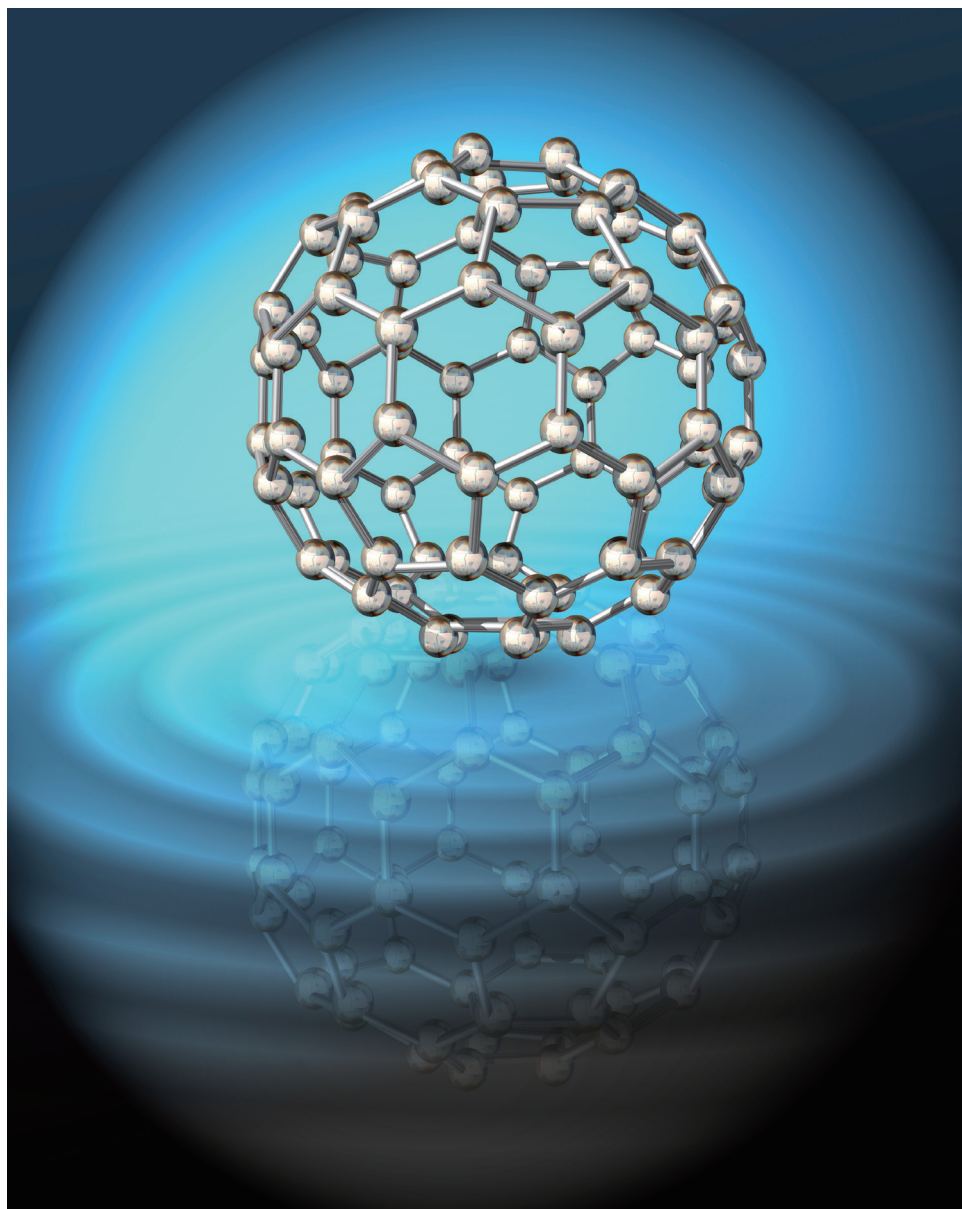


第13章 物質の性質と現代的素材

身の回りを見渡してみましょう。あなたは様々な物質の取り巻かれて暮らしているのがわかるでしょう。そのほとんどは100年前の日本にはなかったものです。古くからある、金属、木、朝などの衣類、陶器などをのぞけば、後は現代の科学技術により生み出されてきたものです。それらの物質には固有の性質があります。物質の性質は、原子間の結合により原子がどのように配置されているかによって決まっています。また中には半導体など非常に特徴的な性質を持つものがあり、その恩恵を受けて暮らしています。今回はこの物質の性質について見ていきましょう。



材質の性質は何が決めるか？

皆さんの身の回りには様々な物質があり、それぞれ別の性質を持っています。それらの性質を決めるのは何でしょうか？それは次の3つです。

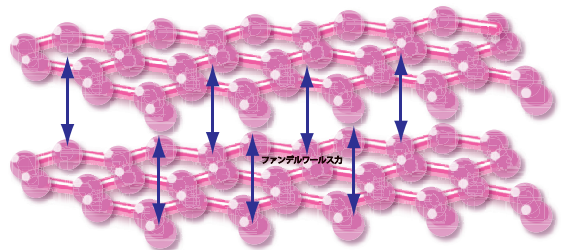
1. 材質が作られている原子の種類
 2. それらの原子の配置
 3. それらの原子の結合の種類
- です。

基本的にそれらの原子の間の力は決まっているので結合が決まればそれが安定な配置はおおむね決まってしまう。一般には多くの原子が配置されるので関連する電子や原子の数も膨大です。そのため、基本原理から出発して、できるだけ近似なしにしようとするればと膨大な処理能力を持つ計算機でその配置を予測する必要があります。しかし、いずれにせよ、**すべての物質はすべて基本的な力の原理に基づいているということを知っておくのは重要なことなのです。**生命体などのように物質を多くしていても電氣的な力や重力以外の力が発生することは再現可能な形では観測されたことはありません。

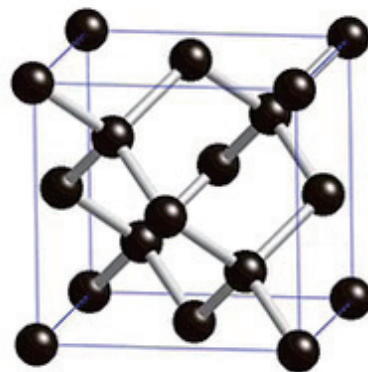
材質の強度と分子結合の関係は？

材質の強度とは、形を変えたときにそれに逆らう能力を言います。つまり、強度が大きいほど形を変えにくいわけです。形を変えにくくしているのは、原子同士の力であるので、強度は原子や分子間の結合の強さと関係しています。分子間の力が弱いほど柔らかい素材になっています。その意味でファンデルワールス力で結合している物質は壊れやすくなっています。たとえば、鉛筆の芯の材料である、グラファイト（黒鉛）がその例です。

一方、イオン結合は強固です。石や、ガラス、セラミックなどがイオン結合をしています。また、ダイヤモンドなどはすべての炭素が共有結合している結晶であり、非常に強固です。



グラファイト（黒鉛）

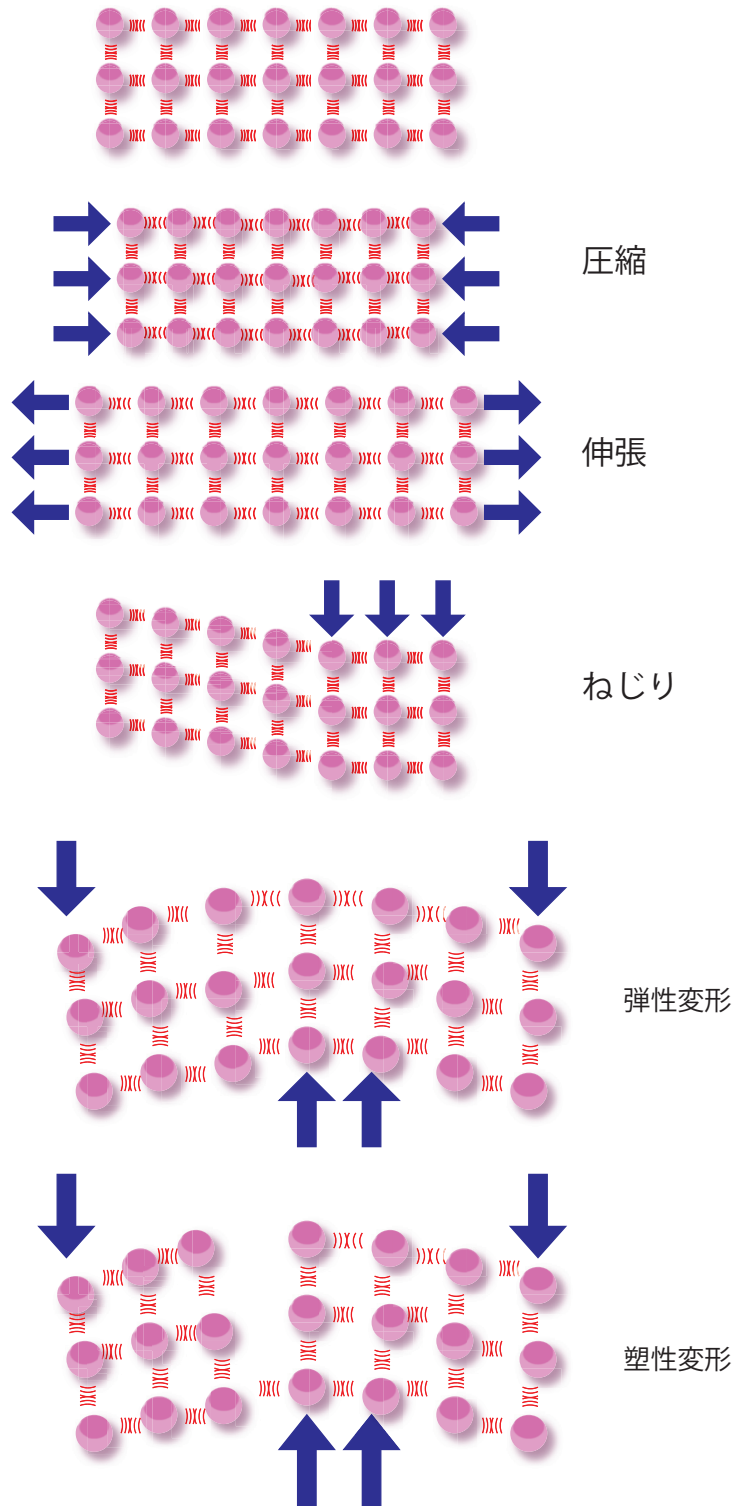


ダイヤモンド構造

変形強度の種類

物質の変形の仕方は大別して3種類あります。**圧縮**、**伸張**、そして**ねじり**です。ねじりはひねるだけでなく、曲げることも含んで良いでしょう。物質の辺境の強さは、それぞれの応じて強度があります。つまり、圧縮強度、伸張強度、ねじり強度となります。これらの強度は物質ごとに関連がないことは日常経験で見られます。たとえば、ロープなどは引っ張ると強い強度なのがありますが、ひねったり圧縮したりするにはあまり強い力を必要としません。また、食塩などの検証である岩塩なども圧縮したりすると強い力で押し返しますが、角をどこかにぶつけてひねるような力を与えると簡単に欠けてしまいます。同様のことがれんがでも起こります。

プラスチックの物差しなどを手で曲げると少し曲げたくらいでは、手を離すと元のまっすぐな物差しに戻ります。このように、元に戻る変形を**弾性変形**と言います。これは、元々分子間には分子間力が働いて、固まった状態にいるので、分子間が離れるとこれを引き戻して元の位置に戻そうとする力が働くためです。一方、物差しを思いっきり曲げてしまうと、元に戻らなくなります。これは、分子間があまりに離れてしまったため、その間に分子間力が働かなくなってしまうためです。このような変形を**塑性変形**と言います。棒が折れてしまうのもこの塑性変形です。どんな物体でも非常に強い力では元に戻らなくなってしまいます。この壊れてしまわないで元に戻る限界を**弾性限界**と言います。弾性限界が大きいほどその物質は元に戻るという意味で強いとも言えるわけです。



合金

日常では鉄やアルミなどの単体の原子だけでできた金属よりも多数の元素を元にした**合金**が使われています。ここではこのような合金の代表的なものを見ていきましょう。

真鍮 (黄銅, brass) は、銅と亜鉛の合金です。代表的なのが五円硬貨であり、トランペットなど楽器にもよく使われています。ブラスバンドの名前もこれに由来しているわけです。亜鉛の量を増すほど硬く、しかし脆くなります。適度に硬く、加工もしやすいので良く利用されています。

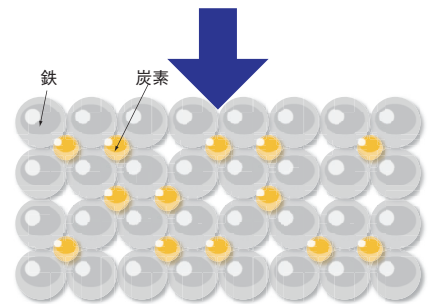
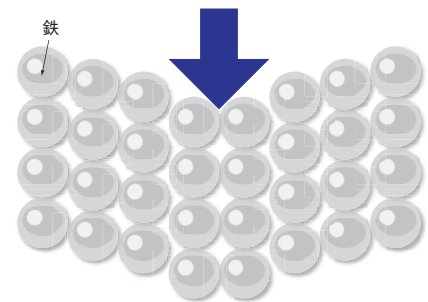
青銅 (bronze) は、銅とスズを含む合金です。十円硬貨は、銅、スズ、亜鉛の合金で青銅に分類されます。青銅というと青色を思い浮かべそうですが、これは銅が酸化して青くなった色をさしています。本来は輝く色をしています。歴史は古く、紀元前 3000 年くらいにメソポタミア文明で作られたのが最初とされています。

白銅は銅とニッケルの合金です。代表的なのが百円硬貨です。

次に鉄の合金を見ていきましょう。鉄単体では強度が少ないため鉄の合金は非常に良く使われます。鉄の合金を**鉄鋼**と言います。通常**鋼**というと炭素が少量混ぜられたものをさします。炭素は鉄に比べて原子サイズが小さく、そのため鉄の結晶の間に入り込み、分子間の結合を強固にする働きがあります。こうした点が合金の利点です。

また、**ステンレス**は鉄のニッケル、またニッケルとクロムとの合金です。ニッケルは酸化しやすく、そのため空気に触れるところで酸化被膜を作ります。そのため、鉄の酸化を防止しさびないのです。

アルミニウムの合金では**ジュラルミン**が有名です。Al-Zn-Mg-Cu の合金で、軽く丈夫なのが特徴です。アルミニウム単体よりも硬くなり、航空機材料に適しています。



鋼 炭素が入り込み強固になる

表面張力と毛細管現象

水の上にそっと1円玉を置くと浮かびます。また、細い管の端を水につけると内部に水が上がってきます。こうした現象も分子間力に関係します。

水の分子はお互いに引き合っています。水中にいる分子は四方の水と引き合っており安定ですが、水面の水の分子は上には引き合う相棒がいまないので、引き合うために水面から内部に潜り込もうとします。このために、水の表面積ができるだけすくないほうが安定なわけですが、逆に言うと、表面の面積を大きくするには力が必要になります。水を薄い膜にするとその膜には小さくするような力が働きます。これを**表面張力**と言います。水の上に1円玉を置きますと重さで表面の面積を大きくしようとするので表面の大きさを縮めるために水が1円玉を押し返し、水に浮くのです。水に石けんなどを入れますと、石けんが非極性分子で分子間力が弱いために表面張力が小さくなります。そのため、1円玉は沈んでしまいます。

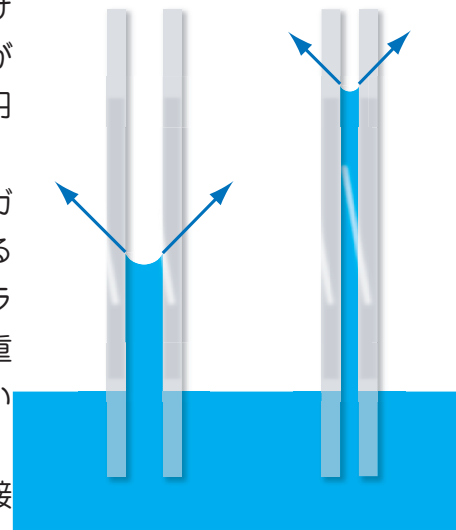
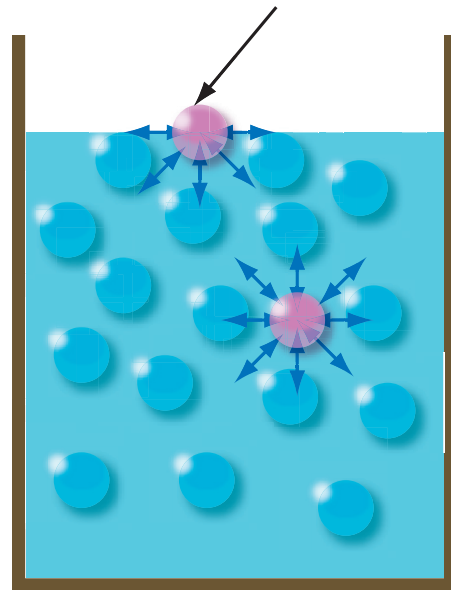
また、極性分子である水は、同じく極性分子であるガラスと引き合います。そのため、ガラスの表面にできるだけ伸びようとして、ガラスなどの細い管では、ガラス表面と水の分子間力により水が上昇します。これは重力と釣り合うまで上昇します。これを**毛細管現象**と言います。

毛細管では、表面張力の力は水の表面がガラス面と接触した分子がガラスと引き合うことによって起こります。このためこの力はガラスとの接触している部分の長さに比例します。これは管の半径に比例します。一方、持ち上がった水による重力は体積に比例しますので、管の面積と高さに比例します。これらの力の釣り合うところまで水面が上昇するわけです。管の半径を半分にすると、表面張力による力は、半分になります。一方、管の面積は半径の二乗に比例しますので、4分の一になります。よって、高さが2倍になると、重力も $1/4 \times 2 = 1/2$ と半分になり、釣り合うことになります。このように、**毛細管現象では、持ち上がる水面の高さは管の半径に反比例する**のです。

この毛細管現象は、植物が水分を葉まで運ぶのに重要です。

水銀は液体ですが、金属なので金属結合によりお互いに強く結合します。このため、ガラスの上に水銀を垂らすと、水銀同士の結合が、ガラスと水銀の結合よりも勝るので、丸く固まります。また水銀にガラスの管を入れると、水銀と大気の境の面は下降します。

下に引っ張られて
横の分子も引っ張る



水とガラスの引力で上に引っ張られる。細い管ほど上げる水の量が少なくてすむので水面が高くなる

物質の電気的性質

電流のところでも学びましたが、物質のことがわかってきた今、物質の性質を見直してみましょう。

導体

電流、つまり電荷の移動を許す物質を導体と言います。

金属では、電子を全体で共有して結合する金属結合をしていることを第11章で見ました。これらの電子は、量子論的には波であり、金属全体を飛び回っています。この共有している電子は導体内を自由に移動できるので導体となります。ただし、原子は熱により振動していますので、金属全体を飛び回っている電子は、金属原子に衝突したりしています。このため、電場の力で移動していく電子も衝突によって動きが阻害されることとなります。原子の振動の様子や原子の大きさは原子ごとに異なりますので、電気抵抗は物質によって異なるのです。

電気の伝導については、液体では固体とは少し様子が異なります。液体中では分子が比較的自由に移動できます。そのため、液体中にイオンを含むと、その移動により電流が流れます。たとえば、塩水では、ナトリウムイオンと塩素イオンがありますので、これらのイオンが移動して電流が生まれます。この液体中のイオンの移動は、生物にとっても重要な意味を持つことが後にわかるでしょう。

絶縁体

外から電場を加えられてもその力で電荷が移動しない物質を絶縁体と言います。分子同士がイオン結合をしている物質では、移動する余分な電子はありません。このため、イオン結合をしている分子は絶縁体です。たとえば、石や陶器、ガラス、また木などの有機化合物は絶縁体です。絶縁体の利用として最も身近なのは、電気コードの被膜です。導線がむき出しな状態だったら、非常に怖いですね。絶縁体の被膜があるからこそ私たちは安全に電気製品を使うことができるのです。

絶縁体でも、非常に大きな電場で、電子に非常に大きな力が働くと、電子は原子を離れてしまいます。このため、電流が流れてしまいます。

このように、絶縁状態が大きな電場によって破壊される現象を絶縁破壊と言います。たとえば、雷

では、通常絶縁体である空気が絶縁破壊を起こし

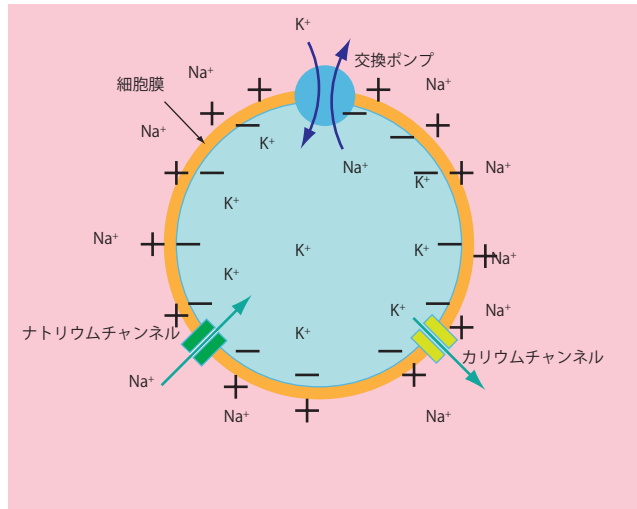
て、雲から地上へ電流が流れるのです。また、私たちの皮膚は絶縁体ですが、大きな電圧では、絶縁破壊を起こして体内へ電流が流れてしまいます。



生体内の電気信号の伝達

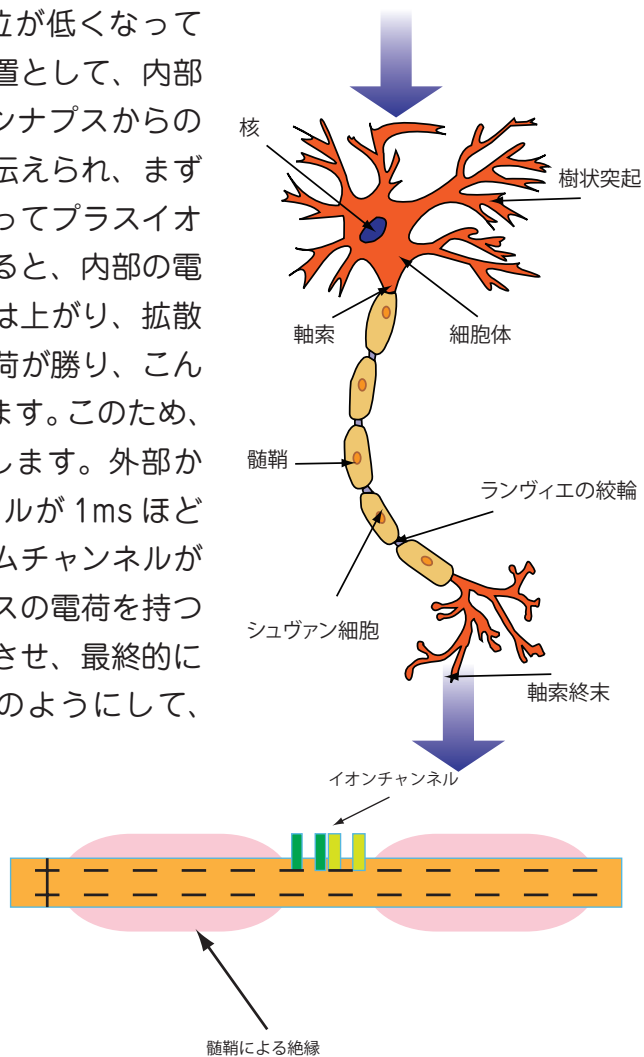
神経伝達については、電気の章で学びましたが、イオンの性質が理解できたところでもう少し詳しく見てみましょう。

細胞膜は、通常イオンなどを通しません。しかし図のように、細胞膜には、カリウムとナトリウムの交換ポンプがあり、外部からカリウムを取り込み、変わりにナトリウムを放出するという交換ポンプがあります。これにより、内部にカリウムイオンが多く、外部にナトリウムイオンが多い状態を作り出しています。このようにイオンを運ぶことにより、濃



度勾配により電位差を作り出しています。すなわち、内部の電位は外部に比べて70mVほど電位が低くなっています。つまり、外部の電位をゼロの位置として、内部の電位は-70mVです。神経細胞では、シナプスからの信号伝達物質が送られてくると、細胞に伝えられ、まずナトリウムチャンネルが開き、拡散によってプラスイオンであるナトリウムが流れ込みます。すると、内部の電荷が中和していきまので、内部の電位は上がり、拡散によって流れ込んでくるアトリウムの電荷が勝り、こんどは内部がプラスに帯電するようになります。このため、内部の電位はプラス40mVにまで上昇します。外部からの伝達物質では、カリウムのチャンネルが1msほど遅れて開くようになっています。カリウムチャンネルが開くと、今度は拡散によって外部にプラスの電荷を持つカリウムが放出され、内部の電荷を減少させ、最終的には再び、-70mVの電位に戻ります。このようにして、電荷が時間的に変化するという信号となります。

軸索の神経細胞は細長くなっていて、途中は髄鞘という部分で外部から電氣的に絶縁されています。これにより、電荷はちょうど導線を電流が流れるように移動し、髄鞘の間でイオン交換により、信号を弱めることなく伝達させる



ことができます。金属を伝わる信号は光の速さに近いのに対してこの信号のスピードは約10m/sです。随分遅く感じますが、イオンの移動にしては随分素早い工夫がされています。

人体に必至なカリウムがあなたを殺す？

カリウムは細胞内に豊富に存在しますので、カリウムは生物にとって必須の成分です。このため、植物の肥料として窒素、リン酸と並んで重要なものになっています。同位体であるカリウム40は放射性同位体であり、それを摂取することにより体内に取り込まれています。ただし、気にするほどではありません。私たちの周りには自然な放射線源が多いのです。



植物を含めて、細胞は必ずカリウムを含むため、私たちはカリウムが不足することはありません。しかし、味噌や醤油を多用する日本人にとって、ナトリウムは必要以上に摂取することが多いのです。塩化ナトリウムは、高血圧の要因になりますし、胃ガンの発生確率を増加させます。そのため、食塩の代替品として、塩化カリウムを食塩の代わりに使用することも健康上有利な点が多いのです。もちろんナトリウムも必須ですが、日本人の場合、味噌や醤油に含まれているナトリウムで十分な場合が多いので、塩として使うもには塩化カリウムがよいのです。塩化カリウムの味は食塩とほとんど変わりませんが、人によっては苦みを禁じてしまいます。現在、こうした塩の代替品としての塩化カリウムが商品化されています。

こうして体に良いカリウムですが、取りすぎると致命的になります。カリウムイオンが細胞外に多くなると、細胞の内部と外部のカリウム濃度に差がなくなります。そして、カリウムチャンネルで濃度の勾配を利用した電荷の受け渡しができなくなります。そのため、心筋細胞が働かなくなり、心臓が止まってしまうのです。実際に、死刑執行のさいに、塩化カリウムの注射が行われているのです。

蛇などの神経毒は、ナトリウムやカリウムのチャンネルを阻害して起こります。たとえば、写真のブラックマンバという毒蛇は、コブラ科に属し体調は2メートル以上で中には4メートルに達するものもあります。移動する速さは、時速20キロメートル近くです。この毒蛇はカリウムチャンネルを阻害し、かまれたら1時間以内に死ぬとされています。この蛇は、映画「キル・ビル2」にも話が登場します。

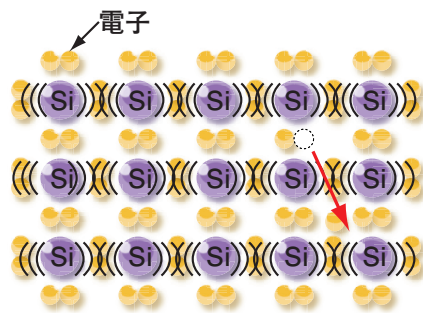
もちろんこれらは極端な例もありますが、カリウムが生体にいかに重要であるかがわかりますね。

シリコン、ゲルマニウムが半導体なわけ

通常物質は、金属か絶縁体かのどちらかです。しかし、その中間に当たる物質があります。これを**半導体**と言います。名前の通り、**電流は流れますが金属ほど多くは流れない**のが半導体というわけです。たとえば、半導体であるシリコン結晶では、抵抗は銅などに比べて100万倍程度あります。それでは、なぜシリコンが半導体なのかを見ていきましょう。

炭素、シリコン、ゲルマニウムは同じ属にあり、最外殻に4個の電子を持っています。原子の大きさは、電子の数が原子に近い方から詰まっていくので、電子の数の多い原子の方が電子最外殻の電子は遠くを回っています。そのため、原子の大きさは小さい順に、炭素、シリコン、ゲルマニウムです。このため、最外殻の電子を引きつける力は、クーロンの法則より、逆に、ゲルマニウム、シリコン、炭素の順に大きくなっていきます。

ダイヤモンドは、炭素が4つの電子を互いに共有して強固な結合をしていることを見ました。このため、自由に動き回ることのできる電子はなく、絶縁体です。ただし、炭素の共有結合以上の力が、電場により電子に加えられると電子が移動できますので、ある意味半導体でもあります。

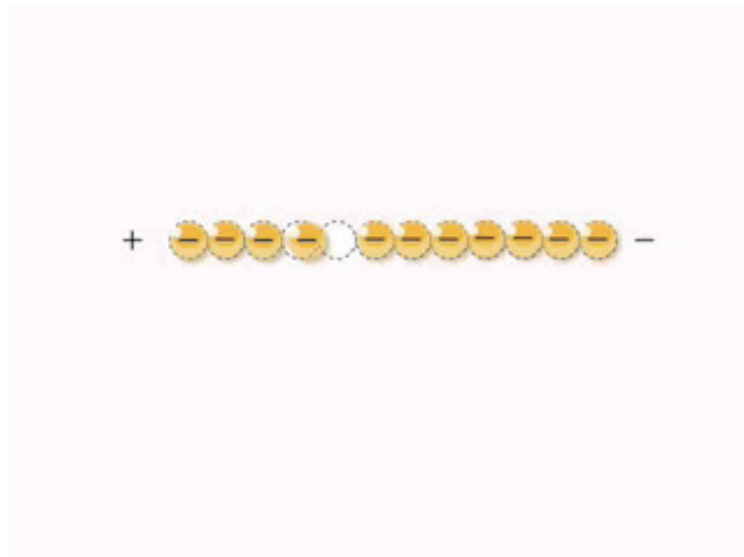
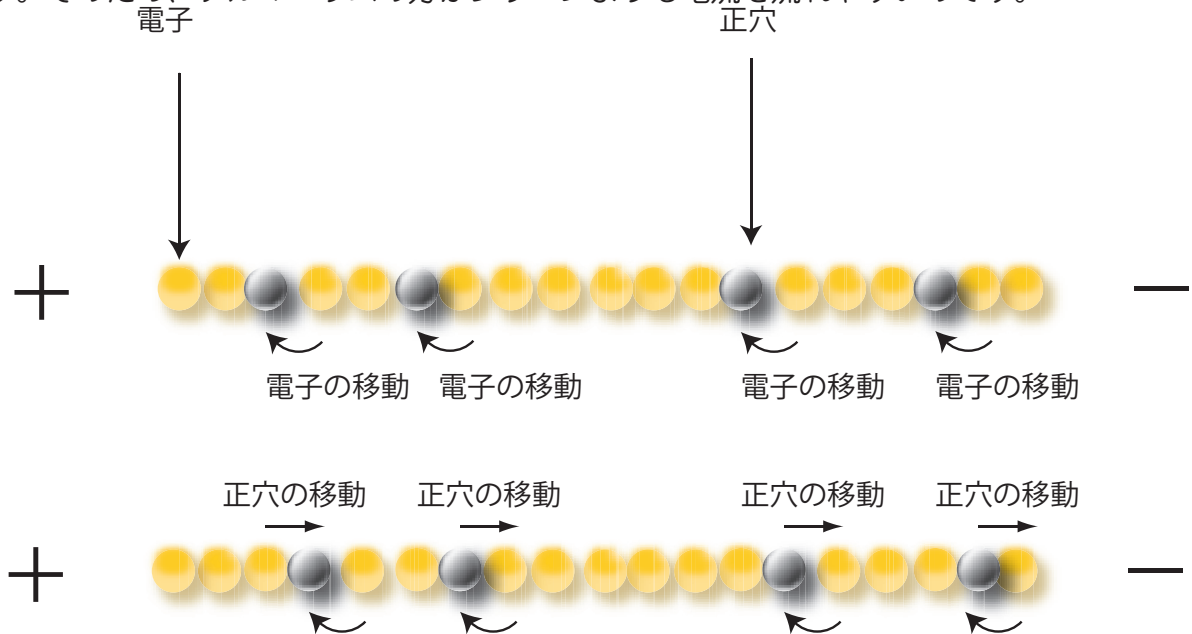


シリコン、ゲルマニウムも4個の原子ですので、炭素同様にダイヤモンドと同じ結晶構造になることができます。ただし、シリコンやゲルマニウムでは炭素よりも電子を引きつける力が弱いのです。また、熱によって原子は振動していますので、全体の原子中でもわずかながら電子が原子から離れてしまうことがあります。たとえば、人間では100万人に一人がおかしな行動をししても全体から見るとたいしたことありませんが、原子の世界ではアボガドロ数程度の数の原子が相手ですので、わずかの確率でも全体としては大きな数になってしまうのです。このようにして、**純粋なシリコンやゲルマニウムなどの半導体では熱運動によって自由電子が生まれます**。銅などでは原子の数だけ自由電子がありますが、このように半導体では非常にわずかの自由電子しかありませんので、電場により流れる電流は導体に比べてわずかになります。このようにして、ゲルマニウムシリコンは半導体となります。以下にもう少し違った状況の半導体が出てきますので、ゲルマニウム、シリコンのような純粋な元素や化合物の結晶による半導体を**真性半導体**と言います。

正穴とは？

原子を離れた電子は、電場によって力を受け移動して電流となります。しかし、半導体ではこの電子だけが電流となるわけではありません。電子が抜けたところは空きになってるので、共有結合されている隣の電子が、電場による力で移動してきたこの場所を埋めます。すると移動した電子のいるところが飽きますので、次々に電子が移動していきます。この空いたところは電子の移動と逆の方向に移動していきます。これは、電子と逆の電荷である、正の電荷を持ったものが移動するのと同じ方向の移動ですので、この穴を**正穴**と言います。つまり、**正穴は正の電荷を持つ電子のように振る舞う**のです。

真性半導体では、温度が高いほど、原子の熱振動によって原子から振り落とされる電子が増加しますので、電気が流れやすくなります。つまり、**通常の導体と異なり、真性半導体では温度が高いほど電気抵抗は小さくなる**のです。また、シリコンに比べてゲルマニウムの方が、電子を引きつける力が弱いので、熱によって原子を離れる電子の数が多いのです。そのため、ゲルマニウムの方がシリコンよりも電気を流れやすいのです。



半導体とは？

ここですこし半導体について述べておきましょう。そえは、私たちの暮らしには今やなくてはならないものとなっているからです。半導体技術を一言で言うなら次のようになります。

半導体技術とは電子の流れを制御する技術である

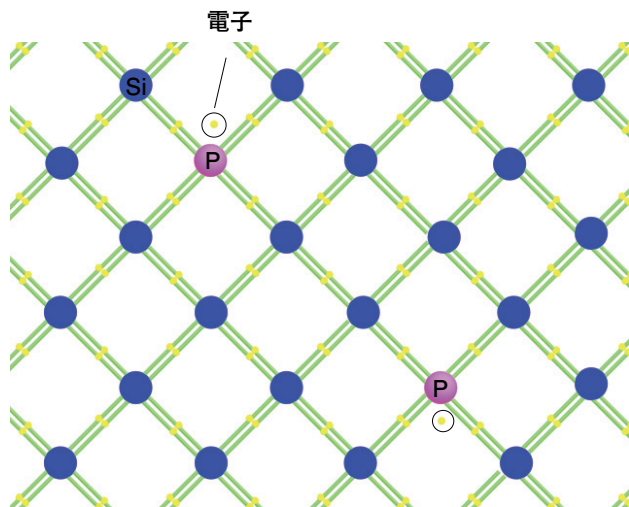
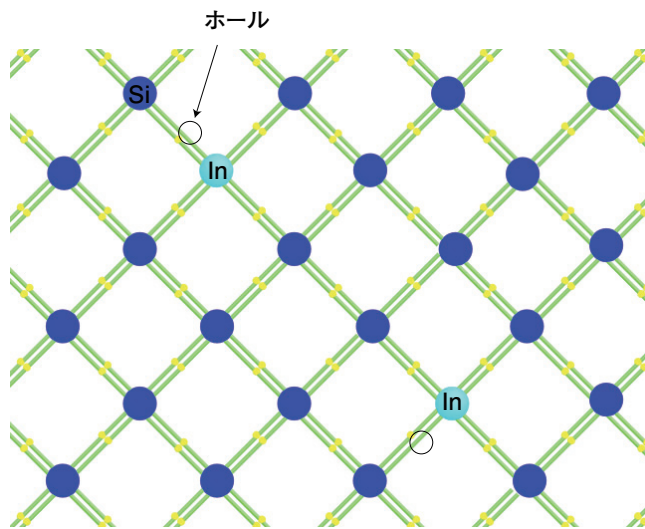
ゲルマニウムやシリコンなどの真性の半導体ではあまり面白いことが起こりません。半導体の本当の価値は、移動できる電荷を作り出すことです。これには、結晶に不純物を入れます。不純物を入れた半導体を**不純物半導体**と言います。不純物半導体は大きく分けて次の二種類があります。

3価のインジウムなどをシリコン結晶に入れますと、シリコンと共有できない電子がで

きます。このため電子が欠落した状態になります。ここに電圧をかけて電場を与えますと、電子は電荷が負ですので電場と逆方向に移動して、この穴に飛び移ります。するとそこにまた穴が出来ますので隣の電子が移っていきます。たとえば、キムタクのサイン会などを見に行つたとしましよう。そこで、皆さんは前の席にの方がよい思うでしょう。そこで、前の席がひとつ空いたとします。するとその後ろの人が次々に前に移りますので、この空いた席は後ろ後ろに行きますね。つまり穴があたかも電子と逆の正

の電荷を持って進むので**正穴**と言われます。P型半導体 正穴が移動して電流となる
つまり、このような不純物半導体では正 (positive) の電荷が移動するので **P型半導体** と呼ばれます。

また、5つ電子が余っている状態のリンなどを入れますと今度はこの余った電子が移動できるようになります。このような半導体を負 (negative) の電荷の電子が移動するので **N型半導体** と言います。

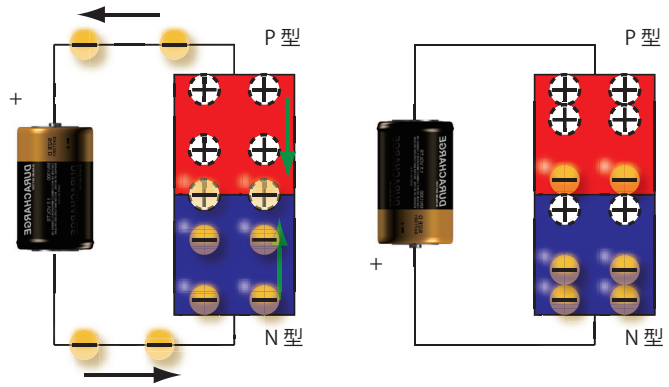


N型半導体 余分な電子が移動して電流となる

半導体の利用

さて半導体では電荷の流れを不純物の入れ具合で人工的に制御できます。でもこれがどのように役立つのかまだ見えてきませんね。技術のすべてを見ることは紙面の関係で難しいので最も簡単な応用だけ見ておきましょう。

N型とP型の半導体をくっつけてみます。N型を+極にしてP型を-極とすると、正穴は正から負に流れて、電子はマイナスからプラスに流れていき、正穴の位置に電子が補いながらすすみます。このため電流は流れます。一方逆にN型をマイナス極につなぐと正穴と電子はお互いに逆方向に進もうとしますが、無理に進むと電荷の偏りが生じてそのクーロン力で進むことができなくなります。このように一方方向だけに進む素子ができます。これを**ダイオード**と言います。

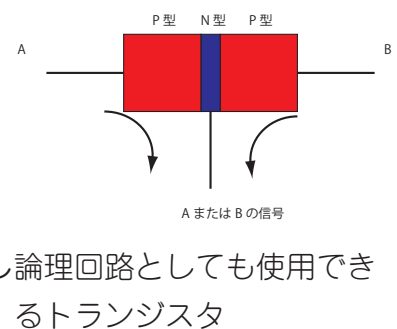


ダイオードの原理

ダイオードでは交流を流しませんが一方方向しか電流が流れませんから交流から直流に変換することができます。

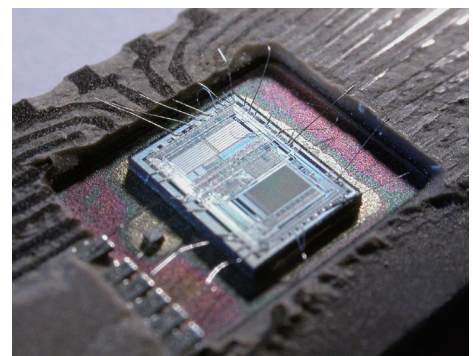
パソコンやゲーム機など主な電子機器は直流で動作するので、アダプターに入っているダイオードで家庭用の交流から直流に変換して用いています。このような働きは真空管などでも可能ですが、ダイオードの方が消費電力が桁違いに小さくまた小型化できるので有用なのです。

また薄いP型をN型でサンドイッチ状態にしたものは、**トランジスタ**と呼ばれます。このトランジスタはサンドイッチ状態にしたところは、川のダムの働きをします。川のダムでは水路の少しの上げ下げで多くの水を流すことが可能ですね。同様に、トランジスタでは挟んだ部分の電圧のわずかな変化で大きな電流に変えることができるのです。これによりCDから読み取った小さな信号を、大きな電流とし



論理回路としても使用できるトランジスタ
また、P型の両方から入った電気信号は真ん中のN型に出てくることができるので、AまたはBを通すといった論理回路を構成できますね。半導体はデジタル回路に欠かせません。

現在ではシリコンのウエハの上に不純物を蒸着させ、アルミなどで導線を作る**集積回路**が作られ利用されています。回路が小型化すると、材料コストも下がり、しかも消費電力も少なくてすむわけです。

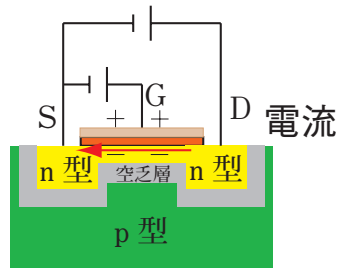
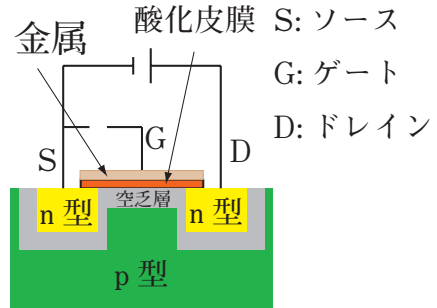


電界効果トランジスタ

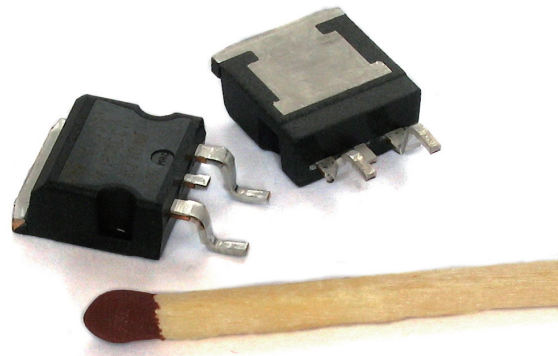
トランジスタには様々な種類がありますが、ここでは代表的なトランジスタである、**電界効果トランジスタ** (Field Effect Transistor, **FET**) の構造を見てみましょう。まず、p型の半導体にn型の半導体二つを少し離れた位置につ

けます。これらはソース、ドレインと呼ばれます。それは、その電流の起源をソースとして、吐き出し口をドレインと言うわけです。そして、絶縁体を挟んで電極を置きます。これをゲートと言います。これは門に対応します。ゲートに電圧をかけていない状態では、ダイオードと同じでゲートとソースの間には電流は流れません。ここで、ゲートにプラスの電圧をかけますと、電子が電極に集まりこれによりn型同士をつなぎ電流が流れます。ゲートにわずかな電圧をかけることで大電流を取り出すことができるので、信号の増幅などに使われるのです。

絶縁体としては、シリコンを熱などで酸化処理したものが用いられます。これは、シリコンを処理するだけで作りやすいからです。このように酸化被膜を使うFETを **MOSFET** (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) と言います。LSIなどで基盤のプロセス加工が容易であることから非常によく用いられています。



MOS FET の構造



大電流用 MOSFET

発光ダイオードとは？

白熱電球ではその多くのエネルギーが赤外線でした。そのため、蛍光灯の方が効率がよいことを見ました。しかし、やはり消費電力量と光のエネルギーを比べたときには、熱などで無駄になっている部分が多いのです。それは蛍光灯をさわってみてもわかるでしょう。それに比べて効率が良く、近年盛んに使用されるようになってきたのが**発光ダイオード** (LED, Light Emitting Diode) です。

原理はダイオードと同じです。正穴に電子が飛び込みますが、そのときエネルギー差の分だけのエネルギーを持った光子が放出されます。これがちょうど可視光領域の光であり、しかも外部に透過できれば、ダイオードが光るのです。

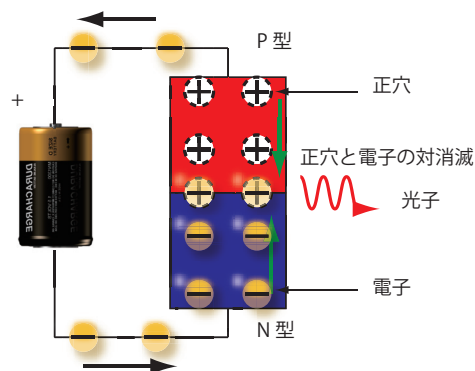
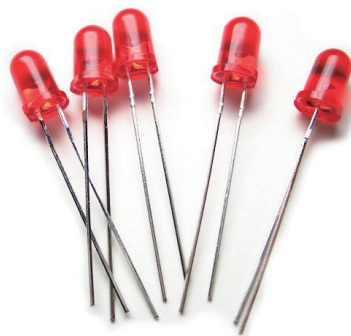
寿命も長いので、さまざまな電気製品に用いられています。たとえば、テレビやパソコンのスイッチの近くで光っている小さな光はすべて発光ダイオードでできていますし、携帯電話で着信のときに光っているのも発光ダイオードです。赤、緑に加えて青色のダイオードが開発、製品化されており、一般的なダイオードはかなり安価です。交差点の信号の光も発光ダイオードによるものに置き換わりつつあります。また、テレビのリモコンには赤外線を放出する発光ダイオードが使われており、テレビに情報を送っています。

フォトダイオードと太陽電池

発光ダイオードと原理が逆のものが**フォトダイオード**です。ダイオードに電流が流れる方向と逆の電圧をかけておきます。このダイオードに光をあけると、共有結合されていた電子が飛び出します。また、光を取り入れやすいようにその形を工夫してあります。テレビの正面にもフォトダイオードが取り付けられていて、リモコンからの赤外線を電気信号に変えているのです。

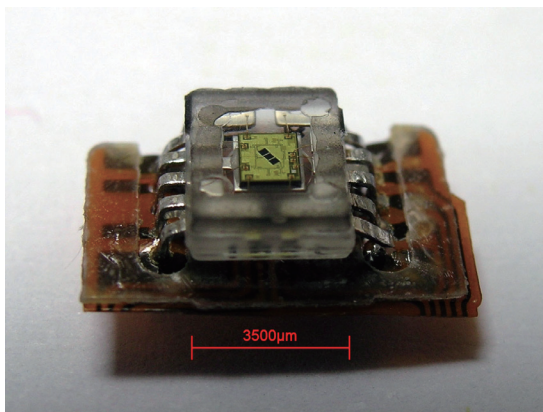
太陽光発電や**太陽電池**もまた同じ原理です。太陽光発電は、二酸化炭素を全く放出しない、クリーンエネルギーです。しかし、現在はそのコストが高いため普及していません。

デジカメなどでは光をこのフォトダイオードを数10万から数百万使った**CCD**と呼ばれる素子で画像を電気信号に変えています。最近では携帯電話のカメラもこのCCDを用いたものになってきています。



発光ダイオード

正穴と電子が対消滅するときのエネルギーが光となる



CD読み取り用、フォトダイオード

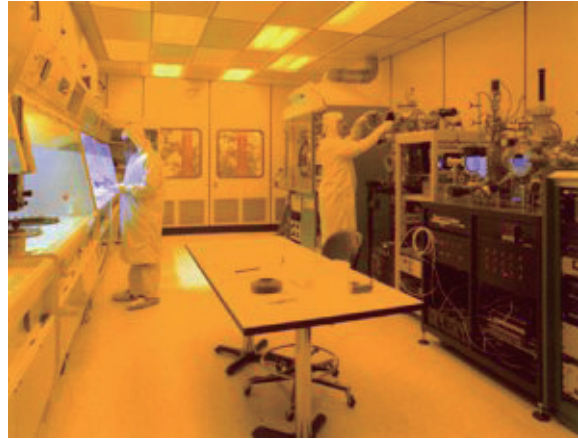
シリコンチップ

シリコンは商業的な半導体として最も重要なものですが、同時に地殻で最も多く存在する物質です。同じ属の炭素が二酸化炭素となるのと同様に地中では二酸化ケイ素の形で存在し、非常に安価です。

地殻に存在する二酸化ケイ素（シリカ）は多くのミネラルが混じり合っています。商業手金信頼できる結晶にするためには、純度が99.99999999%以上必要です。それはわずかな不純物が電気的性質を変えてしまう

からです。そのため、加工の作業などはちりなどを排除したクリーンルームで行われます。また、集積回路の幅は数十ナノメートルであり、これはウイルスなどと同じくらいの大きさなのです。そのため、集積回路にとってはちりなどはとても大きな邪魔者です。

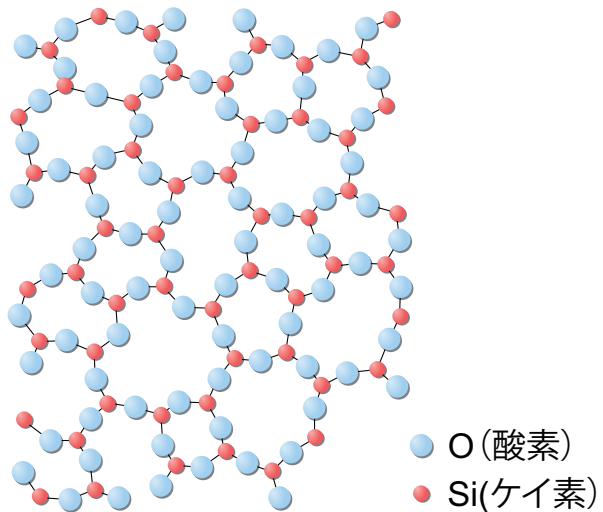
シリコンはまた非常に良い特性があります。それは、人体に害がなく、酸化した状態の二酸化ケイ素は、電子が酸素と強く結びつくため絶縁体であるからです。そのため、回路で絶縁体の必要なところは、酸化処理によって簡単に作ることができます。



高純度のシリコンウエハー制作のために
はクリーンルームが欠かせない

二酸化炭素は気体で、二酸化ケイ素が固体なのはなぜ？

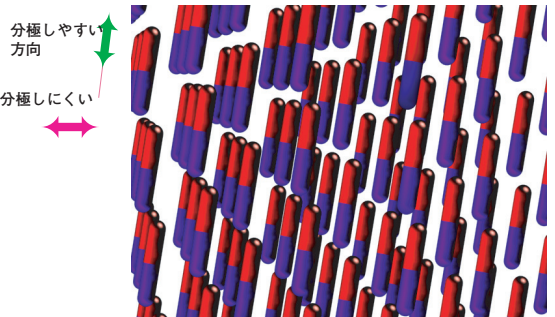
ところで少し不思議の思うのは、同じ属でありながら、炭素は二酸化炭素という気体になるのに、二酸化ケイ素は固体であることです。これは、ケイ素の共有結合に関する電子が、原子から遠く離れていて、ケイ素が電子を引く力が小さいことと関係するのです。二酸化炭素では、酸素と炭素とは共有電子対が2つある、二重結合をしています。これらの電子はお互いに電氣的に反発しあっていますが、炭素の引く力がそれにも増して強力であるので、二重結合をされています。一方、二酸化ケイ素では、二重結合しようとしても、ケイ素の引く力が弱いので、二重結合をすることができません。そのため、炭素は酸素と1重の結合をし、酸素は残った対を、他の炭素と結びつけた方が安定なのです。そのため、二酸化ケイ素は次々と結合して、クォーツやガラスとなるのです。



二酸化ケイ素のガラス

液晶と液晶ディスプレイ

液晶は、有機化合物の一種であり、液体でありながら結晶と同様の規則性のある配列をしています。この液晶の一つの種類に**マネティック液晶**と呼ばれるタイプがあります。有機分子は細長い構造をしており、極性のある部分を2つ含みます。すると分子間ではその極性が逆のもの同士が引き合い、同じ方向を向こうとします。このため、液体であり、分子は熱運動で移動しますが、分子の方向は同じ方向を向こうとします。また、電子はこの分子中を移動でき一方向に分極しやすくなっています。



ネマティック液晶

分子の方向に電子が移動し光を吸収

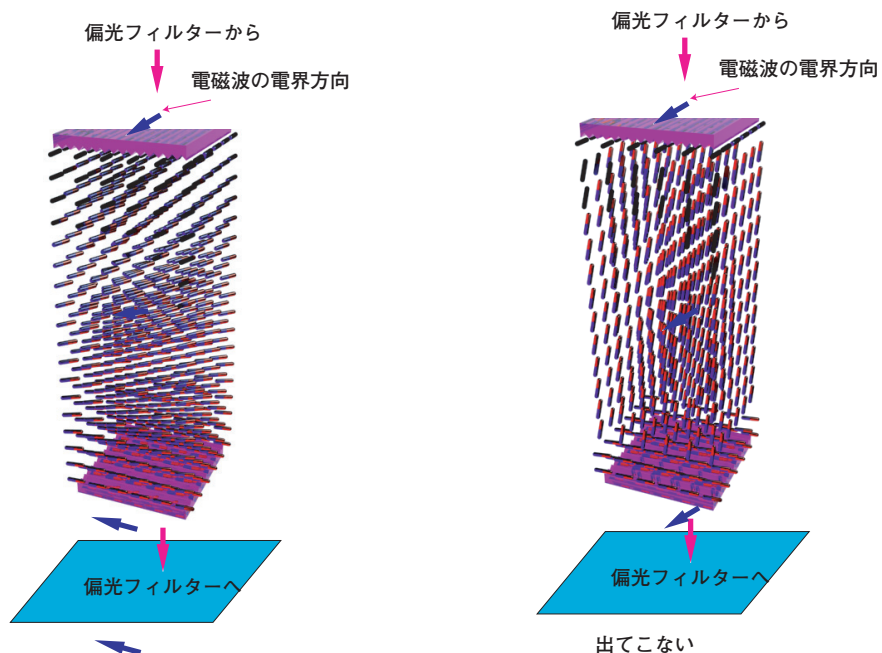
この液晶の分子の方向をひねったように配置するとどうなるのでしょうか？単純な言い方をすると、液晶では偏光板を少しずつ傾けていくことになります。すると、偏光板に垂直な方向だけが通過できていくので、電界の方向が回転します。つまり、**結晶の方向にそって偏光方向が回転します。**

液晶を図のように溝のある膜ではさむと、溝の近くの液晶は溝に沿っていた方が安定であるので図のように、ひねった構造になります。ここに偏光している光が入ると、光の偏向方向は結晶の分極方向にそって回転します。この光を偏光フィルターにより取り出すことができます。

一方、この状態の両端に電圧をかけて電界を作ると、液晶の分極方向が電界の方向を向く。この状態で光は偏光方向は変わらず、偏光フィルターを通過しません。

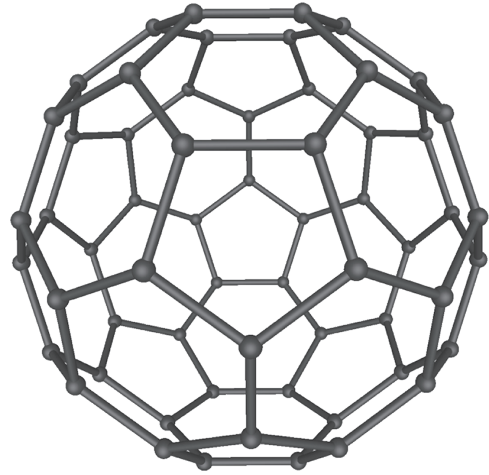
このように、電圧のオンオフで光の透過を調整できます。これが、液晶ディスプレイの動作原理です。ひねったマネティック結晶を使うことからこの形式を**TN(Twisted Manetic) 方式**と言います。

電極には透明な**薄膜トランジスター (Thin film transistor TFT)** を用いたものが多く、現在パソコン用ディスプレイや液晶テレビではこの電極を用いたものが多くなっています。



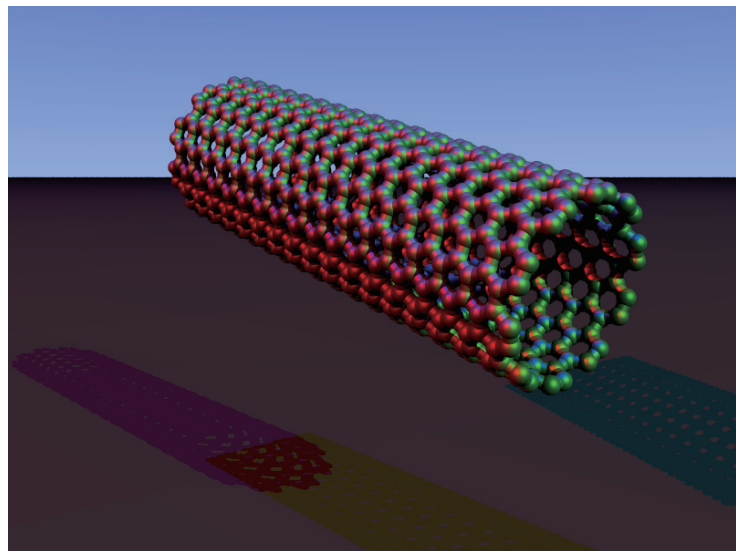
炭素分子の形

1980年代中旬まで、炭素自身で作る分子は黒鉛またはダイヤモンドの形しかないと思われていました。しかし、ハロルド・クロトー、リチャード・スモーリー、ロバート・カールが率いるグループが、第3の形である、60個の炭素原子からなる**フラレン**を発見しました。彼らは、真空中で炭素にレーザーをあてて蒸発させ、それを質量分析機に欠けると、ちょうど60個の炭素からなる分子が多数できることを発見しました。かれらはその構造を図のように、ちょうどサッカーボールの形であると予想しました。その後、分子構造の予想が正しいことが確認され、3人は、1996年度のノーベル化学賞を受賞しました。その他に70個の炭素からなるC70フラレンなども見つかっています。現在、潤滑剤としての応用もされており、医療用の研究もなされています。



フラレン

1991年、飯島澄男が、フラレンを作る途中に、電子顕微鏡でチューブ上に伸びた構造の炭素分子を発見しました。これは、直径が1nmほどしかありません。そこでこれを**カーボンナノチューブ**と呼びます。アルミニウムより軽く、伸張強度がダイヤモンドの20倍もあり、利用法が研究されています。また、構造によっては半導体としての性質もあるため、非常に小さなトランジスタなど作られる可能性があります。ただし、ガン性も指摘されており、利用には注意を要するかもしれません。



カーボンナノチューブ

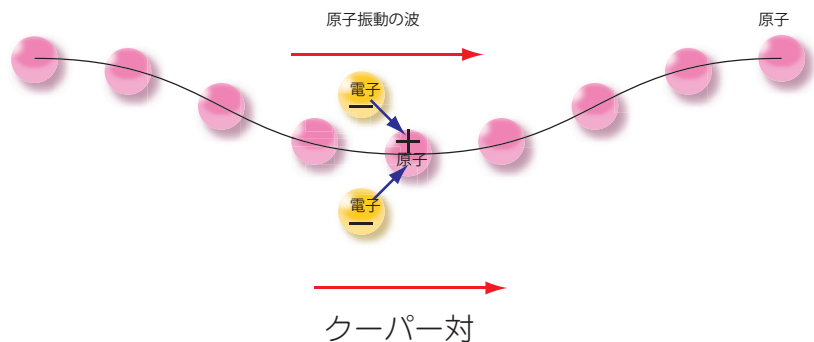
た
が
発

超伝導とは？

電気抵抗は、電子が熱によって振動している原子に衝突することによって起こることを見ましたね。すると温度が高い方が、原子の振動が激しく、衝突しやすいため電気抵抗は上昇します。逆に言うと、低温にすると電気抵抗は減少しますが、絶対零度にならないかぎり、原子の振動が止まらないので電気抵抗はあるということになります。しかし、1911年に、オネスは、水銀を冷やしていくと電気抵抗が全くなくなることを発見しました。このように、低温で電気抵抗が無くなり、電子が自由に移動できるようになることを**超伝導**と言います。超伝導の起こるメカニズムは1957年バーディーン・クーパー・シュリーファーによって解明されました。

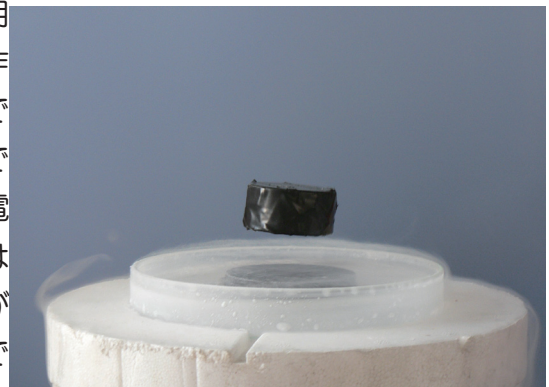
図のように、熱による振動は原子同士が引き合っているために波となって伝わります。またそれぞれの原子は、プラスの電荷のため電子を引きつけます。それに引きつけられた2つの電子が振動を通してお互いに引き合った状態になっています。この原子の振動を介してできた2つの電子の対を**クーパー対**と言います。この対のまま原子振動の熱の影響を受け手も安定なまま進行していきます。これが超伝導現象の起こる原理です。

ベドノルツとミュラーは1986年に銅酸化物において、それまでよりも遙かに高い温度での超伝導状態を発見しました。これを**高温超伝導**と言います。これにより、それまでの高価な液体ヘリウムに代わり、安価な液体窒素の温度を超える温度で超伝導状態が実現できるために、応用価値は一気に高まりました。ただし、高温超伝導では、大きな電流を流すと超伝導状態ではなくなってしまう、テクノロジーとしての応用はこれからの問題となっています。このため、現在実用化されているほとんどの応用は、昔ながらの超伝導です。



超伝導では、巨大な磁場を作り出すための**超伝導マグネット**などが実用化されており、MRIなどのための強力な磁場を作り出すために利用されています。通常の電磁石では、大きな磁場を作り出すために大電流が必要ですが、通常の導体では電気抵抗のために非常に電力を消費します。これに対して、超伝導状態では電気抵抗がないため、電気的エネルギーのロスがなく、強力な磁場を発生させることができます。また、送電線やリニアモーターカーなどへの応用も計画されています。

原子の振動の波と共に抵抗なく電子が移動



超伝導状態では、磁石に対して鏡のように働き、磁石と反発する性質がある。これをマイスナー効果と言う。

ジョン バーディーン (1908-1991)

バーディーンはアメリカの物理学者であり、エンジニアです。

ウイスコンシンン大学で電気工学の修士を得ます。その間に数学と物理学のすべての教程の単位を取得しました。ノーベル賞受賞者であるウィグナーの元で固体物理学の研究で学位を取得します。第2次大戦後にショットキーとブラッテンらとともにベル研究所でトランジスタを発明しました。その後、1951年にイリノイ大学に移り、そこで新しいプロジェクトを立ち上げます。

1965年にトランジスタの発明に対してノーベル賞が授与されました。彼は、ノーベル賞のことは知らずに、自宅で朝食を取っているときに流れてくるラジオのニュースで初めて聞いてびっくりしたようです。授与式とパーティーには3人の子供のうち、一人だけ連れて行きました。他の二人は大学で勉強しているので妨げになると思っての配慮でした。グスタフ国王がそのことで一生のチャンスだからとバーディーンをしかったところ、彼は次の機会には必ず全員つれて来ますと言ったといいます。1957年にクーパー・シュリーファーと共に長い間未解決であった超伝導現象に対する理論的説明を与えることに成功します。この業績に対して、1972年にノーベル賞が授与されたが、その式典には今度は3人の子供を残らず連れて行きました。



キーワード

弾性変形、塑性変形、弾性限界、合金、真鍮、青銅、白銅、鉄鋼、鋼、ステンレス、ジュラルミン、表面張力、毛細管現象、絶縁破壊、半導体、真性半導体、不純物半導体、N型半導体、P型半導体、正穴、ダイオード、トランジスタ、集積回路、電界効果トランジスタ (FET), MOSFET, 発光ダイオード (LED)、フォトダイオード、太陽電池、CCD、液晶、フラーレン、カーボンナノチューブ、超伝導、クーパー対、高温超伝導