



Title	21世紀の原子ナノテクノロジー
Author(s)	森田, 清三; 菅原, 康弘
Citation	大阪大学低温センターだより. 2001, 113, p. 5-9
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/4832
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

「21世紀の原子分子ナノテクノロジー」

工学研究科 森田 清三、菅原 康弘（内線 7761）
E-mail : smorita@ele.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

「半導体ロードマップ」*のような長期の技術開発スケジュールの検討により、2010年頃には半導体DRAMメモリーが2014年頃には半導体マイクロプロセッサが「ミクロ化の極限（物理的限界）」に到達して、半導体技術の進歩・発展が止まる可能性が有る事が明らかとなった。他方、急速に成長しつつある情報通信分野の発展には、パソコンと半導体デバイスの価格性能比が途方もなく安くなった事が寄与している。この半導体デバイスの価格性能比低下の駆動力はミクロ化で有り、これが物理的原因で止まると言うことは、長期的には情報通信分野の進歩・発展にもブレーキが掛かる事になる。このように、半導体デバイスは、情報通信分野の基盤技術で有り、半導体デバイスのミクロ化が止まることの影響は非常に大きい。

2. 21世紀は歴史の転換期

21世紀には、半導体デバイス等の「成長限界」が2010年から2020年頃に来ると予想される。また、開発途上国を中心とした人口増加と生活レベル向上に伴い、食料危機、環境汚染、資源枯渇等の「人類の危機」や温暖化、異常気象、砂漠化等の「地球の危機」が進行し、2020年頃には世界人口が地球上で養える限界の75億人となり様々な危機がピークに達するため、人類が滅亡する可能性すら有ると予想されている。このような「21世紀の悪夢」に対応して、省資源や省エネルギーが呼ばれている。しかし、省資源や省エネルギーだけでは危機の先延ばしにしかならず、場当たり的対応に終わりかねない。つまり、平行してこれらの危機の根本的解決法を探る必要がある。

「次世代原子分子ナノテクノロジー」とも言うべき微細組立技術で、酵素タンパクのような「微小機械（ナノマシン）」を自在に設計・製作できる「万能微細組立機」が開発され、様々な機能を持つ「ナノマシン」に自己増殖や自己再生・修復機能を持たせられると、上で述べた「21世紀の悪夢」の根本的解決が可能になると期待される。例えば、赤潮のように急激に自己増殖する植物プランクトンで毒性のない食べられる「タンパク質ナノマシン」が出来れば食糧危機は解決する。環境汚染物質の一部の原子をナノマシンで他の原子に置換するだけで、毒性を無くして環境汚染を無くすことも可能となる。ウィルスや細菌は病気を引き起こすが、同じ程度の大きさのナノマシンで抗体のように、逆にウィルスや細菌を退治したり、病気を治したり、さらには老化を止めたり逆転させる事も可能になるかも知れない。このように、21世紀の原子分子ナノテクノロジーは、「21世紀の悪夢」を根本的に解決して、全人類に快適で豊かな生活をもたらす「21世紀のバラ色の夢」を育てる可能性を持つ。

3. 原子・分子用工具としての走査型プローブ顕微鏡

個々の原子や分子を操作して自由に新物質や新デバイスを組み立てられる真の微細組立技術を実現するには、「個々の原子・分子を観察、評価、分析、制御、操作して、組み立てる技術」が必要となる。つまり、個々の原子・分子を見る「原子分解能顕微鏡」、個々の原子・分子の物性を測る「原子分解能計測装置」、個々の原子・分子を操作して動かす「原子・分子操作装置（マニピュレータ）」、個々の原子・分子から新物質や新デバイスを組み立てる「原子・分子組立装置（アセンブラー）」などの開発が必要となる。

鋭く尖った金属探針を試料表面に近づけて金属探針と導電性試料の間に流れるトンネル電流を測定しながら、表面に沿って走査する走査型トンネル顕微鏡（STM）^{*[1]}は、1982年に発明されたが、1983年にSi(111)7x7を観測して真の原子分解能つまり三次元的原子分解能を達成し、1990年にはNi基板上のXe原子を動かしてIBMと言う字を書くことに成功している。つまり、STMは「第1世代の原子・分子技術」である。しかし、STMには、トンネル電流を測定する「電気的方法に基づいた原子・分子技術」であるために、電流が流れない絶縁体が見えない、絶縁体の上の原子が動かせない、原子や分子の間に働く力（原子間力や分子間力）が直接測れないと言う限界がある。

他方、鋭い突起を持つ小さなテコを試料表面に近づけて、テコの突起先端原子と試料表面原子の間に働く原子間力によるテコの変位を測定しながら、表面に沿って走査する原子間力顕微鏡（AFM）^{*[2]}は、1986年に発明されたが、1995年に非接触領域での微弱な引力を超高感度に検出する周波数変調検出法を用いて、真の原子分解能が達成された。現在、原子の間に働く相互作用そのものである力（原子間力や分子間力）を原子レベルで三次元計測する研究と、原子間力や分子間力を制御する研究が行われている。AFMでは、まだ個々の原子や分子を動かしたり組み立てたりする事には成功していない。しかし、原子間力を測定するAFMは、「力学的方法に基づいた原子・分子技術」であるため、絶縁体も見える・扱える、原子間力が測定できる等のデバイス作製・評価上重要な利点があり、産業的にも「次世代原子・分子技術」に発展する事が強く期待されている。

「原子・分子の科学と技術の時代」に必要な微細組立方式の実現には、多様な原子や分子を扱う様々な機能を持つ多種類の工具が必要となる。現時点の『原子・分子用工具箱』には、ほぼ完成された走査型トンネル顕微鏡（STM）と黎明期を脱した原子間力顕微鏡（AFM）が入っているが、今後近接場光技術等を含めて走査型プローブ顕微鏡（SPM）*とその周辺技術の更なる研究・開発が必要となっている^[3]。

4. 激化する次世代ナノテクノロジー開発競争

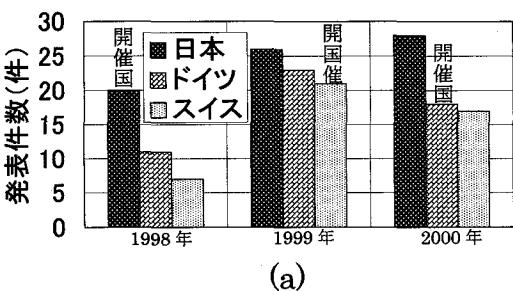
従来型の大きな物から小さな物を削り出す「微細加工」が限界に達すれば、原子や分子から小さなデバイスや物質を組み立てる「微細組立」への技術的転換が必要不可欠となる。つまり、「次世代原子分子ナノテクノロジー」とも言うべき、「個々の原子・分子を観察、評価、分析、制御、操作して、組み立てる微細組立技術」への技術的転換期が21世紀前半に到来する。実際、1997年に行われた科学技術庁の第6回技術予測調査では、2022年に1原子が1ビットに対応する高密度記録システムが開発されると予測している。

このような状況下で、アメリカでは、次世代原子分子ナノテクノロジーをバイオ分野、情報通信分野に次ぐ第3の戦略分野と位置づけて、研究予算の集中投資を長期間継続する事が決定された。具体的には、勧告に基づいて \$ 497M (約500億円) を2001年度の政府予算からNNI (National Nanotechnology Initiative-Leading to the Next Industrial Revolution [ナノテクノロジー立国-新産業革命への道]) 分野に出すことが決まった。アメリカは微細加工ではなく微細組立をターゲットにしており、発表には、個々の原子や分子を動かす能力を持ち、トランジスターやインターネットが情報時代を作ったように、21世紀に次の産業革命を引き起こす技術だと明記されている。他方、ヨーロッパでは、例えば、ドイツが国家プロジェクトとしてナノテクノロジー関連で6分野を強化しており、国内3カ所にナノ分析センターを設置して「ナノ分析」のような装置・技術開発を強化している。また、スイスでは、「TOP NANO 21」と言う国家プロジェクトを開始して、21世紀のナノテクノロジーでトップとなる事を目指し、ナノテクノロジー関連研究を100立ち上げる事を目指している。

5. 日本がリードする非接触原子間力顕微鏡の開発競争

「第1世代の原子・分子技術」である走査型トンネル顕微鏡(STM)の開発や応用研究では、日本は残念ながら出遅れてしまった。しかしながら、「次世代原子・分子技術」に発展すると注目されつつある非接触原子間力顕微鏡(AFM)の開発や応用研究では、日本が世界をリードしている^[3]。具体的には、1995年に周波数変調検出法が開発され、引力を測定する超高真空非接触AFMを用いて、我々のグループがInP(110)へき開面を、また、米国PSI社のGiessiblと日本電子の2グループがSi(111)7x7再構成表面を独立に世界で初めて真の原子分解能で観察することに成功した。米国での非接触AFMの研究は、米国PSI社のGiessiblがドイツの大学に移ったため途絶した状態となっている。一方、非接触AFMの開発で最初出遅れた欧州でも1996年になって、オミクロン社とバーゼル大学のGüntherodtのグループとLinköping大学のErlandssonの3グループがSi(111)7x7やアルカリハライド等で原子分解能観察を達成している。1997年にはハンブルグ大学のWiesendangerのグループも非接触AFMでInAs(110)へき開面の原子分解能観察を達成した。欧州では、現時点での非接触AFMはSTMの発明時と同様な急速な成長期への移行期に有ると考え、また、AFMはSTM以上に産業へのインパクトが大きい事を認識して、この分野を積極的かつ重点的に強化しつつある。

このような状況下で、我々は1998年に第1回非接



(a)

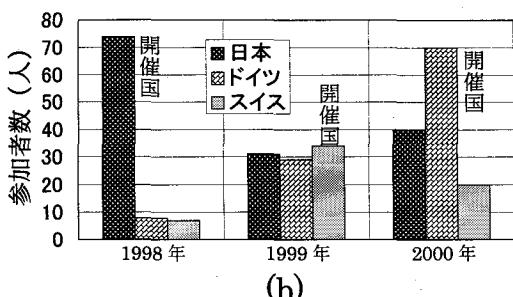


図1 過去三回の非接触原子間力顕微鏡法国際会議 (a)発表件数、(b)参加者数の国別比較。

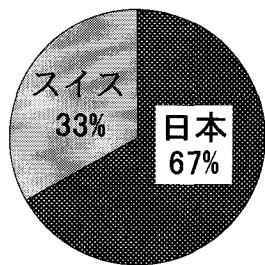
触原子間力顕微鏡法国際会議（NC-AFM1998）を大阪大学コンベンション・センターで開催した。その後、1999年にスイスで第2回国際会議（NC-AFM1999）が、2000年にドイツで第3回国際会議（NC-AFM2000）が開催された。過去三回の「非接触原子間力顕微鏡法国際会議」では、日本とスイスとドイツが参加者や発表件数のほぼ70%以上を占め主要国となっている。本分野における日本の寄与度【量的レベル】は、図1に示すように、発表件数では主催国を含め三年間連続トップで、参加者数も主催国以外ではトップを維持してきた。また、その世界的評価【質的レベル】を示すものとして、今年ドイツのハノブルグで開催された「第3回国際会議（NC-AFM2000）」のプログラムを見ると、図2に示すように、全招待講演者の67%、全座長の37%を日本が占めており、非接触原子間力顕微鏡分野では、日本が質量共に世界のトップに有ることが判る。以上のように非接触AFMの開発競争では、現在、日本が世界をリードしている。しかし、競争相手であるスイスやドイツがナノテクノロジーの国家プロジェクトを発足させ、さらに、その責任者に各国の非接触AFMグループのトップを据えた結果、「次世代原子・分子技術」に発展すると注目されつつある非接触AFMの開発や応用研究でも、スイスやドイツに逆転される可能性が大きくなりつつある。

6. おわりに

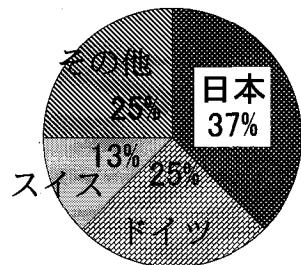
21世紀初頭には産業全般が「ナノテクノロジーの時代」に到達し、さらに時代が進むについには「ミクロ化が極限」に達し、21世紀半ば以前に「原子分子ナノテクノロジーの時代」つまり「原子・分子の科学と技術の時代」が始まると予想される。この微細加工から微細組立への技術的転換期の到来は、次の産業革命を引き起こす。アメリカでは、バイオ分野、情報通信分野に次ぐ第3の戦略的分野としてナノテクノロジー分野に政府予算を集中的に長期間投資し始めている。また、ヨーロッパでは、ドイツやスイスを中心に国家プロジェクトを開始して、「原子・分子の科学と技術の時代」を切り拓く未来技術としての走査型プローブ顕微鏡（SPM）、特に、非接触原子間力顕微鏡（AFM）の研究・開発を重点的に行いつつある。「物づくり」を得意とする我が国が21世紀でも経済大国の地位を維持するには、次世代の物づくり技術である「原子分子ナノテクノロジー」で世界のイニシアティブを握る事が非常に重要であり、日本独自の国家戦略を立て、緊急に研究予算の集中投資を開始するべきである。

参考文献

- 1) 西川 治編著、走査型プローブ顕微鏡—STMからSPMへ—、丸善株式会社、1998.
- 2) 森田清三、原子間力顕微鏡のすべて—原子や分子を見て動かす—、工業調査会、K BOOKS SERIES 108、1995.



(a)



(b)

図2 第3回国際会議（NC-AFM2000）の(a)招待講演、(b)座長の国別比較。

3) 森田清三編著、走査型プローブ顕微鏡—基礎と未来予測一、丸善株式会社、2000.

用語説明

半導体ロードマップ

半導体デバイスを開発するための予定表で、世界の半導体関連会社が集まって作った。最新版は、1999年度版半導体技術ロードマップ（国際版）

[http://public.itrs.net/Files/1999_SIA_Roadmap/Home.htm]

走査型トンネル顕微鏡（STM）

導電性の針を用いて、探針—試料間に流れるトンネル電流を測定する電気的方法に基づいた原子分解能顕微鏡

原子間力顕微鏡（AFM）

小さなテコを用いて、テコ先端突起の探針—試料間に働く原子間力を測定する力学的方法に基づいた原子分解能顕微鏡

走査型プローブ顕微鏡（SPM）

小さなプローブを試料表面に近づけて、表面の応答から探針—試料間距離を測定しながら、表面に沿って走査して顕微鏡像を得るレンズを使わない新しい顕微鏡の総称で、代表的な物にSTMやAFMが有る