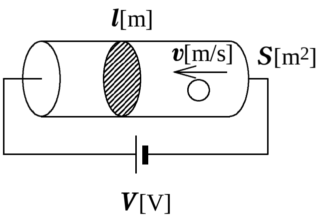
４．電磁気
４．３　電流
①　電流の強さ
　単位時間当たりに流れる電気量を電流と言い，I を用いて表します。したがって，Δt[s]間に Δq[C]の電気が流れたとき，電流の強さ I は次のように表すことができます。

$$\boxed{I=\frac{\Delta q}{\Delta t}}$$

　分母と分子の単位に注目すると，電流の単位は[C/s]と表すことができます。また，[A（アンペア）]を使って表すこともあります。
　次に電流の向きについてです。電気の流れる方向は電気が発見された当時にプラス極からマイナス極と決められました。後に電子が発見されて，電流の正体が電子であることが分かりましたが，それまでの慣例通り，電流の向きは実際に流れている電子とは逆方向のままとなりました。
　実際に電流の強さを求めてみましょう。断面積 S[m^2]の太さが一様な抵抗中を一定の電流が流れているとします。この抵抗中を電気量$-e$[C]，速さ v[m/s]の電子が通過しているとします。



　図の斜線部分を Δt[s]間に通過する電気量を求めます。電子の速さから，Δt[s]間で斜線部分を通過した電子が含まれる領域の体積は（　１　）[m^3]となります。電子の単位体積当たりの個数を n[1/m^3]とすると，この領域に含まれる電子の数は（　２　）[個]となるので，Δt[s]間に斜線部分を通過した電気量の総和は（　３　）[C]となります。したがって，電流の強さ I は次にように表すことができます。

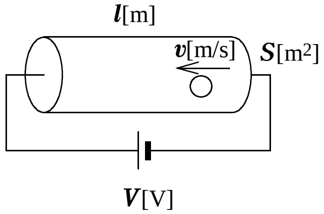
$$\boxed{I=enSv}$$

１：$Sv\Delta t$　２：$nsv\Delta t$　３：$enSv\Delta t$

□ pick up words
・電流の定義

② オームの法則

金属の中を自由電子が流れることで電流が流れます。金属の中には自由電子だけでなく，陽イオンがあります。自由電子が電場によって加速されるものの，速度を増すにつれ，陽イオンからの抵抗力が大きくなります。このため，電場から受ける力と陽イオンからの抵抗力がつり合い，自由電子の速度が一定となります。ここでは，自由電子の速さ $\boldsymbol{v}$ に対して，陽イオンから抵抗力 $\boldsymbol{kv}$ を受けるものとして考えていきましょう。



上の図のように，長さ $\boldsymbol{l}$，断面積 $\boldsymbol{S}$ の抵抗を電圧 $\boldsymbol{V}$ の電池につなぎます。抵抗内にかかる電場は，（$\boldsymbol{V=Ed}$）より，紙面右向きに（　1　）となります。この電場から質量 $\boldsymbol{m}$，電気量 $\boldsymbol{-e}$ の自由電子が，（$\boldsymbol{f=qE}$）より，紙面左向きに大きさ $\boldsymbol{e\frac{V}{l}}$ の力を受けます。この力のため自由電子は加速されますが，上述した通り，陽イオンから抵抗力を受け速さが一定になります。このときの速さを $\boldsymbol{v}$ とすると，力のつりあいより，

$$（\quad 2 \quad）= \boldsymbol{e\frac{V}{l}} \qquad \cdots(1)$$

となります。また，抵抗内にある電子の単位体積当たりの個数を $\boldsymbol{n}$[1/m³]とすると，電流 $\boldsymbol{I}$ が $\boldsymbol{I=enSv}$ と表せる（①電流の強さ参照）ことから，次のように式変形できます。

$$\boldsymbol{k\frac{I}{enS}=e\frac{V}{l} \Leftrightarrow V=\frac{k}{e^2n}\frac{l}{S}I} \qquad \cdots(2)$$

これより，電圧 $\boldsymbol{V}$ が電流 $\boldsymbol{I}$ に比例することが分かりました。これをオームの法則と言います。比例定数を $\boldsymbol{R}$ とおけば，中学校で学習した $\boldsymbol{V=RI}$ の形になります。また，この $\boldsymbol{R}$ を電気抵抗と言います。(2)式より，電気抵抗は次のように表すことができます。

$$\boldsymbol{R=\frac{k}{e^2n}\frac{l}{S}}$$

したがって，電気抵抗 $\boldsymbol{R}$ は長さ $\boldsymbol{l}$ に比例し，断面積 $\boldsymbol{S}$ に反比例します。このときの比例定数を抵抗率と言います。抵抗率を $\boldsymbol{\rho}$ とおくと，

$$\boldsymbol{R=\rho\frac{l}{S}} \qquad （ただし，\boldsymbol{\rho=\frac{k}{e^2n}}）$$

となり，抵抗率の単位は[Ω m]となります。　　1：$\boldsymbol{\frac{V}{l}}$　2：$\boldsymbol{kv}$

□ pick up words

・一様な電場

・電気抵抗と抵抗率

③　ジュールの法則
　オームの法則の証明で，抵抗（陽イオン）の立場になって考えましょう。自由電子が陽イオンから抵抗を受けて進むということでしたので，反対に，陽イオンは抵抗から押されていることになります。時間 Δt の間に力と距離の積から，$kv \times v\Delta t$ の仕事をされています。これは自由電子１個からなされる仕事に過ぎません。抵抗内には全体で nSl 個の電子が含まれているので，電子全体から，

$$nSl \times kv \times v\Delta t$$

の仕事をなされています。②オームの法則の式（１）を用いて式変形すると，

$$nSl \times kv \times v\Delta t = nSl \times \frac{eV}{l} \times v\Delta t = enSvV\Delta t$$

となります。また，電流 I が $I=enSv$ と表せる（①電流の強さ参照）ことから，

$$IV\Delta t$$

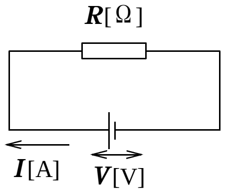
と表すことができます。このときなされた仕事を抵抗はエネルギーとして蓄えることができず，熱として外部に出します。この熱をジュール熱と言い，Q を用いて表します。

$$\boxed{Q=IV\Delta t}$$

☐ pick up words
・仕事とエネルギー

④　消費電力と電力量

下図のような，電圧 $\boldsymbol{V}$ の電池と抵抗 $\boldsymbol{R}$ の電気抵抗がつながれた回路で強さ $\boldsymbol{I}$ の電流が流れているとします。



このとき，電池には電流の定義（①電流の強さ参照）から時間 $\boldsymbol{\Delta t}$ の間にの $\boldsymbol{I\Delta t}$ の電気量が流れているので，（$\boldsymbol{W=qV}$）より $\boldsymbol{IV\Delta t}$ の仕事を電池がしています。これを電力量と言います。この電力量（仕事）が抵抗でジュール熱として消費されます。また，単位時間当たりの電力量を電力と言い，$\boldsymbol{P}$ を用いて表します。これは単位時間当たりの仕事ですので仕事率に他なりません。電池で生み出された電力が抵抗でジュール熱として消費されることになります。単位時間当たりに消費される電力のことを消費電力と言います。単位とセットにして，以下のようにまとめておいて下さい。

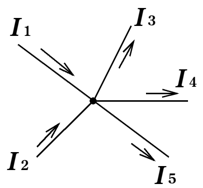
電　　力　　量：$\boldsymbol{W=IV\Delta t}$　［J］

（消費）電力：$\boldsymbol{P=IV}$　［J/s］（［W］）

□ pick up words
・電池のした仕事
・最大消費電力

⑤　キルヒホッフの法則

［キルヒホッフの第Ｉ法則］



１つ目の法則は電流についての関係式です。上図の回路において，Δt[s]間で交点に流れ入る，および，流れ出る電気量をそれぞれΔq_1，Δq_2，Δq_3，Δq_4，Δq_5とします。このとき，電気量保存則からこれらの電気量の間には以下の関係式が成り立ちます。

$$\Delta q_1+\Delta q_2=\Delta q_3+\Delta q_4+\Delta q_5$$

両辺を Δt で割ると，

$$\frac{\Delta q_1}{\Delta t}+\frac{\Delta q_2}{\Delta t}=\frac{\Delta q_3}{\Delta t}+\frac{\Delta q_4}{\Delta t}+\frac{\Delta q_5}{\Delta t}$$

となります。これと電流の定義式（$I=\dfrac{\Delta q}{\Delta t}$）より，

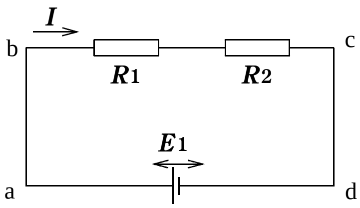
$$I_1+I_2=I_3+I_4+I_5$$

が導けました。一般的には，ある１点に「流れ込む電流の和」とその１点から「流れ出る電流の和」は等しいと表現されています。本書では（$\Sigma I_{in}=\Sigma I_{out}$）として表します。

☐ pick up words

・電気量保存則

［キルヒホッフの第Ⅱ法則］



２つ目の法則は電圧についての関係式です。電圧とは電位差のことでした。上図中の各点 a ～ d の電位を調べてみましょう。d 点での電位を仮に $\mathbf{0}$ とすると，a 点の電位は電圧（電位差）$\boldsymbol{E_1}$の電池があるので$\boldsymbol{+E_1}$となります（電池の負極から正極にかけて電位が上がることに注意しましょう）。b から c に進むと，それぞれ$\boldsymbol{IR_1}$，$\boldsymbol{IR_2}$の電圧（電位差）がある抵抗を２つ通っているので，電力（エネルギー）消費をして，$\boldsymbol{IR_1}$と$\boldsymbol{IR_2}$だけ電位（エネルギー）が下がります。したがって，c 点での電位は$\boldsymbol{E_1-IR_1-IR_2}$となります。d 点での電位は c 点での電位と等しくなっているので，

$$\boldsymbol{E_1-IR_1-IR_2=0}$$

が成り立ります。これを整理すると，

$$\boldsymbol{E_1=IR_1-IR_2} \quad ・・・（１）$$

となります。閉回路を d → a → b → c → d の順に回る時，電池を超えると電位が上がり，抵抗を超えると電位が下がっていることが分かります。同じ電位差でもこれらを区別するため，電池の電圧を「起電力」，抵抗の電圧を「電圧降下」と言います。（１）式の左辺には「起電力」つまりは電位を上げるもの，左辺には「電圧降下」つまり電位を下げるものが入っており，閉回路においては同じ場所，つまり，電位が同じ場所に戻ってくるので，電位が上がった分と電位が下がった分が等しくなっています。たったそれだけのことです。これをキルヒホッフの第Ⅱ法則と言い，本書では（**Σ（起電力）=Σ（電圧降下）**）として表します。

□■［キルヒホッフの第２法則の立て方］■□

①向きも含めて閉回路を決める。
　※電池の正極から出て，負極に戻る向きにしておくと便利。

②（**Σ**（起電力）**=Σ**（電圧降下））に起電力を代入する。ただし，電池が電流を流そうとする向きと①の閉回路の向きが同じなら正，反対なら負とする。

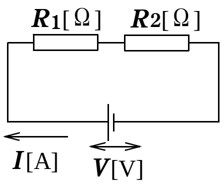
③（**Σ**（起電力）**=Σ**（電圧降下））に電圧降下を代入する。ただし，抵抗に流れる電流の向きと①の閉回路の向きが同じなら正，反対なら負とする。

※基本は電位を見ることで式を立てることができるので，電位の考え方がまとまっている人は電位に注目して式を立てればよい。

□ pick up words
・電位
・電位差

⑥　合成抵抗

合成抵抗は複数の電気抵抗を１つにまとめたものです。抵抗 R_1，R_2 の電気抵抗２つが電圧 V の電池に直列につながれている場合を考えましょう。

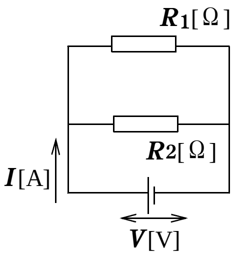


電気抵抗に流れる電流を I とすると，キルヒホッフの第２法則より，以下の式が成り立ちます。

$$V=IR_1+IR_2=I(R_1+R_2)=IR$$

したがって，R_1+R_2 が合成抵抗だと分かります。直列の場合は複数の電気抵抗の抵抗値を単純に足すだけで算出することができます。

次に，抵抗 R_1，R_2 の電気抵抗２つが電圧 V の電池に並列につながれている場合を考えましょう。



２つの抵抗と電池において，それぞれの端で電位が等しくなっています。このため，２つの抵抗にかかる電圧は電池の電圧 V と等しくなっていることが分かります。キルヒホッフの第１法則より，

$$I=\frac{V}{R_1}+\frac{V}{R_2}=\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right)V=\frac{1}{R}V$$

となります。したがって，$\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}$ が合成抵抗の逆数だと分かります。並列の場合は複数の電気抵抗の抵抗値の逆数の和が合成抵抗の逆数になっています。

□ pick up words
・電池の内部抵抗
・電流計と電圧計，分流器と倍率器
・抵抗測定の誤差率
・ホイートストン橋
・電位差計
・最大消費電力
・特性曲線

【授業のポイント】

・電池の内部抵抗
　電池の中には抵抗がある，ただそれだけのお話

・電流計と電圧計，分流器と倍率器
　電流計や電圧計は相手の電流や電圧を測れないよ，ただそれだけのお話

・抵抗測定の誤差率
　電流計や電圧計は自身に抵抗があるので誤差が出ますよ，ただそれだけのお話

・ホイートストン橋
　電流が流れなくなる，つまり，検電器の両端で等電位になりますよ，ただそれだけのお話

・電位差計
　電流が流れなくなる，つまり，検電器の両端で等電位になりますよ，ただそれだけのお話

・最大消費電力
　分母分子で変数分離しましょうね，ただそれだけのお話

・特性曲線
　豆電球の電流と電圧が分からないので，電流と電圧を未知数でおきましょうね，ただそれだけのお話

・コンデンサーを含む直流回路
　コンデンサーを抵抗として考え、電気が流れやすいか流れにくいかを考えましょうね，ただそれだけのお話