特集：進化するナノテクノロジー

産業技術総合研究所におけるナノテク戦略

五十嵐 一男*, 水谷 亘*

*(独)産業技術総合研究所(〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 つくば中央第2)

AIST Strategy for Nanotechnology R & D

Kazuo IGARASHI* and Wataru MIZUTANI*

*National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (1-1-1, Umezono, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8568)

Key Words : Nanotechnology, Material Science, Manufacturing, Sustainability

1. はじめに

現在ナノテクノロジー(ナノテク)と呼ばれている一群の技術は、半導体微細加工、表面科学、応用物理、精密工学、合成化学、材料科学、生物学などから進歩してきたという事情があり、新しい技術の寄せ集めという批判もある。一方、産業技術総合研究所(産総研)は、多様な産業技術の研究を目的とした我が国最大規模の研究機関であり、行政機関や産業界から質の高い研究、長期的な展望を持った研究の推進、目に見える産業貢献への取り組みなどに対し多くの期待が寄せられている。産総研ではナノテクに関しても多様な研究展開を行っているが故に、ともすると纏まりに欠けたり、分散的な研究展開を招きかねない問題も抱えている。産総研では第2期中期計画を推進するに当たり、有限な研究資源で産総研に対する多様で大きな期待に最大限応えるために研究戦略を策

定し、明確な方向性を明らかにした¹⁾。

産総研における研究開発の方向性は、産総研第2期研究戦略の中の全体戦略で位置付けられており、科学技術による持続的発展可能な社会を構築するという基本理念をベースにしている。経済的な発展と資源・環境負荷の低減を両立させるために、科学技術の果たす役割は大きい。ナノテクの研究開発においても、先端技術による高機能の実現だけではなく、省資源、省エネルギーを同時にクリアする技術を重点化している。

また、産総研のナノテク研究開発では、製造技術への展開に戦略的に取り組んでいる。産総研の研究分野は、大枠では科学技術基本計画で設定された重点領域に即して分類されているが、ナノテクと材料だけでなく、製造を含めて一つの分野としている点が特徴である。経産省においても、ものづくり支援政策として製造業の強化に力を入れており、産総研も

図1 産総研で開発している要素技術の一部をミニマル・マニファクチャリング的な視点でプロットした例

技術的な面で協力体制を整えている。他方、米国、欧州のナノテク研究戦略も製造技術ヘシフトしており、国際的な開発競争は製造分野に移りつつある。

第2期中期計画においてナノテクに関わる研究開発では、科学技術による持続的な発展可能な社会の構築を図るとともに、先端技術の積極的な参画により我が国の製造業を強め、国際競争力の強化に資することを目指している。我々は、この戦略の中核コンセプトとして「ミニマル・マニュファクチャリング」を提唱している。これは、「最小の資源を用い、最小のエネルギー投入(生産コスト・環境負荷)投入で最大機能を発現し、かつ廃棄物も最小に押さえる技術体系、循環システム」を構築しようとするものであり、基盤技術としてのナノテクの寄与が強く求められている。ミニマル・マニュファクチャリングの視点である、新機能・高機能、省エネルギー・省資源および高生産性・低コストの3軸で整理した産総研の要素技術マップを図1に示す。ナノテクは、製造技術に対して新機能・高機能化からの寄与が強く期待されている。本稿でもナノテクの要素技術を製造技術に結びつける視点で研究開発戦略と具体的な技術開発の状況を紹介したい。

この他、産総研の公的な役割として、先端的な研究開発のみではなく、ナノテクの産業化を加速するための標準化、リスク評価のような産業化に必要な環境整備を行うとともに、新しい市場の創出につながる技術開発と民間企業の技術開発を支援する試作サービスや人材育成を行っている。

ナノテクは、新たな科学技術を拓くとともに既存の産業技術の多くに関わり、それらの技術の幅を広げ、深みを増す基盤技術でもあり、現在の社会のさまざまな問題の解決に役立つと期待されている。一方で、これまで踏み込んだことのないサイズ領域のナノマテリアルなどが研究対象となり、それらが製品として社会に広く出てくることも含めて、予期しない負の結果がもたらされる可能性も指摘されている。欧米では、2000年以降さまざまな視点からナノテクの社会的影響への関心が高まりつつある。産総研でも、ナノテクの健全な発展を図るために、ベネフィットとリスクの両面から社会的影響を研究していくことを研究戦略に盛り込み、2005年度からナノ粒子の安全試験方法など将来の国際標準化に向けて具体的な取り組みを始めたところである²⁾。

2. 産総研が開発している要素技術

本稿の最初に述べたように、ナノテクはさまざまなツールの集合である³⁾。異なった経緯で開発されたナノテクの要素技術を体系だててすることは難しいが、本節では産総研で行われているナノテクの研究開発の中から特徴的な技術を選び、図1で示したミニマル・マニュファクチャリングの視点から整理した紹介を試みる。

製造産業において、エネルギーと材料資源を削減するには、オンデマンド製造、低温プロセス、高効率な材料生産、低設備投資などが鍵となる。同時に、新しい技術は産業界に実用技術として採用されるように機能的にも優れた製品を生み出すものでなくてはならない。長期的な視点で見れば、エネルギーや資源のコストは上昇すると考えられるので、製品コストを考慮すると、省エネ・省資源を実現する技術は、競争力

でも優位性を持つであろう。省資源、コスト低減と高機能を両立する技術を生み出し、産業に移転していくことが、産総研の重要なミッションと考えている。

2. 1 スーパーインクジェットによるオンデマンド省資源製造

在庫を持たず、必要な時に必要な量の製品を製造する技術をオンデマンド製造と呼ぶ。オンデマンドで市場を革新した身近な例として、ナノテクではないがデジタルカメラが挙げられる。従来型のカメラには、フィルムや現像液、印画紙などの消耗品が必要であり、画像の確認のために無駄な画像も大量に現像していた。また、フィルムを写真屋に持ち込み、数時間待たなければ目的の写真を得ることができなかった。デジタルカメラでは、その場で写真画像の確認ができるので、必要な画像のみ印刷すればよい。すなわち技術の進歩によって資源の無駄遣いが減った上に、より便利になったのである。このように、環境(省資源)と競争力(高機能)を両立させる新しい技術の例として、高度なインクジェット技術が開発されている。

家庭用プリンタに使われているインクジェット技術は、オンデマンド製造手法としても有望である。インクジェットプリンタは、さまざまな色のインクを微小液滴として高精度で打ち出し、紙の上に文字や画像パターンを描く。これは、コンピュータの中でデザインしたパターンを、すぐに(オンデマンドで)実物として出力できる装置なのである。インクは色をつけるだけでなく、有機半導体分子、金属微粒子、絶縁性のポリマーなど溶液として扱うことができるので、たとえば基本的な電子部品やそれらを組み合わせた電子回路をパターンニングできる。印刷するのも紙の上だけでなく、プラスチックやセラミックスなど、インクがうまく付けられる表面なら使用可能である。

光リソグラフィーでは、パターンの変更のためにマスクを作り直す必要があり、数週間かかる。インクジェット法では必要に応じて変更・修正・カスタマイズに即応可能なので、製品開発プロセス、特に試作過程を大幅に短縮することで、企業の開発力の向上に貢献できる。

また、光リソグラフィーによる回路パターンの作製は、図2に示したように、基板上へのレジストの塗布や金属などの蒸着、その後、レジストや不要部分の金属の除去(リフトオフ)といったように、ほとんどの材料を捨ててしまう材料効率の低い手法である。インクジェット技術は、ナノスケールのパターンニングは難しいとされているが、産総研では液滴サイズを従来の千分の一のフェムトリットルまで小さくし、これまでにない高分解能を実現したスーパーインクジェット技術を開発している⁴⁾。

さらに、有機や生体分子を使った壊れやすいナノ構造の上に電極などの微細構造を追加的に作製するには、光リソグラフィーやリフトオフなどレジストと一緒に有機物も剥がす可能性があるプロセスは避けたい。インクには、水溶性のものと有機溶媒に溶かしたものがあるので、たとえば有機溶媒のインクで作ったパターンの上には水溶性インクで配線するというように、さまざまな機能性インクを組み合わせる必要があるだろう。

2. 2 エアロゾルデポジションによるセラミックス薄膜の省エネルギー製造

明渡らによって開発されたエアロゾルデポジション法は、‘セラミックスは焼き物’という常識を覆す製造技術である⁵⁾。通常セラミックスは1200℃以上の高温で焼結するので、熱の発生にエネルギーを使い、温度を上げ、焼いた後で徐冷するのに時間がかかってしまう。しかし、原料となるセラミックスの微粒子を高速で基板に打ち付けると、常温でも微粒子同士がくっつき合っ、セラミックスの薄膜ができる。この成膜メカニズムは、ナノスケールで微粒子がぶつかり合っ一瞬表面が砕け、清浄な表面が結合する(常温衝撃固化現象)と考えられている。エアロゾルデポジション法では高温を必要としないので、プラスチックなど熱に弱い基板やそこに作り込んだ構造を壊すことなく、セラミックス材料を組み込める(図3)。また、これまで不可能だったセラミックス薄膜

をオンデマンドで作ることも、エアロゾルデポジション法を使えば可能である。

セラミックスにはいろいろな種類があり、さまざまな機能を持つ。電子部品の一つにセラミックスを誘電体とするコンデンサーがある。高密度で部品が組み込まれている携帯電話などの電子機器では、基板上のコンデンサーの占める面積が大きく、小型化を阻んでいる。回路の基板としてよく使われているエポキシ製の基板の中に、セラミックス薄膜の誘電体と電極をパターンニングして埋め込むことで、電子機器を大幅に小型化できる。また、セラミックスの一種に電圧を加えると変形する piezo 材料がある。マイクロスケールの機械のアクチュエータとして使うには、焼き固めた piezo 材料を加工し、必要な部分に接着する必要があったが、直接必要な部分に成膜することでコストも下がり、性能も向上する。

図2 光リソグラフィーによるパターンニングの工程

大部分のレジストや蒸着した金属などは、リフトオフのプロセス(d→e)で取り除かれてしまう。インクジェット法であれば、直接パターン(e)を描画できるので、資源を無駄にしない。

図3 エアロゾルデポジションの装置と原理

2.3 マイクロ空間化学

大規模な化学プラントでは、大量生産による効率的な製品製造が行われている。微量、あるいは特殊な化学物質は、実験室のレベルで化学合成される。たとえば生体のラベリングに使われる蛍光性ナノ微粒子を製造する時、その波長を決定する粒径は反応時間に依存するが、ビーカーやフラスコのような反応容器のサイズでは、温度の上げ下げと容器内部で均一な温度に到達する時間がかかる^{6),7)}。容器全体で反応時間を精密に制御できないため、結果として作製された微粒子の径も不均一になり、粒径を整えるためにフィルターが必要で、資源の浪費、コスト高につながる。一つの解決策として、マイクロ空間内での化学反応を利用することで、効率を高めることができる。反応には、細いチューブや基板に掘った溝、マイクロ流路を使う。マイクロ流路の断面の大きさは数10 μm なので、サイズとしてはナノスケールではない。しかし、マイクロ流路はナノテクの重要な舞台となる。マイクロ流路内では、温度を均一かつ迅速に制御できる。たとえば反応時間を一秒以下の精度で決められるため、微粒子であれば均一な粒径を持つ粒子をフィルターなしで得ることが可能になる(図4)。

材料の精製プロセスは、製造工程の中でも時間とエネルギーを要する、すなわちコストのかかる過程である。精製プロセスの効率化は重要な開発課題であるが、最初から純度の高い材料を合成し、精製を不要とするような技術は、真に革新的と言えるであろう。

マイクロ流路を使って化学反応を行うシステムをマイクロリアクターと呼ぶ。マイクロ流路の中では流体は層流状態で流れ、そのままでは引き返したり、混じり合ったりしないという特徴を持つ。二種類の物質を別々に流し、合流させても、直線部分では混じり合わないのだが、流路のカーブでは流体の接触部分で流体内の分子の混合が起こり、反応が始まる。また、流路の壁面を触媒作用のある物質でコーティングし、特定の場所で反応させることも可能である。微小空間では、溶液の体積に対して溶液間の接触面積が大きいので、効率よく反応をすすめることができる。チューブを使ったマイクロリアクターでは、生産量を増やすためにはチューブを太くす

るのではなく、チューブ径はそのままチューブの本数を増やす(ナンバリング・アップ)。

2.4 カーボンナノチューブの革新的製造——高機能デバイスに向けて

ナノスケールの特徴的な構造を持つ物質をナノ材料と呼ぶ。ナノチューブは、ナノスケールのチューブ構造の総称である。ナノテクではカーボンナノチューブ(CNT)が有名であるが、他にも有機分子のナノチューブ、ペプチドのナノチューブ、イモゴライトなど無機物のナノチューブがある。なかでもCNTは、理論的に優れた物性が予測されていて、うまく利用することで、従来にない高機能を発揮できると期待されている。産総研では、これまでにない高効率のCNT成長技術「スーパーグロース」を開発し⁸⁾、高純度のCNTが並んでぎっしりと詰まった構造体を作ることにも成功している(図5)。従来のCNTが数十パーセントの触媒を含んでいるのに対し、スーパーグロース法で作製されたCNTはほとんど触媒金属を含まない。2mmほどの長さに成長したナノチューブは、基板から固まりとして容易に剥がすことができるが、大部分の触媒は基板側に残っている。そのため、CNT材料にダメージを与える可能性のある精製プロセスを省くことができるので、精製プロセスのコスト面のみならず、性能の点でも改善ができています。純度だけでなく、向きの揃ったCNTが密集してできる構造体を使った、さまざまな応用が考えられている。

CNTの電気的性質は、グラファイトシート of の丸め方(カイラリティ)で金属か半導体になるため、電子材料として使うには、均一な物性を持つCNTを選択的に得ることが重要な課題である。たとえばFETのチャンネルになる部分にCNTを使う場合、金属では電界効果(スイッチ動作)は得られない。今のところ、金属と半導体のCNTを作り分ける方法は存在しない。そこで、IBMのアボーリスらは電極間をつなぐCNTに電流を流すことで、金属CNTだけを焼き切るという方法を開発した。他にも、電気泳動などを利用して半導体CNTと金属CNTを分離する試みなども研究されている。

CNTは電気的特性だけでなく、光学特性、機械特性、熱

図4 マイクロ流路による微粒子の製造

伝導特性に優れている。CNTの一端を固定し、他端にマイクロカンチレバーを使って力を加え、剛性を測定した実験がある。理論的にも、純粋なCNTは機械強度が大きいので、軌道エレベータ*のようなこれまで作れなかった建造物の建築が可能になると言われている。しかし、建築に使えるほどの長さのCNTをつくるのはまだ難しい上に、それほどの長さになると、どこかに欠陥が入ってしまう。直径、長さ、カイラリティが揃い、欠陥も触媒やアモルファスカーボンなどの不純物もないCNT試料を得ることは、まだ難しく、新しい合成手法の開発が行われている。CNTの鋭く尖った形状を利用して、電子放出を使ったCNTディスプレイは、すでに試作品も作られている。

2. 5 自己組織化による構造と機能の実現

自己組織化は、ナノ構造製造を劇的に低コスト化する革新的な技術として期待されている。厳密には、自己集積(Self-assembly)と自発的構造生成(Self-organization)に分類されるが、「自己組織化」という言葉での両方を意味する使い方が良くされている。自己組織化の概念はナノスケールにだけ適用されるものではないが、ナノテクの関連で語られる時は、光リソグラフィーのようにトップダウンの手法で加工するのではなく、原子や分子が集まってボトムアップ的にナノ構造ができて上がることを指す。トップダウン方式の代表である半導体デバイスや液晶などのフラットパネルディスプレイの製造に使われる高性能のクリーンルームや描画装置などのさまざまな設備を揃えるには、膨大な資金が必要とされる。工程の一部でも自己組織化によってナノ構造を作製することができれば、インパクトは大きい。しかし、これまでの研究は基礎的なレベルで微小構造はできるものの、機能をもたせるこ

とは難しいとされてきた。

「分子の自己組織化でデバイスを創る」ことは、チャレンジな課題である⁹⁾。デバイス応用としては、

- 多数の分子が自分で配列して、ナノスケール構造を作る現象を利用する
- 1～数個の機能性分子をナノ構造の特定部位に配置するのに用いる

などのプロセスが考えられる。

一つ目の例として、有機分子の自己集合体によるナノチューブ構造が挙げられる¹⁰⁾。産総研では、分子設計によりナノチューブの径を制御することに成功している。これらのナノチューブを使って生体分子の分離などに向けた応用が研究されている。

二つ目のケースは、分子デバイスの作製方法の問題である。分子ワイヤ、カーボンナノチューブ、DNA、超分子などをどうやって電極の中に組み込んでいくのかが、大きな課題になっている。機能性の分子の場合、分子を望みのところへ持っていきただけでなく、方向を決めて固定しなければならない。そのためには、セルフアセンブル単分子膜(Self-Assembled Monolayer, SAM)の作製技術が利用できる¹¹⁾。SAMは基板を溶液に浸けるだけで基板表面に生成する一分子厚さの膜である(図6)。分子を付けたい表面に結合する部位を分子に持たせ、並びやすい分子の形をデザインして選ぶことで、SAMを作製することができる。この手法の特徴は、少ない設備投資でナノ構造が作製できる点である。半導体で原子スケールの膜厚制御をするためには、超高真空中で膜厚を計測しながら蒸着する大規模な装置(Molecular Beam Epitaxy, MBE)が使われるが、分子膜ならばビーカーの中で溶液に含まれる分子を工夫することで作ることができる。一個(あるいは数個)の分子を向きをそろえて基板上に配置することで、設計された分子をナノサイズの部品として利用で

* 静止衛星と地上を結ぶ約4万キロのエレベータができれば、それを足がかりに宇宙開発が進むと言われている。

図5 単層カーボンナノチューブ(CNT)のスーパーグロース技術によって作られたCNTが高密度で垂直に成長している構造
スーパーグロースにより、従来の500倍の長さ、従来の2000倍の超高純度を達成している。CNTはシリコン基板上に触媒をつけた部分からだけ垂直に成長している。一本の柱は、数億本のCNTからできている。

きる。基板全体を溶液に付けるのが難しい場合には、インクジェット法などを用いて必要な部分にのみ少量の溶液を供給すればよい。このような分子ナノ部品を使うと、トップダウンでナノサイズの構造を作製するよりも、構造と性能が均一な製品を低コストで実現できると考えられている。

2002年、コーネル大学のグループとハーバード大学のグループは、細い金属細線を電流によって破断してできるナノギャップを利用して、チオール基を両端に有する分子をナノスケールの金電極ギャップ間に導入し、二つの電極を一個（あるいは数個）の分子が橋渡しする構造を作って、単一電子トンネル現象などを観測した^{12),13)}。電流破断する前には、電子ビームリソグラフィーなどを使ってナノスケールの細線を作製している。一般に分子スケールの電極作製には、電子ビームリソグラフィーに加えて特殊技術が必要とするため、ナノ電極を使った分子デバイスの研究は限られたグループでしかできなかった。産総研では、大量作製が可能なプロセスを用いて作製する分子スケール電極を開発した¹⁴⁾。これは、電子ビームリソグラフィーを使わずに10 nm以下のギャップを有する電極を作製する手法で、いくつかの分子の測定を始め、センサー特性なども得られている(図7)。

2.6 ナノバイオ

一口にナノバイオといっても、さまざまな技術がある。ひとつには、ナノテクを使った生体物質の観察、計測がナノバイオと呼ばれている。たとえば、プローブを使って生体分子

を引っ張って変形させ、結合の選択性や強さを測定する研究がある。また、生体分子を使ってナノ構造を自己組織化的に作製する研究も行われている。しかしながら、ナノバイオによる構造生成は直接には製造まで結びついていない面もあり、図1にはナノバイオと明示していないが、製造技術への応用では自己組織化の一種と考えている。

さまざまな技術に共通する考え方として、ナノバイオの基本は分子の認識機能を利用している点である。よく鍵と鍵穴と喩えられるように、ある種の生体物質にだけ選択的に結合する分子の組み合わせがあり、その性質を利用して生体内部ではいろいろな機能を実現している。たとえば、生体物質であるDNAを使ってナノ構造を作ることができる。DNAは、4種類のベース(A, T, G, C)の配列で生物の遺伝情報を伝える分子メモリであり、ベースの並び方(シーケンス)でタンパク質の種類が決められる。現在の技術では、合成装置も用いて100ベースくらいのシーケンスを設計して人工的にDNAを合成することができる。DNAは、対応する2本のシングル鎖DNA(single stranded DNA, ss-DNA)がペアになって二重螺旋(double stranded DNA, ds-DNA)を形成する(ハイブリダイゼーション)。AとT, GとCが選択的に結合するので、あるベースの並びにそれぞれ結合する並びを持つss-DNAを相補鎖と呼ぶ。この選択性を利用して設計した自己組織化ナノ構造を作ることができる。金の表面に結合するように末端にイオウをつけたss-DNAで金表面をパターンニングし、その上に相補鎖をつけた金微粒子の溶液を導入すると、パターンにしたがって金微粒子が吸着する(図8)。複数のDNAの塩基配列をうまく設計して組み合わせると、さまざまな構造物を自己組織化で作ることができる。

ナノテクをバイオテクノロジーに応用するナノバイオの研究の中でも近い将来に実用化が期待されているのは、副作用のない抗癌剤を作る技術、体内薬物送達システム(ドラッグデリバリーシステム, Drug Delivery System, DDS)である。これは、分子薄膜でできたナノサイズの球体をカプセルのように使って内側に薬を入れ、外側には癌細胞など患部に特徴

図6 セルフアセンブル膜の作製プロセス

図7 分子デバイスへの展開

図8 DNAのハイブリダイゼーションによる金微粒子($\sim \phi$ 5 nm)の選択吸着

(a)一端をチオール化したss-DNAを基板上にパターンニングする。(b)同じくチオール化した相補鎖DNAを結合させた金微粒子を結合させる。(c)電子顕微鏡像。白い点は金微粒子。金微粒子は最初にパターンニングした部分に選択的に結合する。(d)パターンの境界部分(cの白い四角に相当)を拡大した原子間力顕微鏡像

的な組織に選択的に吸着するような構造を作り込んだものである。体内に投与されたカプセルは、患部に集中的に集まり、そこで内部の薬剤を放出する。こうして、健康な部位に作用して副作用を引き起こすことなく、患部にのみ薬剤を到達させる。DDSが実現されると、これまでに開発された薬の中で副作用が強くて使い難かったものが使いやすくなるので、創薬への研究投資を有効に活用することができる。また、ミニマル・マニファクチャリング的な視点から、DDSは材料(薬品)の効率的な利用により省資源と高機能を両立させる技術といえるのではないだろうか。

3. おわりに

産総研のナノテクノロジー・材料・製造分野の研究戦略では、製造業を革新するための技術開発が主要なターゲットであり、ナノテクはそのための重要な要素技術として位置付けている。製造産業では、高性能の製品を実現するために資源やエネルギーを浪費する技術は、見直されてきている。半導体デバイスやフラットパネルディスプレイなどの製造には、高密度と高性能を追求するために莫大な設備、資源、エネルギーが投入されているが、競争力を保持しつつ既存の製造手法を置き換える効率の良い製造技術を開発し、導入を進めることで持続的発展に寄与したいと考えている。これはナノテクの研究開発に限るものではなく、広い技術分野において、コストと機能と環境が相反しない技術の開発によって社会に貢献していくことが、産総研全体の戦略目標でもある。

(2005-9-8 受理)

文 献

- 1) 産総研第2期研究戦略は、下記 url よりダウンロードできる。
http://www.aist.go.jp/aist_j/information/strategy.html.
- 2) 阿多誠文, 根上友美編著; 未来社会への架け橋 ナノテクノロジー (日経 BP 社, 東京, 2005)
- 3) 水谷 亘; 図解入門よくわかるナノテクノロジーの基本と仕組み (秀和システム, 東京, 2005)
- 4) 村田和広; エレクトロニクス実装学会誌, 7, 487 (2004)
- 5) J. Akedo and M. Lebedev; *Jpn. J. Appl. Phys.* Part1, 41, 6980 (2002)
- 6) H. Nakamura, Y. Yamaguchi, M. Miyazaki, H. Maeda, M. Uehara and P. Mulvaney; *Chem. Commun.*, 2844 (2002)
- 7) H. Wang, H. Nakamura, M. Uehara, Y. Yamaguchi, M. Miyazaki and H. Maeda; *Advanced Functional Materials*, 15, 603 (2005)
- 8) K. Hata, D. N. Futaba, K. Mizuno, T. Namai, M. Yumura and S. Iijima; *Science*, 306, 1362 (2004)
- 9) 下村政嗣; 化学, 57, 17 (2002)
- 10) S. Kamiya, H. Minamikawa, J. H. Jung, B. Yang, M. Masuda and T. Shimizu; *Langmuir*, 21, 743 (2005)
- 11) 水谷 亘; *ESTRELA*, 12, 15 (2002)
- 12) J. Park, A. N. Pasupathy, J. I. Goldsmith, C. Chang, Y. Yaish, J. R. Petta, M. Rinkoski, J. P. Sethna, H. Abruña, P. L. McEuen and D. C. Ralph; *Nature*, 417, 722 (2002)
- 13) W. Liang, M. P. Shores, M. Bockrath, J. R. Long and H. Park; *Nature*, 417, 725 (2002)
- 14) Y. Naitoh, K. Tsukagoshi, K. Murata and W. Mizutani; *e-J. Surf. Sci. Nanotech*, 1, 41 (2003)