

- [56] A. Sakai, H. Sunakawa, A. Kimura and A. Usui: J. Electron Microscopy **49**, 323 (2000).
- [57] D. Kapornek, X. H. Wu, B. Heying, S. Keller, B. P. Keller, U. K. Mishra, S. Denbaars and J. S. Speck: Appl. Phys. Lett. **67**, 1541(1995).
- [58] Y. Xin, S. J. Pennycook, N. D. Browning, P. D. Nellist, S. Sivananthan, F. Omnes, B. Beaumont, J. P. Faurie and P. Gibart: Appl. Phys. Lett. **72**, 2680(1998).
- [59] A. Sakai, H. Sunakawa, A. Kimura and A. Usui: Appl. Phys. Lett. **76**, 442(2000).
- [60] M. Peach and J. S. Köhler: Phys. Rev. **80**, 436(1950).
- [61] S. P. Timoshenko and J. N. Goodier: "Theory of Elasticity" (McGraw-Hill, 1970).
- [62] J. P. Hirth and J. Lothe: "Theory of dislocations" (Krieger Publishing, 1992).

そのほか、パーガスベクトルなど、転位論に関する基本的な教科書として、上記[62]のほか、以下の書籍を薦める。

- ・加藤雅治：“入門転位論”（裳華房，1999）。
- ・鈴木秀次：“転位論入門”（アグネ，1967）。
- ・坂公恭：“結晶電子顕微鏡学—材料研究者のための—”（内田老鶴圃，1997）。

第2章

走査型プローブ 顕微鏡による 表面物質創製

2.1 原子操作による表面物質創製

2.1.1 はじめに

原子の実在が確立してから100年強^[1]。走査型プローブ顕微鏡（scanning probe microscope, SPM）は今やその原子を一つひとつ観察し、さらにそれを操る（原子操作）ことも可能になっている（図2.1）^[2,3]。

走査型トンネル顕微鏡（scanning tunneling microscope, STM）や原子間力顕微鏡（atomic force microscope, AFM）ではその原理上、プローブ先端を試料表面から1 nm以下の距離まで接近させてイメージングを行う。そのとき、プローブ先端と表面原子が相互作用しており、それを制御すれば、個々の原子を操作することが可能となる。そして、原子操作が確立した初期から、論理回路やメモリーへの応用を目指して様々な構造作製に関する研究が行われてきた。

STMによる再現性ある表面状態制御は、STMの発明（1981年）から4年後の1985年までさかのぼる。この頃はSTMの原子分解能自体がようやく数グループにより再現されてきたころである^[4-6]。そして1989年にEiglerらは極低温—超高真空環境下の原子操作技術を確立し、Ni(110)表面上

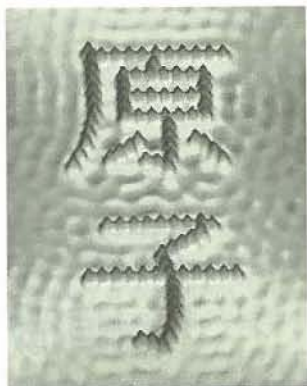


図2.1 EiglerらはSTMを用い、Cu(111)表面上のFe原子を動かして“原子”と描いた(出典:IBM社ウェブサイト)
(カラー図は口絵1を参照)

にXe原子を並べて“IBM”の文字を描き出した^[7]。彼らが個々の原子を操作することに成功したときの興奮が文献^[8]に述べられており、その雰囲気を楽しむことができる(図2.2)。その洗練された実験には誰も目を奪われ、極めてエポックメイキングな仕事となった。自発的に形成し得ない構造を原子スケールで構築することが可能となり、その造形は単なる原子操作を超越し、アートともいえるであろう¹⁾。単原子操作に加え、nmスケールの構造作製技術も進展し^[9]、それを総称して“ナノテクノロジー”と呼ばれる一大科学研究の源流となった。

本節ではSTM/AFMによる原子操作の歩みを概観し、特に単一原子レベルでの原子操作に着目し、いくつかマイルストーンとなった研究について詳しく紹介する。その見事なテクニックに驚くことであろう。しかし、原子操作の将来は薔薇色とは言いい切れない。原子操作はどこを目指しているのだろうか、ということが重要な課題になっている。本節の終盤では原子操作の将来像や課題を述べ、いまだこの問いに対して明確な答えが出ていないことを論じる。

1) IBMグループのアートはIBM社のホームページで見ることができる。
<http://www.almaden.ibm.com/vis/stm/gallery.html>

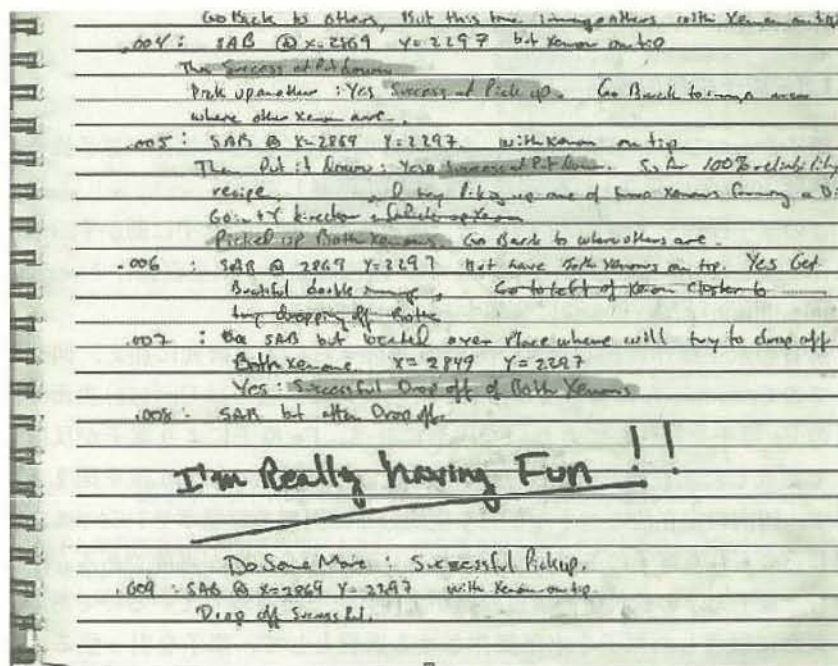


図2.2 1990年2月14日のEiglerの実験ノート^[8]
“I'm Really having Fun!!”と書いてあり、原子操作が確立した頃の興奮が伝わってくる。

2.1.2 原子操作創成期(1980年代)

STM探針によって試料表面が変化することが認識され、STMの発明から数年後、STM探針を用いた構造作製の例が報告された。1985年にRinggerらはPd₈₁Si₁₉アモルファス金属表面上において数nm幅の細線構造を作製した^[10,11]。しかし、これは原子レベルとはほど遠いレベルであり、その当時は、小山^[12]、あるいは直接STM探針を用いて表面を削るなどの“表面加工”が精一杯であった^[9,13,14]。

その後、1987年に、初めて1nm以下の構造作製の成功を報じる論文が現れる。BeckerらはGe(111)表面上において、STMを用いて幅、高さ共に1nm程度の突起を作り出した^[15]。その突起物の組成や構造は不明であるが、単原子操作に一歩近づいたことには間違いのない。この数年後にはEiglerらの成果が登場するのであるから、この頃のSTM技術や原子操作技術の進歩

が非常に速かったことがうかがわれる^[4]。

2.1.3 原子操作の確立 (1989年～)

原子を一つひとつ移動させる、あるいは引き抜くなどの操作 (原子操作) 技術は 1989 年に確立し、1990 年代に大きく進展した²⁾。

この原子操作を 2 つに大別すると、基板表面に対して水平に動かす (水平操作: lateral manipulation)、あるいは、垂直に動かす (垂直操作: vertical manipulation) という 2 つに分類することができる。

前者の水平操作に関しては、先述の Eigler らによる研究に加え、同グループの Crommie らによる構造作製が有名である。彼らは Cu(111) 表面で個々の Fe 原子を操作してきれいな円形に並べ、Fe 原子により電子が反射されて形成した定在波を観察した^[16,17]。その作製過程の STM 像を図 2.3 に示す。円内の定在波のエネルギーや空間分布は円形井戸型ポテンシャル内に閉じ込められた電子のモデルからきれいに説明することが可能である。すなわち、量子力学の教科書の演習問題が実際にここで再現しているのである。

表面に吸着した原子を水平操作させる過程として、原子を引っ張る、押す、あるいは探針と同時に動かすという 3 つのプロセスがある。Bartels ら

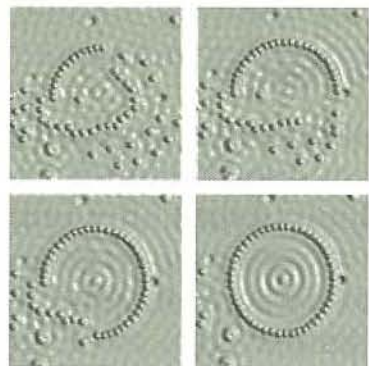


図 2.3 Cu(111) 表面上の Fe 原子を、円環状に並べる過程の STM 像^[17]
円の直径は約 15 nm である。

2) IBM は公式には 1989 年に原子操作が確立したとしている。そして論文発表が 1990 年である。

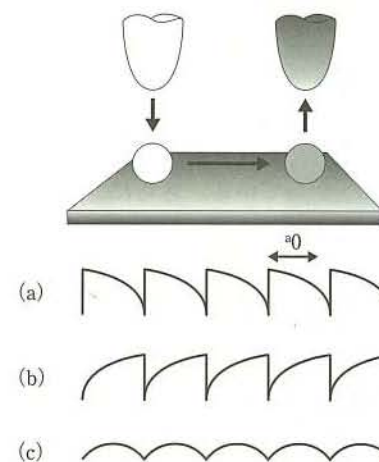


図 2.4 原子の水平操作中に観察した、STM の制御信号^[3]

STM 探針を上下するピエゾ素子に印加する電圧である。

- (a) 原子と探針間の引力的相互作用により引っ張られながら原子が動く過程 (pulling)。
- (b) 反発的な相互作用により弾かれながら原子が動く (pushing)。
- (c) 探針と試料が同時に動く場合 (sliding)。

は水平操作中の探針の高さを詳細に解析し^[18]、3 つのパターンがあることを見出した (図 2.4)。これらパターンを生み出す相互作用の起源も多彩であり、たとえば、Ag(111) 面上の Ag 原子については、探針と原子間の化学結合が引力的な相互作用を生み出し、探針が動くとそれに応じて原子が吸着サイトをホッピングしながら動いていく (図 2.4(a))^[19]。また、金属基板上の CO 分子^[20-23]は探針と反発的な相互作用があり、弾かれながら動く^[2]。このような水平操作は原子だけではなく、より複雑な分子でも可能である^[24-28]。

垂直操作に関しても多数の報告がある。この操作では、表面の原子を一度探針先端に吸着し、その後別の場所で探針から脱離させて表面にその原子を置く。Ni(110) 表面上の Xe 原子^[29]、Cu(111) 表面上での CO 分子^[30]、Si(111) 表面上の Si 原子^[31]が例である。Xe 原子の垂直操作では、トンネル電子が進行する方向に原子が移動する。すなわち、試料バイアス電圧が正では探針側から試料側へ、試料バイアス電圧が負の場合は逆方向に Xe 原子は移動する。探針と試料間にできる Xe 原子のポテンシャル形状と、トンネル電子による Xe 原子の励起が原子移動に関与しているためと考えられてい

る[2, 32, 33]。

このような垂直操作は探針先端の原子種を磁性元素に置換する技術としても活用されており、スピン偏極STM^[34]実現の大きな力となっている^[35]。

また、後述するナノケミストリの実現においても、望んだ分子をつまみ上げる手段として重要な寄与をしている。さらに、近年ではAFMでも垂直操作が可能となっている^[36]。

垂直操作の派生版として、表面から原子を脱離させ、残された穴構造から微細なパターンを作り出すことができる^[37-40]。この場合、脱離した原子は表面を拡散していくか気相中に飛んでいき、どこに行ったかわからなくなる。この原子操作を活用し、細木らがMoS₂表面からS原子を引き抜いて“PEACE”や“Nano Space”と描いたSTM像は印象的である^[41, 42]。

水平および垂直操作の範疇に収まらない原子操作例としては分子の回転^[43]や埋め込みがある。YazdaniらはGaAs上のMn原子にトンネル電流・電圧を印加してMn原子をGaAs内に埋め込み、Mn原子間の相互作用を調べた^[44]。

2.1.4 機能創出 (1990年代より)

原子操作の確立期では、先述のように、原子を動かす、あるいは原子を並べて構造作製するという事に主眼があった。さらに進んだ段階として、作製した構造に新規物性をもたせる、あるいは電子状態を制御する、ということを目指す研究が1990年代後半より現れる。

1999年にHitosugiらはSi(100)-(2×1)水素終端表面上の水素原子を脱離させ、ダングリングボンドを有するSi原子の配列を作製した。その長さを2個分、3個分と長くしていくと、Si原子の単なる並びとはならず、その単一原子幅の構造内で緩和し、多彩な電子状態が現れることを明らかにした(図2.5)^[40]。

その後、NilusらはAu原子を水平操作し、単一原子幅の1次元鎖を作り出した^[45]。その長さを変えていくとトンネルスペクトルが系統的にかわり、1次元鎖に閉じ込められた電子の状態が場所やその長さに依存することを明らかにした。さらに同グループは、このように長さを制御したAgの構造からの発光についても報告している^[41]。

また、Heinrichらは、原子操作によりMnの1次元鎖を作り出し、その

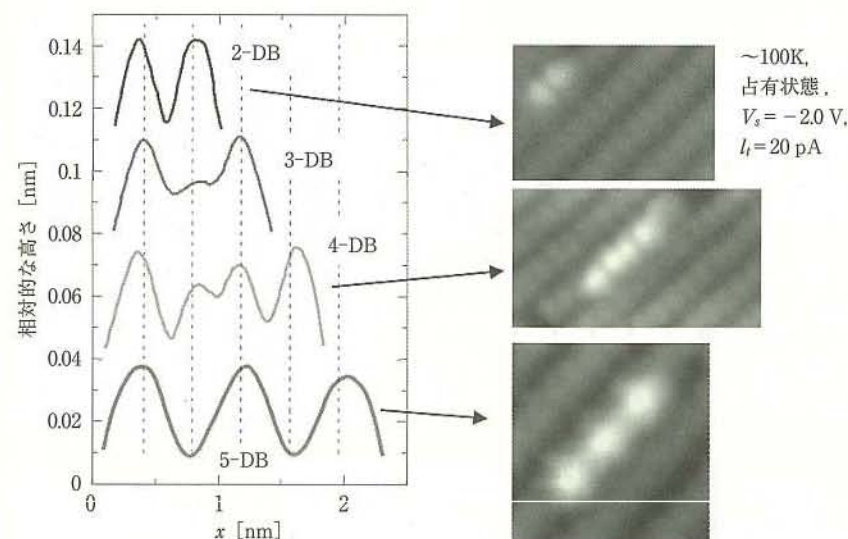


図2.5 Si(100)-(2×1)水素終端表面から水素原子を引き抜き、ダングリングボンド(DB)を並べて作製した構造のSTM像とその断面図^[40]
3-DBとは3つのDBからなる構造を意味する。長さを変えていくと多彩な構造が現れることがわかる。たとえば、3-DBでは3つのDBは等価になっておらず、中央のDBは低く観察されている。

長さに依存して磁性が変化することを示した^[46]。Mn 1次元鎖の長さや、それが偶数個、あるいは奇数個の原子から構成されるのかに磁性が依存している。

実際に原子操作により機能素子を作った例を紹介する。同じくHeinrichらは、Cu(111)表面におけるCO分子の安定・不安定吸着構造を巧みに用いた分子カスケード(ドミノ倒しの様な連鎖反応)を作製した^[47]。図2.6で分子カスケードの原理を説明する。図2.6(a)の小丸は、Cu(111)最表面のCu原子を示している。中丸と大丸はCu原子直上に吸着しているCO分子を示している。CO分子は、Cu原子の格子点において、“くの字”型に3個連なって吸着すると、“くの字”の中央のCO分子が自発的に押し出されて正三角形に配置する。図2.6(a)のCO分子の配置で、まず、Aの分子を原子操作で矢印の方向に移動させる。すると、移動した分子Aと分子B、分子Cで“くの字”型の配置が形成され、“くの字”配置の不安定性のために分子Cは自発的に矢印方向に移動する。もし、その移動先においても再び

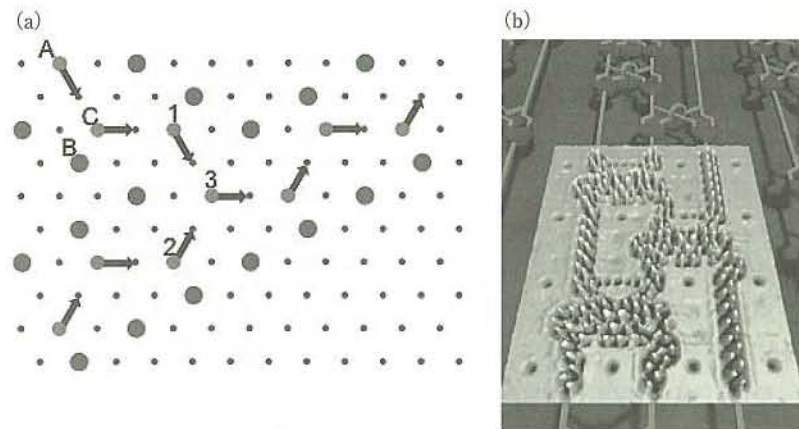


図 2.6 分子カスケードの原理図

(a) 小丸が Cu(111) 表面における CO が吸着することが可能なサイトである。大丸が実際に吸着している CO を示し、中丸が着目している CO 分子である。

(b) 実際の STM 像と模式的な回路を示した図。(出典：IBM 社ウェブサイト)

“く”の字を構成し、中央の原子が押し出されれば、連鎖反応を起こして連鎖的に移動を繰り返すことになる。

この原理をうまく使えば、AND や OR 回路を作製することができる。図 2.6(a) では、AND 回路例を示している。分子カスケードにより分子 1 が矢印方向に移動（入力 1）して、さらに、図 2.6(a) の左下からの分子カスケードにより分子 2 が矢印方向に移動（入力 2）すると、分子 1, 2, 3 がく”の字を形成して、分子 3 が矢印方向に移動して、出力のカスケードを誘起する。Heinrich らは、さらに大規模な論理回路を原子操作により実際に作製し（図 2.6(b)）、分子カスケードにより論理回路が動作することを報告した。

2.1.5 化学反応（ナノケミストリ）

前節の機能創出と平行して、表面で化学反応を起こす研究も進展した。通常、化学反応と聞くと、アヴォガドロ数オーダーの原子や分子を混ぜ合わせ、それら分子や原子の衝突が試験管内で起きて反応が進行する様子を想像する。それに対し、STM を用いた原子操作では、表面上で狙った原子や分子のみに反応を起こすことが可能であり、まさに任意の場所に任意の分子を

合成する、ということが実現する。

最も単純な例として、 O_2 分子の解離を紹介する^[48]。Stipe らは Pt(111) 上の O_2 分子にパルス電流・電圧を印加すると、O 原子間の結合が切断され、1 つの O 原子が fcc サイトへ、そしてもう 1 つ O 原子が hcp サイトへ吸着することを見出した。このような化学結合の切断は Co フタロシアニン分子でも可能である。Zhao らは H 原子を切り離し、金属基板とフタロシアニン分子間の相互作用を制御し、近藤効果を観察した^[49]。

この分野で最も象徴的な研究は、Ho らによる $Fe(CO)_2$ の合成であろう^[50, 51]。彼らは Ag(110) 表面上において、Fe 原子や CO 分子を一つひとつ結合していき、 $Fe(CO)_2$ を作り上げた（図 2.7）。まず、CO 分子直上に探

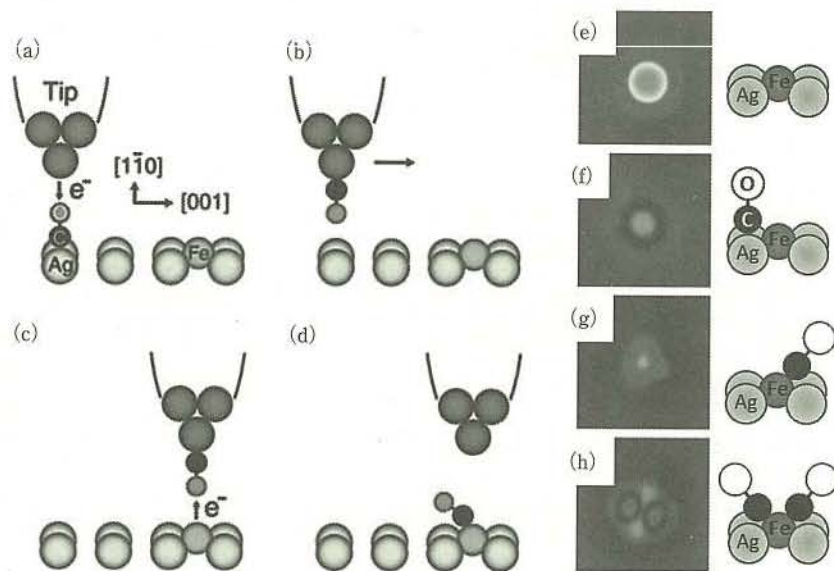


図 2.7 ナノケミストリによる $Fe(CO)_2$ の合成（^[50]の図を改変）

- (a) STM 探針を Ag 表面上の CO 分子の直上に移動させる。
 (b) 適切なトンネル電流・電圧を印加し、CO 分子を探針先端に垂直移動させる（垂直操作）。
 (c) 探針を Fe 原子上にもって行き、適切なトンネル電流・電圧を印加して、探針から Fe 原子上に CO 分子を移動させる。
 (d) すると、 $Fe(CO)$ が生成する。この手順を繰り返して、 $Fe(CO)$ 上に、探針から CO を移すと $Fe(CO)_2$ が合成できる。
 (e) Ag 表面上の Fe 原子の STM 像。円上に観察される。
 (f) Ag 表面上の CO 分子。これも円状に観察される。
 (g) $Fe(CO)$ の STM 像。左右非対称に観察される。
 (h) $Fe(CO)_2$ の STM 像。左右対称に観察される。

針を置き、バイアス電圧とトンネル電流を制御して、探針先端にCO分子を吸着する(垂直操作)。次にこの探針をFe原子上に移動させ、COをFe上に落とす。するとFe-CO結合を形成し、Fe(CO)が合成される。さらに別のCOを拾い上げてこのFe(CO)上に落とすことにより、Fe(CO)₂の合成に成功している。

実際に合成できたということをどのように証明したのであろうか。Fe(CO)は、COが斜めになっているため非対称なSTM像となり、Fe(CO)₂では2つのCOがイメージングされて、ダンベル状の形をしている。しかし、このようなSTM像だけでは結合の有無は不明確であるため、彼らは非弾性トンネルスペクトル(inelastic electron tunneling spectrum, IETS)³⁾によってC-O伸縮振動を捉え、FeとCOが結合していることを示した。

このようにナノケミストリにとってはIETSが結合状態を探るプローブとして重宝されている。川合らがトンネル電子を注入してトランス-2-ブテンから1,3-ブタジエン分子への一分子化学反応を実現した際にもIETSが活躍した^[52-54]。

以上のように、狙った分子を狙った場所に作り出すことが可能になってきた。さらに、表面に吸着しているという環境を利用して、これまでに存在できなかった分子を安定化させることも期待される。今後のナノケミストリの進展が期待される。

2.1.6 AFMによる原子操作の実現

AFMによる原子操作は日本の森田グループ(大阪大学)によって切り拓かれた^[55]。Oyabuらは、ノンコンタクトAFMを用いてSi(111)-(7×7)表面上の原子を引き抜き、さらに、狙ったところにその原子を落とす(垂直操作)ことを報告した^[56]。さらに同グループはGe(111)-c(2×8)表面のGe原子を引き抜き、任意の場所に落とし、さらにそのGe原子を水平操作することに成功した^[57]。これらの実験的な成功に呼応し、原子操作現象の理論的な解明も進められている^[58, 59]。

図2.8にGe(111)-c(2×8)表面に埋め込まれたSn原子を並べて、“Sn”という字を描くデモンストレーションを示す^[60, 61]。室温において、表面に

3) 探針を分子の上に置き、バイアス電圧を掃引すると、トンネル電子のエネルギーが振動モードのエネルギーと等しくなるときに振動が励起され、 d^2I/dV^2 にピーク構造が得られる。

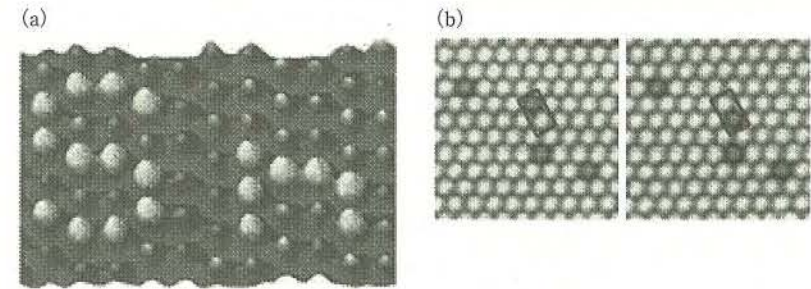


図2.8 AFMによる原子操作の例^[60]

(a)AFMを用い、Ge(111)表面上に埋め込まれたSn原子を操作して“Sn”と描いた例である。(b)四角で示された部分を何度も走査すると原子が置換する。これはInとSiを置換している例である。

埋め込まれたSnからその隣のGeに向けてプローブを何回か走査すると、その両者が入れ替わる(atomic interchange)。これを繰り返して文字を形成した。このような原子の入れ替わりは、同表面上のPb, Sn/Si(111)-($\sqrt{3} \times \sqrt{3}$)R30°, In/Si(111)-($\sqrt{3} \times \sqrt{3}$)R30°, Sb/Si(111)-(7×7)などでも起きることが確認されている^[62]。このような原子交換には、原子上における探針走査が不可欠であり^[63]、①探針により表面原子と深い原子の間の結合を弱める、②表面に拡散が可能となるようなホッピングサイトを生み出す、という2つの寄与があると考えられている。

さらにこのような原子の入れ替えは、探針と表面の間でも起こすことが可能である(垂直操作)^[64]。SugimotoらはSi(111)-($\sqrt{3} \times \sqrt{3}$)R30°表面、およびプローブ先端のSnとSiを入れ替え、前述の水平入れ替えを組み合わせ文字を描いている。このように、共有結合性の強いSiやGeにおいて、原子操作が実現している。

しかし、AFMによる原子操作に関しては技術的なハードルが高く、いまだ例が少ないのが実情である。また、半導体表面上のみならず、AFMが強みとする絶縁体基板表面における原子操作の発展が期待される。

2.1.7 原子操作の将来像

原子を自在に扱う技術が誕生し、本格的なナノテクノロジーが幕を開けた。このナノテクノロジーには、急激な発展を続けているSi半導体デバイスが直面する微細化の壁を克服することが望まれている。しかし、現在の量

産デバイスとSTM/AFMを用いた原子操作との間に存在するギャップはいまだ大きく、トップダウンおよびボトムアップ⁴⁾でこれまで歩み寄ってきた両者には隔たりがあり、融合して実用化する方法についてはっきりとした見通しがたっているわけではない。

その要因として、次の2つが挙げられる。

①真に原子レベルであることに由来する、熱エネルギーの問題

朝永振一郎博士の名エッセイ「鏡の中の物理学」に、印象的な記述がある。そこでは、バッティングセンターにある、球をバッターに向けて投げる機械（バッティング・マシン）を考え、野球の球ではなく分子を投げる場合を考察している。分子をある方向にある速度で正確に投げることをしようとしても、バッティング・マシン自身が分子でできており、思う方向に分子を投げるにはバッティング・マシンを組み立てている分子自身のふらふらとした運動をコントロールしてやらねばならない。そのためにはまた別の機械が必要であり、それがまた分子からできている。ということは、その機械もまたふらふらした分子からできているから、結局、多数の分子を正確に制御するのは不可能であるという議論である。これを熱力学の立場から論じている。

これをSTMやAFMによる原子操作に展開してみよう。原子や分子を操作するため、探針先端部の状態によって原子操作の質が大きく影響される。そのため、再現性の良い結果をコンスタントに得るためには、探針および試料の調製に細心の注意を払う必要がある。探針については、耐久性が高く、再現性も確保できる方法として、カーボンナノチューブをプローブ先端に用いる試みもある^[65]。

もともと再現性に困難がある上に、いくらきれいに原子を並べても熱の効果によってふらふらと原子は動き、構造が崩れる危険性が常にある。原子の表面吸着エネルギーが小さいため、低温でのみ原子の拡散が止まる。実際に、多くの原子操作に関する研究は、吸着分子の拡散が起きないように、極低温下で行われている。Eiglerらの実験でも温度は非常に重要であり、せっかく作った構造は室温では跡形もなくなってしまふ。室温で原子操作するには物質系を選ぶ必要があり、たとえば、ステップエッジに吸着したC60の操

4) 大きなものを加工して微細構造を作る方向性をトップダウンとよび、SPMのように、個々の原子や分子から微細構造を作製する方向性をボトムアップとよぶ。

作^[66]や、Si(111)-(7×7)基板上的クロロベンゼンの分解^[67]が報告されている。

また、前節で紹介した室温におけるAFMによる原子操作についても温度が鍵を握っている。たとえば、Snを探針から供給する実験は、Snが基板側に落ちた後に探針の根元側から先端にSnが拡散して再度供給されるという仕組みである。拡散は熱的な過程が重要なので、室温でちょうどよい原子拡散係数になっていることが実験の肝になっている。したがって、低温や高温ではこの実験は実現しない可能性がある。

現在の半導体テクノロジーは、数多くの原子による集団効果、すなわち、統計性によって熱エネルギーに対する耐性が保証されている。単一の原子がデバイス動作の鍵を握る技術に発展するためには大きなブレークスルーが必要である。

②プローブを機械的に走査しなければならないことに由来する、動作スピードの遅さと動作範囲の狭さ

現在の半導体デバイス製造では、12インチ（直径約300mm）ウェハー上に作り込むことが当たり前となり、STM/AFMのもつ局所的な構造作製という特徴とは相反し、大面積にわたって正確に構造作製することが要求されている。

STM/AFMの動作速度と動作範囲の欠点をカバーする点に対しては、プローブを並列化することが試みられた^[68]。たとえばIBMではmillipedeと呼ばれる、カンチレバーを集積化したデバイスを作製した^[69-71]。しかし、前述したように再現性の低さを考えると、装置全体としての信頼性を獲得するのは極めて困難であろう。

2.1.8 おわりに

本節では原子操作発展の歩みを振り返った。原子操作はいまだ発展途上であり、今後、より複雑な構造が構築され、新規物性の開拓が進むであろう。無機分野のみならず、今後バイオ分野へも活動範囲を広げて多彩なサイエンスの深化が期待される。

しかしながら、現状では、SPMを原子スケールでの加工装置、あるいは製造装置としようとする、ブレークスルーなくして、将来の工業応用は考えられない。ここは研究者の創意工夫の見せ所である。

一つ言えることは、Eiglerらが初めて原子を動かしたときの興奮、これは今後も色あせることはないということである。原子操作を経験する者は誰しも、彼らが感じた気分の高まりと同様な気持ち、すなわち、“原子を動かして自在に物質を創り出す”というロマンを今でも駆り立てられることだろう。

2.2 原子操作による導電性分子デバイス

2.2.1 はじめに

微細加工技術の驚異的な進展に伴う半導体デバイスの高密度・高集積化は、限界と考えられていた光の波長サイズをはるかに凌駕し、現在では35 nmと著しい微細化を遂げてきたが、いよいよ加工限界、高価格化などの問題が生じている。微細化とは異なるベクトルへのシフト、たとえば並列化処理などの手法の開発が進められていることから、この限界に近いことが見て取れる。このため、材料開発の視点からも、根本的な発想の転換が求められ続けている。すなわち、今後も更なる微細化を進めるのであれば、従来の微細化（マクロからマイクロへ）の方向とは逆に、原子・分子の組織化・集積化（マイクロからマクロへ）による機能デバイスを構築するための方法論の確立が必要である。

また、エレクトロニクスの新たなる方向性として、フレキシブルなシートデバイスの開発が急ピッチで進められている。この新たなるデバイスの主役は従来のシリコンにはその硬さ故に務まらない。ソフトマターに位置づけられるような有機分子や高分子がその主役の座を射止めなければ、フレキシブルエレクトロニクスの実現や普及は難しいであろう。こうした面からも、分子の組織化・集積化を巧妙に操作して、機能デバイスを構築するための新たなパラダイムが必要である。

分子デバイスの現状を確認しておこう。分子デバイスの構造は外部とのインターフェイス、演算機能を担う素子、素子と外部インターフェイスを繋ぐ配線に大別される。外部とのインターフェイスは現時点では、シリコンデバ

イスと同様に金属電極を利用する方法に大きな問題はなく、また汎用性の面からも妥当であろう。次に、デバイスの演算機能を担うべき分子素子としては、ドナーとアクセプターを σ 結合でつないだ分子整流器（分子ダイオード）が1974年に理論的に提案され、現在ではLB膜やSAM膜においてその整流特性が実験的に確認されている^[72]。この他にもクラウンエーテルのロタキサンからなる分子ロジックゲートが実際に作製されている^[73]。演算素子は有機分子の多様性をそのままに、多彩な機能をもつものが設計されており、その一部は機能も実証されている^[74]。最後に、配線であるが、これは困難な問題を抱えている。配線には2点間の結合という目的に加えて、この2点に分子を配置するという必要性がつきまとうためである。機能性分子1つを実際の基板上の電極間に実装し、その特性を観測した実施例が極めて少ないのは、分子の位置を操作するという点も含めて、機能性分子間をつなぐ原子・分子配線の技術的処方箋が確立されていないことが大きな要因であり、分子デバイス実現のボトルネックとなっている。

近年のナノテクノロジー技術、殊に走査型プローブ顕微鏡（SPM）技術の進歩はこの問題に解決法を与えてくれる。観ることを主体としていたSPMは、IBMのグループによる走査型トンネル顕微鏡（STM）による原子マニピュレーション^[75]をはじめとして、分子を触って動かす分子マニピュレーション^[76]へと進展し、観ていた分子に実際に触って操作することが可能となった。分子を実際に動かして、配置・配線することや、分子一つひとつの特性を調査するといった研究が進められている。もちろん、産業としての利用を考えるにあたっては、分子を一つひとつ動かしていたのでは、時間もコストもかかりすぎて実用的ではないかもしれない。しかし、まずは基礎レベルで分子デバイスの調査研究が大きな一歩を踏み出したことを喜ぶべきである。

2.2.2 分子配線材料と導電性高分子

分子配線材料として現在最も有望視されているものはカーボンナノチューブであろう。カーボンナノチューブはすでにその1本の導電率が測定され、半径、螺旋度の違いによる電気特性の違い（金属的または半導体的）や、その接合系における整流特性も観測されている^[77]。しかし、分子配線の旗手であるカーボンナノチューブも他の分子との接続は困難なことが知られてい