

## 10 月 29 日連携講義 第 8 回は「材料は生きている—原子スケールでの材料の挙動—」工学部担当です 「ナノテクノロジー」とはどのような技術なのか？

### 単位の補助記号

$10^{12}$	→ T(テラ)
$10^9$	→ G(ギガ)
$10^6$	→ M(メガ)
$10^3$	→ k(キロ)
$10^0$	→ なし
$10^{-3}$	→ m(ミリ)
$10^{-6}$	→ $\mu$ (マイクロ)
$10^{-9}$	→ n(ナノ)
$10^{-12}$	→ p(ピコ)

中間考査明けの高大連携講義(第 8 回、工学部 保田英洋先生担当)は今注目のナノテクノロジーに関する話題を取り上げた講義です。

物理量を測る単位の代表は長さ([m]メートル)、質量([kg]キログラム)、時間([s]メートル)があげられます。例えば、太陽と地球の距離は 1 億 5 千万キロメートルだから、150,000,000,000[m]と書きます。このように大きな量では位取りのためのゼロが多くなって非常に分かりにくく、扱いに不便になります。このときに利用されるのが単位の補助記号です。この場合 150[Gm(ギガメートル)]と書けばよいのです。ナノテクノロジーのナノ[n(ナノ)]もそのひとつで、 $10^{-9}$ (10 億分の 1)を表す非常に小さな量を表すための単位の補助記号です(左表参照)。長さのナノサイズ、すなわち 1[nm](1 ナノメートル=10 億分の 1 メートル)とは、原子を数個並べた程度の大きさに相当する非常に微小な長さを表します。

「ナノメートルの世界」は、人間が住んでいる「メートルの世界」とは大きく異なります。メートルの世界では「ニュートンの運動の法則」が支配しているのですが、ナノメートルの世界では「量子力学」が支配する世界になります。そのため原子サイズの微小世界では物質に特異な性質が現れるのです。このような微小世界では不思議な性質が数多く現れます。電気を通さない絶縁物を電子が通り抜ける「トンネル効果」、「電子の波動性」、「光の粒子性(光子)」などが有名です。この世界を支配する法則「量子力学」は、20 世紀初頭(2000 年頃)に始まった新しい物理学の一つです。詳しくは述べませんが、高校物理では 3 年生になったときに量子力学の入口をほんの少しだけ学習します(物理選択者は楽しみにしておいてください)。また、科学分野の入門書として有名なシリーズ「講談社のブルーバックス」にも取り上げられています。

### 電子顕微鏡を使った材料工学(物性物理工学)の研究

今回の連携講義は工学部の先生が担当するので、理論的なことには深くは触れず、我々に役に立つ利用技術の話になるはずですが、今回のタイトル「材料は生きている」とあるように、「材料工学」(物性物理工学という名前でも呼ばれることもあります)の話です。高校生には想像しづらい名前ですが、金属(形状記憶合金など)、半導体(IC、LSI の素材)、絶縁体(セラミックスなど)などの素材の研究・開発を行います。全て先端技術で使われる素材の研究につながります。インターネットで保田先生の研究をのぞいて見ましょう。Google のホームページで検索キーワード欄に、「神戸大学」、「保田英洋」と入れて検索してみましょう。すぐに先生の経歴についての資料が出てきました。大阪大学工学部の超高電圧電子顕微鏡<sup>1</sup> 施設出身だったのです。筆者が大学院の 5 年間の研究<sup>2</sup> においてその超電圧電子顕微鏡を使っていた関係で頻繁に行き来していた、懐かしい施設(裏山で大きな竹の子が採れ、研究者の楽しみでした。吹田千里は竹林が多く、竹の子で有名な所でした)です(その当時の工学部でするので現在では大きく違ってもいいかもしれません)。

1 30 数年前、日立の創業??周年を記念して作られた当時世界一の電子顕微鏡(現在でも世界一かも)。この電子顕微鏡は加速電圧が 300 万ボルトで、放射線の  $\beta$  線に匹敵する程の高エネルギー電子を使う。電子顕微鏡の高さは 4 階建ての高さ位で、遠くから見ると、電子顕微鏡を操作する人が電子顕微鏡の付属品に見える程でした。電子顕微鏡阪大工学部のオープンキャンパスで高校生に公開しているようですので、機会があれば見に行ってください。

2 超高電圧電子顕微鏡の超高エネルギー電子で金属原子を弾き飛ばし、金属の結晶格子が崩れてゆく様子をリアルタイムで観察し、結晶格子が崩れてゆく過程、崩れた結晶が再構成されてゆく過程を通して、素材の放射線に対する耐性のアイデアを探る基礎研究。軽い原子である Al 原子なら 20 万ボルトで加速された電子で跳ね飛ばせる(1 部屋に入る位の小型の電子顕微鏡でも OK) のですが、Au 原子などの重い原子を跳ね飛ばすには速度の速い(大きな運動エネルギーを持つ)電子(超高電圧で加速された電子)が必要になるのです。

# 電子顕微鏡で何が分かる？ 小さなものが見えるのは当たり前！ 最高性能電子顕微鏡では、原子1個まで見ることが出来る！

電子顕微鏡で何が見える(分かる)のか？ 電子顕微鏡の第1の長所に「解像度が高く、微細な構造が鮮明に見えること」があげられます。光学顕微鏡は生物の細胞観察などでだれでも触れたことがあると思います。このタイプの顕微鏡は、観察するために「光」という波を利用しています。そのため、光学顕微鏡の解像度(細部まで判別できる能力、分解能ともいう)は波長(0.5マイクロメートル程度)サイズが限界(波の回折現象によるため)になるため、最高拡大率は1000倍程度が限界になり、それ以上拡大しても像がぼやけてしまうこととなります。したがって、細胞の概形は見えるが、細胞の細部は鮮明には光学顕微鏡で観察できないこととなります。すなわちぼんやりとした細胞像しか見えないこととなります。では、生物の教科書の写真のような鮮明な細胞像を観察するには(高い解像度の像を見るためには)、「短い波長の波を使う顕微鏡」を作ればよいこととなります。光より短い波長の波とは、どのような波なのでしょう？

ナノの世界は量子力学の世界であり、粒子である電子も「波」の性質を現します。このときの電子の波<sup>3</sup>の波長は、原子の大きさよりもずっと短い波長になります。この「電子の波」を使えば、理論上、原子サイズまで解像度が上がるはずですが、現実には、電子顕微鏡で原子1つ1つを見ることも出来てしまうのです。最近の生物の教科書の細胞の写真は、電子顕微鏡の写真が多くなっており、細胞の細部まで鮮明に見えています(生物の教科書をご覧ください)。

## 電子顕微鏡は、見ている組織を構成する「元素」が分かる！

小さな構造が分かると次に知りたいことは何か？ それは、「その構造が何で出来ているか？」です。いわゆる、元素分析という技術が必要になります。

原子に電子を衝突させると、原子から、原子特有の波長の光が出るのです。ネオン原子に電子を当てると赤い光が出る(ネオンサインの原理)。水銀原子に電子が当たると緑色の光や紫外線がでます(蛍光灯の原理)などがそれにあたります。量子力学の理論によると、原子の周りを回る電子の軌道の相違により、原子から放出される光の波長が異なることが分かっています。原子から放出される光を調べることで原子を判別することが可能になるのです。この技術を、「蛍光分析法」といいます。

電子顕微鏡で観察している部分(微細組織)には、観察するための電子が当たっています。そのため電子顕微鏡で観察している部分の原子から光(X線や紫外線)がでてくるのです。この光の波長を測定することで、観察している組織の元素が分かるのです(蛍光分析法)。電子顕微鏡で観察している部分は非常に小さい領域です。通常の分析法(化学分析)では到底不可能な微細な組織の構成元素が目で見えて、それを確認しながら分析可能になるのです。

## 電子顕微鏡の弱点とはなんだろうか？「スルメ」を見て「イカ」を想像すること！

「スルメ」と「イカ」の違いは何だろうか？元は同じものですが、「イカを干物にしものがスルメである」ことはだれでも知っていることです。電子は真空中でしか自由に動きません。水は真空中では存在できません。共存できない2者を扱うのですから、電子顕微鏡では水分は大敵です。生物の電子顕微鏡写真はすべてスルメ状態の生物の写真なのです。生きたままの細胞を観察するには、電子顕微鏡は不利<sup>4</sup>なのです。生物の電子顕微鏡写真などは、最初に水分を他の物質で置換し、薄くスライス(電子が通る厚さ)した上で、像にコントラストをつけるため、金属を蒸着したり、帯電防止などの処理を行ってきれいな像を得ているのです。きれいな電子顕微鏡写真には撮影のための試料作りに多くのノウハウが隠れているのです。研究者の積み重ねの苦勞は影に隠れて、きれいな研究結果だけしか表からは見えないのです。生物選択者の皆さん、研究者に感謝！(志)

3 ド・ブロイの物質波理論(1924年)。原子サイズの世界では粒子である電子も波の性質を現す。速度を $v$ [m/s]、質量を $m$ [kg]とすると、粒子が波になったときの波長は  $\lambda = \frac{h}{mv}$  ( $h$ はプランク定数といい  $6.63 \times 10^{-34}$  [Js])

4 真空中で水分が気化しないようにカプセルに封入し、そのカプセルを通して電子を透過させることができれば、生きたままの電子顕微鏡写真が撮れることとなります。透過能力の高い電子(超高電圧の電子)を使う超高電圧電子顕微鏡がそのような観察においてその力を発揮するのです。