

# 誰かに教えたくなる 科学技術の話 3

## 極限を追求する ナノテクノロジー



東京大学名誉教授 月尾 嘉男

科学は事物を分割すること

「科学」は英語で「サイエンス (science)」と表現するが、その語源はラテン語の「スキエンティア (scientia)」であり、最初のSciは「はさみ」を意味する英語「シザーズ (scissors)」Sciと同一の言葉で、分割することを意味する。すなわち、科学とは物質を要素に細分して原理を発見することを目指す行為であり、数多くの要素を統合して有用な製品を製造する「技術」とは反対の概念である。

この分割の程度は三桁ごとにラテン語の接辞で表現され、基準の数量の一〇〇〇分の一は「ミリ」、一〇〇万分の一は「マイクロ」、一〇億分の一は「ナノ」、一兆分の一は「ピコ」と名付けられる。その反対に、拡大していく単位は三桁ごとにギリシャ語が使用され、一〇〇〇倍は「キロ」、一〇〇万倍は「メガ」、一〇億倍は「ギガ」、一兆倍は「テラ」となっている (図1)。

この科学の基本精神を反映し、人間は古来、物質を分割し、分子、原子、原子核、素粒子を発見してきた。物質によって相違するが、大略、分子はナノメートル

図1 規模の単位

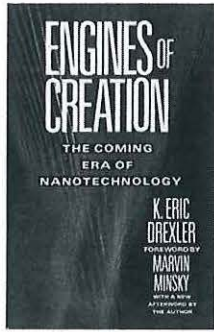
ヨタ yotta	$10^{24}$	ミリ milli	$10^{-3}$
ゼタ zetta	$10^{21}$	マイクロ micro	$10^{-6}$
エクサ exa	$10^{18}$	ナノ nano	$10^{-9}$
ペタ peta	$10^{15}$	ピコ pico	$10^{-12}$
テラ tera	$10^{12}$	フェムト femto	$10^{-15}$
ギガ giga	$10^9$	アト atto	$10^{-18}$
メガ mega	$10^6$	ゼプト zepto	$10^{-21}$
キロ kilo	$10^3$	ヨクト yocto	$10^{-24}$

ルの規模、原子はピコメートルの規模であり、以前は観察するだけの対象であったが、この分子や原子の単位で有用な製品を製造しようという技術が登場してきた。それが今回の主題「ナノテクノロジー」である。

### ドレクスラーの大胆な発想

この技術を最初に発想したのはノーベル物理学賞を受賞しているアメリカの物理学者R・P・ファインマンとされている。一九五九年末にカリフォルニア工科

図2 『創造する機械』



1986



1992

大学で開催されたアメリカ物理学会で「底辺には無限の空間がある」という演題で講演し、物質を細分していけば「針先程度の物質にブリタニカ百科辞典のすべての内容を記録する技術が可能」という事例を紹介した。

このような技術を「ナノテクノロジー」と命名したのは、東京理科大学の谷口紀男教授で「原子一個や分子一個の単位で素材を分離・形成・変形する技術」を一九七四年に提唱している。これは残念ながら注目されなかったが、世界で話題になったのは、一九八六年にアメリカの若

手学者K・E・ドレクスラーが出版した『創造する機械・ナノテクノロジー』である(図2)。

ドレクスラーは「これまでの技術は原子や分子を一括して処理するバルクテクノロジーであるが、これからは原子や分子を制御し精密に操作するナノテクノロジーになり、これまで想像もできなかった革新を世界にもたらす」と説明している。この時点では当分実現しない技術と想像されていたが、ある成果が発表された結果、一気に実現可能な技術として注目されるようになった。

まず一九八二年にスイスにあるIBMのチューリヒ研究所で二人の物理学者G・ビニツヒとH・ローラーが、きわめて先鋭な探針の先端を物質の表面に接近させて原子の状態を観測できる走査型トンネル顕微鏡(STM)を発明した。二十世紀初頭から構築されてきた量子力学により、理論として原子の存在は明確になっていたが、この発明により人間は原子を直接観察することが可能になった。

さらに一九八九年になり、アメリカにあるIBMのアルマデン研究所の物理学者D・アイグラーが走査型トンネル顕微鏡を使用して三十五個のキセノン原子を

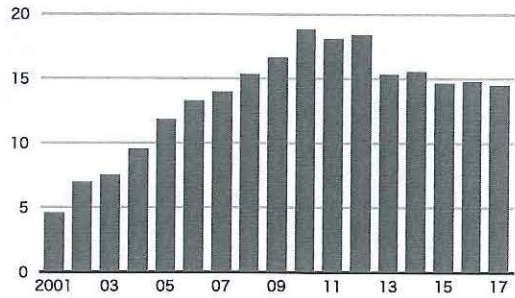
一個一個操作し、ニッケルの表面にIBMという文字になるように配置することに成功した。これによってドレクスラーの提唱した原子や分子の配置を設計図面のように構成する構想が現実の技術として研究することが可能になった。

### 世界に波及したアメリカの国家計画

この革新技術に国家として最初に挑戦を開始したのはアメリカである。布石として、一九九二年にA・ゴア上院議員が中心となってドレクスラーを上院の会議に招致し、ナノテクノロジーの将来について討議している。そのときの議論の内容は公開されているが、議員立法が中心のアメリカの議会では議員も相当に勉強しており、かなり詳細な質疑が展開されたことが記録されている。

そのゴア上院議員が副大統領となったクリントン政権は、二〇〇〇年にB・クリントン大統領自身が「国家ナノテクノロジー戦略(NNI)」をカリフォルニア工科大学で発表し、四十年前に同一の場所であるフラインマン教授が講演した内容を下敷に「アメリカ議会図書館の蔵書すべてを角砂糖一個分の記憶素子に収容する」と発表したため、一般の人々も技術

図3 NNIの研究開発投資金額 (億\$)



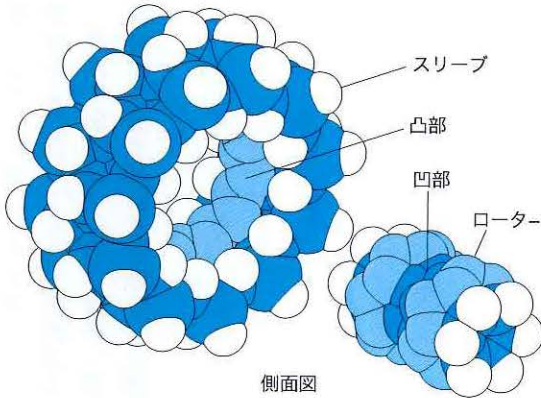
科学技術振興機構「研究開発の俯瞰報告書：ナノテクノロジー・材料分野（2015年）」

の威力に注目するようになった。

この国家戦略に対応し、アメリカは連邦政府のナノテクノロジー研究開発予算を二〇〇一年の五億ドルから二〇一〇年には四倍に増加させてきた(図3)。このような動向に反応し、日本は二〇〇一年の「第二期科学技術基本計画」で「ナノテクノロジー・材料分野」を重点領域とし、EUも全体としてだけでなく、構成する各国も組織を新設するなど、世界が競争する分野に発展した。

NNIではナノテクノロジーを「一〇〇ナノメートル規模の物質を対象とする科学・工学・技術」と定義している

図4 ナノマシンの部品



が、ドレクスラーは走査型トンネル顕微鏡を道具として分子を立体に配置して軸受のような機械部品を製造することを想定していた(図4)。この方法は分子間力や表面張力の影響で実現不能という意見もあったが、分子の単位で特定の目的の機構を実現する方法が開発された。

二〇一六年のノーベル化学賞受賞者はJ・P・ソヴァージュ、J・F・ストダート、B・L・フェリンガの三名で、その業績は「分子機械の設計と合成への貢献」であった。ドレクスラーの物理的方法ではなく化学的方法を開発し、実際に

分子モーター、分子メモリー、分子エレベーターなどが実現している。ただし実用には時間が必要で、現在、実用になっているのは素材分野である。

**すでに実用になっている技術**

粒径が一〇〇ナノメートル(一メートルの一〇〇〇万分の一)以下の素材をナノマテリアルと表現するが、実用になっている材料は数多く存在する(図5)。酸化亜鉛や酸化チタンは紫外線散乱剤として日焼け止め化粧品に使用されてきたが、

図5 ナノマテリアルの粒径 (ナノメートル)

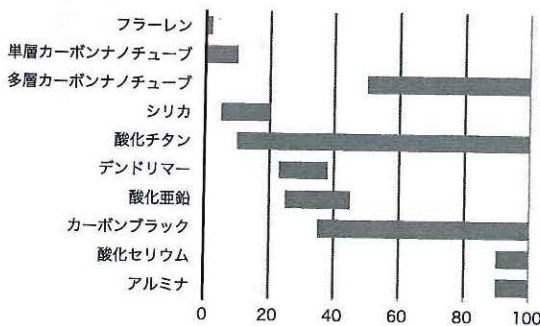
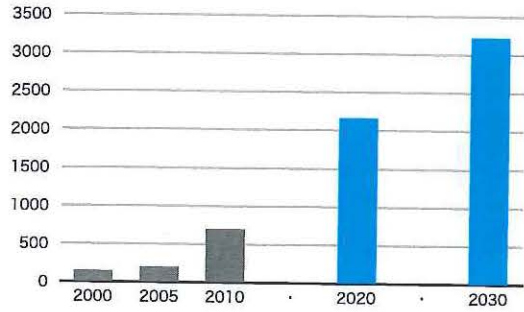


図6 化粧品分野での市場規模推定 (億円)



高土経済「ナノテク関連市場規模動向調査報告書」2006

それらのナノマテリアルは可視光線の波長より小径であり、皮膚に塗布しても透明であるうえ紫外線防止効果もあるため化粧品類に混入されている(図6)。

粒径が五〇〇ナノメートル程度以下の炭素の粒子がカーボンブラックで、大半はゴムタイヤの補強素材として使用されるが、塗料、顔料、導電素材などにも利用されている。カーボンブラックは炭素以外の物質も結合しているが、炭素原子のみで構成された集合はフラーレンと命名され、球状になった物質や筒状になっ

たカーボンナノチューブなどがあり、化粧品や医薬品に使用されている。

六十個の炭素原子が結合してサッカーボール状態になった物質の存在を一九七〇年に発表したのは大澤映二、カーボンナノチューブの存在を一九七六年に指摘したのは遠藤守信、一九九一年にカーボンナノチューブを発見したのは飯島澄男など日本の学者であったが、ノーベル化学賞受賞者は残念ながら、一九八五年にサッカーボール状態のフラーレンを発見した三人の外国の学者であった。

#### 兵器に利用される技術

ここまでは素晴らしい技術のようであるが、問題が懸念されている。ナノマテリアルが人体の健康に影響するという証拠はないし、世界で使用を規制する制度も存在しない。しかし、皮膚を透過して細胞核内にまで到達しているという実験結果も報告されており、公的機関などが影響を検討しはじめている。ところが、このナノマテリアルの特性を利用した兵器の開発が推進されているのである。

映画『ジュラシック・パーク』の原作の著者M・クライトンの『ブレイ(獲物)』(二〇〇二)という小説がある。医療目

的で開発されたナノマシンが研究機関から漏洩し、自己増殖して人間を襲撃してくるという内容である。これを兵器として開発するため、アメリカ国防総省は「防衛ナノテクノロジー研究開発計画」(二〇〇九)を発表しているし、ロシア、中国なども研究していると推定される。

このような装置は「ナノロボット(ナノ規模のロボット)」と命名され、ガン細胞を個別に攻撃する治療目的で研究されはじめているが、あらゆる技術は軍民両用であるから、当然、兵器としても開発されている。その手法はアリやハチが大群で獲物に殺到する「スウォーミング(大軍殺到)」戦略で、ナノロボットが敵軍の兵士や兵器に殺到するという、『ブレイ』に描写された光景になる。

二〇三〇年代にはナノ兵器が大国のパワーバランスの決定要因になるという見解もある(L・A・デルモンテ『人類史上最強ナノ兵器』二〇一七)。冒頭に紹介したように、科学は対象を際限なく分割していく仕事であるが、その科学がナノ単位まで到達した成果を、統合することが仕事である技術が実現した現実がナノ兵器である。憂鬱な気分になるが、これも人類の歴史の一面である。