室蘭工業大学
学術資源アーカイブ
Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive

可変ギャップ電極を用いたトンネル電流の検出

メタデータ	言語: Japanese
	出版者: 室蘭工業大学
	公開日: 2014-03-04
	キーワード (Ja):
	キーワード (En):
	作成者: 安達, 洋, 加藤, 達幸, 鈴木, 和郎
	メールアドレス:
	所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/748

可変ギャップ電極を用いたトンネル電流の検出

安達　洋・加藤達幸・鈴木和郎

A Study of Tunneling Current through A variable Gap in A Liquid

Hiroshi Adachi, Tatuyuki Katoh and Kaazuo Suzuki

Abstract

Scanning tunneling microscopes have potential in surface analysis and are believed to be able to operate in an insulating liquid. A similar electrode structure to a scanning tunneling microscope was made and fundamental characteristics of tunneling current through an insulating liquid was examined. Measurements of the tunneling barrier shows that there is no evident difference between the tunneling currents of air and of the liquid. Although this evidence is far from the authors' expectation, this gives a confirmation that images of scanning tunneling microscopes obtained in insulating liquids can be interpreted by the same way as in vacuum.

1. はじめに

走査型トンネル顕微鏡（Scanning Tunneling Microscope, STM）は1982年スイスのIBMチューリッヒ研究所のBinnig, Rohrer[1]達によって発明され，その物理学に対するインパクトの大きさが高く評価され，1986年度のノーベル物理学賞が授与された。原子像が実空間で直接観察出来るというこの装置の極めて高い分解能は特筆に値するものである。しかもその高い分解能を，鋭い金属の探針を機械的に走査することにより実現した点でも注目されるものである。

鋭い探針を試料表面に沿って走査して表面の凹凸を計測する測定器としては，触針型表面粗さ計が古くから実用に供されてきたが，その分解能は最新のカタログを見ても面に垂直方向で1nm，面内方向で100nm程度である。通常の使用条件下ではこの程度の分解能を得るのは極めて困難なことであって，通常はこれより1桁程度分解能が下がるものと考えた方がよい。それは，探針の鋭さの維持に困難さが伴うためである。分解能は探針が鋭いほど高くなるが，探針を鋭くしすぎるとその機械的強度がその分だけ低下してしまうために，触針圧に耐えられなくなる。つまり，この分解能を低下させる最大の要因は鋭い探針が触針圧に耐えられないことであって，非接触で探針を走査すれば鋭い探針を使用することが可能となり，分解能の向上が望めることになる。この点を指摘し，非接触で探針を走査して極めて高い分解能の表面粗さ計をTopografinerという名前のもとに，アメリカのNBSのYoungが1972年に発表しており，そこにSTMの原型を見ることができる[2]。Youngの装置は基本的にはSTMと全く同じ構成をしており，分光用の

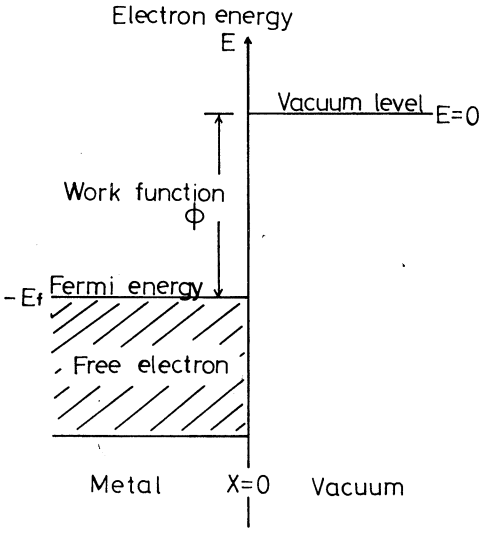
グレーティングの溝の微細構造を計測してその高分解能性を示した。また，理論的には2nmの分解能が可能であることを示したが，装置が外部からの振動に対して極めて敏感に影響されてしまい，とても実用の装置とは考えられないものとして，その研究は中断されてしまった。

Youngの実験では試料と探針の間の距離が10nm以上あり，試料探針間の電圧も100V以上を印加するような動作条件が選ばれていた[2,3]。つまり，探針からの電界放射電子電流を試料探針間の距離の検出に用いていた。これに対し，Binnig達のSTMでは試料と探針の間の距離が0.1nm程度と狭く，また，試料と探針の間に加える電圧も50mV程度の低い電圧に設定されている[1,4,5]。つまり，STMでは試料と探針の間に流れるトンネル電流を試料と探針の間の距離の検出に用いている。このようにトンネル電流を用いることにより，原子の大きさ程度の表面の凹凸も検出出来る位にまで探針が試料に近付くことが出来るようになった。しかし，それを実現するには，探針の位置を0.001nmよりも高い精度で制御する必要がある。

ここでは，走査型トンネル顕微鏡（STM）に用いられるのと同じピエゾ電界効果を利用したアクチュエータを用いて，可変ギャップ一次元トンネルユニットを組み立て，空気中でのトンネル電流を計測する実験を行った結果について述べる。STMは，この2～3年の間の発達が著しく，種々の応用の方面が開かれてきた。この実験は本学にたけるSTMの建設の可能性を検討することも目的のひとつにおいている。

2．トンネル電流

金属の中の自由電子を真空中に取り出すのに必要な最低のエネルギーは仕事関数とよばれ，金属によって異なった値をもつ。詳しくみると，金属の結晶面の方位によっても異なった値をもつがその効果は通常小さいので，ここでは簡単のために，金属の種類により定まった固有のものと仮定する。この様子をエネルギーバンド図にしたものが図1である。ここではエネルギーの基準は真空中で自由電子がもつことのできるエネルギーの最低の値，すなわち真空準位に選んである。E_fはO°Kに置かれた金属のなかの自由電子のもちうる最大のエネルギーであって，フェルミエネルギーと呼ばれるものである。図1に於けるようにエネルギーの基準を真空準位に選んだ場合，仕事関数ϕはフェルミエネル

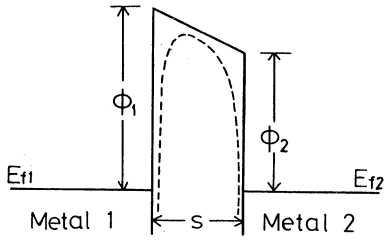


図－1　エネルギーバンド図

ギー E_fと同じ値をもつ。つまり，金属のなかの自由電子からみると，仕事関数は真空中にとびだすときに越えなければならないポテンシャル障壁の高さに相当する。

量子力学によると，ポテンシャル障壁で仕切された空間に存在する自由電子の存在確率はポテンシャル障壁のなかでもすぐに零になるのではなく，距離に対して指数的に減少する関数に従って電子の存在確率が減少する。つまり，金属中の自由電子は金属の外の真空中にしみだして存在し，表面のごく近傍にあたかも雲のように存在している。二つの金属を数 nm にまで近づけていくと，それぞれの金属の表面近傍に存在する電子雲が互いに重なり合うようになる。このような状態になると，二つの金属のなかの自由電子が行き来できるようになり，二つの金属が接触していないにもかかわらず二つの金属の間に電圧を印加すると電流が観測されるようになる。このような現象をトンネル効果と呼んでおり，流れる電流をトンネル電流と呼んでいる。

このような状態にまで二つの金属を近づけたときのポテンシャル障壁の様子を図 2(a)に示す。ここで，ϕ_1とϕ_2は二つの金属それぞれの仕事関数であり，また，エネルギーの基準は二つの金属のフェルミエネルギー E_{f1}，E_{f2}が一致するように二つの金属の間でずらしてある。s は二つの金属の間の距離であり，ここでは電子がトンネル効果で通り抜ける障壁の厚さに相当する。このようにトンネル電流が観測されるほど二つの金属が近づけられた状態では，電磁気学で取り扱われる鏡像力効果が無視出来なくなり，障壁を台形で示すことはもはや出来なくなり，図中に破線で示したような形になる。



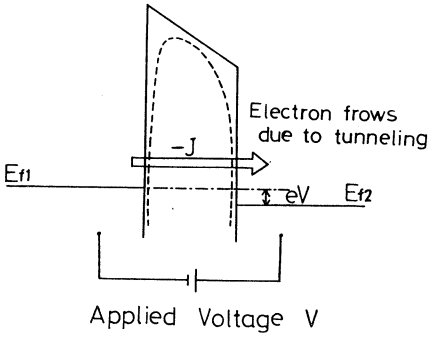
図－2(a)　電圧を印加していない時の二つの金属の間のポテンシャル障壁の図

二つの金属の間の薄いポテンシャル障壁を通り抜けて流れるトンネル電流の密度 J は量子力学の WKB 近似法を用いて計算した結果によると[6]，

$$J \sim CV exp(-A\,\psi^{1/2} s) \tag{1}$$

で与えられる。ここで，C は電気抵抗の単位の次元をもった定数であり，V は二つの金属間に加える電圧であって，図 2(b)に示すように二つの金属のフェルミエネルギーの差として表示される。A も定数であり，MKS 単位系を用いるとほぼ 1 に近似出来るものである。ψは二つの金属を隔てるポテンシャル障壁の平均の高さであって，障壁に台形の近似が出来るときには，

$$\psi \sim (\phi_1 + \phi_2)/2 \tag{2}$$



図－29(b)　電圧を印加した時の二つの金属の間のポテンシャル障壁の図

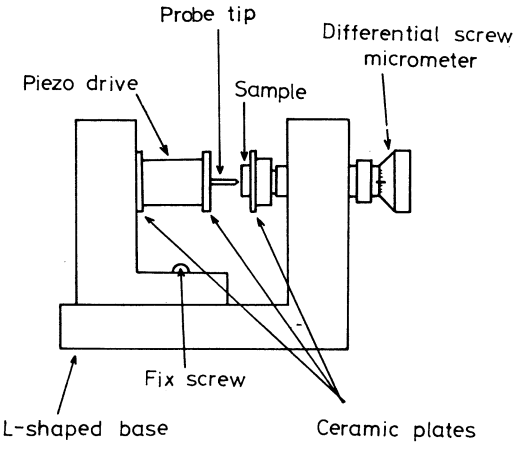
で与えられるものである。一般には，(1)式の成立する範囲内では鏡像力が無視出来ないので障壁高さを(2)式で近似することには無理があるが，ここでは簡単のために，(2)式で平均の障壁高さが与えられるものとする。実際の計測結果では後に述べるように雑音の成分が大きく，この近似の程度が議論出来るほどのものにはなっていない。

(1)式をみると，トンネル電流は二つの金属間の距離に対して指数関数的に変化することがわかる。すなわち，印加電圧が一定のもとで，距離 s を変化させながらトンネル電流を観測すると，電流は指数関数的に変化するので，電流の対数を距離 s に対してグラフにすると，直線の関係がえられ，その勾配から平均の障壁高さ ϕ が求められることになる。

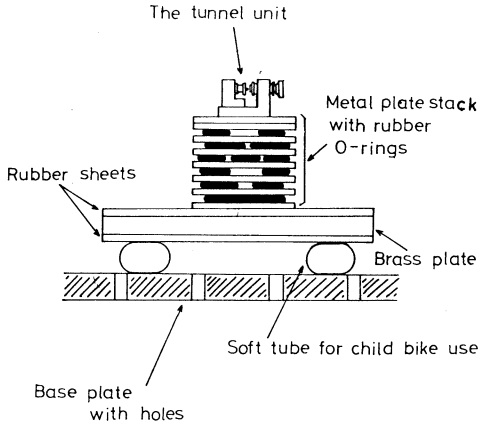
3．トンネルユニット

図3に，ここでの実験のために製作した試料探針間距離の微動調整機構の構成の概略を示す。この機構をトンネルユニットと呼んでいる。アルミニウム合金で作られたL字型をしたものを二つ向かい合わせ，その一方に差動マイクロメータ（フランス，ミクロコントロール社製）を取り付けた。これは，可動距離が0.3mm，1回転0.05mm，1目盛り2μmの性能をもつもので，探針と試料の間の距離の粗動調整に用いる。もう一方には圧電アクチュエータ（PZT）をとりつけた。これは，微調整に用いるもので，その移動量は1Vの印加電圧に対して0.7nm（0.7μm/1000V）である。圧電アクチュエータの先端には薄いセラミックの板を介して，探針が取り付けられ，一方差動マイクロメータの先端にもやはりセラミック板を介して試料が取り付けられた。組み立てに際しては，エポキシ系の真空用の接着剤（Torr Seal, Varian Co.）を用いている。

このトンネルユニットを自作の防振台に取り付けた。防振台の構成を図4に示す。子供用の自転車のチューブ（14インチ）を人間の



図－3　トンネルユニット



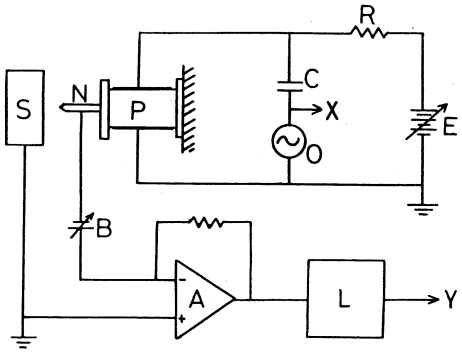
図－4　防振台

呼吸でふくらませ(あまり圧力を高くしない)，その上に40cm 角，1 cm 厚の真鍮板を 2 枚乗せた。真鍮板はおもりの役目をし，チューブはばねの役目をしているが，さらに，基盤になる机には直径5mm 程度の穴が5cm 程度の間隔で縦横に並んであいており，これらの穴とチューブの内側の穴がダンパーの役目をしている。真鍮板は，そのままでは，それ自身のもつ固有振動により，高周波で振動するので，これを防ぐために5mm 厚のネオプレンゴムシートを表面に貼り付けてある。

さらに，この台の上に 6 層からなる積層型防振台を置き，その上にトンネルユニットを置いている。積層型防振台は Binnig 達の発明[7]によるもので，10cm×12cm×3mm のステンレス鋼板を 6 枚重ね，各板の間にはゴム製のオーリングを狭んだものである。オーリングの大きさは直径数 mm のものから10cm 程度の大きさのものまで（ゴム断面の直径では1mm から4mm のものまで）試みてみたが，結果にあまり差はなかった。

4. 計測回路

図 5 に概略を示す。安定化電圧源（0～500V 可変）により，ピエゾドライブに直流バイアス電圧を加え，探針の移動の中心位置を決定する。オシレータからの交流電圧（1Hz）をそれに重量させて，探針と試料の間の距離を微小な振幅のもとで周期的に変化させる。トンネル電流を流すためのバイアス電圧は乾電池の起電圧を抵抗で分圧して，40mV の電圧を得，これを試料と探針の間に印加する。試料は接地電位に保たれ，トンネル電流の計測はこれを基準にして行う。電流の検出には，FET 入力の高インパーダンス型ハイブリッド集積回路（Keithley, 301型）をもちいている。これに負帰還用の抵抗（10MΩ）をつけ，電流増幅回路としている。さらに，トンネル電流は距離に対して指数関数的に変化するので，対数増幅器を接続し，トンネル電流が試料探針間の距離に対して直線の関係になるような信号として検出している。ストレージオシロスコープの横軸にオシレータか



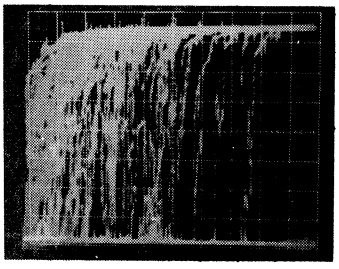
A : High gain amplifier for electrometer use (Keithley 301)
L : Log amplifier
O : Oscillator (1 Hz, 5 Vpp)
C : Capacitor (4.7μm, 500 V)
R : Registor (100 kΩ)
B : Bias supply (0 ~ 100 V)
S : Sample
N : Probe tip
P : Piezo drive
X, Y : Input signal for the storage oscilloscope

図－5　測定回路

らの交流信号を，縦軸にトンネル電流の対数を入力し，得られた結果を写真に撮影している。つまり，写真には横軸が試料探針間距離，縦軸がトンネル電流の対数になったグラフが記録される。

5．測定結果

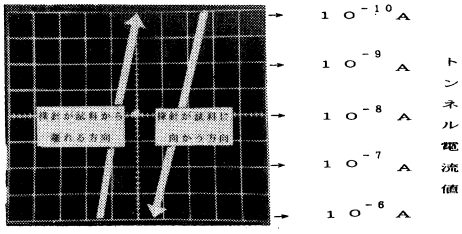
図6に測定結果の例を示した。試料は金薄板で，探針は機械的に研磨した金線である。縦軸は電流であり，横軸は圧電アクチュエータ（PZT）に印加した電圧である。印加電圧と圧電アクチュエータの歪み量の大きさについては，ここで計測の手段を持たないので実際に計ってはいないが，メーカーの供給してくれたデータによると，0.7nm/V の感度をもつ。従って，横軸の一目盛りは0.7nm に相当する。(a)は対数増幅器を用いないときの例であって，試料と探針間の距離（直接的には圧電アクチュエータの印加電圧）に対して電流が急激に変化している。図中にたくさんのトレースが見られるのは，トンネルユニットの温度変化に伴う熱膨張のために試料探針間距離が変化し，その結果生じるドリフトのためである。(b)は対数増幅器を用いた時の例であって，横軸に対して輝点はゆるやかに，しかも直線的に変化している。これはトンネル電流が検出できている確証である。圧電アクチュエータに加える電圧が増す方向と減る方向に電圧を変化させたとき，つまり，試料探針間の距離が長くなる

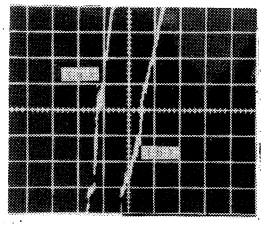


(a)　X：1v/div（≃7Å/div）
(Applied Voltage of Piezo Drive)
Y：2v/div（≃0.2μA/div）
(Tunneling Current)

(b)　X：1v/div（≃7Å/div）
(Applied Voltage of Piezo Drive)
Y：5v/div（≃1decade/div）
（0v ≃ 5×10^{-9}A）
(Log of the Tunneling Current)

図－6（Ⅰ）　トンネル電流測定結果



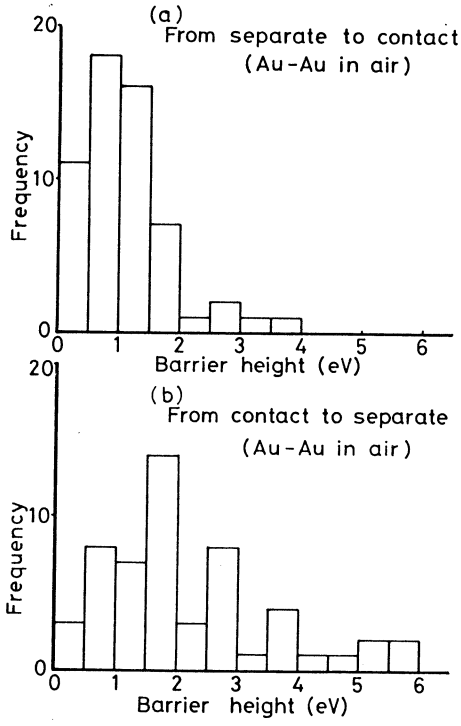


Au－Au
X：1v/div（7Å/div）
Y：0.5v/div（1decade/2div）
(a) 2.0eV　(b) 0.7eV

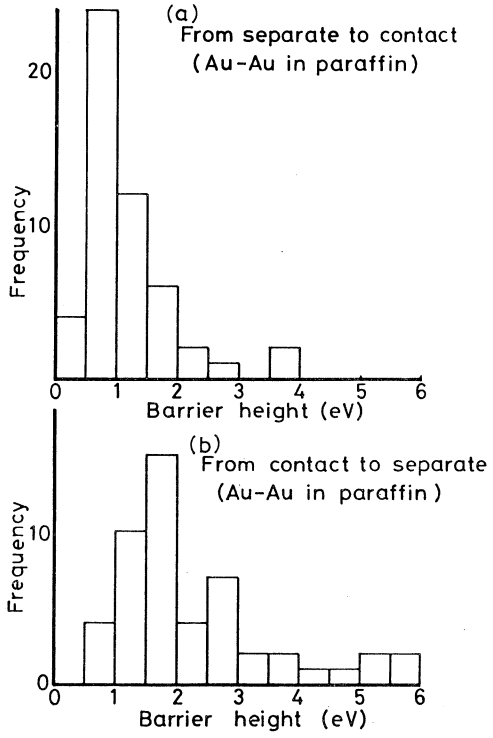
図－6（Ⅱ）　トンネル電流測定結果

ときと短くなるときとで，輝点の軌道が異なっているのは，圧電アクチュエータの歪み量と印加電圧の間にヒステリシスが存在するためである。これは，圧電性物質の本来もっている性質に由来するもので，避けがたいものである。また，ヒステリシスには本来非直線性が付随するものであって，圧電アクチュエータのメーカーが供給してくれた0.7nm/V という電圧機械的歪変換係数はあくまでも平均の値と解釈すべきものであって，常に一定の値をもつものと考えることは出来ない。

この直線の勾配から障壁の平均高さを求めて，整理したのが図７である。圧電アクチュエータの印加電圧を増加する方向の直線の勾配から求めたものを(a)に，減少する方向のものを(b)に示した。横軸が観測された障壁の高さ，縦軸がその障壁高さが観測された回数であり，必ずしも実験の再現性はよくなく，このように広く分布した結果が得られた。また，(a)より(b)のほうが全般に大きな障壁の高さを示している。これは圧電アクチュエータの歪みのヒステリシスに関係した，電圧機械的歪変換係数の違いに起因しているものと考えている。金属の仕事関数は通常数 eV 程度の値をもつ。図の７結果はこれよりはるかに低い値を示している。この原因はいまのところ明らかではないが，一般に金属の表面が汚れると仕事関数が低くなる傾向にあるので，ここでもその効果が現れているものと推定している。Binnig 達が初期に発表した結果でも同じような傾向



図―７　大気中における平均の障壁の高さ



図―８　電動パラフィン中における平均の障壁の高さ

が観測されており，金属表面の汚れに原因があるものとされている[8]。

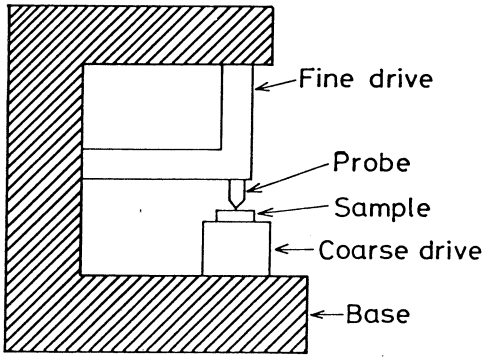
図８は試料探針の間の空間に流動パラフィンを満たして実験した結果である。流動パラフィンは微小信号を切り替えるための機械的な電気接点（スイッチ）の経時変化を防ぐ目的で接点に塗布されるもので，また，電気接点の接触不良に起因する雑音が発生したときに用いられる接点復活剤の主成分でもある。流動パラフィンは電気絶縁性の優れた液体であるが，このような目的に広く使われるので，電極が極めて近接した状態で計測すると，通常の広い電極間のもとで計測された性質とは異なった性質を示すものと予測され，また，電気接点の経時変化の軽減の機構についての知見が得られるものと期待して行った実験である。結果は図８に見られるように，流動パラフィンを満たさないで行った図７の結果と何等有意の差が認められなかった。

6．討　　論

簡単な自作の防振台と自作のトンネルユニットを用いることによって，微小空隙を透過して流れるトンネル電流の検出に成功した。トンネル電流がこのように計測されているということは，探針と試料の間の距離が0.01nm より良い精度のもとに制御出来ていることを示している。今から約15年前に行われた Young 達による Topografiner[1] や Ultramicrometer[9] 等の先駆的実験を実用の計測器にまで発展させることが出来なかったのには，いろいろの理由が考えられているが，その最大の理由は外部からの振動を防ぎ切れなかったためと聞いている。

試料と探針の間の距離を保つためには，図９に模式的に示したように，試料と探針の両方を機械的に支えているＣ型の機構が不可欠である。このＣ型の機構が全体で同じ振動している場合には，試料と探針の間の距離には全く影響を受けないが，部分によって振動の位相がずれると，試料と探針の間の距離が変化することになり，トンネル電流は安定には観測できなくなる。つまり，このＣ型の機構が持つ機械的振動の共鳴周波数に注目し，その共鳴周波数が防振装置の遮断周波数より，遙かに高くなるようにすれば外部からの振動の影響を防ぐことができる[10]。そのためには，トンネルユニットはなるべく硬い材料で，なるべく小さく作るのが良いとされている。

ここで用いたトンネルユニットは金属のなかでは極めて柔らかいものに属するアルミニウム合金を用いて自作した。硬い材料の切削が機械工学を全く知らない著者達には困難であったことも快削アルミニウムの商品名のもとに販売されている柔らかいアスミニウム合金を採用させ



図－９　STM の基本構造

る大きな理由の一つではあったが，アルミニウムを切削した経験から，粘りけの強い金属であることを知っていた。これは，振動という面から考えると減衰係数が大きいこと推測させ，また，アルミニウムはその比重が小さいので，出来た構造の共鳴周波数もその分だけ高くなるものと推定される。そこで，ここではトンネルユニットの構造材としてアルミニウム合金を採用した。実験的にこのことが実証出来た訳ではないが，少なくてもトンネル電流が観測出来たという事実は，著者達の推測が間違っていなかったものと考えている。

流動パラフィンの実験結果は著者達の当初の予測を全く裏切るものであった。少なくても電気接点の金属表面に塗布されて，そのために電気の良導性が保たれるのであるから，極めて近い距離に置かれた電極間でその電気伝導性を調べれば，通常の大きさの電極系で測定された結果とは違った結果がでて然るべきものと考えていたが，結果は空気中に置かれた裸の金属の間で流れるトンネル電流と全く同じ結果を与えた。このことが電気接点に流動パラフィンを塗布出来る理由と考えることもできるが，逆に全く変化を与えないものがなぜ接点の動作の安定性に寄与するのかという疑問を提起している。

本研究は学内教育特別研究費の補助の下に行われたものであり，ここに謝意を表したい。

文　　献

1）G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber and E. Weibel: Phys. Rev. Lett. 49 (1982) p. 57
2）R. Young, J. Ward and R. Scire: Rev. Sci. Instrum. 43 (1972) p. 999
3）R. Young, J. Ward and F. Scire: Phy. Rev. Lett. 27 (1971) p. 922
4）G. Binnig and H. Rohrer: Physica 127B (1984) p. 37
5）G. Binnig and H. Rohrer: Surface Science 126 (1983) p. 236
6）J. G. Simmons: J. Appl. Phys. 34 (1963) p. 1793
7）Ch. Gerber, G. Binnig, H. Fuchs, O. Marti and H. Rohrer: Rev. Sci. Instrum. 57 (1986) p. 221
8）G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber and E. Weibel: Physica 109 & 110B (1982) p. 2075: Appl. Phys. Lett. 40 (1982) p. 178
9）R. D. Young: Rev Sci. Instrum. 37 (1966) p. 275
10）H. Adachi: Proc. 6th. Sensor Symposium (1986) p. 137（電気学会　主催）