



記念講演(2)

ナノテクノロジーの戦略を語る

中村 道治

(株)日立製作所理事・研究開発本部副本部長
経団連ナノテクノロジー専門部会長

なかむら・みちはる

2000年6月経団連に設置されたナノテクノロジー専門部会の部会長に就任。日本の誇るナノテクノロジー技術をこれからのIT革命、バイオ革命に生かし、産業競争力の強化に結び付けていくために、関連部門と連携して、具体策を提言していく予定である。

日立製作所においては、ハードウェア企業からインターネットをベースにしたソリューション提供型企业への転換に向けて、全社研究所を統合し、新しい研究開発課題に挑戦中である。特に、コアコンピタンス作りと事業化スピードの改善を課題に、ベンチャ活用を含む新しい研究開発体制の構築に取り組んでいる。

現職に先立って、中央研究所の所長として、エレクトロニクス、情報通信、ライフサイエンス部門の研究開発を担当した。この間に、SHマイコン、AND型フラッシュメモリ、携帯用RFデバイス、DVD-RAM、RAID、10G光伝送システム、ギガルータなどのIT関連事業の立ち上げに関与した。また、研究部門を母体に、ライフサイエンス事業体制をスタートした。

日立製作所には、1967年の入社。中央研究所で、オプトエレクトロニクス分野、特に半導体レーザの実用化研究を担当した。分布帰還形半導体レーザの提案、海底光通信用レーザの実用化、などを通じて、先端材料プロセス技術を部品、システム事業に結びつける経験を積んだ。2001年7月日本で開催予定のCLEO/Pacific Rim 2000の組織委員長を務める。



<座長> 岡田 雅年

金属材料技術研究所長

ナノテクノロジーとは

ナノテクノロジーは、ナノ領域と呼ばれる1ナノメートル(nm; 100万分の1mm)から100nmの非常に小さいところを扱う研究分野です。そこから次々に面白い研究が出てきていますので、今日はその一端をご紹介します。

1980年代にエリック・ドレクスラー(K.Eric Drexler)がナノテクノロジーを提案したことが知られていますが、実は先駆者がいます。リチャード・ファインマン(Richard Feynman)が1959年にカリフォルニア工科大学の講演でナノテクノロジーについて言及しています。“There’s Plenty of Room at the

Bottom”の講演の中で「我々の行く手には非常に大きな可能性を秘めた場所がある」と話しています。電子ビームを用いた数原子幅のエッチングができるようになり、それを使うとコンピュータの回路がナノスケールでできるようになる、また原子操作により材料の特性制御ができるようになるという予言をしました。ファインマンは80年代にもナノテクノロジーを量子コンピュータにまで発展させた話をしていました。また物理学者の久保亮五先生も、1962年にサブミクロンサイズの金属微粒子中の電子の振る舞いである久保効果を理論的に示され、量子効果による微粒子の離散電子状態の物性を議論されました。これはマクロとミクロの間状態の物性(メソスコ

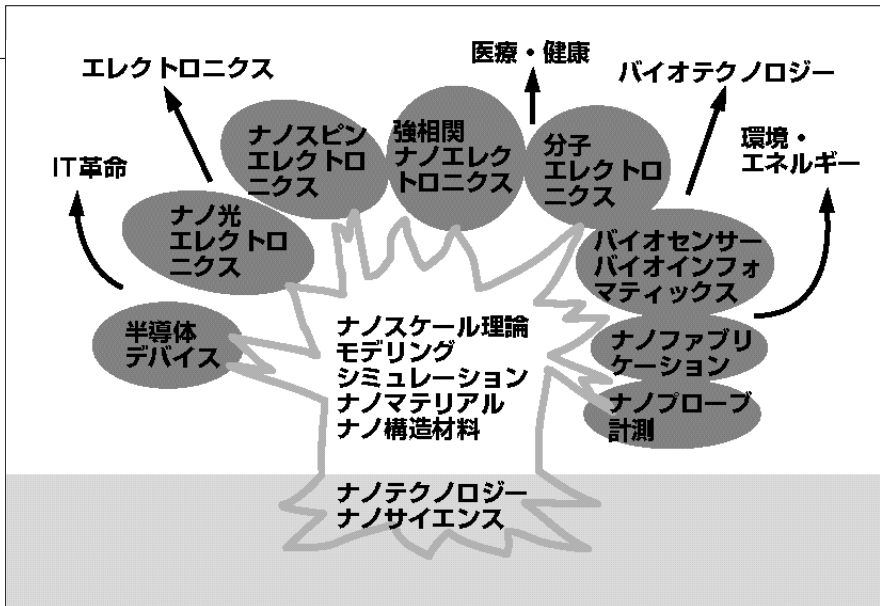


図1 ナノテクノロジーの研究開発

ピック物理)や単電子トランジスタ (SET : Single Electron Transistor) の発展にもつながりました。

最近急にナノテクノロジーが話題に上るようになりましたが、それには二つ理由があります。我々自身がナノスケールでの加工技術を手にし始めたことと、現実には我々が作ろうとしているものがナノテクノロジーの技術なしにはやっていけなくなったからです。ナノテクノロジーは微細な構造の制御によって発現する特有の機能や特性を利用する技術体系で、新しい材料やデバイスを生み出すことが期待されています。

ナノテクノロジーの攻め方には二つの方法があります。1000nm (1 μm) から数百nmの領域にある半導体を加工し、極微細化するプロセスを制御していくトップダウン型と原子・分子レベルで物質を自由に操作するボトムアップ (アトムアップ) 型です。その両方が協力して物質の構造を制御し、実用的なプロセスを作って新しい機能を実現することになります。ナノテクノロジーの研究開発は材料、デバイスを始め、そこから生みだされる多彩な機能によって光、エレクトロニクス、バイオ、ナノプローブ等と広がりをもっています (図1)。また波及効果もあらゆるところに期待できるので、ナノテクノロジーは21世紀の産業革命を起こすともいわれています。それゆえにナノテクノロジーを一言でいうのは難しいことなのです。

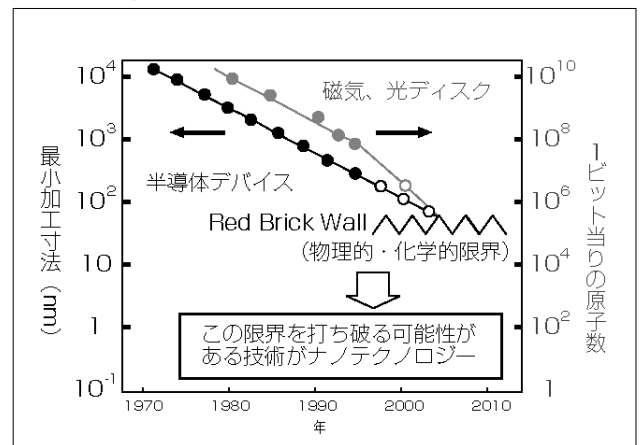
IT革命を支えるナノテクノロジー

我々産業界から見ると、問題を抱えて現実に直面している技術があります。その一例が半導体あるいは磁気ディスクの技術です。図2に半導体デバイスの最小加工寸法あるいは磁気ディスクの最小記録寸法に相当する傾向を示していますが、10年後には科学的限界 (図中のRed Brick Wall) を迎えると考えられています。今までの技術開発の延長ではこの限界を乗り越えら

れないといわれていましたが、ナノテクノロジーはこの限界を打ち破る可能性を秘めています。そのためにナノテクノロジー戦略が現在真剣に検討されているところです。

わが国でナノテクノロジーの議論が活発になった背景の一つに、アメリカのクリントン大統領の宣言があります。アメリカが日本やヨーロッパに唯一負けているナノテクノロジー分野を挽回して優位に立つ、あるいは21世紀の新しい産業革命の準備をするためにNNI (National Nanotechnology Initiative) を2001年度連邦予算案において最優先事項として位置づける、という宣言が2000年1月に行われました。NNIの来年度予算は今年の約83%増の5億ドルと発表されています。NNIは6省庁・機関が参加する大掛かりなものです。基礎的研究に力を入れ、長期的な展望でしっかりとした技術体系を作る点が特色で

図2 IT革命を支えるナノテクノロジー



す。また、みんなが協力して一つの目標を達成するようなプロジェクト(グランドチャレンジ)、センターオブエクセレンス(COE)、ネットワーク構築、研究基盤の整備、あるいは倫理的な問題の法整備、教育訓練といった活動を掲げています。

80年代にアメリカは製造技術で苦境に立ったとき、ソフトウェアや知的財産あるいは半導体や光などの分野で競争力を高めるという政策をとり、それらの分野で世界の主導権をとったことは記憶に新しいところです。私たちも、そのような過去から学び、日本が優位といわれているナノテクノロジーの分野で将来も優位であり続けるようにしなくてはならないと思っています。

IT革命は現在急速に進められています。ITはハードウェアとソフトウェアがお互いに協力する中で発展し続ける分野で、どちらか一方だけでは発展しません。しかしハードウェアには大変大きな壁が立ちだかっています。その壁を打ち破るためには、基盤技術としてのナノテクノロジーあるいは革新的な材料技術が使われると予測されます(図3)。携帯電話やネット型ゲーム機のように現在わが国独自のIT文明が誕生しているといえますが、21世紀はe life、eコマース社会になり、同時に高齢化や環境の保護等の問題も解決されなくてはなりません。誰で

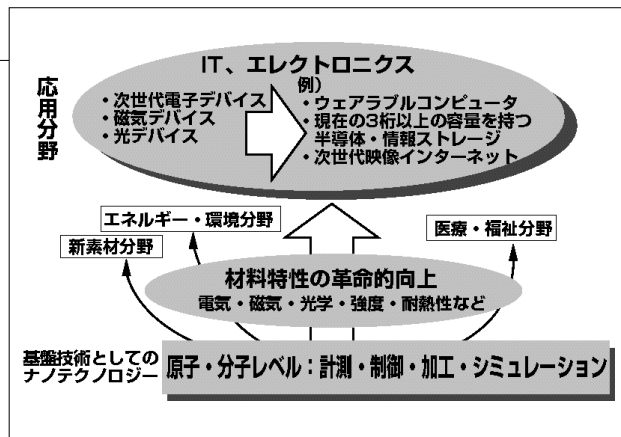


図3 今後のIT革命を左右するナノテクノロジー

もどこでも利用できる情報ネット社会が実現し、健康や安全が保障されるセキュリティの高い医学的なネット社会が実現されなくてはなりません。そのためにもテラビットの情報処理能力、高度なヒューマンインターフェースをもった技術、あるいはセンサー通信機能付きのシリコンチップ、健康管理のバイオナチップといった新しいデバイス技術がどんどん生まれてくる必要があります。

半導体技術にむけたナノテクノロジー

半導体技術に関する加工寸法の予測が図4に示されています。上表には半導体世代の3年ごとの傾向が、下表にはそれを達成するための課題が書かれています。半導体世代が100nmから70nmが変わるところで技術的な困難があると予測されていますが、現在実

用的な意味で技術的な解が見つかっていない状況です。これは大きな問題で、数年後に見えてこなければいけない技術を我々は確定できていません。

アメリカでは過去10年以上半導体の分野をリードしてきましたので、非常に重厚な布陣でこの壁に対応しようとしています(図5)。目下の製品化は企業が行い、その先についてはセマテック(SEMATECH: Semiconductor Manufactur-

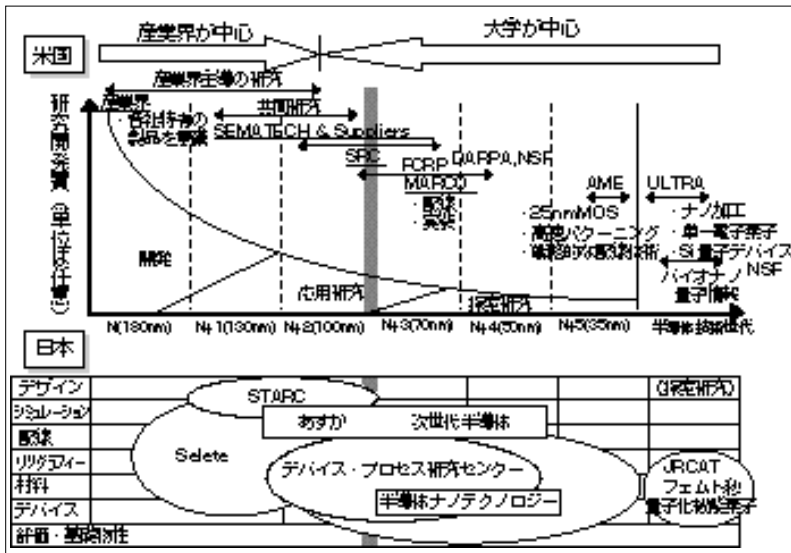
図4 半導体技術ロードマップから見た半導体技術課題

(ITRS 1999 Edition)		壁 (Red Brick Wall)					
西 暦	1999	2002	2005	2008	2011	2014	
半導体世代 (nm)	180	130	100	70	50	35	
MPUゲート長 (nm)	140	85	65	45	32	22	
DRAM規模	256M	1G	4G	16G	64G	256G	
上記目標を達成するための主要条件 (課題)							
重ね合わせ精度 (nm)	70	50	35	30	20	15	
パターン寸法変動値 (nm)	14	8.1	6	4	3	2	
ゲート絶縁膜厚 (nm)	1.9-2.5	1.5-1.9	1.0-1.5	0.8-1.2	0.6-0.8	0.5-0.6	
層間絶縁膜 k	3.0-4.1	2.5-3.0	2.0-2.5	1.5-2.0	<1.5		

解の候補があり研究中
 解の候補がまだ見つからない

ナノテクノロジー時代：従来技術からのブレークスルー要

図5 半導体技術世代と研究推進体制（日米比較）



ing Technology Institute) という官民共同の組織が開発を行います。技術的に立ちはだかる壁の先には配線や実装、ナノ加工などの技術を並べて国家の資金や国立研究所を中心に研究を進め、長期を眺めた布陣をとっていかようとしています。

わが国は技術的に立ちはだかる壁とその先の部分の布陣が非常に弱いことがここ数年問題になり、民間主導のあすかプロジェクト、国立研究所主導の次世代半導体研究センターなどが立ち上がろうとしています。また経団連ナノテクノロジー専門部会でもナノテクノロジー戦略について詳細に検討した結果、

次世代半導体等を包含しながら大きな仕組みとして取り上げるべきだという結論に至りました。

半導体技術における研究開発テーマ

半導体における研究開発テーマについても考えてみます。例えば高誘電率のゲート酸化膜、あるいは配線のための低誘電率層間絶縁膜、プロセス技術、計測等があります。またリソグラフィ、新デバイスのプロセス技術等もわが国できちんと押えたいテーマです。例えばトランジスタの構造は過去20年を振り返ってみると、短チャンネル効果でチャンネル長が変わるとしきい電圧が変わるため、それを

いかに一定にするかという努力の歴史でした。この原因になっているリーク電流の経路を遮断するために、ダブルゲートのトランジスタをSiO₂上に作るという新しいトランジスタ構造も検討されています(図6)。

カーボンナノチューブは1991年にNEC基礎研究所の飯島澄男さんが発見し、研究面でも工学的な面でも大きなインパクトを与えました。これはチューブ状に形成されるカーボンの配置によって金属や半導体の性質を示し、大きな磁気抵抗効果も期待できるものです。スピンの保存されたまま電子が流れるなど、大変面白い性質もわかっていて、工業的なレベ

図6 ダブルゲートの利点とプレーナ構造MOSFET

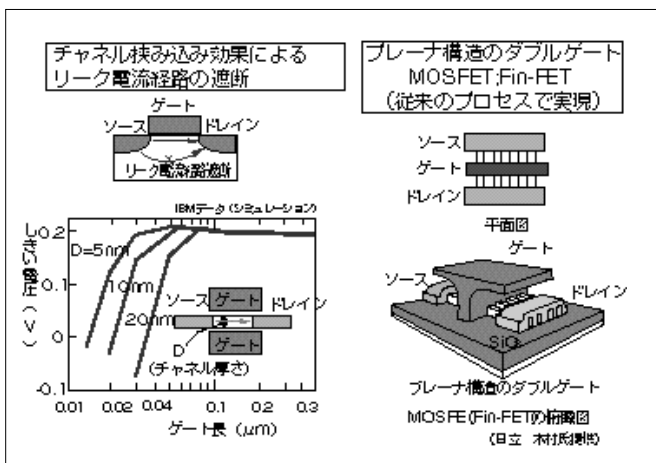


図7 カーボンナノチューブを用いたナノトランジスタ

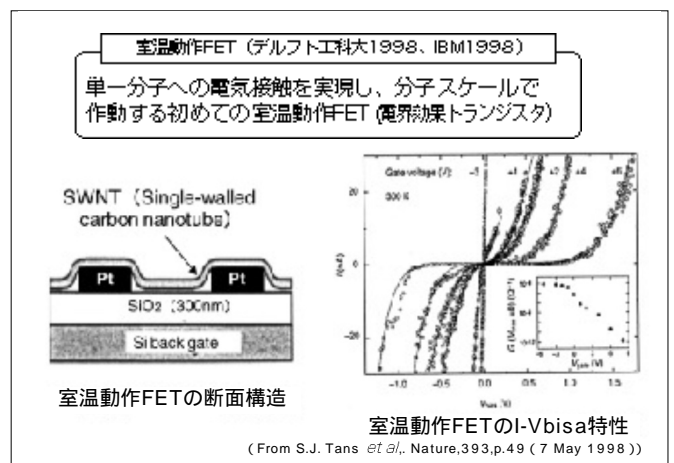


図8 単一電子メモリの動作原理

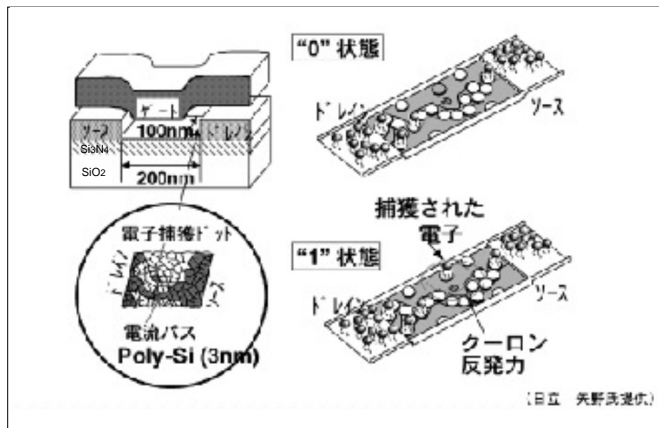
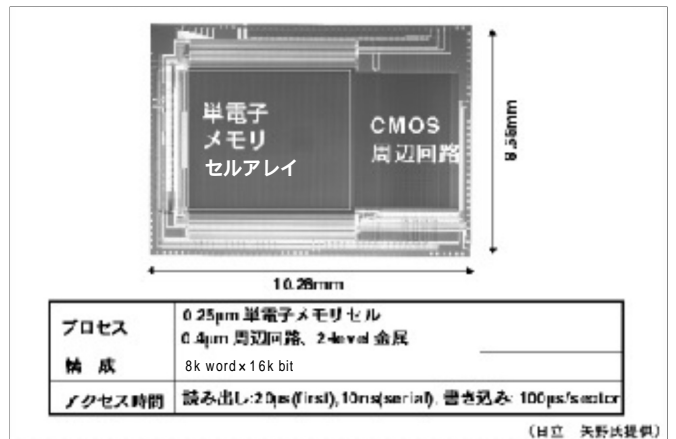


図9 128Mビット単電子メモリ



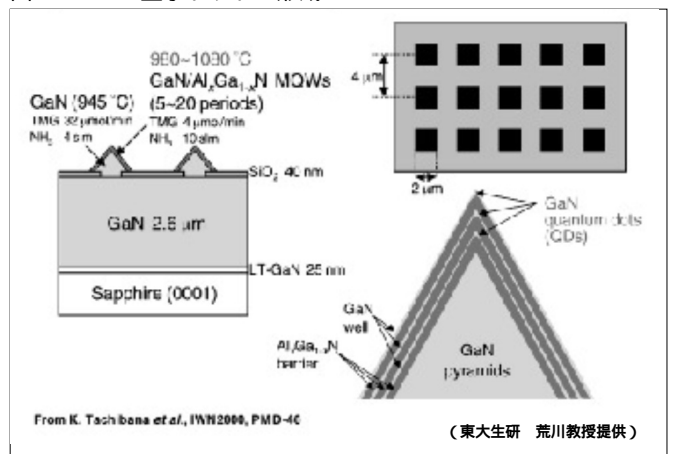
ルで実際に作り出す技術もできつつあります。すると先ほどの電流チャンネルに使えるのではないかということにもなってきます。図7はIBMとデルフト工科大学が1998年に発表したものですが、SiO₂上にカーボンナノチューブを置き白金で電極をとると、室温でトランジスタ特性が出てきます。白金を配置することやSiO₂の基盤を作ることは従来の半導体技術ですが、それにナノスケールの材料技術を組み合わせると新しい解が出てくることを示しています。

メモリについても現在のDRAMからフラッシュメモリ、FeRAM（強誘電体）、MRAM（強磁性体）等いろいろなのが考えられています。図8は日立製作所で作られた単一電子メモリですが、3nmのポリシリコン膜に電流を流すと、電流は通りやすいチャンネルのところで流れます。そこでは電子を捕獲する島状のドットが自然に作られて、捕獲される電子があるかないかで電流の流れが変わり、それに応じてメモリが0か1の状態を取ります。つまりドットに電子があるとクーロン反発力が生じて電流の流れが変わるのです。日立では実際にこの方法で128メガビットの単電子メモリが動きました（図9）。ソースやゲートドレインの作り方は今までと同じですが、電流が流れるという一番大事なところが自己組織的に作られています。このようにナノテクノロジーは新しいデバイスやシステムができてくる方向を我々に示しているのではないかと思います。

光の分野では1982年に東京大学の荒川先生と佐々木先生が量子ドットレーザーを提案されました。量子ドットレーザーでは普通の量子井戸レーザーに比

べ、次元が減る分、状態密度が一ヶ所に集中して高い状態密度が得られます。つまりレーザーとしての利得が高くなり、半導体レーザーの閾値はどんどん下がるはずだという性質が予想されました。最近では青色の量子ドットレーザーが東大の荒川先生のところでは発振しています。作り方は、基盤の一部だけが見えるようにマスクをして結晶成長させるとピラミッド状に化合物が堆積するというものです（図10）。ピラミッドの突端のところを使うと量子ドットが実現できます。このリソグラフィーは2μ程度のもので、自己組織的に材料を形成することによって非常に小さなナノスケールのデバイスができるという例を示しています。図11では実際の基盤上にきれいに量子箱が形成されています。

図10 GaN量子ドットの形成



他の分野でのナノテクノロジーの広がり

ガラスの分野では長年機能性ガラスや構造化といった点を中心に検討されてきました。最近では酸化コバルト (Co_3O_4) の結晶を精製し、その界面にガラス系の薄膜を埋めるといった作り方が関心を集めています。これによって通常のパルクでは期待できないような大きな非線形効果が観測できています。例えばレーザー光を照射するとレーザー光のON・OFFによって屈折率が5%程度変化します。このような材料によって現在よりも10倍の記録密度の光ディスクが可能になるのですが、ガラスという古い分野にナノ構造を入れることによって新しい産業インパクトが生まれてくるのがわかります。

バイオ関連のセンサー技術に対して、ナノテクノロジーが大変役に立つという実例もあります。ナノ粒子を蛍光標識として用いることによって、タンパク質やDNAの検出を簡単にすることができます。そのような応用例が最近アメリカのベンチャー企業でも実用化されています。硫化亜鉛 (ZnS) で被覆された4 nmのカドミウムセレン (CdSe) に紫外線を当てると発光し、粒子の大きさによって波長が変化するというもので、特定のタンパクと結合するような手を埋めこんでおくとそのタンパクによって特定の色で発光します。魅力的な点は粒子の材料を変えると発光の色も変わることですが、さらに粒子の大

きさを同時に変えると量子サイズの効果が出てきて発光波長が変わります。これによってたくさんの標識を作ることが可能になります。一ヵ月ほど前にこの現場を見学してきましたが、彼らはこれを次の遺伝子診断の新しいプラットフォームにしたいと意気込んでいました。1 nmレベルの粒形をうまく制御して実用化しようとしている彼らのバイタリティには感心しました。このような事業化に向けてのバイタリティをどのように日本でも育成するかというのが我々の課題でもあります。

日本がとるべきナノテクノロジー戦略

ナノの世界ではどんどん新しいコンセプトが出てきていますが、問題はそれをどう作るかです。ナノというとSTMで原子をつまむ、あるいははじき飛ばして構造を作るというIBMから1990年に発表されたコンセプトが焼きついていきます(図12)。キセノン原子でIBMと文字を書いたものですが、これでは量産は期待できません。一方、マクロな世界からトップダウン的に降りてきたのでは、ナノの世界はもう加工できないところにあります。これからの我々の大きなチャレンジは、ボトムアップとトップダウンの融合です。この融合がメソスコピック領域、ナノ領域での技術体系、産業化を進めていくと期待されます。ボトムアップはSTM原子分子操作、レーザーピンセット等がありますが、大切なのは自己組織化

図11 GaN量子ドットのSEM写真

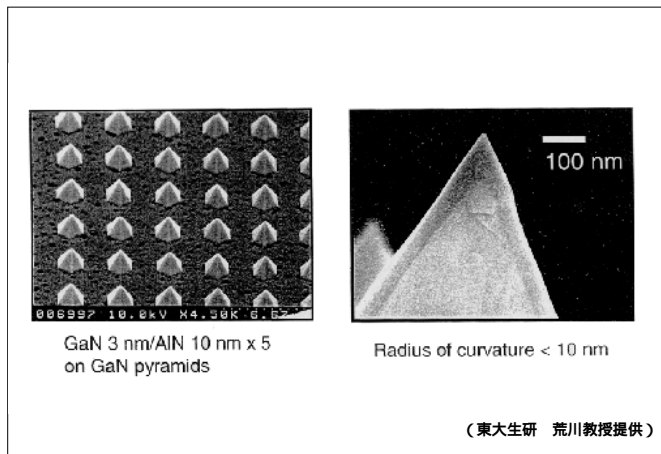
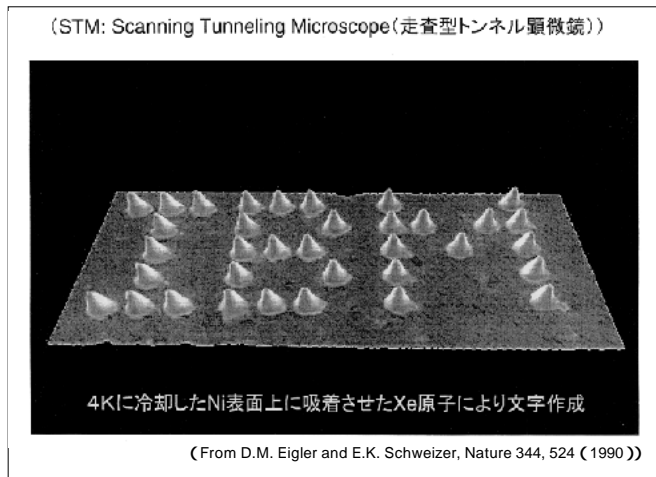


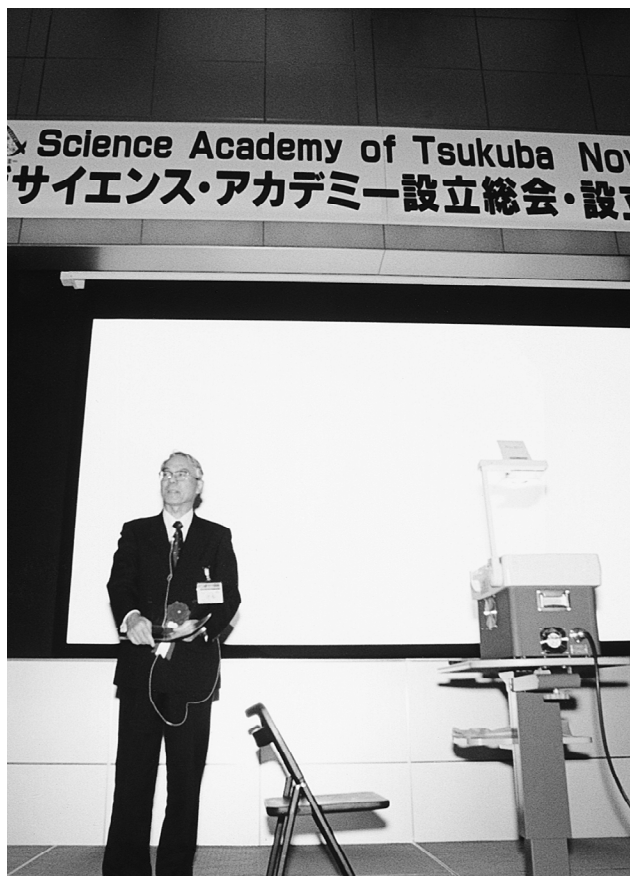
図12 STMによる原子操作で書いた世界最小の文字



機能です。トップダウンはナノサイズに向けての微細化ということになりますが、ここをうまくハイブリッド化してシステムを作っていくところで先駆的な例が出始めています。それらの点を追求することが、わが国のナノテクノロジー戦略の一つではないかと感じています。

マスコミ等では「IT、バイオは残念ながらアメリカに後塵を拝したけれども、ナノテクノロジーだけは勝とう」という論調の記事が見られますが、この表現は誤解を与えます。むしろナノテクノロジーはIT、バイオ、エネルギー・環境、材料をブレイクスルーする研究といった方が正しいでしょう。ですから他分野の進展のためにも、ナノテクノロジー研究の開発が必要となってきます。

これから日本がとるべきナノテクノロジー戦略の中で、どこに集中して国の貴重な人材や資金を投入するかという重点投資の戦略が非常に重要になってきます。それを考える上で私は三つのプロジェクトを念頭に置くべきだと思っています。一つはフラッ



グシップ型プロジェクトで、日本として研究すべき分野の明確な目標を持ち5年、10年先の実現を目指す総合プロジェクトをよく議論して特定すべきです。一例ですが、50から30nm世代の半導体技術、テラバイト級の情報ストレージ技術、毎秒ペタビット級ネットワークデバイス技術、バイオナノセンサー技術等もこの範疇に入ります。二つ目はチャレンジ型プロジェクトで、従来の知見からの革新性を目指すような基盤技術開発プロジェクトです。通産省工業技術院のプログラム研究開発の多くのものがこの範疇に入ります。明確な出口意識のもとに、プロセス、マテリアルあるいは計測、加工、シミュレーションで従来をブレイクスルーするようなオリジナリティの高いリスクな研究開発を狙うべきです。三つ目はリサーチ型のプロジェクトで、新しい可能性の探索や知的基盤の革新を目指す基礎研究です。アメリカはこの部分を非常に強調していますが、日本でもきちんと位置づけておく必要があります。未踏分野の開拓とシーズ探索、原理の究明というのは技術の体系を普遍化し、新しい方向を見出していくのになくはならないものです。この三つのプロジェクトが同時に進んでお互いにいい相乗効果を生み出していければ、わが国のナノテクノロジーの研究開発は成功するのではないかと期待しています。

日本の強い技術分野に重点投資して人材を育成し、省庁、産業界、大学の枠を超えて異分野間にまたがるネットワークを作る。そして基盤技術を構築して実用化し、新しい産業を創生することによって経済成長を促し、そこから出てくる資金で再び新しい研究のシーズを生み出す、という産業のサイクルが今後できるようになればいいと思っています。

私たちは約15年という長い時間をかけて多くの研究者をナノテクノロジー分野に当ててきました。そのためこの分野に関して日本は世界的にも進んでいると認められています。将来に向けても日本が優位であり続けるために、科学技術会議を中心に各省庁や産業界を含めてナノテクノロジー戦略を現在検討しているところですが、そこでしっかりとした戦略を立てることが望まれます。

SAT

