✤は数学的準備

●目　　次●

●本書は「高校物理基礎」の内容を含みません

「導出物理（上巻／下巻)」は第７版より高校物理基礎の内容が「導出物理基礎 第３版」に移行されましたのでご注意ください。

導出物理基礎 第３版　…高校物理基礎 準拠

導出物理（上）力学・波動編　第７版　…高校物理 準拠

導出物理（下）電磁気・熱・原子編　第７版　…高校物理 準拠

B5 判　1273 円+税

●本書の使い方

「わからない」と嘆く生徒を見ていると,「解説を隅々まで読んでいない，もしくは読もうとしない，もしくは内容を理解できるまで考えていない」と感じるケースが多いです。従って当テキストを隅々まで読み，納得いくまで考えてください。急がずじっくり読んだ方がいいです。そして仮に納得できなくても，思い切って基本問題を解いてみると，そこで初めて納得できることもあります。

ただし，高校物理基礎の内容が不得意であると，そもそも本書の習得は大変厳しいです。したがって物理が苦手で本書にたどり着いた方は特に「導出物理基礎 第３版」を先に学習することを強くお勧めします。

当テキストにおいて注意すべきことは，網羅性があり，かなり踏み込んだ内容も含まれるため，すべてをこなそうとすると挫折する可能性が高いです。そのため**個人のレベル，理解度，受験する大学の過去問の傾向などに合わせて学習すべき情報を絞ったほうがいい**です。この点に関しては，易しめの大学を受験するほど絞るべき情報が多くなるため，どこに絞るべきかはできるだけ教師や講師の指示を仰いだ方が得策です。学習は物理に限らず，**薄くまんべんなくやるほどすべてが中途半端となり，成績が下がることさえあります**。この点には十分注意して当テキストを活用ください。

★印のついた項目については発展内容，もしくは高校数学の内容をすべて終えていないと理解できない内容になっているので，読み飛ばしていただいても支障はありません。この内容はより理解を深めたい人のための項目になります。

1章

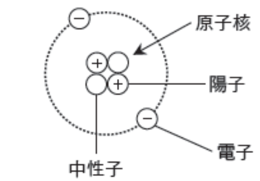
1章　電場と電位Ⅰ

●静電気力と電荷

プラスチックの下敷きを髪の毛にこすって静かに離すと，髪の毛が下敷きに吸いつく。これは下敷きと髪の毛に電気的な偏りが生じて，髪の毛と下敷きとの間に力が発生したためである。このような力を**静電気力**といい，静電気力の原因となるものを**電荷**という。

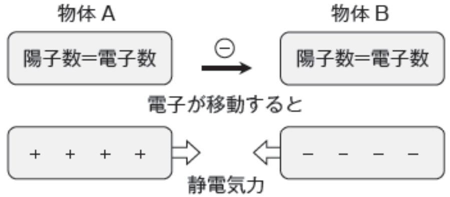
●原子の仕組みと電気

ヘリウム原子の例

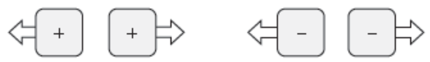


※原子核はプラスの電気を持つ陽子と電気的に中性な中性子からなる。

すべての物質は原子からできており，原子はプラスの電気(正電荷)をもつ陽子と電気的に中性な中性子，さらにマイナスの電気(負電荷)を持つ電子からできている。陽子の数と電子の数が同じときは全体として電気的に中性であるが，電子は原子間を移動する性質があり，原子から電子が抜け落ちると，もとの原子は電気的にプラスに偏り，逆に電子が加わると電気的にマイナスに偏る。



※正電荷同士，負電荷同士は斥力がはたらく



●ヘリウムの元素記号の表記

$^{4}_{2}\mathrm{He}$

→質量数＝陽子数＋中性子数

→原子番号＝陽子数

●電気素量と電流の定義

電気素量 e は電気量の最小単位であり，陽子1個や電子1個の電気量の絶対値に等しい。この値は右のように定義されている。

$$e = 1.602176634\times10^{-19}\,\mathrm{C}$$

電流は1秒に流れる電子の総電気量で，電流の単位は(A)＝(C/s)であるので，t 秒で N 個の電子が流れる電流は $I=\dfrac{eN}{t}$ である。この式から次のようなことがいえる。

1秒 $(t=1)$ で $N=\dfrac{1}{e}$ 個の電荷が流れる $\rightarrow I=1\,\mathrm{A}$

1秒 $(t=1)$ で $N=\dfrac{2}{e}$ 個の電荷が流れる $\rightarrow I=2\,\mathrm{A}$

1秒 $(t=1)$ で $N=\dfrac{3}{e}$ 個の電荷が流れる $\rightarrow I=3\,\mathrm{A}$ …

!注意　電子の流れの向きが発見される前に電流の向きが決められたため，現在でも電流は電子の流れとは逆向きに定義されている。

これにより電流の強さは次のように定義された。

暗記

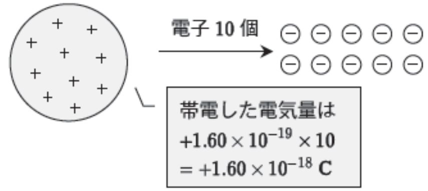
電流の定義：1秒間に $\dfrac{I}{e}$ 個の電子が流れる電流の強さを I(A)と決める

1章

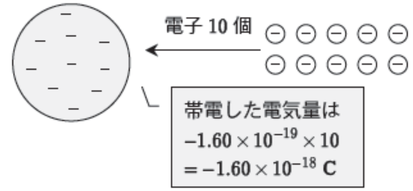
●帯電量

電気素量を $1.60\times10^{-19}\,\mathrm{C}$ とするとき，次の帯電量を確認しよう。

電気的に中性な金属球から電子が10個とれると，電子数よりも陽子数が多くなり，プラスの電気を帯びる。



電気的に中性な金属球に電子が10個加わると，陽子数よりもが電子数多くなり，マイナスの電気を帯びる。



1　電気素量を $e=1.60\times10^{-19}\,\mathrm{C}$ として，下の記述に関する(1)〜(4)の問いに答えなさい。

1秒間に導線断面を通過する電子の個数が(　ア　)であるような電流の強さは電流の定義によって1Aになる。その(　ア　)個の電子の総電気量の絶対値は(　イ　)Cであるので，1Aは1秒間に(　イ　)Cの電荷が流れるときの電流の強さであるといえる。

(1) (A)をCともう1つの基本単位を用いた組立単位で表しなさい。(　　　　)

(2) 文中のアに当てはまる値を，e を用いた文字式で表しなさい。(　　　　)

(3) 電卓を用いて文中のアに当てはまる値を有効数字3桁で表しなさい。(　　　　)

(4) 文中のイに当てはまる値を有効数字1桁で答えなさい。ただし，この値は正とする。(　　　　)

2　自然界に存在する水素は，約99.98％は軽水素と呼ばれるもので，他にはごくわずかに重水素，三重水素が存在する。それぞれの陽子数，中性子数，質量数を答えなさい。

水素の同位体	元素記号	陽子数	中性子数	質量数
軽水素	$^{1}_{1}\mathrm{H}$	①(　　)	②(　　)	③(　　)
重水素	$^{2}_{1}\mathrm{H}$	④(　　)	⑤(　　)	⑥(　　)
三重水素	$^{3}_{1}\mathrm{H}$	⑦(　　)	⑧(　　)	⑨(　　)

3　帯電していないガラス棒と絹布をこすり合わせたところ，ガラス棒の帯電量は $+1.2\times10^{-9}$ C になった。このとき電子はどちらからどちらに何個移動したか。ただし，陽子1個の電荷を 1.6×10^{-19} C とし，有効数字は2桁で答えること。

(　　　　)から(　　　　)に(　　　　)個移動した

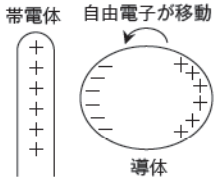
●導体と不導体

金属のように，自由に動き回ることができる**自由電子**を持ち，電気を通す物質を**導体**といい，アクリルやガラスのように自由電子をもたず，電気を通しにくい物質を**不導体**または**絶縁体**という。不導体の電子は原子や分子，イオン（電気を帯びている原子または原子団）と強く結合しているため，自由に動き回ることはできないが，不導体同士の摩擦によって表面の電子の移動が起こり，静電気を帯びることがある。

※金属ほど電気抵抗は小さくはないが，水や人の体も導体といえる。

●静電誘導

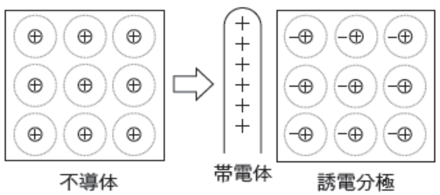
導体に帯電体を近づけたとき，導体内部で電子の移動が起こり，帯電体に近い側には帯電体と異符号の電荷が，遠い側には同符号の電荷が現れる。このような現象を**静電誘導**という。



●誘電分極

図のように，不導体に帯電体を近づけたとき，不導体中の分子内部で電子の偏りが生じ，不導体表面に正負の電荷が生じる。このような不導体の静電誘導を**誘電分極**という。

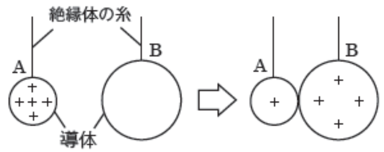
※不導体は**誘電体**と呼ばれることもある。

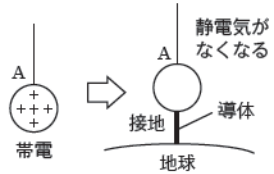


●接地（アース）

図のように，帯電した導体Ａと同じ材質の帯電していない導体Ｂを接触させると，ＡＢ間で電荷の移動が起こり，電荷は偏りなく均一に分布する。

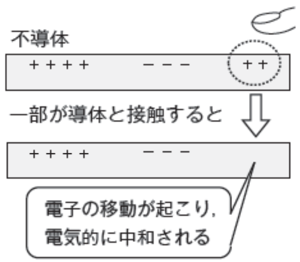
同様に帯電した導体Ａを地球と接触させてもＡと地球との間で電荷の移動が起こり，この場合Ａは電気的な偏りがほぼなくなる。つまり，地球は巨大な導体と言え，静電気が地球に逃げられるように接触することを**接地**または**アース**という。





●不導体の帯電

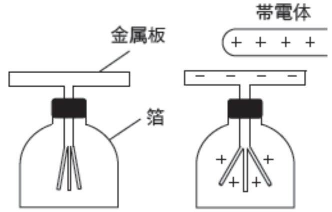
不導体同士をこすり合わせると電子の移動が起こることがあり，表面が帯電する。ただし，自由電子を持たないため，導体のように均一に帯電しない。場合によっては正に帯電したり，負に帯電したりする部分が現れることもある。



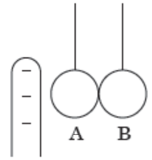
●箔検電器

右図のような器具を**箔検電器**（はく）という。

金属板に帯電体を近づけると，静電誘導が起こり，箔側では同符号の電荷同士が反発し合って箔が開く。



4 図のように，絶縁体の糸で吊るされた同じ材質の球体Ａ,Ｂを接触させ，負に帯電した帯電棒を近づける。次の問いに答えなさい。



(1) Ａが導体であるとき，Ａの内部では電子の移動が起こり，帯電棒側の表面に正の電荷が現れる。このような現象を何というか。

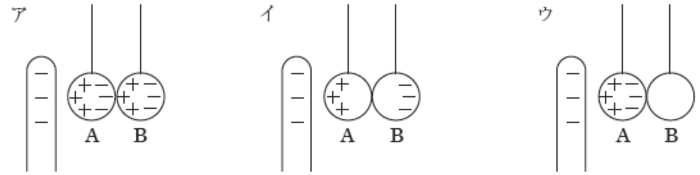
（　　　　　　　）

(2) Ａが絶縁体であるとき，Ａの内部で起こる現象を何というか。

（　　　　　　　）

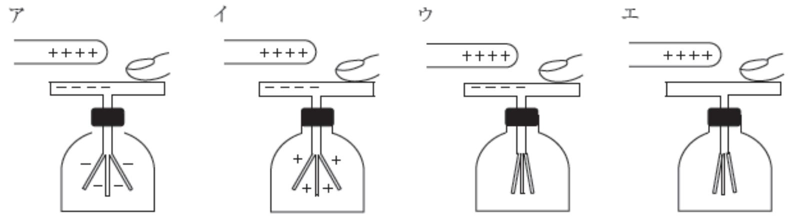
(3) ＡとＢがともに導体であるとき，表面の電荷の分布として正しいものを下のア〜ウから選びなさい。（　　）

(4) ＡとＢがともに絶縁体であるとき，表面の電荷の分布として正しいものを下のア〜ウから選びなさい。（　　）



5 箔検電器について次の問いに答えなさい。

(1) 箔検電器の金属板を指で触りながら，正に帯電した帯電棒を金属板に近づけた。このとき，電荷の分布として正しいものを記号で選びなさい。（　　）

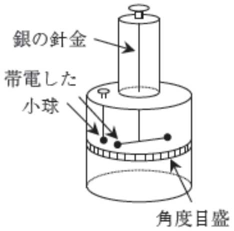


(2) (1)の状態から帯電棒を近づけたまま指を離し，その後帯電棒も遠ざけると，箔は開いた状態，閉じた状態のどちらの状態になるか。　（ 開いた・閉じた ）状態

(3) (1)の状態から帯電棒を遠ざけた後，指を離すと，箔は次のどちらの状態になるか。

（ 開いた・閉じた ）状態

●クーロンの法則



クーロンのねじればかり

銀の針金のねじれの角度から微小な静電気力の大きさを測定。

原理はキャベンディッシュの実験装置と同じ（上巻 p120 参照）

※**静電気力**は**クーロン力**とも呼ばれる。また単に**電気力**と呼ばれることもある。

クーロンは図のような実験装置を発明し，2つの点電荷の間にはたらく静電気力の大きさを調べ，次のことを確認した。

- **力の大きさ F は 2 つの電荷の大きさ q_1，q_2 の積に比例する**
- **力の大きさ F は電荷間の距離 r の 2 乗に反比例する**

よって，比例定数を k とすると，2つの点電荷の間にはたらく静電気力 F は次のようになる。

暗記

静電気力： $F = k\dfrac{q_1 q_2}{r^2}$　$\left(\begin{array}{l} q_1 q_2 > 0：斥力 \\ q_1 q_2 < 0：引力 \end{array}\right)$

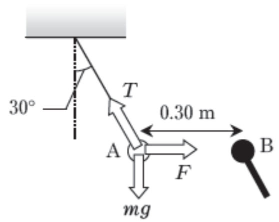
※ q_1，q_2 ：(C)，r ：(m)　k ：(N·m^2/C^2)

※万有引力の式と対応させて覚えよう！

【復習】万有引力：$F = k\dfrac{mM}{r^2}$　上巻 p120 参照

これを**クーロンの法則**という。k の値は実験によって求めることができ，$r = 1$ m，$q_1 = q_2 = 1$ C のとき，真空中では $k = 9.0\times10^9$ であることが知られている。k の値は電荷を取り囲む物質の種類によって決まるが，空気中の場合は真空中とほとんど変わらないので，空気中でも $k = 9.0\times10^9$ が使われることが多い。

例題 1　糸につるした質量 1.0×10^{-2} kg の小球 A に $+3.5\times10^{-7}$ C の電気量を与える。これに静電気を帯びた小球 B を近づけると，A は B と同じ水平面上で 0.30 m の距離まで引き寄せられ，糸は鉛直線から 30°傾いた。A, B 間の引力の大きさ F(N) と B の電気量 Q(C) を求めなさい。ただし，重力加速度の大きさを 9.8 m/s^2，クーロンの法則の比例定数を 9.0×10^9 N·m^2/C^2 とする。



糸の張力を T，小球 A の質量を m，重力加速度の大きさを g とすると，

つり合いの式は，

水平方向：$T\sin30° = F$ …①

鉛直方向：$T\cos30° = mg$ …②

①÷②より，$\tan30° = \dfrac{F}{mg}$

よって，$F = mg\tan30° = 1.0\times10^{-2}\times9.8\times\dfrac{1}{\sqrt{3}}$

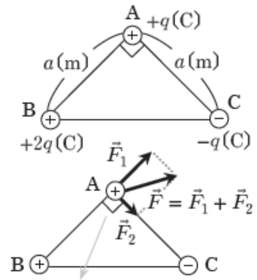
$\fallingdotseq 5.65\times10^{-2} = \mathbf{5.7\times10^{-2}}$ **N** …(答)

また F は静電気力なので，$F = 9.0\times10^9\times\dfrac{3.5\times10^{-7}\times|Q|}{0.30^2} \fallingdotseq 5.65\times10^{-2}$

よって，$|Q| = \dfrac{0.30^2\times5.65\times10^{-2}}{9.0\times10^9\times3.5\times10^{-7}} \fallingdotseq 1.6\times10^{-6}$

AB 間は引力がはたらき $Q < 0$ より，$Q = \mathbf{-1.6\times10^{-6}}$ **C** …(答)

例題 2　図のように直角三角形 ABC の頂点に点電荷が固定されている。$q > 0$，クーロンの法則の比例定数を k とするとき，A の点電荷にはたらく力 $\vec{F}$ の大きさを求めなさい。



! 注意　直角でなければ三平方の定理は成り立たない！

A と B の点電荷の間にはたらく静電気力を $\vec{F_1}$ とすると，

$|\vec{F_1}| = k\dfrac{+q\times(+2q)}{a^2} = \dfrac{2kq^2}{a^2}$

A と C の点電荷の間にはたらく静電気力を $\vec{F_2}$ とすると，

$|\vec{F_2}| = k\dfrac{+q\times|-q|}{a^2} = \dfrac{kq^2}{a^2}$

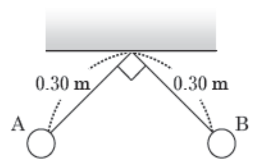
∠BAC = 90° より三平方の定理が成り立つので，

$|\vec{F}| = \sqrt{F_1^2 + F_2^2} = \sqrt{\left(\dfrac{2kq^2}{a^2}\right)^2 + \left(\dfrac{kq^2}{a^2}\right)^2} = \dfrac{\sqrt{5}kq^2}{a^2}$ …(答)

6　帯電量が 2.0×10^{-7} C と -3.0×10^{-7} C の 2 つの小球を 0.30 m 離したときに，2 球が及ぼし合う静電気力の大きさを求めなさい。ただし，クーロンの法則の比例定数を 9.0×10^9 N·m^2/C^2 とし，有効数字は 2 桁で答えること。

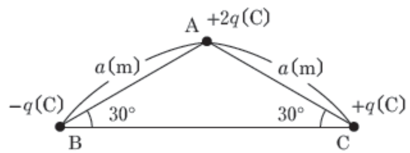
(　　　　　　　　) N

7　0.30 m の 2 本の軽い糸の下端にそれぞれ 0.010 kg の小球 A, B をとりつけ，等量の正の電荷を与え，2 本の糸の上端を一致させてつり下げると，2 本の糸は 90°の角度をなした。このとき，小球 A にはたらく静電気力の大きさ F(N) と，小球 A の帯電量 q(C) を求めなさい。ただし，重力加速度の大きさを 9.8 m/s^2，クーロンの法則の比例定数を 9.0×10^9 N·m^2/C^2 とし，有効数字は 2 桁で答えること。



F：(　　　　　　　　) N　q：(　　　　　　　　) C

8　図のように，二等辺三角形 ABC の各頂点に点電荷が固定されているとき，頂点 A に固定された点電荷にはたらく力 F の大きさを求めなさい。ただし，$q > 0$，クーロンの法則の比例定数を k とする。



(　　　　　　　　)(N)

●積分の復習　一般に，$n \neq -1$ ならば，$\int x^n\,dx = \dfrac{1}{n+1}x^{n+1} + C$

例　$\int \dfrac{1}{x^2}\,dx = \int x^{-2}\,dx = \dfrac{1}{-2+1}x^{-2+1} + C = -x^{-1} + C = -\dfrac{1}{x} + C$

1章

●静電気力による位置エネルギー

重力や万有引力，ばねの弾性力などがする仕事は，物体の移動経路に関係なく始点と終点だけで決まることが知られている。このような力を保存力といい，静電気力も保存力の１つである。この保存力による位置エネルギーは次の式で定義されている。※上巻 p122 参照

$$U = \int_{\text{基準の位置}}^{\text{物体の位置}} -F(x)\,dx$$

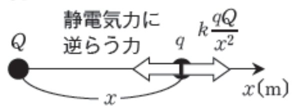
・$F(x)$ は物体にはたらく保存力
・$-F(x)$ は保存力に逆らう力

右図のように，x 軸上の原点に固定された点電荷 Q と位置 x にある点電荷 q を考えると，点電荷 q にはたらく静電気力は，引力・斥力の場合にかかわらず

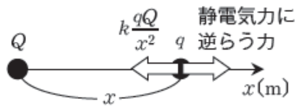
$$\vec{F}(x) = k\frac{qQ}{x^2}$$

と表すことができる。

$Qq > 0$ …斥力がはたらく



$Qq < 0$ …引力がはたらく



!注意
- $qQ > 0$ のときは，$\vec{F}(x)\ (>0)$ は x 軸の正の向き
- $qQ < 0$ のときは，$\vec{F}(x)\ (<0)$ は x 軸の負の向き

よって，静電気力に逆らう力は次のように表される。

$$-\vec{F}(x) = -k\frac{qQ}{x^2}$$

ここで，万有引力による位置エネルギーと同じように基準を $x = \infty$（無限遠）にすると，点電荷 q が $x = r$ の位置に到達したときの，q に蓄えられるエネルギー，つまり静電気力による位置エネルギーは次のよう求められる。

$$U = \int_{\infty}^{r} -k\frac{qQ}{x^2}\,dx = \left[k\frac{qQ}{x}\right]_{\infty}^{r} = k\frac{qQ}{r} - k\frac{qQ}{\infty} = k\frac{qQ}{r}\ \ (\mathrm{N\cdot m})$$

※$(\mathrm{N\cdot m}) = (\mathrm{J})$

暗記

静電気力による位置エネルギー：$U = k\dfrac{qQ}{r}$

【復習】万有引力による位置エネルギー：$U = -G\dfrac{mM}{r}$

※どちらも基準は無限遠

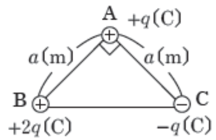
※静電気力による位置エネルギーはマイナスがつかないので注意！

●静電気力による位置エネルギーの合成

ある電荷が他の複数の電荷から静電気力を受けているとき，その電荷の持つ位置エネルギーは各静電気力による位置エネルギーのスカラー和で求められる。

1章

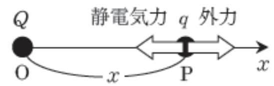
例題 3　図のように直角二等辺三角形 ABC の頂点に $+q$(C)，$+2q$(C)，$-q$(C)の点電荷が固定されている。$q > 0$，クーロンの法則の比例定数を k とするとき，A の点電荷がもつ静電気力による位置エネルギーU を求めなさい。ただし，位置エネルギーの基準は無限遠とする。



$+q$(C)の点電荷がもつ位置エネルギーは，他の 2 つの点電荷との間にはたらく静電気力による位置エネルギーの和で求められるので，

$$U = k\frac{+q\times(+2q)}{a} + k\frac{+q\times(-q)}{a} = \frac{kq^2}{a}\ \cdots(\text{答})$$

9　図のように固定された Q(C)の点電荷 O から x だけ離れた位置に，質量が無視できる q(C)の点電荷 P がある。クーロンの法則の比例定数を k，$Qq < 0$ とし，O を原点として O から P の向きに x 軸をとるものとして，次の問いに答えなさい。



(1) 点電荷 P にはたらく静電気力 $f(x)$ を求めなさい。ただし，$f(x)$ は x 軸の正の向きを正とする 1 次元ベクトルであるとする。

$f(x) = ($　　　　　　　$)$

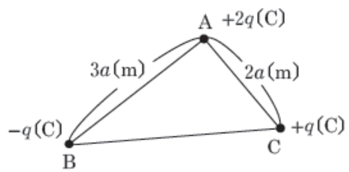
(2) (1)の $f(x)$ について，次の値を求めなさい。

① $\int_a^r -f(x)\,dx = ($　　　　　　　$)$　　② $\lim_{a\to\infty}\int_a^r -f(x)\,dx = ($　　　　　　　$)$

10　帯電量がそれぞれ 2.0×10^{-7}C と -3.0×10^{-7}C の小球 A,B を 0.30 m 離しておくとき，それぞれの小球がもつクーロン力による位置エネルギーU を求めなさい。ただし，位置エネルギーの基準は無限遠とし，クーロンの法則の比例定数を $9.0\times10^{9}\ \mathrm{N\cdot m^2/C^2}$ とする。

$U = ($　　　　　　　$)$ J

11　図のように三角形 ABC の頂点に点電荷が固定されているとき，頂点 A に固定された点電荷のもつクーロン力による位置エネルギーを求めなさい。ただし，$q > 0$，クーロンの法則の比例定数を k，位置エネルギーの基準は無限遠とする。



(　　　　　　　) J

●定積分の復習

$g(x)$ の原始関数を $G(x)$ とすると，$g(x)$ の定積分は次のように表される。

$$\int_a^b g(x)\,\mathrm{d}x = G(b) - G(a) \cdots ① \qquad \int_b^a g(x)\,\mathrm{d}x = G(a) - G(b) \cdots ①'$$

①と①′より，一般に $\boxed{\int_a^b \boldsymbol{g(x)}\mathbf{d}\boldsymbol{x} = -\int_b^a \boldsymbol{g(x)}\,\mathbf{d}\boldsymbol{x}}$ が成り立つ。また，

$$\int_a^k g(x)\,\mathrm{d}x = G(k) - G(a) \cdots ② \qquad \int_k^b g(x)\,\mathrm{d}x = G(b) - G(k) \cdots ③$$

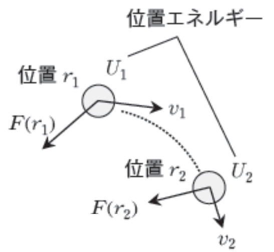
②＋③より，$\int_a^k g(x)\mathrm{d}x + \int_k^b g(x)\,\mathrm{d}x = G(b) - G(a)$ これは①に等しいので，

一般に，$\boxed{\int_a^b \boldsymbol{g(x)}\,\mathbf{d}\boldsymbol{x} = \int_a^k \boldsymbol{g(x)}\mathbf{d}\boldsymbol{x} + \int_k^b \boldsymbol{g(x)}\,\mathbf{d}\boldsymbol{x}}$ が成り立つ。

●保存力がする仕事と非保存力がする仕事

空間内の位置 r_n における物体の保存力による位置エネルギー $\boldsymbol{U_n}$ は，次の式で定義されている。

※高校数学の範囲を超えているので厳密に理解できなくてもよい。



$$\boldsymbol{U_n} = \int_{r_0}^{r_n} -\boldsymbol{F(r)}\cdot\mathbf{d}\boldsymbol{r}$$

$\boldsymbol{F(r)}$：物体にはたらく保存力
$-\boldsymbol{F(r)}$：保存力に逆らう力
$\boldsymbol{r_n}$：物体の位置　$\boldsymbol{r_0}$：基準の位置

注意　$\boldsymbol{F(r)}$と $\mathbf{d}\boldsymbol{r}$ はベクトル量(矢印省略)で，$-\boldsymbol{F(r)}\cdot\mathbf{d}\boldsymbol{r}$ は内積を表す。
内積を用いる理由は p239 参照

ここで図のように，物体に保存力 $F(r)$がはたらくベクトル場において，物体の位置が $\boldsymbol{r_1}$ から $\boldsymbol{r_2}$ まで移動したときの保存力がする仕事 W を考えてみる。保存力がする仕事は物体の経路によらず，始点と終点の位置だけで決まる性質があるため，この仕事 W は $\boldsymbol{r_1}\to\boldsymbol{r_0}\to\boldsymbol{r_2}$ という経路を辿ったとしても変わらない。よって，

保存力がする仕事 $W = \int_{r_1}^{r_2} F(r)\cdot\mathrm{d}r = \int_{r_1}^{r_0} F(r)\cdot\mathrm{d}r + \int_{r_0}^{r_2} F(r)\cdot\mathrm{d}r$

$= \int_{r_0}^{r_1} -F(r)\cdot\mathrm{d}r - \int_{r_0}^{r_2} -F(r)\cdot\mathrm{d}r = U_1 - U_2$

＝【初めの位置エネルギー】－【後の位置エネルギー】…①

> 仕事は物体の移動経路別に計算が異なるが，保存力がする仕事は経路によらないため，単純に次のように計算できる。
> $$\int_a^b \boldsymbol{f(r)}\cdot\mathbf{d}\boldsymbol{r} = \boldsymbol{F(b)} - \boldsymbol{F(a)}$$
> 何故経路によらないかについては大学で学習する。

また，運動方程式を変形すると，次の関係が得られることが知られている。

【外力がする仕事】＝【後の運動エネルギー】－【初めの運動エネルギー】…②　（上巻 p238 参照）

この移動において，物体にはたらく外力が保存力のみであるとき，①,②より，

保存力がする仕事 W ＝【初めの位置エネルギー】－【後の位置エネルギー】
＝【後の運動エネルギー】－【初めの運動エネルギー】

よって，

【初めの運動エネルギー】＋【初めの位置エネルギー】＝【後の運動エネルギー】＋【後の位置エネルギー】

となり，物体にはたらく外力が保存力のみであるとき，**力学的エネルギーは保存される。**

なお，物体に非保存力もはたらくとき，②は次のように書き換えられる。

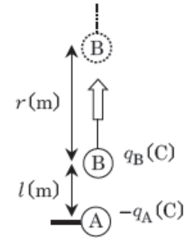
【保存力がする仕事】＋【非保存力がする仕事】＝【後の運動エネルギー】－【初めの運動エネルギー】

よって，　仕事はスカラー量なので単純に和で計算できる！

【非保存力がする仕事】
＝【後の運動エネルギー】－【初めの運動エネルギー】－【保存力がする仕事】
＝【後の運動エネルギー】－【初めの運動エネルギー】－{【初めの位置エネルギー】－【後の位置エネルギー】}
＝【後の運動エネルギー】＋【後の位置エネルギー】－{【初めの運動エネルギー】＋【初めの位置エネルギー】}
＝【後の力学的エネルギー】－【初めの力学的エネルギー】

> **暗記**
> 【保存力がする仕事】＝【初めの位置エネルギー】－【後の位置エネルギー】
> 【非保存力がする仕事】＝【後の力学的エネルギー】－【初めの力学的エネルギー】
> ※上記のような関係式は単に運動方程式を変形したに過ぎないことを知っておこう！

12 それぞれ $-q_A$(C)，q_B(C)（$q_A > 0, q_B > 0$）に帯電した小球 A,B があり，図のように B を軽い糸につなぎ，固定された A から鉛直上向きに $\boldsymbol{l}$(m)だけ離して静止させる。この状態から糸をゆっくり鉛直上向きに $\boldsymbol{r}$(m)だけ引き上げるとき，静電気力がする仕事，重力がする仕事，B に作用する糸の張力がする仕事をそれぞれ求めなさい。ただし，B の質量を $\boldsymbol{m}$(kg)，クーロンの法則の比例定数を $\boldsymbol{k}$(N·m²/C²)，重力加速度の大きさを $\boldsymbol{g}$(m/s²)とする。



静電気力がする仕事：(　　　　　　　　　　)(J)

重力がする仕事：(　　　　　　　　　　)(J)

糸の張力がする仕事：(　　　　　　　　　　)(J)

●電場　電荷の周りに静電気力を及ぼす空間を電場または電界という。

電場は位置によって変わる大きさと向きがあり，次のように定義されている。

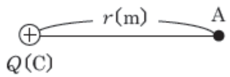
暗記

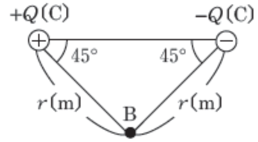
- 電場中に+1 Cの点電荷を置いたと仮定し，その点電荷が受ける力の向きを電場の向き，力の大きさを電場の大きさ(強さ)とする。
- 電場の大きさ(強さ)の単位を(N/C)とする。

※電場中のある 1 点における，電場の強さと向きを表すベクトル量 $\vec{E}$ を**電場ベクトル**といい，その大きさ E は+1 C の点電荷が受ける力の大きさであるので，E の単位は(N/C)となる。

● 次の点 A，点 B における電場の大きさ E と向きを求めてみよう。

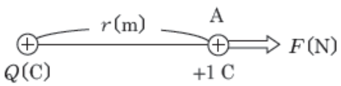
※ $Q>0$ で，クーロンの法則の比例定数は k とする。





点 A に+1 C の点電荷を置いてみる

点 B に+1 C の点電荷を置いてみる

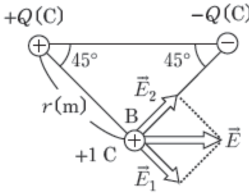


斥力がはたらくので，受ける力は右向き。

大きさ E はクーロンの法則より，

$$E=k\frac{1\times Q}{r^2}=k\frac{Q}{r^2}$$

点 A での $\begin{cases}\text{電場の向き：右向き}\\ \text{電場の強さ：}k\dfrac{Q}{r^2}\end{cases}$



電場ベクトル $\vec{E}$ は図の $\vec{E}_1$ と $\vec{E}_2$ の**ベクトル和**になる。図より，この向きは右向きとなる。

また，$E_1=E_2=k\dfrac{1\times Q}{r^2}=k\dfrac{Q}{r^2}$

であるので，図より，

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

点 B での $\begin{cases}\text{電場の向き：右向き}\\ \text{電場の強さ：}\sqrt{2}k\dfrac{Q}{r^2}\end{cases}$

!注意　ベクトル和やスカラー和で量を求めることを「**重ね合わせ**」といい，それによって求められることを「**重ね合わせの原理**」という。

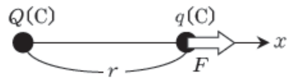
●電場中にある電荷が受ける力

電場ベクトルが $\vec{E}$ の位置に +1 C の点電荷を置くと，その電荷が受ける力が $\vec{E}$ であるので，同じ位置に q(C)の点電荷を置くと，その電荷が受ける力は $\vec{F}=q\vec{E}$ となる。電場ベクトルの大きさ E の単位は(N/C)，q の単位は(C)より，qE の単位は(N)となる。

暗記

電場中の q(C)の電荷にはたらく力：$\vec{F}=q\vec{E}$

!注意　静電気力の式と電場ベクトルの大きさとの関係をしっかり理解しよう！



$$F=k\frac{qQ}{r^2}=q\cdot\boxed{k\frac{Q}{r^2}}$$

+1 C 当たりにはたらく力の大きさを表している

この部分が E

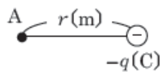
$$F=qE$$

13 次の文中の空欄を埋めなさい。ただし，クーロンの法則の比例定数を k とする。

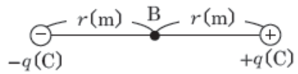
電荷の周囲のクーロン力を及ぼす空間を①(　　　)または②(　　　)という。この量はベクトル量で，③(　　　)(C)の点電荷を置いたときに，その電荷が受けるクーロン力と定義されているので，その単位は④(　　　)となる。よって，q(C)($q>0$)の点電荷から r(m)離れた点での電場ベクトルを $\vec{E}$ とすると，$|\vec{E}|=$⑤(　　　)となる。また，この点電荷から r(m)離れた点に Q(C)の点電荷を置いたとき，Q(C)の電荷にはたらく力は，$\vec{E}$ を用いて⑥(　　　)表すことができる。

14 次の問いに答えなさい。

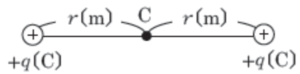
(1) 次の A〜D 点での電場の強さ E を求めなさい。($q>0$，クーロンの法則の比例定数は k とする)



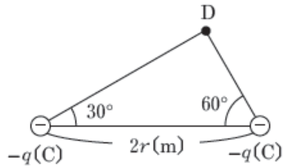
(　　　)(N/C)



(　　　)(N/C)



(　　　)(N/C)



(　　　)(N/C)

(2) (1)の A〜D 点に関して，次の空欄を選択，または埋めなさい。

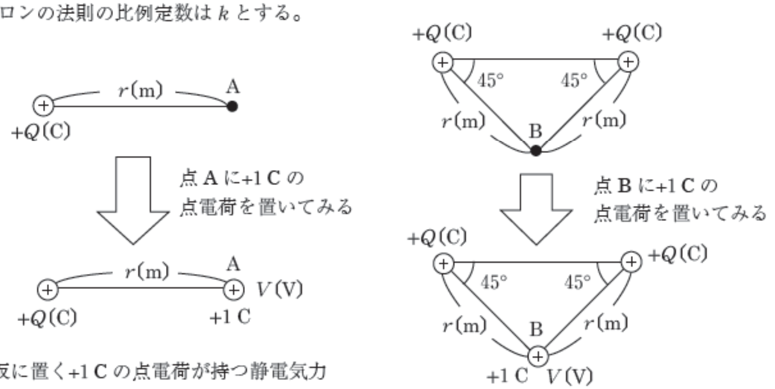
A 点での電場の向きは①(右 ・ 左)向きで，B 点での電場の向きは②(右 ・ 左)向きである。B 点に −3 C の点電荷を置くと，この点電荷にはたらく静電気力の大きさは③(　　　)(N)で，その向きは④(右 ・ 左)向きである。C 点，D 点に +3 C の点電荷を置くと，それぞれの点電荷にはたらく静電気力の大きさは，⑤(　　　)(N)，⑥(　　　)(N)である。

●電位　電場中の電位は次のように定義されている。

暗記
- 電場中に+1 C の点電荷を置いたと仮定し，この点電荷が持っている静電気力による位置エネルギーを電位とする。
- 電位の単位を(J/C)とする。

※電場中の電位は位置によって大きさが変わるスカラー量で，+1 C の点電荷を置いたときの点電荷が持つ静電気力による位置エネルギーであるので，単位は(J/C)となり，(J/C) = (V) と定義されている。

●次の点 A，点 B における電位 V を求めてみよう。ただし，電位の基準は無限遠とし，$Q > 0$，クーロンの法則の比例定数は k とする。



仮に置く+1 C の点電荷が持つ静電気力による位置エネルギーが電位なので，

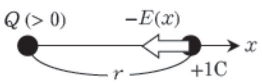
点Aでの電位 … $V = k\dfrac{1 \times Q}{r} = k\dfrac{Q}{r}$

点 B での電位は，次のようにスカラー和で求められる。

点Bでの電位 … $V = k\dfrac{Q}{r} + k\dfrac{Q}{r} = 2k\dfrac{Q}{r}$

注意1　点 A における電位は+1C 当たりの位置エネルギーであるので，位置エネルギーの定義式(p10 参照)により，次のように求めることもできる。

$$V = \int_{\infty}^{r} -E(x)\,\mathrm{d}x = \int_{\infty}^{r} -k\frac{Q}{r^2}\,\mathrm{d}x = \left[k\frac{Q}{x}\right]_{\infty}^{r} = k\frac{Q}{r}$$

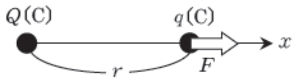


※無限遠を電位の基準（0 V）とする。

●電場中にある電荷が持つ位置エネルギー

電位が V の位置に+1 C の点電荷を置くと，その静電気力による位置エネルギーは V(J)であるので，同じ位置に q(C)の点電荷を置くと，その静電気力による位置エネルギーは $U = qV$ となる。電位 V の単位は(J/C)，q の単位は(C)より，qV の単位は(J)となる。

注意2　位置エネルギーの式と電位との関係をしっかり理解しよう！



$U = k\dfrac{qQ}{r} = q \cdot \boxed{k\dfrac{Q}{r}}$　+1 C 当たりの位置エネルギーを表している

この部分が V

$U = qV$

※無限遠を電位の基準（0 V）とする。

暗記

q(C) の電荷が持つ静電気力による位置エネルギー：$U = qV$

●電圧　電位とは，電場中で+1 C が持つ位置エネルギーであったが，**電場中の 2 点の電位差を電圧といい**，電圧の単位は電位と同じで (V) になる。電場中の 2 点 A，B の電位を V_A, V_B（$V_A > V_B$）とすると，電圧は $V = V_A - V_B$ となる。ここで，

【保存力がする仕事】=【初めの位置エネルギー】−【後の位置エネルギー】
【非保存力がする仕事】=【後の力学的エネルギー】−【初めの力学的エネルギー】

※p12,p13 を参照

であったので，q(C)の点電荷を A から B へ静かに運んだとき，次のように計算できる。

電場(静電気力)がする仕事 $= qV_A - qV_B = q(V_A - V_B) = qV$
外力(非保存力)がする仕事 $= qV_B - qV_A = -q(V_A - V_B) = -qV$

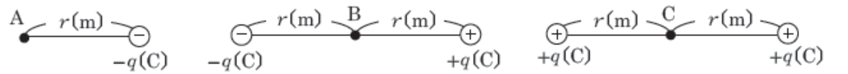
注意　$V_A < V_B$ なら電圧は $V = V_B - V_A$

15　次の文中の空欄を埋めなさい。ただし，クーロンの法則の比例定数を k とする。

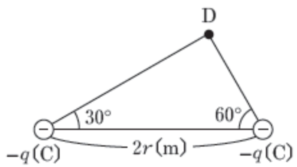
電場中の電位は位置によって変わるスカラー量で，その量は+1 C の点電荷を置いたときに，その点電荷が持っている静電気力による位置エネルギーとして定義されている。電位の単位を(J)と(C)を用いて表すと ①(　　)であり，この単位は ②(　　)と定義されている。この定義によって，q(C)（$q > 0$）の点電荷から r(m)離れた点での電位を V とすると，V = ③(　　　　) となる。よってこの点電荷から r(m)離れた点に Q(C)の点電荷を置いたとき，Q(C)の点電荷が持つ静電気力による位置エネルギーは，V を用いて ④ (　　　) と表すことができる。

16　次の問いに答えなさい。

(1)　次の A～D 点での電位 V を求めなさい。($q > 0$，クーロンの法則の比例定数は k とする)



(　　　　　)(V)　　(　　　　　)(V)　　(　　　　　)(V)

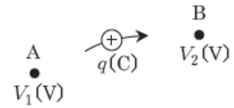


(　　　　　)(V)

(2)　(1)の A～D 点に−3 C の点電荷を置いたとき，この点電荷がもつ位置エネルギーをそれぞれ(1)の結果を利用して単位をつけて答えなさい。

A：(　　　　)(　)　B：(　　　　)(　)　C：(　　　　)(　)　D：(　　　　)(　)

17　ある電場中の点 A，点 B の電位がそれぞれ V_1(V)，V_2(V)（$V_1 < V_2$）で，点 A にある帯電量 q(C)の小球を点 B まで静かに移動させるとき，AB 間の電圧，外力がする仕事，電場がする仕事をそれぞれ求めなさい。ただし，重力の影響は無視できるものとする。



AB 間の電圧：(　　　　　)(V)　外力がする仕事：(　　　　　)(J)

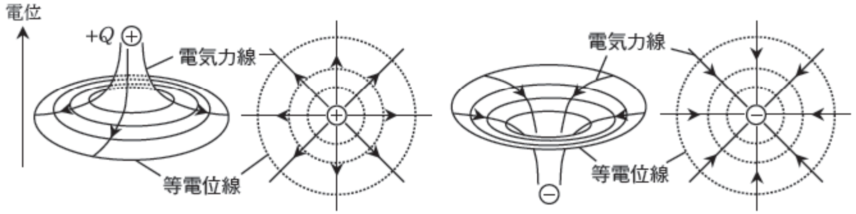
電場がする仕事：(　　　　　)(J)

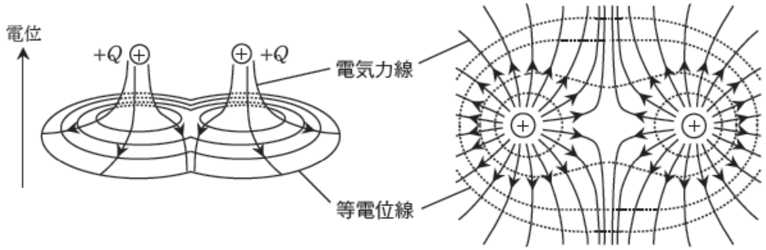
●電場と電位のイメージ

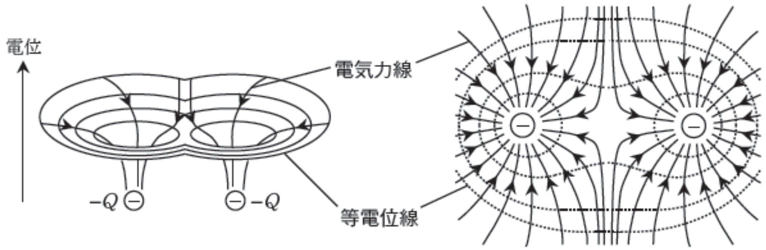
電場と電位の様子を表すのに，**電気力線**と**等電位線**が使われる。それぞれの意味を理解しよう。

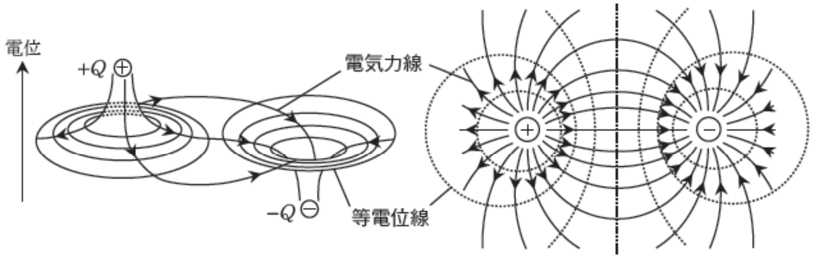
電気力線…+1 C の点電荷を置いたとき，その点電荷が力を受けて移動する軌跡
等電位線…電位が等しい線。地図でいうところの等高線に対応し，標高が電位に対応する

! 注意　電気力線の矢印は電場の向きを表している。+1 C の点電荷を置いて，どちらに力を受けるかを考えれば，電場の向きは容易にわかる。また，電気力線と等電位線は垂直に交わっている。





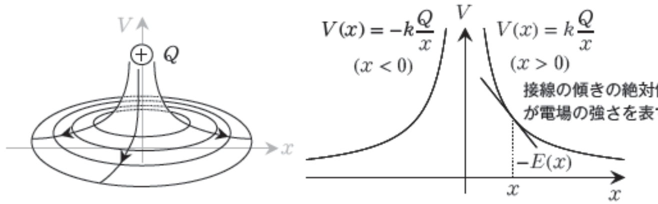




●電位と電場の関係

$-F(x) \xrightarrow{\text{積分}} U(x)$
$-E(x) \xleftarrow{\text{微分}} V(x)$

位置エネルギーは保存力に逆らう力を積分することで得られるので，一般に**静電気力による位置エネルギーを変位で微分すると(−1)×静電気力が得られ，電位を変位で微分すると(−1)×電場が得られる。**
※位置エネルギー，電位については p12 及び p16 注意 1 参照



$V(x) = k\dfrac{Q}{x}$

$\dfrac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}x} = -k\dfrac{Q}{x^2}$

$\dfrac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}x} = -k\dfrac{Q}{x^2} = -E(x)$

※(V/m) = (N/C) なることを確かめよう → (V/m) = ((J/C)/m) = (J/C·m) = (N·m/C·m) = (N/C)

18　次の図 1 は $+Q$(C)の点電荷を $2r$(m)離して固定した図である。また，図 2 は $+Q$(C)，$-Q$(C)の点電荷を $2r$(m)離して固定した図である。$Q > 0$，クーロンの法則の比例定数を k として，次の問いに答えなさい。

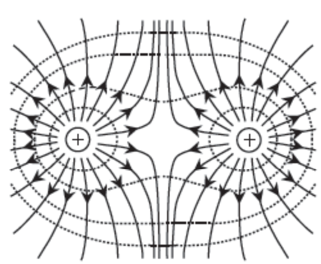
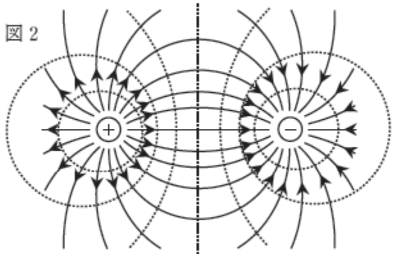
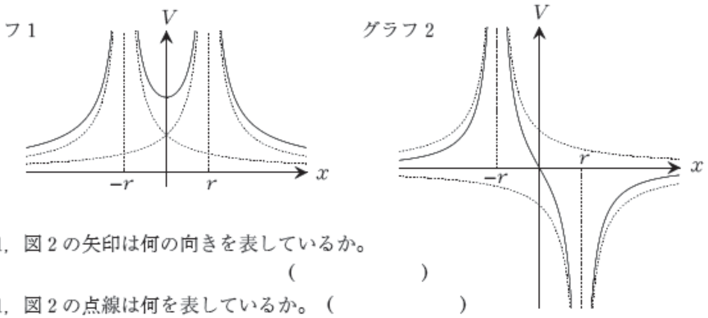
図 1


図 2




(1) 図 1，図 2 の矢印は何の向きを表しているか。
(　　　　　)

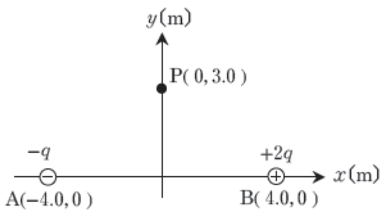
(2) 図 1，図 2 の点線は何を表しているか。(　　　　　)

(3) グラフ 1 とグラフ 2 はそれぞれ図 1，図 2 のある大きさと位置の関係を表したものである。それぞれのグラフの縦軸は何を表しているか。(　　　　　)

(4) グラフ 1 の V 軸との交点の V 座標を求めなさい。(　　　　　)

(5) グラフ 2 の原点での接線の傾きの絶対値を求めなさい。(　　　　　)

例題 4　図のように，xy 平面内で，2 点 A$(-4.0, 0)$, B$(4.0, 0)$に，それぞれ $-q$(C)，$+2q$(C)の電荷が固定されている。クーロンの法則の比例定数を k(N·m^2/C^2)，$q>0$ として，次の問いに答えなさい。



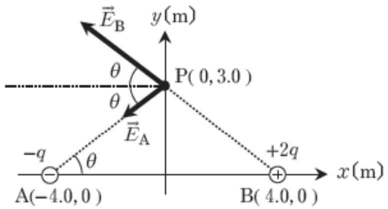
(1) 点 P での電場の強さを求めなさい。

$\angle$PAB $=\theta$ とすると，PA $=\sqrt{4^2+3^2}=5$

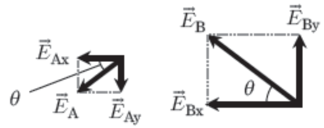
より，$\cos\theta=\dfrac{4}{5}$, $\sin\theta=\dfrac{3}{5}$

A, B にある電荷によって生じる電場ベクトルをそれぞれ $\vec{E}_{\mathrm{A}}, \vec{E}_{\mathrm{B}}$ とすると，

$|\vec{E}_{\mathrm{A}}|=k\dfrac{q}{5^2}=\dfrac{kq}{25}$, $|\vec{E}_{\mathrm{B}}|=k\dfrac{2q}{5^2}=\dfrac{2kq}{25}$



$$\vec{E}_{\mathrm{A}}=\begin{pmatrix}-\dfrac{kq}{25}\cos\theta\\-\dfrac{kq}{25}\sin\theta\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}-\dfrac{kq}{25}\times\dfrac{4}{5}\\-\dfrac{kq}{25}\times\dfrac{3}{5}\end{pmatrix}=\frac{kq}{125}\begin{pmatrix}-4\\-3\end{pmatrix}$$



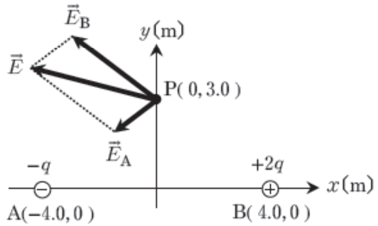
$$\vec{E}_{\mathrm{B}}=\begin{pmatrix}-\dfrac{2kq}{25}\cos\theta\\\dfrac{2kq}{25}\sin\theta\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}-\dfrac{2kq}{25}\times\dfrac{4}{5}\\\dfrac{2kq}{25}\times\dfrac{3}{5}\end{pmatrix}=\frac{kq}{125}\begin{pmatrix}-8\\6\end{pmatrix}$$

合成ベクトルを $\vec{E}$ とすると，

$$\vec{E}=\vec{E}_{\mathrm{A}}+\vec{E}_{\mathrm{B}}=\frac{kq}{125}\begin{pmatrix}-4\\-3\end{pmatrix}+\frac{kq}{125}\begin{pmatrix}-8\\6\end{pmatrix}$$

$=\dfrac{kq}{125}\begin{pmatrix}-12\\3\end{pmatrix}=\dfrac{3kq}{125}\begin{pmatrix}-4\\1\end{pmatrix}$　よって，

$|\vec{E}|=\dfrac{3kq}{125}\sqrt{(-4)^2+1^2}=\boldsymbol{\dfrac{3\sqrt{17}kq}{125}}$ …(答)



(2) 点 P での電位を求めなさい。ただし，電位は無限遠を基準とする。

A, B にある電荷によって生じる電位をそれぞれ $V_{\mathrm{A}}, V_{\mathrm{B}}$ とすると，

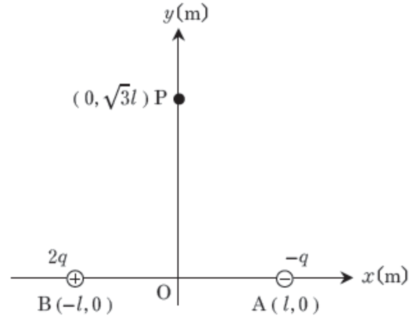
$V_{\mathrm{A}}=k\dfrac{-q}{5}=-k\dfrac{q}{5}$，$V_{\mathrm{B}}=k\dfrac{+2q}{5}=k\dfrac{2q}{5}$　点 P での電位 V はこのスカラー和で

あるので，$V=V_{\mathrm{A}}+V_{\mathrm{B}}=-k\dfrac{q}{5}+k\dfrac{2q}{5}=\boldsymbol{\dfrac{kq}{5}}$ …(答)

(3) 点 P に $+Q$(C)の点電荷を固定したとき，この点電荷にはたらく静電気力の大きさ F と，この点電荷の静電気力による位置エネルギー U (無限遠を基準)を求めなさい。

(1)より，$F=Q|\vec{E}|=\boldsymbol{\dfrac{3\sqrt{17}kqQ}{125}}$ …(答)　　(2)より，$U=QV=\boldsymbol{\dfrac{kqQ}{5}}$ …(答)

19　図のように，xy 平面の点 A$(l, 0)$に $-q$(C)，点 B$(-l, 0)$に $2q$(C)の点電荷が固定されている。点 P の座標を$(0, \sqrt{3}l)$，クーロンの法則の比例定数を k(N·m^2/C^2)，$q>0$ として，次の問いに答えなさい。



(1) 点 P での電場の強さを求めなさい。

(　　　　　　　　)(N/C)

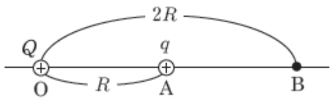
(2) 点 P での電位を求めなさい。ただし，電位は無限遠を基準とする。

(　　　　　　)(V)

(3) 点 P に $3q$(C)の点電荷を固定したとき，この点電荷にはたらく静電気力の大きさ F と，この点電荷の静電気力による位置エネルギー U (無限遠を基準)を求めなさい。

$F=$(　　　　　　　　)(N)　$U=$(　　　　　　　　)(J)

例題 5　図のように，Q(C)の正の点電荷が点 O に固定されている。点 O から R(m)離れた点 A に q(C)の正の電荷を帯びた質量 m(kg)の小物体を静かに置いたところ，小物体は静電気力を受けて B の方向へ運動を始めた。この小物体の点 B（点 O から$2R$(m)離れた点）での速さ v を求めなさい。ただし，クーロンの法則の比例定数を k とし，m は重力が無視できるほど十分小さいものとする。



※物体が非保存力を受けていない間は力学的エネルギーが保存される。質量が非常に小さい場合は重力による位置エネルギーの変化が無視できるため，右の関係が成り立つ。

$$\boxed{\frac{1}{2}mv^2 + qV = 一定}$$

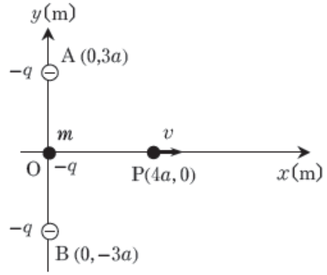
Q(C)の点電荷が及ぼす電場の A,B での電位をそれぞれ V_A, V_B（無限遠を基準）とすると，

$V_A = k\dfrac{Q}{R}$，$V_B = k\dfrac{Q}{2R}$ …①　エネルギー保存則より，

$\dfrac{1}{2}m \times 0^2 + qV_A = \dfrac{1}{2}mv^2 + qV_B$ …②　①,②より，$\dfrac{1}{2}m \times 0^2 + k\dfrac{qQ}{R} = \dfrac{1}{2}mv^2 + k\dfrac{qQ}{2R}$

これを v について解くと，$v = \sqrt{\dfrac{kqQ}{mR}}$ …(答)

20　図のように，xy 平面の点 A$(0, 3a)$, B$(0, -3a)$に $-q$(C)の負の点電荷がそれぞれ固定されている。質量が m(kg)で，$-q$(C)の電荷をもつ微粒子を原点に置いて静かに放すと，微粒子は x 軸の正の方向へ運動した。クーロンの法則の比例定数を k, m は小さく重力の影響は無視できるものとして，次の問いに答えなさい。



(1) 原点 O における電位 V_O と P$(4a, 0)$における電位 V_P をそれぞれ求めなさい。ただし，電位の基準は無限遠とする。

V_O：(　　　　　)(V)　V_P：(　　　　　)(V)

(2) 微粒子が点 P$(4a, 0)$を通過するときの速さ v を求めなさい。　(　　　　　　)(m/s)

(3) 十分時間がたったときの粒子の速さ u を求めなさい。

(　　　　　　)(m/s)

★章末問題★

21　同材質，同半径の 2 つの金属球 A, B に，それぞれ $+4.0 \times 10^{-6}$ C, -6.0×10^{-6} C の静電気を帯電させ，さらに A, B を接触させたのちに離した。このとき，次の問いに答えなさい。ただし，電気素量は 1.6×10^{-19} C，クーロンの法則の比例定数は 9.0×10^9 N·m^2/C^2 とする。

(1) 接触する前に A, B を 0.3 m 離して固定した場合，2 球の及ぼし合う静電気力の大きさを求めなさい。また，その力は引力か，斥力か答えなさい。

(　　　　)N　(　　　　)

(2) A, B を接触して離した後の，A, B それぞれの帯電量を求めなさい。

A：(　　　　)C　B：(　　　　)C

(3) A, B を接触する前後で，電子はどちらからどちらに何個移動したか。有効数字 2 桁で答えなさい。

(　　)から(　　)へ(　　　　)個

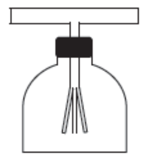
(4) 接触後に A, B を 0.3 m 離して固定した場合，2 球の及ぼし合う静電気力の大きさを求めなさい。また，その力は引力か，斥力か答えなさい。

(　　　　)N　(　　　　)

(5) 銅の同位体の 1 つである $^{65}_{29}$Cu の原子 1 個に含まれる陽子と中性子の数を答えなさい。

陽子：(　　)　中性子：(　　)

22　次の(　　)内を正しく選択しなさい。



帯電していない箔検電器がある。箔検電器の金属部分は①(導体，不導体)であるため，内部には自由に動ける②(陽子，電子，中性子)が存在する。負に帯電した棒を箔検電器上部の金属板に近づけると，③(静電誘導，誘電分極)により，金属板は④(正，負)に，箔は⑤(正，負)に帯電し，箔は⑥(開く，閉じたままである)。次に帯電棒を近づけたまま，箔検電器の金属板を指で触れる。このとき箔は⑦(開く，閉じる，開いたままである，閉じたままである)。これは⑧(箔検電器，人の体)から⑨(箔検電器，人の体)へ⑩(陽子，電子，中性子)が移動したためである。続いて指を金属板から離し，次に棒を遠ざけた。このとき箔は⑪(開く，閉じる，開いたままである，閉じたままである)。

①(　　　　) ②(　　　　) ③(　　　　) ④(　　) ⑤(　　)

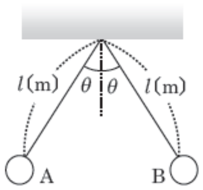
⑥(　　　　) ⑦(　　　　) ⑧(　　　　) ⑨(　　　　)

⑩(　　　　) ⑪(　　　　)

23 電場中にある -4.0×10^{-8} C の点電荷が，点 A から点 B へ移動したとき，電場がした仕事は 2.0×10^{-7} J であった。点 A，点 B のどちらの電位が何 V 高いか。

点(　　) のほうが(　　　　) V 高い

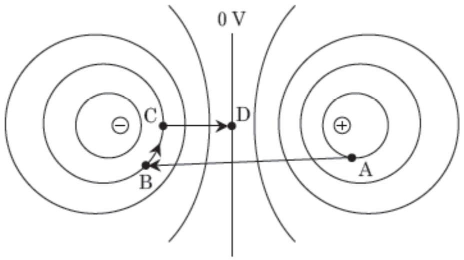
24 図のように長さ l(m)の伸び縮みしない 2 本の軽い糸を天井に固定し，ともに電荷 q(C)の正に帯電した質量 m(kg)の 2 個の小球 A, B を取り付けたところ，糸は鉛直方向とθ(rad)の角をなして静止した。クーロンの法則の比例定数をk(N·m^2/C^2)，重力加速度の大きさをg(m/s^2)として，次の問いに答えなさい。



(1) 小球 A と B の間にはたらく静電気力の大きさを，m, g, θ を用いて表しなさい。　(　　　　　　)(N)

(2) 小球 A と B の帯電量 q の値を，k, l, m, g, θ を用いて表しなさい。(　　　　　　)(C)

25 右図は正負等量の電荷がつくる電場の様子を 10 V 間隔の等電位線で表した図である。点 D の電位を 0 V とし，電荷 q を 2.0 C の正電荷とする。



(1) 点 B に電荷 q があるとき，この電荷が持つ静電気力による位置エネルギーを求めなさい。

(　　　　　) J

(2) q を A→B→C→D の順に運ぶとき，外力が正の仕事をする区間はどれか。またその仕事は何 J か。

(　　→　　)(　　　　　) J

(3) 電場が電荷 q に正の仕事をする区間はどの区間か。またその仕事は何 J か。

(　　→　　)(　　　　　) J

(4) 点 B に-2.0 C に帯電した粒子を静かに置いて放すと，粒子はどのような経路で移動するか。図に書き込みなさい。また，粒子の質量を7.0×10^{-3} kg とするとき，小球が点 A と同じ電位に達したときの速さv(m/s)を求めなさい。ただし，重力による影響は無視できるものとする。

(　　　　　) m/s

26 x 軸上の原点 O 及び座標 $2r$ の位置に，それぞれ $+4q$ の正電荷，$-q$ の負電荷を置く。クーロンの法則の比例定数を k として，次の問いに答えなさい。

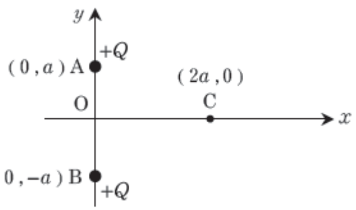
(1) x 軸上で電位が 0 となる座標 x_1を求めなさい。　x_1 = (　　　　　　)

(2) x 軸上において，電場の向きが常に同じ向きである範囲は次のうちどれか。(　　　　)

ア．$x<0$　イ．$0<x<2r$　ウ．$2r<x$

(3) x 軸上で電場の強さが 0 となる座標 x_2を求めなさい。　x_2 = (　　　　　　)

27 図のように原点を O とする xy 平面上の A(0, a) と B(0, $-a$)に $+Q$(C)($Q>0$) の点電荷を固定した。また，($2a$, 0)を C とする。クーロンの法則の比例定数を k として，次の問いに答えなさい。



(1) ∠ACO = θ とするとき，$\cos\theta$ の値を求めなさい。

(　　　　　)

(2) 点 C での電場の強さを求めなさい。(　　　　　　)(N/C)

(3) 電位の基準を無限遠として，原点 O 及び点 C の電位を求めなさい。

原点 O の電位：(　　　　　　)(V)　点 C の電位：(　　　　　　)(V)

(4) $-q$(C)の電気量をもつ質量 m(kg)の粒子を C で静かに放すと，粒子は x 軸上の負の向きに飛び出した。この粒子が原点に達したときの粒子の速さを求めなさい。ただし，重力の影響は無視できるものとする。　(　　　　　　　　　)(m/s)

(5) (4)の粒子が C から O に達する間に電場がした仕事を求めなさい。

(　　　　　　　　　)(J)

7章　電流と磁場

●磁場とは

図 1 のように，電流のまわりに方位磁針を置くと，N 極は点線の矢印の方向を向く。また，図 2 のように回転電流の中心に方位磁針を置くと，N 極は点線の矢印の方向を向く。

磁場（磁界）とは，このように方位磁針（磁石）に影響を与える空間をいい，電流のまわりにできる。ただし，影響を与えるのは方位磁針（磁石）だけではない。

図 3 のような平行電流の間には，電流の向きが同じときは引力，逆のときは斥力がはたらき，磁場は他の電流自体にも影響する。

ところで，図 4 のように磁石内には電流が流れていないのに，磁石のまわりにも磁場ができる。実は磁石内の電子の自転（スピン）が磁場を作り出すことが知られているが，少しわかりやすく言うと，磁石は図 2 の回転電流を限りなく小さくし，それを図 5 のように連続して組み合わせたものである。この回転電流は，N 極と S 極をもつ微小な磁石とみなせ，これを N 極，S 極交互に組み合わせたものが棒磁石である。（この微小な磁石を磁気双極子という）棒磁石は何度切っても両端に N 極と S 極が現れるのは，磁石が磁気双極子の集まりであるからだといえる。

いずれにしても磁場は電流（電子の流れ）によってできるといえる。

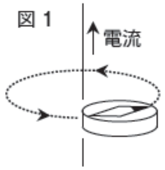
図 1


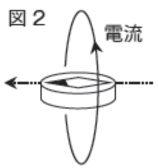
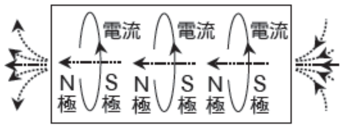
図 2


図 3


図 4


図 5


回転方向が揃っているので磁石になる

●電荷と磁荷

電荷は静電気力の原因となるもので，＋の電気（陽子）や－の電気(電子)などの粒子をいい，電荷のまわりには電場が作られる。同様に，磁力の原因となるものを磁荷と呼ぶが，すでに述べたように磁場が作られる原因は電流であり，現実には正の磁荷，負の磁荷というものは単独で存在しない。ただし，磁気量を定量化する上で，仮想的に単独の磁荷を想定することがあるので注意しよう。

●電磁気に関する式

磁場は電場と同様，ベクトル量であり，小さな方位磁針を置いたとき，方位磁針の N 極が示す向きが磁場の向きであるが，大きさは，電流の強さ，導線の形状，導線からの距離などに関わるため，定量はやや複雑である。詳しくはこの後学習する。

●磁気量と磁場

電荷のまわりの静電気力を及ぼす空間を電場または電界といい，電流のまわりの磁力を及ぼす空間を磁場または磁界というが，磁場に関する式も電場に関する式と対称性をもつように定義されている。まず，電気量と磁気量の単位は次のように定義されている。

> **電荷(電気量)の単位：C**（クーロン）
> **磁荷(磁気量)の単位：Wb**（ウェーバ）

電場中に+1C の点電荷を置いたとき，この点電荷が受ける力の向きを電場の向き，力の大きさを電場の大きさ(強さ)と決める。同様に，磁場中に+1Wb（ウェーバ）の点磁荷を置いたとき，この点磁荷が受ける力の向きを磁場の向き，力の大きさを磁場の大きさ(強さ)と決める。

よって，
- 電場が $\vec{E}$(N/C)である点にある q(C)の電荷が受ける力は $\vec{F}=q\vec{E}$
- 磁場が $\vec{H}$(N/Wb)である点にある m(Wb)の磁荷が受ける力は $\vec{F}=m\vec{H}$

●誘電率と透磁率

ある物質を電場中や磁場中に置いたとき，その物質が正極と負極，N 極と S 極に分かれることを分極といい，正負の分極，NS の分極のしやすさを表す係数をそれぞれ誘電率，透磁率という。誘電率を ε，透磁率を μ とすると，右のことが定義されている。
※考え方については p30 を参照すること。

> q(C)の電荷から $N_e=\dfrac{q}{\varepsilon}$(本)の電気力線が出る …①
> m(Wb)の磁荷から $N_m=\dfrac{m}{\mu}$(本)の磁力線が出る …②

●比誘電率と比透磁率

誘電率は比誘電率 ε_r と真空の誘電率 ε_0 を用いて $\varepsilon=\varepsilon_r\varepsilon_0$ と表した。（p52 参照）同様に，
透磁率は比透磁率 μ_r と真空の透磁率 μ_0 を用いて $\mu=\mu_r\mu_0$ と表す。

●電束線と磁束線

電気力線，磁力線をある本数だけまとめたものを，それぞれ電束線，磁束線といい，q(C)の電荷から q 本の電束線が出て，m(Wb)の磁荷から m 本の磁束線が出ていると定義されている。(電気力線と電束線の向き，磁力線と磁束線の向きはそれぞれ同じと決める)

①,②より，電束線 Ψ(プサイ) $=q$ 本 $=\varepsilon N_e$　磁束線 Φ(ファイ) $=m$ 本 $=\mu N_m$　この関係から，
電気力線を ε 本束ねたものが 1 本の電束，磁力線を μ 本束ねたものが 1 本の磁束である。

●電束密度と磁束密度

S(m^2)に N_e 本の電気力線，N_m 本の磁力線が貫いているとき，

電場の強さ $E=\dfrac{N_e}{S}$(本/m^2) より，電束密度の大きさ $D=\dfrac{\Psi}{S}=\dfrac{\varepsilon N_e}{S}$(本/m^2) $=\varepsilon E$(本/m^2)

磁場の強さ $H=\dfrac{N_m}{S}$(本/m^2) より，磁束密度の大きさ $B=\dfrac{\Phi}{S}=\dfrac{\mu N_m}{S}$(本/m^2) $=\mu H$(本/m^2)

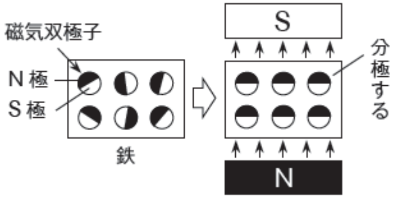
●磁束密度の大きさの単位

m(Wb)の磁荷からは m 本の磁束が出ていると決められているので(Wb)は磁束の本数そのものを表している。よって，磁束密度の大きさの単位は(Wb/m^2)であり，この組立単位はアルファベット 1 文字で(T)(テスラ)と定義されている。

電場に関する式		磁場に関する式	
電気量	q(C)	磁気量	m(Wb)
電場	$\vec{E}$(N/C)	磁場	$\vec{H}$(N/Wb)
静電気力	$\vec{F}=q\vec{E}$	磁気力	$\vec{F}=m\vec{H}$
真空中の誘電率	ε_0	真空中の透磁率	μ_0
比誘電率	ε_r	比透磁率	μ_r
誘電率	$\varepsilon=\varepsilon_r\varepsilon_0$	透磁率	$\mu=\mu_r\mu_0$
電束密度	$\vec{D}=\varepsilon\vec{E}$	磁束密度	$\vec{B}=\mu\vec{H}$

●磁性体と磁化

鉄くぎに磁石を近づけると，鉄は磁石に引き付けられる。これはくぎ内部に浸透する磁場によって，磁気双極子の向きが揃い，くぎ全体が1つの磁石になるためである。このように磁場によって物質が磁石になることを**磁化**といい，これは静電気における不導体の**誘電分極**と対応する現象である。なお，鉄，コバルト，ニッケルなどは**分極**をしやすい物質で，磁石に近づけると強く磁化する。このような物質を**強磁性体**という。アルミニウムや白金，マンガンなどは強磁性体と同じ向きに磁化が起こるが，その程度が弱い。このような物質を**常磁性体**という。水や銅，グラファイト(黒鉛ともいい，炭素からなる)などは，磁石に近づけると強磁性体とは逆向きに弱い磁化が起こり，磁石との間に斥力がはたらく。このような物質を**反磁性体**という。

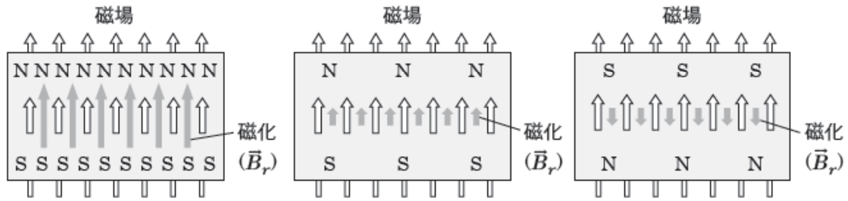


●比透磁率 μ_r (真空を1とする)

強磁性	鉄	120～200,000
	ニッケル	180～600
	コバルト	250～270
常磁性	アルミニウム	1.000021
	白金	1.000265
	空気	1.0000004
反磁性	水	0.999991
	銅	0.999990
	グラファイト	0.99980

※温度や状態，純度によって変わる
※値は分極のしやすさを表す

●強磁性体 ($\mu_r \gg 1$)　●常磁性体 ($\mu_r > 1$)　●反磁性体 ($\mu_r < 1$)



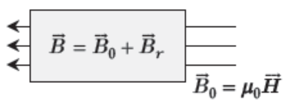
磁場の強さが H の位置に物質を置くと，物質中の磁束密度 $\vec{B}$ は真空中の磁束密度 $\vec{B}_0$ と物質の磁化による磁束密度 $\vec{B}_r$ の和となるが，結局物質中の磁束密度 $\vec{B}$ は次の式で定義されている。

暗記

物質中の磁束密度：$\vec{B} = \mu\vec{H}$　※ $\mu = \mu_0\mu_r$

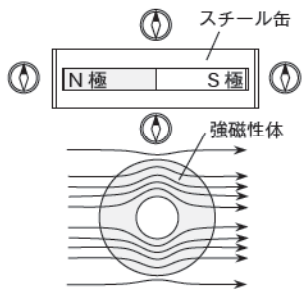
重要 磁場 $\vec{H}$ は磁性体に左右されない量であると決める。

比透磁率が μ_r の物質



●磁場の遮蔽

スチール（鋼(はがね)）は鉄（強磁性体）と炭素の合金であるが，スチール缶の中に磁石を入れると，磁石の周りにできる磁場の大部分は遮蔽(しゃへい)（シールド）される。特に強磁性体は磁力線を迂回させる性質があり，強磁性体で覆われた空間は磁場が遮蔽(しゃへい)される。



100 次の文中の(　　)内を選択もしくは埋めなさい。ただし，真空の誘電率，真空の透磁率，円周率をそれぞれ ε_0，μ_0，π とする。

・単独の①(電荷・磁荷)は存在するが，単独の②(電荷・磁荷)は存在しないと考えられている。

・磁場中に方位磁針を置くとき，針の③(N極・S極)が指す向きが磁場の向きである。

・鉄やニッケルのような④(常磁性・反磁性・強磁性)体を磁場中に置くと，多くの磁気双極子の向きが変わり，磁石になる。このことを⑤(　　　)という。

・真空中にある q(C)の点電荷からは⑥(　　)本の電気力線，及び q 本の⑦(　　)線が出ていると定義されており，同様に真空中にある m(Wb)の点磁荷からは⑧(　　)本の磁力線，及び m 本の⑨(　　)線が出ていると定義されている。

半径 r(m)の球の表面積は⑩(　　　)(m^2)であるので，この点電荷から r(m)離れた位置での電場の強さは $E=$⑪(　　)，(⑦)密度の大きさは $D=$⑫(　　)となるので，$D=$⑬(　　)E となる。同様に，この点磁荷から r(m)離れた位置での磁場の強さは $H=$⑭(　　)，(⑨)密度の大きさは $B=$⑮(　　)となるので，$B=$⑯(　　)H となる。

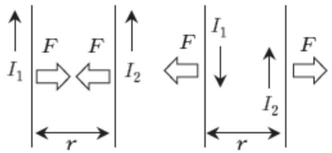
次に，この点電荷及び点磁荷がそれぞれ比誘電率 ε_r，比透磁率 μ_r の水中にある場合を考える。水の誘電率は $\varepsilon=$⑰(　　　)，透磁率は $\mu=$⑱(　　　)と表すことができるので，q(C)の点電荷からは⑲(　　)本の電気力線が，m(Wb)の点磁荷からは⑳(　　)本の磁力線が出ることになる。また，電気力線(⑰)本を束ねたものを(⑦)1本，磁力線(⑱)本を束ねたものを(⑨)1本と定義すると，点電荷からは㉑(　　)本の電束が，点磁荷からは㉒(　　)本の磁束が出ていることになる。よって，点電荷から r(m)離れた位置での電場の強さは $E'=$㉓(　　)，(⑦)密度の大きさは $D'=$㉔(　　)となるので，$D'=$㉕(　　)E' となる。同様に，点磁荷から r(m)離れた位置での磁場の強さは $H'=$㉖(　　)，(⑨)密度の大きさは $B'=$㉗(　　)となるので，$B'=$㉘(　　)H' となる。

・Wb は(⑨)の本数そのものを表しているので，(⑨)密度の大きさの単位は Wb/㉙(　　)であり，これはアルファベット1文字で㉚(　　)と定義されている。

①(　　)	②(　　)	③(　　)	④(　　)	⑤(　　)	⑥(　　)
⑦(　　)	⑧(　　)	⑨(　　)	⑩(　　)	⑪(　　)	⑫(　　)
⑬(　　)	⑭(　　)	⑮(　　)	⑯(　　)	⑰(　　)	⑱(　　)
⑲(　　)	⑳(　　)	㉑(　　)	㉒(　　)	㉓(　　)	㉔(　　)
㉕(　　)	㉖(　　)	㉗(　　)	㉘(　　)	㉙(　　)	㉚(　　)

●平行電流間にはたらく力と透磁率

長さL(m)，間隔r(m)の2本の平行導線に，それぞれI_1(A)，I_2(A)の電流が流れているとき，導線間にはたらく力Fは，I_1, I_2, Lの積に比例し，rに反比例することが実験によって知られている。その比例定数をkとすると，Fは右に示す式で表される。



$$F = k\frac{I_1 I_2}{r}L$$

この比例定数 k は電流を取り囲む空間の状況で決まる値である。真空中において，$r = L = 1$ m，$I_1 = I_2 = 1$ A にすると，はたらく力は $F \fallingdotseq 2.0\times10^{-7}$ N となる。

このことから比例定数kは$k = 2.0\times10^{-7}$と決定され，さらに比例定数kは真空の透磁率μ_0を用いて$k = \dfrac{\mu_0}{2\pi}$と定義されている。このことから$k = \dfrac{\mu_0}{2\pi} \fallingdotseq 2.0\times10^{-7}$となり，$\mu_0 \fallingdotseq 4\pi\times10^{-7}$となる。

注意1　もともとは$F = 2.0\times10^{-7}$ Nとなるような電流の強さが1Aと定義されたが，現在は1秒間に流れる電子の個数で定義されている。（導出物理基礎11章「電流の定義」参照）

注意2　$k = \dfrac{\mu_0}{2\pi}$とした理由は，他の式の形をきれいにするための都合であって，何かの法則によって導き出されたわけではない。これについては後述する。

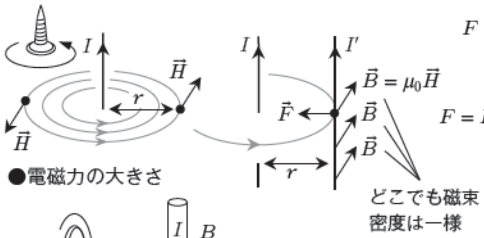
7章

●直線電流の周囲の磁場の強さ

電流のまわりにできる磁場の向きは，磁場中に置かれた方位磁針のN極が指す向きと決める。一方，大きさは次のように定義されている。

●直線電流がつくる磁場の向き

※向きは右ねじの法則に従う



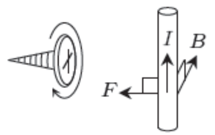
$$F = \frac{\mu_0}{2\pi}\cdot\frac{II'}{r}L$$

$$F = L\cdot I'\cdot\boxed{\mu_0\frac{I}{2\pi r}}$$

この部分をI'(A)の直線電流からr(m)離れた点の磁束密度Bの大きさと決める

$$\boxed{B = \mu_0 H = \mu_0\frac{I}{2\pi r}}$$

●電磁力の大きさ



磁束密度Bの一様な磁場中にある長さLの直線電流Iにはたらく電磁力の大きさは，$F = LIB$

●電磁力の向き

Iの向きをBの向きに回して右ねじが進む向きがFの向き

つまり磁場の強さは$H = \dfrac{I}{2\pi r}$(A/m)と定義されている。

注意　電流を用いて表される磁場の強さ H は電流の周りを取り囲む物質や空間によらない。

また，直線電流が受ける力は$F = LIB$と表すことができる。このように磁場の作用で，電流が流れている導体にはたらく力を電磁力という。（力の向きは左を参照）

※磁束密度 B の単位(本/m^2)は(T)(テスラ)と定義されている。

※磁場の大きさHの単位は定義によって(N/Wb)であるが，上記の定義では(A/m)となる。従って(N/Wb) = (A/m)と定義しなければならない。これについては後で詳しく述べる。

暗記

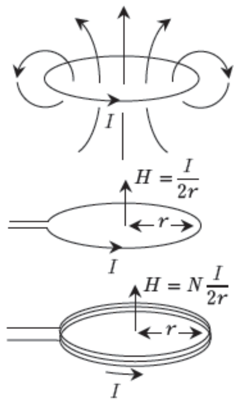
I(A)の直線電流から r(m) 離れた点での磁場の強さ：$H = \dfrac{I}{2\pi r}$(A/m)

B(T)の一様な磁場中の磁場と垂直なL(m)の直線電流にはたらく電磁力の大きさ：$F = LIB$

※Iの向きをBの向きに回して右ねじの進む向きがFの向き

●円電流がつくる磁場

半径r(m)の一巻の円形コイルにI(A)の電流を流すときの中心の磁場の強さH(A/m)，及びN巻の円形コイルにI(A)の電流を流すときの中心の磁場の強さH'(A/m)は，コイルの厚みが十分小さいとき，実験によって次のような大きさになることが確かめられている。



$$H = \frac{I}{2r}\text{(A/m)}\qquad H' = N\frac{I}{2r}\text{(A/m)}$$

暗記

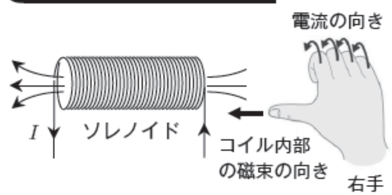
1巻きのコイルの中心の磁場の強さ：$H = \dfrac{I}{2r}$(A/m)

N巻きのコイルの中心の磁場の強さ：$H' = N\dfrac{I}{2r}$(A/m)

※コイルの厚みが十分小さいときに，近似的に成り立つ

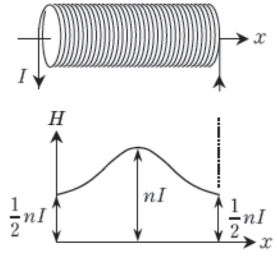
7章

●ソレノイドがつくる磁場



導線をらせん状に巻いたコイルをソレノイドという。1 m当たりの巻数がn(巻/m)のソレノイドにI(A)の電流が流れているとき，ソレノイド内部の中央付近の磁場の強さH(A/m)，及び端付近の磁場の強さH'(A/m)は，実験によって次のような大きさになることが確かめられている。

$$H = nI\text{(A/m)}\qquad H' = \frac{1}{2}nI\text{(A/m)}$$



※ソレノイド内部の磁場の強さ

暗記

ソレノイド内部の中央の磁場の強さ：$H = nI$(A/m)

ソレノイド内部の端の磁場の強さ：$H' = \dfrac{1}{2}nI$(A/m)

※n(1/m) =(巻数)÷(ソレノイドの長さ)

※コイルの厚みが十分大きいときに近似的に成り立つ

※コイルの長さが十分長いと，内部は$H = nI$(A/m)で一様とみなすことができる。

注意　2本の直線電流にはたらく力の式から，直線電流の周りの磁場の強さ$H = \dfrac{I}{2\pi r}$が自ずと決まる。これを基準とした曲線電流の周りの磁場の強さの求め方（ビオ・サバールの法則）が発見されており，それによって円電流やソレノイドの周りの磁場の強さが導出される。詳しくは大学で学習する。

101 次の文中の(　　)内を選択もしくは埋めなさい。

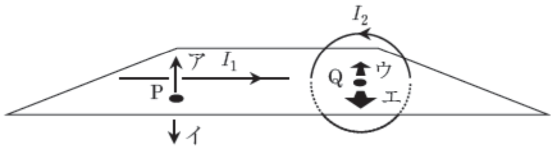
2本の平行な導線に電流を同じ向きに流すと，導線間に①(引力・斥力)がはたらき，互いに逆向きに流すと②(引力・斥力)がはたらく性質がある。この導線の単位長さ当たりにはたらく力の大きさFは，それぞれの導線に流れる電流の強さI_1, I_2の積$I_1 I_2$に比例し，導線間距離rに反比例する性質があるため，この実験を真空中で行った場合，Fは次の式で表される。

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1 I_2}{r}$$

ここで，$\frac{\mu_0}{2\pi}$は比例定数であり，μ_0を真空の③(誘電率・透磁率)と決める。真空中において，$I_1 = I_2 = 1.0$ A，$r = 1.0$ mとしてこの実験を行うと，$F \fallingdotseq 2.0 \times 10^{-7}$ Nが得られる。この結果よりμ_0を有効数字3桁で表すと，$\mu_0 \fallingdotseq$④(　　　　　)となる。

102 右の図について，次の問いに答えなさい。

(1) 平面上に流れるI_1(A)の直線電流が矢印の向きに流れているとき，この直線電流からr(m)離れた平面上の点 P の磁場の強さH(A/m)を答えなさい。また，その向きは図のア，イのどちらの向きか。



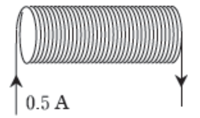
$H =$(　　　　　)(A/m)　向き：(　　　)

(2) 平面上の点 Q を中心とした半径r(m)の円形導線にI_2(A)の電流が矢印の向きに流れているとき，点 Q の磁場の強さH'(A/m)を答えなさい。また，その向きは図のウ,エのどちらの向きか。また，コイルを3巻きしたとき，点Qでの磁場の強さH''(A/m)を答えなさい。ただし，コイルの厚さは1巻きのときとほぼ変わらないものとする。

$H' =$(　　　)(A/m)　向き：(　　　)　$H'' =$(　　　)(A/m)

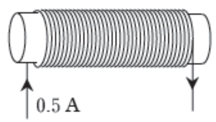
103 次の問いに答えなさい。ただし，真空の透磁率を1.3×10^{-6}とし，比透磁率は表に示す値を用いて，有効数字2桁で答えること。

(1) 200回巻いた長さ10 cmのソレノイドに0.5 Aの電流を流したとき，ソレノイド内の中心付近の磁場の強さH(A/m)と磁束密度の大きさB(T)を求めなさい。



$H =$(　　　)A/m　$B =$(　　　)T

(2) (1)のソレノイド内部に鉄の棒を隙間なく満たすとき，鉄内部の中央付近の磁場の強さH'(A/m)と磁束密度の大きさB'(T)を求めなさい。



$H' =$(　　　)A/m　$B' =$(　　　)T

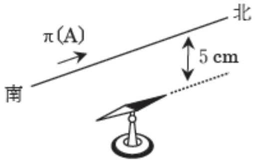
●比透磁率

真空	1.0
空気	1.0000004
水	0.999991
銅	0.999991
ｱﾙﾐﾆｳﾑ	1.00002
コバルト	250
ニッケル	600
鉄	5,000

※電場と磁場に関する定義について，次の空欄を埋めなさい。※答えはp79を参照

電場に関する式		磁場に関する式	
電気量	q(　　)	磁気量	m(　　)
電場	$\vec{E}$ (N/　)	磁場	$\vec{H}$ (N/　)
静電気力	$\vec{F} =$	磁気力	$\vec{F} =$
真空中の誘電率	ε_0	真空中の透磁率	μ_0
比誘電率	ε_r	比透磁率	μ_r
誘電率	$\varepsilon =$	透磁率	$\mu =$
電束密度	$\vec{D} =$	磁束密度	$\vec{B} =$

例題 1 地磁気を受けて静止している小磁針の真上 5 cm の位置に，磁針の方向と平行に導線を張る。この導線に，図のように π(A)の電流を流す。このとき，次の問いに答えなさい。



(1) 導線を流れる電流が小磁針の位置につくる磁場の強さは 何 A/m か。

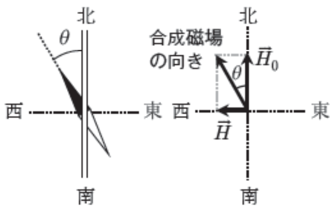
$$\frac{I}{2\pi r}=\frac{\pi}{2\pi\times5\times10^{-2}}=\frac{1}{10^{-1}}=\mathbf{10\ A/m}\ \cdots(\text{答})$$

(2) 小磁針の初めの方向からの振れ角を θ として，地球磁場の水平成分の大きさ H_0(A/m)を，θ を用いて表しなさい。

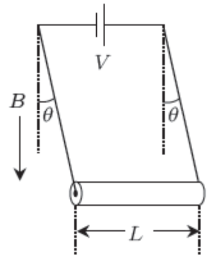
地球磁場の水平成分 $\vec{H}_0$ と電流が小磁針の位置につくる磁場 $\vec{H}$ の合成磁場の向きに針が振れる。

よって右図より，$\tan\theta=\dfrac{|\vec{H}|}{|\vec{H}_0|}$ となり，

$|\vec{H}|=10$ なので，$\vec{H}_0=\dfrac{|\vec{H}|}{\tan\theta}=\dfrac{\mathbf{10}}{\mathbf{\tan\theta}}$ …(答)



例題 2 図のように質量 m(kg)，長さ L(m)，電気抵抗 r(Ω)の金属棒を細い導線でつるし，導線間に内部抵抗の無視できる電池を接続し，さらに鉛直下向きに磁束密度 B(T)の一様な磁場をかけると，導線と鉛直方向が θ(rad)をなして金属棒が静止した。重力加速度の大きさを g(m/s²)として，導線の質量と電気抵抗及び地磁気の影響は無視できるものとして，電池の起電力の大きさ V(V)を求めなさい。



抵抗に流れる電流を I とすると，オームの法則より，

$V=Ir$ よって，$I=\dfrac{V}{r}$ …①

右図のように，I(A)の電流が流れる金属棒は磁場の作用によって LIB(N)の電磁力をうける。導線の張力を T(N)とすると，金属棒にはたらく力のつり合いの式は，

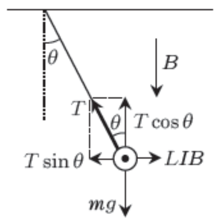
水平方向：$T\sin\theta=LIB$ …②

鉛直方向：$T\cos\theta=mg$ …③　②,③の辺々を割ると，

$\tan\theta=\dfrac{LIB}{mg}$　さらに①より，I を消去すると，

$\tan\theta=\dfrac{LB}{mg}\cdot\dfrac{V}{r}=\dfrac{BLV}{mgr}$

これを V について解くと，$V=\dfrac{\mathbf{mgr\tan\theta}}{\mathbf{BL}}$ …(答)



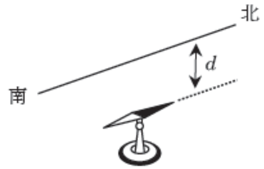
※電磁力の向きは電流を磁場の向きに回し，右ねじが進む向き

※磁場や電流の向きを表す記号を覚えておこう。

⊙ は紙面に垂直で紙面裏から表向き ⊗ は紙面に垂直で紙面表から裏向き

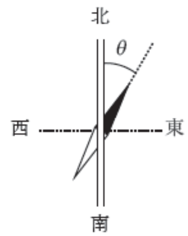
7章

104 図のように地磁気を受けて静止している小磁針の真上 d(m)の位置に，針の方向と平行に導線を張る。この導線に I(A)の電流を流すと，小磁針は東に角度 θ だけ振れて止まった。以下の問いに答えなさい。



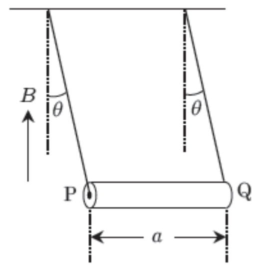
(1) 導線に流れる電流が方位磁針の位置につくる磁場の強さを求めなさい。　(　　　　　　)(A/m)

(2) 導線に流した電流の向きは，南北どちらの向きか。　(　　)向き



(3) 小磁針を置いた場所での，地球磁場の水平成分の大きさを求めなさい。　(　　　　　　)(A/m)

105 質量 m(kg)，長さ a(m)の金属棒 PQ を，長さの等しい糸で図のようにつるし，鉛直上向きに磁束密度 B(T)の一様な磁場をかける。次に，図の PQ 間に電圧をかけて電流を流すと，糸は鉛直方向と角度 θ(rad)をなして静止した。重力加速度の大きさを g(m/s²)，糸の質量及び地磁気の影響を無視できるものとして，次の問いに答えなさい。

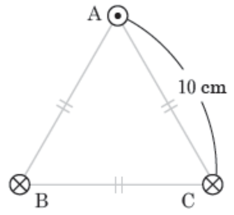


(1) 金属棒 PQ に流した電流の向きは，P→Q，Q→P のどちらか。　(　→　)

(2) 金属棒 PQ に流れる電流 I(A)を m, g, B, a, θ を用いて表しなさい。　(　　　　　　)(A)

7章

例題 3　真空中に 3 本の長い直線の導線 A, B, C を図のように 1 辺 10 cm の正三角形の頂点に紙面と垂直に置く。B と C に紙面の表から裏の向きに，A には反対の向きにいずれも 3.0 A の電流を流す。真空の透磁率を $4\pi\times10^{-7}$(N/A^2)として，次の問いに答えなさい。

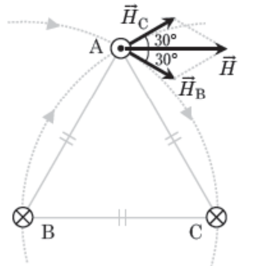


(1) B, C の電流が，A の位置につくる磁場 $\vec{H}$ の強さはいくらか。また，その向きを図に書き込みなさい。

B の電流が A に作る磁場を $\vec{H}_B$ とすると，AB ⊥ $\vec{H}_B$

C の電流が A に作る磁場を $\vec{H}_C$ とすると，AC ⊥ $\vec{H}_C$

また，$|\vec{H}_B| = |\vec{H}_C| = \dfrac{I}{2\pi r} = \dfrac{3.0}{2\pi\times0.1} = \dfrac{15}{\pi}$ であるので，右ねじの法則により，合成磁場 $\vec{H}$ の向きは図に示す向きで，$|\vec{H}| = 2\times\dfrac{15}{\pi}\times\cos30° = \dfrac{15\sqrt{3}}{\pi} \fallingdotseq$ **8.3 A/m** …(答)



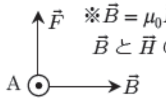
(2) 導線 A の長さ 0.50 m の部分が受ける力の大きさはいくらか。また，その向きを図に書き込みなさい。

A での磁束密度を B(T)，A の電流が受ける力(電磁力)を F(N)とすると，電磁力の向きは右図のようになる。

$B = \mu_0|\vec{H}| = 4\pi\times10^{-7}\times\dfrac{15\sqrt{3}}{\pi} = 60\sqrt{3}\times10^{-7}$ より，

$F = LIB = 0.50\times3.0\times60\sqrt{3}\times10^{-7}$

$= 90\sqrt{3}\times10^{-7} \fallingdotseq$ **1.6×10^{-5} N** …(答)



※$\vec{B} = \mu_0\vec{H}$ より，$\vec{B}$ と $\vec{H}$ の向きは同じ

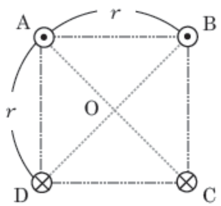
106　図のように，1 辺が r(m)の正方形の頂点に，十分長い 4 本の平行導線 A,B,C,D を紙面と垂直に張り，それぞれに I(A)の電流を図に示す向きに流すとき，次の問いに答えなさい。

（⊙は紙面裏から表向き，⊗は紙面表から裏向きを表す）

(1) 4 本の導線が点 O につくる合成磁場の強さ H(A/m)を求めなさい。また，その向きを図 1 に示しなさい。

(　　　　　　)(A/m)

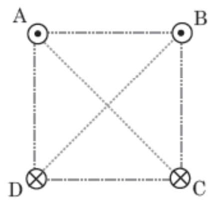
図 1



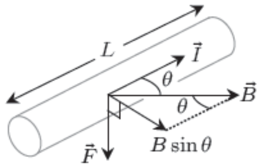
(2) 点 O に 4 本の導線と平行に導線を張り，紙面表から裏に I_0(A)の電流を流した。この導線の長さ l(m)の部分が受ける力 F の大きさを求め，その力の向きを図 2 に示しなさい。ただし，空気の透磁率を μ_0 とする。

(　　　　　　)(N)

図 2



●磁場の向きと電流の向きが垂直でない場合の電磁力



一般に，図のように磁束密度 $\vec{B}$ と電流 $\vec{I}$ の向きとの成す角を θ (0° ≦ θ ≦ 180°) とすると，電流と垂直な向きの磁束密度の大きさは $B\sin\theta$ であるので，長さ L の導体にはたらく電磁力の大きさは，

$$F = LIB\sin\theta$$

!注意　外積 $\vec{a}\times\vec{b}$ の大きさは

$|\vec{a}\times\vec{b}| = |\vec{a}||\vec{b}|\sin\theta$

※外積については上巻 1 章を参照

※ θ は鋭角でも鈍角でも定義式（公式）は変わらない

暗記

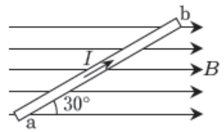
電磁力の大きさ：$F = LIB\sin\theta$　(0° ≦ θ ≦ 180°)

外積による表現：$\vec{F} = L\vec{I}\times\vec{B}$

※θ は $\vec{I}$（電流）と $\vec{B}$（磁束密度）の成す角

※$\vec{F}$ の向きは $\vec{I}$ と $\vec{B}$ の始点をそろえ，始点を軸に $\vec{I}$ を $\vec{B}$ と重なるように回したとき，右ねじが進む向き

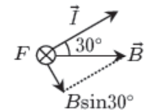
例題 4　磁束密度 5.0 T の一様な磁場中に，磁場との成す角が 30° となるように，0.30 m の直線導線 ab を置く。2.0 A の電流が a→b の向きに流れているとき，導線 ab が受ける力 F(N)の大きさと向きを求めなさい。



電流と磁場との成す角が 30°であるので，

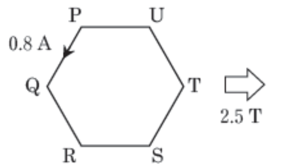
$F = LIB\sin30° = 0.30\times2.0\times5.0\times\dfrac{1}{2} =$ **1.5 N** …(答)

右図において，$\vec{I}$ を $\vec{B}$ と重なるように回したとき，右ねじが進む向きが電磁力の向きなので，紙面表から裏向き…(答)



!注意　電流と磁場の成す角は，必ず電流の向きと磁場の向きの成す角をとること

107　図のように 1 辺が 0.20 m の正六角形のコイル PQRSTU に 0.80 A の電流を P→Q の向きに流し，$\overline{\mathrm{PU}}$ の向きに 2.5 T の一様な磁場をかけた。各辺がこの一様な磁場から受ける電磁力の大きさと，その向きを答えなさい。ただし，向きは次のア～オから選び，$\sqrt{3} = 1.73$ として，有効数字は 2 桁で答えること。

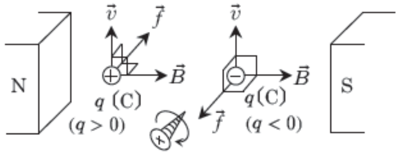


ア．紙面裏から表向き　イ．紙面表から裏向き　ウ．$\overline{\mathrm{PR}}$ の向き　エ．$\overline{\mathrm{SU}}$ の向き　オ．向きなし

	PQ	QR	RS	ST	TU	UP
向き						
大きさ(N)						

7章

●ローレンツ力

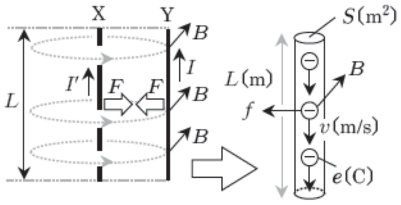


磁場中で点電荷に初速を与えると，点電荷は直進せず曲がってしまう。これは磁場の影響によって点電荷にローレンツ力と呼ばれる力が作用するからである。磁束密度がB(T)の一様な磁場中において，q(C)の点電荷が速さv(m/s)で磁場と垂直に移動しているとき，その力の大きさは$f=|q|vB$(N)であり，向きは，正電荷の場合，点電荷の速度$\vec{v}$の向きを磁場$\vec{B}$の向きに回して右ねじの進む向きである。（負電荷の場合はその逆向き）

ローレンツ力の大きさ：$f=|q|vB$
外積による表現：$\vec{f}=q\vec{v}\times\vec{B}$
●ローレンツ力の向き
$q>0$のときは，$\vec{v}$と$\vec{B}$の始点をそろえ，始点を軸に$\vec{v}$を$\vec{B}$と重なるように回したとき，右ねじが進む向き
$q<0$のときは，その逆向き

ここで導線中の自由電子にはたらくローレンツ力の大きさを導出してみる。

右図のように，長さL(m)，断面積S(m^2)の2本の一様な平行導線 X，Y に，それぞれI'(A)，I(A)の電流が同じ向きに流れているとする。導線どうしが互いに引き合う力の大きさをF(N)，自由電子の電荷をe(C)，Y 中の自由電子の平均の速さをv(m/s)，X を流れる電流が作る磁場の，Y 上での磁束密度の大きさをB(T)とする。

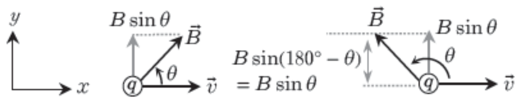


2本の導線が平行であれば電流I'が電流I上につくる磁束密度Bはどこでも等しい

さらに導線の単位体積（1 m^3）当たりの自由電子の個数をnとすると，L(m)の導線には，n(個/m^3)$\times SL$(m^3)$=nSL$(個)の自由電子が含まれる。よって自由電子1個にはたらくローレンツ力の大きさは$f=\dfrac{F}{nSL}$(N)…①　と考えられる。一方，導線どうしが互いに引き合う力の大きさ（電磁力の大きさ）は$F=LIB$（p82参照）と表され，公式$I=enSv$（p44参照）によってIを消去すると，$F=LenSvB$　…②　が得られる。この②式を①式に代入すると，$f=\dfrac{LenSvB}{nSL}=evB$となり，$e$を$q$に置き換えれば，ローレンツ力の公式が得られる。

次に点電荷の速度$\vec{v}$と磁束密度$\vec{B}$の成す角がθ $(0°\leqq\theta\leqq180°)$である場合を考えてみる。下図のように$\vec{v}$と$\vec{B}$がxy平面上にあり，これらの成す角をθとすると，θが鋭角でも鈍角でも$\vec{B}$のy成分の大きさは$B\sin\theta$であるので，$f=qvB\sin\theta$となる。また$\vec{f}$の向きは，$q>0$では，$\vec{v}$を$\vec{B}$と重なるように回して右ねじが進む向きであることも変わらない。

!注意　$\vec{v}$と$\vec{B}$の成す角θは必ず180°以下になるようにとること



$q>0$なら$\vec{f}$は紙面裏から表向き
$q<0$なら$\vec{f}$は紙面表から裏向き

暗記
ローレンツ力の大きさ：$f=|q|vB\sin\theta$　$(0°\leqq\theta\leqq180°)$　外積による表現：$\vec{f}=q\vec{v}\times\vec{B}$
※$\vec{f}$は$q>0$なら，$\vec{v}$を$\vec{B}$と重なるように回して右ねじが進む向き，$q<0$ならその逆向き
※θは$\vec{v}$（電荷の速度）と$\vec{B}$（磁束密度）との成す角　※外積については上巻1章を参照

●荷電粒子の運動

図1

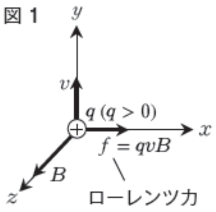


図2

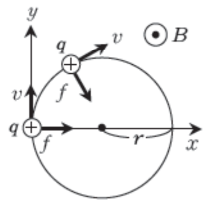


図1のように，z軸の正の向きに磁束密度B(T)の一様な磁場があるxyz空間において，重力の影響が無視できる荷電粒子を原点からy軸の正の向きに発射させると，図2のように荷電粒子はxy平面上を等速円運動する。その理由を考えてみよう。

荷電粒子の質量をm(kg)，電荷をq(C)$(q>0)$，初速をv(m/s)とする。ローレンツ力は速度と常に垂直な向きにはたらくため，荷電粒子に対して仕事をしない。よって荷電粒子は一定の速さで運動すると考えられる。ここで荷電粒子が半径r(m)の円軌道をとると仮定すると，円の中心方向の運動方程式は，ローレンツ力を向心力として，次のように表される。

$$\text{円の中心方向の運動方程式：}m\frac{v^2}{r}=qvB$$

これをrについて解くと$r=\dfrac{mv}{qB}$となり，vが一定ならばrは常に一定となり，円軌道をとることに矛盾しない。

以上のことから，荷電粒子は等速円運動をすることになる。この運動の周期（1周するのにかかる時間）をT(s)とすると，

$T=$(1周の距離)÷(速さ)で求められるので，$T=\dfrac{2\pi r}{v}$なる。

この式に$r=\dfrac{mv}{qB}$を代入すると，$T=\dfrac{2\pi m}{qB}$となり，**周期は速さや軌道半径によらず一定**であることになる。

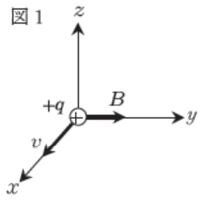
108　次の空欄を埋めなさい。

磁束密度がB(Wb/m^2)の一様な磁場中に，磁場の向きと垂直に直線状の導線があり，その導線にI(A)の電流が流れている。導線のl(m)の部分が磁場から受ける力をF(N)とすると，$F=$(　ア　)(N)…①　である。また，導線中にはq(C)の荷電粒子が個数密度n(個/m^3)で存在し，その平均の速さをv(m/s)とすると，S(m^2)の導線断面を単位時間(1秒)に通過する荷電粒子の数は(　イ　)個である。従って，$I=$(　ウ　)(A)…②　となり，②式を①式に代入すると，$F=$(　エ　)(N)…③　となる。この導線l(m)には(　オ　)個の荷電粒子が含まれるので，③式より，荷電粒子1個が受ける力は，$f=$(　カ　)(N)となる。

ア.(　　　)　イ.(　　　)　ウ.(　　　)　エ.(　　　)　オ.(　　　)　カ.(　　　)

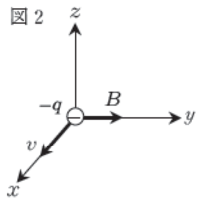
109　次の図1～4のそれぞれの場合について，原点Oにある$+q$(C)の正電荷，$-q$(C)の負電荷が磁場から受けるローレンツ力の大きさf(N)と向きを求めなさい。ただし，B(T)は磁束密度の大きさ，v(m/s)は電荷の速さを表すものとする。

図1



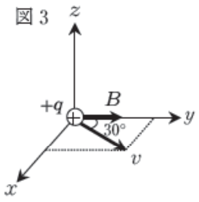
$f=$(　　　　)(N)
向き：($x\cdot y\cdot z$)の(正・負)の向き

図2



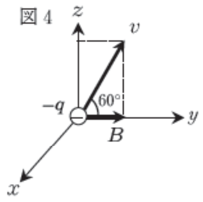
$f=$(　　　　)(N)
向き：($x\cdot y\cdot z$)の(正・負)の向き

図3



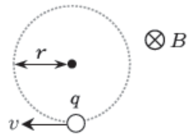
$f=$(　　　　)(N)
向き：($x\cdot y\cdot z$)の(正・負)の向き

図4



$f=$(　　　　)(N)
向き：($x\cdot y\cdot z$)の(正・負)の向き

110 図のように，磁束密度がB(T)の一様な磁場中に，質量m(kg)，電荷q(C)の荷電粒子が，磁場に垂直に初速v(m/s)で打ち出されると，荷電粒子は半径r(m)の等速円運動をした。磁場の向きは紙面表から裏向きであるとき，次の問いに答えなさい。



(1) 荷電粒子が図に示す向きに運動をしているとき，qは正，負どちらか。(　　　)

(2) 荷電粒子の円軌道の中心方向の運動方程式を立てなさい。(　　　　　　)

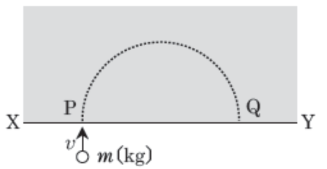
(3) 円軌道の半径rをB, q, m, vを用いて表しなさい。　$r=$(　　　　　　)(m)

(4) 荷電粒子が円軌道を1周するのにかかる時間T(s)をB, q, mと円周率πのみを用いて表しなさい。　$T=$(　　　　　)(s)

(5) 等速円運動の速さがn倍になると，(3)の半径rと(4)の1周する時間Tはそれぞれ何倍になるか。　r：(　　　)倍　T：(　　　)倍

7章

111 図の直線XYより上側には，紙面と垂直にB(T)の一様な磁場がかけられている。質量がm(kg)でq(C)($q>0$)の電荷を持つ荷電粒子Aが，直線XYに垂直に速さv(m/s)で，XY上の点Pから入射し，XY上の点Qに達した。次の問いに答えなさい。



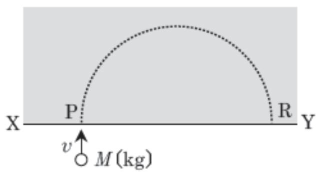
(1) 磁場の向きは紙面の表から裏向き，裏から表向きのどちらか。

紙面の(　　　から　　　)向き

(2) PQの距離を求めなさい。

(　　　　　)(m)

次に，質量M(kg)で電荷の大きさがq(C)の荷電粒子Bに変えて，XYに垂直に速さv(m/s)で点Pから入射させたところ，荷電粒子はXY上の点Rに達した。

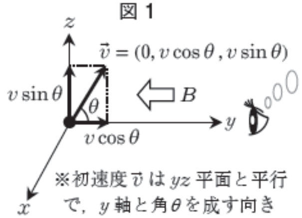


(3) PRはPQの何倍になるか。(　　　　)倍

(4) 荷電粒子Aが点Pから点Qに達するまでの時間をt_1(s)，荷電粒子Bが点Pから点Rに達するまでの時間をt_2(s)とするとき，t_2はt_1の何倍か。　(　　　　)倍

●粒子のらせん運動

図1



※初速度$\vec{v}$はyz平面と平行で，y軸と角θを成す向き

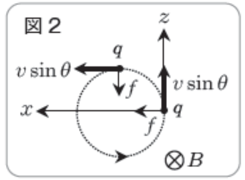


図3

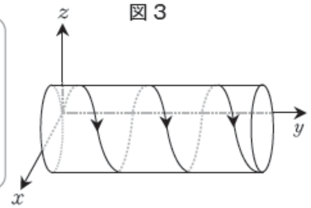


図1のように，y軸の負の向きに磁束密度B(T)の一様な磁場がかけられているxyz空間において，q(C)($q>0$)の荷電粒子を原点から図に示す方向に初速v(m/s)で発射させたとき，荷電粒子はどのような運動をするか考えてみよう。

まず，粒子の初速度のy成分は$v\cos\theta$であるが，y軸と磁束密度Bは平行であるため，粒子にはたらくローレンツ力のy成分は$f_y=q(v\cos\theta)B\sin 180°=0$となる。よって，粒子の速度の$y$成分は一定を保つことになる。

次にxz平面への射影を考えてみる。粒子の初速度のz成分は$v\sin\theta$であるが，z軸と磁束密度Bは互いに垂直であるため，図2のようにローレンツ力fがはたらき，射影は速さ$v\sin\theta$で等速円運動をする。

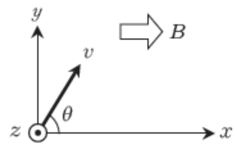
以上のことから荷電粒子は図3に示すような**らせん運動**をする。

なお，図2の射影運動における軌道円中心方向の運動方程式は次のように表すことができる。

$$m\frac{(v\sin\theta)^2}{r}=q(v\sin\theta)B$$

7章

112 図のように，紙面右向きにx軸，上向きにy軸，紙面裏から表向きにz軸をとり，x軸の正の向きにB(T)の一様な磁場をかける。原点Oから，質量m(kg)，電荷$-e$(C)の電子を，xy平面上でx軸と角度θの方向に，速さv(m/s)で運動させた。重力の影響は無視できるものとして，次の問いに答えなさい。



(1) 電子が原点を出発するときの速度の成分を求めなさい。(　　，　　，　　)

(2) この電子の運動のyz平面への射影はどのような運動か。(　　　　　　)

(3) 電子が最初にx軸を横切るまでにかかる時間を求めなさい。(　　　　　)s

(4) 電子が最初にx軸を横切るときのx座標を求めなさい。(　　　　　)

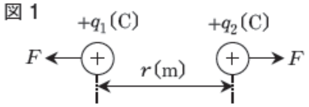
●磁極の強さの定義と磁気に関するクーロンの法則

クーロンは図１に示す静電気力についての法則に加え，図２のような磁気力についての法則も見出した。

長い磁石であれば他方の磁極の影響が小さくなり，磁極は近似的に単独の点磁荷とみなすことができる。その 2 つの長い棒磁石を用いて 2 極間にはたらく力の大きさを調べると，その力は 2 極間距離の 2 乗に反比例した。ところが磁荷の大きさは定義されていなかったため，クーロンが行った実験から，電荷に対応する磁荷の単位を Wb と決め，２つの点磁荷の間にはたらく力の大きさが，２つの磁荷の積に比例するように磁荷の大きさが定義された。具体的には図２のように，長い磁石の磁極の強さを m_1(Wb)，m_2(Wb)，2 極間の距離を r(m)，2 極間にはたらく磁気力を F(N)，真空の透磁率を μ_0 とすると，磁気力の大きさは，

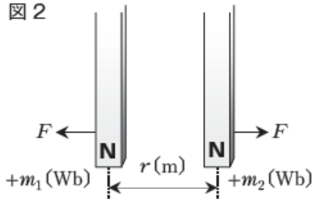
$F = \dfrac{1}{4\pi\mu_0}\cdot\dfrac{m_1 m_2}{r^2}$ …①　と定義し，磁荷の大きさはこの式を満たすように定義されている。

図１



静電気力：$F = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\dfrac{q_1 q_2}{r^2}$

図２



磁気力：$F = \dfrac{1}{4\pi\mu_0}\cdot\dfrac{m_1 m_2}{r^2}$

N 極の磁極の強さ＞0
S 極の磁極の強さ＜0
と決める

7章

※①は静電気力 $F = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\dfrac{q_1 q_2}{r^2}$ と対称性がある。

透磁率は $\mu_0 \fallingdotseq 4\pi\times10^{-7}$ (p82 参照)であるので，$\dfrac{1}{4\pi\mu_0} \fallingdotseq \dfrac{10^7}{(4\pi)^2} \fallingdotseq 6.33\times10^4$ となり，

$m_1 = m_2 = 1$ Wb, $r = 1$ m のとき，$F \fallingdotseq 6.33\times10^4$ N となる。つまり，2 つの等しい磁極を 1 m 離して置き，はたらく磁気力が 6.33×10^4 N であるような磁極の強さ(磁気量)を+1 Wb と決めることができる。①式を**磁気力に関するクーロンの法則**といい，単独では存在しない磁荷の大きさは①式が成り立つように定義されていることを理解しよう。

暗記

静電気力に関するクーロンの法則：$F = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\dfrac{q_1 q_2}{r^2}$

磁気力に関するクーロンの法則：$F = \dfrac{1}{4\pi\mu_0}\cdot\dfrac{m_1 m_2}{r^2}$

さて，２つの点磁荷 m, m' の間にはたらく磁気力 F を次のように変形してみる。

$$F = \frac{1}{4\pi\mu_0}\cdot\frac{mm'}{r^2} = m'\left(\frac{m}{4\pi\mu_0 r^2}\right) = m'H \qquad ただし，H = \frac{m}{4\pi\mu_0 r^2}\ \text{(N/Wb)}\ \cdots②$$

②は m(Wb)の点磁荷から r(m)離れた位置の磁場の強さを表す。

※ $\dfrac{m}{\mu_0}$ は m(Wb)の点磁荷が出す磁力線の本数で，$4\pi r^2$ は点磁荷を取り囲む半径 r の球体の表面積と考えると，②はその球面 1 m² 当たりを貫く磁力線の本数を表している。

★単位の整合性と光の伝播速度

m(Wb)の磁荷から m 本の磁束線が出ると決めたので，Wb は磁束の本数そのものを表している。つまり，(Wb) = (本)と考えることができる。よって，磁束密度の単位は，

$$(本/\text{m}^2) = (\text{Wb/m}^2) = (\text{T})$$

同様に C は電束の本数を表し，(C) = (本)であるので，電束密度の単位は，

$$(本/\text{m}^2) = (\text{C/m}^2)$$

真空中における電束密度を D(C/m²)と磁束密度を B(Wb/m²)とすると，

$D = \varepsilon_0 E$　(E：電場の強さ，ε_0：真空の誘電率) より，$\varepsilon_0 = \dfrac{D\,(\text{C/m}^2)}{E\,(\text{N/C})} = \dfrac{D}{E}\,(\text{C}^2/\text{N·m}^2)$

$B = \mu_0 H$ (H：磁場の強さ，μ_0：真空の透磁率) より，$\mu_0 = \dfrac{B\,(\text{Wb/m}^2)}{H\,(\text{N/Wb})} = \dfrac{B}{H}\,(\text{Wb}^2/\text{N·m}^2)$

※クーロンの法則から誘電率と透磁率の単位を調べても同じ結果になるので確かめてみよう！

ここで誘電率と透磁率の積の単位を調べると，$\varepsilon_0\mu_0$：$\left[\dfrac{\text{C}^2}{\text{N·m}^2}\cdot\dfrac{\text{Wb}^2}{\text{N·m}^2}\right] = \left[\dfrac{\text{C}^2\text{·Wb}^2}{\text{N}^2\text{·m}^4}\right]$

となり，この平方根の逆数 $\dfrac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}$ の単位は，$\left[\dfrac{\text{N·m}^2}{\text{C·Wb}}\right]$ …①となる。一方，直線電流のまわりにできる磁場の強さは，$H = \dfrac{I}{2\pi r}$(A/m)…② と定義され，この定義と磁荷の想定によって，

磁気力は $F = mH$ と表され，磁場の強さは，$H = \dfrac{F}{m}$ (N/Wb)…③ と表される。

7章

②,③はどちらも磁場の強さであるので，必然的に(N/Wb) = (A/m)となり，これを Wb について解くと，(Wb) = (N·m/A) さらに(A) = (C/s)であるので，(Wb) = $\left[\dfrac{\text{N·m}}{\text{C/s}}\right]$ = ((N·m·s)/C)となる。これを①に代入すると，$\dfrac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}$ の単位は，

$$\left[\frac{\text{N·m}^2}{\text{C·Wb}}\right] = \left[\frac{\text{N·m}^2}{\text{C·(N·m·s)/C}}\right] = (\text{m/s})$$

これは速さの単位と一致する。誘電率は静電気力に関するクーロンの法則の実験(p8 参照)によって $\varepsilon_0 \fallingdotseq 8.85\times10^{-12}$ と求められ，2 本の直線電流の間にはたらく力を調べる実験(p82 参照)によって $\mu_0 \fallingdotseq 4\pi\times10^{-7} \fallingdotseq 12.6\times10^{-7}$ と求められるので，

$$\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{8.85\times10^{-12}\times12.6\times10^{-7}}} = 2.99\times10^8\ \text{m/s}\ \cdots④$$

これは真空中における光（電磁波）の速さを表している。p82 の 2 本の直線電流の間にはたらく力の大きさ $F = k\dfrac{I_1 I_2}{r}L$ の比例定数 k は $k = \dfrac{\mu_0}{2\pi}$ と定義されているが，仮に $k = \mu_0$ と定義して，「④式＝真空中の光の速さ」とするなら，④式の中に π が入ってしまい，きれいな形にならない。

つまり，$k = \dfrac{\mu_0}{2\pi}$ という定義は，他の式をきれいにするためなど，対称性や便利さを追求するために決められた定義に過ぎないことを理解しよう。

暗記

真空中を伝わる光（電磁波）の伝播速度：$c = \dfrac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}$　　ε_0：真空の誘電率　μ_0：真空の透磁率

●半導体　半導体とは導体と不導体の中間の抵抗率を示す物質である。Si（シリコン／ケイ素）や Ge（ゲルマニウム）の結晶のように，単体からなる半導体を**真性半導体**という。この真性半導体に P（リン）や Al（アルミニウム）などを少量加えると，抵抗率が 1000 分の 1〜10000 分の 1 程度になって電流が流れやすくなるほか，さまざまな性質を示す。このような半導体を**不純物半導体**という。

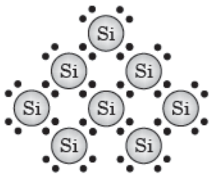
●キャリアとは　半導体内部を自由に移動して電荷を運ぶものを**キャリア**という。キャリアには**電子**と**ホール（正孔）**の 2 つが存在する。ホールとはいわば電子の空席部分で，この空席が次々に移動することで，その挙動はあたかも，正の電荷をもつ粒子が移動しているとみなすことができる。

●価電子とは　原子核における電子軌道のうち，最も外側の軌道（最外殻）をまわる電子の数を**価電子**という。最外殻に最大数の電子が入っているときを**閉殻**といい，その場合，価電子＝0 と定義されている。このような原子は，He（ヘリウム），Ne（ネオン），Ar（アルゴン）などがあり，化学的には特に安定で，自然の状態では他の原子と結びつくことはない。

価電子							
1	2	3	4	5	6	7	0
$_1$H							$_2$He
$_3$Li	$_4$Be	$_5$B	$_6$C	$_7$N	$_8$O	$_9$F	$_{10}$Ne
$_{11}$Na	$_{12}$Mg	$_{13}$Al	$_{14}$Si	$_{15}$P	$_{16}$S	$_{17}$Cl	$_{18}$Ar

●半導体の共有結合

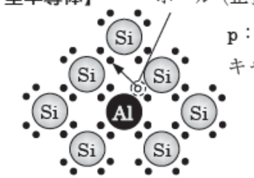
原子同士が電子を共有して安定した状態になっているとき，その原子同士の結合を**共有結合**という。価電子数が 4 である Si（シリコン）の結晶は共有結合によって成り立っている。図のように，電子を共有することで，1 つの原子の最外殻に 8 個の電子が配置され，安定した状態を保っている。なお，半導体の場合，光や熱によって結合部分が切れやすく，その結合部分の電子が自由電子のようにはたらくため，温度が上がるほど抵抗率が下がる（電流が流れやすくなる）性質がある。



※原子の最外殻に最大数の電子が入っている状態を**閉殻**という。

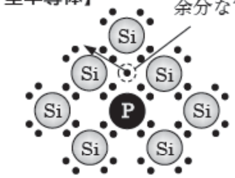
●p 型半導体と n 型半導体

【p 型半導体】



p：positive
キャリア：ホール

【n 型半導体】

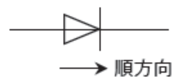


n：negative
キャリア：電子

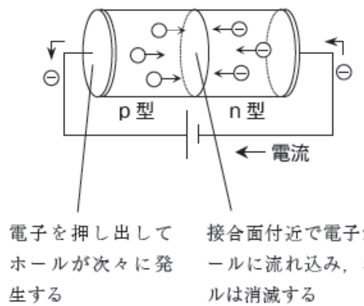
図のように，Si（シリコン）の結晶に価電子数が 3 の Al（アルミニウム）原子が入ると，1 個の電子が不足して，電子の空席部分（ホール）ができる。この空席部分に隣の電子が次々に移っていくことで，電荷を運ぶ。結果として，見かけ上このホールが正電荷をもつ粒子のように結晶内を動き回り，キャリアとなる。このように，キャリアがホール（正孔）となる半導体を **p 型半導体**という。また，価電子数が 5 の P（リン）原子が入ると，1 個の電子が余分になる。この電子が結晶内部で動き回り，**キャリア**となる。このように電子がキャリアとなる半導体を **n 型半導体**という。

●pn 接合　p 型半導体と n 型半導体を接合することを **pn 接合**といい，pn 接合によってできる半導体を**ダイオード**という。ダイオードには**整流作用**（電流を一方向にだけよく流すはたらき）があり，交流電流を直流にする整流回路などに利用されている。

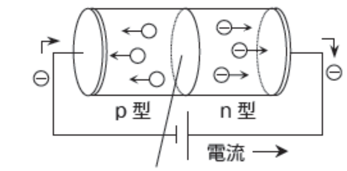
ダイオードの記号



p→n(順方向)は電流がよく流れる



n→p(逆方向)は電流がほとんど流れない



中央付近は空乏層といい，ホールや過剰な電子がない層。電子のほとんどは原子間を結びつける共有結合に使われているため，電子は動きにくく，接合面付近では p 側で電子を押し出し，ホールを作っていくことが困難。

113 次の問いに答えなさい。

(1) (Wb)は何の本数を表しているか。（　　　）

(2) (T)は何の単位を表しているか。（　　　）

(3) (T)を Wb ともう 1 つの単位で表しなさい。（　　　）

(4) 磁場の強さの単位を，A ともう 1 つの単位で表しなさい。（　　　）

(5) 磁場の強さの単位を Wb と N を用いて表しなさい。（　　　）

(6) (4),(5)より，(Wb)を N, A, m を用いて表しなさい。（　　　）

(7) 磁極の強さが等しい 2 つの棒磁石の N 極と S 極を真空中で 4.0×10^{-2} m 離して置いたら，6.33×10^{2} N の力を及ぼし合っていた。この磁極の強さは何 Wb か。ただし，磁気力に関するクーロンの法則の比例定数は 6.33×10^{4} N·m^2/Wb^2 とし，棒磁石は非常に長いものとする。
（　　　　）Wb

(8) (7)の磁気力に関するクーロンの法則の比例定数は，真空の透磁率 μ_0 と円周率 π を用いてどのように定義されているか。（　　　）

(9) 真空中の光の伝播速度を真空の誘電率 ε_0，真空の透磁率 μ_0を用いて表しなさい。（　　　）

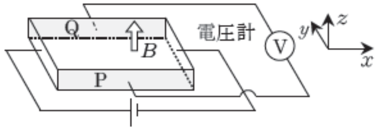
(10) p 型，n 型の半導体のキャリアはそれぞれ何であるか。 p 型：（　　　） n 型：（　　　）

(11) pn 接合されたダイオードの順方向は p→n，n→p のどちらか。（　　→　　）

●ホール効果

電流が流れている物体に対し，電流に垂直に磁場をかけると，電流と磁場の両方に直交する向きに起電力が発生する。この現象はアメリカの物理学者エドウィン・ホールによって発見されたことから，ホール効果と呼ばれ，半導体の電気的特性を調べるときなどに応用されている。

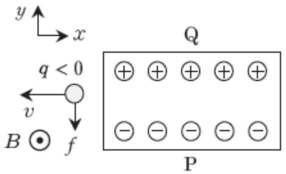
例題 5 図のような直方体の固体に電流を x 軸の正の向きに流し，z 軸の正の向きに磁束密度 B(T)の一様な磁場を加える。次の問いに答えなさい。



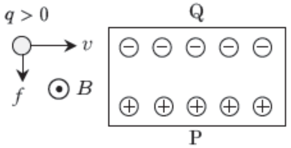
(1) 固体中を速さ v(m/s)で移動する q(C)の荷電粒子が，磁場から受ける力の大きさ F(N)を求めなさい。ただし，q は正負が不明であるため，$|q|$ を用いること。

荷電粒子にはローレンツ力がはたらくので，$F = |q|vB$ …(答)

(2) 電子は力 F の向きに移動し，側面の一方に集まり，電場が発生する。この電場によって，PQ 間に電位差が生じる。PQ 間を電圧計で測定すると，P の方が高電位であった。(1)の q は正負どちらといえるか。

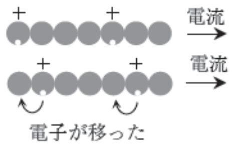


仮に $q < 0$ とすると，荷電粒子は固体内部にできる電場によって，x 軸の負の向きに静電気力を受けて移動する。このときローレンツ力は y 軸の負の向きとなり，P 側に負の電荷が集まる。すると Q 側の方が P 側よりも電位が高くなるので矛盾する。

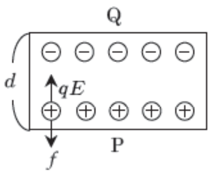


$q > 0$ とすると，荷電粒子は固体内部にできる電場によって，x 軸の正の向きに静電気力を受けて移動する。このときローレンツ力は y 軸の負の向きとなり，P 側に正の電荷が集まる。すると P 側の方が Q 側よりも電位が高くなるので結果に合う。よって <u>q は正である</u>といえる。

重要 n 型半導体はキャリアが電子，p 型半導体はキャリアがホール(正孔)であるため，上記の固体は p 型半導体であると予想される。右図のように，ホールのそばの原子は正の電荷を帯びており，ホールが移動すると，**あたかも正の電荷が電流の向きに移動しているように見える。**

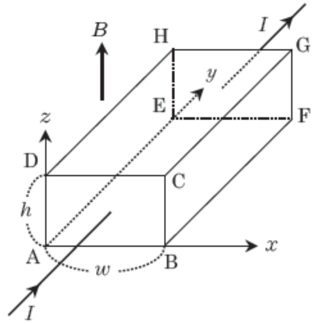


(3) (2)において，電圧計の値は V(V)まで達して一定となった。PQ 間の距離が d(m)であるとき，荷電粒子の速さ v を d, B, V を用いて表しなさい。



ローレンツ力によって正の電荷は P 側に引き寄せられるにつれて，P→Q の向きの電場が大きくなり，やがて電荷にはたらくローレンツ力と静電気力がつり合う。そのときの P→Q 方向の電場の大きさを E(V/m)とすると，つり合いの式 $qE = qvB$ より，$E = vB$ …① また，$E = \dfrac{V}{d}$ が成り立つので，これを①に代入すると，$\dfrac{V}{d} = vB$ よって，$v = \dfrac{V}{dB}$ …(答)

114 図のように，高さ h(m)，幅 w(m)の直方体の金属の頂点 A を原点として，x 軸，y 軸，z 軸をとる。この金属に y 軸の正の向きに I(A)の一定電流を流した。電気素量を e(C)，金属内の単位体積当たりの自由電子の個数を n(個/m^3)として，次の問いに答えなさい。



(1) 自由電子はすべて一定の速さ v(m/s)で y 軸の負の向きに移動していると考えるとき，その速さ v を I, h, w, e, n を用いて表しなさい。

(2) z 軸の正の向きに磁束密度 B(T)の一様な磁場を与えると，自由電子はローレンツ力を受ける。1個の自由電子が受けるローレンツ力の大きさ F(N)を e, v, B を用いて表しなさい。

(3) 磁場を与えた後，時間の経過とともに，金属のある面に自由電子が蓄積され，金属内には x 軸方向に電場が発生する。自由電子が蓄積する面は AEHD，BFGC のどちらか。

(4) (3)の電場は時間の経過とともに大きくなり，やがて自由電子にはたらく静電気力とローレンツ力がつり合い，y 軸方向に再び一定の電流 I(A)が流れ出す。このときの面 AEHD と面 BFGC の電位差をホール電圧という。そのホール電圧 V_H(V)を v, w, B を用いて表しなさい。

(5) 金属内の単位体積当たりの自由電子の個数 n を V_H, I, h, e, B を用いて表しなさい。

(1) v = (　　　　　　)(m/s)　(2) F = (　　　　　　)(N)　(3) (　　　　　　)

(4) V_H = (　　　　　　)(V)　(5) n = (　　　　　　)(1/m^3)

★章末問題★

115 次の問いに答えなさい。ただし，(4)以外は有効数字2桁で答えること。

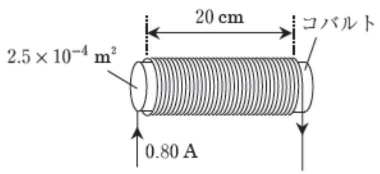
(1) 半径0.10 m の1巻きの円形コイルに0.50 A の電流を流したとき，コイルの中心の磁場の強さを求めなさい。また，コイルを2巻きにしたときのコイルの中心の磁場の強さを求めなさい。ただし，磁場の強さの単位もAとmを用いて答えること。

1巻きのコイル：(　　　　　)(　　)　2巻きのコイル：(　　　)(　　)

(2) 1.0 A の電流が流れる十分に長い直線電流から5.0 cm 離れた位置での磁場の強さを求めなさい。ただし，単位はAとmを用いて答えること。

(　　　　　　)(　　)

(3) 図のように，断面積が2.5×10^{-4} m^{2}の円柱形コバルトに，導線を600回巻いて，長さが20 cm のソレノイドコイルを作る。この導線に0.80 A の電流を矢印の向きに流すとき，コバルト内部の中央付近の磁場の強さと磁束密度を求めなさい。また，磁場の向きを上下左右で答えなさい。ただし，コバルトの比透磁率は250，真空の透磁率は1.26×10^{-6}とし，有効数字は2桁で答えること。また，磁場の強さの単位はAとmを用い，磁束密度の単位はアルファベット1文字の単位を用いて答えること。



磁場の強さ：(　　　　)(　　)

磁束密度：(　　　　)(　　)

磁場の向き：(　　　　)

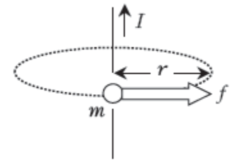
(4) 磁極の強さがm(Wb)の2つの磁石のN極どうしを近づけて，磁極間がr(m)となったとき，2極間にはたらく力の大きさF(N)を求めなさい。ただし，空気の透磁率をμ_0とし，磁石は十分長くS極の影響は無視できるものとする。

$F=$(　　　　　　　)(N)

(5) 磁極の強さが7.2×10^{-4} Wb で，長さが$3.0\sqrt{2}$ m の棒磁石がある。この棒磁石のN極，S極からともに3.0 m 離れた点での磁界の強さは何N/Wb か。また，この点に磁極の強さが5.0 Wb の十分長い棒磁石のN極を置いたとき，N極にはたらく力の大きさは何Nか。ただし，磁気力に関するクーロンの法則の比例定数を6.3×10^4 N·m^2/Wb^{2}とする。

(　　　　　)N/Wb　(　　　　　　)N

116 単独の磁荷を想定するとき，次の問いに答えなさい。



① 真空中におけるm(Wb)の磁荷からは磁力線，磁束線はそれぞれ何本出ていると定義されているか。ただし，真空の透磁率をμ_0とする。

磁力線：(　　　　)本　磁束線：(　　　　)本

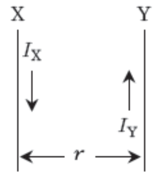
② I(A)の十分に長い直線電流からr(m)離れた位置に，m(Wb)の点磁荷を置いたとき，この点磁荷が受ける磁力の大きさf(N)を求めなさい。

$f=$(　　　　　　)(N)

③ ②の点磁荷をf(N)の磁力に逆らって直線電流の周りをゆっくり1周させるとき，外力がする仕事W(J)を求めなさい。ただし，直線電流と垂直な平面上で，直線電流を中心とした半径rの円周上を移動させるものとし，WはIとmを用いて表すこと。

$W=$(　　　　　　)(J)

117 十分に長い2本の平行な導線X，YにI_X(A)，I_Y(A)の電流が図のように逆向きに流れている。導線間の距離をr(m)として，次の問いに答えなさい。ただし，空気の透磁率をμ_0とする。



(1) 導線Xに流れる電流が導線Yの位置につくる磁束密度の大きさBを求めなさい。また，その向きは紙面の表から裏向き，裏から表向きのどちらか。

$B=$(　　　　　)　紙面の(　　　から　　　)向き

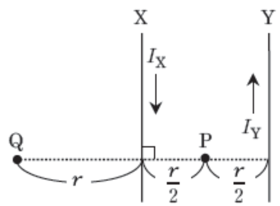
(2) 導線YのL(m)の部分が受ける力の大きさF(N)を求めなさい。また，その力の向きは導線Xに近づく向きか，遠ざかる向きか。

$F=$(　　　　　)　導線Xに(　　　　　　)向き

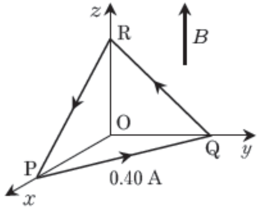
(3) 導線Yが1 m 当たりに受ける力の大きさf(N/m)を求めなさい。$f=$(　　　　　　)

(4) 下図の点P，Qでの磁場の強さH_P，H_Qをそれぞれ求めなさい。ただし，$2I_X>I_Y>0$とする。

$H_P=$(　　　　　　)　$H_Q=$(　　　　　　)

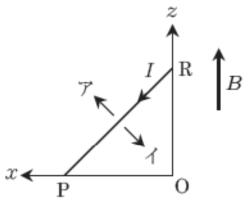


118 x, y, z 軸上のそれぞれ P(1, 0, 0)，Q(0, 1, 0)，R(0, 0, 1)に頂点をもつ正三角形状のコイルに 0.40 A の電流が流れている。z 軸の正の向きに磁束密度 0.50 T の一様な磁場を加えるとき，次の問いに答えなさい。



(1) コイルの各辺が受ける力の大きさを求めなさい。ただし，座標の単位は m とし，$\sqrt{2}=1.41$ として有効数字 2 桁で答えること。

PQ：(　　　　)N　QR：(　　　　)N　RP：(　　　　)N



(2) 右図は xz 平面だけを表した図である。導線 RP が受ける力の向きを次の中から選びなさい。　(　　　)

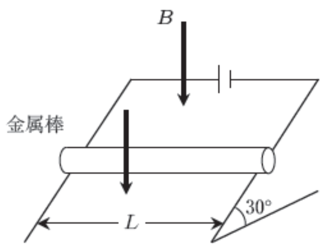
①アの向き　②イの向き　③紙面表から裏向き　④紙面裏から表向き

119 次の文中の空欄に当てはまる式を記号で選択しなさい。

磁束密度 B の一様な磁場が y 軸の正の向きにかかり，強さ(　　　)の一様な電場が z 軸の正の向きにかかっている。質量 m，電荷 Q $(Q>0)$をもった粒子を x 軸の負の向きに速さ v で射ち出したところ，そのまま一定の速度で運動した。ただし，重力は無視できるものとする。

ア. Qmv　イ. QvB　ウ. $\dfrac{QvB}{m}$　エ. $\dfrac{vB}{Qm}$　オ. $\dfrac{B}{m}$　カ. vB

120 図のように，鉛直下向きで B(T)の一様な磁場中に水平から 30°傾いた斜面があり，その斜面上に L(m)間隔の 2 本の平行導線がある。導線間に直流電圧を加え，質量 M(kg)，断面の半径 a(m)，抵抗率 ρ(Ω・m)の円柱形金属棒を導線と直交するように置いたところ，金属棒は静止した。導線と金属棒との間の摩擦は無視でき，重力加速度の大きさを g(m/s^2)として，次の問いに答えなさい。

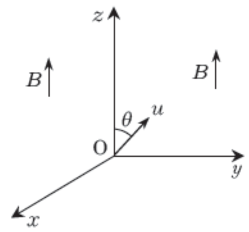


(1) 金属棒を流れる電流の大きさ I(A)はいくらか。(　　　　)(A)

(2) 直流電源の電圧 E(V)はいくらか。(　　　　)(V)

7章

121 図のように，z 軸の正の向きに一様な B(T)の磁場がかかっている。質量 m(kg)，電荷 q(C)($q>0$)の荷電粒子が，原点 O から x 軸に垂直で，z 軸と角度 θ(rad)$\left(0<\theta<\dfrac{\pi}{2}\right)$を成す向きに初速 u(m/s)で入射すると，荷電粒子はらせん運動をしながら z 軸の正の方向に進んでいった。



(1) この荷電粒子が原点を出発するときの速度の x 成分 u_x，y 成分 u_y，z 成分 u_z を求めなさい。

(2) z 軸方向から xy 平面を見たとき，荷電粒子は等速円運動をしているように見える。その円運動の軌道半径 r(m)と周期 T(s)を求めなさい。

(3) 荷電粒子が等速円運動で 1 周する間に，荷電粒子が z 軸方向に進む距離 L(m)を求めなさい。

(4) θ を変えずに u を 2 倍にすると，(2)の T と(3)の L はそれぞれ何倍になるか。

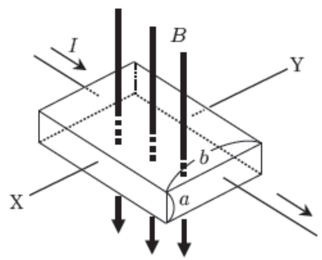
(1) u_x：(　　　　)(m/s)，u_y：(　　　　)(m/s)，u_z：(　　　　)(m/s)

(2) $r=$(　　　　)(m)，$T=$(　　　　)(s)　(3) $L=$(　　　　)(m)

(4) T：(　　　)倍　L：(　　　)倍

7章

122 図のように，断面が縦 a(m)，横 b(m)の長方形となる直方体の不純物半導体を水平に置き，鉛直下向きに磁束密度 B(Wb/m^2)の一様な磁場を加え，I(A)の電流を図の向きに流したところ，XY 間に V(V)の一定電圧が生じ，電位は X よりも Y のほうが高くなった。電気素量を e(C)として，次の問いに答えなさい。



(1) この半導体は n 型，p 型のどちらか。(　　　)

(2) キャリアが水平方向に一定の速さで移動しているとみなすとき，その速さ v(m/s)を求めなさい。

(　　　　)(m/s)

(3) この半導体 1 m^{3}当たりに含まれるキャリアの数 n を求めなさい。(　　　　)(1/m^3)

索　引

●１０の整数乗倍を表す接頭語

倍数	名称	記号	倍数	名称	記号	倍数	名称	記号
10^{15}	ペタ	P	10^{2}	ヘクト	h	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10	デカ	da	10^{-9}	ナノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-1}	デシ	d	10^{-12}	ピコ	p
10^{6}	メガ	M	10^{-2}	センチ	c	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キロ	k	10^{-3}	ミリ	m	10^{-18}	アト	a

●ギリシャ文字

小文字	大文字	読み方	小文字	大文字	読み方	小文字	大文字	読み方
α	A	アルファ	ι	I	イオタ	ρ	P	ロー
β	B	ベータ	κ	K	カッパ	σ	Σ	シグマ
γ	Γ	ガンマ	λ	Λ	ラムダ	τ	T	タウ
δ	Δ	デルタ	μ	M	ミュー	υ	Y	ウプシロン
ε	E	イプシロン	ν	N	ニュー	ϕ	Φ	ファイ
ζ	Z	ゼータ	ξ	Ξ	グザイ	χ	X	カイ
η	H	イータ	o	O	オミクロン	ψ	Ψ	プサイ
θ	Θ	シータ	π	Π	パイ	ω	Ω	オメガ

●基本単位

物理量	名称	主な解説	記号	物理量	名称	記号	主な解説
長さ	メートル	—	m	電流	アンペア	A	基 p144，下 p4
質量	キログラム	下 p223	kg	温度	ケルビン	K	基 p101，上 p132
時間	秒	—	s	物質量	モル	mol	上 p133

●物理定数

物理量	定数	物理量	定数
標準重力加速度 g	$9.80665\ \mathrm{m/s^2} \fallingdotseq 9.8\ \mathrm{m/s^2}$	万有引力定数 G	$6.67408 \times 10^{-11}\ \mathrm{N \cdot m^2/kg^2}$
真空中の光速 c	$2.99792458 \times 10^{8}\ \mathrm{m/s}$	空気中の音速(0°C)	331.5 m/s
静電気力によるクーロンの法則の比例定数 k_0	$8.9876 \times 10^{9}\ \mathrm{N \cdot m^2/C^2}$	磁気力によるクーロンの法則の比例定数 k_m	$6.3326 \times 10^{4}\ \mathrm{N \cdot m^2/Wb^2}$
真空の誘電率 ε_0	$8.8542 \times 10^{-12}\ \mathrm{F/m}$	真空の透磁率 μ_0	$1.2566 \times 10^{-6}\ \mathrm{N/A^2}$
絶対零度	−273.15℃	気体定数 R	8.3144598 J/(mol・K)
アボガドロ定数 N_A	$6.02214076 \times 10^{23}\ \mathrm{/mol}$	ボルツマン定数 k	$1.380649 \times 10^{-23}\ \mathrm{J/K}$
標準大気圧（1 atm）	$1.01325 \times 10^{5}\ \mathrm{Pa}$	理想気体の体積(0℃, 1 atm)	$2.2413962 \times 10^{-2}\ \mathrm{m^3/mol}$
電気素量 e	$1.602176634 \times 10^{-19}\ \mathrm{C}$	電子の質量 m_e	$9.10938356 \times 10^{-31}\ \mathrm{kg}$
電子の比電荷 e/m_e	$1.7588 \times 10^{11}\ \mathrm{C/kg}$	統一原子質量単位（1 u）	$1.660539040 \times 10^{-27}\ \mathrm{kg}$
陽子の質量 m_p	$1.672621898 \times 10^{-27}\ \mathrm{kg}$	中性子の質量 m_n	$1.674927471 \times 10^{-27}\ \mathrm{kg}$
プランク定数 h	$6.62607015 \times 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s}$	リュードベリ定数 R	$1.0974 \times 10^{7}\ \mathrm{/m}$
ボーア半径 a_0	$5.2918 \times 10^{-11}\ \mathrm{m}$	熱の仕事当量 J	4.184 J/cal

●組立単位

物理量	名称	記号	基本単位による表現	主な解説
角度 θ	ラジアン	rad		上 p80
速さ v，速度 v	メートル毎秒	m/s	m/s	上 p20
加速度 a	メートル毎秒毎秒	m/s^2	m/s^2	上 p20
力 F	ニュートン	N	$kg{\cdot}m/s^2$	基 p38
圧力 P	パスカル	$Pa = N/m^2$	$kg/(m{\cdot}s^2)$	基 p64
力のモーメント M	ニュートンメートル	N·m	$kg{\cdot}m^2/s^2$	上 p43
力積 I，運動量,P	ニュートン秒	N·s	kg·m/s	上 p62, p63
仕事 W，エネルギーU 電力量 W，熱量 Q	ジュール	J＝N·m	$kg{\cdot}m^2/s^2$	基 p78, p82 基 p145, p102
仕事率 P，電力 P	ワット	W＝J/s	$kg{\cdot}m^2/s^3$	基 p81,p145
角速度 ω，角振動数 ω	ラジアン毎秒	rad/s		上 p80, p102 下 p128
振動数 f，周波数 f	ヘルツ	Hz	1/s	上 p102, p164 下 p128
モル比熱 C	ジュール毎モル 毎ケルビン	J/(mol·K)	$kg{\cdot}m^2/(s^2{\cdot}mol{\cdot}K)$	上 p152
電荷,電気量 Q	クーロン	C	A·s	基 p142，下 p79
電場の強さ E	ニュートン毎クーロン	N/C＝V/m	$kg{\cdot}m/(A{\cdot}s^3)$	下 p14, p26
電位,電圧 V	ボルト	V＝J/C＝W/A	$kg{\cdot}m^2/(A{\cdot}s^3)$	下 p16, p17, p26
電気容量 C	ファラッド	F＝C/V	$A^2{\cdot}s^4/(kg{\cdot}m^2)$	下 p52
誘電率 ε	ファラッド毎メートル	$F/m = C^2/(N{\cdot}m^2)$	$A^2{\cdot}s^4/(kg{\cdot}m^3)$	下 p30
電気抵抗 R	オーム	Ω＝V/A	$kg{\cdot}m^2/(A^2{\cdot}s^3)$	下 p34, p48
抵抗率 ρ	オームメートル	Ω·m	$kg{\cdot}m^3/(A^2{\cdot}s^3)$	下 p34, p36, p48
磁気量 m，磁束 Φ	ウェーバ	Wb＝V·s	$kg{\cdot}m^2/(A{\cdot}s^2)$	下 p79, 94
磁場の強さ H	ニュートン毎ウェーバ	N/Wb	A/m	基 p14 下 p79, p82
透磁率 μ	ニュートン毎アンペア 毎アンペア	$N/A^2 = Wb/(A{\cdot}m)$	$kg{\cdot}m/(A^2{\cdot}s^2)$	下 p79, p82
磁束密度 B	テスラ	$T = Wb/m^2$	$kg/(A{\cdot}s^2)$	下 p79, p80
インダクタンス L,M	ヘンリー	H＝Wb/A	$kg{\cdot}m^2/(A^2{\cdot}s^2)$	下 p116, 120

●電気用図記号一覧