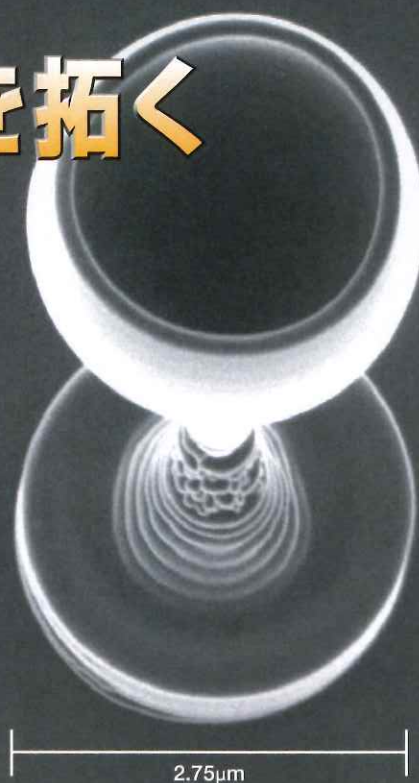


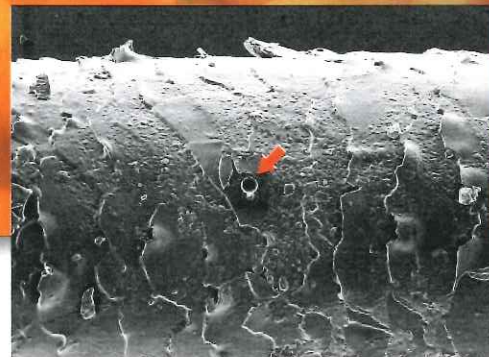


ナノテクノロジーを拓く ナノ計測・加工

ナノテクノロジーは、産業大国日本の未来を担う技術として、大きな注目を集めている。人間の眼に見えない微小な世界の技術であるナノテクノロジーは、あらゆる分野への波及効果が大きい。材料や計測技術は、ナノテクノロジーの基盤技術として重要な役割を占めており、鉄鋼材料でもナノ領域での研究開発が注目されている。またナノ領域の加工技術を利用したマイクロマシンやナノマシンは、「機械」というより「素子」として、また「システム」として、さまざまな応用分野への研究が進められている。



NEC、姫路工業大学、セイコーインスツルメンツは共同で、100nm以下の3次元構造体を作製する技術を開発し、世界最小のナノワイナグラスの作製に成功した(高さ12μm、外径2.75μm)。右は髪の毛の上に置いたところ(矢印の先)。(写真提供:セイコーインスツルメンツ(株))



原子や分子の大きさを対象とする「ナノ」の世界

ナノ(nano)とは、もともと「小人」という意味のラテン語で、10億分の1を表す言葉である。1nm(ナノメートル)は10億分の1mで、よく知られているμmの1000分の1である。1μmは人間の細胞の大きさに相当するが、1nmは細胞を作る分子やDNAの大きさに相当する。ちなみに、物質の最小の単位である原子は10分の1nmの単位である。

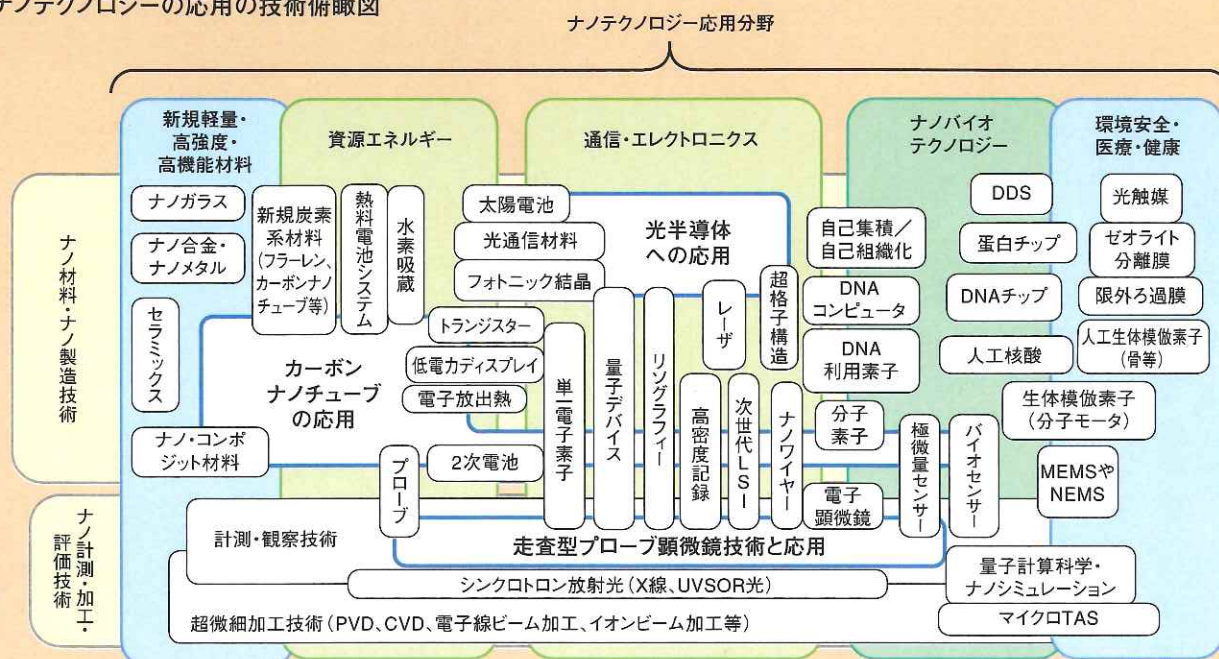
一般に「ナノテクノロジー」とは、分子や原子の大きさのレベルで物質を直接操作し、ナノ物質やデバイスを創製する技術のことである。ナノ物質やデバイスは、材料の種類、形態、大きさ、製造技術などの組合せにより、さまざまな機能を発揮する。

「ナノテクノロジー」と言う言葉が使われ始めたのは、1974年に東京理科大学の谷口紀男教授が国際生産技術会議でその概念を提唱したのが最初であった。1982年には、原子の観察や自由操作が可能となる走査型トンネル顕微鏡(STM:

Scanning Tunneling Microscope)が発明された。2000年に米国・クリントン大統領は、「国家ナノテクノロジー戦略」を推進すると宣言した。この演説の中で、「議会図書館にあるすべての情報を、角砂糖の大きさのメモリに収める」というわかりやすい言葉でナノテクノロジーの可能性を表現した。

日本では、2000年に当時の経済団体連合会が「21世紀を拓くナノテクノロジー」提言書を発表し、ナノテクノロジーへの取り組みの重要性を示した。2001年、政府の総合科学技術会議では、情報通信、生命科学、環境、ナノテクノロジーの4項目を国の科学技術政策の重点課題に掲げた。さらに、2000年に経済産業省が「ナノテクノロジー・材料分野推進戦略」を策定するなど、ここ数年でナノテクノロジーへの取り組みが本格化してきた。

■ナノテクノロジーの応用の技術俯瞰図



(特許庁「ナノテクノロジーの応用に関する特許出願技術動向調査平成14年5月」より)

● ナノ材料を創製する方法

ナノテクノロジーは、材料、情報通信、環境、エネルギー、機械、生命科学などの幅広い先端分野で、その進歩を支える基盤的かつ総合的な科学技術分野としての役割を担っている。現在行われているナノテクノロジー研究分野は、大別すると「ナノ材料創製」「ナノ計測・加工」及び「応用分野」の3つに分けて考えることができる。

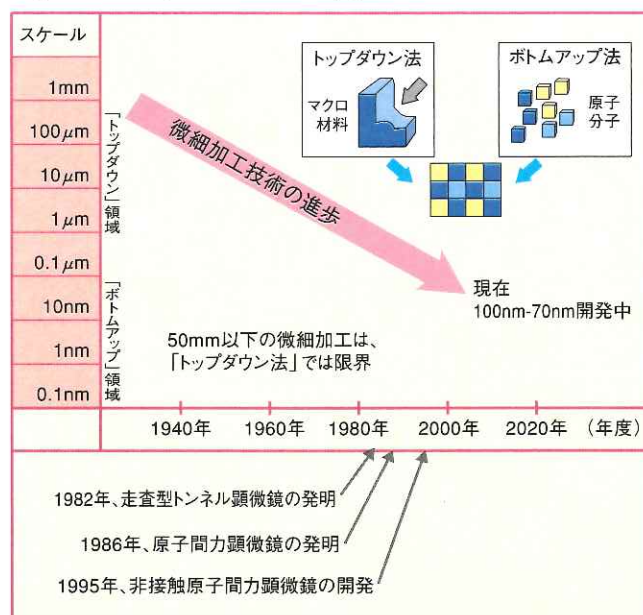
このうちナノ材料創成は、「大きさがナノ領域である」物質を作り出すことにより熱、光、電圧などの刺激に対する新しい特性を引き出そうとする分野である。

ナノ領域の物質を作る考え方には、トップダウンとボトムアップの2つがある。トップダウンは、大きな物質から微細化していく方法であり、ボトムアップは、小さな原子を組み合わせ分子などを構成する方法である。

トップダウンの技術としては、半導体の微細加工が代表的である。半導体は、約1cm角のチップ表面にいかに微細な集積回路を形成できるかが高性能化の鍵となる。現在量産されているDRAM (記憶保持動作が可能な随時書き込み読み出しメモリ) では、集積回路を光学的に焼き付けるリソグラフィ技術によって回路幅は約100nmにまで達している。

ボトムアップは、現在ある約100種類の元素の原子や分子の組合せによって、多様な物質を作り出す方法で、従来にない新材料やデバイスを生み出す可能性が高い。中でも、ナノ領域の構造を自発的に形成していく「自己組織化」では、50nm以下のナノ構造体を効率よく形成することも可能だと言われている。

■微細加工技術の進歩とナノテクノロジー (トップダウン法とボトムアップ法)



(「ナノテクノロジー・ハンドブック」産業技術総合研究所ナノテクノロジー知識研究会編より)

例えば人間のDNA (デオキシリボ核酸) には、生体を形づくるためのプログラム情報が入っている。その情報に従って、細胞中のリボゾームという物質がアミノ酸を並べ、タンパク質を合成すると、骨や内臓などの各器官が作られていく。これは、原子や分子を組み上げて、新しい機能を創造するというボトムアップの例であり、生物は当然のようにナノテクノロジーによる物質創製を行っていると言える。

ナノ材料の中で最も注目されているものの1つが、カーボンナノチューブである。1991年に当時NECに所属していた飯島澄男氏によって発見されたカーボンナノチューブは、六角形に並んだ炭素原子が円筒形状になった物質である。単層・多層、直径、らせん状態、筒端形状など、構造を制御することにより、すぐれた電気伝導性や機械的強度を発揮することができる。これにより、次世代ディスプレイ、燃料電池や、高強度材料への応用が期待されている。また1985年に発見されたフラーレンは、炭素原子60個がサッカーボール構造になった材料で、極めて高い電気伝導性を持ち、フラーレンを応用した新材料の研究も進められている。

鉄鋼材料を進化させるナノテクノロジー

新しい金属材料の創製でも、ナノテクノロジーは重要な役割を果たすことが期待されている。

経済産業省の施策を受け、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)は2001年度から「ナノテクノロジープログラム」を開始した。このプログラムの中には、ナノマテリアル・プロセス技術とナノ加工・計測技術が含まれているが、材料関連のプログラムの1つに「ナノメタル技術」があり、ナノメタル材料創製の基盤技術の確立が試みられている(研究開発期間は2001~2005年度)。このプロジェクトでは鉄系、アルミニウム系、銅系のナノメタルが研究対象となっている。このうち鉄系ナノメタルの研究では、鉄鋼材料の組成及び組織をナノレベルで超精密・超微細に制御することにより、機械的特性(強度、延塑性等)や機能特性(耐食性)を飛躍的に向

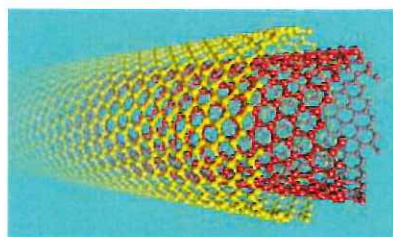
上させることを目指している。この時、スクラップ中のCuに着目し、ナノクラスター・ナノ析出素過程の解明などを行なうとともに、Cu軟質ナノ粒子析出による「分散強化」と「結晶粒のナノスケールでの超微細化」の相乗効果の利用を図っている。

物質・材料研究機構では、1997年度から「超鉄鋼材料研究開発プロジェクト」を実施し、第1期(2001年度に終了)では、土木・建築用厚板向けの800MPa級鋼材を開発するために、特殊な合金元素を添加せずに鋼材の結晶粒径を約 $1\mu\text{m}$ 以下に超微細化する手法を採用した。2002年度からの第2期では、鉄鋼材料の組織や合金元素分布などをナノ領域で測定できる解析装置・技術の研究などが行われており、次世代の鉄鋼材料設計の基盤技術として大きな役割を果たすものと期待される。

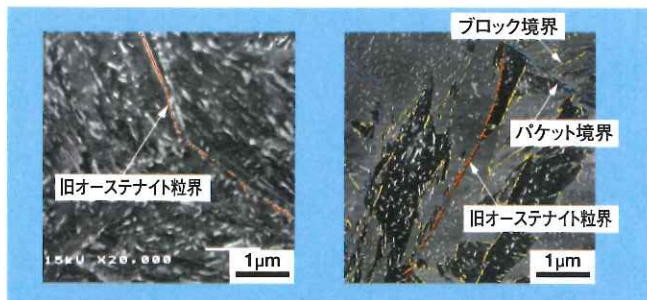
磁性材料でも、結晶粒の微細化技術が注目される。従来の軟磁性合金では、透磁率を向上させるために結晶粒を大きくして磁化の障害となる結晶粒界を減らすという考え方が取られていた。最近では逆に、ナノ領域の結晶粒を持つ材料(粒径約10nm)によって高透磁率を得る技術が開発されている。これは、結晶粒の大きさが10nm程度になると、結晶粒界は磁化の障害にならなくなるという考え方に基いている。

ナノ領域に特有な現象と計測技術

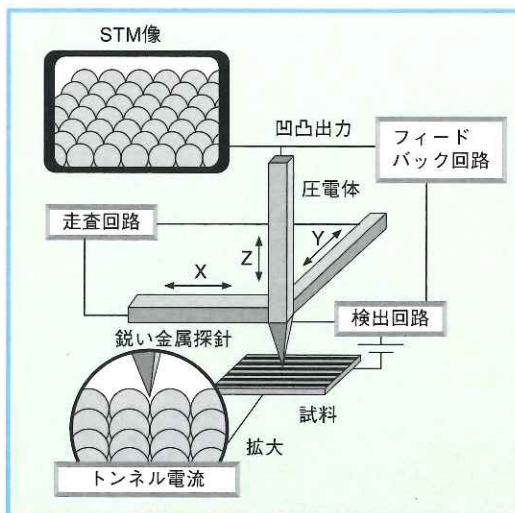
ナノテクノロジーの基盤技術となるのが、計測技術や加工技術であり、よく知られているのがプローブ(probe)技術である。プローブとは、測定器を使用する際に試料に接触させる「探針」であり、表面の形状観察や計測、物性分析などを行うことができる。ナノサイズのプローブを試料表面に近づけて操作する顕微鏡を総称して走査型プローブ顕微鏡(SPM: Scanning Probe Microscope)という。



多層・単層、直径、らせん状態、筒端形状などの構造制御が可能で、電気的特性が制御できる。軽量高強度などの特性を持つカーボンナノチューブ(写真提供:NEC)



マルテンサイト組織のSEM画像(左)とAFM画像(右)。SEMによるマルテンサイト組織の画像では、旧オーステナイト粒界・ブロック、バケット境界を識別しにくかったが、AFMでは粒界・境界上に析出している微細炭化物を明瞭に検出する(着色して表示してある)ことが可能になり、粒界、境界の位置が認識できるようになった。(「物質・材料研究機構「近未来の鉄鋼材料を知る—ナノスケール解析(ナノ観察・ナノ分析)」より転載)



走査型トンネル顕微鏡は試料と探針間に流れるトンネル電流を検知し画像化する(「はじめてのナノプローブ技術」森田清三著より)

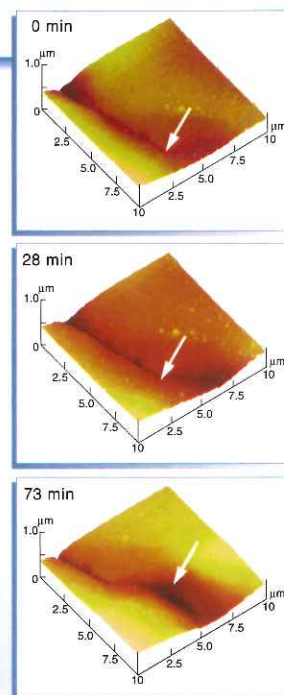
鉄鋼材料の水素脆化のナノスコピック観察

鉄鋼材料を始めとする構造材料が環境要因によって脆化する場合、大きな要因として環境中の水分とそこから発生する水素がある。このような環境脆化の機構解明や抜本的な対策が求められてきたことに対応し、平成10～14年度に科学技術振興調整費による総合研究として「構造材料の環境脆化における水素の機能に関する研究」が行われた（プロジェクトリーダー 南雲道彦早大教授）。本課題は日本鉄鋼協会から提案したものである。

この研究の中で、京都大学・駒井謙治郎教授らは、鉄鋼材料の環境脆化の過程や水素の分布を、ナノ領域で観察した。実際に、環境対応型原子間力顕微鏡（AFM）、環境対応型動的試験装置、及び環境槽からなる動的損傷解析装置を開発し、動的応力を付加した条件下で環境脆化損傷のその場ナノスコピック観察が可能であることを示した。右図は、高強度ステンレス鋼の自然腐食条件下の水素脆化き裂先端を観察した像である。き裂は粒界組織に依存し、鈍化・再鋭化して、進展速度の低下や再加速を示した。

このように、従来は難しかったナノ領域での計測や表面観察を通じて、新しい世代の鉄鋼材料の研究が進められている。

高強度ステンレス鋼の静的応力腐食割れき裂のAFM像（矢印はき裂先端）
自然腐食条件下、 $K(応力拡大係数)=14.2\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ （写真提供：京都大学大学院、駒井・箕島研究室）



代表的な走査型プローブ顕微鏡が、走査型トンネル顕微鏡（STM、前述）である。これは、導電性のプローブを用いて、プローブと試料表面に流れる「トンネル電流」*を検出することにより、表面の電子の状態や凹凸を観測する。

プローブと試料を微小電圧を印加した状態で1nm程度まで近づけると、トンネル電流が流れる。トンネル電流は距離に非常に敏感で、プローブと試料の距離が0.1nm変化すると、電流量は1桁変化する。プローブは圧電素子に取り付けられており、トンネル電流を一定に保つようにして試料表面を走査し、圧電素子に加わった電圧を表面高さに換算して画像化することによって、微小な表面形状が得られる。

STMは顕微鏡としてだけでなく、個々の原子や分子を操作する道具としても使用される。固体表面にある原子や分子の位置を移動させたり、探針と表面との間で原子や分子を移動させることもできる。IBMのアイグラーらは、STMを用いてニッケルの表面にキセノン原子を一個ずつ移動させるという方法で、「IBM」の文字を描いた（1990年発表）。これにより、STMが原子操作の道具として世界に広く知られるようになった。

走査型プローブ顕微鏡には、このほかに原子間力顕微鏡（AFM:Atomic Force Microscope）や走査型近接場光学顕微鏡（SNOM:Scanning Near-field Optical Microscope）などの種類がある。AFMは、カンチレバーの先端に付けた絶縁性の探針と試料表面に働く「原子間力（原子同士が数

nmまで近付いた時に働く力）」を検出することにより表面形状を計測する方法であり、探針と試料の間で働く極めて微小な力を検出できるのが特徴である。SNOMは、光の波長より小さいサイズのものを光で見る顕微鏡で、試料近くに「近接場光（物体の表面近くに存在する光）」を発生させて、プローブで走査して画像化するものである。分解能が光の波長による制限を受けない高分解能の光学顕微鏡である。

ナノ加工を結集したナノマシンの可能性

ナノ材料、ナノ計測といった基盤技術を基に、さまざまな応用分野の研究が進んでいる。このうち、機械分野では、ナノ領域で作動するデバイスや部品の作製や、これを用いた機械システムの研究が進められている。

半導体の製造技術を用いて微小な立体構造や運動機構を作った微小機械、センサなどのことを一般に「マイクロマシン」と呼んでいる。マイクロマシンより微細なナノレベルの極微細構造を形成することができれば、高感度なセンサ、高空間分解能の高密度記録装置、電界放射型電子源などのさまざまな機械システムを作ることが可能となる。

ナノ構造を作る加工方法には、半導体微細加工技術を利用した方式だけでなく、分子レベルの制御によって微細構造を作る「自己組織化プロセス」や走査型プローブ顕微鏡などを応用し、原子を積み上げる方法などがある。

ナノ領域の部品の一例として「ナノ振動子」がある。振動子とは、一定の往復運動を繰り返すもので、形状や重さの変化を敏感に感じることができる。特に原子・分子が振動子に

*トンネル電流：古典力学では、粒子が運動エネルギーより大きな位置エネルギーの差を持つ壁を越えてゆくことはできない。しかしながら量子力学では、障壁が極めて薄い（nm程度）場合にはある確率でこの壁をすり抜けてゆくことが可能であり、この現象をトンネル現象と呼ぶ。粒子が電子の場合、トンネル効果による電子の透過速度を「トンネル電流」と呼ぶ。

触れることによる質量の変化を検出できるようになれば、極限センシングデバイスとしての応用や、大気や水に含まれる微量物質の検知などが可能性になると期待される。そのためには極小レベルの振動子が必要となる。

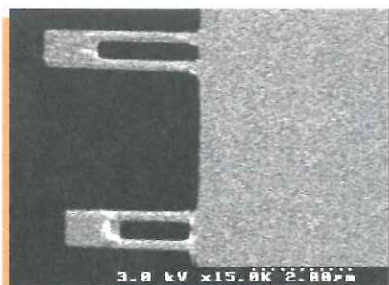
東北大学の江刺・小野研究室では、ナノ領域の加工技術による微小振動子の研究を行っている。厚さ数十nmのシリコン片持ち梁振動子を超高真空中に保持すると、Q値(振動子で、振動の1サイクル当たりに蓄えられた振動エネルギーと外部から与えられた振動エネルギーの比)が20万以上の、極めて鋭い振動特性を示すことを利用して、微小な重量変化などを共振周波数変化として高感度に検出できることが明らかになった。また、この片持ち梁に、ヒータ、温度センサ、近接場光開口などを先端に付けたプローブを作製し、高密度データ記憶や走査型プローブ顕微鏡に応用する研究を行っている。また同研究室では、STMによる描画で表面を局所的に陽極酸化し、これによる微細マスクを用いた結晶異方性エッチングにより、薄いシリコンダイアフラム(膜)を加工したナノ立体構造を製作することに成功している。

東京大学生産技術研究所の藤田博之研究室では、多数のマイクロアクチュエータをアレイ状に並べてその上で物体を搬送するという人工繊毛システムの製作に成功した。このシステムでは、熱膨張率の異なる2種のポリイミドを用いたバイメタル構造とマイクロヒータからなるアクチュエータ(長さ500 μ m、幅100 μ m、厚さ6 μ m)を用いている。

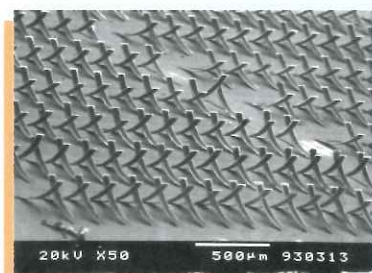
ナノテクノロジーの医療分野への応用例の1つに薬物配送システムがあるが、これは体内で薬が必要な場所に、必要な時間帯に、必要な量の薬物を届けるシステムとして研究されている。このシステムで、薬を届けるためにもナノマシンが使われることが期待される。ナノマシンは、機械というより生物に近い仕組みを持って、自律的に動作を行うことが期待されている。

ナノを見る。ナノを作る。それをシステムとして応用することによって、従来にない新しい機能を手に入れることができる。先端技術分野である半導体、IT、バイオなどのすべてに係わり、それらをさらに高いステージに引き上げる基盤技術となり、新しい「ものづくり」を展開する原動力となる。ナノテクノロジーには、そんなとてつもない可能性が秘められているのである。

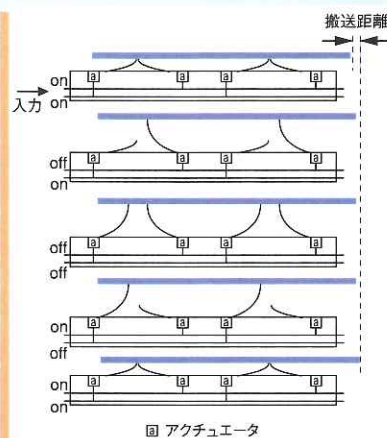
最近のナノ加工技術の研究例



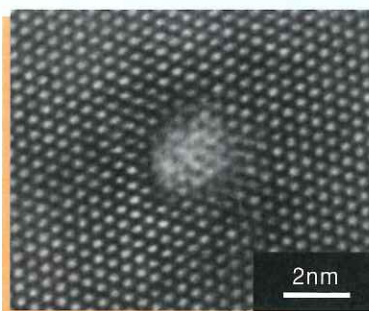
厚さ60nmの単結晶シリコン微小振動子(電子顕微鏡写真)(写真提供:東北大学、江刺・小野研究室)



熱膨張率の異なる2種の材料によるバイメタル構造のアクチュエータ(長さ500 μ m、厚さ6 μ m)を、連携させることにより人工繊毛システムとなる。(写真提供:東京大学生産技術研究所、藤田博之研究室)



シリコンの探針に堆積したニッケルを触媒とし、アセチレンの混合ガスを用いた気相成長によって、カーボンナノチューブが形成できる。この際、基板に電圧を印加して探針先端部に電界を集中させることにより、カーボンナノチューブを探針の先端から選択成長させることができる。これをSPMの探針や、電子顕微鏡の電子源に適用する研究が行なわれている。(写真提供:東北大学、江刺・小野研究室)



重イオンビームを用いた二酸化チタンへのナノ精度三次元加工の例。重イオンビームは、一個のイオンに対して深さ方向に長い一本の長いダメージ部分を形成した(左、写真中央はダメージ上端部)。また、ビームエネルギーを制御することで、表面にはダメージを与えず、表面より数 μ mの深さの領域に極めて平滑(粗さ5nm程度)の空洞層を形成することが可能となった(右)。(写真提供:(独)産業技術総合研究所、栗津浩一主任研究員)

