

目次

| | |
|---|----|
| プロローグ ナノ技術からナノ建築学へ…………… | 1 |
| 小さくすると、どんないいことがある？／マイクロテクノロジーからナノテクノロジーへ／「ナノテクノロジー」の生みの親／ナノテクノロジーは分子・原子の影響を受ける／ナノテクノロジーの次にくるもの——ナノアーキテクトニクス／新しい概念は必要・必然 | |
| 1 汚れない窓ガラス——ナノシート…………… | 17 |
| 混ぜて振るだけ——2次元物質の発見／ナノシートを使って物質をナノ建築する／交互吸着法の将来性／ナノシートを組み上げることで生まれる新しい機能 | |
| 2 トイレを除菌——メソポーラス物質…………… | 29 |
| メソポーラス物質／混ぜて乾燥させて焼くだけ！／高性能の電極に、トイレのコーティング剤に／朝飲めば、昼と夜にも自動的に薬剤が出る？／お手本は自然にあり | |

- 3 紙ではない紙——電子ペーパー……………41
 いつでもどこでも気軽に読書／ハイブリッドポリマー——電気
 で色づける／電子の移動で色の調整も思いのまま
- 4 新しい電池の時代——ナノイオニクス……………49
 安全で高性能なりチウム電池を求めて／ナノイオニクス／開発
 はまだまだ続く
- 5 脳型コンピュータへの道——原子スイッチ……………55
 迫るコンピュータの限界／ナノペンから発明された原子スイッ
 チ／デバイス化へ／原子スイッチの特徴を活かす／アトムトラ
 ンジスタ／脳のように学習するコンピュータへ
- 6 分子に情報を書き込む——ナノレベルの電子回路……………71
 フラレン分子をメモリにする／ハイビジョン映画を1ミリ角
 のチップに録画／分子の配線を描く
- 7 世界で一番薄い集積回路を目指す……………81
 テープで剥がせるナノ物質——グラフィエン／1枚のグラフィエン
 ができる電子回路／ロジック素子

| | | |
|---|--------------------------------------|-----|
| 8 | 夢のエネルギー技術——人工光合成 | 87 |
| | 人工光合成／光触媒物質の発展／より優れた光触媒を求めて | |
| 9 | 医療革命へ | 93 |
| | マテリアルセラピー／生体に適合する材料を求めて／貼る制癌剤／新しい投薬法 | |
| | エピローグ ナノアーキテクトニクスが描く未来 | 103 |
| | 謝辞 | 109 |

プロローグ ナノ技術からナノ建築学へ

小さくすると、どんないいことがある？

高度成長期には「大きいことはいいことだ！」というCMがあったが、社会も経済も成熟した今では、むしろ小さくてかわいらしい、小さいけれど高性能なものに人気が集まっているような気がする。それは、小さい優れたものが、ただ単にサイズの大きいもの・量の多いものよりも使いやすいということを皆が実感してきているからである。例として挙げやすいのは、電話やコンピュータなどの電子機器の進化である。

その昔、電話は持って歩くような代物ではなかったし、計算機などというものは持ち上げることすら困難な大きい物体であった。今では、それらは手のひらに載る、ポケットに入る場合によってはどこかに置き忘れてしまう小さな存在である。

かつて、電話はそこに置いてあるものであり、人びとは電話ボックスのような電話の置いてある場所にたどり着かなければ電話をかけることはできなかった。それどころか、電話する相手がその電話をとることのできる場所にいなければ電話で話せないという、今では信じ

られないような不確実さの中で生活していたのである。

今や電話は持ち運び可能になり、記した事実がすぐに古いものになってしまいうような勢いで進化している。小さくて機能の優れた電話を誰もが持ち運べ、好きなききに目的の人に電話を確実にかけたりメッセージを送ったりすることができる。こう考えると、電話という機械の本来もつ便利さは小型化によって初めて発揮されたといえる。

このように小さい機械を作ることの効果は、取扱いが便利になるという見かけ上の利点にとどまらない。人間が必要な機械の場所に行くのではなく、人間の生活に機械を随行させられるようになった……と、その効果を考えるべきである。

動かせない機械に人間が近づいていくのではなく、ふだんの自然な生活の中に機械を引き連れていけるようになった。人びとの行動の自由度が増えるので、特定の地域への過度の人口集中や特定の時間での人の移動（通勤・通学など）が解消できる。機械が小さくなったことで、それを動かすのに必要なエネルギーも減り、またそこから排出される有害物の量が最低限に抑えられる。機械やデバイスの小型化という科学技術の進歩は、人間の生活を自然のあべき姿に戻すとさえ考えられるのである。

マイクロテクノロジーからナノテクノロジーへ

機械が小型化されてきている背景には、小さい構造を精密に作る技術（微細加工技術）の驚

表 1 小さい量を表す単位接頭辞. 「メートル(m)」などの単位の前につける

| 倍数 | 接頭辞 | 記号 |
|-------------|-----------|------------|
| 0.1 | 10 分の 1 | デシ d |
| 0.01 | 100 分の 1 | センチ c |
| 0.001 | 1000 分の 1 | ミリ m |
| 0.000001 | 100 万分の 1 | マイクロ μ |
| 0.000000001 | 10 億分の 1 | ナノ* |

*ナノとはラテン語で小さい人という意味

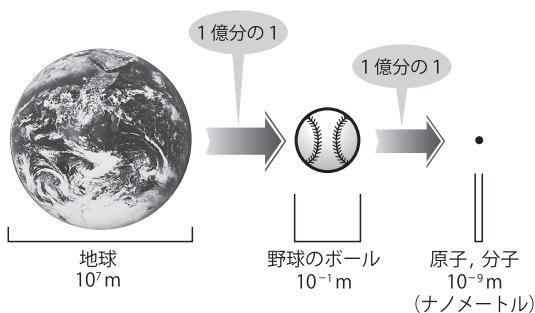


図 1 ナノはいかに小さいか

させてきている。ナノメートルは10億分の1メートルのことであるが、このとてつもない数字を見てもほとんどピンとこないかもしれない。そこで、図1に大きさの比較を示してみる。地球の大きさと野球のボールの大きさには1億倍の差がある。ロ技術)とよべるだろう。科学の進展は、マイクロテクノロジーにとどまることをよしとせず、さらに進んだナノテクノロジー(ナノ技術)を発展

くべき進展がある。顕微鏡でしか見ることができないサイズの精密な回路を今や人類は簡単に作ることができる。これらは、マイクロメートルレベル(マイクロメートルとは100万分の1メートルのこと。表1)の構造を加工していることになるのでマイクロテクノロジー(マイクロ

つまり、地球の大きさを1億分の1にしたら野球のボールの大きさになる。この野球のボールの大きさは10分の1メートル(10センチメートル)ぐらいだから、これを1億分の1にするると1ナノメートル(10億分の1メートル)になる計算になる。

これが、分子や原子、それらが集まったナノ構造の大きさである。このような大きさの世界(あるいはこれよりもちょっと大きな世界)を操るのがナノテクノロジーである。いうなれば、地球外から野球のボールを操るぐらいの芸当をこなすのがナノテクノロジーなのである。

「ナノテクノロジー」の生みの親

では、どのようにして人類がナノテクノロジーという発想に至ったのか? その起源は、アメリカのリチャード・ファインマンが1959年にアメリカ物理学会でおこなった講演「There's Plenty of Rooms at the Bottom(極限の小さな世界には発展の余地が十分にある)」に由来する。彼は、加工技術を極めていくと、分子や原子の世界で機能するシステムが開発できることを説いた。たとえば、顕微鏡下で走る車、非常に小さく情報密度の高いコンピュータ、体内に入って働く医療マシンなどを挙げたそうだ。

そのような発言は当時一笑に付されたともいわれているが、技術が発達した今では、この提案は決して夢物語ではなかったことが証明されつつある。たとえば、ナノカー(ナノサイズの車)はすでに研究されており、アメリカ、フランス、日本のチームなどで競技会をやる

かという話も出ているぐらいである。ファイマンの予測は技術の進展によってまさしく実現されつつあるといえよう。

「ナノテクノロジー」という用語は、元東京理科大学の谷口紀男によって初めて使われたとされる。彼は、1974年に日本で開催された「国際生産技術会議」で、ナノテクノロジーという言葉を使い、ナノ領域の生産システムの開発のため、分子・原子の精度をもつ加工の必要性を述べた。

ナノテクノロジーに大きな影響を与えたもう1つの概念は、アメリカのキム・エリック・ドレクスラーによる『Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology(創造する機械——ナノテクノロジー)』(1986年)という著書によって提唱されている。この書の中では、ナノメートルサイズの機械を想定して、それが自己複製したり、他のナノオブジェクトを作り上げていたりする様子が説明されている。彼は、原子配列や分子の組合せを制御するだけで、まったく機能の違うものが生み出されることを、石炭とダイヤモンド、砂とコンピュータチップ、癌細胞と正常細胞などを例に説明した。漫然と集まった物質ではなく、ナノサイズでシステムを組み立てていくことによって、それらが大きな価値のあるものに変貌することを説明したのである。この考え方は、分子ナノテクノロジーやナノマシンといった概念として発展していった。

実は、ファイマンらの考え方とドレクスラーらの考え方は、ナノ構造の重要性という点

で共通する一方で、そのアプローチの方向は正反対であり、それらは今日のナノテクノロジーの二大潮流となっている。

ファインマンらの考え方によるアプローチは、トップダウン型のアプローチとよばれ、より大きな素材を精密に削っていくことによっていかに望みの微細構造を作っていくかという方法論を表している。これまで実践で使われてきた多くの微細加工技術がこの考え方に立脚しており、多大な成功例を生んできた。今日の小さな機械は、このトップダウン型のアプローチによるものである。ただし、ある程度以上の小さな構造をこの方法で作っていくのは困難であり、エネルギーやコストもかかることになる。

ドレクスラーの考えたアプローチはこの逆で、分子や原子といった単位を組み立てることによって所望の微細構造を作っていくというボトムアップ型のアプローチである。究極の精度の構造体を作るという点では理想的な方法であるが、想像できるように、ある程度以上の複雑な構造体を作るには非常に労力がある。自己組織化という自発的な過程を使うことが成功の鍵であるが、それを完全にデザインして成し遂げていくのは至難のワザである。ただ、これは不可能ではない。なぜなら、生物の構造は、このボトムアップ型の仕組みによって成り立っているからである。所望の構造をわれわれが組み上げていくためには、従来のナノテクノロジーをさらに進歩させた概念を打ち立てることが重要なことは後述しよう。

ナノテクノロジーの発展は、優れた予測や概念の提唱だけでもたらされたわけでは決して

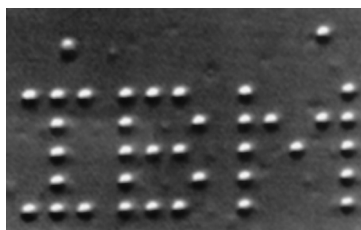


図2 キセノン原子を用いて書かれた文字 (IBM Almaden Research Center)

ない。そのような発想を生み、実行に移す機運をよぶような科学的進展が同時進行で起こったことは見逃せない。たとえば、1932年にはルスカが電子顕微鏡を発明し、1981年にはローラーとビニッチが走査型トンネル顕微鏡 (STM) を発明した。1989年にはSTMを用いた原子操作でキセノン原子を用いてIBMと描画できることが実証された(図2)。近年では、「A Boy And His Atom: The World's Smallest Movie」という原子操作を使った動画がYouTubeに公開されている。

このような技術的側面ばかりでなく、さまざまな新機能物質の発見、たとえば導電性高分子(白川らによる)、フラーレン(クロトー、スモーリーら)、カーボンナノチューブ(飯島ら)、グラフェン(ガイム、ノボセロフら)や、さまざまなナノ物質の発見、さらにはボトムアップ型アプローチの根幹となる自己組織化を包含する超分子化学(レーン、クラム、ペダーセンら)の概念の貢献も大きい。

ここで考えなければならないのは、単なる科学技術の連続展開だけでは一大潮流は生み出せないということである。前述のような、ナノテクノロジーに対する先駆的な予見があればこそ、これらの技術が統合されて大きな発展をなしたと見ることができる。そう考えると、次段階の科学技術

の発展を促すために、ナノテクノロジーの次にくる概念を提唱すべき時期がそろそろきてい
る。

ナノテクノロジーは分子・原子の影響を受ける

ナノテクノロジーの次にくる概念については、次項で詳細を述べるが、その前に、ナノテ
クノロジーについてちょっと掘り下げて考えてみる。

ナノテクノロジーは決して小さいものを生み出していくだけの科学技術ではない。ナノテ
クノロジーの真の価値は前述のマイクロテクノロジーとの比較により明らかにできる。

ナノの世界というのは、分子や原子ひとつひとつの性質や特別な挙動に翻弄される世界
ということになる。一方、それよりも1000倍大きいマイクロの世界は、分子や原子を感
じることのない単なる小さな物体の世界にすぎない。ゆえに、マイクロの世界では、物質の
性質が大きな(マクロな)世界のまま引き継がれる。われわれが身の回りで感じる物質の性能
が、超小型化され、超高密度化されることにすぎない。一方、ナノの世界になると、原子や
分子の特別な個性が如実に働き、われわれが予期しないような物質の性質が表れてくるので
ある。

ナノカーボンという炭素物質を例に挙げると、ナノスケールの直径をもつ円筒構造(カー
ボンナノチューブ)、原子が2次元に並んだ平面構造(グラフェン)などの形態をとり(図3)、そ

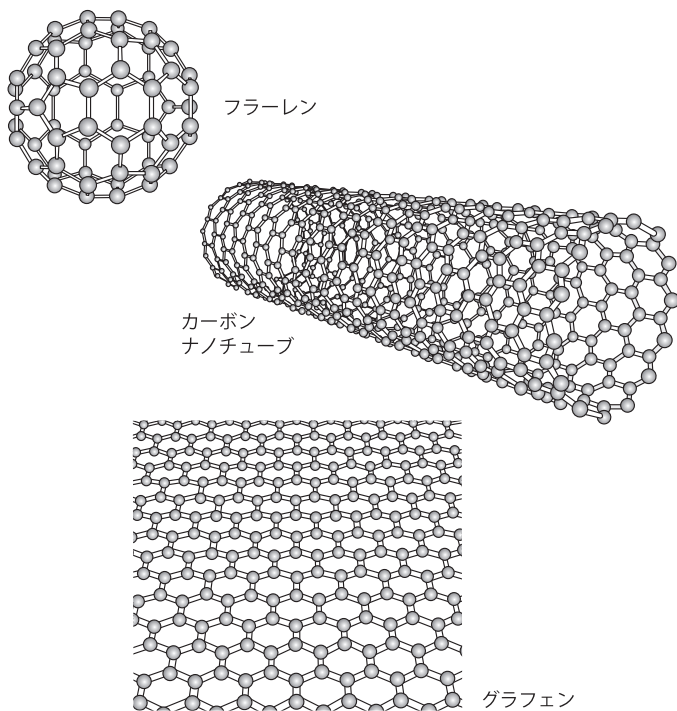


図3 炭素でできているナノ物質

れぞれが予期しなかったきわめて興味深い性質を示す。これらは、活性炭やダイヤモンドなどの従来の炭素材料とは本質的に異なる物質である。それゆえ、カーボンナノチューブは非常に広範な研究分野を創始し、フラーレンとグラフェンの発見にいたっては、それぞれノーベル賞を授けられることになった。

ナノテクノロジーは半導体集積回路の微細加工のために活躍して

きたマイクロテクノロジーを、単により微細化した技術ではない。既知の知識に基づいて設計されたミクロの構造を忠実に構築するのがマイクロテクノロジーであるのに対し、ナノテクノロジーは、未知の性質をもつナノスケールの構造を探索的に究明・構築しようとするものであり、両者は根本的に異なる。

ナノテクノロジーの次にくるもの——ナノアーキテクトニクス

ただ単に小さいのではなく、ナノの世界から材料やシステムを組み上げていくことで、大きな世界では予想しえない形でわれわれの世界を変えていく技術革新が必要である。そのような問題意識から、ナノテクノロジーは確実に進展している。

ただし、現在ナノテクノロジーはナノの世界の現象を観察する・解析することに多くの力が注がれているように思われる。何かが足りない。現在の成功に甘んじることなく、「活」を入れる必要がある。新しいページを意識的に開くべきだ。より未来の科学技術を進展させるために、ナノテクノロジーの次にくる概念を提唱せねばならない。何が必要か？ それは、われわれの周りにある科学技術の発展を根本から見直してみると明らかになってくる。

私たちの周りにはいろいろなもの、たとえばはさみのような道具からテレビやコンピュータなどの機械、あるいは衣服から家のような建築物に至るまでの生活を支える構造物、これらを人間は次々と開発してきた。これらを生産するときに必要な2つの要素がある。どの