disturbance due to vibration/acoustic noise. To improve the phase margin of the controller, the limiter unit consists of a phase-lead high-pass filter and a saturator whose output is less than one-half of the lattice spacing. The performance of the stabilized technique, which is to combine the new tracking controller with enhanced STM stiffness, was evaluated using internal/external artificial disturbance generators. The experimental results show that the proposed method has a high capability for maintaining atom-tracking control without any jumping of the STM tip to neighboring atoms, even in a noisy environment. The method was also applied to atom-stepping control of the STM tip by referring to some crystalline axis. The atom-stepping control atom by atom along the crystalline axis over a range of 200 atoms, at a rate of 10 atoms/sec, was performed without missing the atomic array.

Key words: scanning tunneling microscope (STM), atom-tracking, regular crystalline lattice, disturbance, atomic encoder

1. 序 論

ナノテクノロジーの急速な進展に伴い、サブnmオーダー精度をもつ位置決め法の開発が求められている。従来より、この用途にはレーザ干渉測長機が用いられているが、波長以下の変位を決める位相補間にnmオーダーの誤差が混入し¹⁾、サブnm精度の位置決めは困難であると考えられる。結晶格子の格子間隔はおよそ0.2 nmであり、結晶自体が無応力で格子欠陥がなければ、これは長期にわたって安定し、これを基準とする位置決め法が可能と考えられる。例えば格子間隔毎にステージ等を連続ステップ移動させ、格子間隔を基準として変位を検出する技術（本報ではこれを原子エンコーダと定義する）があれば、ナノメートル領域での位置決め（測長）に多いに貢献すると思われる。シリコンの格子間隔を測定するX線干渉計では、この技術が開発されている²⁾。しかしX線干渉計は装置が特殊であり、充分なコントラストを一定に保つ調整が微妙な為、産業界では一般に利用されていない。走査型トンネル顕微鏡（Scanning Tunneling Microscope : STM）³⁾は、原子まで捉える高分解能性、簡便性から表面技術の分野で浸透している。結晶格子をスケールに、STMを検出器として組み合わせれば、結晶格子を基準とする位置決め法（あるいは変位検出法）を開発できる可能性がある^{4),5)}。STM探針を

高速で微小円運動（ディザ振動）させてトンネル電流を変調し、この変調信号と同期した参照信号をロックインアンプにより同期検波（ロックイン検出）することで試料表面の凹凸情報（= 2次元の傾斜信号）が得られる⁶⁾。ディザ振幅を格子間隔以下としたとき、傾斜信号がゼロになる点は原子頂点（又は底点）となるので、これらをゼロとするようにSTM探針（又は試料）の位置を制御すれば、STM探針を常に原子頂点に位置決めできる^{7)~9)}（本報では、これを原子トラッキング制御と呼ぶ）。これを利用し、STM探針を格子配列上の隣り合う原子頂点へステップ移動させる位置決め（= 原子エンコーダ）が開発可能と考えている。しかし原子トラッキングは振動、音響、熱ドリフトなどの外乱に対する安定性が低く、例えば外乱の多い昼間の環境下では長時間安定した制御を達成することが困難である。原子エンコーダを実用化する為には、外乱に対して、よりロバストな原子トラッキング制御が必須である。

以上の背景を基に、本報では以下の検討を行った。

- (1) 外乱ノイズの調査を行い、その結果を基に、外乱に対してロバストなトラッキングコントローラを設計した。
- (2) 外乱発生器をSTMに組み込み、原子トラッキング制御の安定性を評価した。
- (3) 新たに設計したトラッキングコントローラを利用して、格子配列に沿ったSTM探針の原子ステップ移動を行った。

* 原稿受付 平成16年3月25日

** 学生会員 長岡技術科学大学大学院

† 正 会 員 長岡技術科学大学（新潟県長岡市上富岡町 1603-1）

†† 正 会 員 長岡工業高等専門学校（新潟県長岡市西片貝町888）

Fig. 1 A schematic of an STM used in experiments. A tube-type XYZ PZT actuator is used as a sample scanner for XY raster scanning, atom-tracking and Z-servo operation. The tube-type XY PZT actuator is used as a tip scanner for dither modulation

Table 1 Stiffness and resonant frequencies of the STM head (4 springs / 2 springs) and environmental conditions

Stiffness	Vertical Horizontal	5.3 / 2.8 N/ μ m 3.9 / 2.4 N/ μ m
Resonant freq.	Vertical Horizontal	471 / 320 Hz 402 / 340 Hz
Thermo-stabilized cell	Sound reduction	-10 dB
	Sound level (typical, inside)	Nighttime 40-45 dB Daytime 70-75 dB
	Temperature stability	± 0.05 K
Thermal drift	Rate (typical)	10-50 nm/h
Vibration-isolation table	Resonant frequency	2 Hz

2. 走査型トンネル顕微鏡の構成と外乱ノイズの調査

2.1 走査型トンネル顕微鏡の構成

図1に実験で使用したSTMの概略図を示す。STMは、電流電圧変換器 (IVC) と探針用XY軸チューブスキャナからなるヘッド部と、試料用XYZ軸チューブスキャナを組み込んだベース部からなる。STMを構成する部材はスーパーインバール (線膨張率 0.5×10^{-6} /K) で製作されている。探針スキャナはディザ振動に、サンプルスキャナは原子トラッキング制御とZ方向の制御に用いた。観察試料にはグラファイト結晶 (Highly oriented pyrolytic graphite : HOPG) を用いた。ヘッド部はベース部にばね (ばね定数10 N/m) で固定されている。実験では2種のばねを用いた。STM本体は恒温セル¹⁰⁾の中に入れ、さらにそれらを除振台 (共振周波数2 Hz) に設置した。装置剛性と環境条件を表1に示す。

2.2 外乱ノイズの調査

振動や音響、熱ドリフトなどの外乱が原子トラッキング制御に大きな影響を及ぼす。外乱の多い昼間の環境下では、探針が制御中、次々に他の原子に移動し、安定した制御を長時間行うことが困難である。この原因を探る為、外乱の周波数成分をラスタ走査を行わないときのトンネル電流のスペクトラムから調査した。このとき、外乱がなければZサーボによりトンネル電流は

Fig. 2 The effects of external disturbance on the spectrum of the tunneling current without XY raster scanning. The top (a), middle (b), and bottom (c) power spectra are for a normal-stiffness STM in daytime, enhanced-stiffness STM in daytime, and normal-stiffness STM in nighttime environments, respectively

一定となるはずである。外乱がトンネル電流に混入すれば、そのスペクトラムから外乱の周波数特性が判る。I/Vコンバータの出力を、(1)昼間 / 剛性を強化しない、(2)昼間 / 剛性を強化、(3)夜間 / 剛性を強化しない、の3個の条件下でFFTアナライザを用いて調査した。このとき、トンネル電流の目標値は2 nA (バイアス電圧 = 50 mV) とした。FFTの平均化を3分間行なった結果を図2に示す。同図(a), (b), (c)はそれぞれ、昼間/剛性を強化しない、昼間/剛性を強化、夜間/剛性を強化しないの場合の結果を示す。図2より以下の事が判る。

- (1) 昼間は夜間より外乱成分が多い。特に100 Hz以下が多い。
- (2) ヘッド固定のばねを強化すると剛性の向上に伴い外乱によるトンネル電流のノイズは減少する。特に100 Hz以上では夜間とほぼ同等である。

3者間で100 Hz以上でも差は見られるが、10 pA程度の領域であり、100 Hz以下を外乱の主成分とした。また200 Hz以上はほぼホワイトノイズであった。我々のシステムでは、傾斜信号を検出するロックインアンプの帯域が160 Hz (-3 dB落ち) であるので、160 Hz以下の外乱はコントローラで補償し、160 Hz以上は剛性の強化で抑制することで原子トラッキングの安定化を図った。

3. 原子トラッキング制御安定条件とコントローラの設計

3.1 原子トラッキング制御安定条件

図3(a)に原子トラッキング制御システムの概略図、(b)に同図(a)を簡略化した制御系のブロック線図を示す。同図(b)に示される $A_c(t)$ 、 $A_d(t)$ はそれぞれサンプルスキャナに印加される位置制御量、外乱変位と定義する。制御中、STM探針が目標となる原子を見失うことなく原子トラッキングを達成するためには、次式を満たす必要がある。

$$|A_d(t) - A_c(t)| \leq kd \quad (1)$$

ここで、 k は定数で $0 \leq k \leq 1/2$ 、 d は格子間隔を示す。式 (1) は、位置制御量と外乱変位の偏差が格子間隔の半分以下なら、STM探針が他の原子に移動しないことを意味する。また外乱は、A) 熱ドリフトなどのランパ的な変位外乱、B) 音響・振動などの周期的な正弦波状の変位外乱の2種類に大きく分けられ、これらはコントローラでそれぞれ補償されなければならない。以下、

Fig. 3 (a) is a schematic block diagram of an atom-tracking system. (b) is a simplified control block diagram of the closed-loop atom-tracking system. $A_c(t)$ and $A_d(t)$ are control signal and disturbance displacement, respectively

式 (1) を基にして熱ドリフトと音響・振動変位それぞれに対する補償条件を述べる。

3.2 熱ドリフト補償条件

熱ドリフトは、熱変形による探針・試料間の相対変位であり、測定時間と熱ドリフト速度の積と考えることができ、ランプ状の変位外乱として扱ってよい。従って、次式のように与えられる。

$$A_d(t) = k_{th}t \quad (2)$$

ここで、 $A_d(t)$ は熱ドリフト量、 k_{th} は熱ドリフト速度を示す。熱ドリフト量 $A_d(t)$ と探針（又は試料）の位置制御量 $A_c(t)$ との間の定常偏差 e_{ss} が格子間隔の半分以下なら、STM探針が他の原子に移動することなく制御が達成される。従って、式 (1) と式 (2) から、次式を満たせば良い。

$$\begin{aligned} |e_{ss}| &= \lim_{t \rightarrow \infty} |A_d(t) - A_c(t)| \\ &= \lim_{t \rightarrow \infty} |k_{th}t - A_c(t)| \leq kd \end{aligned} \quad (3)$$

定常偏差は積分器で補償することができ、式 (3) を用いて、後示すコントローラの積分ゲインを決定できる。

3.3 音響・振動外乱補償条件

音響・振動外乱は周期的な正弦波状の変位と考えられる、そこで、外乱による変位を $A_d \cos(\omega t)$ 、制御量を $A_c \cos(\omega t - \phi_c)$ とおく。ここで、 A_d 、 A_c 、 ϕ_c 、 ω はそれぞれ、音響・振動の外乱振幅、位置制御量の振幅、制御信号の位相遅れ、角周波数を示す。外乱変位 $A_d \cos(\omega t)$ 、位置制御量 $A_c \cos(\omega t - \phi_c)$ を式 (1) 中の $A_d(t)$ 、 $A_c(t)$ と置き換えると、制御中STM探針が隣の原子へ移動することなく原子トラッキングを達成する為には、次式が成立する必要がある。

$$\begin{aligned} |A_d \cos(\omega t) - A_c \cos(\omega t - \phi_c)| \\ = \left| \sqrt{A_d^2 - 2A_dA_c \cos(\phi_c) + A_d^2 \cos^2(\omega t - \phi_c)} \right| \leq kd \end{aligned} \quad (4)$$

Fig. 4 A schematic block diagram of the newly proposed controller. The controller consists of integrator, tracer (Phase-lag low-pass filter) and limiter (Phase-lead high-pass filter + Saturator) units

Fig. 5 The experimental system used to evaluate the performance and the robustness of the new stabilization technique

これはさらに次式のように書き換えることができる。

$$1 - 2 \frac{A_c}{A_d} \cos(\phi) + \left(\frac{A_c}{A_d} \right)^2 \leq \frac{k^2 d^2}{A_d^2} \quad (5)$$

$|A_c/A_d|$ とその位相遅れ ϕ は原子トラッキング制御系の閉ループ伝達関数で決定できるので、外乱振幅 $A_d(\omega)$ が決まれば、式 (5) を用いて制御振幅 $A_c(\omega)$ を評価できる。このシミュレーション結果は後に述べる。

3.4 トラッキングコントローラの設計

以前まで原子トラッキング制御のコントローラとして経験的に調整したPI (Proportional - Integral) コントローラを用いていたが⁹⁾、昼間の環境下で長時間安定した制御を達成することは困難であった。外乱ノイズの調査から得た安定化の指針を基に、熱ドリフトと音響・振動をそれぞれ補償するコントローラを設計した。新たに設計したトラッキングコントローラのブロック図を図4に示す。トラッキングコントローラはインテグレート部 (ゲイン K_I)、トレーサ部 (ゲイン K_T)、リミッタ部 (ゲイン K_L) からなる。インテグレート部には熱ドリフトなどのランプ状外乱変位による定常偏差を除去する為に積分器を用いた。ロックインアンプのカットオフ周波数 (160 Hz) 以下の音響・振動外乱を補償し、かつ高周波外乱をカットオフする為、トレーサ部には帯域が調整可能な位相遅れ補償器 (Phase-Lag Low-Pass Filter : LPF) を用いた。160 Hzでの位相遅れを改善するため、リミッタ部には位相進み補償器 (Phase-Lead High-Pass Filter :

Table 2 Experimental conditions of the tracking system

STM	Sample	Graphite (HOPG)
	Tip	$\phi 0.25$ mm, Pt-Ir
	Bias voltage	50 mV
	Set-point current	2 nA
	Sample scanner sensitivity	7.8 nm / V
Dither modulation	Tip scanner sensitivity	5.6 nm / V
	Amplitude	≈ 0.01 nm
Lock-in amplifier	Frequency	10 kHz
	Input amplification	$\times 10$
DSP (AD/DA)	Cut-off freq. (-3 dB)	160 Hz
	Slope	-20 dB / decade
	Sampling freq.	5 kHz

Fig. 6 Experimental results of the performance assessments for (a) the new controller + enhanced springs and (b) the PI controller + normal springs. The upper and lower signals are the internal artificial disturbance and the controlled displacement, respectively. The displacement is determined using the sensitivity of the sample scanner and the X control signal applied to the sample scanner

HPF) を用い、HPF を通過する高周波ノイズを飽和器で格子間隔の半分以下に制限する。

実際の実験では、それぞれのゲインを以下のように決定した。

- (1) ゲイン K_I ($= 0.05$) は、そのときの熱ドリフト量 (典型値 10 nm/h) を基に式 (3) を用いて計算・調整した。
- (2) ゲイン K_T ($= 0.005$) は、閉ループ伝達関数が $|A_c(\omega)/A_d(\omega)| = 0.9$ となるように、式 (5) を用いて調整した。
- (3) ゲイン K_L ($= 0.035$) は、160 Hz での位相遅れが 30° 以内になるよう調整した。

4. 原子トラッキング制御安定性評価実験

外乱発振器をSTMに直接挿入し、提案したトラッキングコントローラを以前調整したPIコントローラと比較・評価した。図5に原子トラッキング制御安定性評価の実験システムを示す。実験システムは、2つのチューブスキャナからなるSTM、I/Vコンバータ、ロックインアンプ (NF回路社, 5610B)、STMコントローラ (デジタルインスツルメンツ社, NanoscopeIII)、トラッキングコントローラ (DSP + 16 bit AD/DA, システムデザインサービス)、外乱発振器、ディザ発振器から構成される。音響ノイズに対する安定性を評価する為、除振台とは切り離れた台にスピーカを設置した。サンプルスキャナで原子トラッキング制御とZ方向の制御を行う。探針スキャナはディザ振動に利用する

Fig. 7 A relationship between the maximum controllable disturbance amplitude and the frequency for the artificial internal disturbance

Fig. 8 (a) A part of the long atom-tracking control against disturbances in daytime. (b) and (c) Expanded images of I/II portions shown in (a), and the relationship between the internal disturbance and controlled displacement

と共に、人工的な外乱信号を直接混入させる。実験手順を以下に述べる。

- (1) コントローラを介してXY方向の傾斜信号をサンプルスキャナにフィードバックし、特定の原子頂点にSTM探針を静止させる原子トラッキング制御を行う。
- (2) 原子トラッキング制御中、探針スキャナのX方向に、音響・振動の周期的な外乱変位を想定し、正弦波信号を印加する。
- (3) 外乱信号とX方向の制御信号を同時に観察する。このとき、制御信号が外乱信号に対して同期かつ安定し、ある評価時間以上STM探針が隣の原子へ移動しなければ、制御は成功したと判定する。隣の原子への移動は制御信号と傾斜信号の変化から判定できる (ここで評価時間は1分とした)。

外乱信号をある周波数に固定した状態でその振幅を増加していき、制御可能な振幅を調査した。実験は、(1)新トラッキングコントローラ / 剛性を強化したSTM (バネを4本)、(2) PIコントローラ / 剛性を強化しないSTM (バネを2本)、2通りの条件で行った。

安定性評価実験は外乱の少ない夜間に行った。実験条件を表2に、実験結果を図6に示す。同図(a)は新しいトラッキングコン

Fig. 9 STM image of graphite crystal surface. X and Y are the scanning axes of the sample scanner. X' and Y' , respectively, are the axes parallel and normal to the crystalline axis. θ is the angle between the X and X' axes

Fig. 10 Schematic block diagram of the atom-tracking and stepping control by referring to atomic arrays in the direction θ

トローラ、右側(b)はPIコントローラの結果を示し、それぞれの図で上の信号と下の信号は、外乱信号と制御信号を示す。PIコントローラのPゲイン ($= 0.007$), Iゲイン ($= 0.05$) は実験的に決定した⁹⁾。変位は制御信号の電圧値 (ピエゾ印加電圧) とスキャナの感度から決定した。なお、スキャナの感度は実験前後で原子像から校正した。図6において、トラッキングコントローラの方がより高い振幅の外乱に追従している。図7にトラッキングコントローラとPIコントローラの制御可能な領域を示す。同図(a), (b)はそれぞれトラッキングコントローラ, PIコントローラの結果を示す。外乱の周波数が40 Hz以下の領域において、新しいトラッキングコントローラは格子間隔以上の外乱変位に追従可能となった。同図(c), (d)は、式 (5) ($k = 1/2$, $d = 0.25$ nm) を用いたシミュレーション結果を示し、それぞれ新しいトラッキングコントローラ, PIコントローラの結果である。新トラッキングコントローラは、シミュレーション結果よりも若干劣るが、ほぼ似た傾向を示す。

次に原子トラッキング制御の時間安定性 (= 熱ドリフト追従性) を調査した。実験では、探針スキャナのX方向に0.1 nm, 5 Hzの正弦波外乱信号と同時に75 dBの音響ノイズ (通常の昼間の音響レベルより若干高い) を加え、昼間の環境下で30分間原子トラッキング制御を行った。結果の一部 (最初の5分間) を図8に示す。同図(a)は制御信号の時間変化を示す。また図中(b),

Fig. 11 An experimental result of a stepping control of a STM tip by referring to atomic arrays along the selected direction. The displacement is determined using the sensitivity of the sample scanner and the XY control signal applied to the sample scanner. The crystalline angle and control time were of 40 degrees and 20 sec, respectively

(c)は同図(a)のI/II部分の拡大図を示す。(a)の右下がりの傾きは、X方向の熱ドリフトを補償していることを示す。(b), (c)は、75 dBの音響ノイズが存在しても外乱信号に追従しており、同時に長時間熱ドリフトを補償しながら原子トラッキング制御が達成できていることを示す。実験時の熱ドリフトはおよそ15 nm/hであった。制御中、制御信号に格子間隔相当の急激な変化は見られなかった。従って、30分間他の原子へ移動することなく熱ドリフトを補償し原子トラッキング制御が達成されたことを確認した。

以上より、今回新たに提案したトラッキングコントローラを用いることで、外乱の多い昼間の環境下でも原子トラッキング制御が安定に動作することが判った。

5. 原子エンコーダの検証

本節では、安定化を実現したトラッキングコントローラを用いて、格子配列に沿ったSTM探針の原子ステップ移動を調べた。図9は、STMで観察できるグラファイト結晶原子像と原子ステップ移動の位置関係を示す。スキャナの駆動軸を XY 軸、格子配列に平行な軸を X' 軸、それに垂直な軸を Y' 軸、また X 軸と X' 軸のなす角を θ とする。実験では、 X' 方向に原子毎にSTM探針をステップ移動させることを目指す。図10に、図9で示した角度 θ をパラメータとするSTM探針の原子ステップ移動の制御ブロック図を示す。図10において、通常の原子トラッキング制御にステップ移動のブロック (同図点線で囲まれた部分) を追加した。なお実験システムは図5から変更点はない。実験手順を以下に述べる。

- (1) STM原子像から、スキャナの X 軸と格子配列 X' 軸のなす角度 θ を割り出す。
- (2) XY 方向の傾斜信号がゼロになるように制御し、制御値をサンプルスキャナにフィードバックすることで原子トラッキング制御を行う。
- (3) 図10にあるように、1ステップが格子間隔相当となる階段波のcos成分 (X 軸), sin成分 (Y 軸) を、 XY 制御信号に

Fig. 12 A time variation of the displacement of the sample scanner in X' -axis direction (= stepping direction). The displacement is determined using the sensitivity of the sample scanner and the X' control signal applied to the sample scanner

加算する。

実験では、熱ドリフト極力抑制するために、恒温セル内でスキャナ走査を約1日継続してから実験を行った。実験結果を図11、図12に示す。図11は制御信号の軌跡を示し、横軸、縦軸はそれぞれ X 方向、 Y 方向の変位を示す。このとき格子配列と X 軸のなす角度 θ は約 40° であった。10原子/secのステップ移動を試みた。制御範囲が約25 nmと狭く、ピエゾの非線形性が小さいと考えられる為、スキャナの変位は制御信号の電圧値（ピエゾ印加電圧）とスキャナの感度の積より決定した。始点と終点でのずれは熱ドリフトによる変位と考えられる。なお、スキャナの感度は前節と同様に実験前後に原子像から校正した。ここから読み取った XY 方向の熱ドリフト速度はそれぞれ9 nm/h、29 nm/hであった。これはデータ取得前後の原子像から読み取った XY 方向の熱ドリフト速度と一致し、正しく元の原子に戻っていることを示す。図12は格子配列方向を X' 軸とした場合の、 X' 方向の制御信号の時間変化を示す。このとき、 XY 傾斜信号はほぼゼロに制御された。1ステップに相当する変位がほぼ格子間隔である $0.25 \text{ nm}^{11)}$ であり、原子ステップ移動が達成されていることがわかる。これ以上広い領域での検証には、ピエゾ印加電圧と変位の間の非線形性が現れるので、他の変位検出法との比較・検出が必要と考えている。

6. 結論と今後の課題

本論文の結論は以下の通りである。

- (1) 外乱ノイズの調査を行い、それを基に外乱に対してロバストなトラッキングコントローラを設計した。
- (2) 提案したトラッキングコントローラは、40 Hz以下の領域なら格子間隔以上の振幅を持つ正弦波状外乱を補償可能になった。外乱の多い昼間の環境下でも熱ドリフトを補償しながら最長30分間原子トラッキング制御を達成でき、昼間での使用を可能とした。
- (3) 格子配列方向に沿ってSTM探針の原子ステップ移動を行い、25 nm（100原子）の範囲を1秒間に10原子の速さで一往復させた。

これらの成果により、原子トラッキング制御の高安定化が達成され、結晶格子を基準とする原子エンコーダ実現の可能性が確認された。原子エンコーダの実用化には、最大5000原子/sec程度の移動速度が望まれる。今後の課題として制御範囲の拡大と高速化を想定している。

謝 辞

この研究は科学研究費補助金の助成を受けた。ここに謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) Chien-ming Wu, John Lawall, and Richard D. Deslattes : Heterodyne Interferometer with Subatomic Periodic Nonlinearity, *Appl. Opt.* **38**, 19 (1999) 4089.
- 2) A. Bergamin, G. Cavigner, and G. Mana : Quantized Positioning of X-ray Interferometers, *Rev. Sci. Instrum.* **68**, 1 (1997) 17.
- 3) G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber and E. Weibel : Through a Controllable Gap, *Appl. Phys. Lett.*, **40**, 2 (1982) 178.
- 4) H. Kawakatsu and T. Higuchi : A Dual Tunneling-Unit Scanning Tunneling Microscope, *J. Vac. Sci. Technol.*, **A8**, 1 (1990) 319.
- 5) M. Aketagawa, K. Takada, K. Kobayashi, N. Takeshima, M. Noro and Y. Nakayama : Length Measurement Using a Regular Crystalline Lattice and a Dual Tunneling Scanning Tunneling Microscope in a Thermo-stabilized Cell, *Meas. Sci. Technol.*, **9**, 7 (1998) 1076.
- 6) D.W. Pohl and R. Möller : Tracking Tunneling Microscopy, *Rev. Sci. Instrum.*, **59**, 6 (1988) 840.
- 7) H. Kawakatsu, Y. Hoshi and T. Higuchi : Crystalline Lattice for Metrological Applications and Positioning Control by a Dual Tunneling-unit Scanning Tunneling Microscope, *J. Vac. Sci. Technol.* **B9**, 2 (1991) 651.
- 8) 佐久田茂, カマル・ヨゼフ = トーミ : STMを用いた超精密角度センサ (第1報) - 誤差解析とピッチング測定 -, *精密工学会誌*, **62**, 3 (1996) 807.
- 9) M. Aketagawa, K. Takada, Y. Minao, Y. Oka and J.D. Lee : Tracking and Stepping Control of the Tip Position of a Scanning Tunneling Microscope by Referring to Atomic Points and Arrays on a Regular Crystalline Surface, *Rev. Sci. Instrum.*, **70**, 4 (1999) 2053.
- 10) M. Aketagawa, K. Takada, N. Takeshima, K. Yamada and J.D. Lee : Long Atomic Imaging over a $5\text{-}\mu\text{m}$ -Long Region Using an Ultralow Thermally Drifted Dual-Tunneling-Unit Scanning Tunneling Microscope in a Thermostabilized Cell, *Rev. Sci. Instrum.* **70**, 1 (1999) 133.
- 11) P. Rerkkumsum, M. Aketagawa, K. Takada, T. Watanabe and S. Sadakata : Direct Measurement Instrument for Lattice Spacing on Regular Crystalline Surface Using a Scanning Tunneling Microscope and Laser Interferometry, *Rev. Sci. Instrum.*, **74**, 3 (2003) 1205.