

I はじめに

## アイアンマンと学ぶナノテク

『アイアンマン』をご存知だろうか。アメリカのマーベル・コミックシリーズの一つで、同名のキャラクターが主人公として登場する作品である。

さて、アイアンマンは**最初からあのスリムでクールなデザインであったわけではない**。「マーク1」と呼ばれる初代スーツは非常に不格好で、ブリキの塊のような見た目をしていて、スーツの着用や起動を一人ではできず、もう一人のサポートがなくてはならなかった。そこから技術の進歩とともにアイアンマンはよりスリムに、より強くなっていった。



↑ 世界一有名なテクノロジーの塊  
(有名なこのスーツはマーク3)



↑ マーク85の装着シーン。水が滴るような装着プロセス  
損傷しても自動修復するし、腕はキャノン砲に変形する

実写映画における彼の最新スーツは「マーク85」である。以前までならばガシャンガシャンと変形してメカメカしくスーツを装着しており、まさにロボットだという感じがあった。しかしマーク85では大量の「**ナノマシン**」が全身を薄い膜で包み込むかのように張り付き、スーツを装着するようになった。このナノマシンの装着シーンが圧巻で、2018年の時点では夢のような技術に思えた。進化しすぎだろうと。

ハルク「なにそれ？」

アイアンマン「ナノテクだよ、気に入ったか？」

理系はからっきしの私だがこの「**ナノテク**」という凄まじい技術の可能性に強く興味を持った。実際のところ、ナノテクは夢のような技術などではなく、とっくに実用化され、あらゆる分野に応用されている。しかしそれがどのような技術なのかを知る人は少ない。

このレポートでは、あえて数学恐怖症の私がナノテクをわかりやすく解説してみようと思う。まずは「ナノテク」の意味を明らかにし、その歴史を紐解く。ナノテクを理解するにあたり、理解困難な専門用語が頻出するので、それらについても丁寧に説明していこう。その後、ナノテクによって実現された技術の例をいくつか挙げていくとしよう。

## II ナノテクとは

2019年期待度		2030年期待度	
1	AI・機械学習／深層学習	1	再生医療
2	AI・音声対話	2	自動運転・操舵
3	自動運転・操舵	3	AI・機械学習／深層学習
4	IoT(インターネット・オブ・シングズ)	4	量子コンピューター
5	自動運転・駐車支援	5	自動運転・駐車支援
6	5G(第5世代移动通信システム)	6	生体埋め込み機器
7	VR(仮想現実)	7	ネット遠隔診療
8	再生医療	8	次世代手術支援ロボット
9	産業用ドローン	9	協働ロボット
10	AR(拡張現実)	10	VR(仮想現実)
			全固体電池

↑日経BP総研による「テクノロジー期待度ランキング」

### ナノテクをご存知ですか

上のランキングは2018年に日経BP総研がビジネスパーソンを対象に「2019年と2030年それぞれの時期に期待する新技術」について調査したウェブアンケートの結果を反映し作られたものだ。調査期間は一ヶ月で有効回答数は1006件に及ぶ。

さて、考えてみてほしい。このうちいくつかの技術が「ナノテク」に当てはまるのか。

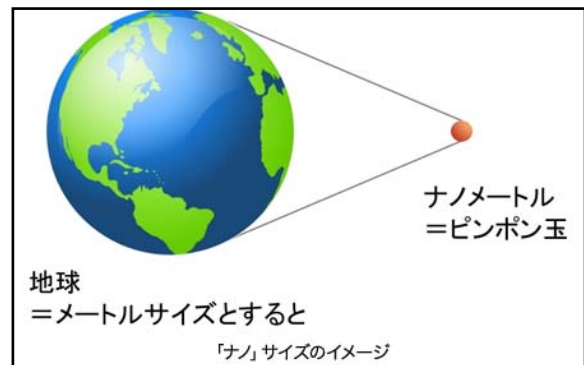
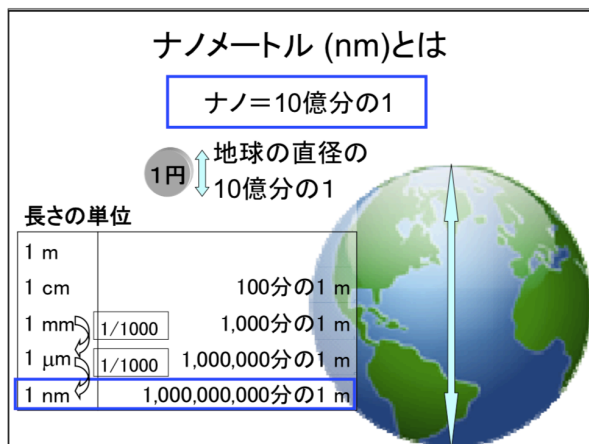
答えは「全部」だ。

### ナノテクの意味

はじめに「ナノテク」は略称であり、正しくは「**ナノ（スケール）テクノロジー**」であることを押さえておかなければならない。ナノ（10億分の1）+テクノロジー（科学技術）の合成語である。

ナノテクノロジーには二つの意味がある。一方は「**100ナノメートルより小さい物質の構造と機能を扱う科学技術**」である。もう一方は「**全ての原子や化学結合が精密に規定されたマシンの設計・製造**」という意味である。

これだけを見ても「おおそうか」程度にしか思われなくてもいい。だがナノテクノロジーがもたらすのは「世界をより暮らしやすく、便利にする」なんてレベルの技術ではなく「**新しい世界を創る**」くらいに壮大で、革新的な技術なのである。



←農林水産省「ナノテクノロジーってなあに」から引用

### なぜナノなのか

ナノのサイズ感は1メートルを地球の大きさとした場合、1ナノはビー玉くらいのものである。ちなみにナノをさらに10分の1にすると原子の大きさに行き着く。世界を構成する最小の単位に10をかけるとナノの世界に入門するというわけだ。ナノテクノロジーが途方もなく小さなものを扱っているということがわかっていただけたか。

#### 特徴1：物質の機能が発現する最小単位であること

物質は原子のサイズで性質が発現し、ナノのサイズで機能が発現するということ。

(性質=見た目や形、硬さや耐性など 機能=役割、はたらき)

#### 特徴2：ナノを制御すると、それより大きなものはその機能と特性が規定される

ナノよりも小さなサイズでいじくっても、物質に変化は起こらないということ。

#### 特徴3：ナノのスケールでは実に多様な機能や特性が存在する

一種の原子だけでも様々な機能を持つ製品が生み出せるということ

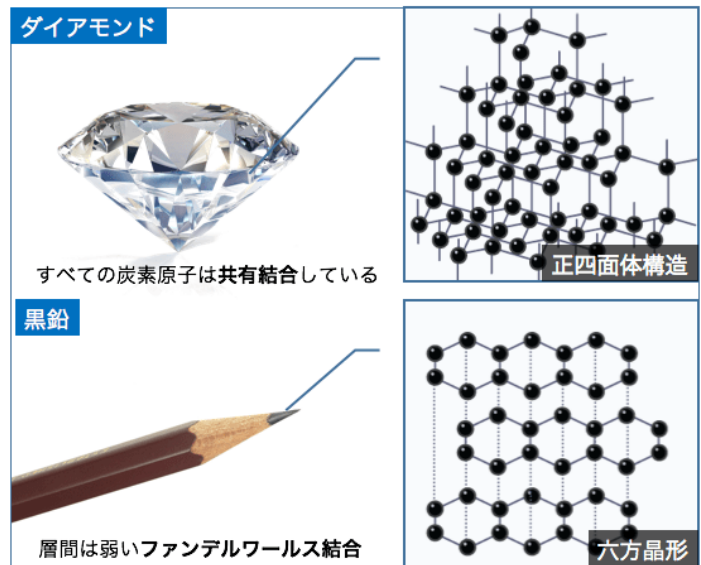
### ナノテクノロジーってどんな方法

ナノの世界を扱うためには主に二つの方法があるとされている。大きいものをひたすら小さく削ってナノの世界まで行き着く**トップダウンのナノテクノロジー**と、原子を組み合わせていってナノの大きさまでたどり着く**ボトムアップのナノテクノロジー**の二つだ。



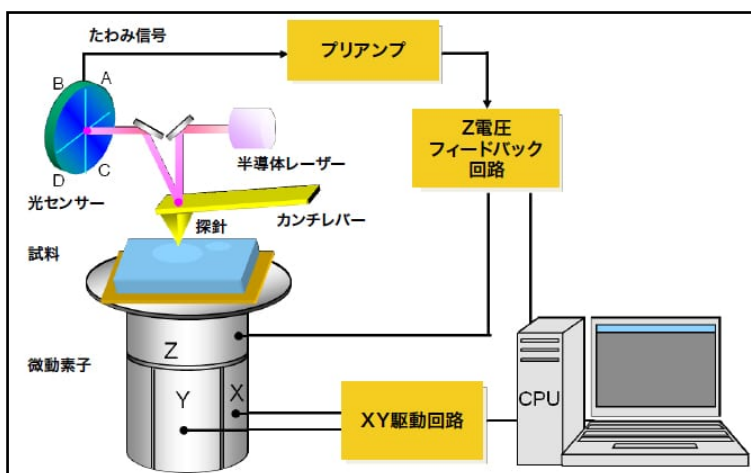
例えば日本ではスマートフォンに使われる世界最小のネジが作られた。ネジはトップダウンのナノテクノロジーの代表例といえる。他にもパソコンの中に10億個ほど搭載されているトランジスタというパーツなどがそうだ。今まではこちらの方法でナノテクノロジーは拓かれてきた。しかし、近年は小さくする技術に限界が訪れ、頭打ちになってきているようだ。

一方で今注目を浴びているのがボトムアップのナノテクノロジーの方法である。例えば炭素であれば、特別な結合方法で立体的に結び合わせていくとダイヤモンドになり、ベンゼン環という形につなげてシート状にしたものを積み重ねると炭になる。他にも薬やタンパク質を作るができる。つまりは**一つの原子でも結び方を変えるだけで様々な素材を作り出すことができる**というわけである。作り出すのは既存の素材だけではない。炭からは**カーボンナノチューブ**という新素材が作り出されたし、これからも様々な原子から様々な素材が創造されていくことだろう。故に「新しい世界を創る」技術であると形容できるわけだ。こちらの方法に関しては、まだ出発点に立ったばかりで進展の可能性に満ちている。



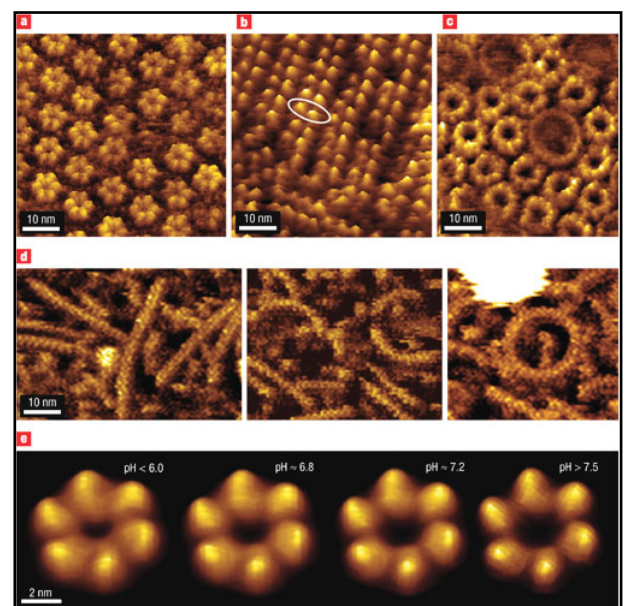
### ナノテクノロジーのためのテクノロジー

原子を操作するためには**電子顕微鏡**や**走査型プローブ顕微鏡**が使われる。走査型プローブ顕微鏡は80年代に発明された。それまでは理論上でしか語ることができなかったDNAの世界を実際に見て、操作をすることができるようになった。仕組みについて調べてはみたが、あまりにも難解だったので一言にすると「すごくよくはっきりと原子の形や性質を観察できるすごい顕微鏡」である。そのまんま。顕微鏡についている「深針」というパーツに電圧をかけることで原子を動かしたり切り出すことができる仕組みだ。



↑あまりに意味不明な走査型プローブ顕微鏡の仕組み

走査型プローブ顕微鏡で見る原子の世界→





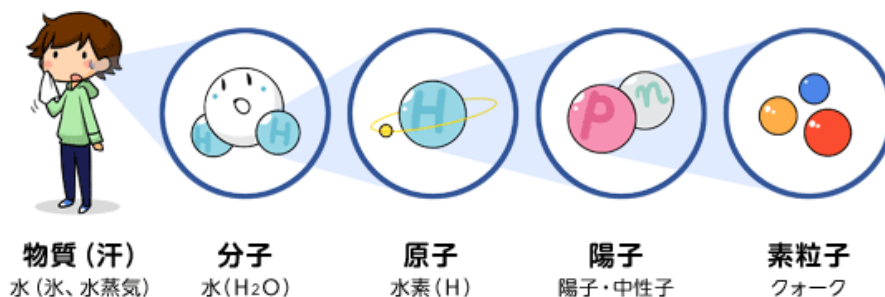
### Ⅲ ナノテクノロジーの来歴

#### ナノテクノロジーの歴史①バイオテクノロジー

そもそもナノテクノロジーとはどんなテクノロジーなのか。まずは、ナノテクノロジーの歴史を遡るために「**バイオテクノロジー**」という概念から理解していこう。

1950年ごろから量子力学によって自然界への理解が深まった。生命そのものの本質とメカニズム、この世に存在する「さまざまな素材がその性質を持つ理由」が明らかにされていったのである。

量子力学とは**分子**（とても小さい粒子、集まると物質になる）**原子**（さらに小さい粒子、集まると分子になる、原子核と電子でできている）**原子核**（原子の中心にあるコア）**素粒子**（原子核よりさらにさらに小さい粒子軍、いっぱい種類があって複雑）を基に現象を扱う理論である。要するにものすごく小さい物質が専門の物理学である。



科学者たちは新しい元素（化学元素とも。一種類の原子から成る物質、水素など）を次々に発見し、世界を「有機物」と「無機物」に二分した。有機物とは動物や植物を構成する物質（有機化合物ともいう。酸化物や炭化物など）で無機物は有機物以外の物質（水、空気、鉱物など）である。

1953年、**DNAの二重螺旋構造**が明らかにされ、生命のメカニズムに関する研究は一気に発展を遂げた。前述の走査型プローブ顕微鏡が80年代に登場し、DNA研究がさらに加速、遺伝子の一部を切り出し、別の生物に移植するなど生命のアレンジが行われるようになった。こうした手法は「バイオテクノロジー」と呼ばれる。

ではこのバイオテクノロジーをメカニズムに掛け合わせるとどうなるだろう。いつか自ら成長し、修復し、増殖するようなマシンが実現されるかもしれない。生物と機械の両方の性質を持つ生命体、それはまさにアイアンマンマーク85を構成する「ナノマシン」に他ならない。その技術は今、発展の最中にある。その技術こそが「ナノテクノロジー」なのである。

## ナノテクノロジーの歴史②ドレクスラーのナノテクノロジー

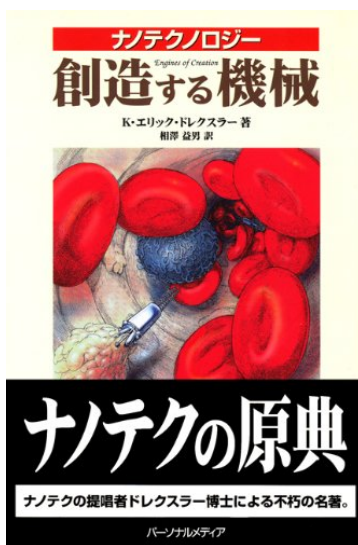
急に「バイオテクノロジーをメカニズムに掛け合わせる」という表現が現れ、困惑しているそのあなた、安心してほしい。当時その発想に至った人物がいるのだ。ここからはその人物について紹介をさせていただく。

1970年代、当時マサチューセッツ工科大学の学生だった**エリック・ドレクスラー**は自身の科学論文の中で、バイオテクノロジーの研究こそマイクロテクノロジーの発展の鍵であると説明した。細胞内で起こる諸現象のプロセスを新素材やマシンの開発に応用できると考えたのだ。

マイクロテクノロジーとはナノテクノロジーの前身である。ナノテクノロジーはマイクロテクノロジーの延長線上にあるものと考えていただきたい。そしてこの時はまだマイクロテクノロジーが主流で、「ナノテクノロジー」は一部の科学者の間でしか知られていない専門用語であった。



↑エリック・ドレクスラー氏



1987年、ドレクスラーは研究仲間たちとともに『**創造する機械-ナノテクノロジー**』という題で一般書を刊行した。このころにはすでに研究者たちの間では「ナノテクノロジー」という言葉が使われていたが、この本の登場で一般大衆の間にも広く知られるようになった。本書の中では人工知能や工学システムのことから、あまりに軽量で着ていることを忘れてしまうような宇宙服、細胞を修復するマシンや人体の冷凍保存のことまで広く議論を展開している。『創造する機械』は凄まじい影響力を発揮し、人々を沸かせた。それまでは実現不可能だと信じられていた夢のような技術たちの「道筋」と「手段」を示したこの本は今でも研究者たちのバイブルである。

## ナノテクノロジーの歴史③技術が向かう先

1990年代、ナノテクノロジーは流行りの専門用語となった。しかし「ナノテクノロジー」という専門用語に明確な定義づけは行われなかった。ナノテクノロジーはこれまでの技術の延長に過ぎず「この技術はナノテクノロジーである」といった明確な区分ができなかったためである。そこで「**全ての原子や化学結合が（原子レベルで）精密に規定されたマシンの設計・製造**」という意味で説明がされるようになった。

さまざまな人がさまざまな分野でナノテクノロジーを語るようになって以来、ナノテクノロジーの研究領域は拡大し、分化し続けている。しかし、全体として向かう先は「**より高い精度でより小さなものを作る**」という方向で一致している。

### Ⅲ 現在のナノテクノロジー製品

#### 建築：デジタルアート

建築と「**デジタルアート**」の二つの分野の関係が深まっている。今の技術では実現できない建築でもアートを掛け合わせれば実現ができる。近未来感を演出したり、平面の壁に立体的な映像を投影し、人々を楽しませたりできるというわけだ。プロジェクションマッピングがよく取り上げられるが、今はもっと進化している。壁一面だけではなく床や天井、空間にも映像やアートを駆使し、さながら異世界にでもいるかのように感じさせる。



↑お台場の森ビルで開催されたデジタルアートミュージアム

現実に溶け込むほど高画質な投影を可能にする技術にはナノテクノロジーが絡んでいる。デジタルアートやテレビにも使われている「4K解像度」の技術はナノテクノロジーの進展によってもたらされたものだ。これから先さらに高解像度な、現実を超える仮想が作られることだろう。マトリックスみたい。

#### 再生医療：機能性人工皮膚、バイオ3Dプリンター

ナノテクノロジーと医療は密接な関係を持っている。最近よく耳にするのは人工皮膚や人工臓器の話だろう。2018年には皮膚の再生を促す機能を持つ「**機能性人工皮膚**」が実用化した。この人工皮膚はなんと移植後、完全に元の皮膚に同化し、手術痕が全くわからなくなる。しかも安価で、2019年には全国で発売されるようになるそうだ。

再生医療の目標は臓器を作り、移植できるようにすること。そのためには立体的に細胞を組み立てる必要がある。佐賀大学の教授である中山氏はサイフーズというベンチャー企業を立ち上げ「**バイオ3Dプリンター**」を開発した。すでに患者の細胞を採取してから2ヶ月ほどで血圧の何倍もの圧力に耐えられる人工血管を作ることができるほどに進化している。こちらも数年以内に実用化がされるようになるだろう。



## 電子工学：IoT工場、量子コンピュータ

工場の運営にAIが使用されている。生産ラインや設備、工場全体をネットワークで接続しデータを収集することで効率化を図っている技術だ。AIこそナノテクノロジーがもたらした代物に他ならない。今の工場に人はほとんどいない。必要ないのだ。工場全てにAIが搭載されていて、データは常に一つのパソコンに集められる。技術者が一人いれば全ての工場の稼働状況が把握できてしまう。もちろん異常があれば即座に通知される。こうした工場は「IoT工場」と呼ばれている。



←ヤマザキマザックの大口製作所  
コンピュータがデータを集積している

コンピュータに量子力学の原理を取り入れることで、膨大な量の計算を並列して行うことができる「量子コンピュータ」に関する研究競争が白熱している。量子コンピュータを用いれば、莫大な量のデータを投入しても高速で分析ができるようになり、即座に最適解をはじき出すことができるようになる。交通渋滞の緩和やナビによるルート案内、素材開発の効率化などに役立つそうだ。

## 環境問題：ゼロエネルギーハウス

経済産業省は「**ゼロエネルギーハウス**」という事業を推進している。住宅を高断熱化し、太陽光発電などの自家発電システムを設置することで、エネルギー消費量を限りなく0に近づけるといふものだ。将来的には新築時からあらかじめ上記のような状態にしておくことで、入居時の負担を減らすことにつなげる狙いもある。こうした利用者、提供者そして社会環境の三方よしのビジネスモデルを重視する傾向が現れつつあるようだ。

高品質な断熱材にはナノテクノロジーが使用されている。高秩序な分子配列で作られた断熱材は熱すら通さない密度を実現する。耐久力も段違いである。ネズミ対策もしてあれば言うことなしだが。



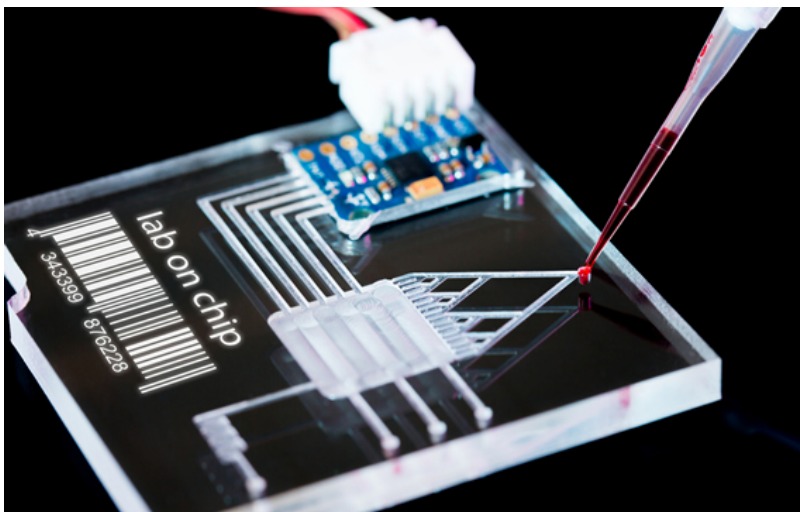
## IV 未来のナノテクノロジー製品

### 建築：超高層建築物

ナノテクノロジーで実用化されそうなものの代表例が超高層建築物である。高秩序な原子配列によって分子同士の隙間を縮め…要するに今とは比べ物にならないくらい堅牢な建築ができるので、数十倍の高さの塔を作ることができるようになるということだ。そして今では建築不可能な複雑なデザインや形状の建物も簡単に建てられるようになるだろう。

### 医療：バイオチップ

今の生体検査は病院へ行き、注射で採血し、数週間後に結果が知らされる。手間も時間もかかるし、気軽に受けられるものでもない。「**バイオチップ**」が実用化されれば、この現状におさらばできる。バイオチップはシリコンなどで作った基板の上にDNAやタンパク質を乗せたチップである。このチップを毎朝舐めたり、少量の血を乗せるだけで体の検査を日常的に行うことができる。検査の結果は携帯端末から病院へ自動送信され、詳細なカルテが作成される。バイオチップの検査対象は人間だけでなく生物全般にわたる。いち早く動物の病気に気づいたり、食中毒を予防したりすることができるようになるだろう。



←AGC科学カンパニーのバイオチップ

バイオテクノロジーはナノテクノロジーから分化した領域の一つである。要するに、原子の組み替えに伴う変化を自由に操作する技術で、実現できれば年老いた肉体を若返らせることや宝石や果実を原子から作り出すことだって可能になる。ナノテクノロジーには常に**倫理的問題**が付きまとう。ただの便利な技術では止まらず、人智を超えた神の技術にまで到達しうる技術なのだ。「生命とは何か」ということに向き合うことは避けられないだろう。

## 電子工学：極小製品、ナノマシン

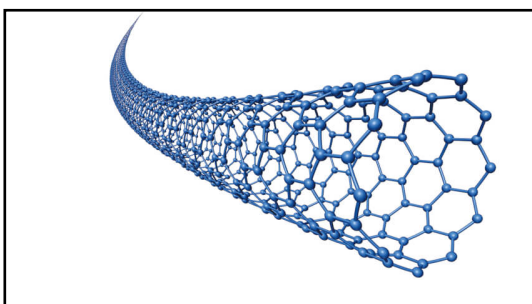
記憶メモリやトランジスタ（電子スイッチ）と呼ばれる機械パーツはより小さく、より大きな容量を持つようになる。動力であるエンジンも極小化する。内蔵されるプログラム（コンピュータ）、全てのパーツが小さくなり、機能は超高性能化する。それらすべてを内蔵するボディも極小化する。それらナノ製品を作る機械設備や工場も極小化する。街に工場ができるのではなく、マンションの一室で事足りるかもしれないし、もしかしたら机の上だけで完結するかもしれない。ナノ製品がどれほどのサイズまで小さくなるかという「想像できないほど小さくなる」のである。そして前述のナノマシン（生物と無機物両方の性質を持つ）がナノ製品に搭載されていれば、自己増殖、修復ができるため半永久的に壊れることはなく、朽ちることもないマシンが誕生する。

ナノマシンにも欠点がある。それは「**適応力が無い**」ことだ。ナノマシンはいわば高秩序で超効率的な工場である。ナノマシンを構成する原子は原子同士の結びつきが非常に強く、後から間に原子を付け加えたり（機能の拡張）、順序を入れ替えたり（機能の修正をすること）が困難なのだ。学習機能があったり、自動でアップデートしてさらに便利になったりとはいかないのである。収納できる原子の数も限りがある。一つの機能を足せば別の機能を失う。「マシン」であるため増殖（コピーを生み出す）ことはできるが交配（進化する）ことはできない。

## 繊維産業：カーボンナノチューブ

今すでに作られているナノ製品で有名なのは「**カーボンナノチューブ**」である。簡単に性質を説明すると、炭素でできたネットを丸めてできた物質で、高い熱伝導性と耐熱性を兼ね備え、電気も通す素材である。そのため主に半導体や燃料電池として使用されている。「電気を通す世界一小さいチューブ」それがカーボンナノチューブ。

私たちが普段身にまとっている絹は、極めて細くありながら航空機用のアルミ合金に匹敵する強度を持ち併せる単繊維を縫い合わせてできている。一方でカーボンナノチューブはその絹の150倍の強度を誇るとされている。もしカーボンナノチューブで服を作ることができれば、決して破損することのない、着ていることを忘れるほど薄くて軽い服になるだろう。だが、実現は難しそうである。カーボンナノチューブには人体に健康被害を及ぼす可能性がある成分が検出されているためだ。日本では厚生労働省によって危険物質の一種に認定されてしまっている。



←カーボンナノチューブの分子構造イメージ

これで服を作ると縫い目のないつやつやなゴムスーツになるだろう

## 環境問題：エネルギー変換

「**光合成**」はエネルギー変換の最高のお手本である。植物の葉緑素は太陽光を受けると、それをまず電気エネルギーに変換する。そして化学エネルギーに変換するという二段階のプロセスがある。各段階の**変換率はほぼ100%**。一切エネルギーを無駄にしていることがわかる。植物には効率よく太陽光を吸収し、分解して構築し直し、自身に蓄える優れた分子ナノテクノロジーが備わっている。

光合成の仕組みをよく理解し、ナノテクノロジーに応用したものが太陽電池だ。そのエネルギー変換率は20%前後と植物には遠く及ばないが、さらに進化したナノテクノロジーで改良すれば有効な技術となることだろう。有害物質を吸収・分解し、無害化することで水質、大気、土壤汚染をより効率的に解決するマシンが生まれるかもしれない。

ナノテクは低エネルギーで高い生産率を有し、環境に対する負荷も極めて低い。既存の高エネルギーで効率性の低い技術や製品作りにナノテクノロジーが導入されれば、それだけでも環境問題の緩和につながる。

## 何もかもを極小化してゆけ

人類は長く、環境を無視した荒っぽい開発行為を続けてきた。チョーク一本を作るのに炭酸カルシウムの白い粉を大きな力と機械で圧縮し、高温で焼いて作ってきた。環境に大きな負荷をかけて作ったこのチョークは脆く、消耗品であるために毎日生産される。一方で自然が炭酸カルシウムで作りに出すのは固く、複雑な形の貝殻である。高秩序な分子配列でできたこの物質は強い圧力も高温も製造に必要ない。

資源問題、環境問題などの地球の持続可能性について考えるならば、自然のメカニズムに基づくナノテクノロジーを使うということは必然の選択だろう。環境に調和したナノテクノロジーは環境に対する負荷も、人類に対する負荷も、あらゆるものをナノスケールに極小化してくれる。これからのテクノロジーに必要なのは火力でも圧力でもなく情報だ。

しかしナノテクノロジーがなんだって実現できる夢の技術というわけでもない。理論の上では実現できても、実際的な要因でその通りにいかないこともある。原子の結合を阻害する宇宙線なるものもその一つ。ナノテクノロジーを扱う設備には莫大な資金がかかる。人間の頭脳の限界もある。何より理論の組み立てから実用化までがとてつもなく長い。理論に技術が追いついていかないのだ。それでも人間は日進月歩でナノテクノロジーを進めている。いまやナノテクノロジーの技術が使われない製品を見つける方が困難なほどだ。繰り返すがナノテクノロジーは夢のような技術などではない。私たちはすでにナノテクノロジーに囲まれて生活している。あなたがこの文章を読むために手にしているこのデバイスこそ、ナノテクノロジーの結晶だ。

「パソコンもスマホも君の体も全て、ナノテクだよ、気に入ったか？」



## 参考文献のみなさん

「ナノテクノロジーってなあに？」農林水産省  
<<http://www.maff.go.jp/j/syouan/seisaku/training/pdf/081225d.pdf>>(2019-08-15)

「世界を動かす技術に関する意識調査」日経BP社  
<<https://www.nikkeibp.co.jp/atcl/newsrelease/corp/20181030/>>(2019-08-18)

「ヤマザキマザック大口製作所をIoT化」日本物流新聞  
<<https://www.nb-shinbun.co.jp/10565/>>(2019-08-18)

「バイオチップ」AGC科学カンパニー  
<[https://www.agc-chemicals.com/jp/ja/fluorine/products/detail/use/detail.html?uCode=JP-JA-F019\\_6](https://www.agc-chemicals.com/jp/ja/fluorine/products/detail/use/detail.html?uCode=JP-JA-F019_6)>(2019-08-20)

J.ストーズ・ホール(2007)『ナノフューチャー 21世紀の産業革命』紀伊國屋書店

川合知二(2002)『ナノテクノロジー入門』オーム社出版局

日経BP社(2019)『世界をつなぐ100の技術』日経BP社

以上