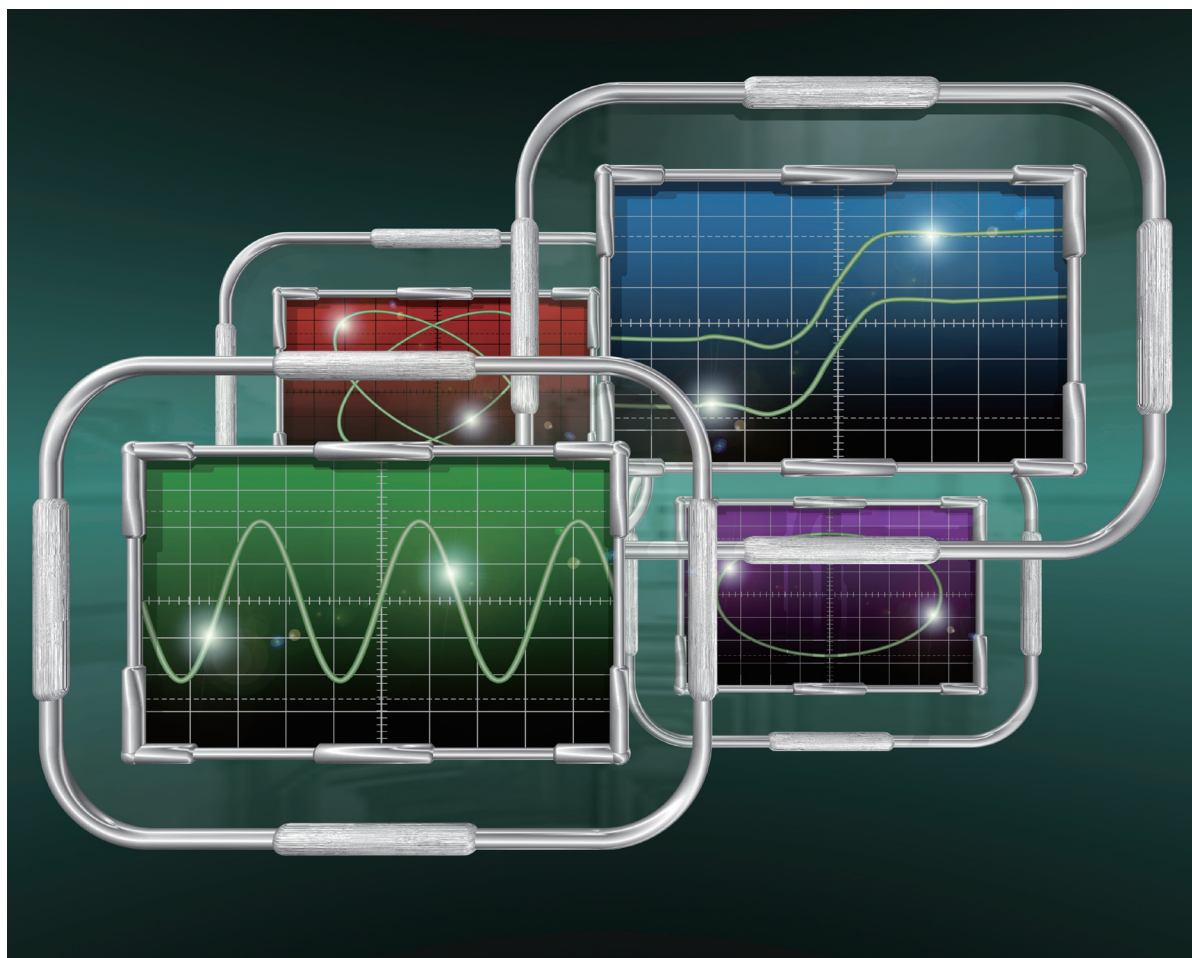


第6章 磁気と電気之力

テレビ、冷蔵庫、電子レンジ、洗濯機、携帯電話など日常生活には電気製品があふれています。パソコンや携帯電話を持つようになってから生活パターンが変わったという人も多いかと思います。電気製品はただ単に生活を便利にするというものだけでなく、我々の文化の一部です。電気の理解は、単に電気製品の仕組みの理解だけでなく、自然界の根本的な力の理解に必須になってきます。今からこの電気について学んで行きましょう。



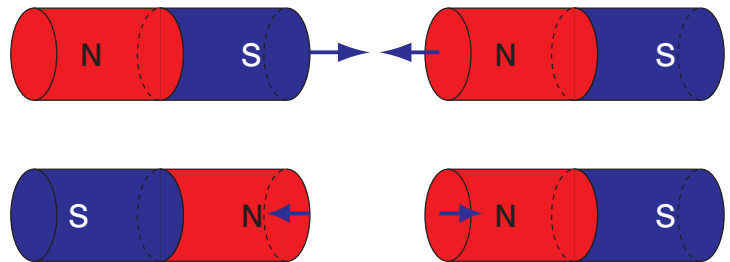
電気や磁気は希な力？

私たちが普通に暮らしていても、磁石は冷蔵庫に予定表などを貼り付けるくらいしか見たことがありません。また、電気の力も冬の静電気でいやな思いをすることくらいしかお目にかかりませんね。磁気や電気の力は本当に希な力なのでしょうか？

磁石

電気や磁気の現象について見てみるのにまず学校でなじみがある磁石からみてみましょう。

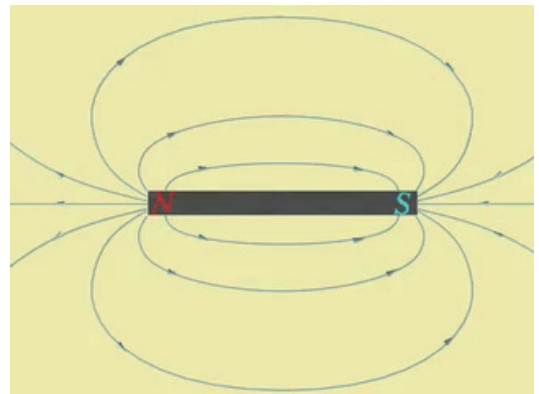
磁石は、磁石に力を与えます。磁石にも電気と同様に2つの極があります。N極とS極と呼びます。同じ極同士は反発しあい、反対の極は引き合います。



同じ極同士は反発し、異なる極は引き合う

地球は大きい磁石です。そのため、コンパスなどのように磁石を動かしやすいようにしておくと、N極は北極 (North pole) に、S極は南極 (South pole) に引かれ、向きを変えます。

磁石の場合、磁石を2つにわけてもやはり、N極とS極をもつ磁石が2つできます。”単独にN極のみやS極のみの磁石はありません。



このように、磁気の流れでは重力のように引きつけ合う力だけでなく、反発する力にもなります。

一方、重力では引き合う力だけでしたので、この点は重力と磁気の力が非常に異なる点です。

ウィリアム ギルバート (1544-1603)

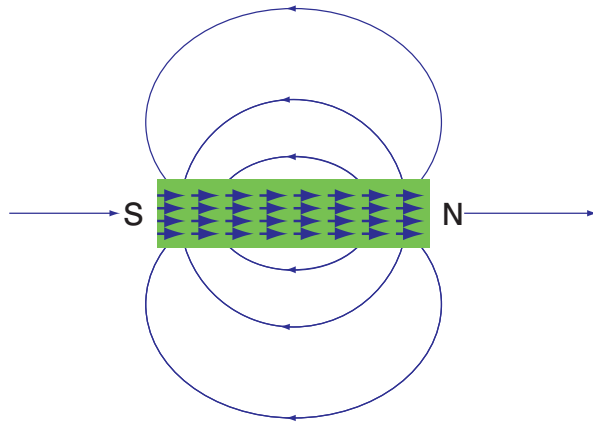
1569年にイギリスケンブリッジにあるセントジョーンズ大学を、医学博士として卒業しました。その頃は、ティコブラーエが天体観測を始めた時期であり、まだガリレオが幼い時期でもあります。彼は、医者として過ごしロンドンで最も著名な医者となり、ロンドンの医学大学の総長となります。1600年にはクイーンエリザベス1世の侍医となります。そして、1603年にコレラで亡くなります。



ギルバートは、仕事の傍ら磁気や電気の研究をします。そして、1600年に「De Magnete」という著作を発表します。この中で、磁石は壊してもいつも2つの極を持つ、双極であるということを発見しました。また、地球は大きな磁石であることも、球形の磁石を作って確かめています。また、静電気の研究により電気 (electricity) という言葉を作ったのもギルバートです。彼は、ガリレオに先立ち科学的手法を実践していたのです。

磁場とは？

磁石の周りに砂鉄を置くと、砂鉄が模様を描きます。これは、各点で砂鉄に働く力が異なるためにおこります。磁石の周りには見えない場ができており、砂鉄はこの場から力を受けていると考えます。このように、磁石などによる場を**磁場（磁界）**と言います。

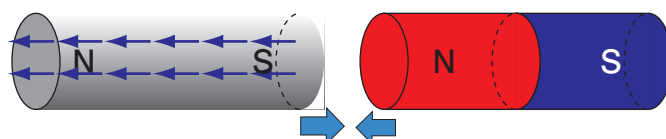


磁石の周りに磁場（磁界）が発生しそれによって砂鉄などが力を受ける。

磁石を細かくしていくと？

磁石は2つに割ってもN極とS極のある磁石です。それでは、どんどん細かくしていくとどうなるのでしょうか？最後は分子レベルになりますね。

磁石がどのようにしてできるかは実は非常に難しい問題です。正確には量子論が必要になってしまうので、ここではイメージだけでみていきましょう。原子を構成する電子や陽子などは、実はそれ自身磁石になっています。磁石同士は反対の極が引き合いますので、電子が2つある場合、通常なら全体として磁界は小さくなることが予想されます。通常の原子では、このように全体の磁界は小さくなっています。ところが、鉄、ニッケル、コバルトなどの金属では、余分の電子の磁界が打ち消し合わないで残ります。しかも、これは、金属全体で同じ方向を向いた方が安定になります。原子の分類からいったら、元素全体の中では鉄、コバルト、ニッケルなどの磁石になる元素の数は少ないのです。しかし、地球上に存在する元素の中では、鉄など非常に多く地中にあるので、磁石は地殻内に非常に多く存在するわけです。特に化合物として常温で磁石となっているものがありこれが永久磁石と呼ばれています。また、鉄は磁石に引きつけられますがこの仕組みは鉄では分子の磁石の方向がそろっていませんが、外からの磁場によって同じ方向にそろうからです。こう言われてもわかりにくいので次に詳しく説明しておきましょう。



鉄も本質的に磁石だが、分子レベルでの磁石の方向がそろっていない。外部からの磁場によって分子の磁石の向きがそろい、磁石となる。

鉄の中は戦国時代

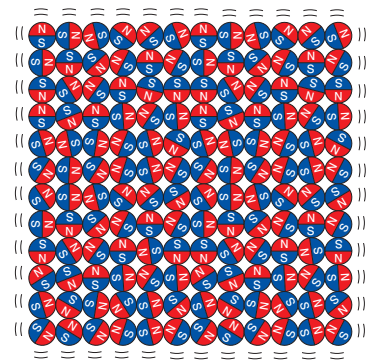
戦国時代には、武田信玄、上杉謙信、北条氏、尼子、などそれぞれの強い大将のもとに地方が統一されていき、長い間群雄割拠の時代が続きました。そこで織田信長などの大きな力を持ったものが現れると、全体が統一されます。そして統一される力が弱くなってくると、再び戦国の世になり、新しい勢力が生まれます。これは、中国の春秋戦国時代などに見られるようにどこの国でも起こっている現象です。長い目で見れば世界では今も続いていると言えるでしょう。磁石でも同様のことがおこっています。

まず、非常に温度が高い場合を見てみます。各原子の磁石の向きを矢印で示してみます。すると熱によって振動しているので各原子の磁石の向きがバラバラになります。この状態では全体でも磁石となっていません。

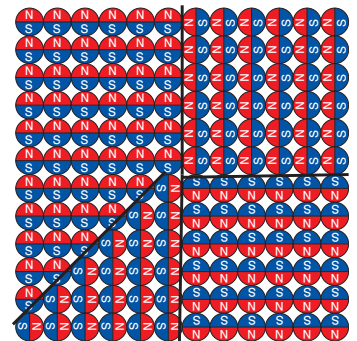
次にある程度温度が低くなると隣あうもの同士が同じ向きでそろっていけば安定なので、最初にそろったグループの周りに同じ方向でそろっていきます。様々な場所で同じ方向にそろっていき、これを**磁区**と呼びます。通常では磁区にあるそれぞれの磁石の方向はバラバラで全体としては磁界は弱くなりやはり磁石ではありません。常温の鉄ではこのような状態になっています。そして、外から磁界がかかると、その磁界の方向にすべての原子の磁界がそろい、磁石となるのです。その方向は外からの磁界と同じ方向になるので、磁石にくっつくというわけです。また、磁石からはなすと、熱による振動などでそれぞれの方向がわかれ、再び群雄割拠の時代にもどり、それ自身の磁界は小さくなっていくのです。このようにして、磁石でない鉄は、磁石にくっつくようになるのです。

鉄や化合物の結晶の構造によっては、電子のスピン間の力が強くなり、通常温度での熱の振動でも磁石の方向がかわりにくいものになります。このような物質が**永久磁石**です。このような永久磁石でも温度を上げていくと磁区が形成されるようになり磁石ではなくなってしまいます。また、鉄でもかなり冷やしていくと、外からの磁場無しでも自分自身で向きがそろい、自発的に磁場を発生させます。このように、鉄と永久磁石の違いは、常温で自発的に磁場を発生させるかの違いだけなのです。

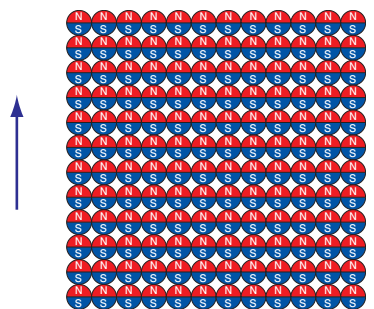
磁鉄鉱や永久磁石など、温度が高くなると磁区を形成し、磁石としての性質をなくしてしまいます。この温度を**キュリー温度**と言います。ちなみに、この発見者のピエールキュリーは、ラジウムなどの発見で有名なキュリー夫人の旦那さんです。たとえば、磁鉄鉱のキュリー温度は585℃です。



ホットな混沌時代



磁区 群雄割拠時代



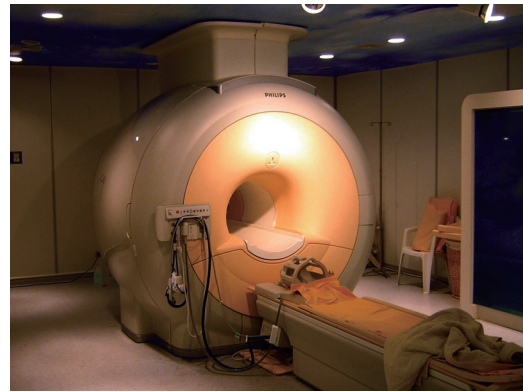
外からの磁界による天下統一

核磁気共鳴画像法（MRI）

電子が磁石であるのと同様に、原子核も小さな磁石となっています。この性質を利用して体内の物質の情報を得るのが**核磁気共鳴画像法**（magnetic resonance imaging, **MRI**）です。MRIは、現在検査機器として開く用いられています。

患者は非常に強い磁場の中におかれます。すると体内の核子はその方向にそろいます。この状態で特定の振動数の電波の吸収により核子の磁場は、ちょうどブランコをブランコと同じ周期で同じ方向に押していくとだんだんふれ方が増幅されていくように核子は回転を始めます。この回転によりまた同じ振動数の電波を放出しますので様々な位置から強度を計ることにより位置と濃度を特定していきます。その物質のこの回転の周波数は核子の種類によって異なりますが、医療用には主に水素を検出します。これは体内には多くの水が含まれており、水は水素を含むからです。

CTなどエックス線を利用する検査では放射線被曝の問題があり多くの回数の検査はできません。一方、MRIでは放射線被曝の問題がないといった利点があります。しかし、一般に検査時間は長くなり、また費用も高くなるなどの欠点もあります。



MRI



水分のあるところを明確に造影する

磁石を持った生物

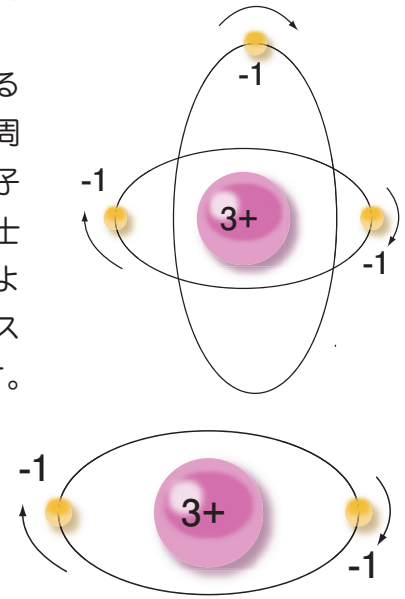
磁石で方向を感知するのは人間だけではありません。磁気を感じて方向を知ることができる生物が存在することがわかったのは1975年のことです。単細胞のバクテリアの一種で体に磁石を内蔵しておりそれにより方向を完治することができます。北半球ではN極はわずかに下向きです。したがってこれにより水の中の上下を感知して進むことができるわけです。

その後、鳥などでも地磁気を利用して方向を決めていることが報告されています。たとえば伝書鳩に磁石をつけてとばすと、地磁気の方角を見ることができないので戻ってくるのが困難になることが報告されています。

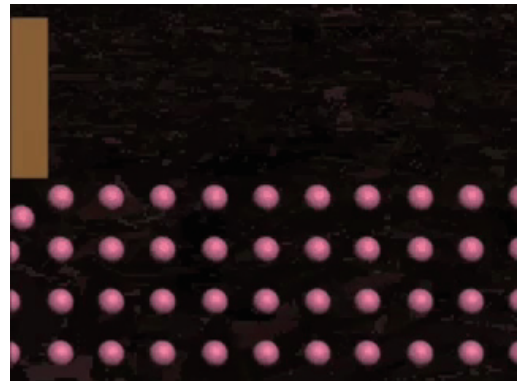
電気の力は？

さて、磁石についてみたので今度は電気の力について見てみましょう。

電気の力も磁気と同じように、引く力もあれば反発する力もあります。原子はプラスの電荷を持つ原子核とその周りをまわる電子でできていることは知っていますね。原子核と電子は電気の力で引き合っています。また、電子同士は反発しているし、原子核同士も反発しています。このような性質は電荷によって、区別されます。原子核はプラスの電荷を持っていて、電子はマイナスの電荷を持ちます。プラスの電荷同士やマイナスの電荷同士は反発して、プラスの電荷とマイナスの電荷は引き合います。一方電荷がゼロの状態では引き合いません。そのため、プラスとマイナスが引き合い、全体として電荷のない中性の状態になろうとします。



物質は、分子の集まりでできています。そのため、中性の状態から電子がはがれた状態はプラスに帯電しており、余分に電子が付いた状態がマイナスに帯電していることになります。物質はそれぞれ、電子の放出しやすさや電子の受け取り安さが異なるため、2つの物質をこすり合わせたりすると多かれ少なかれ電子が移動して帯電します。これは化学ではおなじみのイオン化傾向の違いから起こるものです。摩擦による振動で電子を落としやすい分子があり、これを受け取りやすい分子もあります。このため、これらを擦りあわせると摩擦の振動で電子が振り落とされる原子があり、帯電するわけです。



電荷の保存とは？

原子は中性でいる状態が安定した状態です。この中性の原子には、陽子の数と同数の電子があり全体で中性になっており、他から電子が近づいてきても引き合う力は弱いものになります。また、電子がはがれた状態はプラスの電荷を持ちますのでプラスイオン、電子が余分についたものをマイナスイオンと言います。これらは、化学ではおなじみの用語だから知っている人が多いでしょう。

通常では、電子は突然生まれたり消えたりしません。また、陽子も同様です。したがって電子や陽子が消えないので全体の電荷は一定です。これを**電荷の保存**と言います。

後でみるような原子核の反応などでは電子が生まれたりすることがあります。そうした変化でも全体の電荷は保存しています。電荷の保存は、素粒子レベルでみても基本的な法則の一つなのです。

クーロンの法則とは？

ニュートンの万有引力の法則によると質量の物体と質量の物体がある距離だけ離れているとき、お互いに引力が働いた。この力の大きさは

$$\text{重力} = \text{万有引力定数} \times \text{質量 1} \times \text{質量 2} \div \text{距離の二乗}$$

でした。このニュートン定数は非常に小さな数だったことも思い出しましょう。

また、距離に関して逆二乗の法則が成り立ちます。これは、ランプの明るさと距離の関係と同じでした。

実は、2つの電荷の間に働く力も同様の法則に従います。つまり、**お互いに働く電氣的な力の大きさは、それぞれの電荷に比例し、距離の二乗に反比例する**のです。

電荷の粒子と電荷の粒子が距離だけ離れたところにあるとき、その間にはお互いに

$$\text{電気の力} = \text{クーロン定数} \times \text{電荷 1} \times \text{電荷 2} \div \text{距離の二乗}$$

という力が働きます。これをクーロンの法則と言います。また、重力と異なり、お互いの電荷が共にプラスやマイナスのときには反発する力となります。

国際単位系での電荷の単位は**クーロン**です。この電荷の単位はメートルなどと同じで歴史的な理由でできています。したがって、自然界の本質を用いた単位というわけではありません。1クーロン (C) は電子 6.24×10^{24} 個の電荷のことです。逆に言うと、電子1個の電荷は 1.6×10^{-19} クーロンです。こうすると、1クーロンとはかなり大きな電荷の単位であることがわかります。比例係数であるクーロン定数は、非常に大きな数です。1Cの電荷をもった2つの物体を距離1m離れておいたときにお互いに働く力は、9000000000Nとなります。これを見ると、電気の力が非常に大きい力だとも言えますが、逆に1Cというのは非常に大きな電荷だとも言えます。日常生活では1Cなんていう電荷のものはそのままでは存在できません。たとえばマイナス1Cなんていう電荷が近くにあれば、電子が外に飛び出す力が非常に大きいので、周りの空気中の分子に衝突し、電子がはがれてきて電子が外に逃げて行きます。

このように電気の力は強いので、ほとんどの物質は陽子と電子の数が等しく、中性の状態にあります。もし電子が足りなかったりすれば、プラスの電荷となり、マイナスの電荷である電子を引きつけ中性の状態になろうとします。たとえば、地球など惑星がほとんど中性なものそのためです。また、化学などでもイオンが出てきますが、たとえば純粋でのイオンの数は全体からみればほんのわずかですし、摩擦などで起こる静電気の電荷も非常に小さいのです。

例題

水素原子の電子に働く電気力は、電子と陽子に働く重力による力の 2.2×10^{39} 倍である。電子と陽子の距離を変えることにより、重力による力のほうが、電氣的力よりも大きくすることができるか？

どちらも距離の二乗に反比例するので力の比は距離によりません。よって重力の方を大きくすることはできません。

この例題で重力の方が小さい力だというのは一見日常生活の感覚に合わないような気がするでしょう。それは、私たちの受ける力は重力が圧倒的に大きいからです。しかし、これは地球が非常に大きな質量を持っているからでしたね。

ベンジャミン フランクリン (1706-1790)

アメリカ合衆国を作った最も中心的な人物の一人。アメリカ独立宣言を起草した5人のうちの一人として知られます。印刷業で成功し、政治家、外交官、科学者、発明家でもあります。

フランクリンは、マサチューセッツ州ボストンで生まれました。

電荷にプラスの電荷とマイナスの電荷の概念を取り入れました。また、電荷が保存されることも示しました。

たこを用いた実験で雷が電気であることを実証したとされますが、非常に危険であり本当にたこに雷が落ちたのかは明らかではありません。彼は、避雷針を発明したことでも有名です。



チャールズ クーロン (1736-1806)

フランスの土木技師であり物理学者。

パリの大学を出たあと、港の構築などに従事します。土木技術者として各地を転々としながらも研究を続けました。

摩擦などに関する研究もあるがやはり、電荷の間に働く力が距離の二乗に反比例するという、クーロンの法則の発見者として有名です。ただし、人柄についてはあまり伝わっていません。



電子が移動できる物質とできない物質がある

物質によっては、内部の電子が簡単に移動できる物質があります。鉄などの金属は、電子がそれぞれの原子から離れて、金属全体にわたって動くことのできる電子があります。このような自由に動ける電子を持つ物質を**導体**と言います。また、逆に自由に動く電子を持たない物質を**不導体**または**絶縁体**と言います。紙、ゴム、プラスチックなどがその例です。注意しなければならないのは、絶縁体は、決して電荷を持てない物質ではなく、電荷を持ってもそれが移動できにくい物質のことです。たとえば、帯電したゴムや下敷きなどを手に持っても手の方に電荷が移動できないので、帯電したままです。これらは絶縁体でも電荷を持つことができるわけです。むしろ、静電気の現象が起こるのは不導体に多いのです。導体と不導体の区別はあくまで物質中を移動できる電子があるかどうかの問題であって、原子に電子が余分にくっついたり、足りなかったりしても、その状態の電子が移動できない場合もあるわけです。

一方、帯電した金属を手で持つと、手を通じて電子が移動して金属の電荷が無くなってしまいます。また、シリコンやゲルマニウムなどは、電荷が移動しにくいができないわけではないといった物質もあります。回りくどい言い方ですが、要するに導体と不導体の中間の物質で、これを**半導体**と言います。この半導体はエレクトロニクスのメインの物質として活躍するので聞いたことがある人も多いでしょう。この半導体については後の章で説明します。

例題

導体と絶縁体について間違いなのは？

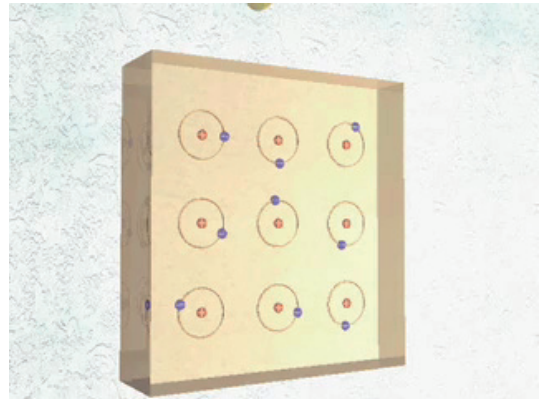
- (A) 導体では自由に移動できる電子があり、絶縁体にはない。
- (B) 導体では電荷が移動できるので帯電するが、絶縁体では帯電できない。
- (C) 導体も絶縁体も帯電できる。

答えは (B) です。

絶縁体では、絶縁体内を電子が移動できないだけであって、帯電はできることに注意しましょう。

中性なのに電荷に引きつけられる？

通常の分子は中性です。では電荷を持ったものを近づけると引きつけられないのでしょうか？実は引きつけられてしまいます。それは、分子が全体としては中性でも、プラスの電荷の陽子とマイナスの電荷の電子からなるからです。たとえば、図のように水素原子にプラスの電荷を近づけると、マイナスの電荷を持つ電子は近くに寄ってきてプラスの電荷の陽子は反発して離れようとしています。すると、クーロンの法則より電荷からの力は近い距離の方が大きな力が働くので、電子の引力のほうが、陽子への反発力をまさり、電荷をもった物体に引かれることとなります。絶縁体では、自由に移動する電子はありませんが、図のようにプラスの電荷を近づけると、やはりプラスの部分に近づくにつれて、プラスの電荷が遠くに行きます。このように、同一の物体の中にプラスの部分とマイナスの部分ができることを現象を**分極**と言います。このように、絶縁体は電気を誘発されるので、**誘電体**とも言われます。



水などの分子では、図のように電子が酸素よりも分布しているので、最初から分極したような構造をしています。このため、水に電荷を近づけると比較的大きな力で引かれることとなります。



例題

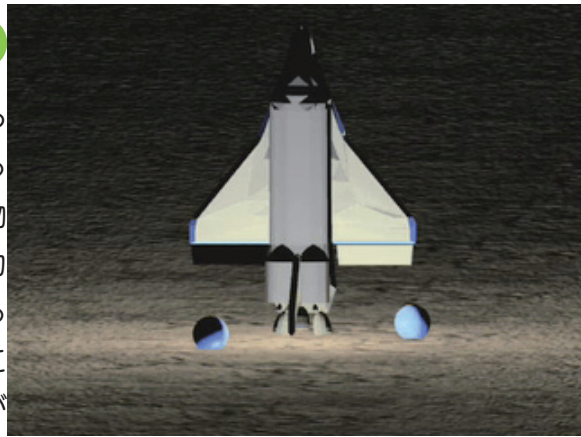
水道の蛇口から出ている水にプラスの電荷を近づけると引きつけられた。それでは、マイナスの電荷を蛇口の水に近づけると？

プラスの電荷が近づくとだと水のマイナスの部分が近づき引きつけられ、プラスでは－の部分が引きつけられます。よってやはり引きつけられるのです。



電場（電界）とは？

ロケットが発射されようとしているところを想像してみよう。ロケットが噴射しているため、この近くの物体には風力が働きます。物体の風に垂直な面積が2倍になれば2倍の力を受けるでしょう。また、ロケットから離れるほど風が弱まるので、ロケットからの距離によって力の大きさが変わります。この力は何が



原因でしょうか？これはそもそもロケットが空気を噴射していることが原因ですから、ロケットの噴射による風の場合、電場も同様に力を伝える場である。

ト自身からの力と言えます。また、ロケットのエネルギーが噴射の原因を作っています。もう一つも見方は、力は、風そのものが与えてくれているので、物体に衝突してくる空気による力と言えるでしょう。ロケットの噴射の力により、空気が移動し、この風による力となります。

それではどちらがよりよい考え方でしょうか？さてこれを、風を媒介とするのではなく、ロケット自身の力とすると、すこし困ったことが起こることがあります。それはたとえば、ロケットが上空にあがって行き、地上の風がやんでいく場合をみてみます。この場合、ロケットからの力とすると、上昇するとすぐにそのやめた影響が物体まで伝わるはずですが。一方空気による力とすると、ロケットからの空気の移動には時間がかかるため、風力が少なくなるのに時間差が生じます。このためこの情報は一瞬のうちに移動することはありません。従って、離れたところからの力というよりも、その点で直接力を受けると考えたほうが都合がよい場合が多いのです。

この考え方を電気の力について応用してみましょう。電荷を持ったものがあると、その周りの物体には力が働きます。その力の大きさはその点の電荷に比例します。そして、電荷から離れるとその力は小さくなりますね。この電荷があることにより、その周りに"風"に対応するものを導入するのが**電場（電界）**です。つまり、**電荷を持つ物質同士が力を受け合うのは、まず電荷がその周りに電場を作り、その電場によって電荷を持った物体が力を受けるのです。**この考え方の優れた点は、電荷が移動していくときにあります。たとえば、二つの逆の電荷をもった物体がその引力で結合して電荷がゼロになった場合を考えてみましょう。クーロンの法則などをそのまま使いますと、電荷がゼロになった影響は一瞬にして周りの物体に伝わることとなりますが電場ではそれは電場の変化が伝わっていくことで情報が一瞬に伝わることはありません。また、このことは情報が一瞬にして伝わらないというアインシュタインの相対性理論からも必要な考え方なのです。

これで少しはわかったような気がしましたか？わからない人が多いと思います。それは実はほとんどの人がそうなのです。電場を理解するには通常非常に時間がかかるのが普通です。そのため、何日間かけて理解に努めてみましょう。

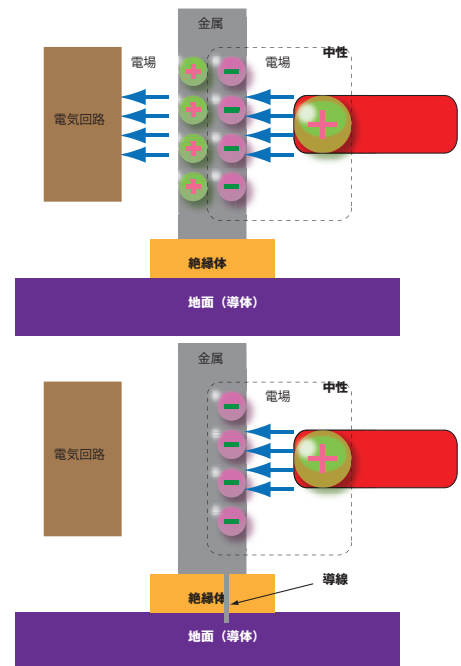
電場はその点に1Cの電荷をおいたときにそこに働く力として定義します。力が大きさと方向を持つので、それに比例する電場も大きさと方向を持ちます。また、各点でに大きさも方向も異なります。

高級CDプレーヤーやアンプが金属で覆われているわけ

不導体のときには、電荷を近づけると分極することを見ました。それでは、導体に電荷を近づけるとどうなるのでしょうか？導体にプラス電荷を近づけると、自由に動ける電子が近寄ってきます。それでは、導体内の電場はどうなるのでしょうか？導体内に電場があると、その位置にある電子は動くことができます。その動きは図のようにちょうど中性になるようにします。すると元々導体は中性でしたから、プラスの電荷は元の電荷からできるだけ遠ざかって分布します。これがまた電場を作り出してしまいます。

この状態で、導体と地面を導線で結んでみます。すると、外の電荷による電場に引きつけられたマイナスの電荷で中性になっていますが、内部のプラスの電荷は余分で、お互いに仲が悪く反発し、できるだけ離れるために地面に逃げて行きます。すると中性の状態だけが残り、左側の電場はなくなります。

このように、余分の電荷を逃がすために地面と接触させることを**接地**と言います。また、このように外部と内部の電氣的影響を遮断することを**電氣的遮蔽**と言います。今は、外部の電場が一定の場合に見ましたが、外部の電場が変化している場合も同様です。電場の変化によって、導体内の電子が移動し、導体内部の電場をゼロにするようにがんばるのです。このように、導体で覆うのは、11章で詳しく調べる電磁波の遮蔽にも使えます。アンプやCDの高級なものはアルミなどの金属で覆われているのは外部の電氣的雑音(ノイズ)をシャットアウトするためです。



静電遮蔽の原理

電荷によって引かれて逆の電荷が現れ、全体で中性の状態にする

平賀源内 1728 年（享保 13 年） - 1780 年（安永 8 年）

日本の蘭学者であり、作家でもあり発明家。現在の香川県に生まれました。大阪や京都で学び江戸に出て本草学や漢学を学びます。江戸において物産展を企画して名を広め、たびたび長崎などに遊学し蘭学を修めました。1770 年に長崎で破損した静電気発生器（エレキテル）を購入し、復元しました。これは元々オランダで宮中の見せ物や医療用具として用いられていたものと言われています。



平賀源内に限らず、江戸時代には日本人は蘭学書などを通じて本物を作り出してしまう能力が発達したようです。たとえばペリーが日本に来てから、蒸気機関で動く蒸気船を3つの藩が相次いで制作に成功しています。これは世界的に見ても驚異的な能力と言えるでしょう。

電氣的位位置エネルギー（ポテンシャルエネルギー）とは？

重力による位置エネルギーを思い出して見ましょう。物体をある高さまでつるすと。このとき、つるすのにした仕事に相当する位置エネルギーが生まれます。実際もしそこから落とすと落下して運動エネルギーに変わり、この運動エネルギーにより、床を振動させ、音や振動などのエネルギーとなります。また、くいを打ち付けるなどの仕事もできますね。

電気の力の場合も重力と同様に考えることができます。電荷同士は引き合っているのも、プラスの電荷からマイナスの電荷をある位置まで引き離すのに仕事します。このように、電氣的力に逆らってした仕事によるエネルギーを**電氣的位位置エネルギー**あるいは**電氣的ポテンシャルエネルギー**と言います。

重力の位置エネルギーは、重力が一定であるためその位置に固有であるため位置エネルギーと言う言い方は感覚と合っています。しかし、電氣的な力はいくらでも変えることができるので、位置エネルギーは、電荷の分布を変えることによってその点に到達するまでの仕事が変わってしまいます。そのため、位置エネルギーでも必ずしも位置に固有の量ではありません。また、位置エネルギーの単位は仕事の単位なので、やはりジュールですね。

電圧って何？

ある電場があるとき、電荷を持った粒子が受ける力はその電荷に比例します。そこで、仕事は電荷に比例することになるので、位置エネルギーもまたその電荷に比例します。電場の概念と同様に、その場所に置く電荷の大きさを離れた概念を導入しておくとう便利です。すなわち、**1クーロンあたりの位置エネルギーを電位または電圧と言います**。つまり

$$\text{電位} = \text{電氣的位位置エネルギー} \div \text{電荷}$$

です。電荷の単位を**ボルト (V)**と言います。これは電池の単位でおなじみですね。この単位がなぜ電池と結びつくのか簡単にみてみましょう。電池は化学反応により、電子をある位置エネルギーところまで押し上げるポンプのような性質を持ちます。このとき電位差は、1クーロンあたりの位置エネルギーなので、

$$\text{電圧} = \text{電子の位置エネルギー} \div \text{電子の電荷}$$

となります。また、別の言い方をすると、電子 6.24×10^{18} 個分の電氣的位位置エネルギーが電圧なのです。

高電圧は危ない？ 風船が5000V？

電圧と電氣的エネルギーは別の概念です。たとえば、風船をこすると風船の表面はマイナスに帯電して数千ボルトになります。しかし、これはすごいエネルギーであるわけではありません。実際にたまっている電荷はマイクロC(10-6C)ほどです。したがって、さわって電気を逃がしたときのエネルギーはミリジュールほどでエネルギーは少ないのです。一方では、家庭用電源では、100Vでも非常に多くの電荷が移動できるので極めて危険です。電気は非常に危険なのですが、通常は絶縁体などでコードが覆われているので逆に電氣的エネルギーを私たちはあまり意識していませんね。しかし、電気は電車を動かしたりするエネルギーがあるのです。**電氣的エネルギーには、電位だけでなく電荷の量に関係することに注意しましょう。**

雷

自然界の静電気として最大のものは雷です。雷では約1ギガボルトの電圧が生じて、雷のエネルギーは平均して500メガジュールにも及びます。雷の通るところの空気は瞬間的に10000度にも達し、これは太陽のおよそ2倍の温度です。

雷は比較的身近なものでありながら、その発生のメカニズムには様々な説があり、現在も決着していない課題です。皆さんも興味があれば調べてみてください。



電気は希な力？役に立つ力？

さて今まで見てきたように、日常生活では一見電気の力を感じません。また日常生活で役に立つ応用があるのか考えると空気清浄機くらいしか思い浮かびません。しかし、私たちは実は電気の力はいつも感じています。たとえば、机の上を手で押しつけます。もし電気の力がなかったら、手は机をすり抜けてしまいます。それは、分子間力は電気の力でおき、分子間力により抗力が生まれているからです。また、摩擦力なども分子間力ですので電気の力と言えます。

それ以前に、電気の力がなければ分子も作られませんので私たちは存在していません。電気の力は役に立つかどうか以前に私たちの存在そのものにかかわっている力なのです。

ルイージ ガルバーニ (1737-1798)

ガルバーニは、イタリアボローニャの薬科学校を卒業し、医学教授となりました。専門は主に生物学です。1766年頃、死んだカエルの解剖の際、切断用と固定用の2つの異なる金属でできたメスをカエルの足に入れると、まるで生きているように足が動くのを発見しました。また静電気によりカエルの足が動くことをも確認しました。これにより動物学と電気の関係が発見されたのですが、解釈は今と異なります。これは、動物電気と名付けて、動物自身が作る電気だと思ったのです。しかし、電流を作るきっかけが生物の研究であったわけです。



アレッサンドロ・ボルタ (1745-1827)

ボルタは北イタリアの町で、まずしい5人兄弟の末っ子として生まれました。彼は知能遅れの子供と思われていました。4才になるまでしゃべることができなかったのです。しかし、いざしゃべることが出来るようになっていくと、今度は逆に何カ国語も話せるようになっていきます。彼は10代の頃から電気に関する実験を始めます。そして電気をためることの出来る装置を発明しました。その功績によりパヴィア大学の物理学教授となります。



彼はガルバーニの実験の話を聞くと、すぐに同様の実験をします。ガルバーニは生物的立場に立って研究をしましたが、ボルタは金属に注目したのです。そしてすぐに電気を引き起こすのは2つの異なる金属であることを確認します。そしていろいろな金属を様々な溶液につけて電気を調べます。また何枚も重ねていくとより強い電流が得られました。そして現在ボルタ電池として知られる電池を発明したのです。

ボルタの最大の功績は、それまで静電気などでしか得られなかった電気を、いつも得られるようにした電池を発明したことでした。これにより、電気をを用いた研究が簡単にできるようになり、電気分解による新たな分子の発見などが続いたのです。現在でも携帯電話の充電機などで皆さん肌身はなさず携帯している人が多いでしょう。彼の名は、電圧の単位であるボルトの起源となっています。

フリードリヒ・ヴェーラー (1800-1888)

ヴェーラーは、有機化学の先駆者であると言われます。

そこ頃、生命現象には通常物質に働くのとは別の力、“生気”または、“生命力”が働き、それにより体の生命現象に関する有機物質が作られるものと思われていました。一方物理現象では、重力や電磁氣的な力しかありませんでした。つまり、生気の力は、重力や電気の力などとは全く別のもとの思っていました。

ヴェーラーは、尿素を作り出そうとがんばっていたのですが、最初思っていたのとは別の物質を入れてしまいました。しかし、意外にもそれで尿素が出来てしまったのです。このことによって、生命現象には、特有の力などはないことが示されました。現在では、自然界のほとんどの有機物質を人工的に作ることも可能となりました。



自然界に存在する力は、次の4つのみが確認されています。重力、電磁気、後で説明する核子の崩壊にかかわる弱い力と、そして核力の元になる強い力です。一方では、生命現象に関わる有機物質の数はDNAの持っている命令の数も驚異的です。生命の起源に関してはまだ謎が多いですね。しかし、心霊現象などは再現性が一切確かめられていません。そのため現在それらの現象は、超自然現象と呼ばれ、自然科学ではありません。

電流ってなに？

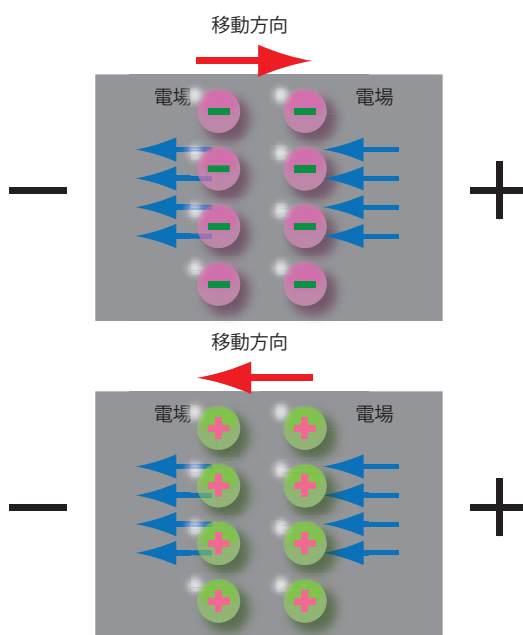
熱の物理の章では、温度差があると熱が伝わっていくことを見ました。熱は高い温度から低い温度に伝わります。同様の現象が電気にも起こります。

導体の両端のに電位差があるときには、一つの端からもう一つの端に電荷が移動します。熱の現象と表面的には似ていますが、原因は違います。これは電位差があると、電場があるため、電子が力を受けるからです。以下に一定の電場がある場合を見てみましょう。もう一度電圧とは何かを思い出してみます。電圧は1 C（クーロン）の電荷を移動させるのに必要な仕事でした。仕事は力と距離の積であることを思い出してください。また、電場とは1 C（クーロン）の電荷にかかる力でしたので、

$$\text{電圧} = 1 \text{ C の電荷への仕事} = \text{電場} \times \text{距離}$$

となりますね。

いずれにせよ、電圧があるところには必ず電場があり、そこにある電荷には力が働きます。金属中では電子は居心地のよい状態で、真空中に出ようとすると、大きな力で引き戻されてしまいます。そのため、空気中には出られません。しかし、導体では、電場による力で電荷が移動していきます。このように電荷を持った物質が移動するのを電流と言います。本当は電子が流れるのですが、電子が流れると電子の流れの下流にはマイナスの電荷がたまっていきます。これは、プラスの電荷が電子と逆向きに流れても、中性な状態からプラスが失われますので、同じところにマイナスの電荷がたまることになります。このため負の電荷を持つ電子がマイナスからプラスに向かって移動するのは、正の電荷がプラスからマイナスの電位の方向に流れるのと同じです。このように、電子の流れの方向と電流の流れの方向が逆なので注意が必要です。



電子はマイナスからプラスに向かって移動する。正の電荷が逆方向に移動するのと同じ。

電流の単位は

電流の単位はおなじみのアンペア (A) です。1 A は、1 C の電荷が1秒間に移動するときの電流を表しています。電子で言うと、1 A は1秒間に 6.24×10^{18} 個のものの膨大な数の電子が移動した量になります。ただし、導体中にはアボガドロ数くらいの膨大な数の電子があるので、電子は1秒間に数ミリ移動するだけで1 A になります。

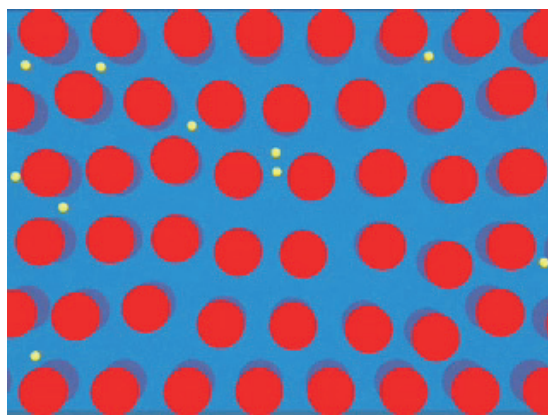
電流が流れても、導体は中性のままであることを注意しましょう。プラスの電荷の原子核と電子があり、電子が移動していますが、端から電子が補給されます。全体で移動しているだけなので中性になっているのです。このため、電荷による力は発生しません。1 C は電荷としては大きな力を生むことを見ましたが、電流により1 C の電荷が移動したとしても大きな電荷による力は発生しません。

電気抵抗とは？

一口に導体と言っても、電流が流れにくいものと流れやすいものがあります。

イメージするのが難しいのでまず川で考えてみます。川によって水の流れを妨げる石の量が異なりますし、水の量もことなりますね、また傾きもことなります。これによって、一般に同じ高さでも流れの速度が異なる。

導体内ではこの石の役割をしているのが原子です。原子は、じっとしていれば、電子は素通りできるところをなんの抵抗もなく通っていきます。しかし、実際には熱により原子は振動しています。つまり、空気の分子が熱により絶えず飛び回っており、**空気中に置かれた金属ではこの空気の衝突により、金属柱の原子は絶えず振動した状態にあるのです。**この熱振動により



熱的に飛び回る電子が、電場により曲げられ移動していく。

電子と原子が衝突して、電子の行く手を妨げます。電子はその場所の電場によって加速されますが、原子との衝突によってまた速度を落としてしまいます。そのため、電子の平均移動速度は電場の大きさにほぼ比例することになります。つまり電子の移動の平均速度は電場に比例します。先に見たように電場は電位差に比例し、また平均速度は電流に比例しますので、**結局電圧は電流に比例することになるのです。**

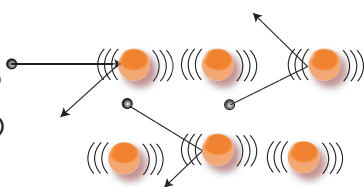
電気抵抗とは、1アンペアの電流を流すのに必要な電圧を言います。このため、より多くの電圧が必要な場合、抵抗が大きいということになります。

つまり、**電気抵抗**を電圧と電流の比として、

$$\text{電気抵抗} = \text{電圧} \div \text{電流}$$

とするとこの電気抵抗は、ほぼ一定の値となります。このように電圧と電流が比例するのを**オームの法則**と言います。

このオームの法則は中学でも習っているので当たり前に思ってしまうかもしれませんが、しかし、なぜ電子の移動にオームの法則が成り立つのかを理解するのが科学なのです。



温度と電気抵抗の関係は？

温度が上がると衝突しやすく

ほとんどの物体では、温度が高くなると原子の振動が大きくなり電気抵抗が大きくなる。くなるので電気抵抗が大きくなります。特に導体である金属などでは温度の上昇と共に電気抵抗が増加します。電気抵抗が一定というのは温度が一定の場合ですから注意してください。

電子部品の抵抗の役割は？

回路で電流を制御するために入れる電子機器を**抵抗器**と言います。つまり川で言うと流れの具合を制御するための水路の役割をします。



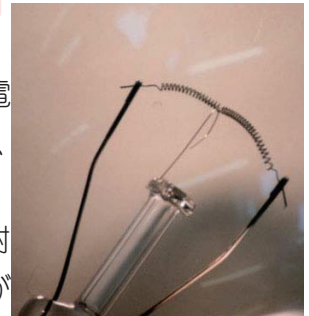
抵抗器

ジュール熱とは？

電気抵抗のある導体に電流を流すと電子が原子に衝突して、原子をより振動させました。原子の平均運動エネルギーは温度に比例するので、これは、温度が高くなることを意味する。このように、電子の電氣的位置エネルギー（ポテンシャルエネルギー）は、金属中を電子が移動すると原子の振動のエネルギー、つまり熱エネルギーに変わります。これを**ジュール熱**と言います。

ジュール熱を利用した電気製品は数多くあります。たとえば、電気ストーブは、抵抗の大きな導体に電流を流して発熱します。また、アイロンなどもこれに当たります。

白熱電球は、電球内の導体、タングステンを高温にして、熱輻射によって光を放射します。タングステンは、金属の中で最も融点が高く、溶けにくいので電球のフィラメントとして選ばれているのです。



白熱電球のフィラメント

デジタル式体温計

現在家庭用の体温計は、ほとんどデジタル表示されるものです。この体温を測る原理には、抵抗が温度によって変わることが利用されています。体温計の先にはサーミスタと呼ばれる抵抗がはいっており、これに一定の電圧で電流を流します。サイリスタの温度によって流れる電流の大きさが変わりますので、電流を測ることによって温度を知ることができるわけです。



デジタル式体温計は温度による電流の変化を利用。

電力とは？

抵抗などで消費されるエネルギーを見てみましょう。電流とは単位時間あたりに移動する電荷です。一方、電圧とは1Cの電荷あたりの位置エネルギーです。そのため、電荷がある電位差のところを通過して行くと、位置エネルギー＝電荷×電圧の分のエネルギーを失います。これは、電子の原子への衝突などで熱エネルギーや電子機器で行う仕事に変わります。したがって、単位時間あたりに電流×電圧だけのエネルギーを外に熱として放出するのは、これが消費されるエネルギーです。この量は単位時間あたりのエネルギーなので、以前出てきた仕事率、パワーと同じものです。電気がする仕事による仕事率を、**電力**と言います。つまり、

$$\text{電力} = \text{電流} \times \text{電圧}$$

となります。電力の単位は仕事率と同様ワットです。つまり

$$1\text{W (ワット)} = 1\text{A (アンペア)} \times 1\text{V (ボルト)}$$

となります。

たとえば、100ワットの白熱電球には家庭用100Vでは、 $100\text{W} = 1\text{A} \times 100\text{V}$ となりますので、この電球には1Aの電流が流れていることがわかります。電池などのように一定の電圧に抵抗をつなげた場合、電気抵抗が少ないほうが、電流が流れ電力を消費しやすくなります。なお、電力というのは、原子力などという言い方と同じですが、重力のような力の種類を意味するわけではないことにも注意しましょう。

電気のコードとして用いるにはどれがいい？

物質によって電気抵抗に差があります。電気のコードとして用いるには電気抵抗が少ない方がよいですね。そこで電気抵抗が一番小さいのはどれでしょうか？その前に、電気抵抗は物質による違い以外の要素もあるのでまずそれを見ていきましょう。

電圧は、電場と距離をかけたものでした。そこで長さが長いほど電場が小さいので、電子に働く力が現象して移動しにくくなります。つまり導体の長さが長いほど電気抵抗は増加します。また、導線の太さが太いと、電場によって移動する電子の数が増加しますので電気抵抗は減少します。また電気抵抗は物質によっても異なります。金属の中で一番電気抵抗が少ないのは銀です。次に、銅、金、アルミニウム、鉄などと続きます。この意味で電気のコードとしては、銀が最もいいわけですが、もったいないので使いません。通常は安価である銅が使われています。

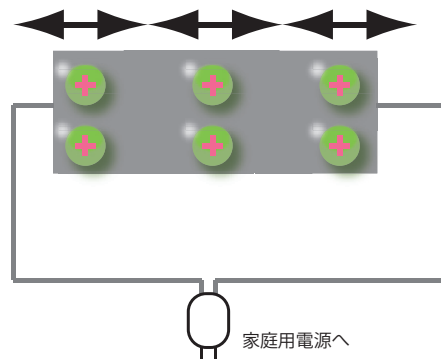
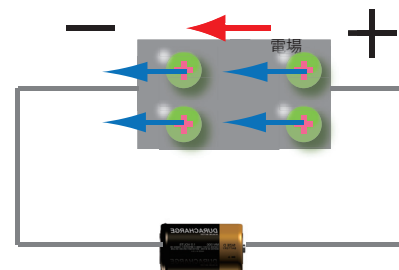
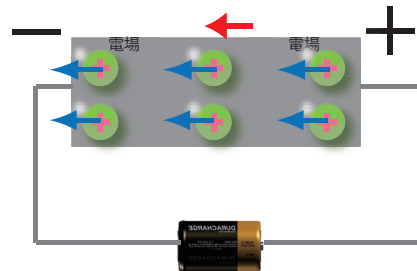
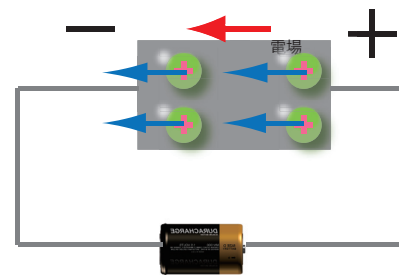
ちなみに、導体内では自由電子は非常に速く飛び回っているので、熱も伝えます。このため、金属で熱の伝わりの速いのも、電気抵抗と同じように銀、銅、金の順になります。金属にさわったときに冷たく感じるのは自由電子のためなのです。

直流と交流

電池などでの電圧は一定の方向を保ったままです。そのため、電流は一方方向に流れます。このように、一定の方向の流れを**直流**と言います。

一方家庭用電源などでは、電流の流れる方向が図のように交互に変わります。つまり、電子は同じ地点を中心として行ったり来たりしているだけです。このように、流れる方向が変わる電流を**交流**と言います。家庭用電源としては、関西では1秒間に60回方向が変わり(60Hz)、関東では1秒間に50回(50Hz)方向が変わります。

電子が行ったり来たりしているだけでは最初と最後がほとんどかわらないのですが、抵抗などで仕事をしないということはありません。交流で荒れ電子が移動すれば原子に衝突し、原子の動きを大きくして温度を上昇させることに注意しましょう。何事も抽象的に考えすぎずにイメージを持つようにしましょう。



交流

人間の体も電気回路？

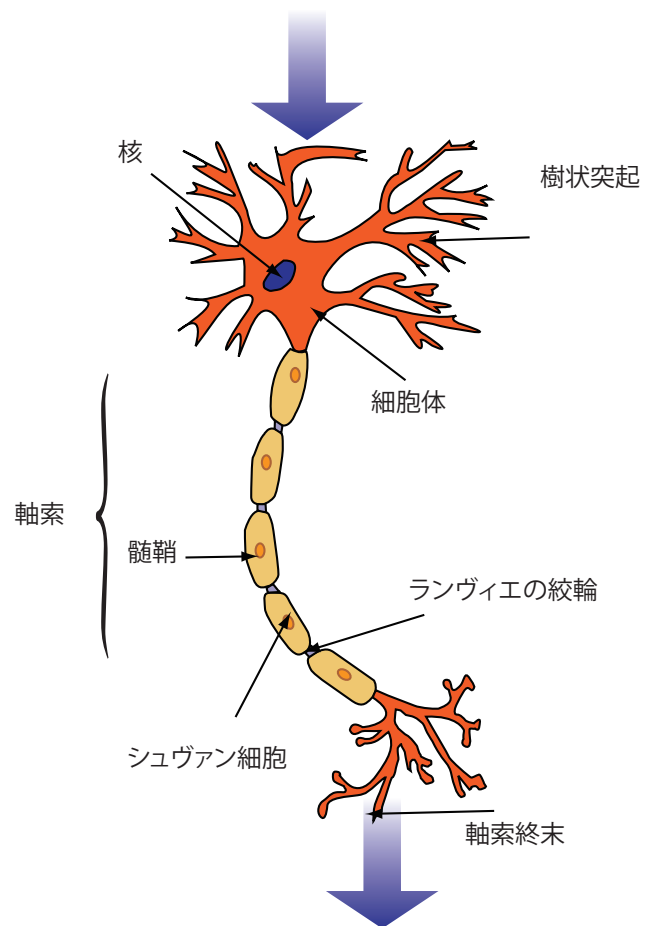
本を読んで情報を読み取ったり、歩いたり、すべての人間の運動は神経細胞の信号により制御されています。神経細胞は、体の中の情報を司り、脳の主要な構成物でもあります。

神経細胞には視覚、味覚や触覚などの人間の五感にかかわるものと脳からの命令を筋肉に伝えて体を動かす神経細胞などがあります。

神経細胞の信号は導体内の電子の移動によるものではありませんが、その電氣的信号の伝え方は非常に似通ったものです。人間の神経細胞の置き差は数ミリ程度から数十センチ程度であり、図のような構造をしています。神経細胞の端には樹状突起と呼ばれる部分があり、他の神経細胞からの信号を受けます。この信号を軸索と呼ばれる部分に伝えます。軸索を取り巻く構造は比較的複雑で、イオンの濃度の勾配を利用して信号を伝えて行きます。水面にボールを落とすと、水面が一定の高さに戻ろうとして、波として伝搬します。同様に、細胞内ではイオンによりマイナス数十ミリボルト程度に電位が保たれています。信号はイオン濃度の変化としても

たらされそれが波として伝搬していくのです。そして軸索の末端は分岐しており、シナプスと呼ばれる部分で伝達物質の放出と吸収により情報が伝えられて行きます。シナプスでは、活動の頻度が高いほど、伝達効率が高くなります。これは、記憶や学習に直接関係すると言われています。つまり、使用頻度が高い記憶はより反応がしやすくなるのです。

このように、生物の体の中の情報も電氣的な信号によって伝えられているのです。



神経細胞 ニューロン
電氣的信号を伝える

キーワード

磁場（磁界）、磁区、永久磁石、キュリー温度、MRI、電荷、クーロンの法則、電場（電界）、接地、電氣的遮蔽、電氣的位位置エネルギー、電位（電圧）、導体、絶縁体、半導体、分極、誘電体、電流、電氣抵抗、オームの法則、ジュール熱、電力、直流、交流