



入門講座

分析試験法編-16

最先端の走査トンネル顕微鏡 (STM)

山田太郎
Taro Yamada

早稲田大学 各務記念材料技術研究所
助教授

The Leading-edge Technology of Scanning Tunneling Microscopy (STM)

1 はじめに

1981年にBenig, Rohrerによって発明された走査トンネル電子顕微鏡 (Scanning Tunneling Microscopy, STM) とそれに続く一連の走査プローブ手法の出現は表面科学の世界に大きなインパクトをもたらした¹⁾。STMによって実空間における原子分子スケールの構造がそのまま拡大されて画像化されたことにより、固体表面の構造が誰にでも直感的に把握できるようになった。爾来、表面科学の分野はSTMを媒介にして圧倒的に多くの研究者が参入するところとなり、幅広い研究が展開されてきている。

STMの観測対象も、初期の頃の超高真空中の単結晶の表面から、溶液中に浸された固液界面にまでひろがり^{2,3)}、絶縁性の物質には原子間力顕微鏡 (AFM) が応用され、光や磁気力、磁気共鳴、化学的親和力などを応用したもの、さらには微少プローブによる原子分子スケールの表面加工や高分子、生体分子などの力学的測定まで話題が付きない。

本稿では、発明以来20年近くを経て今や確立しているSTMの技法を概観し、さらに、ごく最近になってまたさ

れた、STMの先端的な利用例について述べる。

2 固体表面の観察とSTMの技法

固体表面を観察する上でまずなによりも重要なことは、対象とする表面が外界の影響を受けて変化しないように、環境条件を適切に制御することである。一般的に大気中では、固体表面は空気の成分を起源とする汚染から免れることは困難である。この意味で表面科学は超高真空技術と殆ど表裏一体の関係にある。表面の清浄化処理や加熱処理、及び分子吸着など全てが超高真空系内で行われる。表面の清浄度は、真空中では各種の電子分光や回折法、溶液中では電流電圧測定でかなり確実にモニターできるが、STMにより微視的スケールで最終的に確認される。

図1に筆者が観測した、グラファイト単結晶 (0001) 面及び金単結晶 (111) ($22 \times \sqrt{3}$) 再構成清浄表面のSTM像を示す。グラファイト (0001) 面は炭素原子が文字どおり蜂の巣状に結合してできた格子網面であり、STMでも対応する寸法の画像が空気中でも比較的容易に観測できる。他方金単

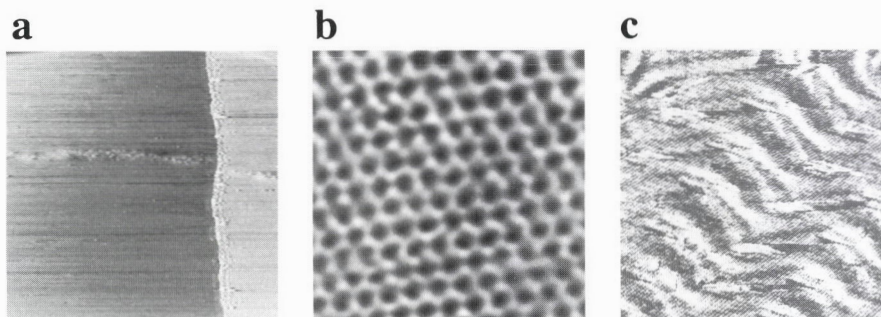


図1 (a) グラファイト (黒鉛・HOPG) (0001) 劈開面のSTM像 画面寸法100nm×100nm。トンネル電流0.5nA、ギャップ電圧50mV。
(b) グラファイト (黒鉛・HOPG) (0001) 劈開面のSTM原子像 画面寸法5nm×5nm。トンネル電流1nA、ギャップ電圧50mV。
(c) 金単結晶 (111) 清浄表面のSTM像。超高真空中800℃に加熱後測定 画面寸法50nm×50nm。トンネル電流10nA、ギャップ電圧250mV。

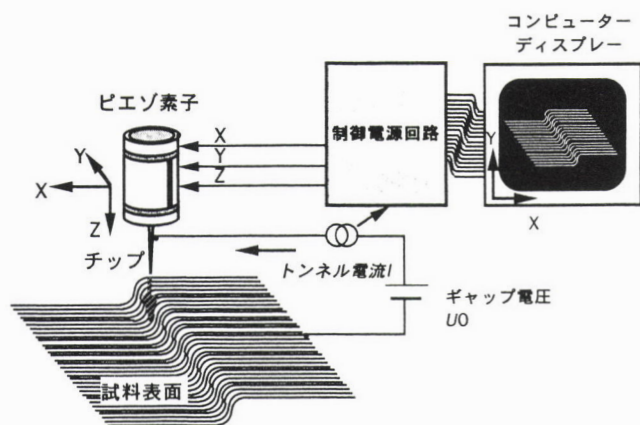


図2 STM装置の原理図

結晶(111)面(図1c)は、超高真空中でアルゴンイオン衝撃の後、800°Cまでの加熱により清浄化される。加熱清浄化の過程で、金(111)面は、結晶格子構造から類推される単純な六方格子ではなく、それをまた大規模に別の周期で変調した“(22×√3)再構成面”というものになる。図1cにおいては、像中細かい点々は全て各々金原子1個に対応し、大規模に波打つうねりが“(22×√3)再構成”構造である。この構造は真空加熱処理や水溶液中の電極電位印加により常に同様に再現する。

STMは、ピエゾ素子(圧電素子)による微小位置決め操作(誤差0.001nm以下の精度が実現される)により、タングステン、白金合金などの探針(チップ)を観測する表面に平行に(xy)走査し、また表面垂直方向(z)を調節して表面に近寄せる(図2)。表面と探針の間に電位差(ギャップ電圧)を与えると試料探針間距離が十分に近いときにこれらの間にトンネル電流が流れる。トンネル電流は試料探針間に空隙がある時のものであり、接触時の電流とは区別される。この電流が望みの一定の電流になるように試料探針間距離(z)を電子回路で帰還制御しながらxy走査して、xyに対してzをプロットしたものがSTM像である。この帰還制御動作と画像蓄積、さらにその後の画像処理などを、すべてマイクロプロセッサで行うような市販装置が最近では広く出回っており、STM、AFMはパソコンの発展とともに身近なものとなってきている。

ところで、STMで本当にこのような動作原理が実現しているのだろうか。最近高柳ら⁴⁾により、STMであい対する探針と試料表面を横から透過型電子顕微鏡(TEM)で直接観察した画像が発表され、STMの動作が直感的に理解できることとなった。図3においては、探針の先端はこのスケールにおいてはかなり鈍く感じられるが、いろいろ実験操作をしているうちに一般的にこのようなサイズになってしまうようである。走査動作により、探針の先端が試料表面と

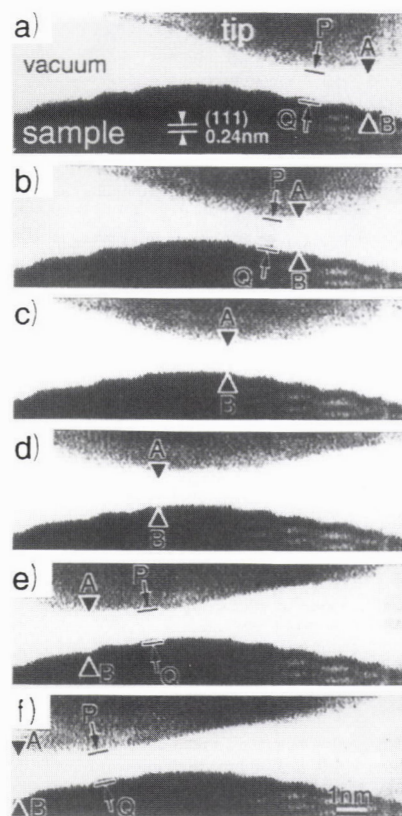


図3 STM動作中のSTM探針の動きを示す透過電子顕微鏡像⁴⁾ 金製の探針(tip)で銅多結晶線の試料表面を走査中。A: 探針の最先端、B: 探針の最先端に相対する試料表面上の位置。P, Q: 探針と試料の最近接位置。走査時間に応じて撮影。
a) 0秒後、b) 4秒後、c) 8秒後、d) 12秒後、e) 15秒後、f) 18秒後 (Reprinted from Surf. Sci. Vol. 415, H. Onishi, Y. Kondo and K. Takayanagi, p. L1061, copyright (1998), with permission from Elsevier Science)

一定の距離を保ちながら移動していることがわかる。見てのとおり、探針は試料表面に触れることなく、“トンネリングギャップ”が常に保たれ、電子はこのせまい空間をトンネル効果によって移行していくことが実感できる。

STMは原理的には、電流の流れ得る表面なら何にでも適用できるはずであるが、上記の幾何学的配置からわかるとおり、平坦な表面ほど測定しやすいことは間違いない。装置の動作性能の限界をこえる凹凸の激しい表面では正常に観測できない。そこで殆どの実験例は、STMにマッチしたできるだけ平坦な表面を作成することから始まる。そうして初めて、吸着分子などによるさらに低い凹凸の形状が、高いS/N比をもって解像できてくるのである。

もう一つの問題点は、STM画像の解釈可能性である。原子・分子スケールの真正な画像内においてある形状が現れたとして、それをある化学種であると判定するのは意外と困難である。STM画像は電子軌道の形状を反映するのであ

り、その軌道形状だけから分子種を判定することは一般的にはできない。さらに、不純物の混入の恐れが常時あり、さらに、色々な原因のノイズもあり、まさに、絵をみただけではなんともいえない、と言わざるを得ないケースが常である。この問題を克服するには、環境条件を十二分に制御することと、他の手法による観測結果とクロスチェックを行うことが最善の道である^{5,6)}。

3 STMによるアトムマニプレーション —表面電子の量子力学的特性

STMは探針のオングストロームスケールの位置決め動作を基礎としているので、表面構造の観測だけでなく、そのまま探針を利用した表面構造の創製や加工を行うことも考えられる。事実かなり初期の段階からSTMによる原子分子の操作すなわちアトムマニプレーションが検討され、多くの実験が行われてきた。Eiglerらによるキセノン原子の配置⁷⁾、青野らによるケイ素表面の原子引き抜き⁸⁾など印象深い研究例が多い。

本項では、Eiglerらによる、銅金属単結晶(111)表面の鉄原子の任意配列構造による表面電子閉じ込め実験⁹⁾の結果を紹介する。

Eiglerらは世界に先駆けて液体ヘリウム冷却設備を含んだSTM装置を設計製作し、STMにつきものの熱膨張による機械的ドリフトを極限まで低減させることを企て、実際、かなりの長時間に及んで、表面上同一の場所をオングストロームの精度で観測・加工できるような装置を完成した。この装置では、液体ヘリウムによって冷却した気体ヘリウムを超高真空容器の外周に回して、STM装置本体を、探針、試料その他一切まとめて数Kから十数Kの温度に保つこと

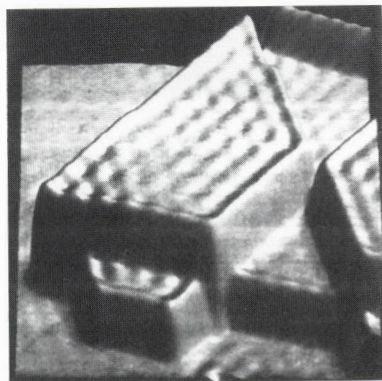


図4 銅(111)金属清浄表面の部分STM像⁹⁾
画面寸法25nm×25nm。トンネル電流1nA、ギャップ電圧0.1V。(Reprinted from Surf. Sci. Vol. 361/362, M.F. Crommie, C.P. Lutz, D.M. Eigler and E.J. Heller, p. 864, Copyright (1996), with permission from Elsevier Science)

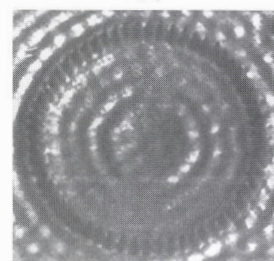
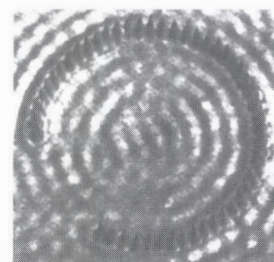
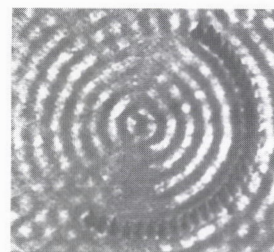


図5 銅(111)金属清浄表面上に鉄原子を用いて直径17.74nmの円周構造を作製しているところのSTM像⁹⁾
画面寸法約20nm×20nm。トンネル電流1nA、ギャップ電圧0.01V。円周構造内に電子定在波が観測される。(Reprinted from Surf. Sci. Vol. 361/362, M.F. Crommie, C.P. Lutz, D.M. Eigler and E.J. Heller, p. 864, Copyright (1996), with permission from Elsevier Science)

ができる。外部からの振動、電磁波ノイズ、光や熱による擾乱を理想的にシャットアウトでき、大変心地よい操作性を実現した模様である。

この装置によって観測した銅金属(111)面の画像を図4に示す。ここでは、(111)面に存在するステップ・テラス構造をデフォルメして示している。テラス面上に周期的な波が見えるが、この波の周期は約2nmあり、銅(111)面の原子間隔0.255nmとは全く異なる。またこの波の周期は探針—試料間電圧を変えると変化し、結局、表面における多種の電子波の干渉によって現れる“定在波”であることが示される。この“定在波”の形は、もちろん表面の形状、即ち境界条件で決まるので、人為的に形状を造ることで電子“定在波”の性質を調べることができると考えられた。

そこで、銅(111)清浄表面に微量の鉄原子を蒸着により吸着させた後、各鉄原子を1個1個探針で移動させ、鉄原子全て60個を用いて直径17.7nmの円周を描いた。この作業の

様子を図5に示す。まさに、世界でもっとも小さい鉄製の構造物を構築したことになる。円周が形成されるに従い、銅表面の清浄部分にやはり長距離周期の電子定在波がいろいろ形を変えて見えてきている。

図5(c)においては、円周部分の内部のみならず外部にも同心円上の定在波が見られる。とくに円周内部の同心円状波形は、波のピークの数と間隔が探針－試料間電圧に応じて一定の関係をもって変化する。この様子は量子力学の入門編でよく紹介される、『井戸型ポテンシャル』における電子の波動関数を計算することにより再現される。

Eiglerらの一連のアトムマニプレーションによる構造形成実験は、量子力学の世界を自在に利用する技術の端緒となるものであり、量子力学的原理に基づいた電子記憶素子、演算素子など、全く新しい応用が期待される。その意味で、あらゆるジャンルの研究者の注目を集めている。

4 STMトンネリングスペクトロスコーピーによる吸着分子1個の内部振動の観測

探針と試料の間のトンネル電流を、ギャップ電圧の関数として測定することにより、試料表面における電子状態を観測することができる。さらに、この電流－電圧曲線に関係した、驚くべき分光法が最近Stipe, Razaee, Hoら¹⁰⁾により発表された。

Hoらは、やはり液体ヘリウム冷却設備を含んだSTM装置を注意深く設計し、8 K(=−265℃)に冷却時で、到達真空度 2×10^{-11} Torr、温度ドリフト0.01K、トンネルギャップドリフト0.0001nm/min、トンネル電流バイアス0.5pAという極めて高安定度の装置を組み立てた¹¹⁾。この装置により、やはり表面上オングストロームレベルの物体をドリフトに悩まされることなく、長時間観測することができた。さらに、この安定度を利用して、今まで成功例のなかった電流－電圧曲線の2階微分曲線、即ち d^2I/dV^2 曲線を、変調ロックイン検出という技法により精度よく測定することに成功した。

この電流－電圧曲線の2階微分曲線とは、何を指し示すものであろうか。幾つかの原子からなる分子においては、その構成原子同志の間の距離が周期的に時間変化する“分子内振動”が、有限温度においては常に考えられる。これらを実際測定する手段としては有名な赤外吸収分光法やラマン分光があるが、別に、非弾性トンネル電子分光法(IETS)という手法も古くから提案され実行されていた。非弾性トンネル電子分光法においては、アルミニウム－酸化アルミニウム－鉛で構成されるジャンクションに、観測したい分子種をごく微量介在させ、液体ヘリウム冷却下に

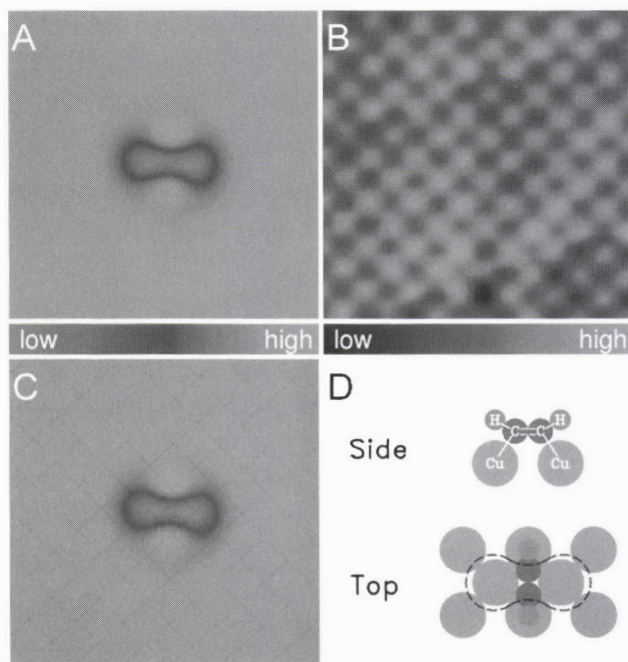


図6¹⁰⁾ (a)銅(100)清浄表面に吸着したアセチレン分子のSTM像。画面寸法2.5nm×2.5nm。トンネル電流10nA、ギャップ電圧100mV。
(b)(a)と同位置でアセチレン分子を取り除いた後の銅(100)清浄表面。画面寸法2.5nm×2.5nm。トンネル電流10nA、ギャップ電圧10mV。
(c)画像(a)に画像(b)から得られた下地格子構造を書きこんだもの。
(d)銅(100)上の吸着アセチレン分子の構造モデル。
(Reprinted with permission from B. C. Stipe, M. A. Razaee and W. Ho, Science 280(1998)1732, Copyright 1998 American Association for the Advancement of Science)

このジャンクションに対する電流－電圧曲線の2階微分曲線を測定する。このとき、 d^2I/dV^2 曲線は、
 $8.06 \times V(\text{mV単位}) = \nu(\text{振動分光における振動波数、cm}^{-1} \text{1単位})$

なる電圧Vにおいてピークを示し、したがって d^2I/dV^2 曲線がそのまま分子種の振動スペクトルを示すこととなる。

Hoらは、STMのトンネリングギャップにおいても、同等の状況であることを実験的に明示した¹⁰⁾。銅の金属単結晶(100)表面を清浄化し、アセチレン分子(H-C≡C-H)及び重水素置換した“重”アセチレン分子(D-C≡C-D)の混合物を微量吸着させた。温度8 KにおいてまずSTM画像を測定すると、図6のようなダンベル型の穴が観測された。このダンベルのところにアセチレン分子があると考えられるわけであるが、吸着分子が凹みとして観測されるのは、ギャップ電圧及び設定トンネル電流の加減によって下地銅表面にくらべてトンネル電流が小さく出てくるからである。即ち、アセチレン分子の電子状態を反映していることが示されて

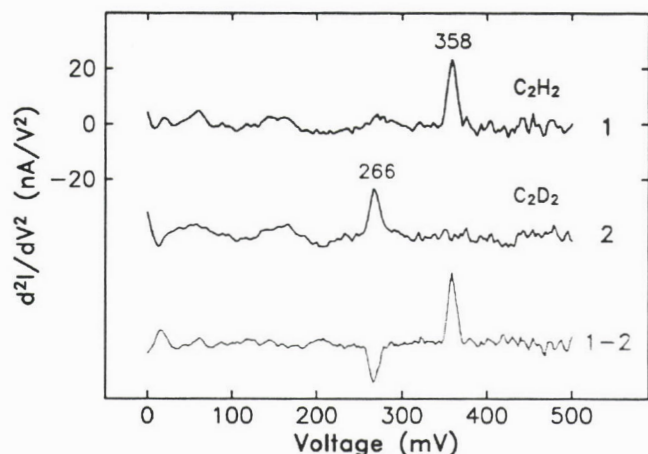


図7 銅(100)清浄表面に吸着したアセチレン分子 $\text{H}-\text{C}\equiv\text{C}-\text{H}$ 及び重アセチレン分子 $\text{D}-\text{C}\equiv\text{C}-\text{D}$ の d^2I/dV^2 スペクトル¹⁰⁾

1. アセチレン分子 $\text{H}-\text{C}\equiv\text{C}-\text{H}$ 。
2. 重アセチレン分子 $\text{D}-\text{C}\equiv\text{C}-\text{D}$ 。
3. 1と2の差スペクトル。バックグラウンド信号が打ち消されていることを示す。

(Reprinted with permission from B. C. Stipe, M. A. Rezaei and W. Ho, Science 280(1998)1732, Copyright 1998 American Association for the Advancement of Science)

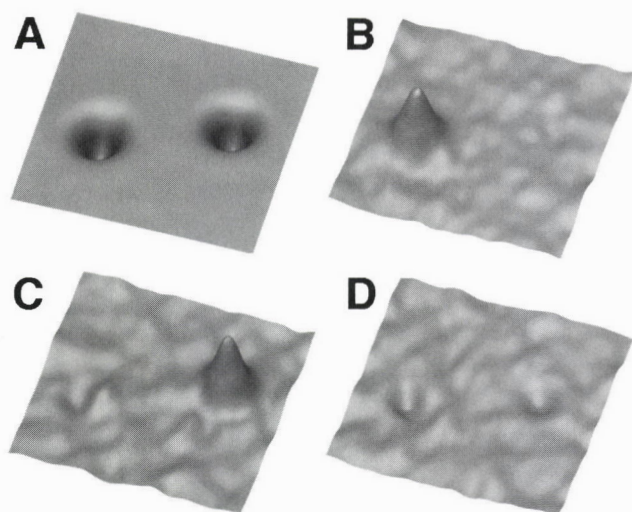


図8 銅(100)清浄表面に吸着したアセチレン¹⁰⁾分子 $\text{H}-\text{C}\equiv\text{C}-\text{H}$ 及び重アセチレン分子 $\text{D}-\text{C}\equiv\text{C}-\text{D}$ のSTM像

画角は何れも $4.8\text{nm}\times 4.8\text{nm}$ 。

- A 通常のSTM像。
- B 振動信号像(358mV対応)。
- C 振動信号像(266mV対応)。
- D 振動信号像(311mV対応)。

(Reprinted with permission from B. C. Stipe, M. A. Rezaei and W. Ho, Science 280(1998)1732, Copyright 1998 American Association for the Advancement of Science)

いる。

このような分子像を表面上にいくつか探し出し、その上に探針を固定して d^2I/dV^2 曲線を測定したところ、図7中

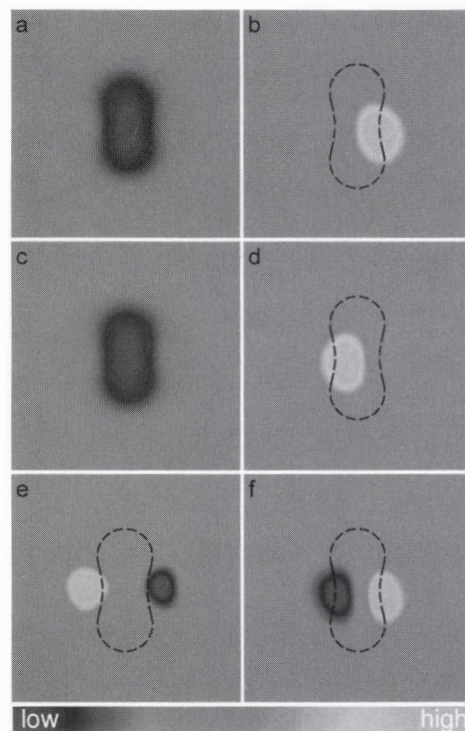


図9 銅(100)清浄表面に吸着した重水素標識アセチレン分子 $\text{H}-\text{C}\equiv\text{C}-\text{D}$ のSTM像及び振動信号像

画角は何れも $1.7\text{nm}\times 1.7\text{nm}$ ¹²⁾

- (a) 通常STM像、トンネル電流1nA
- (b) (a)と同時記録の振動信号像(266mV対応、C-D結合に相当)。
- (c) アセチレン分子を 180° 回転させた後の通常STM像。
- (d) (c)と同時記録の振動信号像(266mV対応、C-D結合に相当)。
- (e) 差画像(a)-(c)。C-D結合部位とC-H結合部位の幾何学的構造の違いを示す。
- (f) 差画像(b)-(d)。C-D結合部位とC-H結合部位の結合振動数の違いを示す。

(B. C. Stipe, M. A. Rezaei and W. Ho, Phys. Rev. Lett. 82(1999)1724.)

のような2種類に分類されるスペクトルが得られた。スペクトル1には $358\text{mV}=2885\text{cm}^{-1}$ にピークが現われ、スペクトル2では $266\text{mV}=2144\text{cm}^{-1}$ である。各々 $\text{H}-\text{C}\equiv\text{C}-\text{H}$ 分子中のC-H伸縮振動、 $\text{D}-\text{C}\equiv\text{C}-\text{D}$ 分子中のC-D伸縮振動に対応することが、他の分光測定からわかっている。即ち、吸着分子1個1個の振動スペクトルを別々に測定することに成功したことになる。

さらにこのことを示すため、表面位置に対してその位置における d^2I/dV^2 の値をスキャンしてプロットした、“振動信号像”を図8に示す。図8(a)は通常のSTM(トポグラフィ)像であり、同位体置換を度外視したアセチレン分子2個に対応する凹みが見える。これに対し、(b)、(c)はそれぞれ358mV、266mVに対する“振動信号像”であり、一方は $\text{H}-\text{C}\equiv\text{C}-\text{H}$ 分子で、一方は $\text{D}-\text{C}\equiv\text{C}-\text{D}$ 分子であることを明らかに表している。また、両者の中間である311mVに

おける“振動信号像”(図8(d))では大きな信号が見られないことから、振動励起がなされていないことが確認できる。

以上の実験から、まさに、表面に吸着した分子1個1個の振動スペクトルを個別に観測することが可能であることが示された。このことは、気体分子の分子分光法以来連続と続く振動分光法の歴史にあって、とうとう目指す分子1個だけの振動を捉え得た、というにとどまらず、今までSTMの本質的な欠点とされてきた、「何かが見えるが、それが何なのかは分からない」という問題にも原理的な解決をもたらしているものである。即ち、“振動信号像”を既存の赤外吸収分光などのデータと比較することにより、観測された形状を特定の化学結合や元素種にまで帰属できるのである。

さらにHoらは、同一分子内の異種結合の振動を識別するという、化学結合観測の極限にせまる実験結果を示した¹²⁾。アセチレン分子の2個の水素原子の内1個だけを重水素にした $\text{H-C}\equiv\text{C-D}$ 分子を同様に銅(100)清浄表面に吸着させ、通常STM像及び269mVに対する“振動信号像”を測定した。図9にそれらを示す。ダンベル型に見えているのは、アセチレン分子の $\text{C}\equiv\text{C}$ 三重結合の π 電子分布であり、この際ダンベルの柄にあたる部分は $\text{C}\equiv\text{C}$ 軸と直交していると考えられる。したがってbの“振動信号像”でダンベルの中央部やや右に寄った位置の269mV振動の分布はまさに $\text{H-C}\equiv\text{C-D}$ 分子中のC-D結合によるものである。 H-C 結合は異なる振動数なのでこの像には現れない。探針に高電圧パルスを加えると、この吸着アセチレン分子全体を回転させることができる。下地の銅(100)表面の対称性から、回転前後の通常STM像は殆ど変わらないが、C-D結合の位置は逆転する。

STMのトンネリング電流による振動励起は、赤外吸収などの双極子選択則とは全く異なる励起強度変化を示し、新しい研究課題になっている。何はともあれ、Hoらの研究成果は最近のSTM分野の一大センセーションとして実験、理論の両面から注目を集めている。

5 電解質溶液中のSTM観測

STMの動作原理は操作環境が真空中でも溶液中でも変わらないが、特に電解質溶液中ではチップも電解電極のひとつとなり、チップをそのまま浸漬するとトンネル電流に対して電解電流が大きなバックグラウンドとなってしまう。そこでチップの先端以外の不必要な部分を絶縁し、また電気化学的環境に合うようにチップの電位もポテンシオスタットで制御して、ギャップ電圧を与える。最近では、純度の高い溶媒・溶質から調合した電解質溶液の中で、観測

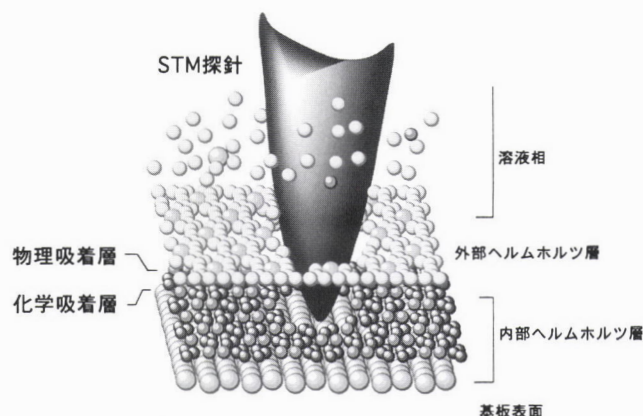


図10 固液界面におけるSTM観測の概念図

する表面を作用電極として電極電位を掃引して、溶液中その場で各種の清浄表面が得られることがわかり、電気化学的環境における表面科学の基礎が整った。

電気化学的環境において、金属あるいは半導体の表面近傍には、吸着種のみならず、溶媒分子や、界面全体としての電気的中性条件を保つために溶液中イオン種も高い濃度で存在することになる。このような環境中でのSTM観測の概念図を図10に示す。今までの幾多の固液界面のSTMの観測結果から、固液界面には、溶液中の固体表面には、表面原子に化学結合した「化学吸着種」と、静電的な力や分子同志の間に働く分子間力の結果表面に構成される「物理吸着種」に分類される吸着種が生成することがわかってきた。常温における溶液中STMでは、イオン、原子あるいは有機分子の「化学吸着種」が美しい格子図形として観測されることが多い。また、「物理吸着種」は凝集力如何によってはよく固定されて観測される場合もあり、また、動きやすくて観測にかからない場合もある。

電解質溶液中のSTM観測の実例については、すでに多くの論文、解説が出版されており、詳細については他の総説³⁾に譲る。

6 終わりに

以上、最近の最先端のSTMによる研究例を紹介した。STMは基礎物性物理学の研究手段としては、依然未知の可能性を秘めた手法であり、あらゆる方面からのアプローチが現在進行している。他方、実用的な顕微鏡としての応用には、同じ走査プローブ手法の中でも「原子間力顕微鏡」(AFM)が優れている。これについては、また機会を改めて論じたい。

参考文献

- 1) Scanning Tunneling Microscopy, Vols. I, II, and III (Springer Series in Surface Sciences, vols. 20, 28, 29; 1992, 1992, 1993) ed. by H.-J. Guntherodt and R. Wiesendanger
- 2) 山田太郎, 板谷謹悟: 触媒, 36 (1994), 326.
- 3) 山田太郎, 板谷謹悟: ふんせき, 2 (1997), 112.
- 4) H. Onishi, Y. Kondo and K. Takayanagi: Surf. Sci. 415 (1998), L1061.
- 5) T. Yamada, N. Batina and K. Itaya: J. Phys. Chem., 99 (1995), 8817.
- 6) T. Sawaguchi, T. Yamada, Y. Okinaka and K. Itaya: J. Phys. Chem., 99 (1995), 14149.
- 7) D. M. Eigler and E. K. Schweizer: Nature, 344 (1990), 524.
- 8) T. Nakayama, D.-H. Huang and M. Aono: Microelectronic Engineering, 32 (1996), 191.
- 9) M. F. Crommie, C. P. Lutz, D. M. Eigler and E. J. Heller: Surf. Sci. 361/362 (1996), 864.
- 10) B. C. Stipe, M. A. Rezaei and W. Ho: Science, 280 (1998), 1732.
- 11) B. C. Stipe, M. A. Rezaei and W. Ho: Rev. Sci. Instrum., 70 (1999), 137.
- 12) B. C. Stipe, M. A. Rezaei and W. Ho: Phys. Rev. Lett., 82 (1999), 1724.

(2000年3月1日受付)

ブックレビュー

粉体工学用語辞典(第2版)

粉体工学会 編

2000年3月 日刊工業新聞社発行(Tel. 03-3222-7131)

●A5判 464頁 本体価格7,500円(消費税別)

1981年に初版が発刊されてすでに20年が経過し、粉体工学会では創立40周年を記念して「粉体工学便覧(第2版)」の出版を機に、本書を刊行することとなった。

粉体工学は広い専門分野を横断する工学であり、極論すれば粒子という見方はあらゆる工学分野の基礎となっている。特に、鉄鋼業をはじめとする材料工学分野においては、粉粒体に関する知識は不可欠で、様々な業務を遂行する上で密接な関係を持っている。

筆者はかつて鉄鋼製造の製鉄部門で仕事をしていた関係で、毎日が粉粒体との明け暮れであった。当時は粉体工学に関する多くの本を読んで勉強もしたが、本書の執筆者リストを見ると初版の執筆者とは大幅にメンバーが交替し、その間の時間の経過を改めて認識した。

本書の構成によれば、用語として初版の2倍にあたる約2700語を収録し、固体粒子のみならず液体の微粒子や気泡まで幅広く最新の内容を各語500字平均でコンパクトに解説されている。また、随所にわかりやすい図面が豊富に配置(全170図表)され、辞典にありがちな文言のみで理解不足となる懸念の回避に努めている。巻末には、粉体工学を学ぶ上で必須の数表と欧文索引が添えられ、読者の便宜が図られている。

材料工学に携わる技術者にとって座右に欲しい基盤となる一冊である。

(住友金属ビジネス企画(株) 佐藤 駿)