

電機電子基礎技術

高齢・障害・就職者雇用支援機構

北海道職業能力開発大学校

第1編 電機電子基礎

1. 機械分野における電機電子技術

我々の身の回りには様々な機械製品が使われており、有益な仕事をしている。その仕事の基となるエネルギー源として熱エネルギーや流体エネルギーがあるが、現在使われている重要なエネルギー源は電気エネルギーである。これは、電気自動車が実用されていることから明らかである。

また、現在の機械はコンピュータが機械を操作するような自動化が進み、さらにその動作も高度なものが要求されている。半導体製造装置はサブミクロンオーダーの精度が要求されており、ハードディスクの磁気ヘッドの位置精度は、飛行機が地上から 5mm の位置を飛んでいるのと同じ程度と言われている。もちろん、この位置精度は電気を使ったモータによってなされている。

機械装置をコントロールするための機械制御の分野においても、現在は電気が使われており、センサからの電気信号をコンピュータで処理し、コンピュータから出力される電気信号でモータなどの駆動装置を動かしている。このような機械装置では、外部の状況を検出するためのセンサ技術や、実際に駆動装置を動かすためのアクチュエータ技術が、さらには個々の機器間で電気信号を伝えるためのインターフェイス回路技術や、装置をコントロールするための制御回路技術など、電子技術が必要になる。

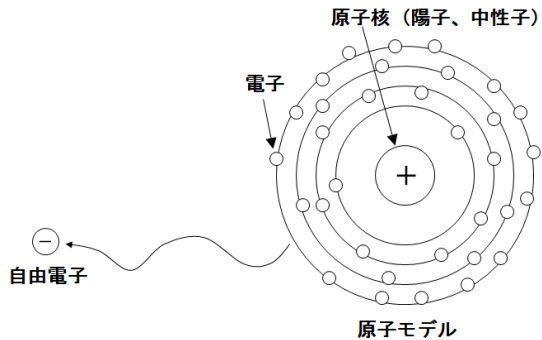
このように、現在使用されているほとんどの機械装置には電気が使われており、電気信号による外部状況の検出および動作の指示、電気エネルギーによる装置の駆動などが行われている。現在の機械には電気は不可欠な技術要素であり、機械を創る現在の機械技術者にとっては電気電子技術が必要不可欠である。

このテキストでは電気で動く機械、すなわち「電機」を創るのに必要となる「電機電子技術」を習得することを目的としている。

2. 電気とその作用基礎

2. 1 電気とは

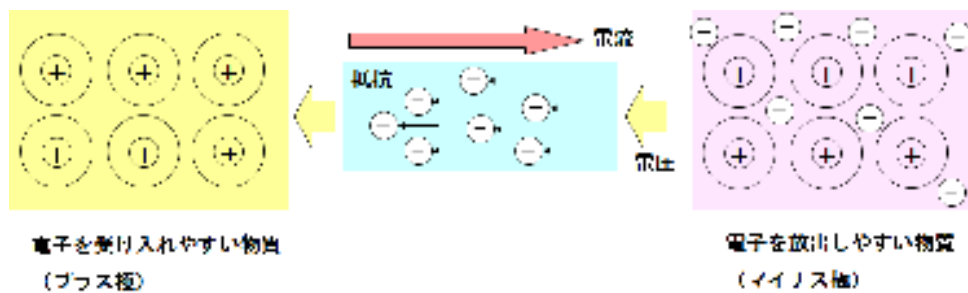
全ての物質は原子から成り立っている。原子は、原子核と電子からなり、原子核は陽子と中性子からなる。陽子と電子には互いに引き合う力が生じる。また、電子同士もしくは陽子同士には反発しあう力が生じる。この力を出す素が電荷である。電荷には正の電荷、負の電荷があり、陽子は正の電荷を、電子は負の電荷を持っている。電荷の単位は[C]（クーロン）で、電子は -1.602×10^{-19} [C]の電荷を持っている。



負の電荷を持つ電子は正電荷を持つ陽子（原子核）から引き寄せられる力を受けるが、負の電荷を持つ電子同士には反発しあう力が生じる。そのため、電子は原子核を中心に何重かの円軌道上で円運動をする。原子の最も外側の軌道（最外殻）運動する電子は陽子と引き合う力が弱く、陽子と各電子の力のバランスにより、最外殻の電子を放出したり、電子を受け入れたりする。外部からの影響により放出された電子が自由電子となる。

自由電子は電子を放出し易い物質（マイナス極）から電子を受け入れ易い物質（プラス極）に移動する。短時間当たりに移動する電子の量を電流と言い、電子を動かすのに必要な力（のようなもの）を電圧という。

自由電子はマイナス極からプラス極へ移動するが、自由電子の発見以前に「電流はプラス極からマイナス極へ流れる」と決めていた。したがって現在も、「自由電子はマイナス極からプラス極へ移動するが、電流はプラス極からマイナス極へ流れる」としている。



自由電子は移動する物質（空間）によって移動しやすさが異なる。この移動しやすさ（しにくさ）を抵抗という。移動しやすい物質を導体、移動しにくいものを絶縁体、その中間のものを半導体という。

移動している電子はエネルギーを持っており、電子が負荷（エネルギーを変換するもの）を通ることにより、外部に対してエネルギーを出していく。電子の持つエネルギーで光を出したり仕事をしたりなどのエネルギー変換により、電気で様々な作用をすることが出来る。

2. 2 電気の3要素

電気の基本となる3つの要素に、電流、電圧、抵抗がある。

電流：一定時間内に流れた電子の数。電流の単位は[A]

1Aは 6.25×10^{18} 個/秒の電子が移動（1秒間で1Cが移動）

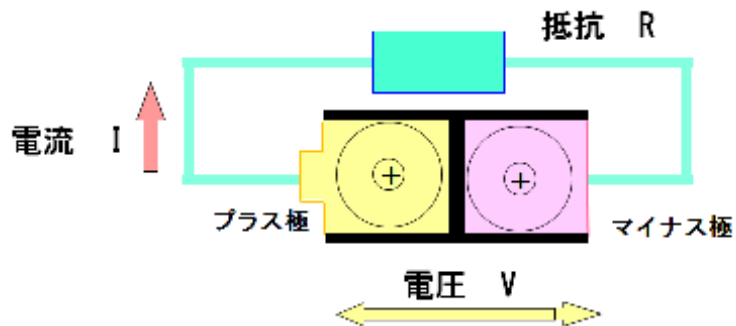
（電流はプラスからマイナスに流れるが、電子はマイナスからプラスに流れる）

電圧：電子を動かすのに必要な力（のようなもの）。電圧の単位は[V]

抵抗：電圧をかけて電子を流す時の、電子の流れ難さ。抵抗の単位は[Ω]

電流を I 、電圧を V 、抵抗を R とすると、

$$I = \frac{V}{R} \quad (\text{オームの法則})$$



2. 3 電気エネルギー

電流を流すと、抵抗の部分からエネルギーを取出すことが出来る。電流が持つエネルギーを電気エネルギーといい、その単位は[J]で表される。電気エネルギーは電力量とも言う。

電気エネルギーは抵抗の部分により様々なエネルギーに変換され、モータであれば運動エネルギー、電球であれば光エネルギー（一部は熱エネルギー）、スピーカーであれば音エネルギーに変換される。

電気エネルギーは、流した電流、かけた電圧、通電時間の積で求められる。エネルギーを W 、時間を t とすると、

$$W = IVt \quad \text{単位：[J] = [A] \cdot [V] \cdot [s]}$$

電力とは、単位時間当たりに取り出すことのできる電気エネルギーで、電流と電圧の積で求める。電力の単位は[W] = [J/s]。電力を P とすると、

$$P = IV \quad \text{単位：[W] = [A] \cdot [V]}$$

2. 4 電力制御

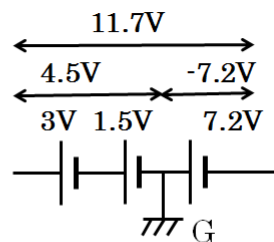
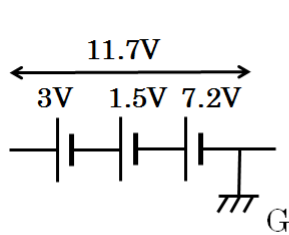
電気が外部に対して仕事をするとき、電気エネルギーを調整することにより速さ、力、明るさなどを調整することができる。電気エネルギーを調整するとは、即ち、電流、電圧、時間を調整することである。

2. 5 電気の源（電源）

我々が電気エネルギーを使用するためには、電流を流す（電圧をかける）源が必要になる。この源を電源と言う。この電源が持つ電圧で電流を流し、流れた電流から電気エネルギーを取り出す。

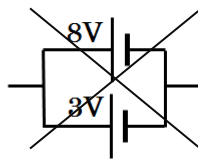
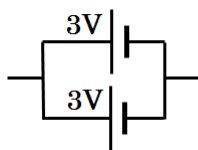
電源には電流が流れる方向が一定の直流電圧（DC 電圧）と、電流の流れる方向や大きさが周期的に変化する交流電圧（AC 電圧）がある。一般的に、直流電圧は乾電池やバッテリーから得られ、交流電圧は電力会社から供給される商用電源から得られる。

複数の電源を接続する場合、直列接続のときは各電源の電圧の和が全体の電圧となる。並列接続のときは、電源の電圧が異なると電位の差が生じそこに電流が流れる。負荷（抵抗）がないと過電流が流れ非常に危険である。仮に負荷があっても、電圧が低い側の電源に逆方向の電流が流れるため、使い方としては望ましくない。機械制御においては、並列接続は電源電圧が等しいとき（交流の場合、位相も検討）だけ使用可能と考えておく。

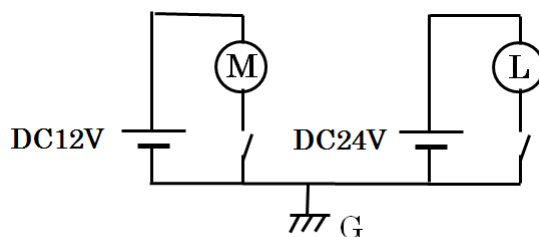


回路の電圧の基準を接地（グラウンド、GND、G）という。通常は基準（G）を 0V として電圧を示す。

G: 電圧の基準 (0V)



8V プラスと 3V プラスの間に抵抗がないので、この間に無限大の電流が流れる



電圧の異なる機器を動作させる場合、マイナス (0V、GND) を接続することがある。

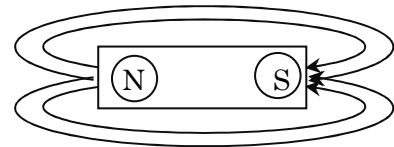
3. 電磁気

3. 1 E・B 対応と E・H 対応

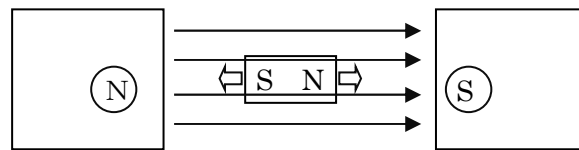
電気を扱う上で、電気と密接な関係がある磁気も重要な要素である。磁気（磁界）を発生させるものとして、昔は「磁荷というものが存在し、磁荷によって磁界（磁場）は発生する」（E・H 対応）と考えられていた。しかし、研究が進むにつれ、「磁界（磁場）は電流によって発生する」（E・B 対応）と考えられるようになった。現在では E・B 対応が正しいことが明らかになった。しかしながら、理解しやすさから磁気現象を説明する上で E・H 対応を用いることもある。

3. 2 磁界（磁場） —ここだけは E・H 対応で説明—

磁石は鉄など（強磁性体材料）を吸引する。また、磁石はN極とS極を持ち、異極同士は吸引し、同極同士は反発する。このような磁力（磁石の力）の及ぶ範囲を磁界（磁場）という。磁界には仮定の磁束線（磁力線）があり、磁束線はN極から出てS極に入る（但し、E・B 対応では磁石内部はS極からN極。E・H 対応では磁石内部もN極からS極）。



磁石のN極とS極を対向させると、N極からS極に向かう磁界（磁場）が発生する。この磁界中に磁石を置くと、磁石のS極には磁界を作るN極にひかれる力が働き、磁石のN極には磁界を作るS極にひかれる力が働く。



磁力が生じる磁界では磁束が存在し、単位面積当たりの磁束の本数を磁束密度と言う。磁束を Φ [wb]、面積を A [m²]、磁束密度を B [T (テスラ)] とすると、次式で表される。

$$B = \Phi / A$$

磁界の強さは、磁束密度および磁束が存在する媒体によって決まる。磁界の強さを決める媒体の物理量を透磁率といい、磁界の強さを H [A/m]、透磁率を μ とすると、次式で表される。

$$H = B / \mu$$

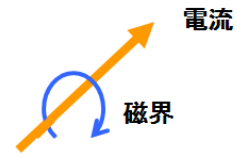
地球も北極がS極、南極がN極の磁石と考えることができる。したがって、方位磁針は地磁気に反応してN極が北方向を、S極が南方向を向くようになっている。

3. 3 電磁気の法則

電磁気では2つの基本法則がある

1) アンペールの法則 (ビオ・サバルの法則)

導体に電流が流れると、流れた電流の方向に対して右回りに磁界が発生する (電荷が運動すると磁界が発生する)。これをアンペールの法則 (アンペアの右ねじの法則) という。ほぼ同じものとしてビオ・サバルの法則がある。(アンペールの法則がわずかに早い)



磁界の強さを H 、流す電流を I 、導体からの距離を r とすると、その関係は次式で表される。

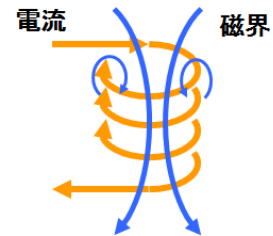
$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad \text{磁界の強さ } H \text{ の単位 : [A/m]}$$

・視点を変えると

電流をらせん状に流すと、すなわち電線を巻いてコイル状にすると、コイル全体で大きな磁界を作ることができる。

コイル中心部の磁界の強さを H 、流す電流を I 、コイルの半径を r 、巻き数を N とすると、その関係は次式で表される。

$$H = \frac{NI}{2\pi r}$$



2) ローレンツ力 (ローレンツ力の法則とは言わないが)

磁界で電荷が運動すると、電荷は磁界から力を受ける。この力をローレンツ力という。(この力は、アンペアの右ねじの法則により、電荷が運動したことによって発生した磁界と外部の磁界による作用)

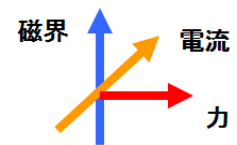
・視点を変えると (その1)

磁界で電線に電流を流すと (電荷が運動すると)、電線は力 (電磁力) を受ける (電荷はローレンツ力を受ける)。(電磁力は電荷に働くローレンツ力を積分したもの) 受ける力 F は、磁束密度を B 、電流を I 、電線の長さを l とすると、次式で表される

$$F = BIl$$

この磁界の方向、電流の方向、発生した力の方向を示す方法に「フレミング左手の法則」が用いられる。

このローレンツ力 (フレミング左手の法則) を応用したものとして、モータがある。磁界中で電流を流すと、ローレンツ力によりモータが回転する。



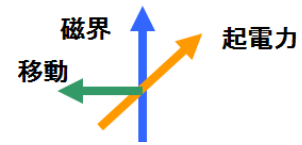
・視点を変えると（その2）

磁界で電線が運動すると（電荷が運動すると）その電線に電流が流れ起電力が発生する（電線内の電荷が力を受けて移動する）。発生する起電力 e は、磁束密度を B 、移動速度を v 、電線の長さを l とすると、次式で表される。

$$e=Bvl$$

この磁界の方向、電流の方向、電線の運動の方向を示す方法に「フレミング右手の法則」が用いられる。

このローレンツ力（フレミング右手の法則）を応用したものとして、発電機がある。磁界中で発電機を回すと、ローレンツ力により電流が流れる（電圧が発生する）。

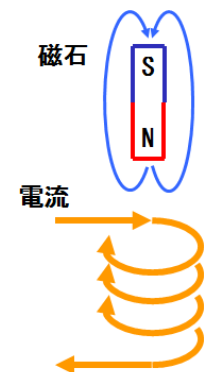


・視点を変えると（その2'）

静止している電線に磁界が近づくと（磁界が変化すると）その電線に電流が流れ起電力が発生する（相対的に、磁界で電線を運動させることと同等）。流れる電流は磁界の速度が大きいほど早くなる。また、磁界を近づけたときと遠ざけたときでは流れる電流の方向が逆になる。

・視点を変えると（その2''）

電線をらせん状に巻いたコイルに磁界を近づけると電流が流れる。流れる電流は磁界の速度が大きいほど早くなる。また、磁界を近づけたときと遠ざけたときでは流れる電流の方向が逆になる。言い換えると、コイルに磁石を近づけたり遠ざけたりするとコイルに電流が流れる。



以上のような、磁界の変化により電流が流れる現象を電磁誘導という。

3. 4 相互誘導と自己誘導

コイルに電流を流すと磁界が発生する（コイルに流れる電流が変化すると磁界が変化する）。逆にコイルまわりの磁界が変化すると電流が変化する（流れる）。

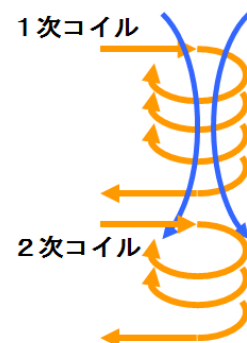
1) 相互誘導

2つのコイルを並べ（1次コイル、2次コイル）、1次コイルに電流を流して磁界を発生させると、その磁界によって2次コイルに電流が流れる。この現象を相互誘導という。

1次コイルに電流が常に変化している交流電流を流すと、2次コイルにも交流電流が流れる。変圧器はこの相互誘導を応用したものである。

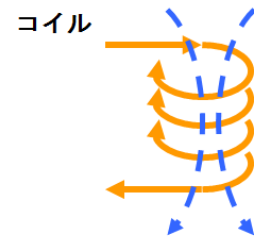
流れる電流（電圧）とコイルの巻き数の関係は。

$$\frac{V1}{V2} = \frac{I2}{I1} = \frac{N1}{N2}$$



2) 自己誘導

コイルに電流を流すと磁界が発生する。磁界が変化したことによりその磁界を打ち消すような電流がコイルから流れる（電圧が生じる）。同様にコイルに流れる電流を遮断したときにも電圧が生じる。このような現象を自己誘導という。



3. 5 静電気と静電容量

自由電子を押し出す力（電圧）がない物体同士で、何らかの働き（摩擦など）があると、自由電子が物体間を移動することがある。電子が移動して、物体が電気を持つことを帯電という。電子を放出した帯電を正帯電、電子を受け入れた帯電を負帯電という。帯電して移動しない電荷を静電気と言う。正帯電した物体と負帯電した物体を接続すると、一瞬だけ電流が流れる。



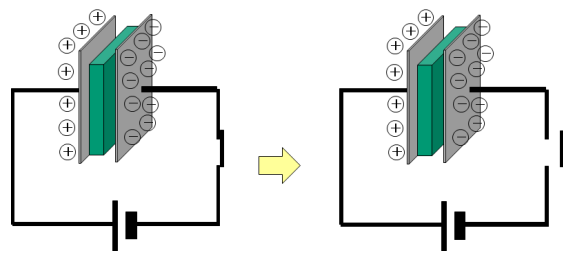
2枚の導体の板にすきまを設け、一方をプラス極に接続し、もう一方をマイナス極に接続すると、電子が移動してそれぞれ正帯電、負帯電する。このように電子が移動した（電荷が蓄えられた）ことを充電と言う。このような働きをする部品をコンデンサ（キャパシタ）という。

受け入れた電子の量（電荷を蓄える能力）のことを静電容量といい、蓄えられる電荷を Q 、静電容量を C 、かける電圧を V とすると、その関係は次式で表される。

$$Q=CV$$

また、両辺を t で微分すると、 $dQ/dt=I$ より、その関係は次式で表される。

$$I=C \frac{dV}{dt}$$



コンデンサは、2枚の導体の板（もしくはフィルム）に絶縁体を挟み込んだ構造になっている。コンデンサの静電容量 C は、導体の面積を A 、導体間の距離を l 、絶縁体の誘電率（物質固有の物性値）を ϵ とすると、その関係は次式で表される。

$$C = \epsilon \frac{A}{l}$$

4. 電気材料

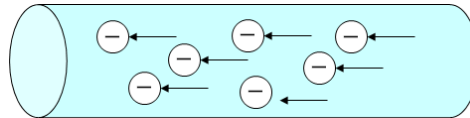
4. 1 電気材料

4. 1. 1 抵抗率

あらゆる物質は電圧をかけると電流が流れる。流れる電流の量はその物質の抵抗値で決まる。物質の抵抗値はその物質が持つ固有の電気の通りやすさを示す抵抗率、電気が流れる部分の面積および長さで決まる。抵抗Rは

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

ρ : 抵抗率、L : 物質の長さ、A : 物質の断面積



抵抗率の大きさにより、電流が流れやすい物質、流れにくい物質、その中間の物質に分類することができ、それぞれを導体、絶縁体、半導体と呼ぶ

導体	抵抗率 $10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ 以下	銅、アルミなどの金属
絶縁体	抵抗率 $10^6 \Omega \cdot \text{m}$ 以上	樹脂、石、木、空気など
半導体	導体と絶縁体の間	シリコン、ゲルマニウムなど

導体の抵抗値はその温度により変化する。一般的に温度が上昇すると、金属の抵抗値は増加し、半導体の抵抗値は減少することが多い。

4. 1. 2 導電材料

電気を通しやすい導電材料（導体）を金属と呼び、その中でも特に以下の金属が良く利用されている。代表的な金属の抵抗率を以下に示す。

銀	$\rho = 1.59 \times 10^{-8} [\Omega \cdot \text{m}]$	とても高価、酸化するのであまり利用されない
銅	$\rho = 1.68 \times 10^{-8} [\Omega \cdot \text{m}]$	やや高価、通常の導線で利用
金	$\rho = 2.44 \times 10^{-8} [\Omega \cdot \text{m}]$	非常に高価、酸化しないためメッキで利用
アルミ	$\rho = 2.82 \times 10^{-8} [\Omega \cdot \text{m}]$	安価、通常の導線で利用
鉄	$\rho = 10.1 \times 10^{-8} [\Omega \cdot \text{m}]$	銅やアルミよりも大きい

4. 1. 3 絶縁材料

電気を通しにくい絶縁材料として、以下のものが良く利用されている。

無機物絶縁材料：雲母（マイカ）、磁器、石綿（アスベスト）

有機物絶縁材料：ゴム（クロロプレン、ブタジエン、シリコン）

樹脂（ポリ塩化ビニル、ポリエチレン、フェノール樹脂）

4. 1. 4 半導体材料

導体と絶縁体の中間の材料として半導体がある。4個の価電子をもつシリコンやゲルマニウムの単結晶に不純物を混入させて作る。不純物の種類により、2種類の半導体を作ることができる。

N型半導体 アンチモンや砒素などを混入。自由電子を持つ。

P型半導体 ホウ素やガリウムなどを混入。自由電子の受けを持つ。

P型半導体とN型半導体を接合させると、PからNに電流は流れ、NからPには流れないようになる。

4. 2 磁気材料

磁気材料には、磁界を発生させるための磁心材料と、永久磁石を作るための永久磁石材料がある。

磁心材料：ケイ素鋼板、純鉄

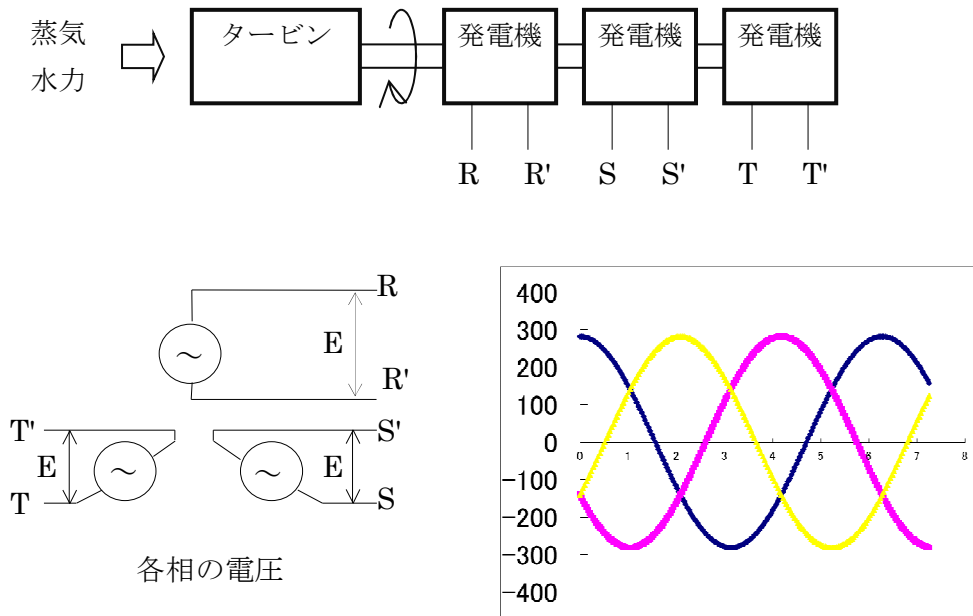
永久磁石材料：MK鋼、フェライト磁石、ネオジム磁石

5. 発電

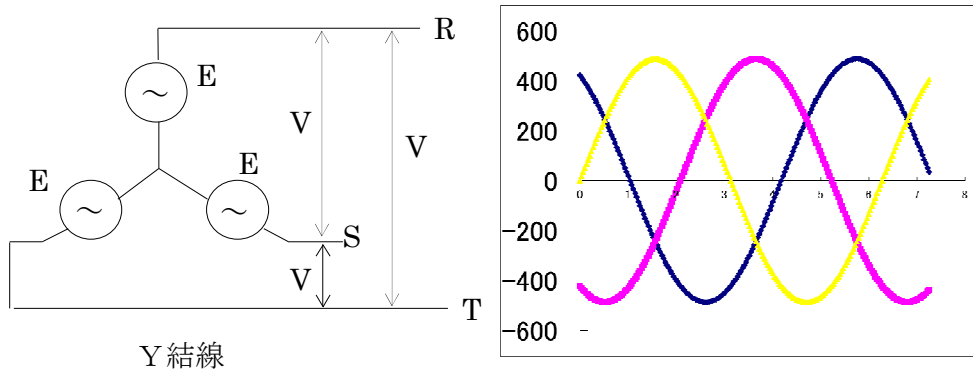
商用電源は発電所によって発電される。ほとんどの発電には、フレミング右手の法則を利用した発電機が使われる。発電所では、蒸気の水力を使ってタービンを回転させ、それにより発電機を動作させて発電している。発電機からは交流電圧が得られる。

発電所では、3個の発電機を同時に回転させ、電圧 E 、位相が 120 度ずつずれた3対の交流電圧を発電する。これは、工場などで使用する大型のモータを回転させるためには、位相がずれた3対の交流電流が適しているためである。また、周波数は東日本と西日本で異なり、東日本では 50Hz の交流が、西日本では 60Hz の交流が発電される。

発電される電圧は数 10 万ボルトの高圧な電圧であるが、実際に工場などで使用するときには 200V まで電圧を下げている。



電圧が得られる6本の線のうち、 R' 、 S' 、 T' を接続すると、これら3本の線には電流が全く流れず、代わりに、 R - S 、 S - T 、 T - R 間で、位相が 120 度ずつずれた、電圧 V の交流電圧が得られる。このような接続方法をY結線といい、送電の電線数を半分に減らすことができる。

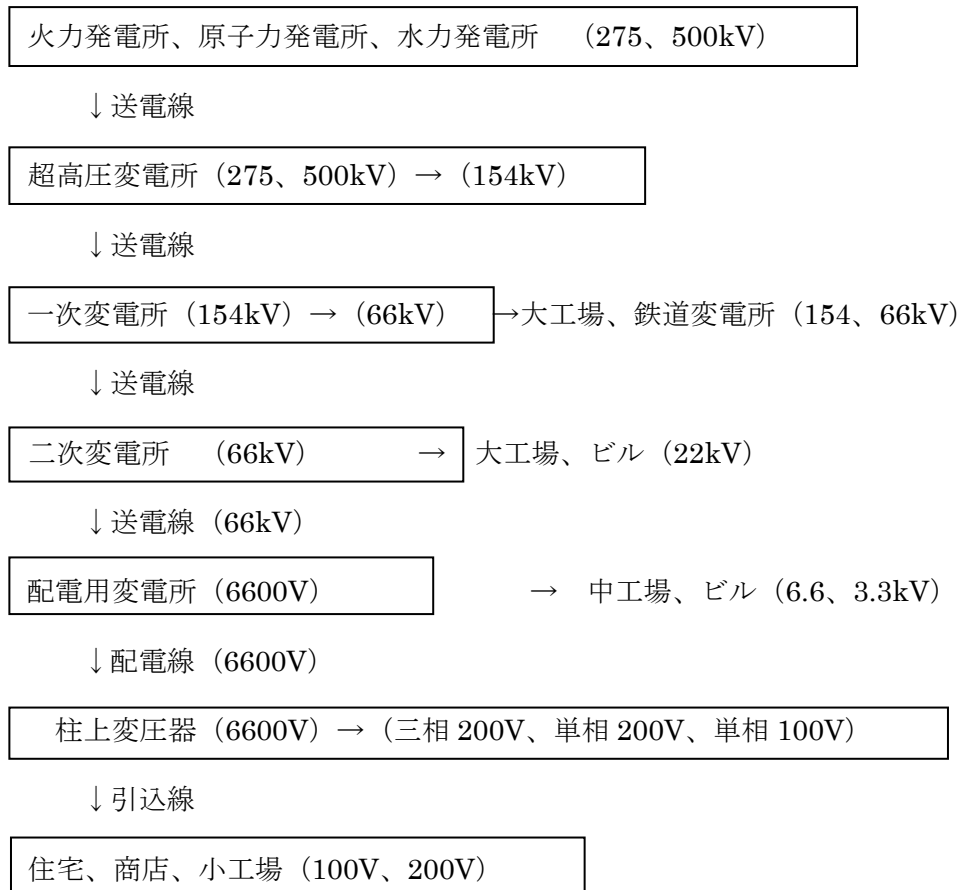


ここでの、発電機から得られる電圧 E を相電圧、各線間の電圧 V を線間電圧といい、 $V = \sqrt{3} \times E$ の関係が成り立ち、また線間電圧の位相は相電圧の位相より 30 度進む。

発電所で発電された電気の送電は、送電効率を高めるため（送電によるエネルギー損失を小さくするため）、高い電圧で送電している（275、500kV）。この時、送電線の数を少なくするためにY結線で送電し、中性線（R'、S'、T'）は接地されている。

発電された電気は、送電線を使って送電用変電所へ送電され、トランス（変圧器、コイル）により使用に適合した電圧に降圧し、大規模工場や鉄道変電所へ送電される。最後の配電用変電所では 22 kV や 6.6kV に降圧され、電柱の上にある柱上変圧器、もしくは各工場や事業所の変電設備へ送られる。また、ここでΔ結線にされる。多くは S 相が接地される。

柱上変圧器、もしくは各工場や事業所の変電設備では、送られた電気を単相交流 100V や単相交流 200V、三相交流 200V に降圧し、各家庭や小さな工場へ送電する。このうち、単相交流 200V は一般家庭で大きな動力を得るために使われ、三相交流 200V は工場などの大型モータを回転させるのに使われる。



6. 電気・電子部品、制御用機器

6. 1 電源

1) 電源の働き

電気エネルギーを得るための電気の源。

電源として、商用電源（電力会社が供給する電気）や電源装置などがある。

2) 直流と交流

電圧には、電流の流れる方向や大きさが一定の直流電圧（DC 電圧）と、電流の流れる方向や大きさが一定時間ごとに変化する交流電圧（AC 電圧）がある。

直流電源として、電池や交流電圧から直流電圧を作り出す直流電源装置がある。直流電源装置としては非安定化電源と、安定化電源がある。非安定化電源は小型家電など簡易的になものとして使われ（DC アダプタなど）、安定化電源は工場内の自動化装置は計測器などで使われる。

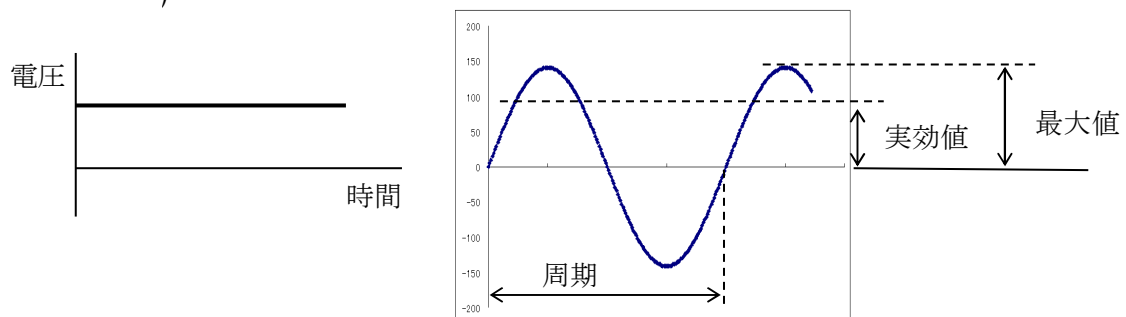
交流電圧の代表的なものとして正弦波交流があり、その電圧の大きさは時間経過とともに周期的に変化する。電圧の大きさは実効値で表され、最大値の $1/\sqrt{2}$ 倍になる。これは同じ電圧の直流電源から得られるエネルギーと等しい電圧となる。

$$V = \sqrt{2} \cdot V_{\max}$$

単位時間当たりの繰り返し数を周波数、また 1 回の時間を周期と言う。周期と周波数の関係は次のようになる。

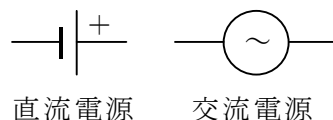
$$T = \frac{1}{f}$$

T : 周期 [s]、f : 周波数 [Hz]



交流電源として通常は商用電源が使われる。また商用電源を一旦直流電圧に変換し、それを任意の実効値、任意の周波数に変換する交流電源装置（インバータ）もある。

電源の図記号



3) 電圧の大きさによる電気の分類

電気設備技術基準（電気設備に関する技術基準を定める省令）においては、次のような区分で電圧の大きさが定義されている。

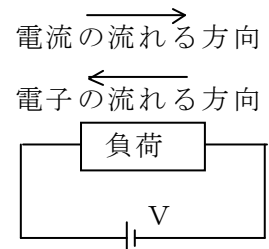
	直流	交流
低圧	750 ボルト以下	600 ボルト以下
高圧	7000 ボルト以下	7000 ボルト以下
特別高圧	7000 ボルトを超えるもの	7000 ボルトを超えるもの

4) 直流電源

直流電流は電池や直流電源装置などから取り出すことができる。直流電源には陽極（プラス）と陰極（マイナス）があり。電流は+から-に流れる（電子は-から+に流れる）。

線番（ワイヤーマーク）は統一されていないが、プラスには P、V、VCC などが、マイナスには N、G、GND などが使われる。DC24V の場合、プラスに P24、マイナスに N24 などがある。

線の色には、一般的にプラスには赤、マイナスには青（または黒）が使われる。



直流電源の種類

a) DC24V

制御系のセンサ、各種負荷（出力機器）などの電源として使われる。

b) DC5V

耐ノイズ性が要求される FA 機器ではあまり使わないが、マイコン回路などの電子基板では良く使われる。

c) その他 DC12V、DC15V、DC3.3V など

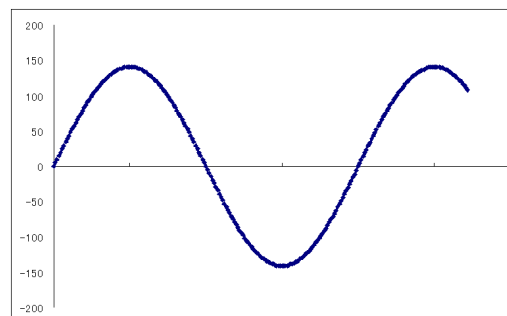
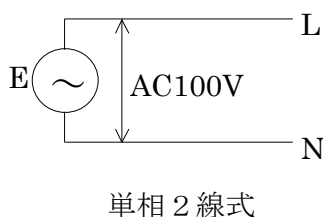
5) 交流電源（商用電源）

交流電源として、商用電源を用いることがほとんどである。発電所で発電された電圧が変電所によって降圧され、最終的に配電線（電柱の電線）の AC6600V を柱上変圧器（柱上トランス）や各事業所での変電設備（キュービクル）により単相交流 100V、単相交流 200V、三相交流 200V に変圧して使用する。

交流電源の種類

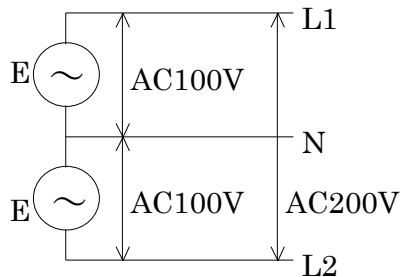
1) AC100V 単相 2 線式 (1φ2W AC100V)

一般家庭用電源。線番は L、N と記載するのが一般的（N側が接地されてる）。線の色は L には赤もしくは黒、N には白を使うことが多い。

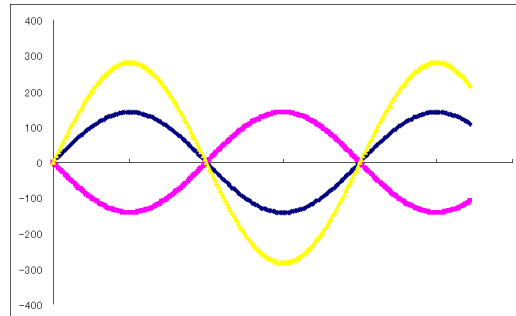


2) AC200V 単相3線式 (1φ3W AC200V)

一般家庭電源。2つの交流電圧を合わせたもので、位相が180度ずれている。線番はL1、L2、Nと記載するのが一般的。Nが接地されており、L1-N間がAC100V、L2-N間がAC100V、L1-L2間がAC200Vとなる。線の色はL1には赤、L2には黒、Nには白を使うことが多い。エアコンなどの大型モータや電磁調理器などの電源として使用される。



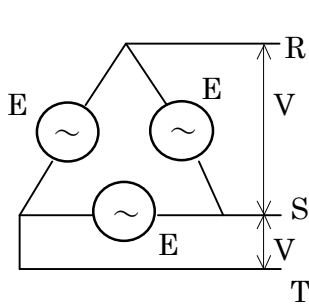
単相3線式



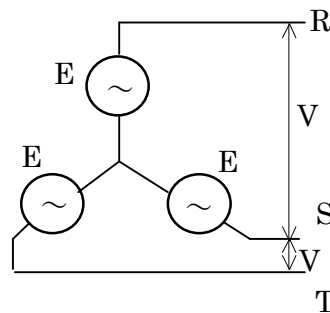
3) AC200V3相3線式 (3φ3W AC200V)

工場で一般的に使われる電源。3つの交流電圧を合わせたもので、それぞれ位相が120度ずつずれている。線番は通常1次側(電源側)はR、S、T、二次側(負荷側)はU、V、Wと記載する。R-S間、S-T間、T-R間のそれぞれがAC200Vになる。電線の色はRには赤、Sには白、Tには青を使うのが一般的。大きな交流モータ(誘導電動機)を駆動するのに適している。(規定にはないが大抵S相が接地されている)

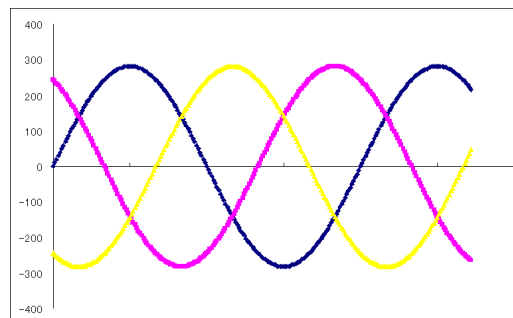
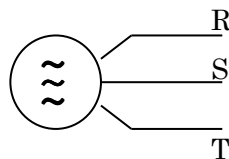
3つの交流電圧の合わせ方として、デルタ結線(Δ結線)とスター結線(Y結線)があり、6600Vを超える送電ではY結線で、6600V以下の配電ではΔ結線で送られる。



Δ結線



Y結線



時間	t0	t1	t2	t3	t4	t5
R	++	+	-	--	-	+
S	-	+	++	+	-	--
T	-	--	-	+	++	+

三相交流の電流の流れ

6) 電源の仕様

電源から取り出すことの出来る電気の種類や定格（上限）

電流の種類：交流（AC）・直流（DC）、

定格電圧：出力される電圧

定格電流：流すことの出来る最大電流

定格電力：取り出すことの出来る最大電力

電源には、直流電源の場合、流すことの最大電流（許容電流、定格電流）が決められており、定格以上の電流を流そうとすると、電圧が降下する。電源装置によっては保護回路が働き、定格以上の電流が流れないようにになっているものもある。

交流電源の場合、ブレーカーなどが取り付けられており、許容電流を越えると電流が遮断されるようになっている。

6. 2 電線

電線は、電気を流すための導体。一般には導体の導線に絶縁体の被覆を施した絶縁電線が使用される。参考として、特別高圧の送電線は被覆を施していない。一本のものを単線、複数の線がまとめたものをケーブルと呼ぶ。なお、コードは電気配線用電線である。用途によって、単線・ケーブル、固定用・可動用、信号用・電力用などに分けられる。

1) 導電部の種類

導電部として、単線とより線がある。単線は 1 本の太い導線で構成されている線で、ノイズを受けにくいが高いため、固定した後は可動しない箇所で使われる。より線は、複数の細い導線がよられている線で、単線に比べて配線の取り回しがしやすい柔らかい線になっているが、長くなるとノイズを受けやすくなる。

線の材質としては、抵抗率の小さい銅やアルミニウムが使われる。

2) より線の規格

より線の種類として、導電部の太さ（断面積や直径）、絶縁部（被覆）の材質と厚さなどによりいくつかの種類がある。これらのものは規格化されており、日本でよく使われる電線の規格として日本の JIS 規格とアメリカの UL 規格がある。JIS で規格化された線として IV 線（ビニル絶縁電線）、KIV 線（電気機器用ビニル絶縁電線）、VSF 線（単芯ビニルコード）、KV 線（通信機器用ビニル電線）、KQE 線（架橋ポリエチレン絶縁電線）などがある。

・ JIS 規格による分類 (断面積 0.5 または 1.25mm²)

	外径	電流 A	電圧 V	サイズ mm ²	用途
IV (1.25)	3	19	600	1.25~5.5	盤内固定用
KIV (0.5)	2.5	4	600	0.5~8	電機機器用
VSF (0.5)	2.5	4	300	0.5~2	電機機器用
KV (0.5)	1.9	5	300	0.3~0.75	信号用
KQE (0.5)	1.55	9	60	0.2~0.75	弱電回路用

・ UL 規格による分類 (断面積約 0.5 AWG20)

UL1015(0.5)	2.65	9	600V	0.2~5.5 相当
UL1007(0.5)	1.87	7	300V	0.08~1.25 相当

UL 規格では、AWG (American Wire Gauge) を使って線の太さを示す。

AWG 線の断面積と許容電流

AWG28	0.08	3.1A
AWG24	0.20 (0.2)	5.4A
AWG22	0.32 (0.3)	7.0A
AWG20	0.51 (0.5)	9.2A
AWG18	0.82 (0.75)	12A
AWG16	1.31 (1.25)	19A

電線には許容電圧、許容電流があり、それを超えて使用してはいけない (実際には安全を考慮し許容の 1/3 程度で使用する)。

電線の色

日本では黒、白、赤、緑、黄、青などの線が使われる。用途によって使われる色がおおよそ決まっており、厳密な決まりは無いが、一般的には以下の色が使われる。

AC200V 赤 (R) - 白 (S) - 青 (T)

AC100V 赤、黒 (L) - 白 (N)

DC 電源 赤 (P) - 青、黒 (N)

アース線 緑 (G)

制御線 (直流) 青

制御線 (交流) 黄

その他、必要に応じて線の色を変えて使用する。

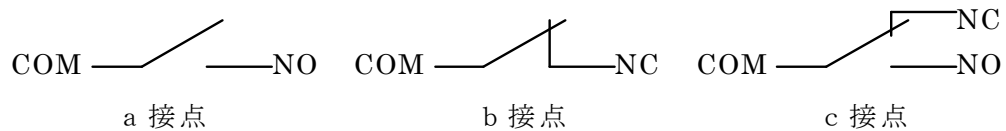
6. 3 スイッチ

1) スイッチの働き

操作するためのアクチュエータと、金属（導体）で作られた接点からなり、接点が接触したり離れたりすることによって、電流を流したり止めたりする。このような接点を機械式接点ともいう。

スイッチの接点として、操作したとき（動作したとき）に電流が流れる a 接点（メーク接点）、スイッチを操作（動作）したときに電流が遮断される b 接点（ブレイク接点）、操作（動作）すると電流の流れる方向が切り替わる c 接点（トランスファ接点）がある。それぞれの接点の端子には COM（Common）、NO（Normally Open）、NC（Normally Close）の名前がついている。

スイッチの図記号



接点が接触……電流は流れる（抵抗がほぼゼロ）

接点が離れる……電流は流れない（抵抗がほぼ無限大）

利点：安価、容易、大電流・高電圧に耐えられる、絶縁抵抗が大きい

欠点：寿命が短い(10~100 万回程度)、動作が遅い(5~10ms)、チャタリングを起こす

*チャタリングとは、接点が切り替わったとき、接点の状態が安定するまでの非常に短時間（0.01ms 程度）にまで ON/OFF を繰り返す現象

スイッチのアクチュエータとして、人が操作するものと、物が操作するものがある。人が操作して接点を切り替えるスイッチを操作スイッチという。また、物体が操作することによって接点が切り替わるスイッチを検出スイッチと呼ぶこともある。

スイッチを使用するときの表現として、「オン (on) / オフ (off)」と言う表現が使われるが、b 接点スイッチの場合、接点の状態なのかアクチュエータの状態なのかを示さないと混乱する恐れがある。ここでは「アクチュエータを操作する / 復帰する（操作しない）」、「接点が開く / 閉じる」、「接点が ON になる / 接点が OFF になる」、「電流が流れる / 流れない」、「電流が導通する / 遮断する」などを使うことにする。

スイッチの表現

アクチュエータを操作する、アクチュエータが動作する

→アクチュエータを復帰する（操作しない）、アクチュエータが復帰する

接点が開く、接点が動作する、接点が ON になる、導通する

→接点が開く、接点が復帰する、接点が OFF になる、遮断する

2) スイッチ (アクチュエータ) の種類

スイッチは操作するアクチュエータによって、様々な種類がある。

押しボタンスイッチ トグルスイッチ セレクトスイッチ、

参考資料： <https://www.nkkswitches.co.jp/home/klg/knowledge.cfm>

3) スイッチ (接点) の主な仕様

接点の種類・・・	a 接点：操作すると電流が流れる b 接点：操作すると電流が流れない c 接点：操作すると一方には電流が流れ、反対側には流れない
接点の数・・・	1 極、2 極、3 極・・・
接点の動作・・・	モーメンタリ：操作している間だけ、接点が切り替わる オルタネート：操作後手を離しても、接点の状態は変わらない
最大電圧・・・	かけることの出来る最大電圧
最大電流・・・	流すことの出来る最大電流
動作速度・・・	接点が切り替わるまでの時間

スイッチの極数と接点の表現方法

SPST=単極単投 (Single Pole, Single Throw)、

SPDT=単極双投、DPST=2 極単投、DPDT=2 極双投、3PDT=3 極双投

6. 4 抵抗器

1) 抵抗器の概要、働き

両端に電圧がかかったときに流れる電流を制限する。電圧を分配するなどの働きを持つ。

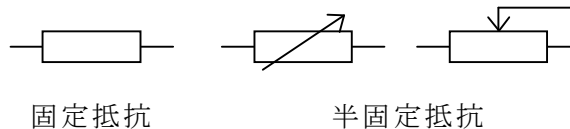
「抵抗器」は厳密な呼び方であって、一般的には「抵抗」と呼ばれることもある。

抵抗器には抵抗値が一定の固定抵抗器と、抵抗値を調整できる抵抗器がある。

頻繁に抵抗値を変える・・・可変抵抗器

一度調整したら、以後変化させない・・・半固定抵抗器

抵抗器の図記号



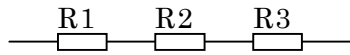
2) 電流と電圧の関係

$$I = \frac{V}{R} \quad V = IR \quad \text{オームの法則}$$

1 V の電圧をかけたときに 1 A の電流が流れるような抵抗を 1 Ω という。

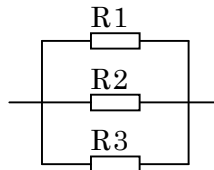
3) 合成抵抗

複数の抵抗を組み合わせたときの全体の抵抗の大きさ



直列 : $R = R1 + R2 + R3 + \dots$

各抵抗器に流れる電流が等しい



並列 : $\frac{1}{R} = \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3} + \dots$

各抵抗器にかかる電圧が等しい

4) 抵抗器の種類

- 炭素皮膜抵抗 : 汎用的に広く使われる。カーボン抵抗
- 金属皮膜抵抗 : アナログ回路など高精度を必要とするところで使われる。
- 酸化金属皮膜抵抗 : 電源など、大電流が流れるところで使われる。
- 巻き線抵抗 : 大電圧、大電流のところで使われる。

5) 抵抗器のカラーコードの読み方

炭素皮膜抵抗などはカラーコードを使って抵抗値を表す。一般的に4色の色で抵抗値を表し、最初の2色で2桁の数値、次で指数 (10^n)、最後は精度を表し、金 ($\pm 5\%$) 銀 ($\pm 10\%$)、なし ($\pm 20\%$) となっている。

ゼロから順番に、黒 茶 赤 橙 黄 緑 青 紫 灰 白

例えば、茶黄赤の場合、 $14 \times 10^2 = 1400[\Omega]$ となる。



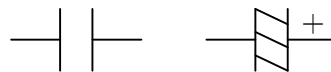
カラーコード

6. 5 コンデンサ (キャパシタ)

1) コンデンサの概要と働き

2枚の導体の板に絶縁体をはさみこんだ構造。導体板間の電圧 V をかけると、 $q=CV$ の電荷 (電子) が蓄えられる。コンデンサの働きとして、電気エネルギーを蓄える、交流電流を流す、直流を流さない、ノイズを除去する、などがある。

コンデンサの図記号



コンデンサ 電解コンデンサ

2) 電流と電圧の関係

$$I = C \frac{dV}{dt} \quad V = \frac{1}{C} \int Idt \quad C : \text{静電容量 (単位は F フェラッド)}$$

直流電圧をかけた場合、電流は一瞬流れるが、すぐに流れなくなる (電子がいっぱいまで蓄えられる)。

交流電圧をかけた場合、電流の位相は電圧に対し $\pi/2$ 進む

$$V=V_0\sin\omega t \text{ のとき } I=\omega C \cdot V_0\cos\omega t=\omega C \cdot V_0\sin(\omega t+\pi/2)$$

また、 ω が大きいほど（周波数が大きいほど）大きな電流が流れる（抵抗が小さくなる）。

3) 合成容量

複数のコンデンサを組み合わせたときの全体の容量の大きさ

$$\text{直列：} 1/C=1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3 + \dots$$

$$\text{並列：} C=C_1 + C_2 + C_3 + \dots$$

4) コンデンサの種類

電解コンデンサ

容量が大きい。極性があり、温度特性が悪く、寿命が短い。

セラミックコンデンサ（積層セラミックコンデンサ）

容量が小さく、デジタル回路のノイズ除去用として使われる。

フィルムコンデンサ（マイラコンデンサ）

容量が小さく、一般的に良く使われる。

5) コンデンサの容量の読み方

セラミックコンデンサなどは3桁の数字を使って容量を表す（単位に注意）。

$$103 \dots 10 \times 10^3 \text{ [pF]}$$

6. 6 コイル（インダクタ）

1) コイルの概要と働き

電線をらせん状に巻いた構造。電流が磁界を発生することにより、電気エネルギーを磁気エネルギーとして蓄える。磁気エネルギーを蓄える、直流を流す、交流を流さない、などの働きがある。

物理的性質と用途

電磁石として利用する。使用例：リレー、モータ、スピーカ

自己誘導を利用し、高い電圧を発生させる。使用例：安定器、イグニッションコイル

相互誘導を利用し、電圧の降圧、昇降、2つの回路を結ぶ。使用例：トランス

コンデンサと組み合わせ、共振を利用する。使用例：アンテナコイル、発振コイル

誘導リアクタンスを利用し、ある周波数の交流を抑える。使用例：安定器、ノイズフィルタ、チョークコイル

インダクタンスを利用し、電気エネルギーを蓄える。例：スイッチング・レギュレータ

2) 電流と電圧の関係

$$I = \frac{1}{L} \int V dt \quad V = L \frac{dI}{dt} \quad L: \text{インダクタンス (単位は[H] ヘンリー)}$$

直流電圧をかけた場合、電流は徐々に流れる。理想的にはどんどん大きくなるが、実際にはコイルの内部抵抗の作用により、ある値で一定になる。

交流電圧をかけた場合、電流の位相は電圧に対し $\pi/2$ 遅れる

$$V=V_0\sin\omega t \text{ のとき } I=-1/\omega L \cdot V_0\cos\omega t=-1/\omega L \cdot V_0\sin(\omega t-\pi/2)$$

また、 ω が大きいほど（周波数が大きいほど）小さな電流が流れる（抵抗が大きくなる）。

3) 合成インダクタンス

複数のコイルを組み合わせたときの全体のインダクタンスの大きさ

$$\text{直列: } L=L_1 + L_2 + L_3 + \dots$$

$$\text{並列: } 1/L=1/L_1 + 1/L_2 + 1/L_3 + \dots \quad \text{抵抗器と同じ}$$

4) コイルの種類

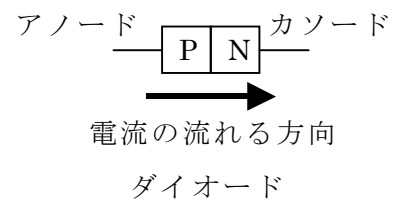
名称	特徴 形状
ソレノイド型	巻きやすい、漏れ磁束が大きい、一般的
トロイダル型	漏れ磁束が少ない
スパイラル型	平面にできる、チップ向き

6. 7 半導体部品

6. 7. 1 ダイオード

1) ダイオードの概要と働き

P型半導体とN型半導体を接合すると、PからNに電流は流れ、NからPには電流は流れないようになる（一方向しか電流を流さない）。それぞれP型半導体に接続された線（端子）をアノード、N型半導体に接続された線（端子）をカソードと呼ぶ。

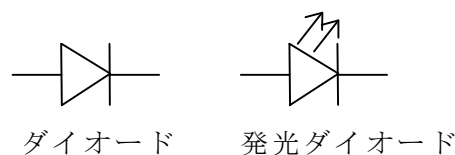


その働きとして、一方向に電流を流す、電圧を一定に保つ、光を出す、トランジスタを保護する、などがある。

電流を順方向に流したときのダイオード自身の電圧降下（順方向電圧降下：VF）は約0.7V。

熱に弱いので、半田ごてを使うときは、加熱のしすぎに注意する。

ダイオードの図記号



2) ダイオードの種類

整流用ダイオード（トランジスタ保護などにも使用） $V_F \approx 0.6 \sim 0.7V$

ツェナーダイオード（定電圧を作る）

発光ダイオード（光を放つ、表示する） $V_F \approx 2 \sim 3.5V$

3) 発光ダイオードの点灯方法

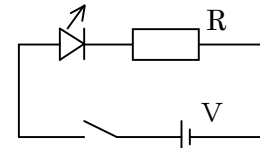
発光ダイオードは、順方向に約 10~20mA の電流を流すと点灯する。電流を制限するための抵抗を用い、その抵抗の大きさは、電源電圧を V とすると、LED での電圧降下（仮に）2V を引き、

$$R = \frac{V - 2}{0.01 \sim 0.02}$$

で算出する。

$V=5V$ のときで $R=330\Omega$

逆方向電圧 V_r がかかると破損するので、 V_r を超える電圧がかからないようにする。



発光ダイオードの点灯

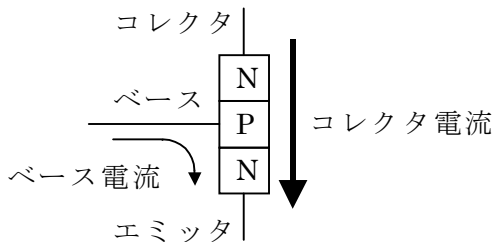
6. 7. 2 トランジスタ

1) トランジスタの概要と働き

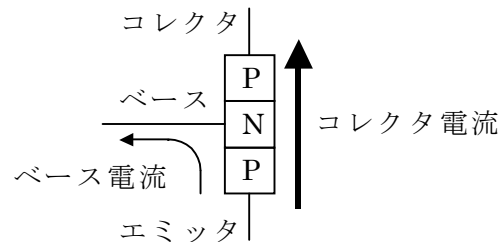
P 型半導体、N 型半導体を組み合わせた半導体部品で、その組み合わせにより NPN 型と PNP 型に分けられる。それぞれの半導体に接続された端子をベース、エミッタ、コレクタと呼ぶ。その働きとして、ベースからエミッタに流れる電流 I_B によってコレクタからエミッタに流れる電流 I_C を制御することが出来る

$$I_C = h_{fe} \times I_B$$

h_{fe} : 直流増幅率

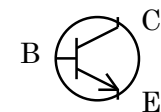


NPN 型トランジスタ

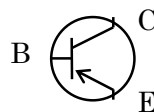


PNP 型トランジスタ

トランジスタの図記号



NPN型



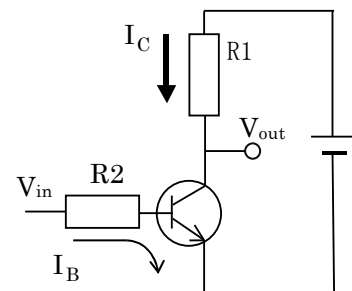
PNP型

2) 増幅作用

微少なベース電流で大きなコレクタ電流に増幅する。もしくはベースにかかる電圧でコレクタにかかる電圧を増幅する。

$$I_C = h_{fe} \cdot I_B$$

よく使われる増幅回路として、エミッタ接地回路がある。この回路を組み、 I_B を変化させると I_C が変化する。



エミッタ接地回路

$$I_B = (V_{in} - 0.7) / R_B$$

$$I_C = h_{fe} \cdot I_B = h_{fe} \cdot (V_{in} - 0.7) / R_B$$

$$V_C = V - R_C I_C = V - R_C / R_B \cdot (V_{in} - 0.7)$$

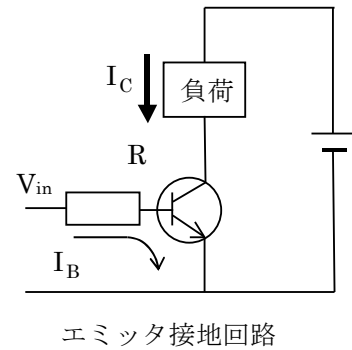
ただし、 I_C は $(V-0.7)/R_C$ を超えない（飽和状態）

実際の増幅回路モデルはもう少し複雑になる。詳しくは 7.4 で説明する。

3) スイッチング動作

NPN 型トランジスタでエミッタ接地回路を組み、飽和領域に達するベース電流を ON/OFF することによりコレクタ電流を ON/OFF することができる。この作用により、直流負荷のスイッチングを行うことができる。

そのほか、エミッタフォロア回路（コレクタ接地回路）を組み、ベース電圧を H/L にすることにより、コレクタ電流を ON/OFF することもできるが、機械制御では、この回路で直流負荷を駆動する使い方がほとんどである。



利点：動作が早い。チャタリングが生じない。寿命が長い。

欠点：ノイズに弱い。直流負荷しか駆動することが出来ない。

詳しくは 7.4 で説明する。

4) トランジスタの特性

I_B — I_C 特性 : I_B が流れると I_C が流れる。 $I_C = h_{fe} \times I_B$

V_{CE} — I_C 特性 : I_B が流れると I_C が流れるが、幾ら電圧を上げてても I_C は限界がある（飽和する）

I_B — V_{BE} 特性 : I_B が大きくなると、 V_{BE} は約 0.7V で一定になる

5) トランジスタの電氣的仕様

トランジスタを選定する際、NPN、PNP、高周波、低周波のほかに以下の仕様も検討する。

コレクタ・ベース間電圧 V_{CBO}

コレクタ・エミッタ間電圧 V_{CEO}

エミッタ・ベース間電圧 V_{EBO}

コレクタ電流 I_C

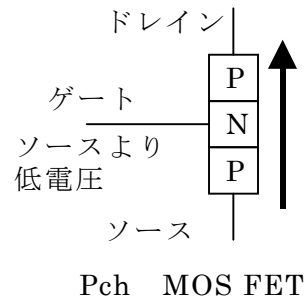
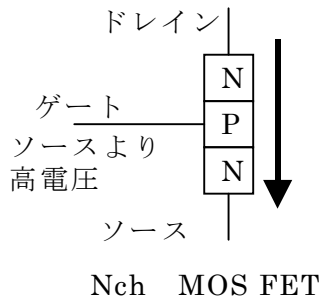
直流電流増幅率 h_{fe}

6. 7. 3 FET (電界効果トランジスタ)

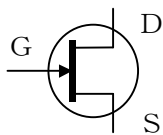
電圧信号によりスイッチング動作をするトランジスタ。トランジスタに比べ、制御のための電力が少なく（発熱が小さい）、駆動回路が簡単なため、トランジスタの代用として使われている。動作速度はトランジスタよりやや遅い。また、トランジスタと比べて MOS-FET は静電気で壊れやすい。ゲート、ソース、ドレインの端子があり、それぞれトランジスタのベース、エミッタ、コレクタに相当する。

FET の種類として、接合型、MOS 型などがあり、それぞれ p チャンネル、n チャンネルがある（接合型 p チャンネル FET、接合型 n チャンネル FET、MOS 型 p チャンネル FET、MOS 型 n チャンネル FET）。その中でも MOS 型 n チャンネル FET は NPN 型トランジスタの代用としてよく利用される。

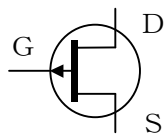
2SJ*** : Pch 、2SK*** : Nch



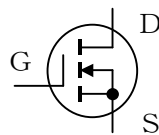
FET の図記号



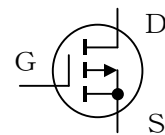
接合型 FEF(n)



接合型 FEF(p)



MOSFEF(n)

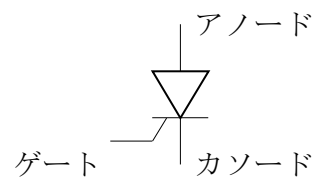


MOSFEF(p)

6. 7. 4 サイリスタ、GTO、トライアック

1) サイリスタ (SCR)

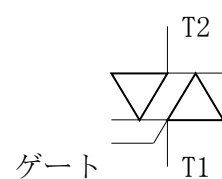
電圧信号によりスイッチング動作をする。直流のスイッチングの場合、ゲートからカソードに電流を流すとアノードからカソードに電流が流れ、ゲートからの電流を切っても、アノードからの電流は流れ続ける（自己保持をする）。



2) トライアック(双方向サイリスタ)

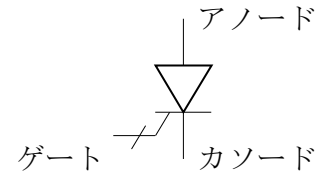
2つのサイリスタを逆方向に接続したものと同等の動作をする。ゲートからの電流入力信号による交流負荷の駆動に使われる。

T1、T2、G の端子があり、G に電源と同期するような信号を入力することにより、交流負荷を駆動させることができる。



3) GTO

サイリスタの自己保持機能を取り除いたもの。大型の誘導モータの駆動などに用いられる。



6. 7. 5 フォトカプラ

発光ダイオードとフォトトランジスタ（光の信号で ON/OFF するトランジスタ）を組み合わせた構造で、発光ダイオードを ON/OFF することにより、フォトトランジスタに接続された装置を ON/OFF 制御する。電気信号の絶縁のために利用されることがほとんどだが、フォトトランジスタのコレクタ電流が数 10mA なので、直流負荷を直接駆動することはほとんどない（LED 程度）。

特徴

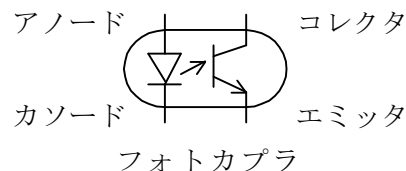
利点：発光ダイオード側（制御回路）とフォトトランジスタ側（駆動回路）が電氣的に完全に切り離されており、ノイズに強い。

動作が速い（10 μ s 程度）。

チャタリングが起きない。

寿命が長い（半永久的）。

フォトカプラの図記号



6. 7. 6 IC

1) アナログ IC (オペアンプ)

入力のアナログ電圧信号をさまざまな信号に変換し、出力する。アナログ IC としてオペアンプがほとんどである。

オペアンプを使った回路として、比較回路、反転増幅回路、非反転増幅回路、差動増幅回路、微分回路、積分回路、加算回路、減算回路 などがある

2) デジタル IC

デジタルの入力信号をさまざまなデジタル信号に変換し、出力する。デジタル信号として、電圧の H/L（例えば 0V、5V）を扱う。

デジタル回路の種類として、論理回路、フリップフロップ回路、カウンタ回路、パルス回路などがある。そのほか、様々な専用 IC（モータコントロール IC、ドライブ IC など）がある。

デジタル IC の種類

1)TTL IC

トランジスタを組み合わせた IC。安価で取り扱いが容易なため、広く使われる。電源は DC5V のみ。

入出力信号は電圧の H/L で、信号の H/L のレベルは電源電圧と同じ 0/5V となる。

実際に保障されている信号レベル (TTL レベル)

入力：L・・・0.8V 以下、H・・・2.0V 以上

出力：L・・・0.4V 以下、H・・・2.4V 以上

種類によっては O.C 出力 (トランジスタ出力) のタイプもある。

2)C-MOS IC

MOS 型 FET を組み合わせた IC。消費電力が小さく、電源電圧の範囲が広い (3~18V 程度)。

一方、TTL よりも壊れやすく、未使用の入力端子にも処理が必要となる。

専用の働きを持つ専用 IC の多くは C-MOS が使われる。

信号の H/L のレベルは電源電圧によって決まる。電源が DC5V の場合

入力：L・・・1.2V 以下、H・・・3.8V 以上

出力：L・・・0.1V 以下、H・・・4.9V 以上

TTL と組み合わせて回路を組む場合、信号レベルを合わせる必要がある。