

マイクロ・ナノスケールの世界をのぞいてみよう

1. はじめに

みなさんは東京ディズニーランドに『マイクロアドベンチャー』というアトラクションがあったのをご存じですか？このアトラクションは、イマジネーション研究所にて天才ザリンスキー博士が巻き起こす事件を様々な映像・音声・体感技術を駆使して、私たちに驚きと興奮と笑いを提供してくれるものです。その内容をもう少し詳しくお話すると、物質を小さくする光線が誤って会場内にいる観客にあたってしまう人間がマイクロ化されることを擬似的に体験できるというストーリーになっています。マイクロになってしまった人間の目を通して広がる世界って、どんなふうに見えるのでしょうか？

それでは、科学技術の力をかりたマイクロアドベンチャーの旅に出発しましょう！

2. ミクロな世界を見るために

ミクロな世界を探検するために何が必要でしょうか？人間を小さくするためのマイクロマシン、それとも小さなモノを拡大できるビッグライトのようなドラエものの道具でしょうか。どちらとも現実には無理ですね。ということは、人間自身の大きさを変えないで、『特殊なメガネ』を通してミクロな世界を見ることを考えましょう。

人間の目はわずかな色の相対的な違い(色ムラ)を見分ける点においては非常に優れています。小さなモノを見るという点ではどうでしょうか？極端な話ですが、みなさんは原子を見ることができますか？一般に二つの線、または点が離れていることを認識できる限界を解像度とよびます。私たちの生活において、新聞などの小さな活字を見るためにはルーペや虫眼鏡を、遠くの風景を眺めるには双眼鏡を、池や河川に生息する微生物を観察するためには光学顕微鏡を利用することは多くの方がすでに実際に体験されていることでしょう。光学顕微鏡を使った場合でも解像度はたかだか1 ミクロン($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{m}$)程度です。それでは、解像度はどのようにして決定されるのでしょうか？

解像度は観察に用いる光の波長と深く関係しています。ヒトの目、ルーペ、虫眼鏡、光学顕微鏡のいずれをとってみても、使用する光は太陽または蛍光灯(白色光)からの光です。暗闇でモノが見えないのは光がないためです。人間の目で見える光の波長範囲(可視光領域)は380 nm から 780 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{m}$)といわれています。また、光の色と波長との間には密接な関係があります。たとえば、短波長(380 nm)側では紫色に、長波長(780 nm)側では赤色に見えます。大自然がつくりだす雨上がりの虹を思い浮かべてください。

太陽を光として利用すると観察できる世界の大きさはおのずと限られてしまいます。それでは、もっとマイクロな世界をのぞくためにはどのようにすればよいのでしょうか？その答えは「電子」を光として使うのです！電子は粒子として振る舞うばかりでなく、ときには波としての性質も持つのです。

3. どうしてマイクロな世界がみられるの？

私たちがモノの形状を観察するとき何が必要でしょうか？三つあります。それは、太陽または蛍光灯などの光、モノ、人間の目です。それぞれ、光源、試料、検出器に相当します。このなかのいずれかひとつでも欠けると人間はモノを見ることはできません。

光源に太陽ではなく電子を利用する「電子顕微鏡」によってマイクロな世界を観察できます。質量が軽い電子は高速になると粒子性と波動性の二面性がでてきます。電子の特性を最大限に利用したものが電子顕微鏡といっても言い過ぎではありません。どれぐらい小さなモノが見られるか（解像度）は光の波長に関係すると述べました。電子の波長は電子を加速するエネルギー(電圧)によって変化させることが可能です。電子の波長 λ (Å, $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$)と加速電圧 $E(\text{V})$ との関係を示します。

$$\lambda = \sqrt{\frac{150}{E}}$$

上式より、電子を加速する電圧が高くなるにつれて波長が短くなることが理解できます。電圧の大きさによって電子顕微鏡は二種類に大別できます。低電圧タイプの走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope, SEM) と高電圧タイプの透過型電子顕微鏡 (Transmission Electron Microscope, TEM) です。TEMの方が小さなモノを見るためには優れています。しかしながら、TEMで観察する試料を作るには非常に手間と時間がかかります。その点、SEMは観察試料の作り方が簡単で光学顕微鏡よりもマイクロな世界を見ることに適した装置といえます。もしかしたら、みなさんの高校にも走査型電子顕微鏡があるかもしれませんよ。



図1 走査型電子顕微鏡 (SEM)

4. ミクロアドベンチャーに出発だ！

今、みなさんは走査型電子顕微鏡(図 1)というマイクロアドベンチャーに必要なパスポートを手に入れました。それでは、電子顕微鏡という「電子が見えるメガネ」を通してミクロの世界をのぞいてみましょう。どんな世界がみなさんを待ち受けているのでしょうか？

4. 1 髪の毛のキューティクル

みなさんの髪の毛は健康でしょうか？髪の毛の健康状態を調べるためのバロメータとしてキューティクルがあります。私たちの目を通して髪の毛の色、長さ、太さなどは分かりますが、キューティクルまでは見ることはできません。髪の毛について、ちょっとサイエンスしてみましょう。髪の毛の構造は図2のようになっています。髪の毛の中央部にあるコルテックスは柔らかいタンパク質で構成されています。コルテックスを保護するために硬いタンパク質（ケラチン）であるキューティクルによって表面が覆われています。髪の毛の傷みの原因は物理的なブラッシングによる摩擦や化学的処理であるパーマやヘアカラーなどによってキューティクルがはがれ落ちることにあります。キューティクルが痛むと髪の毛の滑りが悪くなり、つやがなくなります。さらに、中心にあるコルテックスが保護されないため枝毛、切れ毛の原因となります。一度傷んだ髪の毛の部分は二度と修復することができません。図3に一般的なヒトの髪の毛をミクロな目で観察した写真を示します。これより、魚のうろこ状のキューティクルが重なりあった状態が確認できます。あなたのキューティクルは健康ですか？

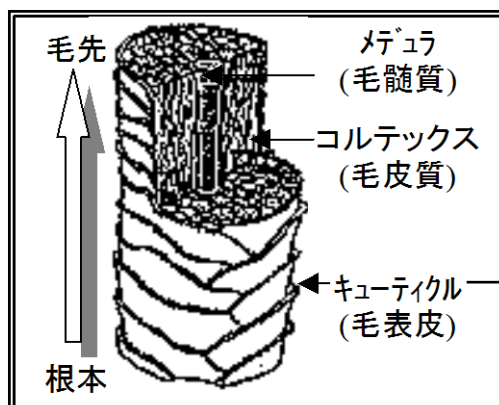


図2 髪の毛の構造

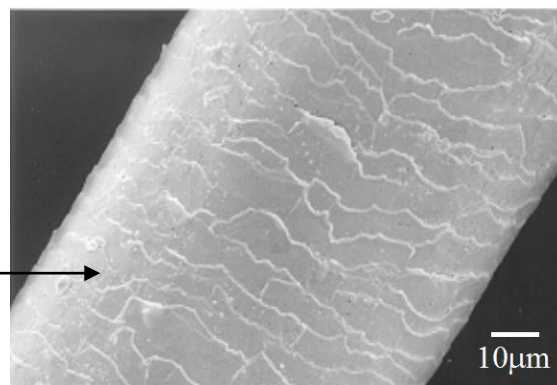


図3 髪の毛の電子顕微鏡観察写真

4. 2 宝石オパールはなぜ見る角度によって色が変わるのか？

みなさんは宝石をお持ちでしょうか？持っていないなくてもジュエリーショップなどで見たことがある方も多いでしょう。宝石にもたくさんの種類がありますが、宝石の一種としてオパールがあります(図4)。オパールの化学組成をみなさんご存知ですか？実は、オパールはほとんど二酸化ケイ素 SiO_2 からできているのです！みなさんご存知のように、 SiO_2 は窓ガラスなどの主成分ですね。オパールは、均一な大きさの SiO_2 の球状粒子 (150 ~ 450 nm) が三次元的に規則正しくならんでできているのです。実際にオパールのミクロ構造を電子顕微鏡によって観察した結果を図5に示します。このように均一な粒子が

規則正しくならんだ場所に白色光（太陽光など様々な波長から構成される光）を照射すると、七彩の遊色効果を得ることができます。このように球と空間とが整然と配列することで天然の回折格子が形成され、入った光が規則正しくならんだたくさんの球の表面で繰り返し反射された結果、特定の波長の干渉光が強調されて遊色（構造色）となって出てきます。SiO₂粒子の直径が150~450nm（ナノメートル）の場合には、可視光領域の波長（380~780 nm 程度）の光が遊色となって現れ、みなさんの目に美しく映るのです。



図4 オパールの写真

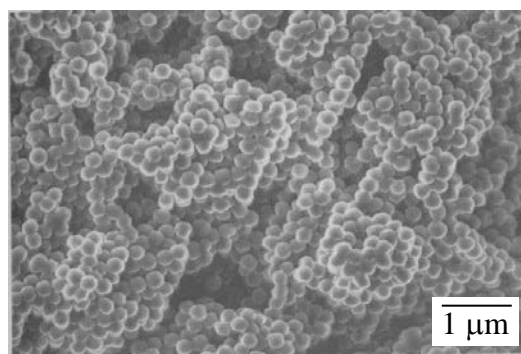


図5 オパールの電子顕微鏡写真

5. ミクロアドベンチャーに必要なもの

ミクロアドベンチャーの出発に必要なものをお知らせします。ミクロな世界に行くためのパスポートである走査型電子顕微鏡はこちらで用意いたします。みなさんに準備していただくものは二つあります。一つめは、みなさんがミクロな目を通して観察してみたいモノです。これにはサイズと重量の制限がありますが可能な限りチャレンジします。髪の毛や石やプラスチックでも結構です。二つめは、みなさんの『知的好奇心』と『やる気』です。以上のものを揃えてミクロアドベンチャーの世界に旅立ちましょう！当日、みなさんがミクロの世界で撮影された写真は記念にお土産としてお持ち帰りいただきます。