

ナノメートルの世界

日本科学未来館 湯沢哲朗

1. はじめに

今やほとんどの人が持っている携帯電話。ひと昔前のコンピュータにも匹敵するほどの性能をもち、機能もとても豊富です。メールを送ったり、インターネットに接続ができたり、音楽が聴けたり、写真が撮れたり、スケジュール管理ができたりと、個人にとって手軽に使える大変便利なツールです。しかも中身はどうなっているのか、どんな仕組みで機能しているのかなど知らなくても、自由自在に使いこなすことができます。このようにコンパクトなサイズに豊富な機能を詰め込めるようになった背景には科学技術の発展があるのです。

日本科学未来館には「技術革新と未来」という展示エリアがあります。ここでは、「ロボット」「マイクロマシン」「ナノテクノロジー」「超伝導」など、私たちの生活を変えていく可能性がある科学技術が紹介されています。今回はこの中で「ナノテクノロジー」に注目します。これは、携帯電話のようなエレクトロニクス技術を進歩させ、さらには原子や分子を操作することによって今までに存在しなかった新たな物質を作り出す可能性をもつ21世紀を支える科学技術です。

この技術によって、私たちの暮らしは、より豊かに、より便利に、そしてより環境に優しいものになります。例えば、トランジスタやレーザーの性能が飛躍的に高まり、情報や通信分野で急速に変化が



写真1 日本科学未来館3階常設展示テーマ「技術革新と未来」にあるナノテクノロジー展示

生じています。さらに、原子や分子の集団を基本構造とする材料の開発も盛んになっています。光通信システムの中核となっているレーザー光や、次世代照明として期待されている発光ダイオード(LED)の光には、従来の電灯には無い素晴らしい性質があります。また、遺伝子をはじめ私たちの体も分子の構造が基本となって様々な機能が実現されているので、ナノテクノロジーに基づく新しい医療の開発が期待されています。

2. ナノメートルの世界をみる

物質をどんどん細分化していくとどうなるのでしょうか。細分化しても大きさが変わるだけで性質は同じという段階を経た先は、物質を構成する分子や原子が要素として現れてきます。さらに、原子はもっと小さな素粒子から成り立っていることがわかっていますが、ナノテクノロジーではせいぜい分子・原子のサイズまでの世界を扱います。

メートルの単位でいうと、分子や原子のサイズはだいたい「ナノメートル」になります。ナノメートルはnmと記述します。nは「ナノ」と読み、10億分の1を意味する接頭語です。つまり1nmは10億分の1メートルを意味します。こんなに小さなものを肉眼で観察することはできないので想像することすら困難ですが、そのサイズで起きている現象を調べている研究者が大勢います。極小スケールのナノメートルの世界の科学を探究したり、物質の構造を制御したりするのが、ナノ科学(ナノサイエンス)・ナノ技術(ナノテクノロジー)と呼ばれる科学技術です。

微小な世界を観察するための一般的な道具としては光学顕微鏡が思い浮かぶと思いますが、光学顕微鏡には光の回折現象に起因する限界があります。それは、光の波長程度の大きさに像がぼやけてしまうため、解像度に原理的な限界があるということです。そこで電子顕微鏡が昔から使用されてきました。なぜなら電子顕微鏡に使われる電子線は、光に比べて波長が短いため、可視光を使うよりも詳細な観測ができるのです。しかしナノテクノロジーを

発展させたという観点からすると、走査プローブ顕微鏡という顕微鏡が開発されたことがとても重要なことです。観察するだけでなく、操作するためのツールとなりえるからです。

走査プローブ顕微鏡とはどんな道具なのでしょう？ 先端が非常に鋭い探針を試料に近づけると、探針と試料との間でさまざまな物理的相互作用があらわれます。原子間にはたらく引力や斥力、近づけたことにより流れるトンネル電流、磁気的な力、探針と試料との間の摩擦力などです。そこで、試料の表面を探針で走査し、これらの相互作用の力を測定することにより、原子スケールで試料表面の立体情報を得ることができるのです。この原理は、手で表面を触ると凸凹がわかるのと同じといってもよいでしょう。さらに、この走査プローブ顕微鏡を使うと、この大変小さい探針と表面の原子との相互作用を利用して、原子をひとつひとつ操作できることが報告されました。この手法を使ってひとつひとつ原子をならべることによって「IBM」という文字を書いた最初の研究は大変な驚きを与えました。分子や原子を操作・制御できること、このことがポイントです。

現在研究が進んでいるナノテクノロジーの多くは、今後様々な分野に活かされる未来の技術として注目されていますが、エレクトロニクス分野ではナノテクノロジーの成果がすでに活用されています。トランジスタなど電子素子は、微細化、高集積化、高速化を目指して開発が進んできました。微細化という観点では、半導体の線幅はすでに100nm以下の領域で開発が進んでいます。また、高速化を示すCPUクロック数は、この30年間に数千倍にも上昇しています。このような進歩は、まさにナノテクノロジーがもたらしたものです。最初に述べた携帯電話などはこのような集積化が可能としています。

しかしながら、微細化だけが目標ではありません。ナノテクノロジーの分野では、その技術がもたらす革新的な醍醐味があるから大きな期待が寄せられているのです。ではどんなところが革新的なのでしょう。

3. ナノメートルがもたらす効果

ナノメートルサイズの構造体は、大きなスケールのたくさんの集合体としての状態と比較してまったく異なる性質を示します。同じ材料でも、サイズ

が変わることによって新しい性質を現すのです。例えば、金をナノメートルサイズの粒子にして溶液に分散した状態では、金色ではなく赤色になります。ニュートン力学では記述できないこのようなナノメートルサイズの現象を記述するのは量子力学です。

通常のエレクトロニクスでは粒子として捉えられる電子ですが、10ナノメートルより小さいナノ空間に入ると、波としての性質が見えてきます。電子は見方によって粒子性と波動性という2つの顔を持ち、ナノメートルサイズの世界においては波として考えた方が理解しやすい現象が現れてくるのです。この性質は、光の場合にも、実は波としての性質と粒子としての性質を併せ持ち、私たちの見方によって粒子性と波動性とが現れるのと同じです。物質のもつ本質的な性質です。そのような電子を膜状、線状、箱状のナノメートルサイズの空間に閉じこめると独特の性質を示します。薄く膜状になったナノ空間に閉じこめられると電子は2次元的にしか自由度がなくなり、量子効果を示します。この膜は量子薄膜とも呼ばれます。また1次元的に線状になったものは、量子細線と呼ばれます。さらに量子細線の線方向も狭めていき粒状になると電子はどの方向に対しても閉じこめられた状態となります。これは量子ドットと呼ばれ、電子にとっては0次元の世界です。

電子をいろいろなナノ空間に閉じ込めると書きましたが、外に抜け出てしまう性質があります。電子が波として振る舞うために生じるこのような不思議な現象「量子効果」を利用して、新しいタイプのセンサやレーザー、メモリや磁気記録用読み出しヘッドなどが開発されています。たった1個の電子の出し入れで、スイッチやメモリ機能などをもつ単一電子



写真2 模型を使って「量子効果」を示す日本科学未来館の展示



写真3 日本科学未来館「光技術とナノテクノロジー」展示

素子など将来の電子素子も研究開発されています。このように、単なる微細加工にはとどまらず、新規な性質や現象を生み出す可能性があることが、ナノ科学・ナノ技術が大きく取り上げられている理由なのです。

従来の光技術では、「回折現象」によって光の波長以下の分解能で像を見たりすることは不可能とされていたと上述しました。しかし、ナノテクノロジーによって実現した新しい光である「近接場光」によって、回折限界を超えて波長以下の分解能で像を見たり加工をしたりすることが可能となってきたのです。通常、レンズを用いたりしても波長以下のサイズにまで光を集光することができないのは回折限界によるものです。一方、光の波長よりもずっと小さい直径の粒子に光を当てた場合、その粒子の周辺で局在した電磁場が発生します。これを近接場光と呼んでいます。この近接場光は粒子の周辺にのみ存在する光で、粒子のサイズのみで大きさが決まるため、粒子のサイズを小さくすれば波長以下のサイズの光を作り出すことができるのです。小さな穴を用意してそこから染みだす光とも考えられます。ただし、遠方にまで伝搬はしない光であるため、観察したり利用したりするために様々な研究や開発がされています。近接場光の分野では、ナノメートルサイズでの観察手段やナノメートルサイズでの微細加工への利用のみならず、近接場光の性質を動作原理とした新規な光デバイスの研究・開発が進められており、革新的な技術として今後の利用が期待されています。

4. ナノ科学とナノ技術が拓く21世紀

ナノテクノロジーは科学技術における基盤技術で

あり、その影響は非常に広範囲に及んでいます。特に、医療分野やバイオテクノロジーへの活用もその一分野として注目されています。その中でも、ナノテクノロジーを使って実現が期待されているものがドラッグデリバリーシステムです。薬物を運ぶナノメートルサイズの入れ物を作り、そこに医薬物質を入れて目的の部位に到達させるシステムです。通常の投薬では、患部以外へも薬が広がるために副作用を引き起こし、効果があることがわかっていても強すぎて使えない薬がありました。目的とする患部だけに薬を運ぶシステムが実現すれば、患部だけに作用しピンポイントでの治療ができるので、薬の量も少なく副作用の心配も少なく、効率的な投薬が可能となるのです。

ナノテクノロジーで注目されているのは加工技術だけではなく、素材も重要です。中でも大きな期待がもたれているのが、ナノカーボンと総称される炭素材料です。炭素60個だけからできている物質C₆₀はサッカーボールと同じ形をしています。大きさはナノメートルのサイズです。鉛筆の芯などのグラファイトも炭素のみからできていますが、こちらは、炭素がシート状に並んだもので、このシートをくると丸めてチューブ状になったものがカーボンナノチューブと呼ばれる物質です。これらは炭素のみからできていますが、構造が違うと性質もまったく異なります。しかもカーボンナノチューブでも、シートの巻き方を変えると導体になったり半導体になったりと、性質の違いを制御できるのです。この細くて長い構造が、まさに次世代のエレクトロニクスなどに使えないかと注目されています。既にカーボンナノチューブを使ったトランジスタが研究され、シリコンのデバイスと比較して高性能・低消費電力化が期待されています。

デバイスを作成するために、走査プローブ顕微鏡をピンセットのように使って、分子や原子をひとつひとつ操作することも可能ですが、この方法では時間がかかり、デバイスとして応用したりするための大量生産には向いていないという課題があります。ここで注目されているのが「自己組織化」という手法です。構成要素が自ら秩序だった安定な構造を作り上げるといった性質を利用するのです。最適な条件下で部品となる材料を混ぜると反応が進み、より複雑な分子構造が自らできあがるのが可能になり、ナ

ノ構造物質を大量に作るができます。これは、化学的な合成に近いものですし、生命体がDNA情報にしたがって様々なタンパク質を合成し体の組織を作り上げることに類似しています。また、化学的な手法を用いると、たとえばカーボンナノチューブやフラーレンの表面に加工をしたり、また、超分子と呼ばれるような、分子を部品としてより高次な構造をもつ分子を形成したりすることも可能です。このように自己組織化などを利用しながらナノ構造を形成するための新しい手法を開発していくことも課題の一つです。

ナノテクノロジーはとても魅力的です。エネルギー問題や環境問題、医療問題など21世紀に私たちが直面する課題の解決につながるような科学技術になることでしょう。一方で、新しい科学技術は安全や安心といった側面で不安な要素も持ちます。また、ナノテクノロジーは万能ではありません。原子・分子レベルの制御ができるからといって、何でも自由自在に作り出してよいというわけではありません。今後の科学技術の動向に注目し、間違った方向に進んでいないかどうかを正しい理解に基づいて各々が判断することが必要かもしれません。

5. 日本科学未来館での展示

日本科学未来館にある「ナノテクノロジー」をテーマにした展示では、その基礎から応用まで、模型やコンピュータ・グラフィックス、実物を使って紹介しています。例えば、電子の波が引き起こす不思議な現象「量子効果」や、携帯電話の中のLSI、発光ダイオードなどを取り上げています。

また、走査プローブ顕微鏡のひとつである原子間



写真4 日本科学未来館での走査プローブ顕微鏡実演

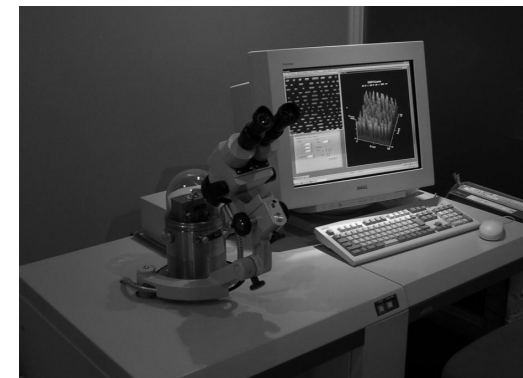


写真5 走査プローブ顕微鏡

力顕微鏡の実演では、その原理を学びながら、実際にナノ構造を観察することもできます。生体の代表的なナノ構造であるDNA、炭素でできたナノチューブ、金属や半導体の超微粒子など、多種多様なナノ世界の姿を画像で紹介するギャラリーもあります。電子顕微鏡、原子間力顕微鏡、走査トンネル顕微鏡など最先端の観察装置を使って、第一線の研究現場で撮影されたナノ画像を紹介しています。

研究者を取り上げるのも未来館ならではの展示です。ナノテクノロジーを切り拓いてきた世界の一流の研究者たちが、研究の要点や面白さ、今後の展開、さらには教育や科学の未来について映像で語っています。

是非ご来館いただきナノテクノロジーについて考えてみてください。

日本科学未来館については以下のサイトをご覧ください。

<http://www.miraikan.jst.go.jp/>