

走査トンネル顕微鏡の雑音と測定限界

宮 尾 正 大

仙台電波工業高等専門学校 〒989-31 仙台市青葉区上愛子北原 1

(1992年9月17日受理)

Detection Limit and Noise in Scanning Tunneling Spectroscopy

Masahiro MIYAO

Sendai National College of Technology
Kitahara, Kamiyashi, Aoba-ku, Sendai 989-31

(Received September 17, 1992)

STM 装置は装置の発生する雑音によって測定値がゆらぎ、これにより装置の測定限界は決定される。本論文では具体的な回路を想定し、この回路が発生する残留雑音により決定される測定限界が具体的に決定されることを示した。さらに、トンネル電流自身をもつ雑音が、この測定結果にどのように影響するかを調べた。そして、この結果より STM 装置を用いるときに、最適な測定条件が、測定時間、トンネル電流、トンネルバイアス電圧によりどのように変化するかを示した。その結果によると、STM データの雑音による測定限界は測定時間には依存しない。また、トンネル電流には、測定時間より決まる最適な値があることが判明した。

1. はじめに

走査トンネル顕微鏡 (STM) の誕生は、われわれに容易に固体の表面原子像を観察する手段を与えてくれた。そして、この顕微鏡のデビューを飾ったシリコン (111) 表面の超構造の画像は、われわれに驚愕に近い鮮烈な印象を与えると同時に、表面物理の地平線をはるかな先へと広がることを予感させるものであった。この予感はまさに的中し、STM の発明から 10 年、この素晴らしい顕微鏡は多くの研究者を魅了し、表面科学の分野だけでなく、半導体、生物、化学、金属の各分野で広く利用されるようになり、現在では商品として多数の機種が市販され容易に利用できるようになった。STM は、これらの機器を購入すればすぐに動作する分析機器として分析機器の世界に定着した。

しかし、現実には STM を用いて実験を行ってみると原因のわからないノイズに悩まされることが多く、安定な原子像が常に得られるというわけにはいかないことが多い。これは、STM がわれわれのもつ技術での測定限界に近い状態で動作しているため、装置の内外で発生するさまざまな雑音が原子像に代表される表面の微細な像

の観測を妨げているからである。STM の歴史はこの雑音との戦いの歴史ともいえ、STM の生みの親である Binnig と Rohrer の装置も¹⁾、環境からの振動との戦いの解答書といえるようなものであった。Yan Kuk²⁾の探針の先端の形状と測定対象の表面の起伏の大きさが装置の雑音の上限を規定する、いいかえると STM 装置の雑音が探針の尖り具合とあいまって測定限界を決めているという指摘からも明らかのように、STM 装置の雑音は装置の性能を規定するもっとも重要な問題なのである。

STM 装置の雑音には、装置の環境から受ける機械振動のほかに STM 装置自身が発生する雑音がある。前者の雑音は防振技術を駆使することにより、あるいは STM 装置の設置環境を選択することにより、満足できる程度に減少させることが可能である。この外部からの機械的な雑音とその防除方法に関しては多くの技術文献と解説書³⁻⁶⁾があるので本論文では取り上げないことにする。

STM 装置自身の発生する雑音には機械的な雑音と電気的な雑音があり、機械的な雑音には駆動装置が発生する雑音と、装置の熱振動自身によるゆらぎが考えられる。装置の格子振動 (フォノン) による測定限界に関す

る考察は Keavens⁷⁾ により報告されているがその結果によると、格子振動の STM に与える影響は決して無視できず、低バイアスで特に問題となる。

STM を含めて、すべての電子装置は装置内部で必ず電気的な雑音が発生しており、これ以下の信号を取り扱うことができない。この電子装置内部で発生する雑音が装置の測定限界を決定する。しかしながら、この STM にとって深刻な雑音の、STM 測定限界に与える影響の解析は意外に研究の対象になっていない。STM 装置が発生する雑音と、測定限界に関する最初の解析は、STM 研究者によってではなく、この真空トンネル接合を重力波の検出器に利用しようとした研究者によってなされた^{8,9)}。この Bocko によってなされた解析は、トンネルジャンクションを重力波の検出器に用いたときの有効性に関する議論であった。しかし、STM 研究者にとって残念なことに、この論文では現実の STM 装置を想定していないいうえ、増幅器としては理想的な増幅器を考えていることなどより、実際の STM 測定装置の測定限界にはそのままでは適用できなかった。そこで、本論文は、まずはじめにこの Bocko によってなされた STM 装置の電気的残留雑音の解析を実際の STM 装置を想定して適用し、装置の残留雑音がどのようになり、この STM 装置で表面の高さ方向の測定限界がどのように規定されるかを明らかにする。

一方 STM の測定時に、装置の性能から期待される測定限界に比較して現実の STM の測定結果はるかに劣っていることがわかってきた。この原因が STM 測定の雑音が STM 装置の電気雑音と床などの震動からくる機械震動雑音のほかに、トンネル電流自身が雑音をもっている¹⁰⁻¹³⁾ ためであることがわかってきた。そこで、本論文の後半では、このトンネル電流自身の過剰雑音が測定限界をどのように規定するかを現実の STM 装置について評価する。

まず最初に、考えの基になる STM 装置を考えよう。ここでモデルとして考える STM 装置は、図 1 に示すようなパイプ形のアクチュエータと粗動用のアクチュエータおよびその駆動回路と、試料／探針間の距離を制御するサーボ機構から構成された標準的なものである。

STM 装置から発生する電気雑音は、高さ方向（以後、仮に Z 軸と呼ぶ）の制御ループ内で発生する雑音に加え、Z 軸サーボループ外、たとえば探針を制御が働くまで近づける、いわゆる Z 軸の粗動機構駆動回路、の発生する雑音がある。ここでは機械振動などの雑音は考えないことにする。

STM 装置では探針、アクチュエータ、制御回路が閉ループを構成しているので、雑音の影響を考えると

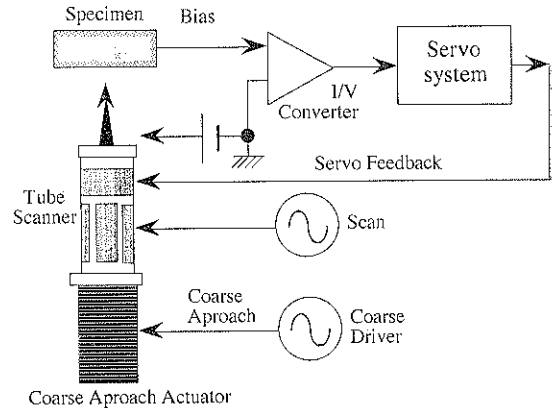


図 1 STM の概念図

注意が必要である。制御ループの中で発生する雑音は帰還制御により抑圧される。STM のサーボ機構は試料、探針と、トンネル電流を検出する電圧電流変換増幅器、トンネルギャップの非直線性を補正する対数変換器、それに Z 軸制御回路と、それによってドライブされるピエゾアクチュエータから構成される（対数変換器は省略されることがあるが、解析を容易にするために省略しないものとする）。また探針を表面に平行な方向に走査する走査機構（仮に XY 走査と名づける）、そして先ほどの Z 軸の粗動機構を構成するピエゾアクチュエータとそのドライバーが付属している。

以下、粗動機構により代表される帰還回路の外部で発生する雑音、帰還回路の内部で発生する雑音、それにトンネル電流が発生する雑音の影響の順に解析しよう。

2. 帰還回路の中で発生する雑音と外で発生する雑音

測定装置がサーボ機構である帰還回路を構成しているとき、帰還回路内部で発生する雑音は抑圧される。これより、帰還回路内部で発生する雑音と外部で発生する雑音とは取り扱いが異なってくる。

STM でのトンネルギャップ距離とトンネル電流の間には指数関数の関係があり、これを補正するための対数変換器が STM 装置には挿入される。指数関数的に変化するトンネル電流の雑音はピエゾアクチュエータ駆動回路の雑音とは異なる等価機械振動に換算できるので^{8,9)}、電気雑音の機械振動への換算はこの対数変換器の前後で異なる取り扱いをする必要がある。

以下で、帰還回路外で発生する雑音、帰還回路内で発生する雑音のうち線型近似のできる対数変換回路以降で発生する雑音、それに対数変換回路より前で発生する雑音の、STM 測定の限界に与える影響を分けて考える。

2.1 帰還回路の外で発生する雑音

まず最初に単純な帰還回路の外で発生する雑音を考えよう。モデルの STM 装置では、 X/Y 走引回路 (面内方向の雑音) や粗動接近機構のドライバーの発生する雑音がこれに相当する。

いま、アクチュエータの電気機械結合係数を $K[\text{\AA}/V]$ とし、駆動回路の出力に現れる雑音電圧を e_n とすると、この雑音により誘起される Z 軸の機械的なゆらぎの平均振動振幅、 $\langle Z_{app} \rangle$ は

$$\langle Z_{app} \rangle = K e_n \quad (1)$$

で与えられる。この値が要求精度を越えているときには何らかの方法、たとえばドライバーを改良するか帯域を制限する (雑音は帯域の平方根に比例する) などの方法により達成しなければならない。STM 装置はこの Z 軸の粗動アクチュエータのゆらぎにより測定下限が決定される。一方、 Z 軸粗動機構の可動範囲は、駆動回路の最大出力により上限が規定される。この二つの値の差、ダイナミックレンジは駆動回路の回路技術により決まってしまう。このため、必要以上に STM の Z 軸可動範囲を広く設計することは測定限界を引き上げてしまうので注意する必要がある。必要最低限の可動範囲に設計することが望ましい。この問題は XY 駆動回路でも同じである。測定対象にあわせて駆動回路の出力を変えることは STM 装置にとって望ましいことである。ピエゾアクチュエータに直列に容量を挿入する電荷制御駆動方式はこのような駆動範囲の制限には特に望ましい方式である。 Z 軸粗動回路は満足できる雑音レベルになるまで周波数帯域を狭めることは可能であり、使い難くはなるが実験に支障はきたさない。 Y 軸の走引速度は X 軸のそれに比べてゆっくりしているので、 X 方向駆動回路はそれほど広帯域を要求されない。 X 方向走査回路は高速性がある程度要求されるが、制御回路ほどではない。これらの対策により実用上問題にならない程度まで雑音を軽減することは容易である。

2.2 帰還回路の中で発生する雑音 (対数変換器以後の回路で発生する雑音の影響)

つぎに、制御ループ内で発生する雑音の測定限界に与える影響を考えよう。複数の増幅段数をもった増幅回路の内部で発生する雑音はすべて初段の入力で発生する等価雑音 e_n で置き換えることができる。増幅器の増幅率は十分に大きいと考えると、各増幅器で発生する雑音のうち、入力雑音のみが問題になる。ただしここで取り扱う入力とは対数変換器以後の増幅段の雑音を指している。ピエゾアクチュエータの電気機械結合係数を K 、ピエゾアクチュエータ駆動回路の出力から制御系の入力まで (ここでの制御系とは対数変換器の後に続く駆動

回路を指す) の系の感度係数を S 、制御系の増幅器 (この回路は一般的には積分器と高圧増幅器から構成されている) の利得を A とすると、帰還回路の一巡する利得は AS となる。よって出力に現れる雑音は負帰還理論でよく知られた式、

$$e_0 = \frac{A}{1+AS} e_n \quad (2)$$

が得られる。これより等価な探針の雑音によるゆらぎの平均値は

$$\langle Z_{app} \rangle = \left| \frac{AK e_n}{(1+AS)} \right| \quad (3)$$

となる。帰還回路を構成しないときに比較して、雑音によるゆらぎが $(1+AS)$ だけ低減できる。 A , K , S は周波数により変わるので、それぞれ周波数 F により変化する複素関数である。(3)式は単位周波数当りのゆらぎであるので、現実には観測されるゆらぎは、ゆらぎの各成分が独立であることより、2乗平均を測定帯域にわたって積分して平方根を求めることにより得られる。測定帯域とは1フレームの画像を測定する時間の逆数が下限、1ピクセルの画像信号を測定するために必要な検出器の通過高域周波数が上限となる。これは1フレームの画像を構成するピクセル数で決る。

2.3 電流電圧変換器より対数変換器までの間で発生する雑音の影響

STM 装置での雑音の測定限界に与える影響は探針を表面上に一定の距離に保つ制御系の雑音が一番大きい。対数変換器より前の段で発生する制御系の雑音のうち、一番問題となるのは電流電圧変換器の雑音である。そこで、以下に実際の電流電圧変換回路を想定し、この回路を用いたときに STM 装置の測定限界がどのように規定されるかを評価してみよう。モデルに用いる素子には、演算増幅器には現在容易に入手できる製品では最も雑音が少ない OPA-111 を使い、電流電圧変換形式には単純な帰還抵抗を用いる回路を用いる。帰還抵抗にはこれも現在容易に入手できる抵抗である金属皮膜抵抗を用いる。炭素皮膜抵抗は雑音が多いので望ましくない。また、帰還抵抗は $100 \text{ M}\Omega$ とした。抵抗値に $100 \text{ M}\Omega$ 以上を選択すると、 1 nA 以上のトンネル電流で測定するときにダイナミックレンジが制限されるからである。

図2にモデルとする電流電圧増幅器と、これをトンネル電流の測定に用いたときの等価回路を、発生する雑音を含めて示した。 R_{fb} は電流電圧変換器の帰還抵抗、 R_t はトンネル抵抗、 S_{fb} と S_{jt} は帰還抵抗とトンネル抵抗の発生するジョンソン雑音、 S_{sh} と S_f はトンネル電流自身のもつ雑音で、 S_{sh} はショット雑音、 S_f は次章で述べるトンネル電流自身のもつ $1/f$ の周波数依存

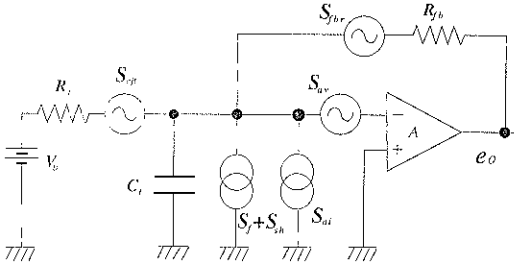


図 2 トンネル電流検出用の電流電圧変換器の等価回路

R_t : 等価トンネル抵抗, R_{fb} : 電流電圧変換器の帰還抵抗, V_b : バイアス電源, C_t : トンネルジャンクションと演算増幅器, 帰還抵抗の浮遊容量, S_{fbr} : 帰還抵抗の発生するジョーンソン雑音 (等価雑音の二乗平均), S_{eji} : トンネル抵抗の発生するジョーンソン雑音, S_{av} : 入力増幅器の発生する等価電圧入力雑音, S_{ei} : 入力増幅器の等価電流雑音, S_{sh} : トンネル電流のショット雑音, S_f : トンネル電流の過剰雑音, すべての S は, 等価な電流の 2 乗に換算

性をもつ雑音成分である。演算増幅器で発生する等価入力電流雑音の 2 乗平均として, 電圧性雑音に起因する項 S_{av} と電流性の雑音に起因する項 S_{ei} で表示してある。トンネル接合のバイアス電源 V_b の雑音は, バイアス電圧を高速で変えない (STS は考えない) ので回路を狭帯域に設計でき, 発生雑音を無視できる程度までなくせるものとして無視した。バイアス電源の内部抵抗が無視できると, 雑音のない理想的な電源であることを考慮すると, トンネル接合の浮遊容量と増幅器の入力の対地浮遊容量, および帰還抵抗のもつ浮遊容量 (ミラー効果を考慮する必要あり, 演算増幅器の利得 A に依存するが簡略化するために一定とした) はひとつの容量 C_t にまとめることができる。

すべての雑音成分はお互いの独立なので総合的な雑音は 2 乗平均の和をとればよい。考えやすいためにすべての雑音は等価入力雑音電流に還元して考えることとする (S で表記)。図 3 の中で, S_{fbr} , S_{eji} , S_{sh} は白色雑音で周波数依存性はない。 S_{av} は演算増幅器の電圧性の雑音で, 一般に白色雑音と高周波で f^2 に比例して増加する成分からできている。演算増幅器の電流雑音成分 S_{ei} は, S_{av} と同様に高周波で f^2 に比例する項のほかに低周波域でいわゆる $1/f$ 依存性をもっている。 S_f は Moller の論文^{11,12)} で報告された, $1/f$ 特性を示すトンネル電流過剰雑音で, 詳しくは次章で議論するのでここではゼロと考える。 R_{fb} の値を $100 \text{ M}\Omega$ とし, 演算増幅器 OPA-111 の利得 A を F を周波数として, 位相を含めて複素数 $A=10^5/(1+iF)$ で表わすと, それぞれの等価雑音電流の 2 乗平均の入力電流に換算した値は

$$S_{eji}=4KT/R_t \quad (4)$$

$$S_{fbr}=(4KT)/R_{fb} \quad (5)$$

$$S_{ei}=(1.6 \times 10^{-31} + 10^{-40} F^2) \quad (6)$$

$$S_{av}=\frac{\left(3.6 \times 10^{-17} + \frac{10^{-14}}{F}\right)}{R_{fb}^2} \quad (7)$$

$$S_{sh}=2Q_e I_t \quad (8)$$

$$S=S_{ei}+S_{av}+S_{fbr}+S_{eji}+S_{sh}+S_f \quad (9)$$

と与えられる。 S_{ei} , S_{av} は演算増幅器のマニュアルよりモデル化した雑音の値である。 S_f は今はゼロとしている。ジョーンソン雑音, ショット雑音には理論式を用いた。すべての雑音の 2 乗平均は単位周波数で規格化してある。

2.4 各雑音の周波数依存性

前節で求めた等価回路を用い, 入力電流の 2 乗に換算した雑音を各周波数にわたって求めた。バイアス電圧を 0.1 V , トンネル電流を 100 pA に設定したときの, トンネル接合抵抗と帰還抵抗からのジョーンソン雑音 S_{eji} , S_{fbr} , トンネル電流のショット雑音 S_{sh} , 演算増幅器の発生する電流性雑音と電圧性雑音の和 $S_{ia}=S_{ei}+S_{av}$ のそれぞれの周波数依存性を図 3 に示す。 C_t の値は 10 pF である。雑音のバイアス電圧依存性は, トンネル抵抗から発生する雑音以外はあまりない。トンネル抵抗より発生する雑音は, ほかの雑音に比較して小さいので, このような測定条件では実質的に変化しないと思ってよいであろう。図中には S_f が示されているが, この項に関しては次節で考える。(4)~(9)式では省略してあるが, $C_t=10 \text{ pF}$ の存在と A が周波数依存性をもつことより 10 kHz 以上の高周波域で S は減衰している。

これらの雑音のトンネル電流依存性を図 4 に表わす。通常の測定条件では, 次節で議論するトンネル電流のもっている $1/f$ 雑音成分がもっとも大きく, ついでトン

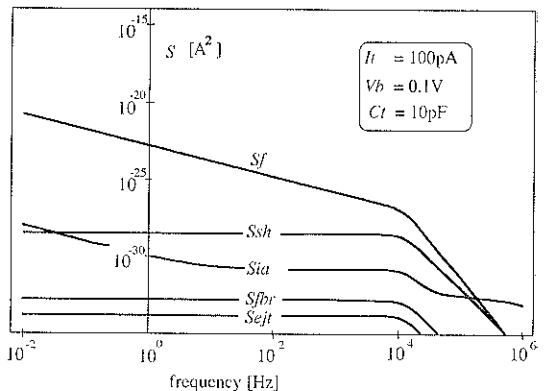


図 3 各雑音電流の 2 乗平均の周波数依存性
 $V_b=0.1 \text{ V}$, $I_t=100 \text{ pA}$, $C_t=10 \text{ pF}$

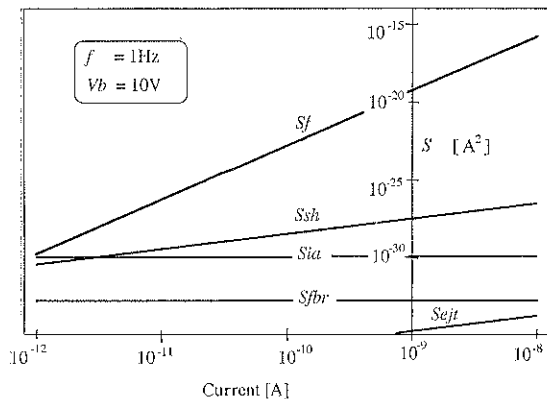


図4 各種雑音のトンネル電流依存性

ネル電流のショット雑音, そして演算増幅器の発生する雑音の順になっている。初段の演算増幅器やショット雑音が問題となる電流領域は 10 pA 以下である。

3. トンネル電流自身のもつ雑音

3.1 トンネル電流の過剰雑音

トンネル電流の雑音の周波数依存性は $1/f$ 特性にしたがう。しかし, この雑音に関する報告はあまり多くなく, Abraham⁹⁾, Bocko¹⁰⁾, Moller^{11,12)}, Kenny¹³⁾ によって, 真空中^{11,12)}, 大気中^{9,10,13)} で金属探針により金属^{11,12)}, Si¹³⁾ とグラファイト^{9,10)} について測定されているだけである。実験条件, 材料と探針の組合せ, 測定時のバイアス電圧とトンネル電流, それに観測されたトンネル電流の周波数特性を表1に示す。

一般に放出電子電流が $1/f$ 特性を示すことは古くから知られていて¹⁴⁾, 雑音は流れる電流の1から2乗に比例する。報告された測定例のうちで異なる電流で雑音が測られているのは, 文献^{11,12)}のみである。そこで, 以下の計算ではこの唯一の周波数/電流依存特性の計られている Moller の実験結果^{11,12)}に基づいて進めることにする。

Moller の論文のデータを用いると, 雑音電流の値は

$$\langle in \rangle = \left[\frac{2.23 \times 10^{-10}}{F} \cdot \left(\frac{I_t}{10^{-10}} \right)^{1.74} \right] \quad (10)$$

で与えられる。 I_t はトンネル電流の平均電流値であり, F は周波数である。 S_f は(10)式より

$$S_f = \left(\frac{1.04 \times 10^{12} I_t^{3.48}}{F} \right) \quad (11)$$

と与えられる。

3.2 雑音による Z 方向のゆらぎとトンネル電流の $1/f$ 雑音の効果

トンネル電流の $1/f$ 雑音の有無が, どの程度探針と試料間のゆらぎになるかを見探してみよう。トンネル電流がギャップ間距離の指数関数で変化し, 通常 $1 \text{ \AA}$ の変化により1桁変化することより, トンネル電流のゆらぎにより引き起こされる探針のゆらぎの2乗平均は

$$\langle Z_{app} \rangle^2 = \frac{S}{(2\kappa I_t)^2} \approx \frac{S}{4I_t^2} \quad (12)$$

$\kappa = (2m\phi)^{1/2}$, m : 電子の質量, ϕ : 仕事関数

と与えられる^{8,9)}。バイアス電圧 0.1 V, トンネル電流 100 pA における, S_f が無いときと S_f を加えた場合の雑音により誘起される探針のゆらぎの2乗平均の総和を図5に図示した。 S_f のないときにはショット雑音が問題となるのはトンネル電流が 1 pA 以下のときである。

図4と同様に S_f の有無による $\langle Z_{app} \rangle^2$ のトンネル電流依存性をプロットした(図6)。 S_f の有無により雑音の電流依存性はまったく異なる挙動を示す。 $1/f$ 雑音がないときには, トンネル電流が増加するにつれて分母の電流の項により $\langle Z_{app} \rangle^2$ は減少する。一方 S_f は, 雑音が電流の 1.74 乗に比例するため, 電流の増加につれて増大する。 S_f が無視できる程度に減少するにはトンネル電流が 1 pA 以下にならなければならない。

3.3 1 フレームの画像を測定する間の雑音

走査トンネル顕微鏡の実際の測定は, XY 方向に探針を走査しながら, 一点ごとに高さを測定していく。今測定に必要な周波数帯域を考える。STM 画像は多くのピクセルから構成されているが, 各ピクセルごとの測定に必要な時間は STM 信号が追従できる速度, すなわち

表1

Author		Abraham (3)	Moller (5)	Moller (5)	Kenny (7)	Bocko (4)
Condition	Tunnel bias	20 mV	-250 mV	-0.5 mV	100 mV	?
	Tunnel current	?	1 nA	50 pA	1.3 nA	0.2 nA
	Circumstance	Air	Vacuum	Vacuum	Air	Air
	Tip and sample	W/graphite	W/Au	W/Au	Au/Si	W/graphite
$1/f$ noise current	Power	1/2	1/2	1/2	1/2	~1.5
	Current at 10 Hz	6.50 E-12	6.00 E-11	7.00 E-13	2.30 E-12	7 E-12*

* at 1 kHz. There is no data <1 kHz

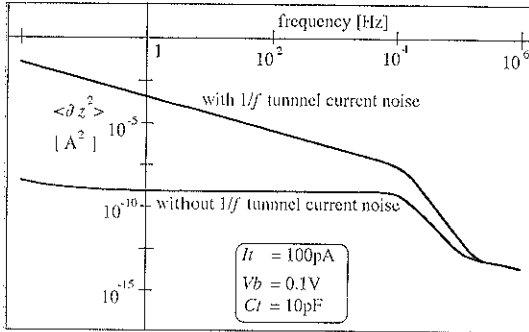


図5 S_f 成分の有無による Z 軸のゆらぎの違い
 $V_b = 0.1 \text{ V}$, $I_t = 100 \text{ pA}$, $C_t = 10 \text{ pF}$

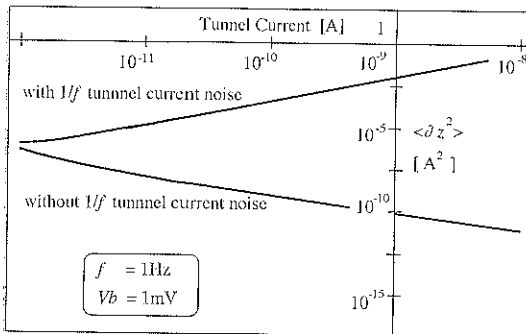
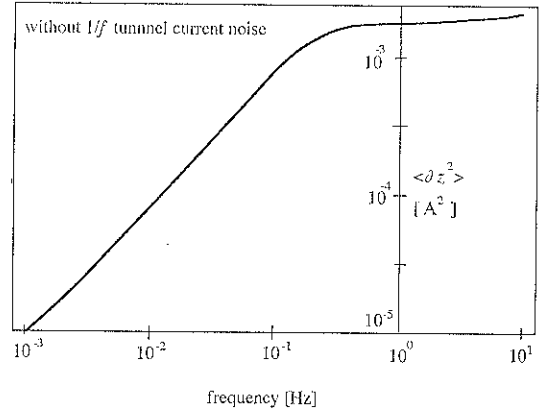


図6 S_f のないときとあるときの $\langle Z_{app} \rangle^2$ の
トンネル電流による変化

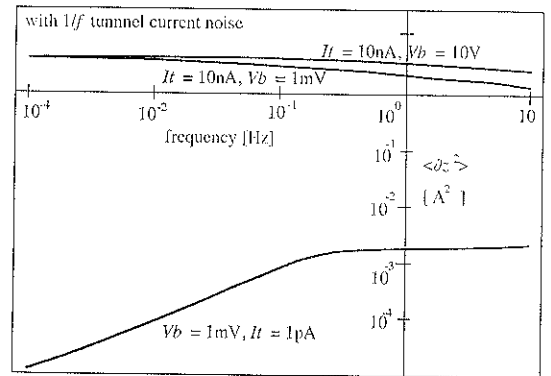
STM 装置の周波数帯域の逆数程度以上の時間が必要となる。一方、1 画像（フレーム）を測定する時間は各ピクセルの測定に必要な時間にピクセルの総数をかけた値以下にはできない。実際にはこの時間に水平方向の戻り時間が加わる。この 1 フレームの測定時間が装置に要求される下限周波数帯域を決定する。今この下限周波数と上限周波数の比を考えると、この比は 1 フレームの総ピクセル数以下にはできない。1 フレームを測定する間、探針が示すゆらぎは、単位周波数当りのゆらぎの 2 乗平均をこの最低周波数と最高周波数の間で積分すれば得られる。図 7 はこの積分を行った結果である。

図 7(a) は S_f がいない場合、(b) は S_f を含めた場合の結果である。横軸の周波数は 1 フレームの画像を取得するに必要な時間の逆数である。フレーム当たりのピクセル数は 256×256 を仮定している。測定時間が短くなると必要な帯域幅が広がるためにゆらぎも増える。1 Hz（測定時間 1 秒）以上でゆらぎが飽和しているのは、 C_t の効果により電流電圧変換器の周波数特性が劣化し、高域の周波数が制限された結果である。

一方、 S_f を考慮すると、(b) に見るようにトンネル電流によりゆらぎが変化し、また周波数依存性（測定時間）がなくなるようになる。 S_f があるときには、時間



(a) S_f の項を無視した場合



(b) すべてを含んだ場合、フレーム当りの
画素数は 256×256

図7 1 フレームを測定するときの
 Z 軸の雑音によるゆらぎ

をかけてゆっくりと走査しても雑音の低減ができないということである。

図 7 で、トンネルギャップ間の浮遊容量 C_t が問題になる高速測定では、各ピクセルの測定に電流電圧変換器が追従できていないことを意味している。これは走査トンネル顕微鏡が正しく動作していないことなのでこのような状態での動作は望ましいものではない。1 フレームの画像を得ている間に観測される高さのゆらぎの 2 乗平均のふるまいを調べるためには、さまざまな条件の下で (13) 式を測定周波数帯域にわたって積分すればよいのであるが、先にみた電流電圧変換器が追従できていない高速走査の条件では、走査トンネル顕微鏡が正しく動作していないことになる。よって、このような条件で面倒な式の計算を行う意味はない。そこで、トンネルギャップ間の浮遊容量 C_t を無視した簡略化した式を用いて先の積分を行った。図 8 はその結果である。図 7 とは 10 Hz 以上でのふるまいを除き、同じ物である。雑音が $1/f$ に

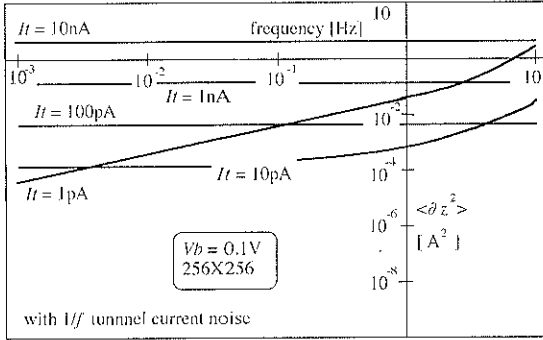


図 8 C_i を無視したときの $\langle Z_{app} \rangle$ の周波数依存性

比例することと帯域が広くなることが打ち消しあい測定時間を増加させてもゆらぎは減少しない。ゆらぎが測定時間を増すと減少するのは、他の雑音が主要になるトンネル電流 10 pA 以下のときだけである。

3.4 トンネル電流依存性

$\langle Z_{app} \rangle$ のバイアス電圧依存性は、 256×256 ピクセル画像 1 フレームの測定時間を 10 秒として表示すると図 9 のようになる。通常の測定条件であるトンネル電流 10 pA 以上ではゆらぎのバイアス電圧依存性はない。

しかし、ゆらぎにはトンネル電流には強く依存する。図 10 は 1 フレームを 1000 秒 (a) と 0.1 秒 (b) で測定するときのゆらぎのトンネル電流依存性を、バイアス電圧をパラメータにしてプロットしたものである。ゆらぎの値にはトンネル電流の最適値が存在し、その値は測

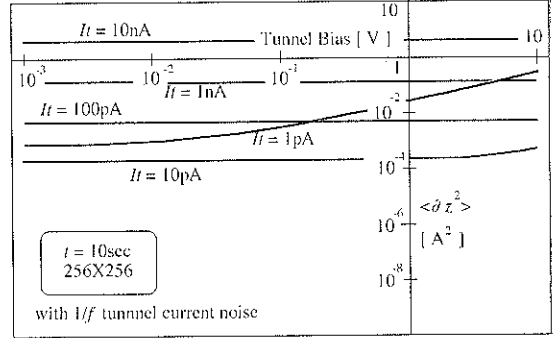


図 9 C_i を無視したときの $\langle Z_{app} \rangle$ のトンネル接合電圧依存性

定時間に依存している。

この最適測定電流と測定時間の関係を見るために、バイアス電圧を 10 V (a) と 1 mV (b) にしたときのゆらぎを、測定時間をパラメータにしてプロットしたものが、図 11 である。いずれの場合でも測定時間を長くするとゆらぎの最も少なくなるトンネル電流は少ない方向に移動していく。また、単純にゆらぎのみから考えると、通常の測定時間では (多分大部分の測定は 1 分から 10 分程度で行われている) トンネル電流の最適値は 10 pA 前後にある。

4. 結論と実験指標

以上見てきたように、残留雑音の主要な成分が 1/f

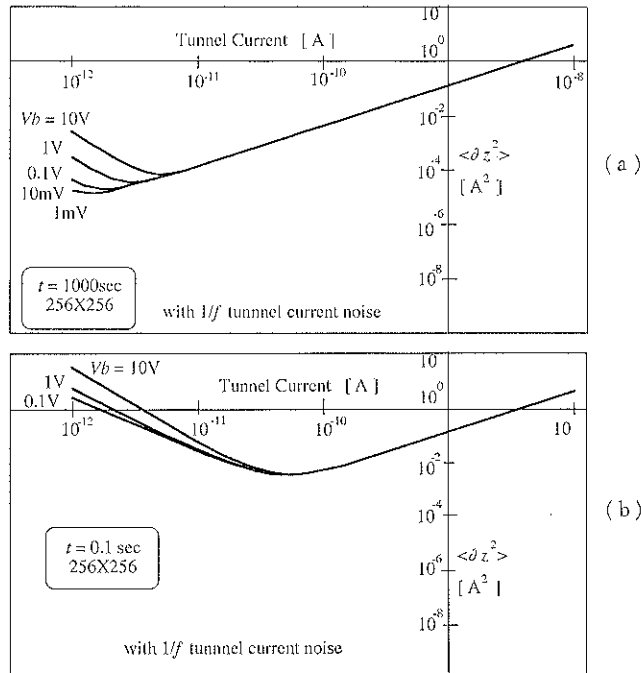
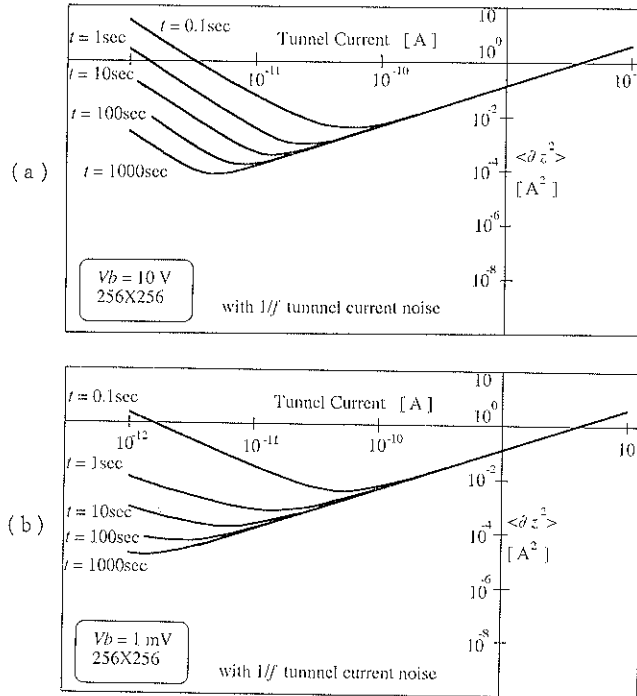


図 10 $\langle Z_{app} \rangle$ のトンネル電流依存性、接合容量 C_i を無視

図 11 $\langle Z_{app} \rangle$ のトンネル電流依存性, 接合容量 C_j を無視

成分であるときには, 測定時間の延長 (ゆっくり測定する) は雑音の低減に結びつかない。このような状態では, 測定時間はどのように設定しても同じような S/N 比で測定されることになる。1/f 雑音があるときには, 時間をかけて測定しても雑音の少ないデータは得られない。このような性質の雑音の下では, S/N は測定周波数の上下限周波数の差ではなく, 比で決定される。その結果, S/N 比は 1 ピクセルの測定時間と 1 フレームの測定時間の比で決まる。この比はピクセル数以下にはならない。しかしながら, 極端に短時間で測定することは, Z 軸の制御の追従性より考えても望ましくない。また, 2.2 節での議論で見たように高速測定は Z 軸制御のループ利得の低下をもたらす, この結果は電子回路の後段増幅器の雑音が無視できないものにする。以上より, 低雑音で STM を測定する指針として以下のようにまとめることができよう。

1. 帰還利得を十分に確保し増幅回路の後段で発生する

雑音が無視できるようにするために, 帰還回路の応答は発振しない限りできるだけ広く大きく設定すべきである。これはまた, 探針が試料に当たらないようにする効果も大きい。

2. データを取り込む検出器の帯域は必要最低限に設定すべきである。これは A/D 変換器の前に可変周波数低域通過フィルターを置き, 早い走査方向 (図 12 では X 方向) での必要な構造が見える限界まで狭くするべきである。
3. 1/f 雑音が主要なときには, 図 12 のように X 方向と Y 方向で雑音が異なる¹⁵⁾。X 方向と Y 方向で異なる特性をもったフィルターによる処理が効果的である。STM で一般に行われている, 2 次元空間フィルタリングが最も有効である。
4. 高い S/N 比で STM データを得るには, 積算方式が最良であるが, STM では XY 方向のドリフトが多くて採用できない。平面内での交流変調と同期検

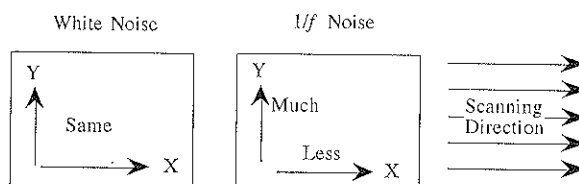


図 12 STM の走査方向と 1/f 雑音の存在するときの画質

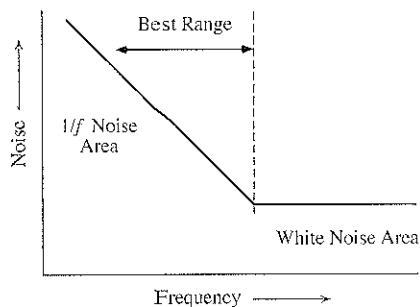


図 13 白色雑音と $1/f$ 雑音が混在しているときの測定周波数帯域の設定法

出法¹⁵⁾を採用することや、トンネル電流を交流信号にして、測定帯域を変調周波数にシフトし、上/下限周波数の比を小さくする¹⁶⁾ことも有効である。さらに、多数の画像を測定し、ドリフト補正した後これらを加算する方法は最も優れていると思う。

5. $1/f$ 成分と白色雑音が共に存在する、図 13 のような雑音が存在するときには、測定周波数の設定は、上限周波数を図のように雑音の変曲点に合せると最もよい状態となる。

5)の結論は一見常識に反して、雑音の大きな領域で測定するように見えるが、これは図の横軸が周波数の対数であることによる錯覚である。図の右側の白色雑音が優勢な領域では、測定時間をかければ、すなわち測定領域を左側にシフトするにつれて測定結果の S/N 比が向上する。一方、図の左側の領域すなわち $1/f$ が優勢な領域では、先に見たように時間をかけても、すなわち測定領域を左側にシフトして行っても S/N は向上しない。この中間領域、すなわち図の折れ曲がった領域にわたって測定領域を設定したときには、左に測定領域をシフトしていくにつれ S/N 比の向上が頭打ちになっていく。図示した領域が S/N 比の向上する限界である。これ以上時間をかけても S/N 比の向上はなく、いたずらに測定時間のみが費やされるだけになる。

5. 情報としての雑音

以上見てきたように、STM 電流に含まれる雑音は STM 測定を阻害する要因と考えてきた。これ避けるためにトンネル電流を流さないで、すなわち $1/f$ 雑音を避けて STM データを得る方法が試みられていた^{12,17)}。ゼロバイアス時のジョンソン雑音を利用して STM データを得る方法である。

しかし、この嫌われ者の雑音もトンネル現象の物理過程に起因する情報ととらえ、積極的に活用することは、非常に興味深いものがある¹⁸⁾。通常の伝導電子などの示

す $1/f$ 特性は、伝導に關与する電子の数が非常に多いために、電子のもつ集団の特性、電子の分布関数のゆらぎの効果が強く反映している。しかし、トンネル現象は、遷移している電子の場所が極端に局在しているうえ、一般に電子のトンネル伝導の遷移時間は十分に短いと信じられているため、基本的にはトンネル電流は独立した遷移の積み重ねであると単純化できる。トンネル電流の雑音を測定することにより新しい物理現象の観測が可能となるであろう。

これはたいへんに興味深い分野であるが、ここで簡単に述べるにはあまりにも大きな問題であるようなので稿を改め別の機会に譲ることにする。

文 献

- 1) G. Binnig and H. Rohrer: IBM, J. Res. Develop. **30**, 355 (1986).
- 2) Y. Kuk and P. J. Silverman: Rev. Sci. Instrum. **60**, 165 (1989).
- 3) D. W. Pohl: IBM J. Res. Dev. **30**, 417 (1986).
- 4) M. Okano, K. Kajimura, S. Wakiyama, F. Sakai, W. Mizutani and M. Ono: J. Vac. Sci. Technol. **A 5**, 3313 (1987).
- 5) 岡野真, 梶村皓二, 水谷亘, 小野雅敏, 脇山茂, 坂井文樹: 電子技術総合研究所報 **51**, 725 (1987).
- 6) A. I. Oliva, V. Sosa, R. de Coss, R. Sosa, N. L. Salazar and J. L. Pena: Rev. Sci. Instrum. **63**, 3326 (1992).
- 7) C. R. Keavens and G. C. Aers: Surf. Sci. **181**, 250 (1987).
- 8) M. F. Bocko, K. A. Stephenson and R. H. Koch: Phys. Rev. Lett. **61**, 726 (1988).
- 9) D. W. Abraham, C. C. Williams and H. K. Wickramasinghe: Appl. Phys. Lett. **53**, 1503 (1988).
- 10) M. F. Bocko and K. A. Stephenson: J. Vac. Sci. Technol. **B 9**, 1363 (1991).
- 11) R. Moller, A. Esslinger and B. Koslowski: Appl. Phys. Lett. **55**, 2360 (1989).
- 12) R. Moller, A. Esslinger and B. Koslowski: J. Vac. Sci. Technol. **A 8**, 590 (1990).
- 13) T. W. Kenny, S. B. Waltman, J. K. Reynolds and W. J. Kaiser: Appl. Phys. Lett. **58**, 100 (1991).
- 14) Ch. Kleint: Surf. Sci. **200**, 472 (1988).
- 15) E. Stoll and O. Marti: Surf. Sci. **181**, 222 (1987).
- 16) G. P. Kochanski: Phys. Rev. Lett. **62**, 2285 (1989).
- 17) R. Moller, C. Baur, A. Esslinger and P. Kurz: J. Vac. Sci. Technol. **B 9**, 609 (1991).
- 18) H. Kurita, M. Uota, Y. Mera and K. Maeda: "Noise in Physical Systems and $1/f$ Fluctuations" Edited by T. Musha, S. Sato and M. Yamamoto (Ohmsha Ltd. 1991) p. 373.