

8 電気製品の物理——IC カードに寿命なし

世の中には正と負の電荷がある。N と S の磁極が存在する。電気のはたらく空間を**電場**、磁気のはたらく空間を**磁場**という。両者は互いに作用し、影響を及ぼし合う。

8.1 電気の性質 — 静電気とうまくつきあう方法

8.1.1 電荷, 帯電

■電荷, 帯電

電気現象を生じさせるものを**電荷**という。「正の電荷」「負の電荷」がある。電荷の単位は [C] クーロン。クーロンは物理学者の名前である

物体が電気を帯びることを**帯電**といい、帯電したまま移動しない電気を**静電気**という。プラスチックの下敷きで髪の毛をこすると、髪の毛が下敷きに引き寄せられるが、これは**静電気力**である。私たちのまわりの物体は、摩擦することで電気を帯び、引力や斥力を及ぼし合う。

帯電した物体どうしの中に引力と斥力の 2 種類が存在することから、電気には正 (+) と負 (-) の 2 種類が存在していることもわかる。

■エレキテル

電気を貯める装置として、オランダで**ライデン瓶**が発明されたのは 1746 年とされている。ガラス瓶の内側と外側を金属（鉛など）でコーティングしたもので、現在でいう**コンデンサ**と同じ原理である。

同じ頃、アメリカのフランクリンは、雷を伴う嵐の中で凧をあげ、雷の正体が電気であることを示す実験を行った、とよく紹介されるが、その証拠はない（アイデアを述べたことは確かだが、実験した証拠はない）。

日本では平賀源内 がエレキテルを復元したことが有名である。オランダで発明され、宮廷での見世物や医療器具として用いられていた静電気を摩擦で発生させる装置「エレキテル」（オランダ語の *elektricititeit*（電気、電流）がなまったもの）が、1751 年頃オランダ人から幕府に献上されていた。平賀源内は文献でそれを知り、長崎で破損したエレキテルを古道具屋から入手し模造製作した。外部は木製の箱、内部に蓄電器があり、外付けのハンドルを回すと内部でガラスが摩擦され、発生した電気が銅線へ伝わって**放電**するしくみだった。

江戸時代後期の橋本宗吉は、ガラス管を紙でこするとエレキテルと同様に静電気が発生することや、ガラス以外の多くの物質も静電気を帯びることな

電荷 q
(charge)

帯電
(electrification)
静電気
(static electricity)

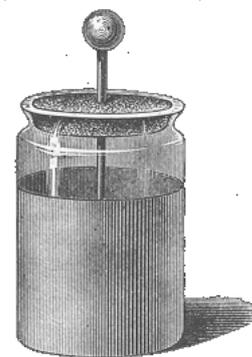


図 1: ライデン瓶
(Leiden jar)



図 2: フランクリン
Benjamin Franklin
(1706–90)

平賀源内 (1728–80)
放電 (discharge)

橋本宗吉 (1763–1836)



図 3: 江戸時代の電気の実験 [左] 平賀源内のエレキテルを描いた図 (後藤梨春『紅毛雑記』(1775)). [右] 百人おどしの図 (橋本曇齋・平田箒筆『阿蘭陀始制エレキテル究理原』(1881)).

どを実験している。寺子屋に集まった子供たちを輪にして手をつながせ、蓄えた静電気をを放電させると全員が感電してびっくりする「百人おどし」の実験をしている (図 3)。

コラム

コラム 20 (雷の正体)

急激な上昇気流で発生した積乱雲の中では、水蒸気どうしがこすれ合っって電気が発生する。正に帯電した小さい氷の粒が雲の上部に移動するので、雲の下は負に帯電する。雷は、雲と地表との間で放電する現象である。空気中では 3 万 [V/cm] で放電が開始する。

落雷による 1 回の放電量は数万～数十万 [A] (アンペア)、電圧は 1~10 億 [V] (ボルト)、電力換算で平均約 900 [GW] (ギガワット) (=100W 電球 90 億個分相当) に及ぶ。エネルギーに換算すると約 900 [MJ]、家庭用エアコン (消費電力 1 [kW]) を 240 時間連続できるが、時間にすると 1/1000 秒程度でしかない。

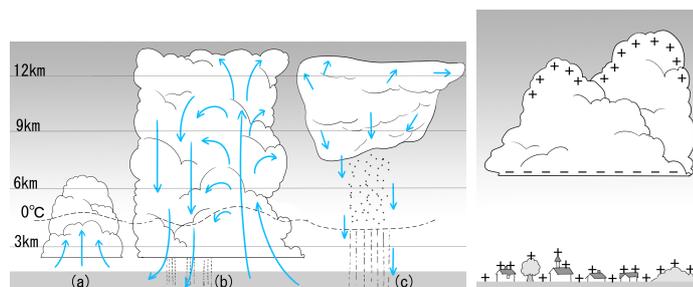


図 4: [左] 激しい上昇気流で積乱雲が発生し、上空で冷却されて強い雨が降る。[右] 雲の中で水分子がぶつかり合う摩擦で雷は帯電する。貯まった電荷を空中放電するのが雷である。

8.1.2 電気の正体

■陽子, 中性子, 電子

原子は**原子核**と**電子**からできていて、原子核は**陽子**と**中性子**から構成されている。電子は負の、陽子は正の電気をもっていて、中性子は電気をもたない。電子 1 つと陽子 1 つのもつ電気量は、符号が異なるが同じ大きさであり、 $e = 1.6 \times 10^{-19}$ [C] である (この値を**電気素量**という)。

原子 (atom)
 原子核 (nucleus)
 電子 (electron)
 陽子 (proton)
 中性子 (neutron)
 電気素量
 (elementary electric charge)

■イオン

普通の原子は陽子と電子の数は等しく、電氣的に中性である。正負の電荷のバランスがくずれた原子・分子を**イオン**という。すなわち、

イオン (ion)

電子が不足 \implies 正イオン

電子が過剰 \implies 負イオン

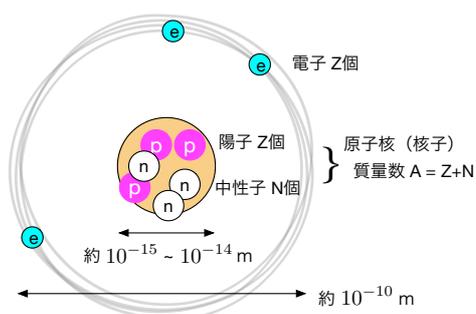


図 5: 原子の構造 よくこのような図が描かれるが、原子核のサイズと電子の軌道半径を考えると、電子は原子核サイズの 10 万倍位の半径をまわっている。

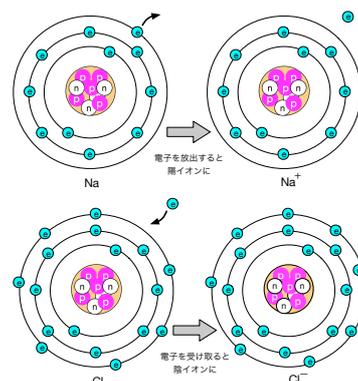


図 6: 電子の過不足がイオンになる
電子を 1 つ放出すると陽イオン (+イオン) に、電子を 1 つ余計に持つと陰イオン (-イオン) になる。

8.1.3 静電気

■帯電列

2 つの物体を接触させると、摩擦によって正と負の電気をそれぞれ帯電する。どちらの電気を貯めやすいかを順に示したものが、**帯電列**である。

帯電列
(triboelectric series)

冬になると、指先がパチッと静電気を放つことがある。「静電気によって火花放電が起きた」というのが、正しい表現である。着ている衣服がこすれあって発生した静電気を蓄えた人間が、指先で物体に触れると、そこから一気に電気が流れる現象である。

■接地 (アース)

地球は巨大な導体で電気を逃がす。地面に打ち込んだ金属棒を通して、電気の逃げ道をつくることを**接地 (アース)**という。アースすることで、電位が安定する。

欧米の電気コンセントは三口であり、1 つはアース用である。日本の家庭用コンセントでは、水周りやエアコン周りにしかアースがない場合が多い。洗濯機の内部は回転することによって電気を貯めやすい。感電を防止するために洗濯機をアースすることが必要である。電気コンセントにアースが

なければ、水道の蛇口につないでおくのもよい。

マイナス (-) に帯電		プラス (+) に帯電	
シリコーンゴム	テフロン	人の皮膚	アスベスト(石綿)
塩化ビニル	ポリプロピレン	毛皮	ガラス
ポリエチレン	ポリウレタン	石英・雲母	人間の毛髪
サラン(サランラップ)	スチレン(発泡スチロール)	ウール(羊毛)	ナイロン
アクリル繊維	合成ゴム	レーヨン	シルク(絹)
ポリエステル	金	木綿	木材
プラチナ(白金)	真鍮・銀	紙	エポナイト
ニッケル・銅	硬質ゴム	紙	硬質ゴム

図 7: 帯電列 (摩擦帯電列)。2つの物質をこすり合わせた時、相対的にプラスとマイナスのどちらの電荷が帯電しやすいかを並べた列。塩化ビニルを紙でこするより、毛皮でこする方がより多くの静電気が発生する。

コラム

コラム 21 (静電気とつきあう方法)

冬になると空気が乾燥し、どうしても静電気が発生しやすくなる。静電気をなくすことはできないので、なんとか軽減する方法を考えるのがよい。次のような方法がある。

- (1) 組合わせる衣服の素材に注目する。
まず、帯電列の離れたものどうしが接触するほど静電気が発生しやすい。たとえばアクリルのセーターにウールのコートなどを組み合わせると静電気が発生しやすい。帯電列の近くにある衣類どうしでは静電気の発生量が少なくなるので、コーディネートに工夫することで多少は防げることになる。
- (2) 静電防止加工を施した製品を利用する。
最近では、導電糸を使って、発生した静電気を逃げやすくした製品が販売されている。
- (3) 静電防止スプレーなどを利用する。
マイナスイオンをふりかけることで「プラスになりやすい人間の肌」から静電気が多少失われる。地面・アースに触れることでも同じである。
- (4) 湿度を高くする。
加湿器などで、湿気を多く含んだ状況を作り出すことにより、静電気の発生を抑えたり、発生した静電気を逃げやすくすることができる。
- (5) 洗濯に柔軟剤を使う。
衣類が柔らかければ、着衣時の摩擦が減って、静電気の発生が少なくなる。

静電気は害ばかりではない。コンロやライターなどには、放電のエネルギーを利用した点火装置が使われている。身近に見られるコピー機やレーザープリンタの原理も静電気である。また、火力発電所などで発生する煤塵の除去には、電気集塵機も使われている。すすなどの細かい塵をイオンを吹き当てて帯電させ、電荷をもった集塵板に付着させるしくみである。

■電流と電圧

定義 電流

電気の流れを**電流**という。単位は [A] (アンペア)。電流の大きさ I は、導線の断面を 1 秒間にどれだけの電荷が通過したかで決める。

電流の向きは、正の電荷が移動する向きとする (図 9 [右])。しかし、これは歴史的な理由であり、実際には、電流の正体は、負電荷を帯びた電子が、負極から正極へ移動することだとわかっている。電流の大きさの単位アンペア [A] は、物理学者アンペールの名に由来する。

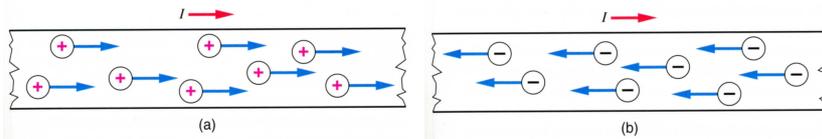


図 9: 電流の向きは、正の電荷が動いていても負の電荷が動いていても実質同じ。

定義 電圧

電流を流そうとするはたらきを**電圧**という。単位は [V] (ボルト)。

電圧 V の単位は [V] ボルト。物理学者ボルタに由来する。電流を流そうとする「はたらき」であるから、電流が流れなくても電圧は存在する。

乾電池や家庭の電気コンセントは電圧を供給する。

Topic スイッチを入れると電位が瞬間的に変化する

回路で接地 (アース) した場合は、その点が 0 V の電位の基準になる。図 11 のように、乾電池と豆電球を結んだ回路では、スイッチを入れる前は、スイッチで断線しているところで、 0 V と 1.5 V の領域に分かれているが、スイッチを入れた直後には、電流の流れにくい豆電球の両端で電位差が生じることになる。

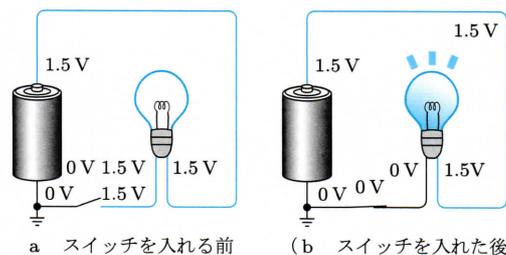


図 11: スイッチを入れる前と入れた後の電位の変化。

電流 (current)[A]



図 8: アンペール
André-Marie Ampère
(1775–1836)

電圧 (voltage)[V]



図 10: ボルタ
Alessandro Giuseppe
Antonio Anastasio
Volta (1745–1827)

8.2 電気回路

「物体に力を加えると加速度が生じる」という言い回しと同じように「回路に電圧を加えると電流が流れる」といえる。回路は数種類の素子の組み合わせでできている。

8.2.1 電気回路の基本

■電気回路と水流の類似

乾電池やコンセントなどの電源と、電球やモーター、コンデンサなどの電気的な素子を導線でループ状につないだものを**電気回路**という。スイッチを入れるなどして、全体が一周できるように接続されていれば電源から**電流**が流れるようになる。白熱電球は、電流を流れにくくする**抵抗**であり、電子の流れを邪魔することで発熱して光を出す。エネルギーを失った電流は電源に流れ着くが、電源で再びエネルギーを供給されて流れ出す。電流を流そうとする力を起電力という。

電気回路

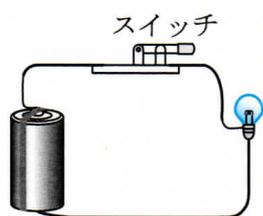
(circuit)

電流 (current)

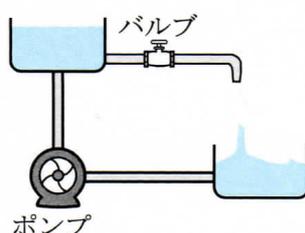
抵抗 (resistance)

電気回路は、よくポンプで循環する水流に例えられる。水が電流に相当し、ポンプが電源に相当する。ポンプで汲み上げた水流の高さ（位置エネルギー）は、電気を流そうとする電圧に相当する。

	水流回路	電気回路
動くもの	水	電荷
動力源	ポンプ	電源
道	パイプ	導線
抵抗	狭いパイプ	フィラメント
切り替え器	バルブ	スイッチ
動かす力	圧力の差	電位差



(a) 電気回路



(b) 水流回路

図 12: 電気回路を水流回路に例えた図。

■直流電源と交流電源

乾電池などは、電流の流れる向きが決まっている**直流電源**である。化学反応を利用して、電気エネルギーを発生させており、電子の動く向きが決まっている。

これに対して、送電所から家庭に送られてくる電気は、大きさと向きが時間とともに周期的に変化する**交流電源**である。発電のしくみを考えると、交流となるのが自然であるし（⇒120 ページ）、交流には送電時に、変圧が可能である、というメリットがある。すなわち、数十万ボルトという高い電圧で発電所から供給される電気を、効率よく送電したあと、各家庭までに降圧するしくみが容易である。



図 13: 直流電源
(DC; direct current)



図 14: 交流電源
(AC; alternating current)

日本は、歴史的な原因で、東日本では 50 Hz（1 秒間に 50 回振動する）、西日本では 60 Hz の交流となる（図 16）。

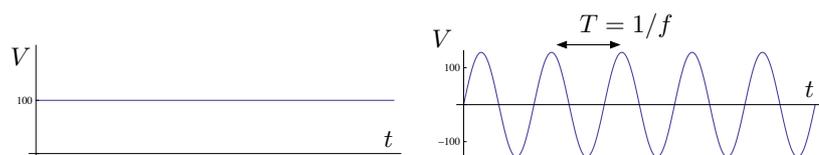


図 15: 〔左〕直流電源からの起電力 $V(t)$ は常に一定. 〔右〕交流電源からの起電力 $V(t) = V_0 \sin(2\pi ft)$. $\bar{V} = 100$ V の起電力は、最大 $V_0 = 100\sqrt{2} = 141$ V になる. $f = 60$ Hz は、1 秒間に 60 回振動することを表す.

電気製品のなかには、乾電池でも家庭用コンセントでも動作するものがある. これは電気製品のなかに、整流器が入っているからだ

Topic 東日本は 50Hz, 西日本は 60Hz

日本は静岡県の富士川と新潟県の糸魚川あたりを境にして、東側は 50Hz, 西側は 60 Hz の電気が発電所から送られている. 明治時代, 関東にはドイツから 50 Hz の発電機が輸入され, 関西にはアメリカから 60 Hz の発電機が輸入されたのが発端である. 電気器具の中には周波数が変わると正常に作動しなくなるものがあるから引越の際には注意する必要がある.

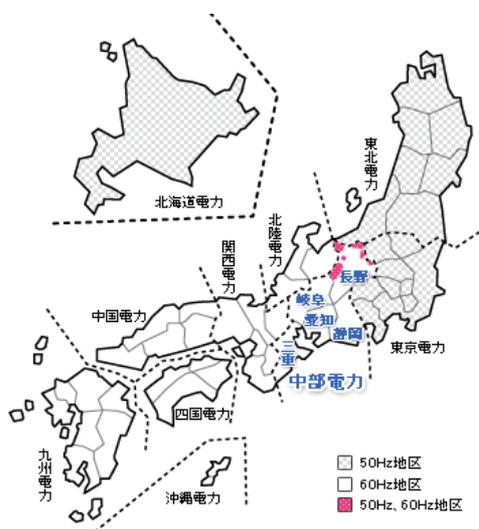


図 16: 電力会社別周波数分布. (中部電力のホームページから)

周波数が違う場所にいくと,...

そのまま使えるもの

電気こたつ, 電気ポット, 電気毛布, 電気コンロ, 電気ストーブ, トースター, アイロン, テレビ, ラジオ, パソコン

そのまま使えるが能力が変わるもの

扇風機, ヘアドライヤー, 換気扇, 掃除機, 温風暖房機, ジューサー・ミキサー

そのままでは使えないもの

洗濯機, タイマー, 電気時計, 電子レンジ, 衣類乾燥機, 蛍光灯 (インバータ式以外), ステレオ

問題と研究

問 6.3 50Hz で動く電気式時計を 60Hz の地域で使用するとどうなるか.

問 6.4 切れた電線に触れると電流がながれ危険である. 電線に止まっている鳥はなぜ感電しないのだろうか.

8.2.2 電池・抵抗・電力

■電池のしくみ

乾電池は化学反応を利用する**化学電池**である。一度だけ使える一次電池（マンガン電池，アルカリ電池，オキシライド電池など）と，充電することにより再度使える二次電池（ニッケル・カドミウム電池，リチウム・イオン電池など）がある。二次電池は，放電時とは逆の電気を流すことで，内部が放電とは逆の化学反応を起こし，放電前の状態に戻せるしくみだ。

表 1: 充電式電池の比較

電池の種類	特徴
ニッケル・カドミウム電池	大電流が流せるが自己放電も多い。継ぎ足し充電では充電量が減少する。掃除機などのモーターに利用される。
ニッケル・水素電池	大容量を充電できるが自己放電も多い。継ぎ足し充電では充電量が減少する。充電式乾電池として普及。
リチウム・イオン電池	放電電圧が高く，自己放電・充電量の減少が少ない。過充電・過放電で高温化。携帯電話，PC などモバイル機器に利用される。

コラム

コラム 22 (充電電池とつきあう方法)

携帯電話，PC などを持ち歩くことが普通になり，充電式のリチウムイオン電池の世話になることが多くなった。まだ，現在の技術では，リチウムイオンの充電回数は 400 回程度しか品質の保証ができず，400 回を超えると本来の 80% 以下しかフル充電できなくなる。少しでも長く使うために，次のようにつきあうのがよいとされている。

(1) 電池残量を 20% ~ 80% で保つ。

完全放電・完全充電状態であると劣化が激しい。最近の機種では，充電器をさすと，80% までは高速充電され，それ以降フル充電まではゆっくり充電されるように設定されているものもある。

(2) 冷暗所で保管する。

リチウムイオン電池は熱に弱い。車のダッシュボードなどに放置するのは厳禁。逆にあまり寒いのもよくない。

(3) 月一回は電池をリセットする。

ときどき完全放電したあと，フル充電する。電池内の電子を時々動かすとよい。

■消費電力（電力）

電流が流れると，私たちは熱エネルギーや運動エネルギーを取り出すことができるから，電流はエネルギーをもつといえる。単位時間あたり（1 秒あたり）に電源から他のエネルギーに変換される電気エネルギーの量を**消費電力（電力）** P という。電力の単位は仕事率と同じワット [W] である。

定義 電力

単位時間あたり（1秒あたり）の電力 P [W] は、

$$P = VI, \quad \text{電力 [W]} = \text{電圧 [V]} \times \text{電流 [A]} \quad (1)$$

電力の値に時間を乗じた量を電力量とする。単位はエネルギーの単位と同じジュール [J] を用いる。

定義 電力量

t 秒間の電力量 W [J] は、次式で与える。

$$W = Pt, \quad \text{電力量 [J]} = \text{電力 [W]} \times \text{時間 [s]} \quad (2)$$

熱の仕事当量（ $1 \text{ cal} = 4.2 \text{ J}$, $\Rightarrow \S 5.3.1$ ）を使うと、 100 W の電力を1分間消費した場合、 $6000 \text{ J} / 4.2 = 1428.5 \text{ cal}$ となり、 100 g の水を約 $14.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度上昇させることができる計算になる。

家庭の消費電力を調べよう

実験

電気料金は、電力量で決められる。その際に使われる単位は、上記のように秒を乗じるのではなく、**ワット時 [Wh]** あるいは**キロワット時 [kWh]** である。（ 1 kWh は、 1 W の 1000×3600 倍である。）

■スイッチ

電気を流したり止めたりするスイッチのはたらきは、読者はすでにご存知だと思う。もっとも簡単な回路は、スイッチと電池と電球をつないだ電気回路だろう（図18）。

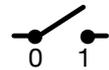


図 17: スイッチ

Topic コンセントにあるスイッチ

最近のテレビ・ビデオ・エアコンなどの電気製品は、時計が内蔵されていたり、自動通信機能があるなどで、使用していないときでも電気をを使う。節電のためにコンセントに挿したままでも電気を通さないスイッチ付きのタップが販売されている。

携帯電話の充電に、コンセントから直接ケーブルで接続している方も多いと思う。節電のために充電していないときに接続ケーブルを抜く必要があるか、と質問されたことがあるが、電気が流れていなければ電力を使わないので、この場合はさしたままでも構わない。

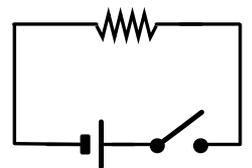


図 18: スイッチと電池と電球をつないだ電気回路。

Topic タコ足配線は危険

1つのコンセントからいくつも分岐して電気製品をつなぐことをタコ足配線というが、危険である。どんな導線もジュール熱を発生させる。多くの電気製品が並列に接続されると、おおもとの導線には多くの電流が流れるようになり、ジュール熱で火災発生の危険性が増す。

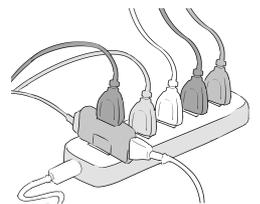


図 19: タコ足配線は危険

電力
(electric power)

単位

電力は [W](ワット).

電力量
(electric energy)

単位

電力量は秒単位では [J](ジュール). 時間単位では [Wh](ワット時).

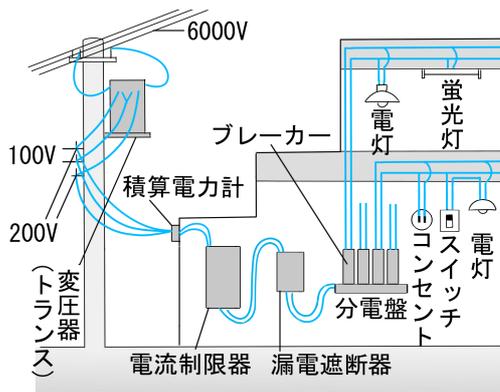


図 20: 各家庭の電気は、送電線から引き込まれたあと、積算電力計を通り、電流制限器（ブレーカー）のついた分電盤を通して、各部屋につながっている。屋内配線は、並列回路である。家庭の電源では一度に大量の電気が流れると、危険防止のために電気が止まるブレーカーが入っている。かつては実際に切れる導線「ヒューズ」が使われていた。

コラム

コラム 23 (階段のスイッチ)

家庭の階段の電気は、1 階側でも 2 階側でもスイッチを押すことによって電気がついたり消えたりするしくみである。これは、どのような回路になっているのだろうか。階段で使われるのは、三路スイッチと呼ばれるスイッチで、図 21 [左] に示すようなものだ。切り替えることによって 0-1 あるいは 0-3 のどちらかが必ずつながる構造を持っている。三路スイッチを 2 つ使って、図 21 [右] のような電気回路をつくると、階段のどちらでも電気の ON/OFF ができる回路になる。

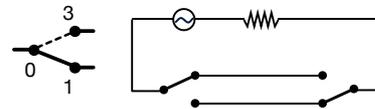


図 21: [左] 三路スイッチ。[右] 2 つのスイッチのどちらでも電球の ON/OFF を可能にする回路。

8.2.3 電球・蛍光灯・LED

■白熱電球

白熱電球は、ガラス管内のフィラメント（電極）を熱して出る光を利用する。ガラス管内には不活性ガスが充填されている。電気エネルギーの 8 割以上が熱として消費されるため、光を得る目的としては効率が悪く、蛍光灯や発光ダイオード (LED) に比べて寿命も短い。日本の大手メーカーは、経済産業省の要請により、2012 年末までに白熱電球の生産を取りやめた。

■蛍光灯

蛍光灯は、放電で発生する紫外線を蛍光体に当てて光を得る。（蛍光灯のガラス管内に電気が流れているわけではない）。熱としての電力の損失は 45% 程度で、電球に比べて格段に少なく、寿命も長い。点灯するには、スターター（点灯管・安定器）と呼ばれる装置・回路が必要になる。電源を入れた直後に点灯管内部に放電を起こし、その放電を契機にして蛍光灯のガラス管内のガスの放電を開始する。放電するガスには、低圧の水銀蒸気が使われていて、環境には悪いのだが代替となる物質がない。いずれは、より効率のよい発光ダイオード (LED) に置き換えられていくものと考えられる。

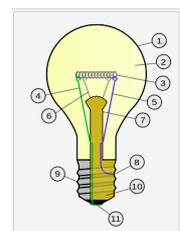


図 22: 白熱電球 (incandescent lamp)

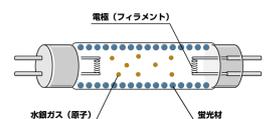


図 23: 蛍光灯 (fluorescent lamp)

■半導体とダイオード

電気をよく通す**導体**（良導体）や通さない**絶縁体**に対して、電氣的に中間的な性質をもつものを**半導体**という。

電子部品で使われるのは、人工的につくられた半導体である。**n型半導体**は、たとえばシリコン (Si) の結晶中に、リン (P) を不純物として注入（ドーピング）することによって得られる。自由電子数が過剰な状態となり、自由電子が電気を伝える役割（キャリア）をする。

p型半導体は、たとえばシリコン (Si) の結晶中に、ホウ素 (B) を不純物として注入（ドーピング）することによって得られる。電子数が欠けて**ホール（正孔）**状態になっているところが、プラスの電氣的な性質をもち、電気を伝える役割をする。どちらも不純物の割合は、もとの結晶中の分子に対して、10万から1000万個に一つの割合である。

p型半導体とn型半導体をつないだもの（**PN接合**）が**ダイオード**である。ダイオードのp型部分に－とn型部分に＋の電圧をかけたとすると、それぞれ空孔と電子が加えた電圧の極性の方に近づいてくる（図25(a)）。逆にダイオードのp型部分に＋とn型部分に－の電圧をかけたとすると、この場合は空孔と電子が加えた電圧とは逆の極性に向かって動く（図25(b)）。前者の場合は電気が流れないが、後者の場合は電流が流れることになる。つまり、ダイオードは電流を一方向にしか流さない素子になる。この性質を**整流性**という。

半導体
(semiconductor)

n型半導体 (negative semiconductor)
p型半導体 (positive semiconductor)
キャリア (carrier)
ホール（正孔）(positive hole)

ダイオード (diode)

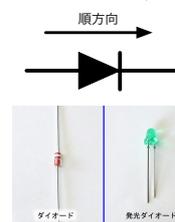


図24: ダイオードの記号

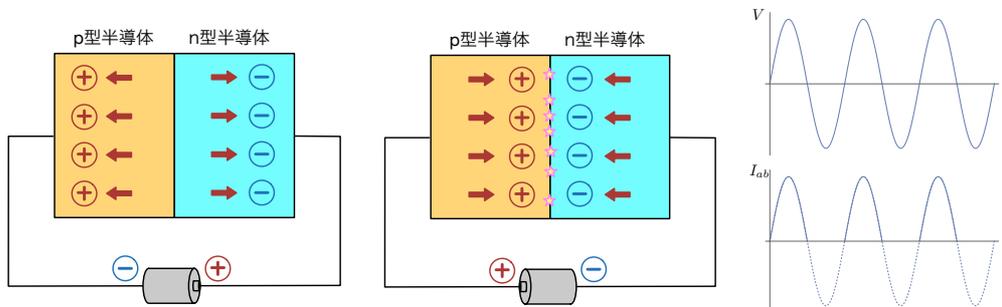


図25: ダイオードのしくみ (a) 電流が流れない向き (b) 電流が流れる向き (c) 整流性, ダイオードに交流電圧を加えたときに流れる電流を示す。

■発光ダイオード (LED)

PN接合部での電子のエネルギー遷移を利用して発光させるのが、**発光ダイオード (LED)**である。LEDは電気を直接光に変換するので、白熱電球や蛍光灯に比べてエネルギー効率が良い。最近では、白熱電球から発光ダイオードへの転換が進んでいる。

2014年のノーベル物理学賞は、『高輝度でエネルギー効率のよい白色光を実現する青色発光ダイオードの開発』で赤崎勇・天野浩・中村修二の3氏が受賞した。(光の3原色 ⇒ 91ページ)

コラム 24 (電球の明るさの単位はワットからルーメンに)

長らく、電球の明るさを示す単位は、白熱電球の消費電力 (ワット [W]) が使われていた。だがこれはおかしい話で、熱放出が少ない蛍光灯や LED は、同じ明るさでも消費電力は小さい。最近では光束 (光の放射量) を示すルーメン [lm] の単位を使うようになってきた。

- 光源の強さ (**光度**) を表す単位はカンデラ [cd] である。カンデラはラテン語で獣脂蝋燭を表す言葉で、英語の蝋燭 (candle) と同じ語源である。単位面積あたり (1 m² あたり) の光度 (**輝度**) の単位はカンデラ毎平方メートル [cd/m²] である。
- 光は四方八方に広がる。光の放射量 (**光束**) の単位をルーメン [lm] とする (1 cd = 4π lm とする)。ルーメンは昼光を意味するラテン語である。単位面積あたり (1 m² あたり) の光束 (**照度**) の単位はルクス [lx] である。ルクスもラテン語で光を表す。照度は光源からの距離の 2 乗に反比例して小さくなる。2m 離れると、1m 離れたところの 1/4 倍の照度になる。

いずれの単位も人名由来ではないので、小文字で書くのが普通である。

これまで使われていたワットとルーメンの換算は、緑色 (波長 555 nm) の色を基準として 1 W = 683 lm にする。他の色の場合はこの値より小さな係数を乗じることになる。

出力	青 (473 nm)	緑 (532 nm)	赤 (635 nm)
100 W	13600 lm	54600 lm	13600 lm
50 W	6800 lm	27300 lm	6800 lm
10 W	1360 lm	5460 lm	1360 lm
5 W	680 lm	2730 lm	680 lm
1 W	136 lm	546 lm	136 lm

家庭用の電球だと、30W は 325lm、50W は 600lm、60W は 800lm 程度に相当する。

8.3 電気と磁気 — 電磁誘導こそ電磁気学の本命

電気と磁気は相互に作用する。この電磁誘導によって、私たちは発電でき、モーターを回すことができる。

8.3.1 磁気の性質

磁気は次に上げるような性質をもつ。

- N と S の**磁極**が存在する。N 極だけ、あるいは S 極だけの単磁極は存在せず、必ず N と S のペアで存在する。
- N と N、S と S は反発し、N と S には引力が作用する。これらの力を**磁気力**といい、磁力がはたらく空間を**磁場 (磁界)**という。
- 磁場中で力が作用する方向を**磁力線**として表し、向きは N 極から S 極への向きとする。**方位磁石の N 極が向く方向が磁場の向き**である。

磁極
(magnetic pole)
磁気力
(magnetic force)
磁場 (磁界)
(magnetic field)
磁力線
(magnetic line of force)

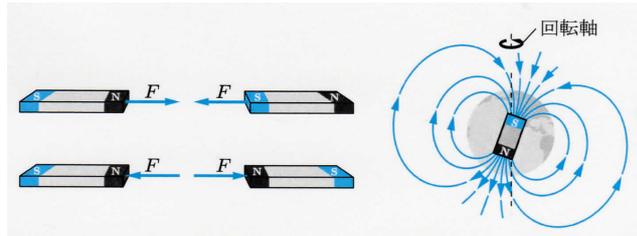


図 26: [左] 磁気力, [右] 地球は 1 つの大きな磁石.

■磁化

「磁石」という言葉が使われるが、ほとんどの磁石は石ではない。磁鉄鉱という磁気をもつ鉱石はあるが、ふつうの磁石は遷移金属を含む合金や酸化物である。

磁力の源は、電子自身のもつ回転運動である。電荷をもつ電子が回転すると磁気が発生する。電子の回転する向きが揃えば全体に磁気が生じることになる。永久磁石は、電子のスピンの向きがずっと揃っている状態である。クリップが磁石にくっつくのは、近づけた磁極からの磁力線によってクリップ内の電子のスピンの向きが揃い、異符号の磁極がクリップに誘起され、引力がはたらくからである。クリップにさらにクリップがつくのも同じ原理だ。

地磁気があるのは、地球内部に回転電流があるからである。地球内部に高温のマントルがあり、地球の自転につられて回っている。このマントルが電荷をもっていると、回転電流によって磁気が生じることになる（地球ダイナモ説）。地磁気にそって鉄の棒にショックを与えると磁石になることがある。これは、鉄内部の磁場が衝撃をあたえることで揃うためである。ステンレスは鉄が主成分だが、磁石につかない。ふつうの鉄と結晶構造が異なるため磁性を失っているからである。

Topic

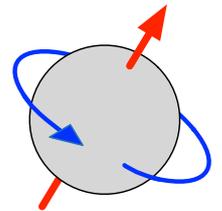
オーロラの見える範囲

北極や南極では空に音もなく色とりどりの幻想的なオーロラが出現する。宇宙から地球へ飛び込む電子が大気中の原子や分子と衝突することで発光する。酸素原子と反応すれば緑や赤に、窒素原子と反応すればピンク色になる。

地球には磁場があるため、電子は簡単には入り込めないが、高緯度では磁力線に沿って侵入することができる。そのため、オーロラは主に高緯度で観測される。太陽活動が活発になると、大量の電子が放出されるため、オーロラは低緯度でも観測されるようになる。ちなみに、北極と南極の両方で、同時刻に逆巻のオーロラが発生していることが知られている。

地球は 1 つの大きな磁石である。方位磁針の N 極が向く北極には S 極がある。

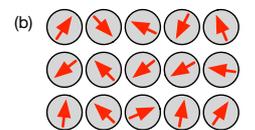
磁化 (magnetization)



(a) 電子の回転運動



(b) スピンが揃った状態



(c) スピンがばらばらな状態

図 27: 磁気力の源

ダイナモ = 発電機
(dynamo)

オーロラ (aurora)

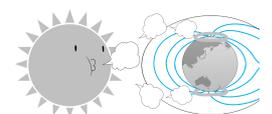


図 28: オーロラは太陽からの電子の風が、地球の磁力線にそって極地域に入り込むことで発生する。

8.3.2 電気と磁気

■右ねじの法則

法則 1 電流のまわりに磁場が発生する

直線状の導線に直流電流を流すと、そのまわりの空間に同心円状の磁場が生じる。磁場の向きは「電流の流れる方向に右ねじを進ませたときに、ねじの回転の向き」と同じになる（右ねじの法則、図 29）。

磁場の向きとは、方位磁針を置いたときに N 極が向く方向である。

円筒状にコイルをつくり電流を流すと、電流を流した時だけ磁石の性質をもつ電磁石ができる。とくにコイルの内部に鉄芯を入れておくと、鉄による磁化の効果も加わって強い電磁石ができる。

■電磁石を使ったモーターの原理

電気を流すことによって回転運動を継続的に行うモーターをつくることができる。図 31 はその断面図を描いたものだ。永久磁石の N 極と S 極でつくられた磁場のなかで、回転軸を取り付けた電磁石を用意する。電磁石のコイルを流れる電流の向きは、180 度ごとに逆転できるように接続部分を工夫する（整流子と呼ばれる装置）。そうすると、常に磁石の反発力と引力が同じ回転方向に生じるようにでき、回転が持続する。

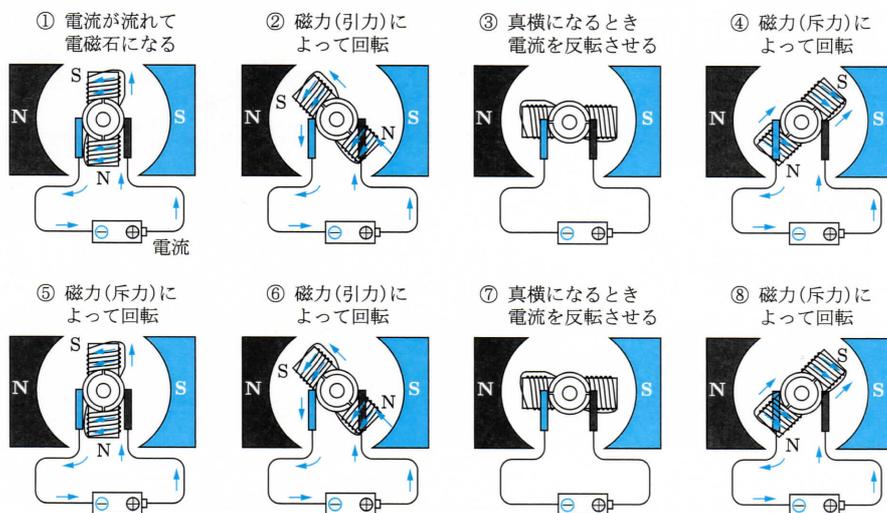


図 31: モーターが回転するしくみ。1. 電流が流れ電磁石になる。2. 磁力（引力）によって回転。3. 真横になったとき電流を反転させる。4. 磁力（斥力）によって回転。5. 磁力（斥力）によって回転。6. 磁力（引力）によって回転。7. 真横になったとき電流を反転させる。8. 磁力（斥力）によって回転。

電磁相互作用の法則 1

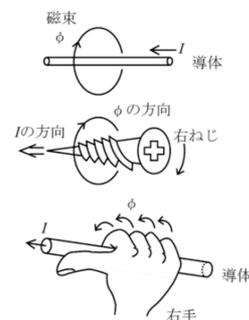


図 29: 右ねじの法則 (right-handed screw rule). 向きは「電流の向きに右手の親指を向けたとき、右手の 4 本の指が巻く方向」と表現してもよい。

電磁石 (electromagnet)

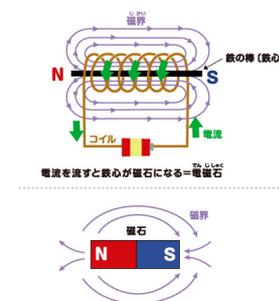


図 30: 電磁石 電流をコイル状に流すと中に置いた鉄芯が磁石になる。

8.3.3 ローレンツ力

■ローレンツ力とフレミングの左手則

図 35(a) に示すように、U 字形磁石を置き、直流電流を紙面の奥から手前に向かって流す。磁石の磁場と導線のまわりの磁場の重ね合わせを考えると、紙面上、導線の左側は磁場が互いに逆向きなので弱めあい、導線の右側は磁場が同じ向きなので強めあう。磁力線はなるべくまっすぐになろうとする性質があるので、強めあった磁力線は導線を左側に押し出す力を及ぼすことになる。

法則 2 電流は、磁場から力を受ける

磁場の中に置かれた電流（導線または荷電粒子の動き）は、磁場から力を受ける。この力をローレンツ力という。ローレンツ力の向きはフレミングの左手の法則（図 33）で表される。

フレミングの左手の法則は、左手の 3 本の指を拡げて、人差し指を磁場 B の向き、中指を電流 I の向きとしたとき、親指の向く方向が導線が受ける力 F の方向である。親指から順に FBI として覚えておくとよい。

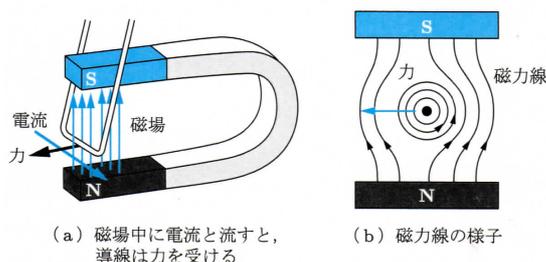


図 35: ローレンツ力 (a) 磁場中に奥から手前に向かって電流を流すと、電磁力が左向きに生じる。(b) 磁力線が最短距離で結びつこうとすることが電磁力の源

■ローレンツ力による粒子の運動

電荷を帯びた粒子が磁場中に飛ぶと、常に進行方向に対して垂直な向きにローレンツ力を受けることになる。垂直な方向の力は運動方向を変える。常に一定の力がかかるのであれば荷電粒子は円運動をすることになる。

Topic 荷電粒子を加速するサイクロトロン

放射線を用いた癌の治療が広く行われるようになってきた。これは X 線や荷電粒子（電子や陽子、重粒子線）を加速させて人体に照射し、癌細胞の増加を防ぐためだが、癌細胞のところに到達するためには、 10^8 V 程度の電圧で粒子を加速させることが必要で、数 100 m もの長さの装置が必要にある。そこで、磁場を使って粒子を円運動させ、同じところを何周も飛ばしながら、徐々に加速させる装置が円形加速器（サイクロトロン）である。最近では設置する病院も増えてきた。

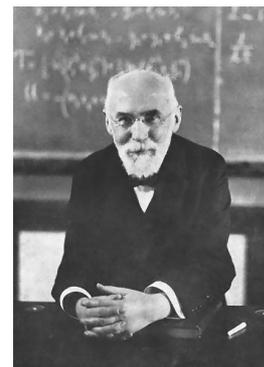


図 32: ローレンツ H.A. Lorentz (1853–1923)

電磁相互作用の法則 2

ローレンツ力 (Lorentz force)

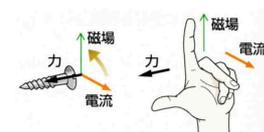


図 33: フレミングの左手の法則

フレミング John A. Fleming (1849–1945)

円形加速器（サイクロトロン）(cyclotron)

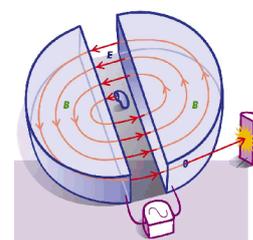


図 34: サイクロトロン 磁場をかけて方向を変えながら、何回も電場で加速して、速度の大きな粒子をつくる

8.3.4 電磁誘導

■ファラデーの電磁誘導の法則

ファラデーは図 37 のような装置で、コイルに磁石を近づけたり、遠ざけたりすると、そうした移動時に、コイルに起電力が発生することを発見した。磁石の動きを止めると、起電力は発生しない（図 39）。このことから、「コイル内を通過する**磁力線の数が変化するとき**、起電力が発生する」と理解することができる。

さらに実験の結果、発生する誘導起電力の向きは、磁束の数を元のままに保とうとするように発生していることがわかる。

- 磁石の N 極を近づけると、コイルを通過する磁束が増えるので、コイルは磁束が増えないような向きに磁束を発生させるよう起電力を引き起こす。
- 磁石の N 極を遠ざけると、コイルを通過する磁束が減るので、コイルは磁束が減らないような向きに磁束を発生させるよう起電力を引き起こす。

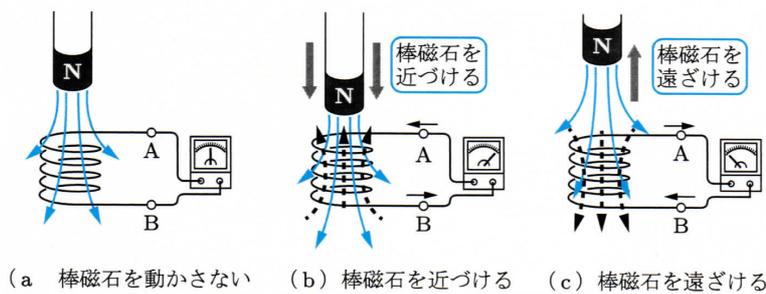


図 39: 誘導起電力の発生。

これらを法則として、次のようにまとめよう。

法則 3 磁束の変化が起電力を生じさせる

閉回路（閉じた電気回路、またはコイル断面）を貫く磁束が変化すると、回路には起電力が生じる。この現象を**電磁誘導**とよび、発生する起電力を**誘導起電力**、生じる電流を**誘導電流**と呼ぶ。（**ファラデーの電磁誘導の法則**）

誘導起電力の向きは、生じた磁束の変化を打ち消すように誘導電流が流れる方向である。（**レンツの法則**）

電磁誘導の現象は、いわば「磁束に対する慣性の法則」といえる。磁束が現状を保とうと、変化に対して反対するのである。

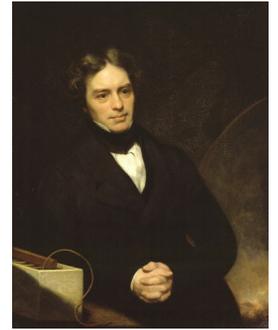


図 36: ファラデー Michael Faraday (1791–1867)

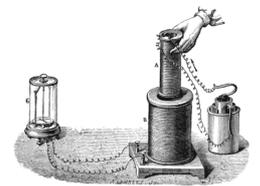


図 37: ファラデーの誘導起電力の実験

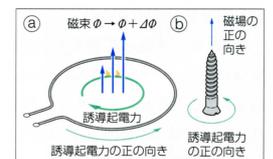


図 38: 誘導起電力の向き

図 38: 誘導起電力の向き

電磁相互作用の法則 3
電磁誘導
 (electromagnetic induction)
誘導起電力
 (induced electromotive force)
誘導電流
 (induced current)

レンツ
 Heinrich F. E. Lenz
 (1804–65)

Topic

非接触型 IC カード

銀行 ATM カード・クレジットカード・鉄道乗車券カードなど、カードのセキュリティを上げたり、情報をたくさん蓄えたりするために、集積回路を組み込んだカードが増えてきた。

IC カードのなかには、駅での改札のように、直接に機械に触れなくても反応する「非接触型」がある。これは、カードの周囲にコイルが埋め込まれていて、駅の改札機に近づけると磁場が通り、カード内の回路に電流が流れる電磁誘導原理を利用している。電流が流れると、IC チップからカードの個人情報が発信され、それを改札の通信機が読み取る、というしくみである。だから、カードに寿命はない。

■発電機のしくみ

磁場の中で導線を動かすと起電力が発生することから、発電機ができる。発電機の基本は、図 41 にあるように、コイルを磁場の中で回転させることである。

最近では防災グッズに、手回し式発電機をよく見かけるようになったが、この原理は、交流発電機でも直流発電機でも同じだ。

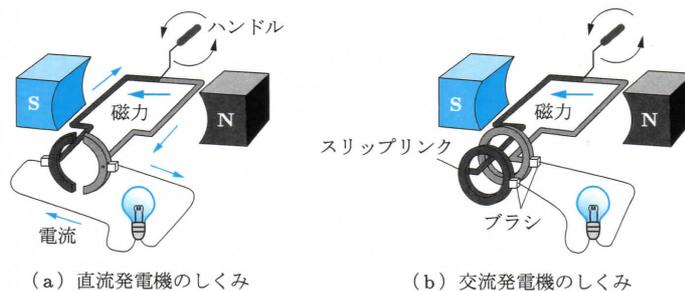
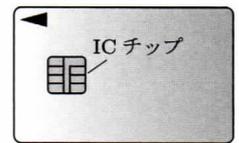


図 41: 発電機のしくみ 交流発電機も直流発電機も基本は同じ。両者の違いはコイルで発生する起電力の取り出し方である。構造は交流発電機の方が簡単だ。

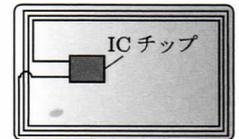
コイルの面が磁力線を横切るときが（磁力線の変化が大きいため）もつとも起電力が大きく、コイルの面が両磁極と並行のときは（磁力線の変化が小さいため）起電力は瞬間的に 0 になる。

電気会社の発電所も原理は同じで、自転車のライトの発電機を大きくしたものである。水力発電、火力発電、原子力発電、風力発電問わず、タービンを回すという意味で同じ構造である。

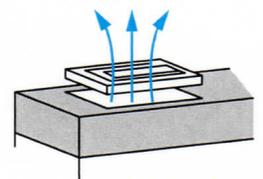
集積回路 IC (integrated circuit)



(a) 接触型 IC カード



(b) 非接触型 IC カード



(c) タッチするパネルから磁力線が出る

図 40: 非接触型 IC カードの中にはコイルが埋め込まれている。

8.4 家電製品いろいろ — 最終進化形は何か

ここまで触れられなかった、身の回りにある電気製品のしくみを考えてみよう。

■IH クッキングヒーター

電磁誘導（⇒119 ページ）により、金属板に磁石を近づけたり、磁石を動かしたりすると、金属板に電流が流れる。このとき発生する電流を**渦電流**という。この原理を利用して加熱するしくみが**誘導加熱 (IH)**である。

IH クッキングヒーターは、渦状に巻いたコイルに交流を流し、鍋の底に渦電流を発生させる。電流が生じたとき、抵抗の大きい金属ならば、ジュール熱が発生するので温まることになる。したがって、銅やアルミなど電気抵抗の低い金属でできた鍋や底の薄い鍋だと IH 調理器は使えない。IH 調理器具対応という土鍋は鍋底の部分に金属コーティングや金属板プレートをいれている。（最近では、交流の周波数を上げることによって使える鍋の種類を増やしている製品も登場してきた。）周辺の空気を加熱する無駄がないので、エネルギーは効率的だ。また、少しでも持ち上げると加熱されない。この理由は簡単であろう。

■電子レンジ

電子レンジは、2450MHz の電磁波・マイクロ波を照射し、共振によって水分子の振動を激しくすることで加熱する。したがって、水分を含んでいるものだけ加熱され、焦げ目がつくことはない。アルミホイルなどの金属を入れるとマイクロ波の電圧が金属に電流を流し、金属が放電を起こすので危険である。金箔などの模様がある皿も模様に変色することがある。

なお、凍っているものは結晶構造がしっかりしているため、電子レンジでは直接加熱することはできない。「解凍モード」があるレンジでも、電磁波の強さを弱め長い時間をかけて周囲の温かい空気から徐々に解凍させていく。

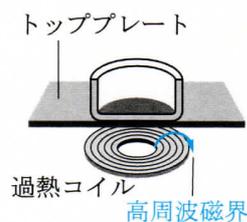
■インバータ式家電製品

コンセントからの交流電流を直流に変換する装置を整流器（⇒114 ページ）というが、逆に、直流を交流に変換する装置をインバータ（逆変換, inverter）と呼ぶ。

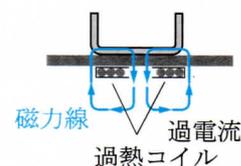
交流モーターを動かすとき、モーターの回転速度は交流電源の周波数によって変わる。インバータと制御装置を組み合わせるとモーターをコントロールすることによって、モーターの回転数を変え、エアコンや冷蔵庫による温度を無駄なく一定に保とうとする製品が「インバータ家電」と称されている。

蛍光灯でも、周波数を高めて明るさをアップし、チラツキも抑制する性能があるとして、「インバータ式蛍光灯」がある。

渦電流
(eddy current)
誘導加熱 IH
(induction heating)



(a) 内部構造



(b) 加熱の原理

図 42: IH 調理器のしくみ。

電子レンジ
(microwave oven)



(a) 内部構造



(b) 加熱の原理

図 43: 電子レンジのしくみ。

■体組成計

体重だけでなく体脂肪/筋肉/骨などの量を測定する器具がある。「乗るだけ」タイプと、部位ごとに詳しく測れる「グリップ」タイプがあるが、どちらも体内に微弱な電流を流し、その反応を膨大なサンプルデータから推測して表示する。直接体脂肪などを計測しているわけではない。

朝起きてすぐと、1日活動した後の夕方以降とでは、体内の水分分布が大きく異なり、測定結果も変わる。ちなみに、体組成を計測するタイミングとしては、1日活動して帰宅し、食事を取る前、かつ、お風呂に入る前が最も適しているという。

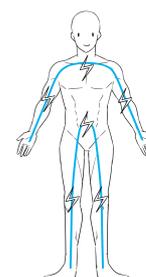


図 44: 筋肉と体脂肪とでは電気抵抗が異なることを利用して体脂肪を測定することができる。

■リニア新幹線

東京・名古屋間を40分で結ぶリニア新幹線の建設が始まった。リニアとは回転する部分の無い平板状のリニアモーターのことだ。レール部分と車体に電磁石を用意し、磁石の反発力を利用して車体を浮かせ、磁石の引力を利用して前方へと移動させる原理である。従来の鉄道と異なって、レールや架線との接触部分がないため、高速に移動することが可能になる。

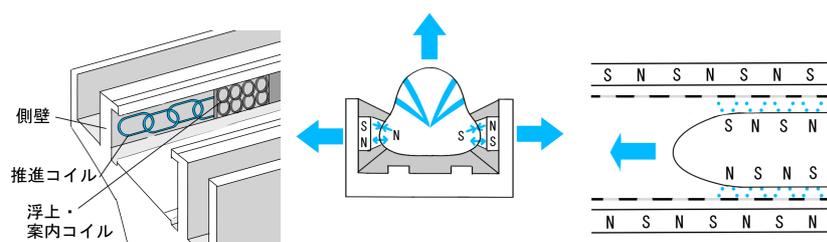


図 45: 平板状の電磁石を使うリニア新幹線。磁界の中を進むことになるので、室内で使う電気も運転しながら発電する。

■3D テレビ

メガネをかけると立体映像になるテレビが発売されている。左右の目にわずかに違う映像を届けることができれば、立体に見えるのが理屈だが、同じ画面を見ながら左右で違う映像を受け取るためにはいくつか方法がある。

- 映画館などでは偏光シートを向きを変えて左右に貼ったメガネを提供している (⇒97 ページ)。安価で済むが解像度に限界がある。
- 現在、家庭用として販売されているものの主流は、高速で左右のシャッターが開閉するメガネ方式である。1秒間に120回左右の目に入る映像がシャッターで切り替わる。見ている人間はシャッターに気づかずに残像を合成して立体と感ずることになる。
- 画面の画素ごとに細かく凸型のレンズをつけて、左右の目に違った情報を届ける方法もある。メガネなしで立体映像になるが、立体で見える場所が限られたり、画面の大型化が難しいようだ。

かつては左右で赤と青のセロハンなどを貼ったメガネを用意して、目に入る映像情報を分ける方法があったが、色の再現性に問題があった。

■携帯電話

携帯電話は、街の中に設置されている基地局と常に交信していて、自分がどこの基地局に一番近いかを把握している（ページング技術）。この交信は断続的で、交信時間以外はバッテリーの節約のため機械は OFF になっている。したがって、病院や航空機など、電波を発すると障害が起きる可能性がある場所では「携帯電話の電源を切ってください」というアナウンスがされることになる。

エレベーターの中など静電遮蔽された空間では、携帯電話がページングに失敗するため、基地局探しに躍起になる。そのため電源の消耗が早くなってしまう。そのため、長時間使う予定のないときは、携帯電話の電源は切っておくとバッテリーの節約になる。

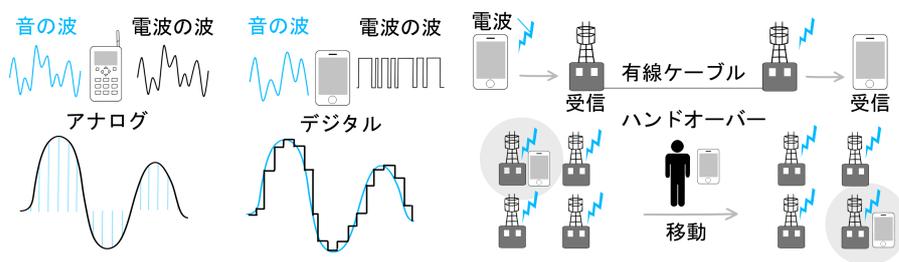


図 46: 携帯電話のしくみ (a) アナログ方式は波形データを送信する。デジタル方式は波を矩形で表して、その大きさを 2 進数 (0 か 1 か) に変換して送信する。(b) 移動しても携帯電話がつながるのは、最寄りの基地局を電話機が常に把握しているから。

コラム

コラム 25 (カーナビゲーション)

車を運転するときに自分の現在地と行き先を知らせてくれるカーナビゲーション (カーナビ, automotive navigation system) は、自分の位置を正確に知ることができる GPS(Global Positioning System) のおかげである。GPS はアメリカ軍が自軍の位置を正確に知るために配備したシステムで、24 個の衛星 (GPS 衛星) から発信する電波情報を受信機で解析するしくみだ。地球上のどこにいても 4 台の衛星が上空にいるので、そのうちの 3 台からの電波を受信できれば、三角測量の要領で、自分が地球上のどこにいるのかが、他に何も目印がなくてもわかってしまう。

カーナビは、加速度センサーやジャイロセンサーを搭載して自分の動きを記録・計算し、GPS で得た情報を補正・修正しながら画面を表示する。ビルの谷間やトンネル内では電波を受信できないので、そのときは計算値が表示されることになる。

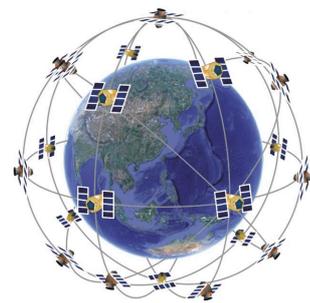


図 47: GPS 衛星は 24 個の衛星のシステム。