物理Ⅰ Ⅱ公式集

電磁気分野

==========

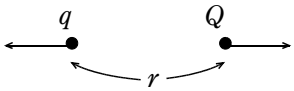
E-mail　　yamato@my.email.ne.jp

ホームページ　http://www.ne.jp/asahi/hanako/physics/

==========

静電気　クーロン力と電界・電位

クーロンの法則



同種の電荷は斥力

異種の電荷は引力

(1) 2つの電荷の間に働く静電気力は，それぞれの電気量の積に比例し，距離の2乗に反比例する．

$$F=k\frac{qQ}{r^2}\quad [\mathrm{N}]$$

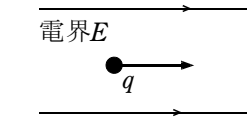
$k=9.0\times10^9\ \mathrm{Nm^2/C^2}$

点電荷の作る電界

(2) 点電荷Qより距離 r離れたところにつくる電界

$$E=k\frac{Q}{r^2}\quad [\mathrm{N/C}]$$

向きは正をおくと，受ける力の向き

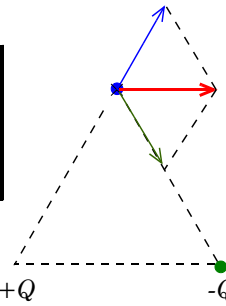


電界の向きは，右向きであるが，点電荷の電荷が正負によって力の向きは異なる

(3) 電界の強さEのところに置かれた点電荷qの受ける力F

$$F=qE\quad [\mathrm{N}]$$

負電荷の場合左向きになる

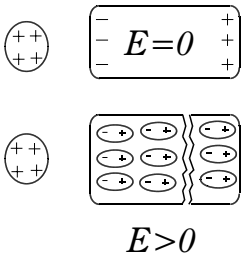


(4) 1辺がrの正三角形の頂点で作られる電界の強さ

$$E=k\frac{Q}{r^2}$$

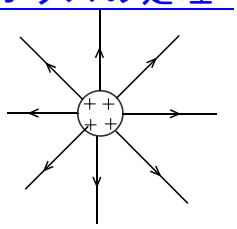
ベクトルの合成

静電誘導と誘電分極



ガウスの定理

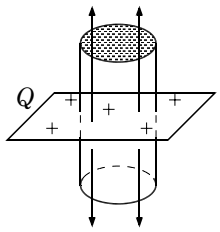
ε_0は真空の誘電率



(5) 点電荷Qからでる電気力線の総本数

$$4\pi kQ$$

または $\dfrac{Q}{\varepsilon_0}$

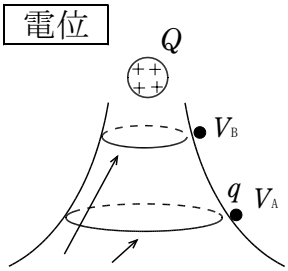


(6) 非常に薄い面積Sの平面に電荷Qが分布しているとき，電界

$$E=\frac{Q}{2\varepsilon_0 S}$$

$\vec{E}$ 電場ベクトル
正負なし
V 電位
正負あり

電位



等電位線

無限遠が基準

(7) 点電荷 qを電位V_AからV_Bまで運ぶ仕事

$$W=q(V_B-V_A)\quad [\mathrm{J}]$$

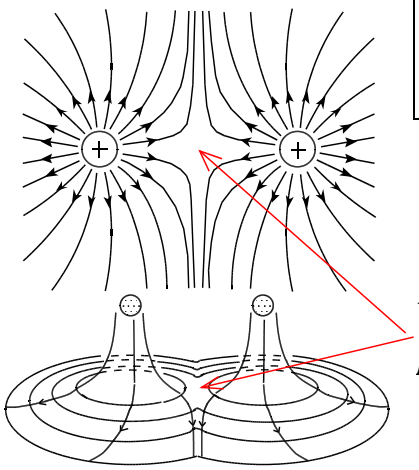
(8) 点電荷Qよりrだけ離れた点での電位

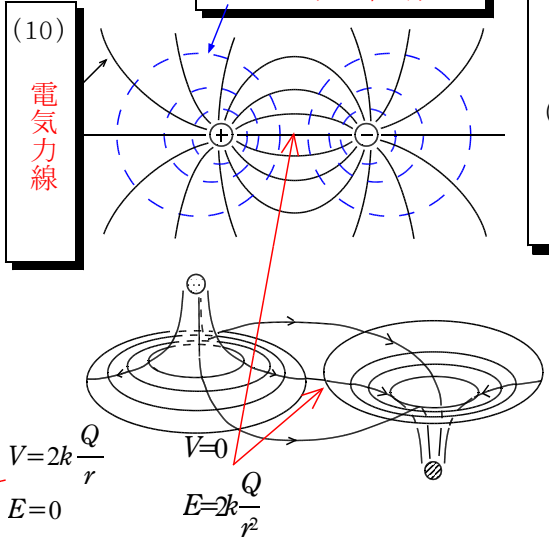
$$V=k\frac{Q}{r}\quad [\mathrm{V}]$$

(9) 等電位線上の電荷を移動するときの仕事

$$W=0$$

(10) 電気力線





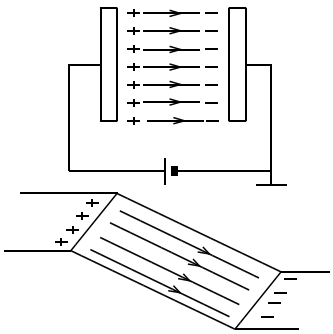
(11) 等電位線

(12) 等電位線と電気力線は

直交する

(13) 電気力線の向きは

正から負に向かう



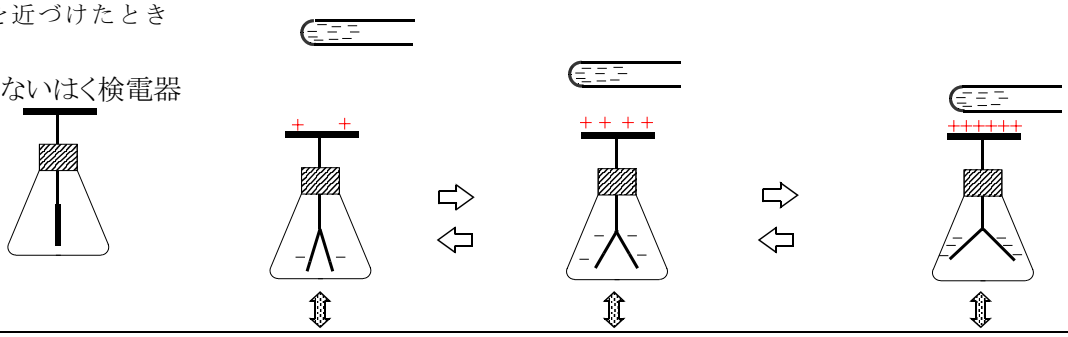
等電位線は等高線，電場は坂道の勾配

はく検電器の動作

電荷の保存が成立。正,負の数に注意

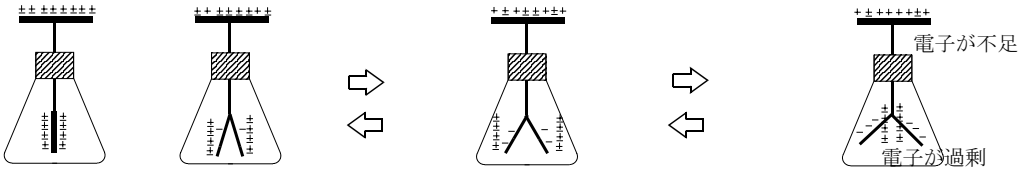
帯電棒を近づけたとき

電荷のないはく検電器



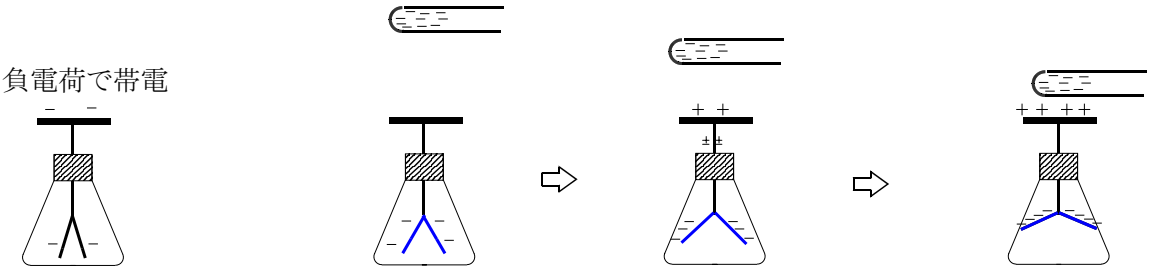
補足

はく検電器は
電気的に中性



はく検電器は帯電した棒の電荷を調べることができる。

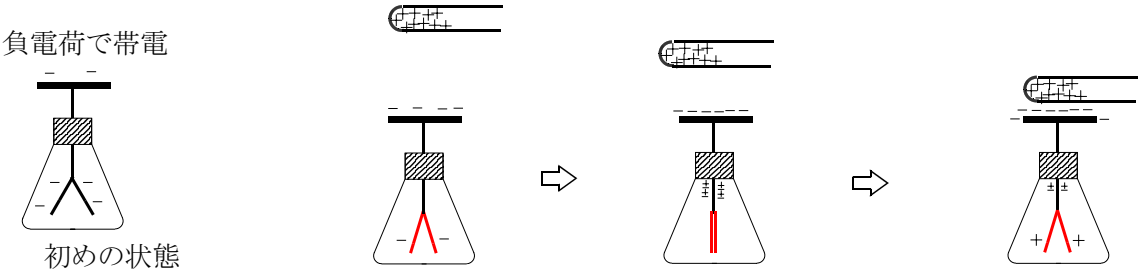
負電荷で帯電



初めの状態

開きを増していくときは，同種の電荷

負電荷で帯電

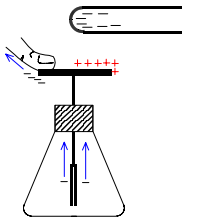


初めの状態

初め閉じて,再び開くのは，異種の電荷

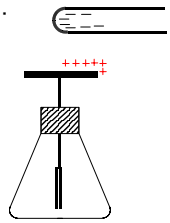
帯電棒と反対の電荷を蓄える

電荷のないはく検電器に帯電棒を近づけ，指でさわってアースする.

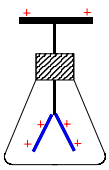


指を伝わって負の電気が逃げていく。正の電荷は引力のため逃げることが出来ない。

次に，帯電棒をそのままにして指を離す.



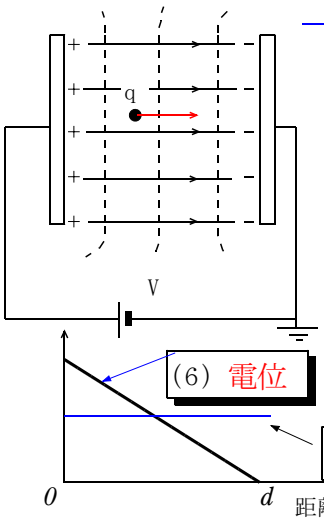
最後に，帯電棒を遠ざける.



電界と電位 コンデンサー

電界と電位の区別

一様な電界と電位



(1)極板間の距離をdとすると電界の強さE[V/m]は

$$E=\frac{V}{d}\ \text{[V/m]}\quad \text{右向き}$$

(2)電荷qが強さEの電界から受ける力は

$$F=qE\ \text{[N]}\quad \text{右向き}$$

(3)電荷qが電位差Vの電界から得た仕事W[J]は

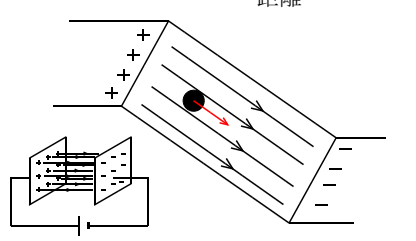
$$W=qV\ \text{[J]}$$

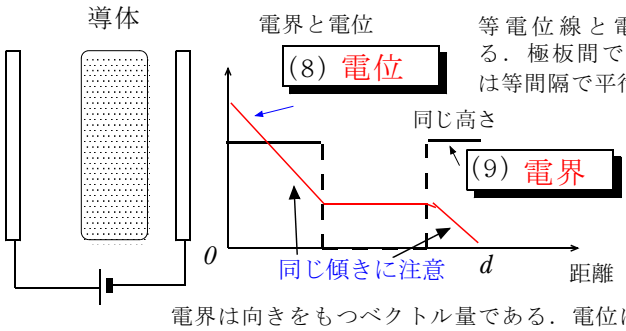
(4)陽極で静止していた点電荷が陰極に達した．質量m，速さvであるとき，運動エネルギー

$$\frac{1}{2}mv^2\ \text{[J]}$$

(5)速さvを求めると

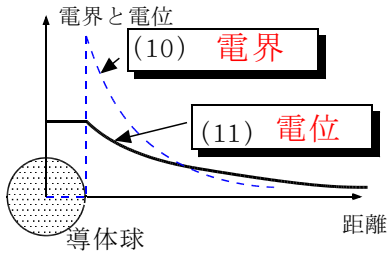
$$v=\sqrt{\frac{2qV}{m}}\ \text{m/s}$$





等電位線と電界は直交する．極板間では，等電位線は等間隔で平行になる．

電界は向きをもつベクトル量である．電位は大きさだけのスカラー量である．電界は電位の傾きにマイナスをかけたもの．

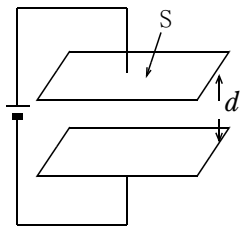


導体の性質

導体に電荷を与えると表面にのみ分布する。したがって電気力線は表面から出て，内部に存在しない。(内部の電場が0である)また，電気力線は表面から垂直に出るので導体は等電位になる。

導体球の電場は，点電荷と同じになる。

コンデンサー

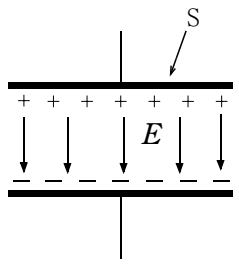


(12)電気容量C，電荷Q，電圧Vの間の関係式

$$Q=CV\ \text{[C]}$$

(13)電気容量Cは，S，dを使うと

$$C=\varepsilon_0\frac{S}{d}\ \text{[F]}$$



(14),(15)より(13)が導かれる

(14)極板間の電界の強さEと電位差Vと間隔dの関係

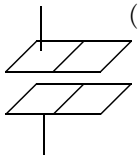
$$E=\frac{V}{d}$$

(15)ガウスの定理より面積S，電荷Qと電界Eの関係

$$E=\frac{Q}{\varepsilon_0 S}$$

電気容量の変化

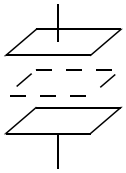
(16)面積が２倍になると



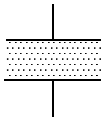
２倍

(17)間隔が２倍になると

$\frac{1}{2}$倍

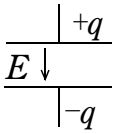


(18)比誘電率ε_rを挿入すると



ε_r倍

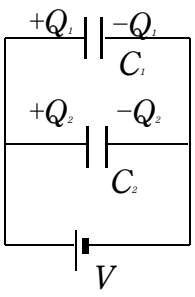
(19)極板間に働く力



$$F=\frac{1}{2}qE$$

コンデンサー　合成容量とｴﾈﾙｷﾞｰ

コンデンサーの接続

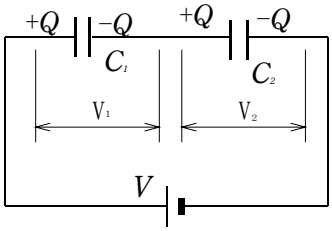


(1)コンデンサーに共通な量は　電圧

(2)電気量の比$Q_1:Q_2$　$C_1:C_2$

(3)合成容量C　$C=C_1+C_2$

並列接続は同じ電圧がかかるので，耐電圧は小さい方になる。
直列接続は逆数比になるので，注意。



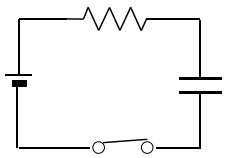
(4)コンデンサーに共通な量は（初めに電荷はない）　電気量

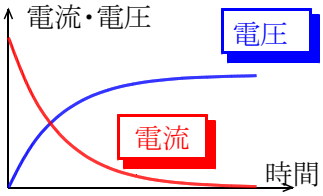
(5)電圧の比$V_1:V_2$　$\frac{1}{C_1}:\frac{1}{C_2}$

(6)合成容量Cの関係　$\frac{1}{C}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}$

電荷が初めに与えられたコンデンサーの接続では左の式は成立しない。

静電エネルギー





スイッチを入れた後，コンデンサーは充電されるが，時間がかかる。そのときの様子は左のようになる。抵抗の大小によって，遅い・速い充電時間となる。

(7)コンデンサーに蓄えられるエネルギー

$$U=\frac{1}{2}QV=\frac{1}{2}CV^2=\frac{1}{2}\frac{Q^2}{C}\ \text{[J]}$$

(8)充電した後電池の供給したエネルギー　QV [J]

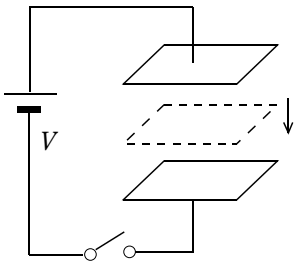
(9)抵抗で消費されたエネルギー　$\frac{1}{2}QV$

半分のエネルギーがたまる

コンデンサーの変化

コンデンサーの間隔を２倍にするとき，スイッチを切ったままのときと入れたままでは何が同じかが注意点

スイッチを切ったまま，間隔を２倍にするとき，コンデンサーの諸量



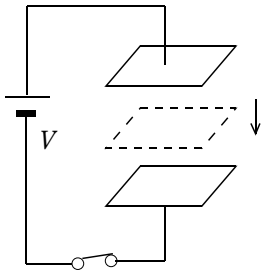
(10)電気容量は　$\frac{1}{2}$倍　倍

(11)電気量　同じ

(12)電圧　2倍

(13)静電エネルギー　2倍

スイッチを入れたまま，間隔を２倍にするとき，コンデンサーの諸量

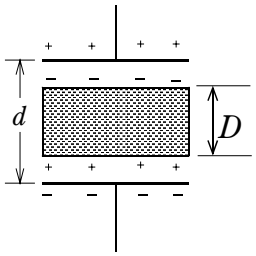


(14)電気容量は　$\frac{1}{2}$倍　倍

(15)電気量　$\frac{1}{2}$倍

(16)電圧　同じ

(17)静電エネルギー　$\frac{1}{2}$倍



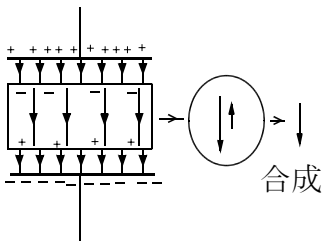
導体を挿入するときは，極板間距離が減少すると考える

間隔dの電気容量Cのコンデンサーに厚さDの金属板を挿入するとき

(18)金属板中の電界の強さ　0

(19)電気容量　$C'\frac{d}{d-D}C$

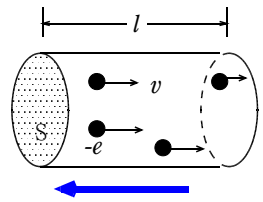
(20)Qが一定のとき静電エネルギー　減少する



誘電分極のため，電界は弱くなる

(21)誘電率ε_rの誘電体を挿入したとき，誘電体内の電界E'は外での電界をEとすると　$E'=\frac{E}{\varepsilon_r}$

電流　オームの法則



電流 i 電子密度 n個/m^3

(1) t秒間にQ[C]の電荷が流れているときの電流

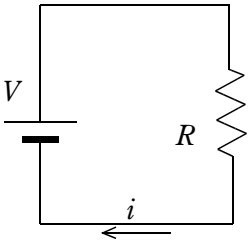
$$i=\frac{Q}{t}\quad[\mathrm{A}]$$

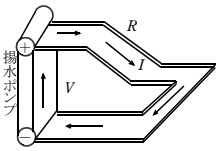
(2)電流 iをn,e,v,Sを使って表すと

$$i=nevS$$

電流は１秒間に通過する電気量

オームの法則





(3)電流 i，電圧V，抵抗Rの関係

$$i=\frac{V}{R}$$

(4)抵抗による消費電力

$$P=i^2R=iV=\frac{V^2}{R}\quad[\mathrm{W}]$$

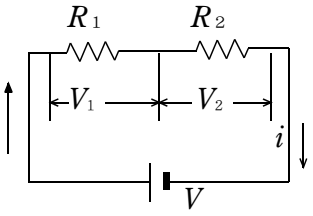
(5)電気抵抗RをS，l，ρで示すと

$$R=\rho\frac{l}{S}$$

(6)抵抗の温度変化の式

$$R=R_0(1+at)$$

抵抗の接続



(7)各抵抗で共通なのは

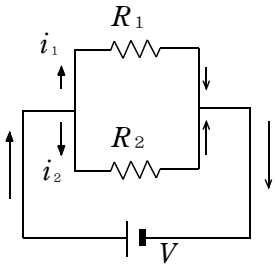
電流

(8)電圧の比V_1:V_2

$$R_1:R_2$$

(9)合成抵抗

$$R=R_1+R_2$$



(11)各抵抗で共通なのは

電圧

(12)電流の比i_1:i_2

$$\frac{1}{R_1}:\frac{1}{R_2}$$

(13)合成抵抗

$$\frac{1}{R}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}$$

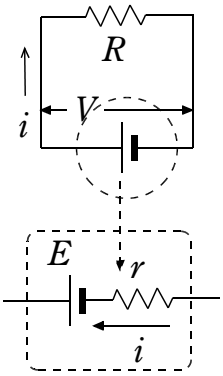
(10)抵抗での消費電力の比

$R_1:R_2$ ($i^2R_1:i^2R_2$ より)

抵抗での消費電力の比

$$\frac{1}{R_1}:\frac{1}{R_2}\left(\frac{V^2}{R_1}:\frac{V^2}{R_2}\ \text{より}\right)$$

電池の起電力と内部抵抗



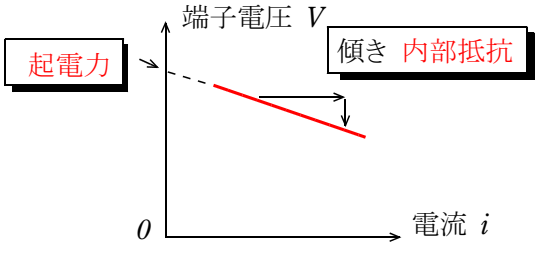
(14)起電力E，内部抵抗 rの電池の端子電圧Vは

$$V=E-ir$$

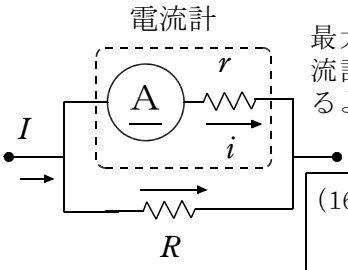
(15)図の回路を流れる電流 iは

$$i=\frac{E}{R+r}$$

外部抵抗Rを変えて測定した実験



電流計と電圧計



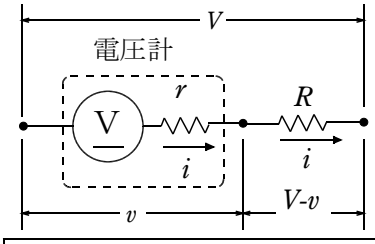
最大 i[A]を測定できる電流計を最大 I[A]まで計れるようにしたい．

(16)分流器を流れる電流

$$I-i$$

(17)分流器の抵抗R

$$R=\frac{i}{I-i}r$$



最大 v[V]を測定できる電圧計を最大V[V]まで計れるようにしたい．

(18)倍率器にかかる電圧

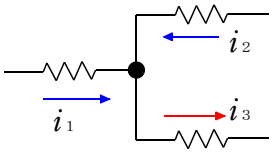
$$V-v$$

(19)倍率器の抵抗R

$$R=\frac{V-v}{v}r$$

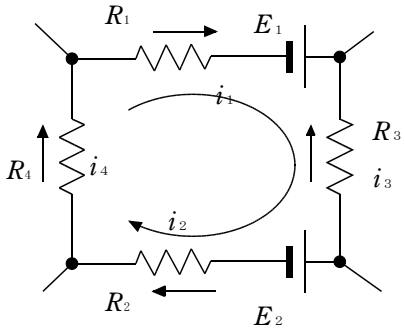
キルヒホッフの法則

直流回路・オームの法則



(1)回路の分岐点おいて
第１法則

$$i_1+i_2+(-i_3)=0$$



(3)点Bについての電流の保存

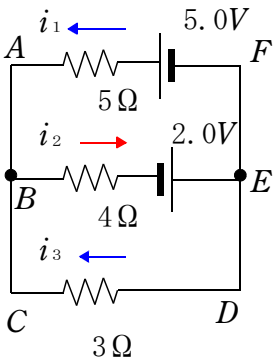
$$i_1+(-i_2)+i_3=0$$

第２法則
(4)回路$ABEFA$について

$$5i_1+4i_2=2+5$$

(5)回路$BEDCB$について

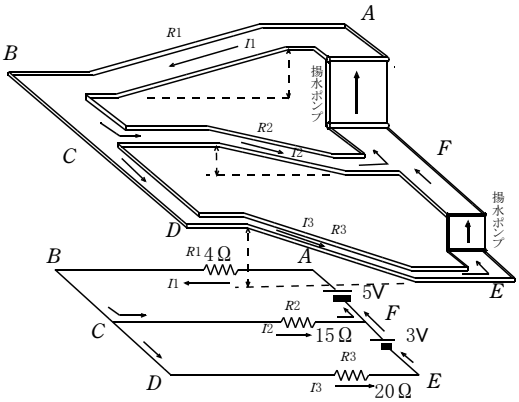
$$4i_2+3i_3=2$$



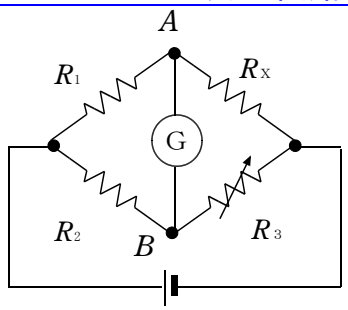
(2)閉回路の電圧降下と電池の起電力
第２法則

$$i_1R_1+(-i_3R_3)+i_2R_2+i_4R_4=E_1+(-E_2)$$

電流の向きの正負，電池の起電力の向きの正負



ホイートストンブリッジ回路



(6)検流計に電流が流れないときの４つの抵抗の関係

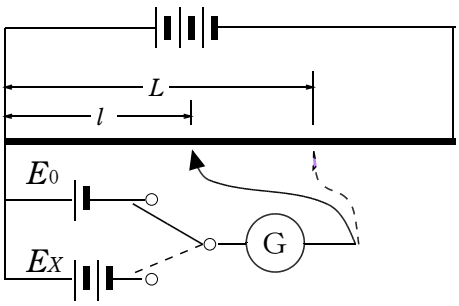
$$R_1R_3=R_2R_x$$

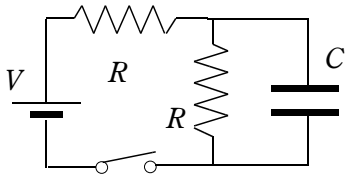
AB間の電位差が0であるとき，Gに電流は流れない

(7)標準電池E_0，未知の電池E_xとして検流計に電流が流れないところをl，Lとするとき

$$E_X=\frac{L}{l}E_0$$

電位差計





スイッチを入れた瞬間の電流

$$i=\frac{V}{R}$$

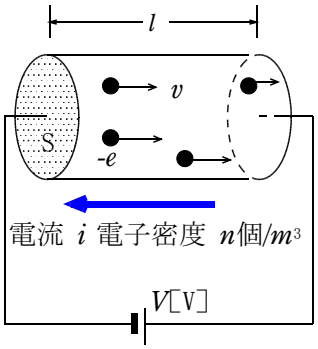
十分時間がたったときの電流

$$I=\frac{V}{2R}$$

コンデンサーの電気量

$$Q=C\frac{V}{2}$$

電力



(8)導体中の電界の強さE

$$E=\frac{V}{l}$$

(9)１個の自由電子が受ける力F

$$F=eE=\frac{eV}{l}$$

(10)等速運動する自由電子が電界から受ける仕事率

$$Fv=\frac{eVv}{l}$$

(11)導体中の電子の数

$$nSl$$

(12)導体中の電子すべてが電界から受ける仕事率

$$nSl\times\frac{eVv}{l}=nevSV$$

(13)電流 iをn，e，v，Sを使うと

$$i=nevS$$

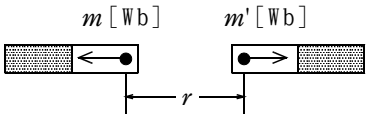
(14)電力

$$P=iV$$

電流と磁場

電流のつくる磁場

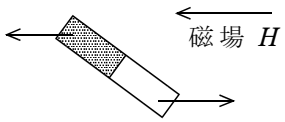
磁極の間の力



(1) 磁極の間に働く力は距離r[m]の2乗に反比例し，磁極の強さm[Wb]の積に比例する

$$F = k\frac{mm'}{r^2}$$

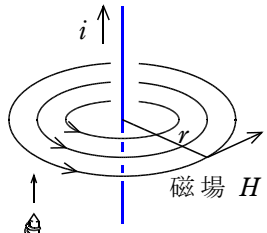
同種の磁極　斥力
異種の磁極　引力



(2) m[Wb]の磁極が受ける力

$$F = mH \quad [\mathrm{N}]$$

直線電流の作る磁場



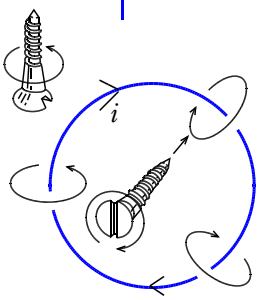
(3) 直線電流 i[A]から距離 r[m]離れた点での磁場の強さH[A/m]

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

向きは右ねじの関係がある

(4) 半径 rの円周上で，磁極 m[Wb]を一周させる仕事はその内部の電流 i と磁極mの積に等しい．（ｱﾝﾍﾟｰﾙの定理）

$$2\pi r \times mH = mi$$



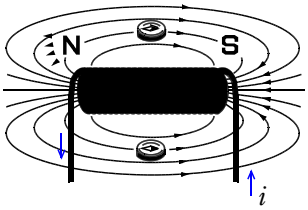
(5) 半径 rの円電流 i[A]がその中心に作る磁場H[A/m]

$$H = \frac{i}{2r}$$

向きは右ねじの法則に従う。

(6) N回巻きの円電流の場合

$$H = \frac{Ni}{2r}$$



内部は一様な磁場ができる

(7) ソレノイドコイル内部の中心の磁場H[A/m]は，電流 iと単位長さあたりの巻き数 nに比例する．

$$H = ni$$

nは単位長さあたりの巻き数
向きは右ねじの法則に従う。

ｿﾚﾉｲﾄﾞｺｲﾙは口径に比べて筒の長さが十分長い場合を言う。筒の長さをlとすると $n = \frac{N}{l}$

(8) 磁場の強さHについては，直線電流・円電流・ソレノイドコイルの３つがある．しかし，実際に扱うときは磁束密度B[Wb/m^2]を使う．真空の透磁率をμ_0とするとき

$$B = \mu_0 H \ \mathrm{Wb/m^2}$$
$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ \mathrm{N/A^2}$$

(9) 直線電流の磁束密度

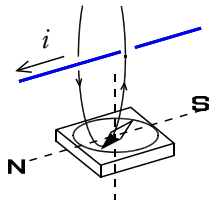
$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} \ \mathrm{Wb/m^2}$$

(10) 円電流の磁束密度

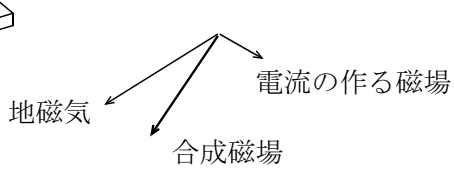
$$B = \frac{\mu_0 i}{2r} \ \mathrm{Wb/m^2}$$

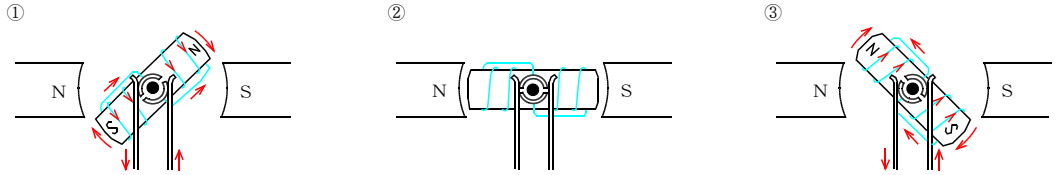
(11) ソレノイドコイルの磁束密度

$$B = \mu_0 n i \ \mathrm{Wb/m^2}$$



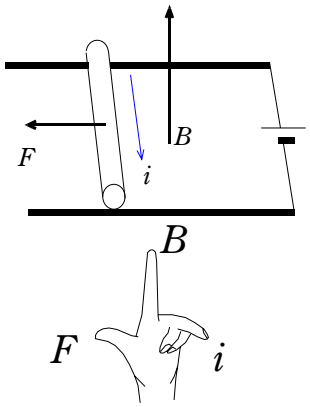
直線電流の磁場と地磁気の磁場の合成磁場の向きに磁針が向く





① 界磁石と電機子のＮ極、Ｓ極が引きあって回転する。
② 電流は流れないが、電機子の慣性で回転する。
③ 界磁石のＮ極に近い方にＮ極、Ｓ極に近い方にＳ極ができ、これらの反発によって回転する。
①→②→③→①→②→③‥‥とくり返して、回り続ける。

電流が磁場から受ける力　ローレンツ力



(1) 磁束密度Bの磁場に垂直に電流 iが流れているとき，長さ lの導線が受ける力の大きさ

$$F = iBl \quad [\mathrm{N}]$$

向きはフレミングの左手の法則

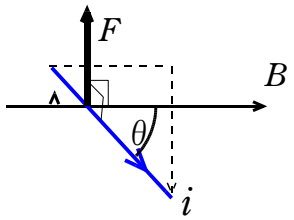
(2) ただし，真空の透磁率 μ_0とすると，磁場の強さ Hと磁束密度Bの関係は

$$B = \mu_0 H \quad \mathrm{Wb/m^2}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ \mathrm{N/A^2}$$

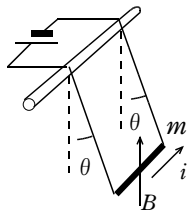
一般に，磁場と電流が θ の角をなすとき

(3) $F = iBl\sin\theta$ [N]



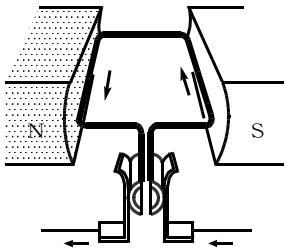
(4) 長さ lの金属線に電流 iが流れているとき，図の鉛直線となす角

$$\tan\theta = \frac{iBl}{mg}$$

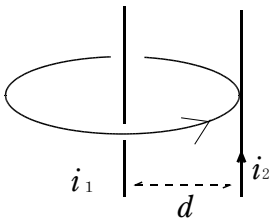


直流モーター

電流が磁場から力を受ける。整流子で電流の流れる向きが常に同じになるので、左回転を続ける。



平行電流間に働く力



(5) 電流i_1が電流i_2のところにつくる磁場の磁束密度

$$B = \frac{\mu_0 i_1}{2\pi d} \quad \mathrm{Wb/m^2}$$

(6) 長さ lの導線が受ける力

$$F = \frac{\mu_0 i_1 i_2 l}{2\pi d}$$

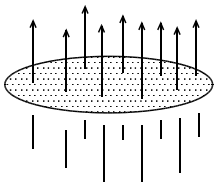
$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ \mathrm{N/A^2}$$

同じ向きの電流 (7) 引力

反対向きの電流 (8) 斥力

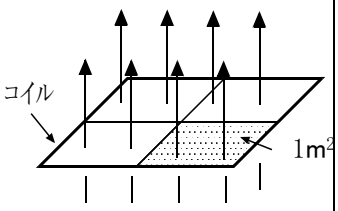
磁束と磁束密度

(9) 単位面積当たりを直交する磁束を磁束密度という．

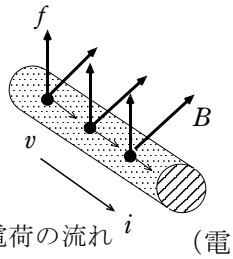


磁束Φ　面積S

$$\Phi = BS \quad \mathrm{Wb}$$



ローレンツ力　磁場に対して垂直方向に働く力



正の電荷の流れ

$F=iBl$ の力は電荷に働く合力である。

電流 $i=nevS$ であるが

この電荷の数は nSl である。

$\therefore\ F=nSl\times f=nevs\times Bl$

(電子の場合，電流の向きと運動の向きが逆)

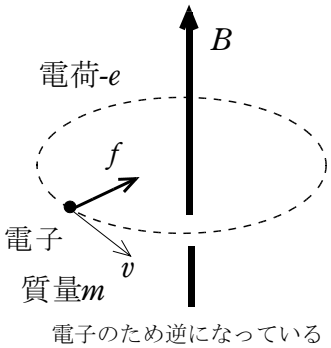
(10) 電荷q (>0) 速さvで運動しているとき，磁場から受ける力

$$f = qvB \quad [\mathrm{N}]$$

向きはフレミングの左手の法則

電荷の運動方向と電流の向きを合わせる。

電子は逆向きになる。



電子のため逆になっている

一様な磁場中を荷電粒子が速さvで入射したとき，ローレンツ力が向心力となって等速円運動する。周期は速さによらず一定になる。

(11) 半径 rとして運動方程式

$$m\frac{v^2}{r} = evB$$

(12) 円運動の半径

$$r = \frac{mv}{eB}$$

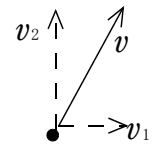
(13) 周期T

$$T = \frac{2\pi m}{eB}$$

電磁誘導

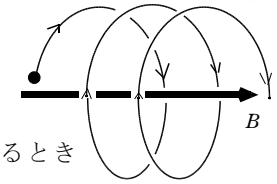
ファラデーの電磁誘導の法則

一様な磁場中の荷電粒子の運動



ななめに入射するとき

らせん運動



(1) 磁場と平行方向に　v_1の等速

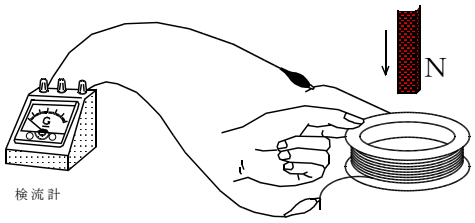
(2) 磁場と垂直方向に　半径　$r=\dfrac{mv}{qB}$

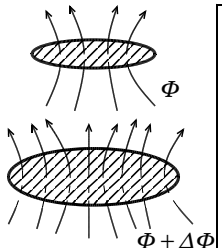
$m\dfrac{v^2}{r}=qvB$より　速さ　v_2の等速円運動

電磁誘導

レンツの法則
誘導起電力は，誘導電流の作る磁場が，コイルを貫く元の磁束の変化を妨げるような向きに生じる．

ファラデーの法則
誘導起電力の大きさは，コイルを貫く磁束の単位時間当たりの変化に比例する．





Δt秒後

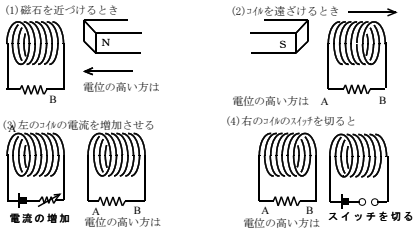
(4) 1巻きコイルについて，時間Δtの間のコイルを貫く磁束の変化を$\Delta\Phi$とするとき，誘導起電力Vは

$$V=-\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

負号は妨げる向きを示す

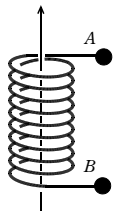
(5) n回巻きのコイルでは

$$V=-n\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$



(1) B→A　Bの方が高い　(2) B→A　Bの方が高い
(3) A→B　Aの方が高い　(4) A→B　Aの方が高い

面積が一定で磁束密度が変化する場合

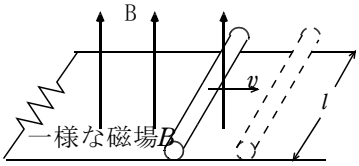


断面積3.0×10^{-4}m2,巻き数1.0×10^{2}のコイルを貫く磁束密度が図の矢印の向きに毎秒2.0Wb/m2(T:テスラ)の割合で増加しつつある。

(a) A,B間に生じる誘導起電力は何Vか。

(b) 誘導起電力によるA,Bの電位はどちらが高いか。

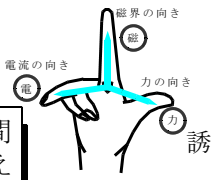
磁束密度が一定で,面積が変化する場合



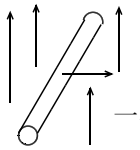
一定の磁束密度の磁場中を一定の速さvで直角に横切る長さlの棒に生じる誘導起電力Vは，

(3)
$$V=Bvl$$

フレミングの右手の法則



誘導起電力の向きは電池に置き換える



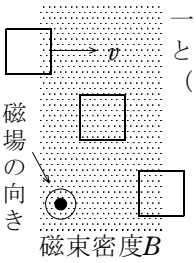
(6) 磁束の変化ではなく，棒が1秒間に横切る磁束の本数に等しいと考えてもよい．誘導起電力は

一様な磁場B

一定の速さv

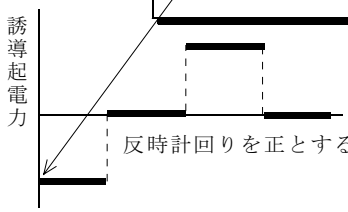
棒の長さl

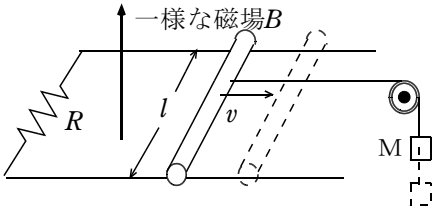
$$V=Bvl$$



一定の速さで正方形コイルを動かすとき
(一辺a)

(7) 誘導起電力
$$V=-Bva$$





(8) 上の回路で，棒が速さvで右に動いている瞬間，誘導電流の大きさ

$$i=\frac{Bvl}{R}$$

(9) 誘導電流が磁場から受ける力

$$F=iBl=\frac{B^2v l^2}{R}$$

(10) 抵抗で消費される電力

$$i^2R=\frac{(Bvl)^2}{R}$$

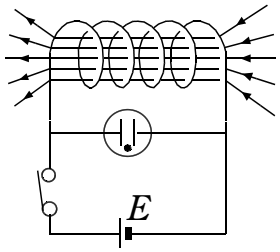
(11) 重力のする仕事率

Mgv または $i^2R=\dfrac{(Bvl)^2}{R}$

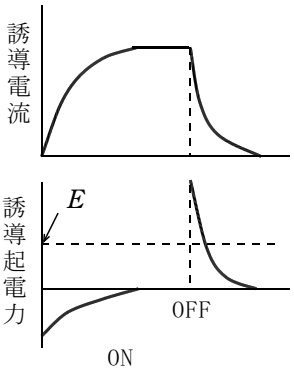
したがって，エネルギーは保存している。

自己誘導と交流　相互誘導

自己誘導　コイルには電流の変化を妨げる自己誘導が働く



スイッチを切るときのみネオン管が光る



(1) 誘導起電力の大きさは，電流の時間的変化に比例する．

$$V=-L\frac{\Delta i}{\Delta t}$$

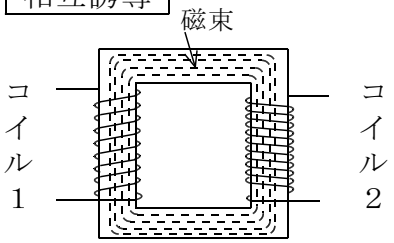
自己インダクタンス L [H：ヘンリー]

負号は向きを示す

(2) コイルに蓄えられるエネルギー

$$U=\frac{1}{2}Li^2 \quad [\mathrm{J}]$$

相互誘導

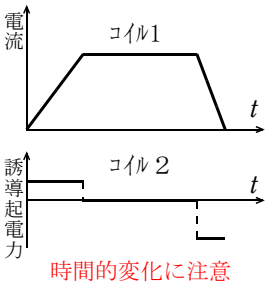


(3) コイル1の電流がΔt秒間にΔi_1だけ変化するとき，コイル2に生じる誘導起電力V_2は

$$V_2=-M\frac{\Delta i_1}{\Delta t}$$

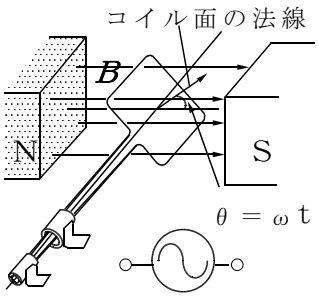
相互インダクタンスM [H：ヘンリー]

負号は向きを示す



時間的変化に注意

交流理論



ωの角速度で回転させるとき，コイルの面積S，磁束密度Bとすると，

(4) t秒のときの磁束Φは

$$\Phi=BS\cos\omega t$$

(5) 交流電圧Vはn回巻きのコイル

$$V=-n\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

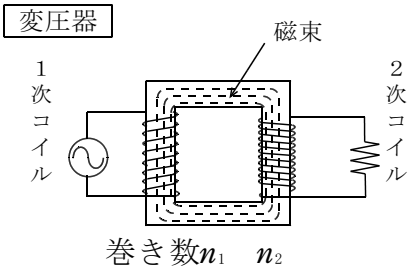
(6) 最大値V_0として

$$V=V_0\sin\omega t \quad V_0=nBS\omega$$

(7) 周波数fと角速度ω

$$\omega=2\pi f$$

変圧器



巻き数n_1　n_2

(8) 電圧の比　$V_1:V_2$

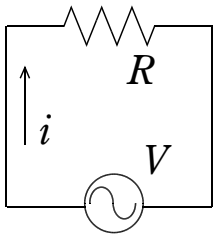
$$V_1:V_2=n_1:n_2$$

(9) 電流の比　$i_1:i_2$

$$i_1:i_2=n_2:n_1$$

(10) 理想的な変圧器の電力の関係

$$i_1V_1=i_2V_2$$



(11) 電源電圧を$V=V_0\sin\omega t$とするとき，電流iは

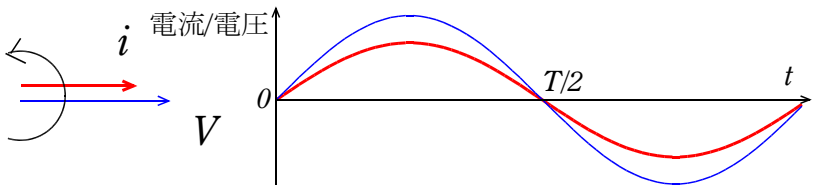
$$i=\frac{V_0}{R}\sin\omega t$$

(12) 最大値V_0，i_0，Rの関係は

$$i_0=\frac{V_0}{R}$$

(13) 電圧・電流の実効値

$$i_e=\frac{i_0}{\sqrt{2}} \qquad V_e=\frac{V_0}{\sqrt{2}}$$



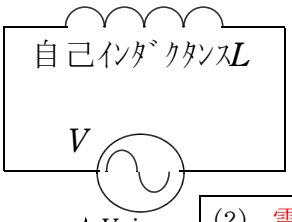
(14) 平均の消費電力

$$P=i_eV_e \quad [\mathrm{W}]$$

交流は、西日本では60Hz、東日本で50Hzの100Vを使っている。
電流と電圧は、変化するので瞬時値を使って計算する。しかし、実用的には実効値を使って計算することが多い。基本的にオームの法則で計算する。位相がずれるのは、コイルとコンデンサーを含む場合。

交流回路　ＲＬＣ回路

コイルを含む回路



(1)電源電圧を$V=V_0 \sin \omega t$とすると，電流は

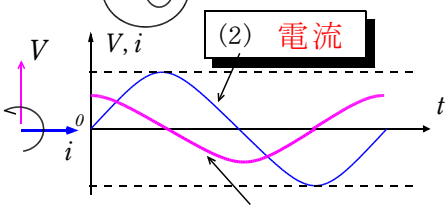
$$i=\frac{V_0}{\omega L}\sin\left(\omega t-\frac{\pi}{2}\right)$$

(6) 実効値の関係

オームの法則　$I_e=\dfrac{V_e}{X_L}$

(7) 誘導ﾘｱｸﾀﾝｽ

$X_L=\omega L$
$=2\pi fL$　Ω



(2)　電流

(4) 電流は電圧より位相が　$\dfrac{\pi}{2}$遅れる

(5) コイルは電力を　消費しない

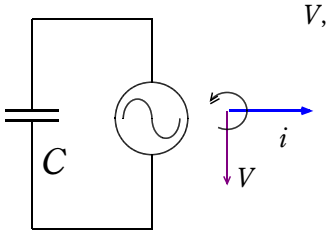
コイルの自己誘導のために，電流は遅れる。
自己インダクタンスの大きいコイルは交流での電気抵抗が大きい。
理論的には直流抵抗は0である

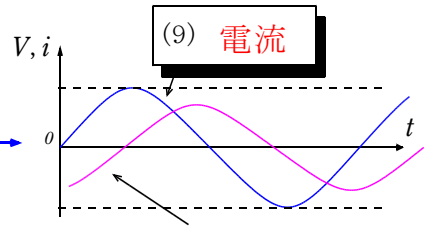
(3)　電圧

コンデンサーを含む回路

(8)電源電圧を$V=V_0 \sin \omega t$ とすると，電流は

$$i=\omega C V_0 \sin\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right)$$





(9)　電流

(10)　電圧

(13) 容量ﾘｱｸﾀﾝｽ

$$X_C=\frac{1}{\omega C}=\frac{1}{2\pi fC}\quad \Omega$$

(14) 実効値の関係

オームの法則　$I_e=\dfrac{V_e}{X_C}$

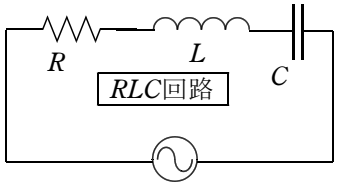
(11) 電流は電圧より位相が　$\dfrac{\pi}{2}$進む

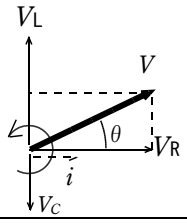
(12) ｺﾝﾃﾞﾝｻｰは電力を　消費しない

(15) ω と周波数 fの関係

$\omega=2\pi f$

コンデンサーは，直流は通さない。
交流は流れるが，電気容量が大きいほど抵抗が小さい。
周波数fが大きいと小さいので，雑音(ﾉｲｽﾞ)を通すことで利用されている。





(16)抵抗の電圧$\vec{V_R}$，ｺｲﾙの電圧$\vec{V_L}$ コンデンサーの電圧$\vec{V_C}$と すると
電源電圧$\vec{V}$は

$$\vec{V}=\vec{V_R}+\vec{V_L}+\vec{V_C}$$

(17) ｲﾝﾋﾟｰﾀﾞﾝｽ Z

$$Z=\sqrt{R^2+\left(\omega L-\frac{1}{\omega C}\right)^2}\quad \Omega$$

(18) 電圧に対して電流の位相の遅れ

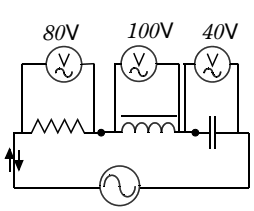
$$\tan\theta=\frac{\omega L-\dfrac{1}{\omega C}}{R}$$

(19) 回路の消費電力

$$P=I_eV_e\cos\theta$$

$\cos\theta$ を力率という

問　各回路素子の電圧を測定したとき下図であった。電源電圧はいくらか。

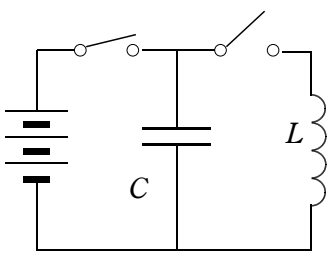


実効値の関係

オームの法則　$I_e=\dfrac{V_e}{Z}$

電気振動回路

コンデンサーを充電した後，
コイルにつなぐと電気振動が起きる



(20) 固有振動数

$$f=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

(21) エネルギーの関係

$$\frac{1}{2}Li^2+\frac{1}{2}\frac{q^2}{C}=一定$$