JAIST Repository

https://dspace.jaist.ac.jp/

Title	走査型プローブ顕微鏡にみる電圧印加のナノ力学的相 互作用
Author(s)	富取,正彦;新井,豊子
Citation	表面科学, 29(4): 239-245
Issue Date	2008
Туре	Journal Article
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/7939
Rights	Copyright (C) 2008 日本表面科学会. 富取正彦、新井 豊子,表面科学, 29(4), 2008, 239-245.
Description	



Japan Advanced Institute of Science and Technology

走査型プローブ顕微鏡にみる電圧印加の ナノカ学的相互作用

富取 正彦¹·新井 豊子^{2,3}

(2008年1月22日受理)

Nanomechanical Interaction between a Tip and a Sample with Changing Bias Voltage Observed by Using Scanning Probe Microscopy

Masahiko Tomitori¹ and Toyoko Arai^{2,3}

¹School of Materials Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology, 1-1 Asahidai, Nomi, Ishikawa 923–1292
²Natural Science and Technology, Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa, Ishikawa 920–1192
³SORST Japan Science and Technology Agency, 4–1–8 Honcho, Kawaguchi, Saitama 332–0012

(Received January 22, 2008)

A novel surface spectroscopic method referred to itself as noncontact atomic force spectroscopy (nc-AFS) is presented, which is based on noncontact atomic force microscopy (nc-AFM) and scanning tunneling spectroscopy (STS) of the family of scanning probe microscopy (SPM). The interaction force and current are measured with sweeping bias voltage between a tip and a sample at a close tip-sample separation, and analyzed in terms of surface spectroscopy. The spectra obtained by the nc-AFS indicate that the resonance states, i. e., covalent bonding, between a Si tip and a Si sample can be formed by tuning the bias voltage, corresponding to the relative shift of energy levels of tip states and sample states. Moreover, the nc-AFS combined with current measurement exhibits potential of evaluating the collapse of tunneling barrier and analyzing the correlation between force interaction and electron conductance between two pieces of condensed matter in proximity.

KEYWORDS : noncontact atomic force microscopy, noncontact atomic force spectroscopy, covalent bonding, bias voltage, silicon

1. はじめに

研究紹介

.....

1980 年代に走査型トンネル顕微鏡(STM:scanning tunneling microscopy)^{1,2)}と原子間力顕微鏡(AFM: atomic force microscopy)³⁾が登場して以来,その動作原 理を応用して多種多様な走査型プローブ顕微鏡(SPM: scanning probe microscopy)が開発されてきた。「先端が 鋭利な探針を試料に近接させ,そのとき探針と試料間で 授受される物理量を一定に保ちながら探針を走査するこ とによって表面像を得る」という SPM の原理は一見単 純であるが、その単純さと"原子が見える"という特筆 すべき性能が種々の分野の研究者達に様々なインスピレ ーションを与えた。その結果、ナノスケールの表面観 察・物性測定や原子・分子操作の技術が飛躍的に進歩 し、いまや SPM は最先端の研究・開発は言うに及ば ず、汎用装置の一つとして多方面で活躍している。この 流れに呼応するように、無機・有機・バイオ材料のナノ スケールでの理解と制御技術が SPM の助けもあり飛躍 的に発展し、今や材料関連の科学技術は"ナノ"真っ盛 りとなった。

現在, SPM の中でも高分解能で絶縁材料をも観察で きる AFM がもっとも普及している。開発当初, AFM

E-mail: tomitori@jaist.ac.jp

では原子分解能を達成できないとの予想もあったが、微 弱な探針-試料間引力を検出できる FM 法4)を利用した 非接触原子間力顕微鏡 (noncontact (nc)-AFM) が開発 され、1995年以降は原子像が再現よく観察されるよう になった5~7)。ところで、高分解能あるいは原子分解能 SPM 像を得るためには探針先端がナノスケールで鋭利 である必要がある。一般に、探針先端の構造・状態が変 化すれば、得られる SPM 像もそれに応じて変化する。 見方を変えれば、探針も一つの"ナノ機能材料"であ り, 探針の"ナノスケールで鋭利な形とその物性"が試 料表面の形状を高分解能で描きださせ、また物性を計測 できるようにさせ、さらには原子・分子の操作を可能に しているといえる。一方, SPM が描きだしている像あ るいは測定量の本質は、試料と探針の二つの物体が近接 したことによって変化する物理状態量のナノスケールで の3次元的空間変化である。ただし、量子効果を含めた ナノスケールでの「探針と試料の絡み合い」が物理状態 量を変化させる主原理となっていて、そこで起きている 現象を的確に分析することは必ずしも容易ではない。し かし、この「絡み合い」を解きほぐすことは物理的にも 興味深く、ナノテクノロジーへの応用の観点からも重要 な研究対象である。量子効果を含めてナノスケールで鋭 利な探針がもつ特性の理解と制御が一つの鍵になってい ると思われる。

AFM での絡み合いは、よく知られているように探針 と試料間に働く相互作用力であり,静電気力や van der Waals 力といった遠距離力から化学結合力に代表される 近距離力までの種々の相互作用の合力のはずである。し かし、起源に基づいて合力を分離・解析することは簡単 ではない。一般に半導体表面などで nc-AFM 像が原子分 解能を示す場合、近距離で支配的な化学結合力(共有結 合)が画像形成に大きく寄与しているとされる(イオン) 結晶の場合は、結晶表面の正負イオンと探針先端間の局 所的静電気力の寄与が大きいとされる)。従来、AFM に よる探針-試料間相互作用力の解析はおもに力-距離曲 線⁸の測定によって行われ,その曲線から力の空間変化 を議論して遠距離力と近距離力とに分離し、解析されて きた。一方、力の起源を表面電子(エネルギー)スペク トロスコピーに対応する意味で"分光"するという観点 から,探針-試料間印加電圧を変化させて静電的な力変 化やそれに伴う探針-試料間のトンネル・コンダクタン ス変化を明らかにしようとする試みはほとんどなかった (ただし、応用的重要性から、印加電圧に対して相互作 用力が極小値になる電圧(古典的な意味での探針-試料 間の接触電位差)を求めることができる走査型ケルビン 力顕微鏡⁹の開発は確実に進展した)。しかし, Chen は

早くから相互作用力とトンネル電流の関係に着目し,相 互作用力とトンネル・コンダクタンスがトンネル障壁を 介した探針--試料間の量子力学的共鳴によって密接に関 連していること,即ち,どちらも近接した探針と試料の 波動関数の重なり(正確にはトンネル行列要素)から求 められることを論じた¹⁰⁾。極言すれば,近接していく二 つの金属物体間の結合力とトンネル電流の変化は,崩壊 していくトンネル障壁を介して表裏一体の関係にある現 象(電子定在波を作りだしていく状態)の具現であると もいえる。一方,力とコンダクタンスを同時計測する実 験も行われていて^{11~13)},微弱な力を検出できる nc-AFM などの実験技術の進歩とともに,探針先端原子と試料表 面原子の波動関数の重なりによって生じる量子力学的相 互作用を詳細に解析できる可能性は高くなっている。

ところで、波動関数が確実に重なる距離まで探針と試 料が近づいたとしても、それらのエネルギー準位が異な るとフェルミの黄金則にみられるようにその二つの電子 状態が共鳴することはない。探針と試料が半導体表面や 分子のように分離・離散した電子状態・準位をもつ系で 予想されることである。そこで我々は、探針と試料を半 導体 Si としてその両者間に電圧を印加し, 探針と試料 のフェルミ準位を相対的にシフトさせることで、探針先 端と試料の表面準位エネルギーを静電的にシフトさせて 一致させ、元来は異なるエネルギー準位にある探針先端 の波動関数と試料表面の波動関数を共鳴させる手法を立 案した (Fig. 1)。この着想は,探針-試料間印加電圧を 変化させたときに nc-AFM 像の原子コントラストが微妙 に変化する観察結果14,15)から得られたものであり、化学 結合的相互作用力と印加電圧の関係を確かめるためのも のであった。我々は、探針-試料間印加電圧を変化させ たときの量子力学的共鳴に基づく相互作用力変化を nc-AFM をベースに計測することで表面準位を調べる力学 的分光法を電圧印加非接触原子間力分光法 (nc-AFS: noncontact atomic force spectroscopy) と名付け、そのス



Fig. 1. (color online). Schematic diagram of noncontact atomic force spectroscopy (nc-AFS) with changing bias voltage.

ペクトルを取得し¹⁶⁾,また電流変化も同時測定したので¹⁷⁾紹介する。

2. 実 験 手 法

本実験には自作の室温稼動の超高真空 (UHV) nc-AFM を用いた。力センサーである AFM カンチレバー はピエゾ抵抗型 Si カンチレバー(カンチレバーの曲が り(変位)をカンチレバーの抵抗変化として計測する自 己検出型)を用いた。一般に,カンチレバーの変位測定 にはレーザー照射による光てこ法や光干渉法などが利用 されるが、自己検出型カンチレバーではレーザー照射は 不要である。したがって、光照射によって探針(や試 料)内にキャリアを不用意に励起することはない。用い たピエゾ抵抗型カンチレバーにはカンチレバー部および 探針先端部に B がドープされ、カンチレバーの根本か ら探針先端まで導電性がある。一般に市販されている Si カンチレバーと同様に.本カンチレバーも Si(001) ウェハーから作製され、探針は「001〕方位の単結晶 Si である。通常, 市販のカンチレバー端の Si 探針先端に は自然酸化膜の形成や有機汚染物の付着が認められる。 これらの除去のために UHV 中で探針をアルゴンイオン スパッタし、また加熱(カンチレバーのピエゾ抵抗に直 接通電,600℃程度)した¹⁸⁾。その評価は走査型オージ ェ電子分光顕微鏡で行った。また、UHV-AFM の機構を 利用して, Si 探針先端に単結晶 Si ナノピラーを成長さ せて高分解能 AFM 像観察と分光測定に利用した (Fig. 2: AFM 試料ステージに設置した Si 基板を通電加熱 (約600℃)し、接触電流をモニターしながら探針を接 触させ、その後ゆっくりと引き上げて単結晶 Si のナノ ピラーを成長させる¹⁹⁾)。

探針-試料間相互作用力の測定では、AFM カンチレバ ーをその共振周波数で一定振幅になるように加振し、相 互作用力によるカンチレバーの共振周波数のシフト (*Af*) を FM 検波法によって検出する。前述したように、 探針-試料間に働く相互作用力には、van der Waals 力と 静電気力などの遠距離力、および化学結合力(共有結合 と金属的凝着力を含む)などの近距離力、さらに近接領



Fig. 2. (color online). Single crystal Si nanopillar growth using a UHV-AFM setup. After bringing the Si tip gently in touch with a heated Si substrate, we retract it slowly in a well-controlled manner.

域で働く斥力などが含まれる。探針-試料間相互作用力 Fと計測される Δfには以下の近似関係がある²⁰⁾。

$$\Delta f = \frac{f_0}{2\pi kA} \cdot \int_0^{2\pi} F(z_0 + A\cos\varphi)\cos\varphi \,\,d\varphi \qquad (1)$$

ここで, $k: カンチレバーのバネ定数, f_0: 自由振動$ $時のカンチレバーの共振周波数, A:振動振幅, <math>z_0$:探 針-試料間の平均距離, である。 Δf は引力領域で探針-試料間距離に対して単調増加する。また, 力を成分に分 解したときは各成分に対して(1)式に基づき加算則が 成り立つ。即ち, 探針-試料間に働く全相互作用力 (F_{total})が静電気力(F_{v}), van der Waals 力(F_{vdw}), 結合 力(F_{bord}), 斥力(F_{repul})の合力とするならば((2) 式), 計測される周波数シフト(Δf_{total})は, それぞれの 力の成分による周波数シフトの加算として表される ((3)式)。

$$F_{\text{total}} = F_{\text{V}} + F_{\text{ydw}} + F_{\text{bond}} + F_{\text{repul}}$$
(2)

$$\Delta f_{\text{total}} = \Delta f_{\text{V}} + \Delta f_{\text{vdw}} + \Delta f_{\text{bond}} + \Delta f_{\text{repul}} \tag{3}$$

本測定では合力が引力であり,負側への周波数シフト (- *Δf*)が大きいことは引力が強いことを意味する。

3. 測 定 結 果

本測定で用いた試料 n 型 Si(111)-7×7 再構成表面²¹⁾ の nc-AFM 像の例を Fig. 3 に示す。個々の明領域がダン グリングボンドをもつ Si 吸着原子位置に対応し, 12 個 の Si 吸着原子からなる 7×7 単位胞が描きだされてい る。単位胞内でやや明るい6 個の原子からなる正三角形 状の領域が下層に積層欠陥をもつ半単位胞である(やや 暗い正三角形領域が非積層欠陥半単位胞)。この半単位 胞間の明暗の差は,積層欠陥半単位胞内 Si 吸着原子上 で探針との間に働く引力が非積層欠陥半単位胞内 Si 吸 着原子上より強いことを意味し,電子密度・状態の差異 が結合力の違いを生んでいると推察される。

nc-AFS スペクトル測定は, STM に基づいて開発され た走査型トンネル分光法 (STS: scanning tunneling spec-



Fig. 3. nc-AFM image of Si(111)-7×7 at a sample bias voltage of -0.5 V. Scanning area : about 12 nm×12 nm.

troscopy) である CITS (current imaging tunneling spectroscopy)法²²⁾を模倣した。具体的には.nc-AFM 画像を取 得しつつ,あらかじめ設定した位置で間欠的に探針の走 査を止め,探針-試料間距離の制御用フィードバック回 路もホールド状態にして,即ち探針と試料の相対的位置 関係を固定したうえで、探針-試料間印加電圧を掃引し て共振周波数変化 (-Δf) を計測した。Si(111)-7×7表 面を試料として, nc-AFM 像を観察し, 振動している探 針先端-試料表面間の最接近距離を 1.5, 0.43, 0.33, 0.3 nm(注:相対的な接近変化量の確度は高いが、絶対値 は概算値)と近づけつつ,多数点(Fig.3の約1/4に対 応する面積で16×16=256 点)でnc-AFS スペクトル (-Δf-V曲線)を一気に取得した。各距離で取得したス ペクトルの一部を Fig. 4 に示す(上列が Si 吸着原子上, 下列が Si 吸着原子・Si レスト原子がない領域(表面 Si 原子がない領域)に対応)。

探針が試料面から 1.5 nm 以上離れているときはすべ ての測定点で,相互作用引力は接触電位差(V_c = -0.27 V)に相当する印加電圧で極小値を取り,印加電圧の増 大とともに 2 次関数的に強くなった。この振舞いは静電 気力を起源とした引力に現れる典型的な現象である ($(-\Delta f) \propto (V-V_c)^2$)。一方,探針-試料間距離を 0.43 nm に接近させると,すべての測定点で 0 V 近傍にやや幅広 なピークが出現した。さらに 0.33,0.30 nm と近づける と,複数の測定点で 0 V 近傍のピークが非対称的に鋭く なった。Fig. 5 (a) に,Si(111)-7×7 表面の積層欠陥半 単位胞 Si 吸着原子上で得られた nc-AFM スペクトルの 探針-試料間距離に対する依存性を示す。この関係を基



Fig. 4. (color online). Typical examples of nc-AFS spectra over Si(111)-7×7. Upper row shows spectra over a Si adatom, and lower over no Si surface atoms, i.e., no Si adatoms neither Si rest atoms.

に, 探針-試料間距離・印加電圧・相互作用力 $(-\Delta f)$ の関係を 3 次元プロットとして Fig. 5 (b) に描いた。

ここで得られた nc-AFS スペクトルを数値的に解析し てみた。各スペクトルから遠距離相互作用である静電気 引力((*V*-*V*_c)²の項)と van der Waals 力(探針-試料間 距離の逆べき乗に比例する項。nc-AFM スペクトルの最 小値(静電気引力がゼロのとき(*V*=*V*_c))に対応。)の 寄与を差し引き,近距離相互作用の寄与のみをピーク曲 線(近距離相互作用スペクトル)として抽出した。さら に,この曲線が複数のガウス型曲線が重なっていると仮 定して複数のピークに分離してみた。その結果,試料表 面上のすべての測定点でほぼ同じピーク(中央値= -0.27 eV,半値幅=約0.35 eV,ブロード・ピークと呼 ぶ)が見いだされ,探針-試料間距離0.33 nm のときは, そのピークの他に表面 Si 原子上では特定電圧で非常に 鋭いピーク(半値半幅:約0.1 eV,シャープ・ピークと 呼ぶ)が見いだされた。シャープ・ピークの中央値は各



Fig. 5. (color online). (a) Change of nc-AFM spectra over a Si adatom with decreasing tip-sample closest separation from 1.5, 0.43, 0.33 to 0.30 nm. (b) Surface plots of $-\Delta f$ versus sample bias voltage and tip-sample closest separation.

原子サイトにより若干異なっていた(Si 吸着原子上で はフェルミ準位より-0.4 eV,積層欠陥半単位胞内の Si レスト原子上では-1.0 eV でピーク)。これらの値は, 光電子分光・トンネル分光法や密度汎関数法によって求 められた Si(111)-7×7 表面の各 Si 原子の電子エネルギ ー準位によく一致し^{23,24)},以下に議論するように探針と 試料間の化学(共有)結合に起因していると考えられ る。また,-0.2 V から+0.8 V の範囲に小さな複数のピ ークも検出しているが,詳細はまだ未確定である。

一方,測定系を改良して nc-AFS スペクトルと同時に 電流-電圧 (I-V) 特性も測定した。ただし, AFM カン チレバーは常にその共振周波数で振動(この測定では f₀=167 kHz, A=15 nm) しているので電流もその周波 数で変動する。計測に用いた電流アンプの帯域は数 kHz なので、測定電流はカンチレバー振動の1周期あたりの 平均値となる。電流がトンネル電流と同じ探針-試料間 距離特性をもつとすると、平均電流値は探針と試料が最 接近したときに流れる電流の5%弱と推量される25)。 Fig.6 に測定結果を示す。nc-AFS スペクトルは, Fig.5 の結果と同様に接近時にすべての領域でブロード・ピー ク, Si 吸着原子上でシャープ・ピークを示した。一方, 同時測定した電流は, Si 吸着原子上でシャープ・ピー クが現れる印加電圧で接近時(0.5 nm)にわずかに検出 され, さらに接近 (0.4 nm) するとシャープ・ピークと ともに急峻に増大した。このピーク電流は1nA以下で あるが、前述の計算によると振動している探針が試料に 最接近したときには 20 nA 程度の電流が流れていること になる。この程度の電流の場合、トンネル障壁の崩壊が 始まって障壁高さが低下し、純粋なトンネル過程からバ

リスティック伝導に移行し始めている可能性がある。こ の印加電圧での探針-試料間距離に対する電流変化を測 定すると,見かけ上のトンネル障壁高さは低下してい た。これは実際のトンネル障壁高さがかなり消失してい ることを意味し²⁶⁾,探針が接近して探針と試料の表面間 に強い引力が働くときに両者間には電子伝導チャネルが 開いていることを示唆する。この*I-V*特性には通常の STS で測定されるようなトンネル電流-印加電圧特性も 含まれているはずであるが,前述したように振動してい る探針と試料間の電流の検出感度はかなり低下するので 検出できなかったと推定している。

4. 印加電圧に依存する相互作用力の考察

固体同士の結合形成を考える場合、通常の孤立分子系 の結合過程と大きく異なる点がある。当然であるが、そ れは両者間に電位差を与えられる点である。電位差を印 加すれば2物体のフェルミ準位は静電的・相対的にシフ トする。そこで、nc-AFSの結果を考察するためのエネ ルギーダイアグラムを Fig.7 に示す。試料は Si(111)-7×7 再配列表面 (n型, バンドギャップ:1.1 eV) で表 面伝導は金属的である(表面 Si 原子のダングリングボ ンド1本に平均1個の電子が存在)。Si探針の電子状態 は不明であるが,探針が [001] 方位の単結晶 Si (B ド ープ p 型) であるので, 先端は Si ダイマーからなる Si (001)-c(4×2) 再配列構造で表面エネルギーギャップ (約 0.8 eV) をもつと仮定する。探針と試料が 1 nm 以上 離れていて0V印加の場合(a),接触電位差によって電 界が真空ギャップ内で発生する効果と鏡映力の効果を考 慮して、真空ギャップ内の静電ポテンシャルは中央が傾



Fig. 6. Simultaneous measurements of $-\Delta f$ with average current versus sample bias voltage at tip-sample separations of (a) 0.9, (b) 0.5 and (c) 0.4 nm, respectively. Upper row shows over a Si adatom, and lower over no Si surface atoms.



Fig. 7. Energy diagram of a sample of $n-Si(111)-7 \times 7$ and a tip of $p-Si(001)-c(4 \times 2)$ in a proximity. (a) At a wide separation at 0 V. (b) Tip approaching at 0 V. (c) Shift of bias voltage tuning of the sample states to the tip states, resulting in resonance states.

いた曲線として描ける。次に探針が試料に1nm以下に 接近すると、両者に由来した静電ポテンシャルの重ね合 わせの効果でトンネル障壁が崩壊し始め、トンネル電流 は急激に増大する。さらに接近すると(b), 試料と探針 の波動関数の空間的重なりは大きくなる。ここで試料-探針間印加電圧を変化させる (c)。試料側のおもに表面 Si吸着原子に起因するダングリングボンドと探針側の 空準位(探針先端の Si ダイマーのうちバックリング・ ダウンした Si の表面電子状態)のエネルギーが一致し 始め、両者の軌道混成によって電子系エネルギーが得と なり共有結合が生じる。この結合形成の印加電圧依存性 が nc-AFS で捉えたシャープ・ピークであると推定で き、また、この軌道混成が電子伝導チャネルを形成した と考えられる。このとき探針側に正の電圧を印加してい るので、探針先端の Si ダイマーのバックリング・ダウ ン(空準位)した Si 原子は、負に印加された試料側に 引っ張られバックリングが弱まり対称ダイマーに近づい ている可能性がある。Si 対称ダイマーの場合, エネル ギーギャップは消失することが知られている。したがっ て、探針側のSiダイマーによる表面エネルギーギャッ プは探針側への正電圧印加によって小さくなり、結果と して、試料のダングリングボンドの電子状態とエネルギ ー的に重なる印加電圧範囲は小さくなるであろう。この ような効果を含め鋭いピークが捉えられたと考えてい る。

次に, 試料表面上のすべての測定点で検出されたブロ ード・ピークを考える。このピークはシャープ・ピーク に比べてやや離れた探針-試料間距離(約0.5 nm)から 検出され始めた。探針が試料に接近してトンネル障壁の

高さと幅が減ると、電子はトンネル抜けしやすくなり探 針と試料の電子は双方に帰属されるようになる。例え ば. 試料から探針ヘトンネルした電子は探針表面の原子 ポテンシャルで散乱され、一部はそのまま進行し、残り は後方散乱されその一部は試料側に再度トンネルし、さ らにはその一部が後方散乱され探針側へまたトンネルす るであろう。このような障壁の低減・狭小化によって増 加する探針-試料表面間の電子散乱は、トンネル障壁を 挟んだ一つの定在波を形成し得る。真空を挟んだ二つの マフィンティン・ポテンシャルの間でトンネル障壁が消 失することによって形成されていく金属結合への移行で あるとも解釈できる。印加電圧が高くなると、トンネル 抜けした電子はバリスティックに表面より内部まで進行 し、表面近傍の原子ポテンシャルの散乱を受けにくくな る。したがって、低減・狭小化したトンネル障壁を挟ん だ探針-試料間に広がる共鳴的電子状態を形成しにくく なる。その結果.nc-AFM スペクトルは接触電位差が補 償される印加電圧(本測定で約-0.27 V. トンネル障壁 の中央で真空準位の傾きが水平になり, 探針と試料に対 してその傾きが対称的なトンネル障壁となる電圧)のと きを中心としてブロード・ピークが観察されると解釈で きる。また、孤立した Si 原子同士が接近するときの s, p軌道の混成を考えるとき,接近によって縮退が解けて いくときの p 軌道に含まれる電子系のエネルギー低下は 金属結合的であり、さらに接近したときの sp 混成は半 導体としての共有結合状態であると表現できる。即ち, 金属的結合は共有結合が形成されるより遠方で出現する わけで、本測定で捉えられたピークの距離依存性と対応 している。

5. ま と め

印加電圧を変化させて各原子位置での相互作用力を評価する新しいナノ力学的表面電子分光法 nc-AFS を紹介した。ここで示した結果は、二つの凝縮系物体を極接近させ印加電圧を変化させて静電エネルギー的にチューニングすることで、それぞれの表面電子準位からなる共鳴状態(共有結合)を形成できることを示している。本手法では電流も同時計測できるので、近接した凝縮系物体間のトンネル障壁の崩壊過程と相互作用力の相関に新しい知見をもたらすことや、二つの電極に挟まれた分子系の結合形成や電流-電圧特性の評価への応用が期待できる。また、nc-AFM は絶縁部を含んだ材料・デバイスにも適用できるので、静電ポテンシャル変化をその試料の境界条件に基づき巧みに利用すれば、nc-AFS も幅広い材料・デバイスに適応できる可能性をもつ。ただし、超高分解能走査電子顕微鏡と SPM を複合化した観察によ

ると,対象試料がナノ粒子などの場合,静電的な効果に よって探針と試料間でナノ粒子の飛翔が偶発的に起こる 場合がある。近接物体間の相互作用を理解するには,構 造的な配位も含めて多角的で慎重な検討が必要であるこ とは忘れずに指摘しておきたい。

文 献

- G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber and E. Weibel : Phys. Rev. Lett. 49, 57 (1982).
- G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber and E. Weibel : Phys. Rev. Lett. 50, 120 (1983).
- G. Binnig, C.F. Quate and Ch. Gerber : Phys. Rev. Lett. 56, 930 (1986).
- 4) T.R. Albrecht, P. Grütter, D. Horne and D. Rugar : J. Appl. Phys. **69**, 668 (1991).
- 5) F.J. Giessibl : Science 267, 68 (1995).
- S. Kitamura and M. Iwatsuki : Jpn. J. Appl. Phys. 34, L145 (1995).
- H. Ueyama, M. Ohta, Y. Sugawara and S. Morita : Jpn. J. Appl. Phys. 34, L1086 (1995).
- 8) B. Cappella and G. Dietler : Surf. Sci. Rep. 34, 1 (1999).
- 9) M. Nonnenmacher, M.P. O' Boyle and H.K. Wickramashinghe : Appl. Phys. Lett. **58**, 2921 (1991).
- C.J. Chen: "Introduction to Scanning Tunneling Microscopy, second edition" (Oxford University Press, Oxford, 2008) p. 123.
- U. Dürig, O. Züger and D.W. Pohl : J. Microscopy 152, 259 (1989).
- 12) Ch. Loppacher, M. Bammerlin, M. Guggisberg, S. Schär,

R. Bennewitz, A. Baratoff, E. Meyer and H.-J. Güntherodt : Phys. Rev. B **62**, 16944 (2000).

- 13) A. Schirmeisen, G. Cross, A. Stalder, P. Grütter and U. Dürig : New J. Phys. **2**, 29 (2000).
- T. Arai and M. Tomitori : Appl. Surf. Sci. 157, 207 (2000).
- 15) T. Arai and M. Tomitori: "Noncontact Atomic Force Microscopy", ed. by S. Morita, R. Wiesendanger and E. Meyer (Springer, Berlin, Heidelberg, 2002) p. 79.
- T. Arai and M. Tomitori : Phys. Rev. Lett. 93, 256101 (2004).
- 17) T. Arai and M. Tomitori: Phys. Rev. B **73**, 073307 (2006).
- 18) T. Arai and M. Tomitori : Jpn. J. Appl. Phys. Part 1 36, 3855 (1997).
- T. Arai and M. Tomitori : Appl. Phys. Lett. 86, 073110 (2005).
- 20) F.J. Giessibl : Phys. Rev. B 56, 16010 (1997).
- 21) K. Takayanagi, Y. Tanishiro, M. Takahashi and S. Takahashi : J. Vac. Sci. Technol. A **3**, 1502 (1985).
- R.J. Hamers, R.M. Tromp and J.E. Demuth : Surf. Sci. 181, 346 (1987).
- 23) Ph. Avouris, I.W. Iyo and F. Bozso : J. Vac. Sci. Technol. B 9, 424 (1991).
- 24) M. Fujita, H. Nagayoshi and A. Yoshimori : Surf. Sci. 242, 229 (1991).
- 25) T. Arai and M. Tomitori : Jpn. J. Appl. Phys. 39, 3753 (2000).
- 26) N. Kobayashi, K. Hirose and M. Tsukada : Jpn. J. Appl. Phys. 35, 3710 (1996).