

豊田 信行  
TOYODA Nobuyuki

藤田 忍  
FUJITA Shinobu

黒部 篤  
KUROBE Atsushi

石川 正行  
ISHIKAWA Masayuki

多くの可能性を秘めたナノテクノロジー(以下、ナノテックと略記)について、その動向と将来展望を述べる。歴史と現状の解説に続き、いまだに混とんとしているナノテックの定義を、製法、寸法、材料の種類、形態について再考し、それを基に多種多様なナノテックを簡便に整理する。ナノテックの応用が期待される分野としては、エレクトロニクス分野だけでなく、バイオ応用、メカトロニクス、エネルギー・環境分野などが挙げられる。ここでは、当社が技術開発に携わっている応用領域を中心に紹介する。

Nanotechnology is expected to become a fundamental technology in the future. This paper describes the trends in nanotechnology and its future prospects. First, the history of nanotechnology is reviewed. Next, the definition of nanotechnology is reconsidered from the viewpoints of fabrication, size, materials, and morphology, leading to a simple classification of the wide range of varieties of nanotechnology. This is followed by the most important section of this paper, explaining the application of nanotechnology in the fields of electronics, bionics, mechatronics, energy, and environment. The emphasis in this section is on areas of application where Toshiba is making efforts to develop new technology.

### 再度注目を集めるナノテック

2000年1月に、米国のクリントン政権時代に掲げられたナノテック国家戦略により、にわかにナノテックが注目されるようになり、日本でも科学技術政策の重点項目となった。しかし、表1の年表に示すように、ナノテックはかなり古くから存在する概念であり、研究の歴史も比較的長い。

当社では、今回のブームの前からナノテックに関連した技術の研究を行っており、本誌1999年2月号で、「ナノ領域の先端研究」というナノテックの特集を組み、先端研究を中心とした探

索型の研究・開発成果を紹介した。この特集では、ナノテックに関する最近の研究活動を紹介する。

### ナノテックの“再定義”

ナノテックは、製法、寸法、材料の種類、形態の四つが絡んだ極めて多種多様な組合せがあり、それぞれに様々な機能を持つ。そのため、しばしば議論が混乱し、ナノテックの全体像が見えてこない。企業として選択と集中を意図した研究戦略を練るうえでもナノテックをどうとらえるかが重要であり、原点に立ち戻ってナノテックの

再定義を行った。

### 製法

ナノテックを製法と寸法で整理した概観を図1に示す。ナノテックは、これまで大きなものを削って小さくしていく“Sculpture方式”と呼ばれる製法で進められてきた。バルク状の材料を作り、リソグラフィー技術とエッチング技術の組合せで、小さくしていく加工方式である。これらは、半導体デバイスをはじめ、磁気記録デバイスや、液晶ディスプレイ用の薄膜トランジスタなどの作製にも利用されている。しかし、このリソグラフィー技術には、いずれ加工寸法に限界がくると言われている。既に70nmまでは、商用向けに利用可能になっているが、この延長で50nm以下の構造を大量生産するのは、かなり難しいとされている。

これよりもサイズが小さいナノテック領域では、小さいものを積み上げていく“Build-up方式”と呼ばれる製法が必要であると言われている。この方式を実現する手法の有力候補が、

表1. ナノテクノロジーの歴史  
History of nanotechnology

| 年             | 内容  |
|---------------|---|
| 1959年         | 米国ファインマン氏、未来のナノテクノロジーの可能性を講演                                    |
| 62年           | 久保亮五氏、ナノテクノロジーの将来性を予言   |
| 86年           | 米国ドレクスラー氏、著作「Engines of Creation」でナノマシンを説く                      |
| 80年代後半～90年代前半 | トンネル顕微鏡、フラージェン、カーボンナノチューブ、原子操作技術など、ナノテクノロジー基盤技術の重要な発明・発見続く      |
| 2000年         | 米国クリントン政権、National Nanotechnology Initiativeに基づき、ナノテクノロジー重点化を宣言 |
| 01年           | 日本政府、科学技術政策でナノテクノロジーを重点化  |

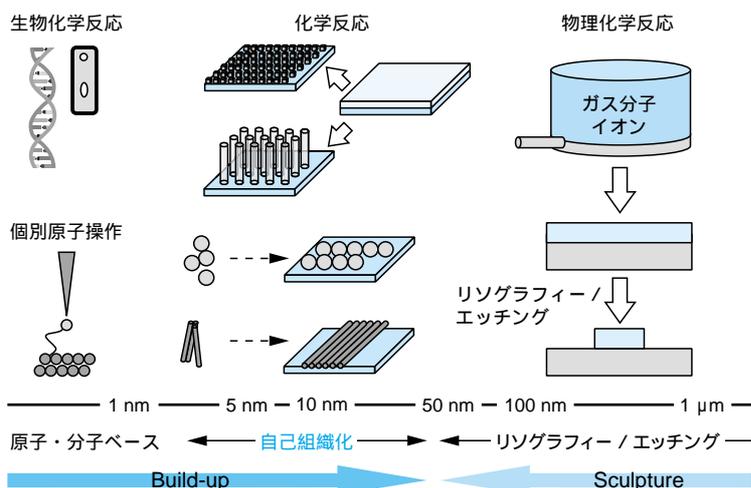


図1 . ナノテクノロジーの製法と加工寸法 今後は、従来型のSculpture方式からBuild-up方式に変わってくる。この先10年では、10～50nmの領域が重要である。  
Nanotechnology fabrication methods and processing sizes

化学反応で自然にナノスケールの構造が形成される“自己組織化反応”である。

■ 寸法

ナノテクは、ナノスケールの大きさの材料に基づく技術である。ナノスケールと言っても、原子・分子の大きさから1 μmに近いところまで様々である。寸法に関しておおむね次の三つで区分けして考えられる場合が多い。

- (1) 原子・分子や小型のクラスターといった“シングルナノメートル” (以下、シングルナノと略記)のサイズの領域
- (2) Sculpture型加工技術では製作が相当に困難な、おおむね50 nmよりも小さい領域
- (3) もう少し広く100 nm以下のサイズも含むもので、いわゆる“デカナノ”の領域

エレクトロニクス分野では、既にデカナノ領域の技術が商用化されつつある。世の中でナノテクの具体例とされるものを概観すると、50 nm以下の領域(1)と(2)を指すことが多いようである。そして、特に材料の性質に著しい変化をもたらすとされる10 nm以下のシングルナノの領域と、10～50

nmの領域は、応用を考えるうえでは分けて考えたほうがよい。前者は、10～20年という長期的スケールで取り組むべき領域である。後者は、10年以内には確実に“リアルな技術”として使われるようになるからである。

次章でも述べるように、多くの材料について、10～50 nmでは、材料自身の性質は変わらないが、体積密度や表面積の増大が、著しい性能向上

をもたらす。10 nm以下では、金属、絶縁体、半導体という境目が極めておぼろげになり、同じ材料でもわずかな構造の違いや、表面の性質の違いで電気伝導の性質ががりと変わる。そのために、材料の違いで分類することがあまり意味をなさなくなる。

■ 形態

形態を分類する方法は、何通りかある。もっともよく目にするのが、ナノ材料が形成する形態として、粒子状(0次元)、ワイヤー状(一次元)、平面状(二次元)、立体状(三次元)という切り口であるが、実際に応用を考えると、このような単純な形態で使われる場面はほとんどない。ナノテクを形態面で体系的に理解する便宜的な分類方法を図2に示す。この方法だと、ナノテクの技術トレンドを世代順にとらえていける。材料の寸法を3軸方向で見て、その一方向だけがナノスケール(おおむね50 nm以下)に加工され制御されるものを、便宜的に“一次元的構造”と呼ぶことにする。そうすると一次元的構造には、電極細線や、超薄膜が含まれる。これらは、現在エレクトロニクス市場で、コア技術と

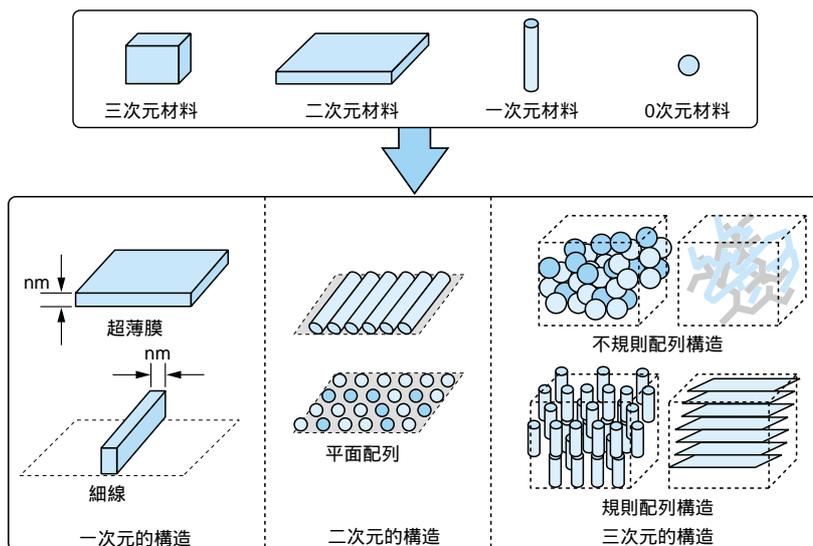


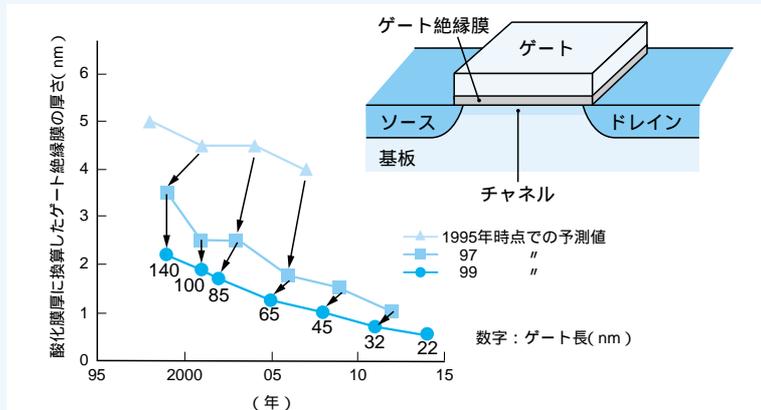
図2 . ナノ構造の形態による分類 各材料を一次元的、二次元的、三次元的に配列することで、機能を持つ構造を作り出す。技術は左から右にシフトしていく。  
Classification of nanotechnology by morphology

## シリコンナノテクノロジーのトレンド

LSIの集積度はまさに指数関数的に増大し、チップ当たりの素子数は、1960年から2000年の過去40年の間に、実に9けた近くもの伸びを示した。これを支えたのは、よく知られたMOSトランジスタの比例縮小則であるが、既にゲート長は量産レベルで100nmを切り、ゲート酸化膜厚は2nmに到達している。まさに、膜厚(縦方向)だけでなく横方向もナノの世界に突入している。

LSIの世界では技術ロードマップが策定されて微細化の指標として位置づけられているが、特に90年代後半からは各社の競争が激化し、微細化のトレンドが予想を上回って加速されている。図は、ゲート酸化膜厚予測を過去の技術ロードマップから引用してプロットしたものである。微細化の前倒しが顕著に読み取れる。

2005年にゲート酸化膜厚は1.5nm以下になると予想されている。これは酸化膜が、5~6原子層並んだ厚さに当たり、もはや絶縁体とは言えなくなる。ゲート漏れ電流を十分に抑えるには、誘電率がより高い絶縁体で酸



ゲート酸化膜厚予測 微細化のトレンドが予測値を上まわる。

化膜を代替し、物理膜厚を厚くしつつ電気的な膜厚を薄くする必要が生じる。

しかしながら、酸化膜のようにシリコンとの界面の相性が良く、しかも高温のLSI作製プロセスに耐えられる高誘電体材料は、いまだに確立していない。集積化シリコン素子が40年以上にわたって信頼し利用してきた酸化膜からの決別は容易ではない。原子オーダーで新材料を制御するナノテクが急務になっている。

更に微細化が推し進められて、ゲート長が30nm程度を切るようになると、従来のプラナーMOS構造に限界が訪れると考えられている。ゲートによる伝導チャンネルの支配力が低下してしまうためである。表側ゲートだけでなく裏側ゲートを作り込むなどのナノオーダーでの立体的な構造が不可欠になるであろう。物理現象の把握と複雑なナノ構造を作成する技術としてのナノテクの進展が期待される。

して顕在しているものである。例えば、電極細線は、MOS(Metal Oxide Semiconductor)トランジスタや高周波デバイスに100nmクラスの細線が使われ、その寸法は年々縮小されている(囲み記事参照)。また、超薄膜はMOSトランジスタのゲート酸化膜、高周波化合物半導体トランジスタや半導体レーザの超格子、ハードディスク用GMR(Giant Magneto-Resistance)ヘッドの磁性多層膜などがそれである。薄膜の厚さは、シングルナノであり、ものによっては1nmよりも薄い。これらは、いずれも現在当社のコア技術となっている。これらに加えて、新しい不揮発メモリとして期待されるMRAM(Magnetic RAM)に使われるトンネル磁気抵抗多層膜もシ

ングルナノの超薄膜であり、当社で開発進行中である。今後も多層薄膜は重要な技術であり続ける。

一次元構造の定義に習い、2軸方向でナノスケール制御する場合を、“二次元的構造”と呼び、3軸方向の場合を“三次元的構造”と呼ぶことにする。二次元的構造は、二次元の位置制御、若しくは配列制御を意味する。そして、一次元的ナノ構造の次にくる世代は、この二次元的ナノ構造である。具体的な例としては、カーボン系材料や、ポーラスアルミナなどの自己組織化がある。また、二次元配列制御の例としては、磁気記録媒体がその典型として挙げられる。

最後に、三次元的構造、つまり立体構造の制御が必要となる。ここまで

くと、ナノマシンの原型のような複合型機能を持つものも作製可能になってくる。三次元的構造でも、配列が不規則な構造のものは、より早い時期に使われるであろう。例えば、バッテリーの電極、ナノ構造フィルタ、ナノ構造触媒が、それに相当する。二次元の不規則構造はそれより早い時期に使われるであろう。

### ■ 材料の種類

材料の種類別の分類は、電気伝導の性質として、金属、半導体、絶縁体という分類と、無機物、有機物、フラーレンなどの炭素材料という分類のマトリックスとして考えるとわかりやすい。また、複数の材料が組み合わせられたナノ複合材料や、生体細胞を

構成する生体高分子を材料として利用することも考えられている。

### ナノテクに期待される効果

ナノテクに期待される効果を図3に示す。もっとも単純で、かつ重要な効果は、“単純な小型化”である。エレクトロニクス分野は、軽薄短小で進んでおり、IT(情報技術)市場の拡大に伴い、デバイス、部品の小型化が加速化されている。部品を構成するユニット材料の大きさも、ますます小型になり、ナノテクの領域に入ってくる。

二つ目は、材料の大きさが小さくなることのPassiveな効果である。単位面積あたりに含まれるナノ材料の数や、単位体積当たりのナノ材料の表面積が“サイズの2乗に反比例する”形で急激に増大する。数の効果はメモリやデータストレージの分野において極めて有効である。一方、表面積の効果は化学触媒や、バッテリーの電極など、材料の表面化学反応を利用する分野で著しい効能を導く。

三つ目の効果は、材料が持っている様々な物理的性質自身が、サイズの縮小とともに大きく変わってくるActive

な効果である。これが一番劇的な変化をもたらす効果である。例えば、絶縁体が数nm以下になると、トンネル現象で電子が透過して電流が流れることは古くから知られている。また、本来発光しない半導体であるシリコンは、約5nm以下の微粒子にすると、発光しやすい性質を持つことも知られている。このような著しい材料の変化は、寸法が10nm以下の領域で主に見られる。この領域では、材料の内部で、粒子的な励起状態が顕著となり、物質の性質を決める。同時に、このサイズ領域では、材料表面の特性が材料自体の性質を決めてしまうことがしばしば起きる。つまり、ナノ材料は“表面の塊”なのである。

また、シングルナノになると、どんな物理現象が起きるのか、現状では予言できないもののほうが多い。何しろこの現象は、“異常現象”であって、理論などで説明がつかないものが大半であろう。極論すると、あらゆる物質の性質は、ナノの世界で“異常”な性質を示すと言っても過言でない。そう考えると、異常現象が見つかった材料は、半導体や磁性金属など、制御技術が進んだ一部の材料に限ら

れており、大半はまだ見つかっていない。この異常現象が、しばしば学会や専門誌のうえでトピックスとして取りざたされるのである。

### 応用分野の動向と展望

続いて、ナノテクの応用分野別に、動向と展望を概説する。ここからは具体的な応用イメージを重視する。図4に各応用分野に属する部品や技術が実現可能と判断できる時期を予想してまとめた。この展望図に従って各分野ごとに触れる。

### 半導体デバイス

メモリやプロセッサは、シリコンLSI技術の進化によって、小型・集積化が進んできた。詳細は囲み記事で紹介しているが、シリコン技術のロードマップは、前倒しで達成され続けている。米国インテル社からは、ゲート長20nmのCMOS(Complementary MOS)試作も発表されている。MOSトランジスタは、Sculpture方式のナノテクを突き進んでいる。

これに対して、Build-up方式の典型として、シングルナノの大きさのシリコン微粒子を使った単一電子素子の研究も、広く行われている。単一電子素子は、その名のとおりに究極の低消費電力駆動が大きな利点である。

また、化合物半導体の量子ドットも古くから研究されている。これは、主に光子子に利用される。

### ストレージデバイス

商品化されているハードディスクの記録密度は、現在1インチ四方に20~30Gビット(20~30Gbps)という高密度となっており、年率2倍で増加する傾向が続いている。これまで、磁気ストレージは、シリコンテクノロジーの技術を転用する形で、技術開発が進んできた。しかし、このままいくと、磁気ストレージの微細化ロードマップは、4,5年後にシリコンテクノロジー

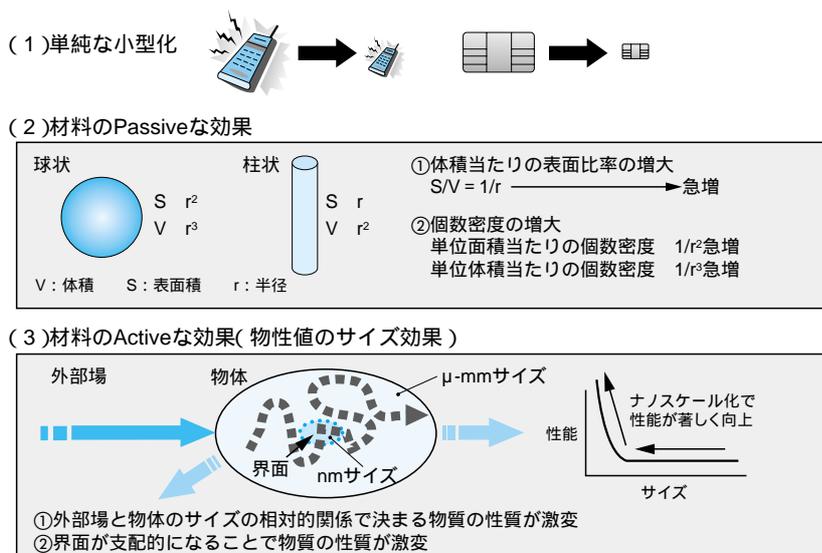


図3 . ナノテクに期待される効果    大きく三つの効果が期待される。(3)のActiveな効果をもっとも劇的な変化をもたらす。  
 Expected effects of nanotechnology

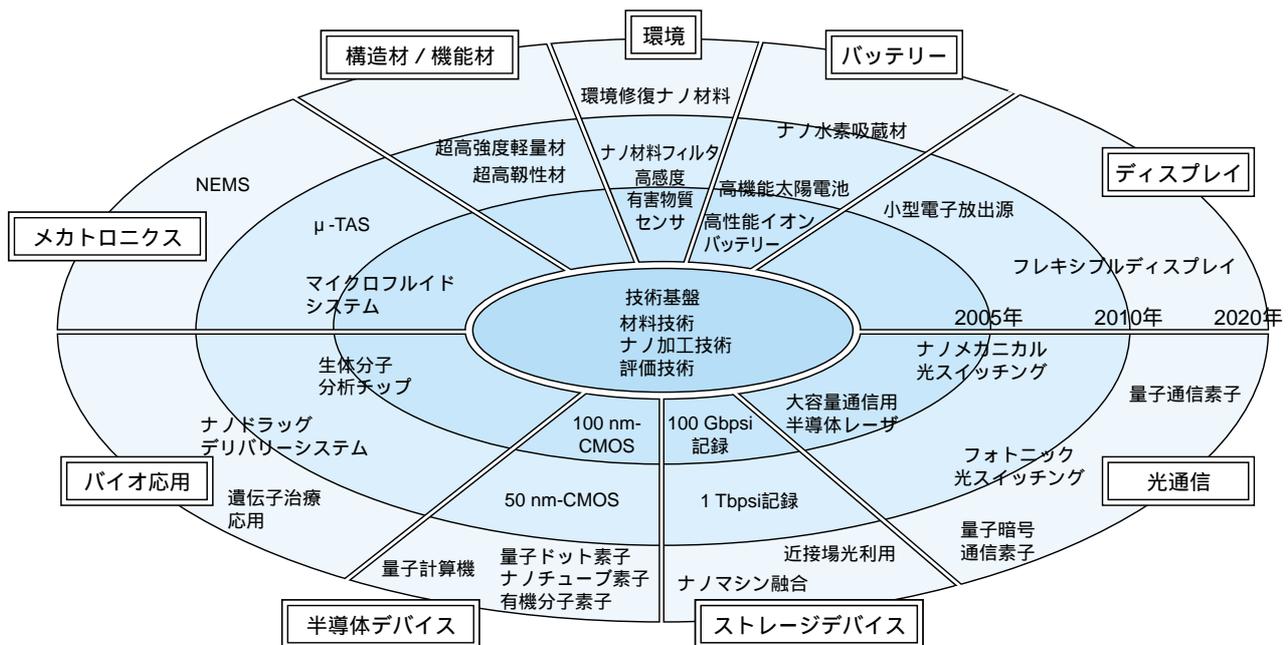


図4 . ナノテク応用分野のトレンド 半導体デバイスからバッテリーまでがエレクトロニクス分野，バイオ応用とメカトロニクスは融合分野，環境分野は新分野である。

Trends in application of nanotechnology

のロードマップを逆転してしまう。したがって、独自に微細加工技術の開発が必要となり、現在も様々な方法で検討が進められている。

これに伴い、今後1T(テラ:  $10^{12}$ ) bpsi という高密度記録を実現することが期待されており、そのためにはおよそ10 nm 四方に1ビットを記録する技術が必要となる。そのために、自己組織化反応を利用した加工技術がキーポイントと考えられる。米国IBM社などが、磁性体微粒子と有機物の相互作用による自己組織化反応で二次元配列させ、Tビット媒体のプロトタイプを作製しているが、実用化にはまだまだ課題が多い。当社では、独自の自己組織化を利用して、Tビット級磁気媒体作製技術を開発している。

また、光ディスクの技術に関しても、記録密度の向上に伴い、ナノテクがかかわってくる。光の波長は通常数百nmのオーダーとなり、この波長よりも小さい領域に光を使って記録することは原理的に困難である。しかし、近接場光という特殊な光を利用すると、ナノテクの領域で記録可能で

あることも確認されている。

シリコンと磁気ストレージの二つは、加工技術のロードマップが既に決まっており、それらを達成するためのナノテクであり、“ロードマップナノテク”とでも呼ぶべきものであろう。エレクトロニクス部品の小型化のトレンドは、今後も継続すると予想されるが、この先二つの重大な問題が生じてくる。一つは、前述の“微細加工技術の限界”であり、もう一つは“正常動作の限界”，つまり小型化していくと、物理的・化学的要因で部品が異常な動作を起こすようになってくるのである。これを克服することが必要になってくる。

当社では、半導体デバイスとデータストレージの両分野で、正常動作の限界を打ち破る技術開発に挑んでいる。

#### ■ 光通信・ネットワーク

通信インフラの大規模容量化が進んでいる。これまでは、光ファイバ通信の波長多重化と、スイッチング機器の大規模な並列化によって、通信容量と速度を上げてきた。しかし、近い

将来基幹系通信網が1Tビット/sを超えるようになると、光を光のままルーティングする光ルータなど通信デバイスの置替えが必要になってくる。光ルータを実現するために、後述するナノスケールのマイクロマシン(NEMS: Nano-Electro Mechanical Systems)による光スイッチや、フォトニクス結晶などのナノテクにかかわる要素技術が必要となる。

大規模光通信の半導体レーザーには、ナノテクの代表格の一つである半導体超格子が活用されている。レーザーを更に小型・集積化するために、垂直方向に発光する面発光レーザーが有望視されており、当社ではその実現に向け開発を進めている。

更に、未来のセキュリティ光通信として、量子暗号通信技術が期待されている。当社では、半導体量子ドットを用いた量子暗号通信デバイスを研究中である。

#### ■ ディスプレイ

ディスプレイを構成する画素自体は、 $\mu\text{m}$ オーダーの技術が主である。

しかし、ディスプレイの薄型化が進むなか、画素内部のキーとなる要素部品には、ナノテクが使われるようになってくる。薄型の平面ディスプレイは、多種多様なものが提案されている。当社は高輝度・省電力の電子放出型ディスプレイを開発中であるが、この中にも様々なナノスケールの要素技術が含まれている。世の中では、真空中に電子を放出する冷陰極電子源としてカーボンナノチューブを用いる構造も研究されている。一方、有機EL (ElectroLuminescence) などのフレキシブルなフィルム型ディスプレイもいくつかのタイプが研究されているが、EL材料の設計や発光素子形成プロセスなどでナノテクが成否の鍵(かぎ)を握ると予想している。

#### ■ バッテリー

この分野も、携帯電話や小型パソコンなどのモバイル機器普及に伴い、小型・軽量、長寿命、高容量化の要求が著しい。代表的な小型二次電池では、エネルギー体積密度向上の鍵を電極が握っている。イオンを捕獲する電極の表面積が広がるほどエネルギー体積密度が上がるので、先に述べたナノ材料の表面積増大効果が有効となる分野である。

しかし、単に構成電極のサイズを小さくするだけで、エネルギー密度が向上するような単純な技術ではなく、電極を構成する材料の選択や材料の複合化、更に電極のマクロな構造自身も重要である。

また、チタニア( $\text{TiO}_2$ )微粒子を用いた色素増感型透明太陽電池などでも、ナノ微粒子の表面積増大効果が有効になる分野である。当社では、ナノ微粒子の新たな形成技術を含めた電池電極技術の開発に努めている。

バッテリーは、原子サイズであるイオンの伝導を制御する技術なので、性能を追求し続けると、電極やイオン伝導媒体には、最終的に原子サイズの構造制御が求められることになっ

ていくだろう。

以上は、エレクトロニクス分野にかかわるナノテクである。ナノテクのインパクトは、エレクトロニクス分野にとどまらず、これと別の領域が融合した新しい分野にも注目すべきである。以下にそれらの融合分野や新分野について述べる。

#### ■ ナノメカトロニクス

“ナノマシン”は、様々なナノテクのインテグレーションの結果生まれる夢の機械である。具体的なイメージとして、映画“ミクロの決死圏”が引合いに出される。そういった未来の世界以前に、ナノスケールのエレクトロニクスデバイスに運動するという機能を付加することが非常に重要になる。例えば、ハードディスクの磁気ヘッドを制御するデバイスを連想するとわかりやすい。また、近未来の光通信分野では、ルータ装置の内部にナノスケール駆動のマイクロマシン(NEMS)が使われる可能性も示唆されている。

更に、エレクトロニクス分野だけでなく、化学工業や創薬の分野でも、微量な流体の動きを制御し、同時に極微量な化学反応をセンシングするようなマイクロシステム( $\mu$ -TAS:  $\mu$ -Total Analysis System)への応用も重要視されており、当社ではそのシステムに向けた要素技術開発に取り組んでいる。

これらは寸法的には、サブ $\mu\text{m}$ の領域に入るものが多いが、複合化されたデバイスでは、 $\mu\text{m}$ 、サブ $\mu\text{m}$ 、デカナノをそれぞれつなぐためのメカトロニクスが重要なのである。

#### ■ バイオ応用

もう一つの期待が大きい分野は、バイオテクノロジーとの融合領域である。この中身には、① 生体分子の分子レベルの構造解析技術基本、② ナノ材料を使って特定の病理箇所に投薬するナンドラッグデリバリーシステ

ム、③ ナノ材料を使った遺伝子治療技術、などが考えられている。①の生体分子は、主にDNA(デオキシリボ核酸)をはじめ、生体機能に重要なタンパク質や酵素などを対象とするので、シングルナノの技術が必要である。①～③のいずれもライフサイエンスの上でインパクトが大きい技術である。

更には、生体分子と大きさが同程度であり、生体と特定の化学反応を起こす(又は、起こさない)ようなナノ材料が開発されれば、生体分子と同様の機能を持つものを人工的に作り出せる可能性もある。また、こういった材料は、当然ながらケミカル製品の分野にも利用できる。これ以外にも、ナノスケールの材料はバイオ領域で様々な可能性を秘めていると言える。

#### ■ 環境・エネルギー分野

ナノ材料が持つ優れた表面活性を利用して、環境修復技術につなげようとする試みがなされている。ナノ材料の表面に有害物質を吸着させるといふものである。例えば、カーボンナノチューブへのダイオキシンの吸着などである。また、同様の性質を利用して、カーボンナノチューブなどのナノ材料に水素を貯蔵させ、エネルギー源に利用しようという試みもある。

これらの応用技術を実現するには、単なる表面吸着ではなく、特定の化学物質を選択的に吸着させる必要があるうえ、必要に応じて脱離も起こしてくれる材料技術開発が必要となる。

#### ■ ナノ材料・基盤技術

これまで述べた応用分野に適用するためには、ナノ加工、ナノ材料、ナノ分析の三つの基盤技術開拓が必要となる。次にそれらを解説する。

##### ・自己組織化ポリマー材料

前述したとおり、二次元の自己組織化反応の利用が必要とされる。有機物ポリマーの自己組織化反応が、様々なナノスケールの構造を作る方

法として期待される。無機物は結晶を構成する単位が原子若しくは分子量の小さい分子であり、かつ分子間の相互作用が小さくかつ等方的であるため、分子量がある程度大きなものをBuild-up的に作るには不向きなのである。

一方、有機分子は、分子量が小さいものから大きいものを選択でき、かつ、相互作用の強い・弱いも選択できるうえ、特定の化学反応を利用して構造形成することが可能である。もちろん、バリエーションが豊富であることは、有用な組合せを探すことが難しいということの意味しており、発見型の研究が重要性を増す領域である。

当社では、ブロックポリマーのミクロ相分離を利用し、自在なナノ構造を得る技術を開発している。この技術は、先に挙げたTピット級記録媒体への応用などが期待される。このような規則構造体は、ナノテンプレートと呼ばれるもので、記録媒体以外にも新しい応用を可能とする。また、大がかりな製造装置が不要な低コストプロセスとしても注目される。

#### ・ナノ微粒子材料

ナノ材料に期待される効果で述べたように、材料をナノサイズにすると材料物性が著しく変化する。物性のサイズ効果と、“表面”若しくは“界面”の面積が大きくなる効果である。これを顕著に現すのが、ナノ微粒子である。ほとんどすべての材料について微粒子を作製しうる。

触媒や、バッテリーの電極、フィルタ材料、蛍光体材料の効率を著しく高める効果が期待される。また、先に述べたストレージ用磁気媒体に磁気微粒子が利用される可能性もある。ナノ微粒子では、表面が著しく活性であり、容易に凝集してしまう。よって、微粒子を作り出す際に、表面を不活性化するなどの技術が必要となる。

#### ・評価技術

ナノテクに必要な評価技術と言え

ば、直ぐに走査型トンネル顕微鏡や、原子間力顕微鏡、電子顕微鏡などを連想するが、これら原子オーダーの分解能を持つ構造評価技術は、極限られた一部のケースにしか適用できない。特に、走査型トンネル顕微鏡は一般の応用技術には現在適用不可能である。透過型電子顕微鏡で、原子像を見たり、シングルナノの寸法を測定したりするためには、特殊なサンプル加工技術を要するので、特定箇所を見ることすら困難である。

例えば、磁性粒子若しくは磁性体のドメインが数十nm以下になると、その磁区構造を読み取る手段がなくなる(従来は磁気力顕微鏡と呼ばれる装置で観察した)。当社は、1nmオーダーの分解能で、磁区構造を観察できる、スピン走査トンネル顕微鏡を独自に開発している。

このように、先に述べた応用分野を実現するには、汎用型の評価技術を駆使するだけではなく、各応用に適したカスタムな評価技術が必要となる。

## ■ ナノテクへの期待

ナノテクは夢の技術で、新しい市場・製品を生み出してくれるという期待が高い。株式市場には、“ナノテク株”なる銘柄まで登場している。しかし、現段階は、炭素系材料などの素材に関連する企業が中心である。いわばナノテクの第一次産業である。事実、こうした産業分野で新しい技術・製品が生まれている。こうした素材の革新が、エレクトロニクス分野などの第二次産業分野に波及してナノテクを活用した、新たな機能・性能を持つ製品が多方面で生まれることが期待される。第二次産業成熟の暁には、様々なヒューマンサービスが第三次産業として登場することになり、人類に真の豊かさを与えるであろう。

この稿に続いて、当社のナノテク研究の代表事例を、エレクトロニクス分野から四つ、先端評価技術から一つ、

メカトロニクス融合分野とバイオ融合分野から一つずつ紹介する。いずれも業界トップクラスの技術と専門家から高い評価を受けている。ほかに、ディスプレイ、環境応用、微粒子、量子計算機などの分野でもナノテク関連の研究を行っている。今後も新たな技術の芽が生まれてくると思われる。その多くが当社の将来の差異化技術になっていくと期待される。



豊田 信行

TOYODA Nobuyuki, D.Eng.

研究開発センター 研究企画室理事, 工博。  
材料デバイス, 機械システム分野の研究企画に従事。電子情報通信学会会員。  
Corporate Research & Development Center



藤田 忍

FUJITA Shinobu, D.Eng.

研究開発センター LSI基盤技術ラボラトリー主任研究員, 工博。  
システムLSI用半導体ナノデバイスの研究・開発に従事。応用物理学会会員。  
Advanced LSI Technology Lab.



黒部 篤

KUROBE Atsushi, D.Sci.

研究開発センター LSI基盤技術ラボラトリー及び個別半導体基盤技術ラボラトリー室長, 理博。  
低次元系の半導体電子デバイス・光デバイスの研究に従事。日本物理学会, 応用物理学会, 英国物理学会, 米国光学会, IEEE会員。  
Advanced LSI Technology Lab., and Advanced Discrete Semiconductor Technology Lab.



石川 正行

ISHIKAWA Masayuki

研究開発センター 研究開発室参事。  
光半導体デバイスなどの材料デバイスの研究・開発に従事。応用物理学会, 電子情報通信学会会員。  
Corporate Research & Development Center