

## 電場

### 30. 電気量

- (1) 陽子1個の電気量を $+1e$ 、電子1個の電気量を $-1e$ とすると、次の電気量はいくらになるか
- ① 陽子1個電子1個の水素原子
  - ② 陽子1個の水素イオン
  - ③ 陽子13個電子10個のアルミニウムイオン
  - ④ 陽子8個電子10個の酸化物イオン
- (2) +の電気と-の電気は引き合い。同符号の電気は反発する。次の原子・イオンは引き合うか反発するか。
- ① 水素イオンとアルミニウムイオン
  - ② 水素原子どおし
  - ③ 酸化物イオンどおし
  - ④ 酸化物イオンとアルミニウムイオン
- (3) 陽子 $6.3 \times 10^{19}$ 個の電気と同じ電気量を $+1C$ とする。次の電気量はいくらか
- ① 陽子 $6.3 \times 10^{19}$ 個
  - ② 電子 $6.3 \times 10^{19}$ 個
  - ③ 陽子 $6.3 \times 10^{19}$ 個と電子 $6.3 \times 10^{19}$ 個
  - ④ 陽子 $12.6 \times 10^{19}$ 個
  - ⑤ 陽子 $12.6 \times 10^{19}$ 個と電子 $6.3 \times 10^{19}$ 個
- (4) 同じ材質、同じ大きさの金属球がA,B二つある。以下の問いに答えよ。
- ① Aに $+10C$ 、Bに $+20C$ の電気を帯電させ接触させて離れた。A,Bの電気量はいくらになるか
  - ② Aに $+10C$ 、Bに $-20C$ を帯電させて接触させて離れた。A,Bの電気量はいくらか
  - ③ Aに $+10C$ 、Bは帯電させずにA,Bを接触させて離れた。A,Bの電気量はいくらか

### 31. 重力場と電場

- (1) 地球周辺の空間に物体を置くとその物体に力が作用する。これは空間が重力の影響を受けた特殊な空間になっているためである。このような空間を重力場という。重力場の強さは重力か速度の大きさで表わす。重力場について以下の問いに答えよ。
- ① 重力加速度の大きさが $9.8\text{m/s}^2$ のとき、 $1\text{kg}$ の物体に作用する力の大きさはいくらか
  - ② ある空間に $1\text{kg}$ の物体を置くと $4\text{N}$ の重力が作用した。重力加速度の大きさ（重力場の強さ）はいくらか
  - ③ 重力場の強さ $5\text{m/s}^2$  ( $5\text{N/kg}$ ) の空間に $1\text{kg}$ の物体を置いた。重力の大きさはいくらか
  - ④  $6\text{N/kg}$ の空間に $2\text{kg}$ の物体を置いた。重力の大きさはいくらか
  - ⑤  $5\text{kg}$ の物体を置いたら $20\text{N}$ の重力が作用した。この位置の重力場の強さはいくらか
  - ⑥ 重力場の強さ $g[\text{N/kg}]$ の空間に $m[\text{kg}]$ の物体を置いた。この物体に作用する重力の大きさはいくらか

### 解説

- (1) ① 0 ②  $+1e$  ③  $+3e$  ④  $-2e$
- (2) ① 反発 ② 力が作用しない ③ 反発 ④ 引き合う
- (3) ①  $+1C$  ②  $-1C$  ③ 0 ④  $+2C$  ⑤  $+1C$
- (4) ①  $\frac{10+20}{2} = +15C$  ②  $\frac{10-20}{2} = -5C$  ③  $\frac{10+0}{2} = +5C$

### 解説

- (1) ①  $9.8\text{N}$  ②  $4\text{N/kg}$  ③  $5\text{N}$  ④  $2 \times 6 = 12\text{N}$  ⑤  $20 \div 5 = 4\text{N/kg}$
- ⑥  $mg$
- (2) ①  $4\text{N/C}$  ② 下向きに $5\text{N/C}$
- ③ 負電荷の場合は力の向きと逆向きに電場がある。左向きに $3\text{N/C}$
- ④  $4\text{N}$  ⑤ 右向き $5\text{N}$  ⑥ 左向き $5\text{N}$  ⑦ 右向きに $4 \times 5 = 20\text{N}$
- ⑧ 北向き  $40 \div 5 = 8\text{N/C}$  ⑨ 上向き  $20 \div 4 = 5\text{N/C}$  ⑩  $qE$
- (3) ① 下向き  $mg$  ② 上向き  $qE$  ③ クーロン力 ④  $qE - mg = ma$

# 電場

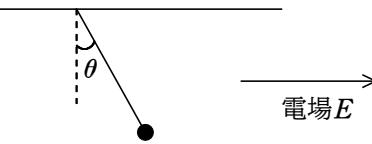
(2) 電荷をおくとその電荷に力が作用する空間を電場という。電場は+1Cの電荷に作用する力(ベクトル)と定義されている。電場について以下の問いに答えよ。

- ① +1Cの電荷をおくと4Nの力が作用した。この場所の電場の強さは何[N/C]か
- ② +1Cの電荷をおくと下向きに5Nの力が作用した。この場所の電場はいくらか
- ③ -1Cの電荷をおくと右向きに3Nの力が作用した。この場所の電場はいくらか
- ④ 4N/Cの電場に+1Cの電荷を置くと何Nの力が作用するか
- ⑤ 右向きに5N/Cの電場に+1Cの電荷を置くとどちら向きに何Nの力が作用するか
- ⑥ 右向きに5N/Cの電場に-1Cの電荷を置くとどちら向きに何Nの力が作用するか
- ⑦ 右向きに5N/Cの電場に+4Cの電荷をおくとどちら向きに何Nの力が作用するか
- ⑧ +5Cの電荷をおくと北向きに40Nの力が作用した。この場所の電場はいくらか
- ⑨ -4Cの電荷をおくと下向きに20Nの力が作用した。この場所の電場はいくらか
- ⑩  $E$ [N/C]の電場に $q$ [C]の電荷をおいた。この電荷に作用する力の大きさはいくらか

(3) 上向き $E$ [N/C]の電場に質量 $m$ [kg]、電気量 $q$ [C]の電荷をおいた。重力加速度の大きさを $g$ [m/s<sup>2</sup>]として以下の問いに答えよ。

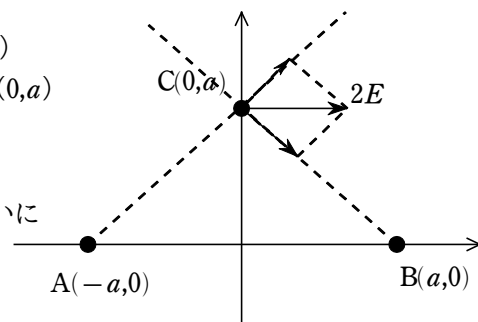
- ① この物体に作用する重力の方向と大きさはいくらか
- ② この物体に作用するクーロン力の方向と大きさを答えよ。
- ③ この物体が上向きに加速した。クーロン力と重力はどちらが大きいか
- ④ この物体の加速度を $a$ とすると、この物体の運動方程式をたてよ。
- ⑤ この物体の加速度を $E, m, q, g$ で表わせ。

(4) ある電気量に帯電した質量 $m$ の物体を右向きに一様な電場 $E$ がある中で天井からつるしたところ角度 $\theta$ でつりあった。重力加速度の大きさを $g$ として以下の問いに答えよ。



- ① この物体が帯電しているのは正か負か
- ② この物体に作用している重力の大きさはいくらか
- ③ この物体が持っている電気量を $q$ とすると、クーロン力の大きさを $q, E$ で表わせ。
- ④  $\tan \theta$ を $m, g, q, E$ で表わせ。
- ⑤  $q$ を求めよ。

(5) 座標平面上A(-a,0)、B(a,0)に電気量不明の電荷をおき、点C(0,a)に-1Cの電荷をおいたところx軸正の方向に $2E$ [N]の力が作用した。座標1目盛り=1mとして以下の問いに答えよ。



- ① C点の電場の強さと方向を答えよ。
- ・ C点の電荷はA、Bの電荷から反発力あるいは引力を受けその合力が作用している。その合力が $2E$ [N]である。

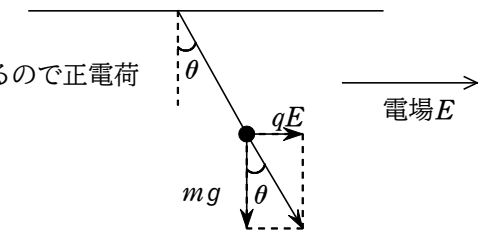
$$\textcircled{5} \quad a = \frac{qE}{m} - g$$

(4) ① 電場と同じ方向に力が作用しているため正電荷

$$\textcircled{2} \quad mg \quad \textcircled{3} \quad qE$$

$$\textcircled{4} \quad \text{図より} \quad \tan \theta = \frac{qE}{mg}$$

$$\textcircled{5} \quad q = \frac{mg \tan \theta}{E}$$



(5) ① 点Cは負電荷であるから電場の方向は力の逆向き x軸負の方向に $2E$ [N/C]

②  $\triangle CAB$ は直角二等辺三角形である。

$\angle ACB = 90^\circ$ で $CR \parallel QR$ なので、 $\triangle CQR$

も直角二等辺三角形である。よって、

力CQは $CR = 2E$ の $\frac{1}{\sqrt{2}}$ となる。

$$2E \times \frac{1}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} E [\text{N}]$$

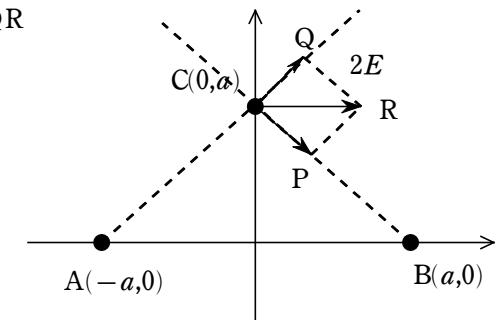
③ ②と同じく $\sqrt{2} E$ [N]

④ 電場の強さは逆向きに $\sqrt{2} E$ [N/C]

⑤ 同じく $\sqrt{2} E$ [N/C]

⑥ Aからは反発の方向に力を受けているので、Aは負電荷

Bからは引く方向に力を受けているので、Bは正電荷



# 電場

- ② C点の電荷がAから受ける力の大きさはいくらか
- ③ C点の電荷がBから受ける力の大きさはいくらか
- ④ C点のAからの電場の強さはいくらか
- ⑤ C点のBからの電場の強さはいくらか
- ⑥ A,Bの電荷の符号を答えよ。

## 32. 電気力線

(1) 正電荷と負電荷の間にはクーロン力が作用している

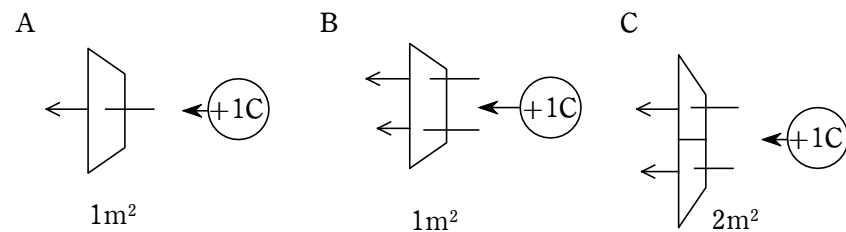
これをイメージするために、正電荷と負電荷の間がひもでつながっていると考える。そのひもの方向を電場の方向に定義する。この線を電気力線という。

- ① 右図の正電荷と負電荷は電気力線一本でつながっていると電気力線を矢印で記入せよ。
- ② 下図の正電荷、負電荷の周りの黒点位置においた+1Cの電荷に作用する力の方向を矢印で示せ。



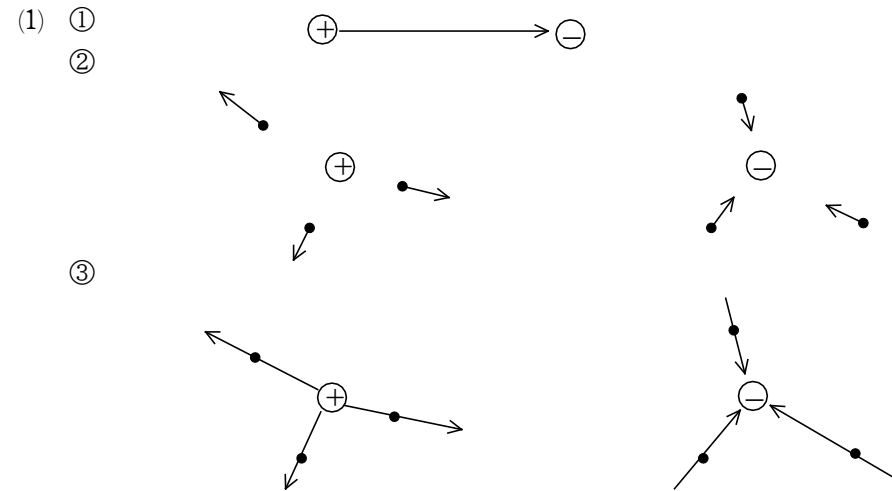
③ 上図に電気力線を記入せよ。

(2)  $1\text{m}^2$ の断面を電気力線が貫いている本数を電気力線密度という。 $1\text{m}^2$ あたり1本の電気力線があるとき、+1Cに1Nの力が作用しているとして以下の問いに答えよ。



- ① 上図AとBはどちらが何倍+1Cに作用する力の大きさが大きいか。
- ② 上図Cの+1Cに作用する力の大きさはA,Bどちらと等しいか。
- ③  $1\text{m}^2$ あたり2本の電気力線があるとき+1Cの電荷に作用する力の大きさはいくらか。
- ④  $2\text{m}^2$ あたり2本の電気力線があるとき+1Cの電荷に作用する力の大きさはいくらか。
- ⑤  $1\text{m}^2$ あたりE本の電気力線があるとき+1Cの電荷に作用する力の大きさはいくらか。
- ⑥ 電気力線 $1\text{m}^2$ あたりE本の電気力線があるとき、その空間の電場の強さはいくらか。
- ⑦ +1Cの電荷に4Nの力が作用していた。その空間 $1\text{m}^2$ あたり何本の電気力線があるといえるか。
- ⑧ +4Cの電荷に20Nの力が作用している。この空間 $1\text{m}^2$ に何本の電気力線があるか。
- ⑨  $S[\text{m}^2]$ あたりN本の電気力線が貫いている。この場所の電場の強さをN,Sで表わせ。

解説

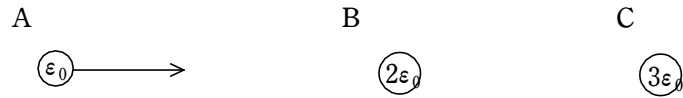


電気力線は+1Cの電荷に作用する力の方向に存在すると考える。

- (1) ① Bに2倍強い力が作用する ② A ( $1\text{m}^2$ あたりの本数で決まる)
- ③  $2\text{N}$  ④  $2\text{本} \div 2\text{m}^2 = 1\text{N}$  ⑤  $E[\text{N}]$  ⑥  $E[\text{N/C}]$
- ⑦ 4本 ⑧  $20 \div 4 = 5[\text{N/C}]$  5本 ⑨  $E = \frac{N}{S}$
- (2) ① B=2本 C=3本 ②  $N\epsilon_0[\text{C}]$
- ③ N本出ているとすると、 $Q = N\epsilon_0$ 。よって、 $N = \frac{Q}{\epsilon_0}$ 本
- (3) ①  $\frac{Q}{\epsilon_0}$ 本 ② 左右対称であるから左側は半分 よって、 $\frac{Q}{2\epsilon_0}$ 本
- ③ 左側の金属表面の面積はSなので、 $1\text{m}^2$ あたり、 $\frac{Q}{2\epsilon_0 S}$ 本あることになる。
- ④ 電気力線密度が電場なので、 $E = \frac{Q}{2\epsilon_0 S}$
- (4) ①  $\frac{Q}{\epsilon_0}$ 本 ② 球の表面積が $4\pi r^2$ なので、 $1\text{m}^2$ あたり $\frac{Q}{4\pi r^2 \epsilon_0}$ 本となる。
- ③  $E = \frac{Q}{4\pi r^2 \epsilon_0}$
- ④ 自由電子が動かないので電場はない。電場は電荷に作用する力である。0N/C
- ⑤ 電場とは電気力線密度なので、電場がない時は電気力線はない 0本
- ⑥ 電荷があると電気力線が出るので、金属内部には電荷はないことになる。0C

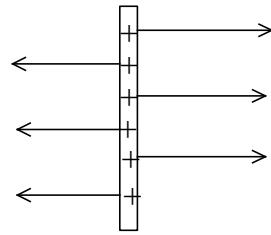
# 電場

(3) ある電気量から電気力線が1本出ているとして電気量と電気力線数の関係を考えてみよう。 $\epsilon_0[C]$ より1本出ているとする。以下の問いに答えよ。



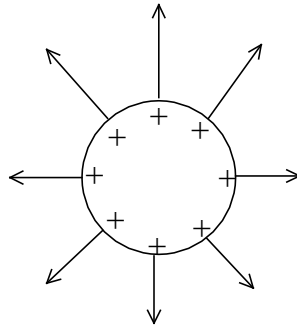
- ① B、Cはそれぞれ電気力線何本出ているといえるか。
- ② 電気力線がN本出ている時、電気量は何Cか
- ③ 電気量Q[C]より電気力線は何本出ているか

(4) 右図のように断面積Sの薄い金属板に電気量+Qを帯電させた。電気力線は均等に分布し、金属板の厚さは無視できるものとし、 $\epsilon_0[C]$ より電気力線1本出ているとして以下の問いに答えよ。



- ① この金属板から出ている電気力線は全部で何本か
- ② この金属板の左側には電気力線何本出ているか
- ③ 金属板の表面近くでは $1m^2$ あたり何本の電気力線があることになるか
- ④ 金属板の表面近くの電場の強さはいくらか

(5) 半径rの球(表面積 $4\pi r^2$ )の表面に一樣に電気量Qの電荷が帯電している。 $\epsilon_0[C]$ より電気力線1本出ているとし、電気力線は一樣に出ているとして以下の問いに答えよ。



- ① 電気力線は全部で何本出ているか。
  - ② 表面近くの電気力線は $1m^2$ あたり何本か
  - ③ 球の表面近くの電場の強さはいくらか
    - ・ 金属内の電場について考えよう。
  - ④ 帯電させた金属内では自由電子は移動した後で動かなくなっている。このことを考慮して金属内の電場の大きさはいくらと考えられるか
  - ⑤ 金属内の電場から考えて金属内に何本の電気力線があることになるか
  - ⑥ 金属内に電荷があるとき、その電荷から電気力線が出ることになる。このことから考えて金属内部に存在する電気量を答えよ。
- (6) 点電荷+Q[C]の電荷から電気力線が

- ①  $\frac{Q}{\epsilon_0}$ 本
- ② 点電荷から出た電気力線はすべてこの球の表面を貫くので①と同数になる。よって、 $\frac{Q}{\epsilon_0}$ 本

③ 球の表面積が $4\pi r^2$ なので、 $1m^2$ あたりの電気力線数は $E = \frac{Q}{4\pi r^2 \epsilon_0}$

④  $E = \frac{Q}{4\pi r^2 \epsilon_0}$ が電場強さである。方向は中心方向の逆向きである。

⑤ ④と同じで、 $E = \frac{Q}{4\pi r^2 \epsilon_0}$

⑥  $F = qE$ より、 $F = \frac{Qq}{4\pi r^2 \epsilon_0}$

⑦  $F = \frac{Qq}{4\pi r^2 \epsilon_0} = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \frac{Qq}{r^2} = k \frac{Qq}{r^2}$  (これがクーロンの法則である)

$r=1$ 、 $Q=q=1$ を代入すると、 $F=k=9.0 \times 10^9$

<参考>

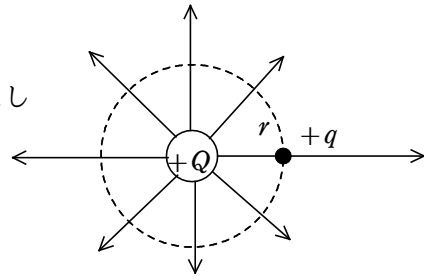
$\frac{1}{4\pi \epsilon_0} = 9.0 \times 10^9$ なので、 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} C/本$ ,

この $\epsilon_0$ を真空誘電率という。

# 電場

四方八方へ一様に出ている。

点電荷を中心とする半径 $r$ の球の表面を考える。 $\epsilon_0$ [C]より電気力線1本出ているとして以下の問いに答えよ。



- ① この点電荷から出ている電気力線は何本か
  - ② 点電荷を中心とする半径 $r$ の球の表面を貫いている電気力線は何本か
  - ③ 点電荷を中心とする半径 $r$ の球の表面 $1\text{m}^2$ あたりの電気力線数は何本か
  - ④ 点電荷から $r$ 離れた点の電場の方向と強さを求めよ。
- ・ 点電荷から $r$ 離れた点に点電荷 $+q$ [C]をおいた。
- ⑤ この点電荷の位置における中心電荷からの電場の強さはいくらか
  - ⑥ この点電荷に作用するクーロン力はいくらか
  - ⑦  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = k$  (この $k$ をクーロン定数という) とする。 $+1\text{C}$ の二つの電荷を $1\text{m}$ 離して設置すると、電荷どおしには $9.0 \times 10^9 \text{N}$ の力が作用することが知られている。 $k$ の値はいくらになるか。

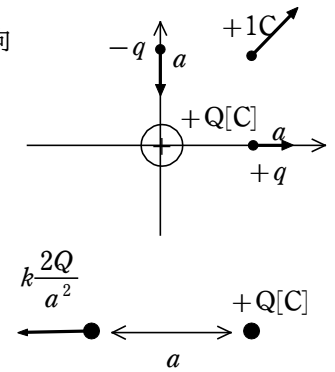
## 33. クーロンの法則

(1)  $xy$ 平面上の原点に $+Q$ [C]の電荷が存在している。クーロン定数を $k[\text{Nm}^2/\text{C}^2]$ として、以下の問いに答えよ。座標の単位は[m]である。

- ① 座標 $(a,0)$ にある $+q$ [C]の電荷に作用する力の方向と大きさを求めよ。
  - ② 座標 $(0,a)$ にある $-q$ [C]の電荷に作用する力の方向と大きさを求めよ。
  - ③ 座標 $(a,a)$ にある $+1$ [C]の電荷に作用する力の方向と大きさを求めよ。
  - ④ 座標 $(a,a)$ の電場の強さと方向を求めよ。
- ・ 座標 $(-a,0)$ にある電荷に $k\frac{2Q}{a^2}$ [N]のクーロン力が $x$ 軸負の方向に作用していたとする。
- ⑤ 座標 $(-a,0)$ に存在している電荷の大きさと符号を答えよ。
  - ⑥ 座標 $(-a,0)$ の電場の方向及び強さを答えよ。
- ・  $x$ 軸上に $-2\text{C}$ の電荷があり、この電荷に作用しているクーロン力が $x$ 軸正の方向に $\frac{1}{2}kQ$ [C]作用していたとする。
- ⑦ この電荷の存在する座標を答えよ。
  - ⑧ この座標の電場の強さはいくらか
- (2)  $xy$ 座標平面上の点 $A(-a,0)$ に $+4Q$ [C]

## 解説

- (1) ① クーロンの法則より $k\frac{Qq}{a^2}$ [N] 方向は $x$ 軸正の方向
- ② クーロンの法則より $k\frac{Qq}{a^2}$ [N] 方向は $y$ 軸負の方向
- ③ 原点との距離は $\sqrt{2}a$ であるので、クーロン力は $k\frac{Q \times 1}{(\sqrt{2}a)^2} = k\frac{Q}{2a^2}$ [N] 方向は右上 $45^\circ$
- ④  $+1\text{C}$ の電荷に作用する力が電場なので、電場の強さは $k\frac{Q}{2a^2}$ [N/C] 方向は右上 $45^\circ$
- ⑤  $k\frac{2Q}{a^2}$ は $q=2$ [C]に該当する。負の方向にクーロン力が作用しているのだから原点の正電荷に反発していることになり、ここに存在する電荷は $+2\text{C}$ となる。
- ⑥  $F=qE=+2E=k\frac{2Q}{a^2}$  より、 $E=\frac{kQ}{a^2}$  で力の向きと同じ左向き
- ⑦ 座標を $x$ とすると、 $F=k\frac{2Q}{x^2}=\frac{1}{2}kQ$  これより $x^2=4$  負電荷が正の方向に力を受けるためにはこの電荷は原点の左側でなければならないので、 $x<0$  よって、 $x=-2$  ( $-2,0$ )
- ⑧ 電場は $+1\text{C}$ に作用する力なので、クーロンの法則で $q=1$ とすればよい。  
よって、 $E=\frac{kQ}{(-2)^2}=\frac{1}{4}kQ$



# 電場

点B(a,0)に $-Q[C]$ の点電荷がある。  
クーロン定数を $k$ として以下の問いに答えよ。

・ 原点に $+1C$ の電荷を置いたとき

① Aの電荷から受けるクーロン力の大きさと方向を求めよ。

② Bの電荷から受けるクーロン力の大きさと方向を求めよ。

③ 原点の電場の大きさと方向を求めよ。

・ 座標(x,0)に $+1C$ を置いたとき、

④ 点Aからの距離はいくらか。絶対値記号を用いて表せ。

⑤ 点Aから受けるクーロン力の大きさと方向を答えよ。方向については $x > -a$ のときと $x < -a$ の時に分けて答えよ。

⑥ 点Bから受けるクーロン力の大きさと方向を答えよ。方向については $x > a$ のときと $x < a$ の時に分けて答えよ。

⑦ この座標において電場が0であったとすると、 $x$ はいくらになるか。 $a$ で表せ。

・ 点C(0,a)に $+1C$ の電荷を置いた。

⑧ この点とA点との距離はいくらか。

⑨ この電荷がAの電荷から受ける力の $x$ 成分と $y$ 成分を求めよ。

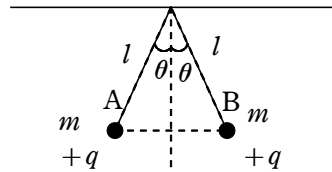
⑩ この電荷がBの電荷から受ける力の成分と $y$ 成分を求めよ。

⑪ C点の電場の力の成分と $y$ 成分を求めよ。

⑫ C点の電場の大きさを求めよ。

(3) 右図のように長さ $l$ の軽いひもに質量 $m$

の小物体を取り付けたものをA,B二つ用意し  
それぞれに $+q$ の電荷を帯電させたところ  
それぞれが鉛直と角度 $\theta$ でつりあつたとする。  
重力加速度の大きさを $g$ 、クーロン定数を $k$   
として以下の問いに答えよ。



① AB間の距離はいくらか

② AB間に作用しているクーロン力の大きさを $k, q, l, \theta$ で表せ。

③ A,Bに作用している重力の大きさはそれぞれいくらか。 $m, g$ で表せ。

④ ひもの張力を $T$ としたとき、水平方向と鉛直方向各成分を $T, \theta$ で表せ。

⑤ 水平方向、鉛直方向のつりあいの式を物体Aに関してそれぞれ導け。

(2) ①  $k\frac{4Q}{a^2}$  方向は右向き ②  $k\frac{Q}{a^2}$  方向は右向き

③ 原点の電場の大きさはそこへ $+1C$ を置いたときの力であるので、Aからの力とBからの力の和となる。よって、 $k\frac{4Q}{a^2} + k\frac{Q}{a^2} = \frac{5kQ}{a^2}$

④  $|x+a|$

⑤  $k\frac{4Q}{|x+a|^2} = \frac{4kQ}{(x+a)^2}$   $x > -a$ のとき、右向き  $x < -a$ の時左向き

⑥  $k\frac{Q}{|x-a|^2} = \frac{kQ}{(x-a)^2}$   $x > a$ のとき、左向き  $x < a$ の時右向き

⑦ 電場が0ということはクーロン力が0ということである。⑤⑥の力が逆向きで同じ大きさであればクーロン力が0となる。

$$\text{よって、} \frac{4kQ}{(x+a)^2} = \frac{kQ}{(x-a)^2} \quad 4(x-a)^2 = (x+a)^2$$

$$\text{これは、} \quad 4(x-a)^2 - (x+a)^2 = 0$$

$$\{2(x-a) + (x+a)\}\{2(x-a) - (x+a)\} = 0$$

$$(3x-a)(x-3a) = 0$$

$$x = 3a, \frac{1}{3}a$$

$x = 3a$ のとき、⑤は右向き⑥は左向きなので、電場=0となるが、

$x = \frac{1}{3}a$ のときは⑤⑥ともに左向きとなるので、電場=0とならない。

よって、 $x = 3a$

⑧  $\sqrt{2}a$

⑨ 大きさは $k\frac{4Q}{(\sqrt{2}a)^2} = 2\frac{kQ}{a^2}$  であり、方向が $x$ 軸正方向より $45^\circ$ 上であるので、

$$x\text{成分} = 2\frac{kQ}{a^2} \cos 45^\circ = \sqrt{2} \frac{kQ}{a^2}$$

$$y\text{成分} = 2\frac{kQ}{a^2} \sin 45^\circ = \sqrt{2} \frac{kQ}{a^2}$$

⑩ 大きさは $k\frac{Q}{(\sqrt{2}a)^2} = \frac{1}{2} \frac{kQ}{a^2}$  であり、方向が $x$ 軸正方向より $45^\circ$ 下であるので、

$$x\text{成分} = \frac{1}{2} \frac{kQ}{a^2} \cos 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{kQ}{a^2}$$

$$y\text{成分} = -\frac{1}{2} \frac{kQ}{a^2} \sin 45^\circ = -\frac{\sqrt{2}}{2} \frac{kQ}{a^2}$$

⑪ C点の電場はA、Bそれぞれからの電場のベクトル和である。

(電場は $+1C$ に作用する力であるから力の合成と同じように考えてよい。)

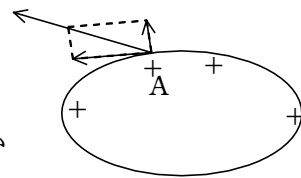
⑨⑩より、

34. 誘電分極・静電誘導

(1) 金属表面に電荷が存在している。

この電荷について以下の問いに答えよ。

・ 帯電している金属内では自由電子は動かない状態にある。



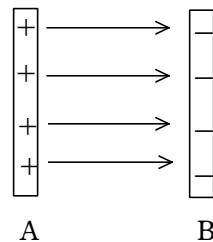
- ① 金属内の自由電子に力が作用しているかどうか答えよ。
- ② 金属内に電場があるかないか答えよ。
- ③ 金属内部（表面ではない）に電荷がある場合その電荷から電気力線が出ることを考えて、金属内に電荷があるかないかを判断せよ。
- ④ 金属表面から出る電気力線が金属表面に対して図Aのように斜めになっていた場合、その電気力線を金属表面に接する方向と垂直方向に分解できる。自由電子は動かないことを考慮し、金属表面に接する方向の電気力線は存在しないことを説明せよ。
- ⑤ 金属表面から出る電気力線は必ず金属表面に垂直である。この理由を簡単に説明せよ。

(2) 右図は金属板Aを $+4\epsilon_0[C]$ で、金属板Bを $-4\epsilon_0[C]$

で帯電させ平行に設置したものである。 $\epsilon_0[C]$ より電気力線が1本出ているとして以下の問いに答えよ。

- ① AB間には電気力線が何本出ているか。
- ② 金属板Aの左側には電気力線は何本出ているか

・ この金属板間に金属（導体）を挿入した。導体内に自由電子があり、自由に動ける。そのため、導体挿入後しばらくすると



$$x\text{成分} = \sqrt{2} \frac{kQ}{a^2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{kQ}{a^2} = \frac{3\sqrt{2}}{2} \frac{kQ}{a^2}$$

$$y\text{成分} = \sqrt{2} \frac{kQ}{a^2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{kQ}{a^2} = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{kQ}{a^2}$$

⑫ ⑪より大きさは三平方の定理より  $\sqrt{\left(\frac{\sqrt{2}}{2} \frac{kQ}{a^2}\right)^2 + \left(\frac{3\sqrt{2}}{2} \frac{kQ}{a^2}\right)^2} = \sqrt{10} \frac{kQ}{a^2}$

(3) ①  $2l\sin\theta$  ②  $k \frac{q^2}{(2l\sin\theta)^2} = \frac{1}{4} \frac{kq^2}{l^2\sin^2\theta}$  ③ A,Bともに $mg$

④ 水平方向  $T\sin\theta$  鉛直方向  $T\cos\theta$

⑤ 水平方向  $T\sin\theta = \frac{1}{4} \frac{kq^2}{l^2\sin^2\theta}$  鉛直方向  $T\cos\theta = mg$

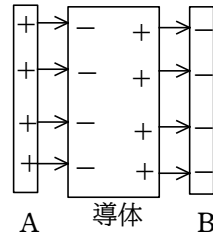
解説

- (1) ① 自由電子は動かないのであるから、力は作用していない。  
 ② 自由電子に力が作用していないので、電場はない。  
 ③ 金属内部に電荷があると、そこから電気力線が出ることになる。しかし、金属内に電場はないので、金属内部に電荷はないことになる。  
 ④ 接線方向に電気力線があると、自由電子が力を受けて動くようになる。自由電子は動かないので接線方向には電気力線はない。  
 ⑤ 電気力線の接線方向成分がないので、電気力線は金属表面に垂直となる。
- (2) ① 電気量が $4\epsilon_0[C]$ なので、4本  
 ② 4本とも右側に出ているので左側にはない。  
 ③ ない。  
 ④  $4\epsilon_0[C]$ から出た電気力線をすべて受け止めるだけの負電荷が必要なので、金属板Aと同じ $4\epsilon_0[C]$ 。負電荷であるから $-4\epsilon_0[C]$   
 ⑤ ④と同じく  $+4\epsilon_0[C]$
- (3) ① 原子核は右、軌道電子は左に力を受ける。  
 ② 正極は右側、負極は左側  
 ③ 電場がなければ原子に電極はできないので、不導体内に電場は存在する。  
 ④ 正極 ⑤ 負極  
 ⑥ 不導体内に外部の電気力線が入っているので、発生した電気量は外部の電気量よりは少ない。（導体の場合は等しいので、電場が打ち消される。）
- (4) ① 生じた電荷は右側と左側では逆符号で等しい大きさである。  $+\epsilon_0[C]$   
 ② 相手が不導体であるので自由電子は移動しない。元と同じ $+4\epsilon_0[C]$   
 ③ 元と同じ $-\epsilon_0[C]$   
 ④ ①と同じく $+2\epsilon_0[C]$

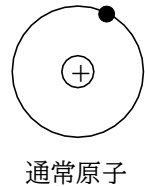
# 電場

電荷は動かないようになっている。

- ③ 導体内に電場はあるか、ないか。
- ④ 導体内に入ってきた電気力線により自由電子が動き金属表面に電荷ができる。右図導体左側表面にできる電荷は何Cか
- ⑤ 導体表面右側にできる電荷は何Cか

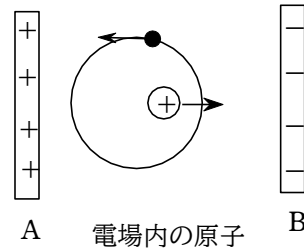


- (3) 原子は通常原子核の周りを電子が回っており、その電子は一様に回っているので、原子自体には電極ができない。しかし、電場の中にある原子は電場から力を受けることになる。原子の左側に正電極を右側に負電極を置いた。これについて以下の問いに答えよ。



通常原子

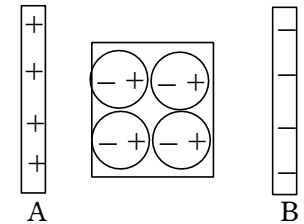
- ① 原子核、軌道電子はそれぞれどの方向に力を受けるか
- ② 電場内にある原子には電極ができるが、図の原子にできる電極は正極・負極それぞれの位置にできるか



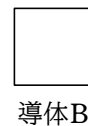
電場内の原子

・ 下の図は不導体を電場内に挿入したものである。

- ③ この不導体内に電場はあるかないか
- ④ この不導体の右側面にできる電極は何か
- ⑤ この不導体の左側面にできる電極は何か
- ⑥ 金属板A、Bの電気量と不導体に発生した電気量はどちらが大きいか。



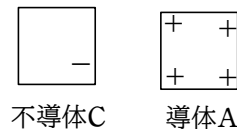
- (4) 同じ材質でできた同じ大きさ形の導体AとB、そして、同じ大きさ形の不導体Cがある。導体Aを  $+4\epsilon_0[C]$  で帯電させた。 $\epsilon_0[C]$ より電気力線が1本出ているとして以下の問いに答えよ。



導体B

・ 帯電した導体Aに不導体Cを近づけたところ、Cの右側に  $-\epsilon_0[C]$ の電荷が生じていた。

- ① 不導体Cの左側にはいくらの電荷が生じているか。



不導体C

導体A

・ AとCを接触させて再び同じ位置まで離れた。

- ② 導体Aが持つ電気量はいくらになったか
- ③ 不導体Cの右側にはどれだけの電荷ができていますか。

・ 導体Aと導体Bを近づけたところ導体Bの右側に  $-2\epsilon_0[C]$ の電荷が生じていた。

- ④ 導体Bの右側にはいくらの電荷が生じているか

## 35. 誘電率

- (1) 金属板Aを  $+4\epsilon_0[C]$ で金属板Bを  $-4\epsilon_0[C]$ に帯電させて、

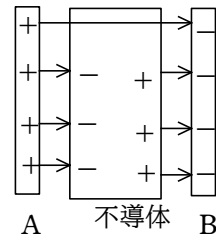
解説

- (1) ① 4本 ② 4本 ( $4\epsilon_0$ ) の75%なので  $3\epsilon_0[C]$



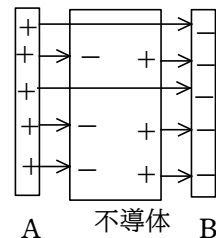
# 電場

不導体を挿入した。この不導体は貫く電気力線の75%を受け止めるだけの誘電分極を起こす能力があるとする。その状態を図示したのが右図である。この図を見て以下の問いに答えよ。



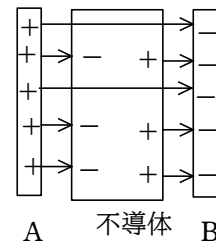
- ① 金属板Aから出ている電気力線は何本か
- ② この不導体に生じた誘電分極による電荷は何Cか
- ③ 不導体内に入り込んだ電気力線は何本か
- ④ この不導体が電気力線一本通す電気量（誘電率という）はいくらか
- ⑤ 誘電率の真空誘電率 ( $\epsilon_0$ ) に対する比を比誘電率という。この不導体の比誘電率はいくらか
- ⑥ この不導体の外部の電場に比べて不導体内の電場は何分の一になっているか

(2) 金属板Aを  $+5\epsilon_0[C]$ 、Bを  $-5\epsilon_0[C]$  で帯電させ金属板間に不導体を挿入した。そのときの電気力線の状態を表したのが右図である。これを見て以下の問いに答えよ。



- ① 金属板Aから電気力線は何本出ているか。
- ② 不導体に誘電分極で生じている電荷はいくらか
- ③ 不導体内を貫いている電気力線は何本か
- ④ この不導体の誘電率はいくらか
- ⑤ この不導体の比誘電率はいくらか
- ⑥ 不導体内の電場の強さは不導体外の電場の強さの何倍になっているか

(3) 金属板Aを  $+Q$  に、金属板Bを  $-Q$  に帯電させ、金属板間に不導体を入れたところ誘電分極により  $xQ$  の電荷が生じた。 $\epsilon_0[C]$  より電気力線が1本出るとして以下の問いに答えよ。



- ① 金属板Aから電気力線は何本出ているか
- ② 誘電分極により不導体表面で断ち切られる電気力線は何本か
- ③ 不導体内に入り込む電気力線は何本か
- ④ この不導体の誘電率はいくらか
- ⑤ この不導体の比誘電率はいくらか
- ⑥ 不導体内の電場の強さは外部の電場の何倍か

(4) 金属板Aを  $+Q$  に、金属板Bを  $-Q$  に帯電させ、金属板間に比誘電率  $\epsilon_r$  の不導体を入れた。 $\epsilon_0[C]$  より電気力線が1本出るとして以下の問いに答えよ。

- ① 金属板Aから電気力線は何本出ているか
- ② この不導体の誘電率はいくらか
- ③ 不導体内を貫く電気力線は何本か
- ④ 不導体内の電場の強さは外部の電場の何倍か
- ⑤ 誘電分極により生じた電気量はいくらか

- ③ 生じた  $3\epsilon_0[C]$  の電荷により電気力線4本のうち3本が打ち消される。よって、1本
  - ④  $4\epsilon_0$  ⑤ 4 ⑥ 電場の強さは電気力線密度である。  $\frac{1}{4}$
- (2) ① 5本 ② 誘電分極で生じる電荷は片方の面に生じる電荷の絶対値で答える。  $3\epsilon_0$
- ③ 2本
  - ④  $5\epsilon_0[C]$  で2本電気力線が通過しているので、電気力線1本当たり、  $\frac{5}{2}\epsilon_0$

誘電率は  $\frac{5}{2}\epsilon_0$  となる。

- ⑤ 比誘電率は真空誘電率  $\epsilon_0$  に対する比なので、  $\frac{5}{2} = 2.5$
- ⑥ 電場の強さは電気力線密度である。外部の5本に対して内部では2本なので、  $\frac{2}{5}$  倍

- (3) ①  $\frac{Q}{\epsilon_0}$  本 ②  $xQ$  の電荷が生じ、生じた分だけ断ち切られるので、  $\frac{xQ}{\epsilon_0}$  本

- ③  $\frac{Q}{\epsilon_0}$  本のうち、  $\frac{xQ}{\epsilon_0}$  本が断ち切られるので、  $(1-x)\frac{Q}{\epsilon_0}$  本

- ④ 誘電率は貫く電気力線1本あたりの電気量でこの場合電気量  $Q$  で  $(1-x)\frac{Q}{\epsilon_0}$  本貫いていることになるので、1本当たり、  $Q \div (1-x)\frac{Q}{\epsilon_0} = \frac{\epsilon_0}{1-x}$

- ⑤ 比誘電率は  $\epsilon_0$  の何倍かなので、  $\frac{1}{1-x}$

- ⑥ 比誘電率4は電場  $\frac{1}{4}$ 、比誘電率5は電場  $\frac{1}{5}$  になるので、電場の強さは比誘電率の逆数になる。よって、  $1-x$

- (4) ①  $\frac{Q}{\epsilon_0}$  本 ②  $\epsilon_r \epsilon_0$

- ③ 不導体内は誘電率（1本あたりの電気量）が  $\epsilon_r \epsilon_0$  なので、電気力線数は  $\frac{Q}{\epsilon_r \epsilon_0}$

- ④ 不導体内では電気力線が外部の  $\frac{Q}{\epsilon_0}$  本に対して、  $\frac{Q}{\epsilon_r \epsilon_0}$  本なので、  $\frac{1}{\epsilon_r}$  になっている。

- ⑤ 不導体外部の  $\frac{Q}{\epsilon_0}$  本に対して、不導体内は  $\frac{Q}{\epsilon_r \epsilon_0}$  本なので、断ち切られた電気力線

は  $(\frac{Q}{\epsilon_0} - \frac{Q}{\epsilon_r \epsilon_0})$  本である。電気力線1本あたり電気量  $\epsilon_0$  なので、  $(\frac{Q}{\epsilon_0} - \frac{Q}{\epsilon_r \epsilon_0})$  本は

$$(\frac{Q}{\epsilon_0} - \frac{Q}{\epsilon_r \epsilon_0}) \times \epsilon_0 = (1 - \frac{1}{\epsilon_r}) Q$$

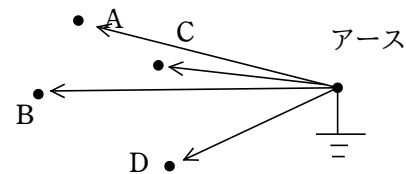
# 電場

## 36. 電位

(1) 山の高さは $m$ で表される。登山の苦しさは上に上がる仕事（重力による位置エネルギー）で表される。地球の最高峰はエベレスト山で8850mで、火星の最高峰は21000mのオリンポス山である。火星に空気があり地球と同じように登山するとき、エベレスト山とオリンポス山の登山の苦しさについて以下の問いに答えよ。火星の重力加速度の大きさは地球の重力加速度の大きさの $\frac{1}{3}$ とする。

- ① エベレスト山とオリンポス山はどちらの標高が高いか
  - ② 火星表面に立ったとき、自分の体重は地球上の何倍になるか
  - ③ 地球上でエベレスト山に登山するのと、火星上でオリンポス山に登山するのはどちらが苦しい（エネルギーを多く使う）か
  - ④ 体重の大きい人と体重の小さい人は同じ山に登山するとき、どちらの人がより苦しい（エネルギーを多く使う）か
- ・ 体重が違えば登山の苦しさ異なるので、山の高さを登山の苦しさで表すとすれば同じ体重で表さなければならない。そこで、山の高さを「1kgの物体を運ぶ仕事」と定義することにする。
- ⑤ エベレスト山とオリンポス山はどちらが高いといえるか。

(2) 電気の世界で各電荷が力を受けて動く様子を山の斜面を転がるイメージで考えることにする。電気の世界で山の高さ（電位・単位[V]）を考えると、(1)と同様にして「+1Cをゆっくりと運ぶ仕事」と定義する。基準はアース（電気回路の一部を地上とつなぐこと）である。これに関して以下の問いに答えよ。



- ① アースしてある位置からA点まで外力が+1Cを運ぶとき、2Jの仕事が必要とした。この位置の電位はいくらか
- ② アースしてある位置からB点まで外力が+2Cを運ぶとき、6Jの仕事が必要とした。この位置の電位はいくらか
- ③ アースしてある位置からC点まで外力が+1Cを運ぶとき、-2Jの仕事が必要とした。この位置の電位はいくらか
- ④ アースしてある位置からD点まで外力が-2Cを運ぶとき、6Jの仕事が必要とした。

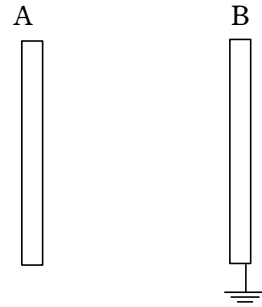
## 解説

- (1) ① オリンポス山 ②  $\frac{1}{3}$
- ③ 火星上では体重が $\frac{1}{3}$ になるので、21000mの山は地球上の7000mの山に相当する。よって、エベレスト山の方が多くのエネルギーを使う
- ④ 位置エネルギーは $mgh$ なので、体重（ $mg$ ）のある人のほうが多くのエネルギーを使う
- ⑤ エベレスト山の方が高いといえる。
- (2) ① 2V ② 3V ③ -2V
- ④ 負電荷の場合正電荷と逆向きに力が作用するので+1Cを運ぶ場合と仕事の符号が逆になる。よって、+2Cを運んだとすれば-6Jの仕事が必要であり、+1Cを運んだとすれば-3Jの仕事が必要である。よって、-3V
- (3) ① 電位はアースしているところを基準とする。0V  
 ② 電位は+1Cを運ぶ仕事なので、V[J]  
 ③ 3倍必要なので、3V[J] ④ 力の方向が逆になるので -V[J]  
 ⑤ 逆方向に運ぶので仕事の符号は逆になる。-V[J]  
 ⑥ V[J] ⑦ qV[J] ⑧ -qV[J]
- (4) ① 電場は+1Cに作用する力なので、電気力線と同じ方向（右向き）にE[N]。  
 ② 仕事は力と距離の積なので、Ed[J]  
 ③ アースから+1Cを運ぶ仕事は電位であり、任意の位置から運ぶ仕事は電位差である。この場合Bはアースされていないので、②の仕事は電位でなく電位差である。Ed[V]  
 ④ 電気力線の方向にqE[N]  
 ⑤ qEd[J]  
 ⑥ 右向きqE[N]  
 ⑦ AからBに直に移動するので、ゆっくりと運ぶには逆向きに力をくわえなければならない。よって、-qEd[J]  
 （運ぶ仕事というのは外力がする仕事であって、クーロン力がする仕事ではない。）
- (5) ① A~B=1J、B~C=0J、C~D=-2J、D~E=-1J、E~A=2J  
 電位差は+1Cを運ぶ仕事なので、各位置間の電位差がそのまま仕事となる。  
 ② 1+0-2-1+2=0J 元へ戻ると電位差は0なので0J  
 ③ A→B→C→D=1+0-2=-1J A→D=-1J
- (6) ① V[J]  
 ② 正の仕事であるから動かす方向と同じ方向の力を加えている。左向き。  
 大きさは仕事を距離で割ればよい。 $\frac{V}{d}$ [N]  
 ③ 外力がゆっくり運んでいるので、クーロン力は反対向きにかかっている。右向き

# 電場

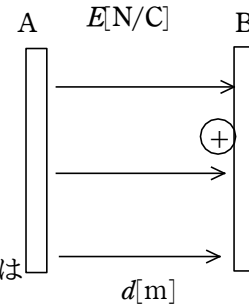
この位置の電位はいくらか

- (3) 金属板A、Bを平行に設置し、金属板Bをアースし、金属板Aの電位を $V[V]$ に調整した。このとき以下の問いに答えよ。



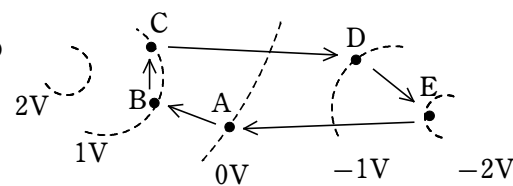
- ① 金属板Bの電位はいくらか
- ② 金属板BからAに外力が $+1C$ の電荷を運ぶのに必要な仕事はいくらか
- ③ 金属板BからAに外力が $+3C$ 運ぶのに必要な仕事はいくらか
- ④ 金属板BからAに外力が $-1C$ 運ぶのに必要な仕事はいくらか
- ⑤ 金属板AからBに外力が $+1C$ 運ぶ仕事はいくらか
- ⑥ 金属板AからBに外力が $-1C$ 運ぶ仕事はいくらか
- ⑦ 金属板BからAに外力が $+q[C]$ 運ぶ仕事はいくらか (公式)
- ⑧ 金属板AからBに外力が $-q[C]$ 運ぶ仕事はいくらか

- (4) 金属板AとBを用意し、金属板AとBの間に一様な電場 $E[N/C]$ となるようにAの電気量を調整した。A、Bの極板間距離は $d[m]$ として以下の問いに答えよ。



- ・ 極板Bの左側表面に $+1C$ の電荷Cを置いた。
- ① 電荷Cに作用する力はどの向きにどの大きさか
- ② 外力が電荷Cを極板Aの位置まで運ぶのに必要な仕事はいくらか
- ③ 極板Aの電位差を $E$ 、 $d$ で表せ。(公式)
- ・ 極板Bの左表面に $+q[C]$ の電荷Dをおいた。
- ④ この電荷Dに作用するクーロン力の方向と大きさを答えよ。
- ⑤ この電荷をAまで運ぶのに必要な仕事はいくらか
- ・ 極板Aの右表面に $+q[C]$ の電荷Eを置いた。
- ⑥ この電荷に作用するクーロン力の方向と大きさを求めよ。
- ⑦ この電荷を極板Bにゆっくりと運ぶ仕事はいくらか

- (5) 右図の点線は電位の等しい位置をつないだ線で近くの数値はその位置の電位を表している。点A~Eは $+1C$ の電荷をこの順番で動かした。これについて以下の問いに答えよ。



- ① A~B、B~C、C~D、D~E、E~Aに動かす仕事はそれぞれいくらか
- ② Aから始まってAに戻ったとき、この間にした仕事の合計はいくらか
- ③ A→B→C→Dと移動させる仕事とAから直接Dに運ぶ仕事をそれぞれ求めよ。

大きさは②と等しい。  $\frac{V}{d}[N]$

- ④ 電場は $+1C$ に作用するクーロン力なので、右向き $\frac{V}{d}[N/C]$ 。

単位は $[V/m]$ でも良い

- ⑤ 等電位なので、仕事0J ⑥ 距離が $s[m]$ なのに仕事0なので、力は0[N]

- ⑦ クーロン力が右向き $\frac{V}{d}[N]$ なので、左向き $\frac{V}{d}[N]$ の力を加えなければCに運べない。

- ⑧ ①と同じ $V[J]$

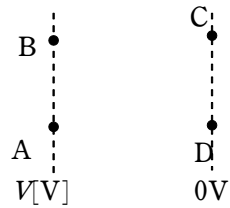
- ⑨ DからCの方向には力が作用していないので、この方向に電気力線は存在しない。電荷に作用する力が右向きなので、電気力線の方向は右向きとなる。よって、等電位線と電気力線は互いに直角関係にある。

# 電場

6) 右図C,Dは電位0Vの等電位線上にあり、

A,BはV[V]の等電位線上にある。四角形ABCDは  
長方形であり、 $AD=d[m]$ 、 $AB=s[m]$ である。

最初D点に+1Cの電荷が存在し、この領域の電場は  
一様である。以下の問いに答えよ。



・ Dにある電荷をAに運ぶとき

- ① Dにある電荷をAに運ぶ仕事はいくらか。
- ② Dの電荷をAに運ぶために必要な力の大きさと方向を答えよ。
- ③ この電荷に作用しているクーロン力の大きさと方向を答えよ。
- ④ この領域の電場の大きさと方向を答えよ。

・ Dにある電荷をCに運ぶとき

- ⑤ 仕事はいくらか
- ⑥ このとき電荷に加えた力のDC方向の成分はいくらか
- ⑦ DA方向の力の成分はいくらか

・ Dにある電荷をBに運ぶとき

- ⑧ 仕事はいくらか

・ 電気力線と等電位線の関係

- ⑨ 電気力線と等電位線のなす角度は何度になるか

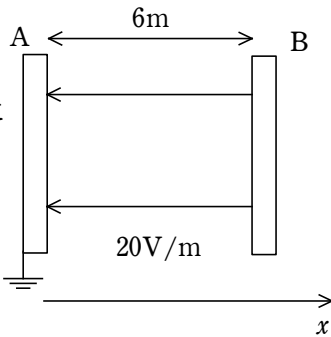
37. 電場と電位との関係

(1) 金属板A,Bがあり、Aをアースする。A,B間を

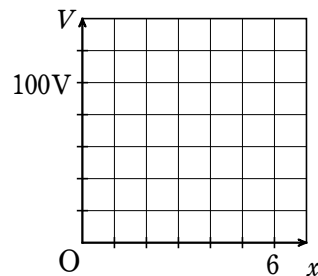
一様な電場左向き $20V/m$ になるように金属板B  
の電荷を調整した。AB間は $6m$ である。

金属板Aからの距離を $x$ とし、金属板Aの右表面に  
+1Cの電荷があるととして以下の問いに答えよ。

- ① この電荷に作用するクーロン力はどちら向きに  
何Nか
- ② この電荷を極板Bまでゆっくり運ぶために必要  
な力はどちら向きに何Nか



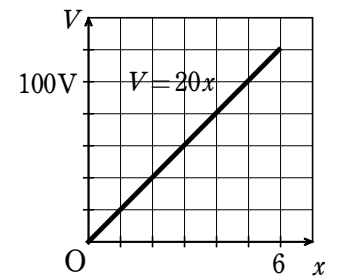
- ③ Aの電位はいくらか
- ④ Bの電位はいくらか
- ⑤ この電荷をAから右方向に $x[m]$ 運ぶのに必要な仕事はいくらか。 $x$ で表せ。
- ⑥ Aから $x$ 離れた位置の電位はいくらか
- ⑦ 縦軸に電位をとったグラフを完成せよ。
- ⑧ このグラフの傾きはいくらか
- ⑨ このグラフの傾きは何を意味しているか



(2) 断面積 $S$ の金属板A,Bにそれぞれ $+Q$ 、 $-Q$ の電荷を

解説

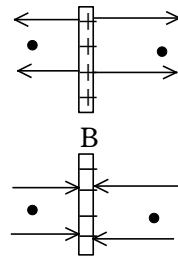
- (1) ① 左向き20N ② 右向き20N ③ 0V ④  $20 \times 6 = 120V$   
⑤  $20x[J]$  ⑥  $20x[V]$   
⑦ 右のグラフ  
⑧ 20  
⑨ 電位の傾きで電場の強さである。



- (2) ① 右側 右向き  $\frac{Q}{2\epsilon_0 S}$ 、左側 左向き  $\frac{Q}{2\epsilon_0 S}$   
② 右側 左向き  $\frac{Q}{2\epsilon_0 S}$ 、左側 右向き  $\frac{Q}{2\epsilon_0 S}$   
③ 右側 右向き  $\frac{Q}{2\epsilon_0 S}$ 、左側 左向き  $\frac{Q}{2\epsilon_0 S}$  (+1Cに作用する力が電場である。)  
④ 右側 左向き  $\frac{Q}{2\epsilon_0 S}$ 、左側 右向き  $\frac{Q}{2\epsilon_0 S}$   
⑤ 0 ⑥  $\frac{Q}{2\epsilon_0 S} + \frac{Q}{2\epsilon_0 S} = \frac{Q}{\epsilon_0 S}$  ⑦ 0  
⑧  $0, \frac{Q}{\epsilon_0 S}, 0$  電場は金属板間しか存在しない。

# 電場

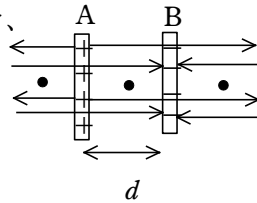
帯電させた。電気量 $\epsilon_0$ より電気力線が1本出ているとする。  
この金属板から一様な電場が生じている（電気力線が平行）  
として以下の問いに答えよ。



- ① 金属板Aの右側と左側の電場の方向及び強さをそれぞれ答えよ。
- ② 金属板Bの右側と左側の電場の方向及び強さをそれぞれ答えよ。
- ③ 金属板Aの右側及び左側の図の黒点の位置に+1Cの電荷を置いた。この電荷に作用する力の大きさ及び方向をそれぞれ答えよ。
- ④ 金属板Aの右側及び左側の図の黒点の位置に+1Cの電荷を置いた。この電荷に作用する力の大きさ及び方向をそれぞれ求めよ。

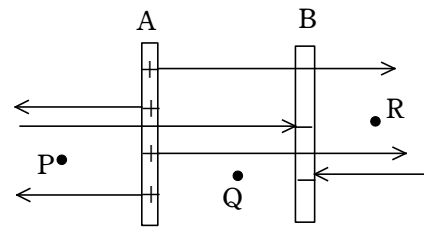
・上の金属板A,Bを $d$ 離して右図のように並べた。

- ⑤ 金属板Aの左側の黒点に+1Cの電荷を置いたとき、金属板A、Bから受ける力の合力はいくらか
- ⑥ 金属板AとBの間の黒点に+1Cの電荷をおいたとき、金属板A、Bから受ける力の合力はいくらか



- ⑦ 金属板Bの右側の黒点に+1Cの電荷を置いたとき、金属板A、Bから受ける力の合力はいくらか
- ⑧ Aの左側、A,Bの間、Bの右側の電場の強さはそれぞれいくらか
- ⑨ 金属板AとBの電圧はいくらか

- (3) 金属板Aを+2Q、金属板Bを-Qに帯電させ、2枚の金属板を距離 $d$ 離して設置した。金属板A,Bともに面積は $S$ で、電気量 $\epsilon_0$ より電気力線1本出るとして以下の問いに答えよ。



- ① 点Pが極板A、Bから受ける電場の強さ及び合成した電場の強さを求めよ。
- ② 点Qが極板A,Bから受ける電場の強さ及び合成した電場の強さを求めよ。
- ③ 点Rが極板A,Bから受ける電場の強さ及び合成した電場の強さを求めよ。
- ④ 極板A,B間の電位差（電圧）を求めよ

電気力線は+極から-極に繋がっていると考えても差し支えない。

- ⑨ 電圧=電場×距離 $=\frac{Q}{\epsilon_0 S} \times d = \frac{Qd}{\epsilon_0 S}$
- (3) ① A  $\frac{2Q}{2\epsilon_0 S} = \frac{Q}{\epsilon_0 S}$  B  $\frac{Q}{2\epsilon_0 S}$  合成は差になるので、 $\frac{Q}{\epsilon_0 S} - \frac{Q}{2\epsilon_0 S} = \frac{Q}{2\epsilon_0 S}$
- ② A  $\frac{Q}{\epsilon_0 S}$  B  $\frac{Q}{2\epsilon_0 S}$  A,Bの電場は同じ方向なので、 $\frac{Q}{\epsilon_0 S} + \frac{Q}{2\epsilon_0 S} = \frac{3Q}{2\epsilon_0 S}$
- ③ A  $\frac{2Q}{2\epsilon_0 S} = \frac{Q}{\epsilon_0 S}$  B  $\frac{Q}{2\epsilon_0 S}$  合成は差になるので、 $\frac{Q}{\epsilon_0 S} - \frac{Q}{2\epsilon_0 S} = \frac{Q}{2\epsilon_0 S}$
- ④ ②より、 $\frac{3Q}{2\epsilon_0 S} \times d = \frac{3Qd}{2\epsilon_0 S}$
- (4) ① E ② E ③ 同じ傾きで距離が2倍になるので2V
- ④  $\frac{Q}{\epsilon_0}$  ⑤  $\frac{Q}{\epsilon_0}$  ⑥  $\frac{Q}{\epsilon_0 S}$  ⑦ Ed ⑧  $\frac{Qd}{\epsilon_0 S}$

# 電場

(4) 右図 I は面積  $S$  の金属板 A を  $-Q$  に帯電させ  
 同じ面積の B を  $+Q$  に帯電させ距離  $d$   
 離して設置した様子を示している。

図 I

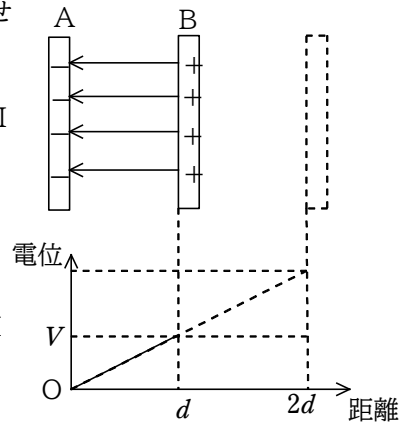
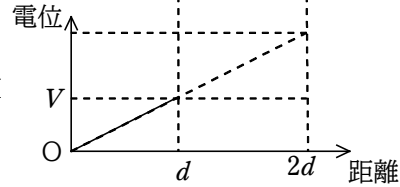


図 II は極板 A を 0 とした電位を A から  
 の距離との関係で示したものである。こ  
 の状態で、極板の電気量が変化しない  
 ようにして、極板間隔を2倍になるように  
 極板 B を平行移動させた図が図 III で  
 ある。電気量  $\epsilon_0$  より電気力線

図 II



1本出るとして以下の問いに答えよ。

・ 図 I の極板間の電場の強さを  $E$  とする。

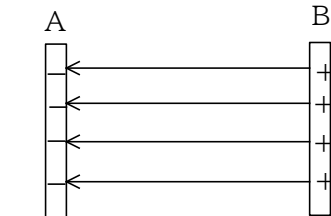
① 図 II のグラフの傾きはどうか

$E$  で表わせ。

② 図 III の電場の強さはどうか

$E$  で表わせ。

図 III



・ 図 I の極板 B の電位が  $V$  であった時、

③ 図 II の極板 B の電位はどうか  $V$  で表わせ。

④ 図 I で極板 B から出ている電気力線数はどうか。  $Q, \epsilon_0$  で表わせ。

⑤ 図 III で極板 B から出ている電気力線数はどうか。  $Q, \epsilon_0$  で表わせ。

⑥ 電場の強さ  $E$  を  $Q, \epsilon_0, S$  で表わせ。

⑦ 電位  $V$  を  $E, d$  で表わせ。

⑧ 電位  $V$  を  $Q, \epsilon_0, S, d$  で表わせ。

## 38. 電場と電位の関係 2

### 解説

(1) ① 電池をつないだままであるので、電圧は  
 変わらない。  $V$

②  $V = Ed$  より、  $V$  が一定なので、  $E$  と  $d$  は  
 反比例する。よって、  $\frac{1}{2}E$

③ 電場の強さが半分になっているので  
 電気力線数も半分になっている。  
 元が4本あったので、2本になった。

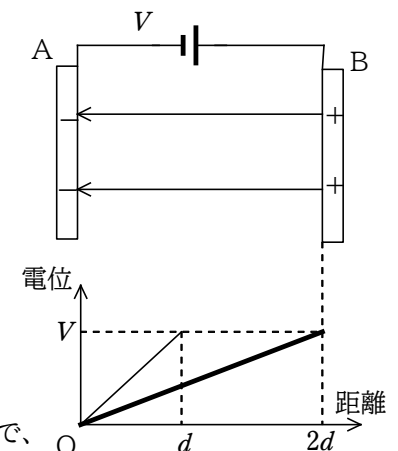
④ 電気力線が半分になったので、電気量も  
 半分になっている。よって、  $+2\epsilon_0$

⑤ 最初  $+4\epsilon_0$  だったのが  $+2\epsilon_0$  になっているので、  
 $2\epsilon_0$  減少している。この減少分が流れたことになる。

$2\epsilon_0$

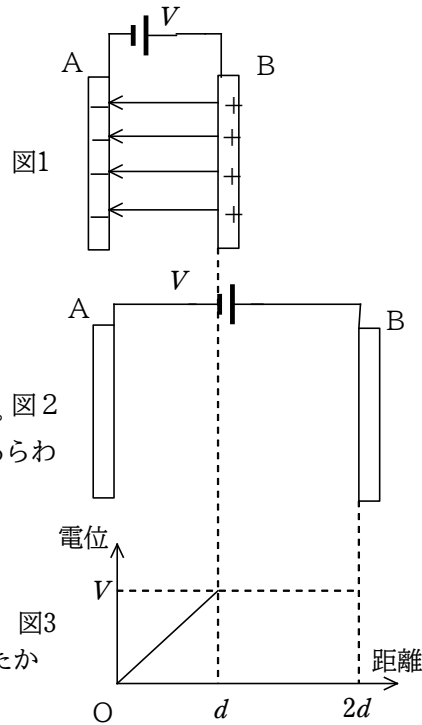
⑥ 右上図 (電場の強さが半分なので電気力線数も半分)

⑦ 右下図 (電場の強さが半分なのでグラフの傾きも半分)



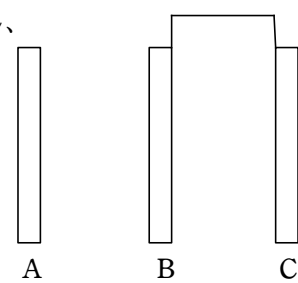
# 電場

- (1) 距離 $d$ 離れた金属板ABを平行に置き、電圧 $V$ をかけたところ、Aが $-4\epsilon_0$ 、Bが $+4\epsilon_0$ の電荷がたまってきた。AB間の電場の強さは一様で $E$ であった。この状態を表しているのが図1である。この状態で電圧を一定に保ったまま金属板Bを金属板Aから距離 $2d$ になるまで引き離れた。この状態が図2である。



- 図3は図1の場合と図2の場合の極板Aの電位を0としたAからの距離と電位との関係を示したものである。グラフは図1の場合のグラフとなっている。これについて以下の問いに答えよ。図2
- ① 図2において極板Bの電位はいくらか。 $V$ であらわせ。
  - ② 図2において極板間の電場の強さはいくらか $E$ で表せ。
  - ③ 図2において電気力線は何本になったか
  - ④ 図2において極板Bの電気量はいくらになったか
  - ⑤ 極板Bを動かす間に極板Bから電池に電気がいくらか流れたか。
  - ⑥ 図2に電気力線を記入せよ。
  - ⑦ 図3に図2の場合の電位のグラフを記入せよ。

- (2) 電荷を持たない同じ金属板BとCを導線で直結し、平行に設置した。この状態で、帯電している電気量を自由に変えることのできる金属板Aを金属板Bの隣に右図のように設置した。



- この状態で金属板Aの電荷を以下のように変化させるとき、以下の問いに答えよ。
- ・ 金属板Aを $+4\epsilon_0$ に帯電させた。

- ① 金属板Aから何本の電気力線が出ているか
  - ② 金属板Aの右側には電気力線が何本出ているか。
  - ③ 金属板Bは金属板Aから何本の電気力線を受けているか
  - ④ 導線でつなぐということは電位が等しいということである。金属板BC間には電気力線は何本あるか。
  - ⑤ 金属板Bはいくらに帯電しているか
  - ⑥ 金属板Cはいくらに帯電しているか
  - ⑦ 金属板Aの左側の電気力線と、金属板Cの右側の電気力線本数はどのような関係にあるか。また、双方の電気力線の合計と金属板A, B, Cの電気量の合計との関係を答えよ。
- ・ この状態で金属板Cをアースした。

- (2) ① 電気力線は電気量 $\epsilon_0$ より1本なので、 $4\epsilon_0$ は4本となる。

② 電気力線は金属板の両面に等しく出るので、左右ともに2本。よって、右側2本

③ ②より2本

④ 電気力線があれば電子が加速する。加速すれば運動エネルギーを得るので電圧があることになる。電圧がないということは電気力線がないということである。0本

⑤  $-2\epsilon_0$  ⑥  $+2\epsilon_0$

⑦ A, B, C3枚の金属板を限りなく近づけて遠くから見た場合、この3枚の金属板は1枚に見える。1枚の金属板では左右に同じ電気力線数になるので、Aの左側とCの右側は必ず同じ電気力線数になる。

この考え方に立てば、A, B, Cの合計電気量が $+4\epsilon_0$ なので、外へ出る電気力線数は4本となる。よって、Aの左側2本、Cの右側2本となるわけである。

答え..Aの左側とCの右側の電気力線数は等しい。

全体の電気量総数から算出した電気力線数と金属板から外に出る電気力線数は等しい。

⑧ アースをすると、必要な電荷がアースからやってくるので、A,B,Cの電荷の和は0になる。そのために外部に出る電気力線はなくなる。金属板Aからの電気力線はすべてBにつながる。よって、Bの電荷は $-4\epsilon_0$ 。Cの右側は外部になるので、電気力線0、左側はBと同電位なのでこれも電気力線0。よって、Cは電荷0

⑨ アースをはずし、金属板Aを取り除いた場合、金属板Bに残っていた $-4\epsilon_0$ の半分が金属板Cに移動する。

よって、金属板B $=-2\epsilon_0$ 、金属板C $=+2\epsilon_0$

⑩ 導線で繋がっているの電位は等しく電気力線は存在しない

⑪ 右図のように2本

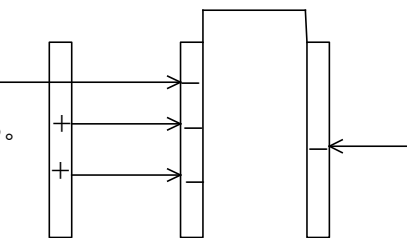
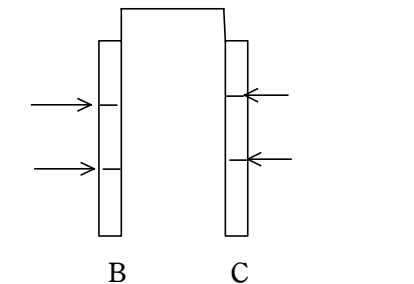
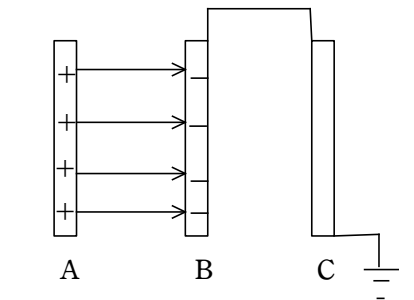
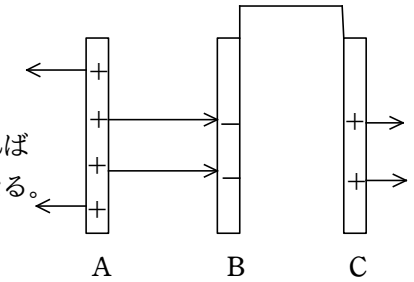
⑫  $-2\epsilon_0$

⑬ それぞれ1本

⑭ 金属板Aは $+2\epsilon_0$ なので、金属板Bの $-2\epsilon_0$ の電荷が電気力線でつながり外部からは見えなくなる。残りの $-2\epsilon_0$ がB,Cに等分配される。

よって、金属板B $=-3\epsilon_0$ 、C $=-\epsilon_0$

⑮ 電位が等しいので0本



# 電場

- ⑧ 電気力線で繋がっている電荷は動けないが、繋がっていない電荷は動く。金属板B, Cはそれぞれいくりに帯電しているか
- ・ アースをはずし、金属板Aを取り除いた。
- ⑨ 金属板B, Cはそれぞれいくりに帯電しているか
- ⑩ BC間の電気力線は何本か
- ⑪ Cの右側の電気力線は何本か
- ・ 金属板Aを $+2\epsilon_0$ で帯電させ、先ほどと同じところに設置した。
- ⑫ 金属板A, B, Cの合計電気量はいくらか
- ⑬ 金属板Aの左側, Cの右側の電気力線は何本か
- ⑭ 電気力線が+と-でつながった場合。外部から見ると電荷がないのと同じになる。この考え方を基にして金属板B, Cの電気量を求めよ。
- ⑮ 金属板BC間の電気力線は何本か
- ⑯ 金属板AB間の電気力線は何本か
- ・ 金属板Aを $-2\epsilon_0$ で帯電させた
- ⑰ 金属板A, B, Cの合計電気量はいくらか
- ⑱ 金属板Aの左側とCの右側の電気力線はそれぞれ何本か
- ⑲ 金属板 B, Cの電気量をそれぞれ答えよ。

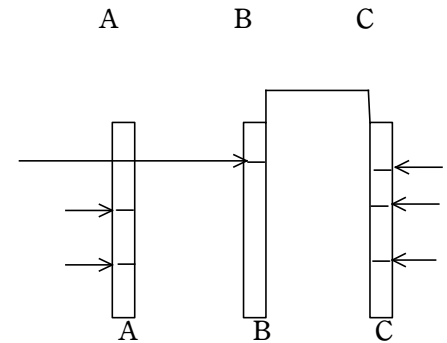
(3) 右図のような箔検電器に対して次のような実験を行った。

このときの金属箔の開きについて以下の問いに答えよ。  
最初金属箔は閉じていたとする。



- ・ 正に帯電した不導体棒を金属板に近づけた。
- ① 金属箔はどちらの電気に帯電するか
- ② 金属箔はどうなるか
- ・ 不導体棒を近づけたままで金属板を指で触った。
- ③ 金属箔はどうなるか
- ④ 金属板にたまっている電荷はどうなったか
- ・ 金属板から指を離し、続けて不導体棒を取り去った。
- ⑤ 金属箔はどうなるか
- ⑥ 金属箔にたまっている電荷の符号を答えよ。
- ・ 負に帯電した不導体棒を金属板に近づけた。
- ⑦ 金属箔はどうなるか
- ・ 正に帯電した不導体棒を近づけると箔は一度閉じた。その状態から更に不導体棒を近づけた。
- ⑧ 金属箔はどうなるか
- ⑨ 金属箔に帯電している電荷の符号を答えよ。

⑯ Aの+電荷の電気力線が2本。金属板Bの電気力線が1本で合計3本



- ⑰ B, Cで $-4\epsilon_0$ なので、A, B, Cで $-6\epsilon_0$
- ⑱ A, B, Cを1枚と考えて左右ともに3本となる。
- ⑲ BC間の電気力線は0なので、Cは $-3\epsilon_0$ よって、金属板Bが $-\epsilon_0$

- (3) ① 正に帯電した不導体棒を近づけたのであるから金属板は静電誘導を起こし、金属板は負に、金属箔は正に帯電する。よって、正に帯電
- ② 金属箔は開く
- ③ 指で触るとアースしたことになるので、不導体棒の電荷と電気力線で繋がっている金属板の電荷以外は流れて消滅する。よって、箔の電荷がなくなるので箔は閉じる
- ④ 金属板の負電荷は不導体棒の電荷と電気力線で繋がっているので、そのままである。
- ⑤ 不導体棒を取り去ったので、金属板の負電荷が自由に動けるようになり、金属箔にもやってくるので、金属板は開く、しかし、金属板にも残るので、前よりは開きは小さい。よって、金属箔は開く。
- ⑥ ⑤より負電荷
- ⑦ 負電荷の不導体棒を近づけたので、金属板の負電荷が金属箔にやってきて金属箔の開きが大きくなる。
- ⑧ 正電荷に帯電した不導体棒を近づけたとき、金属箔の負電荷がこの不導体棒にひきつけられ、金属板のほうに移動し、金属箔に負電荷がなくなるので、金属箔が閉じる。不導体棒を更に近づけた場合、金属板の負電荷が更に多くなるので、金属箔から負電荷が引き抜かれ金属箔が正電荷になる。よって箔は開く。
- ⑨ ⑧より正電荷



# 電場

## 39. 金属板間に導体や不導体を挿入する問題

(1) 距離 $d$ 離れた2枚の金属板A,BにAは $-Q$ 、Bは $+Q$ の電荷を帯電させた。これを示したのが図1である。図2は金属板AB間に厚さ $\frac{d}{3}$ の金属板をその中央部に挿入したものである。

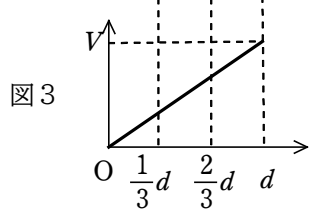
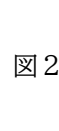
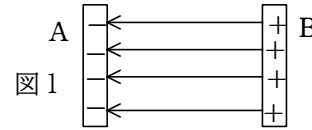


図3は図1の状態にある金属板間の電位を金属板Aを0としてグラフで表わしたものである。図1の金属板AB間の電場の強さを $E$ として以下の問いに答えよ。

- ① 図2で中央に挿入した金属板の左右端にはそれぞれいくらの電荷が生じているか
- ② 図2で金属板Aと挿入した金属板間の電場の強さはいくらか $E$ を用いて表わせ。
- ③ 挿入した金属板内の電場の強さはいくらか
- ④ 図2に電気力線の図を図1に習って書き込め
- ⑤ 図3に図2における電位のグラフを書き込め
- ⑥ 金属板AB間の電圧は金属板を挿入することにより最初の何倍になったか

(2) 距離 $d$ 離れた2枚の金属板A,BにAは $-Q$ 、Bは $+Q$ の電荷を帯電させた。これを示したのが図1である。図2は金属板AB間に厚さ $\frac{d}{3}$ 、比誘電率2の不導体をその中央部に挿入したものである。C、Dは不導体の両端を表し、AB間の3等分点である。点PはCDの中点上にある。

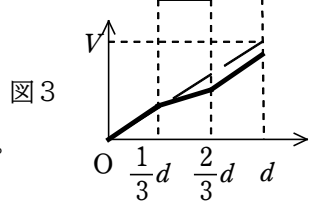
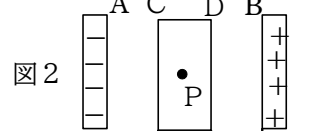
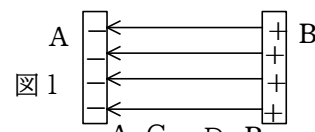


図3の破線は図1の状態にある金属板間の電位を金属板Aを0としてグラフで表わしたものであり太線は図2の電位のグラフである。

図1の金属板AB間の電場の強さを $E$ として以下の問いに答えよ。

- ① 金属板と不導体の間の空間の電場の強さを $E$ で表せ。
- ② 不導体内の電場の強さを $E$ で答えよ。
- ③ 図2で中央に挿入した不導体のC、D端にはそれぞれいくらの電荷が生じているか
- ④ 図2に電気力線の図を図1に習って書き込め
- ⑤ 図3において図2の太線AC間のグラフの傾きは $E$ である。CD間のグラフの傾きはいくらか

### 解説

(1) ① 静電誘導なので同じ電気量が生じる。

左端 $+Q$ 、右端 $-Q$

② 金属板を挿入しても電気力線の数是不変なので、電場は図1と同じである。

よって、 $E$

③ 金属板内は自由電子が挿入直後に動いた後は動かなくなっているので、自由電子には力が作用していない。力が作用していないので、電気力線は存在せず、電場は0

④ ⑤ 右図の通り

⑥ グラフの通り、電圧は $\frac{1}{3}$ になっている。

(2) ① 右図の通り電気力線数が図1と変わらないので、電場の強さは図1と同じである。よって、 $E$

② 比誘電率2であるから電場の強さは $\frac{1}{2}$ になる。

よって、 $\frac{1}{2}E$

③ 電場の強さが $\frac{1}{2}$ なので、電気力線が半分になる。

そのため、全電荷の半分の電荷が生じていることになる。よって、 $C = +\frac{1}{2}Q$ 、 $D = -\frac{1}{2}Q$

④ 右図の通り

⑤ 電場の強さが $\frac{1}{2}$ になっているので、傾きも $\frac{1}{2}E$

⑥ 図1では傾き $E$ なので、 $V = Ed$ の関係が成立する。

C点では傾き $E$ で距離 $\frac{1}{3}d$ なので、 $E \cdot \frac{1}{3}d = \frac{1}{3}V$

CDの電位差はD点ではC点より傾き $\frac{1}{2}E$ で距離 $\frac{1}{3}d$ なので、 $\frac{1}{2}E \cdot \frac{1}{3}d = \frac{1}{6}V$

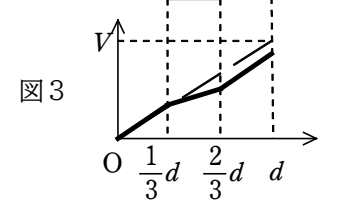
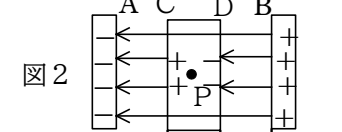
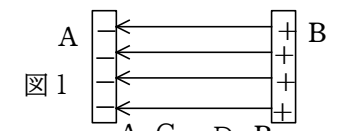
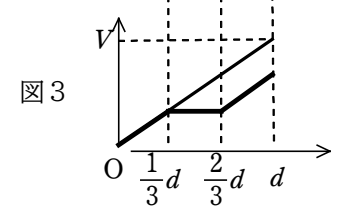
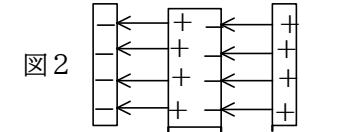
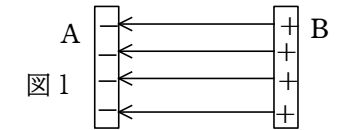
よって、電位は $\frac{1}{3}V + \frac{1}{6}V = \frac{1}{2}V$

P点はCDの電圧の半分なので、 $\frac{1}{3}V + \frac{1}{2} \times \frac{1}{6}V = \frac{5}{12}V$

BはDより更に $\frac{1}{3}V$ 高くなっているため、 $\frac{1}{3}V + \frac{1}{6}V + \frac{1}{3}V = \frac{5}{6}V$

(3) ① 電場の強さがグラフの傾きである。 $x$

② 公式 $V = Ed$ より、 $x \times \frac{1}{3}d = \frac{1}{3}xd$



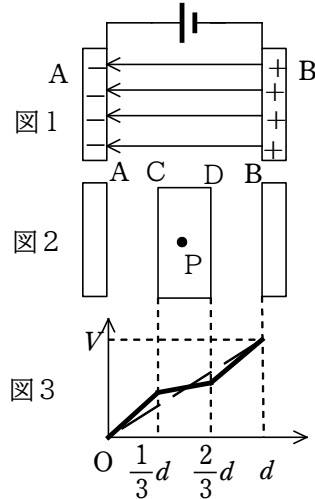
# 電場

⑥ 図1において金属板Bの電位がVであったとすると、点C, P, D, Bの電位をVを用いて表せ。

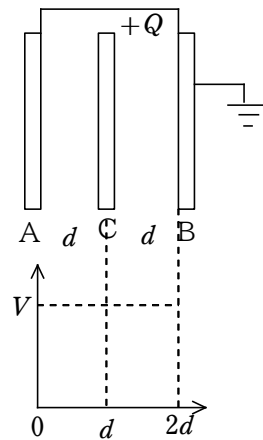
(3) (2)と同じ装置を電圧Vの電池につないだままで比誘電率2の誘電体を(2)と同じように挿入した。図3はそのときの電位を表したグラフである。これを見て以下の問いに答えよ。

AC間の電場の強さをxとする。

- ① 図3の太線グラフのAC間の傾きをxで表せ。
- ② 点Cの電位をx,dで表せ。
- ③ CD間の傾きをxで表せ。
- ④ CD間の電圧をx,dで表せ。
- ⑤ DB間のグラフの傾きをxで表せ。
- ⑥ DB間の電圧をx,dで表せ。
- ⑦ AB間の電圧はVで最初と変わらない。このことと、②、④、⑥の結果を用いてxをV,dで表せ。
- ⑧ 図1における電場の強さはいくらかV,dで表せ。
- ⑨ 金属板Aの電荷は図1に比べ図2では何倍になっているか



(4) 断面積Sの金属板A, Bを距離2d離して平行に設置し金属板Bをアースし、AとBを導線で直結した。この金属板間に厚さの無視できる薄い金属板Cを電気量+Qに帯電させて金属板間中央に挿入した。右図はこの実験装置の様子を示したものであり、下のグラフは各金属板間の電位を示すものである。真空誘電率をε<sub>0</sub>として、以下の問いに答えよ。



- ① 金属板A, Bの電位はいくらか
- ② 金属板Cの左右に出る電気力線数はそれぞれ何本か。Q, ε<sub>0</sub>を用いて答えよ。
- ③ AC間BC間の電場の強さはそれぞれいくらかQ, S, ε<sub>0</sub>で答えよ。
- ④ AC間BC間の電位の傾き(大きさ)はいくらか。Q, S, ε<sub>0</sub>で答えよ。
- ⑤ 極板Cの電位をVとしたとき、AC間BC間の電場の強さをV,dで表せ。
- ⑥ 上のグラフに電位を示すグラフを書き込め
- ⑦ ④⑤より、極板Cの電位VをQ, S, ε<sub>0</sub>, dで表せ。

(4) 断面積Sの金属板A, B, C3枚を用意し、金属板B

③ 比誘電率2なので、電場の強さは半分である。よって、 $\frac{1}{2}x$

④  $\frac{1}{2}x \times \frac{1}{3}d = \frac{1}{6}xd$  ⑤ x ⑥  $x \times \frac{1}{3}d = \frac{1}{3}xd$

⑦ 各電圧を加えると、 $\frac{1}{3}xd + \frac{1}{6}xd + \frac{1}{3}xd = \frac{5}{6}xd = V$

よって、 $x = \frac{6V}{5d}$

⑧  $\frac{V}{d}$

⑨ 極板Aの周辺の電場の強さが $\frac{V}{d}$ から $x = \frac{6V}{5d}$ と $\frac{6}{5}$ 倍になっている。

これは、電気量が $\frac{6}{5}$ 倍になったためである。

(4) ① アースしてあるので0

② 極板Bがアースしてあるので、すべての極板の電荷の和は0になる。A, Cが合わせて電気量が+2Qなので、極板Bは-2Qとなる。

③ ε<sub>0</sub>は電気力線一本あたりの電気量なので、 $\frac{2Q}{\epsilon_0}$ 本

④  $\frac{Q}{\epsilon_0}$  ⑤ ③より、 $\frac{2Q}{\epsilon_0 S}$

⑥ ④より、 $\frac{Q}{\epsilon_0 S}$

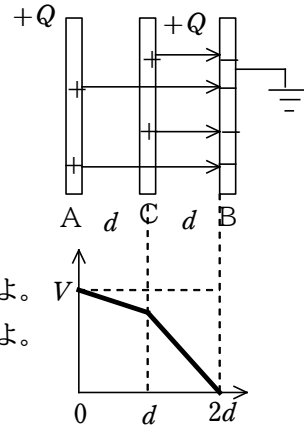
⑦ 金属板CはBから電位の傾き $\frac{2Q}{\epsilon_0 S}$ で距離dなので、電圧(電位)は $\frac{2Qd}{\epsilon_0 S}$

AC間の電圧は電位の傾き $\frac{Q}{\epsilon_0 S}$ で距離dなので、電圧(電位)は $\frac{Qd}{\epsilon_0 S}$

よって、極板Aの電位は $\frac{2Qd}{\epsilon_0 S} + \frac{Qd}{\epsilon_0 S} = \frac{3Qd}{\epsilon_0 S}$

# 電場

をアースし、A、Cをそれぞれ、電気量 $+Q$ で帯電させ、右図のように距離 $d$ 離して平行に設置した。下のグラフはこのときのAB間の電位を示したグラフである。真空誘電率を $\epsilon_0$ として以下問いに答えよ。



- ① 金属板Bの電位はいくらか
- ② 金属板Bにたまっている電荷はいくらか。符号を含めて $Q$ を用いて答えよ。
- ③ 金属板Bに届いている電気力線は何本か。 $Q$ 、 $\epsilon_0$ で答えよ。
- ④ 金属板Aから出ている電気力線は何本か。 $Q$ 、 $\epsilon_0$ で答えよ。
- ⑤ BC間の電場の強さはいくらか。 $Q$ 、 $\epsilon_0$ 、 $S$ で答えよ。
- ⑥ AC間の電場の強さはいくらか。 $Q$ 、 $\epsilon_0$ 、 $S$ で答えよ。
- ⑦ 金属板A、Cの電位はいくらか。 $Q$ 、 $\epsilon_0$ 、 $S$ 、 $d$ で答えよ。

## 40. 点電荷の周りの電位

(1) 電位とは $+1C$ の電荷を運ぶ仕事である。

原点に $+q[C]$ の電荷Aが

存在している。この電荷から  $+q[C]$

右方向に $x$ 軸をとり、

座標 $x$ の位置に $+1C$ の点



電荷がある。クーロン定数を $k$ として、この点電荷Bについて以下の問いに答えよ。

- ① 点電荷Bに作用しているクーロン力の大きさ及び方向を答えよ。
  - ② この点電荷をゆっくりと（極めて0に近い一定の速度）左方向に運ぶために必要な力の大きさと方向を答えよ。
  - ・ 点電荷Bを左方向に運ぶ間にクーロン力の大きさが変化する。微小距離を移動させる間にはクーロン力は変化しないと考えるので、微小変位 $dx$ だけ動かすものとする。 $dx$ は変位なので、右向きが正で左向きが負である。
  - ③ この点電荷を左向きに $dx$ 動かす時の仕事を $k, Q, x, dx$ で表わせ。（符号に注意せよ）
  - ④ 電位とは $+1C$ の電荷を基準の位置から運ぶ仕事である。電位の基準は電荷が移動しても電位が変化しない位置でなければならない。点電荷の周りの電位を考える時の基準はどこに取ればよいか。
  - ⑤ 点電荷Bを④の基準から、座標 $r$ の位置まで運ぶ仕事を定積分の形で表わせ。
  - ⑥ ⑤を計算し、座標 $r$  ( $r > 0$ ) の位置の電位を $k, Q, r$ で表わせ。
  - ・ 点電荷が $x < 0$ の領域にあるとき、以下の問いに答えよ。
- 
- ⑦ 点電荷Bに作用しているクーロン力の大きさ及び方向を答えよ。
  - ⑧ この点電荷をゆっくりと（極めて0に近い一定の速度）右方向に運ぶために必要な力の大きさと方向を答えよ。
  - ⑨ この点電荷を右向きに $dx$ 動かす時の仕事を $k, Q, x, dx$ で表わせ。（符号に注意せよ）

## 解説

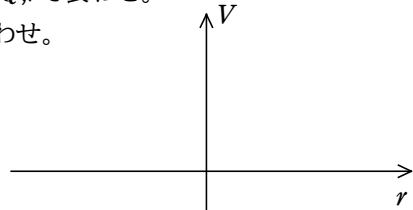
- (1) ① 右向き  $k\frac{Q}{x^2}$  ② 等速であるから力が釣りあっている。 左向き  $k\frac{Q}{x^2}$
- ③ 仕事=力×距離 である。  $k\frac{Q}{x^2} \times dx$ であるが、この仕事は動かす方向と力の向きが同じなので、正となる。しかし、 $dx < 0$ なので、  

$$-k\frac{Q}{x^2}dx$$
- ④ 無限大の彼方は電荷が移動しても電位の変化はない。よって、無限大
- ⑤  $\int_{\infty}^r -k\frac{Q}{x^2}dx$
- ⑥  $\int_{\infty}^r -k\frac{Q}{x^2}dx = -kQ \int_{\infty}^r x^{-2}dx = -kQ \left[ -\frac{1}{x} \right]_{\infty}^r = \frac{kQ}{r}$
- ⑦ 左向き  $k\frac{Q}{x^2}$  ⑧ 等速であるから力が釣りあっている。 右向き  $k\frac{Q}{x^2}$
- ⑨ 仕事=力×距離 である。  $k\frac{Q}{x^2} \times dx$ であるが、この仕事は動かす方向と力の向きが同じなので、正となる。 $dx > 0$ なので、  

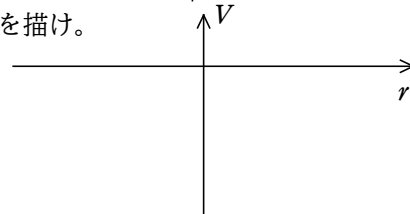
$$k\frac{Q}{x^2}dx$$
- ⑩ 無限大の彼方は電荷が移動しても電位の変化はない。よって、負の無限大
- ⑪  $\int_{\infty}^r k\frac{Q}{x^2}dx$
- ⑫  $\int_{\infty}^r k\frac{Q}{x^2}dx = kQ \int_{\infty}^r x^{-2}dx = kQ \left[ -\frac{1}{x} \right]_{\infty}^r = -\frac{kQ}{r}$
- ⑬  $r > 0$ のとき、 $V = \frac{kQ}{r}$ 、 $r < 0$ のとき $V = -\frac{kQ}{r}$

# 電場

- ⑩ 点電荷の周りの電位を考える時の基準はどこに取ればよいか。  
 ⑪ 点電荷Bを⑩の基準から、座標 $r$ の位置まで運ぶ仕事を定積分の形で表わせ。  
 ⑫ ⑪を計算し、座標 $r$  ( $r > 0$ ) の位置の電位を $k, Q, r$ で表わせ。  
 ⑬ ⑥⑫をまとめて絶対値記号を用いて電位を表わせ。  
 ⑭ 点電荷Aの周りの電位のグラフの概形を描け。

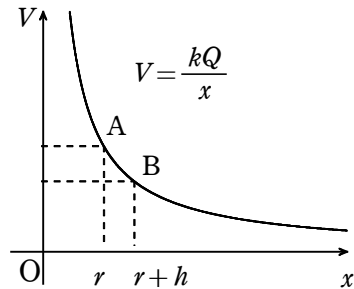


- ⑮ 点電荷 $Q$ が負電荷だった場合の周辺電位の概形を描け。



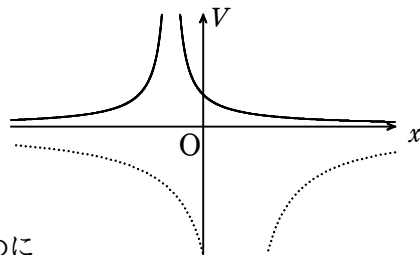
(2)  $x$ 軸上の原点に電荷 $Q$ が存在している。クーロン定数を $k$ として、以下の問いに答えよ。  
 ただし、 $r > 0$ とする。

- ① 座標 $r$ の点Aの電位を $r, Q, k$ で表わせ。また、無限大の点からAに $+1C$ を運ぶ仕事はいくらか。  
 ② 座標 $r+h$ の座標Bの電位を $r, h, Q, k$ で表わせ。また、無限大の点からBに $+1C$ を運ぶ仕事はいくらか。  
 ③  $+1C$ の電荷をAからBに運ぶ仕事を求めよ。  
 ④ AからBに運ぶ時の平均の力の大きさを $F$ とすると、この仕事を $F, h$ で表わせ。  
 ⑤ ③④より $F$ を $k, Q, r, h$ で表わせ。  
 ⑥  $h \rightarrow 0$ のとき、 $F$ はいくらに近づくか。(微分概念を用いよ)  
 ⑦ A点の電場の方向と強さを求めよ。



- ⑧ 電位の式 $V = \frac{kQ}{r}$ を $r$ で微分することは、何を求めることになるか。

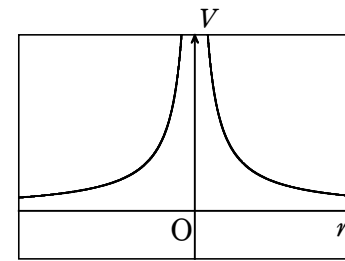
(3)  $x$ 軸上の座標 $-a$ の位置に $+Q$ の点電荷A、座標 $a$ の位置に $-4Q$ の電荷Bが存在している。右のグラフの実線は点電荷Aの電位を表わし、破線は点電荷Bの電位を表わしている。クーロン定数を $k$ として以下の問いに答えよ。



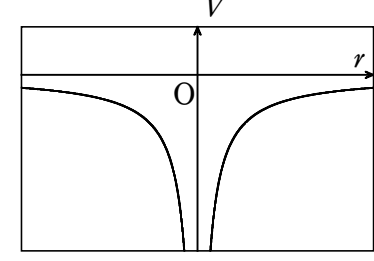
- ① 座標 $x$ の位置の点電荷Aからの電位を $k, Q, x$ で表わせ。  
 ( $a+x$ の符号が $x$ の値によって異なるために絶対値記号を使うことを忘れないこと)  
 ② 座標 $x$ の位置の点電荷Bからの

まとめると、 $V = \frac{kQ}{|r|}$

⑭



⑮



(2) ①  $V = \frac{kQ}{r}$  電位とは無限大から運ぶ仕事なので、仕事も同じ  $\frac{kQ}{r}$

②  $V = \frac{kQ}{r+h}$  無限大から運ぶ仕事も同じ  $\frac{kQ}{r+h}$

③ クーロン力は正の方向なので、AからBに運ぶための力は負の方向となる。つまりAからBに運ぶ仕事は負である。電位は $+1C$ を無限大から運ぶ仕事なので、仕事の差(電位の差)がAからBに運ぶ仕事になる。無限大から $+1C$ を運ぶにはAの方がBより余分に仕事しなければならないので、Aの方がBより仕事が多い。AからBに運ぶにはその差(B-A)をとればよい。

$$W = V_A - V_B = \frac{kQ}{r+h} - \frac{kQ}{r}$$

④  $Fh$  ⑤  $Fh = \frac{kQ}{r+h} - \frac{kQ}{r}$  これより、 $F = \frac{1}{h} \left( \frac{kQ}{r+h} - \frac{kQ}{r} \right)$

⑥  $h \rightarrow 0$ なので $F = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} \left( \frac{kQ}{r+h} - \frac{kQ}{r} \right)$ となる。これは微分の定義そのものである。

$\frac{kQ}{r}$ を $r$ で微分すると、 $-\frac{kQ}{r^2}$ となる。

<別解> 直接極限計算をすると、

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} \left( \frac{kQ}{r+h} - \frac{kQ}{r} \right) = \lim_{h \rightarrow 0} \left( -\frac{kQ}{(r+h)r} \right) = -\frac{kQ}{r^2}$$

⑦  $+1C$ を運ぶ仕事は電場の強さなので、⑥の $-\frac{kQ}{r^2}$ は電場となる。

よって、大きさ $\frac{kQ}{r^2}$ 、方向は負の方向の電場となる。

⑧ 電位を微分すると電場を求めることになる。(電位のグラフの接線の傾きが電場となる。)

(3) ① Aと点電荷との距離は $|x+a|$ であるので、 $\frac{kQ}{|x+a|}$

② 点電荷Bからの距離は $|x-a|$ であるので、 $-\frac{4kQ}{|x-a|}$

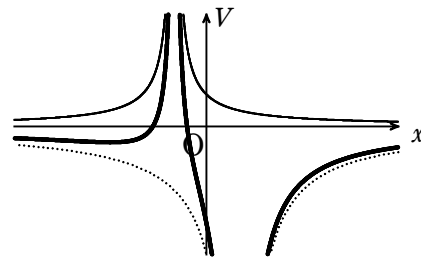
③ 実際の電位はそれぞれの点電荷からの電位の和である。電位は位置エネルギーを表わしているので複数ある場合は単純和となる。

# 電場

電位を  $k, Q, x$  で表わせ。(①と同様に絶対値記号を使うこと)

- ③ 座標  $x$  の位置の実際の電位はいくらか。  $k, Q, x$  で表わせ。  
 ④ 上のグラフに実際の電位のグラフの概形を書き込め

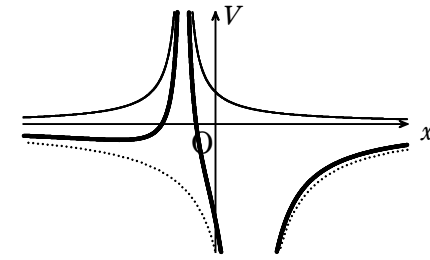
(4) (3)と同じ条件で右のグラフの実線は  
 実際の電位を現している。このグラフを見て  
 以下の問いに答えよ。



- ① 電位が0になっているグラフ上の位置に●  
 印をつけよ。  
 ② 電場が0になっているグラフ上の位置に○  
 印をつけよ。  
 ③ 電位が0となっている点の  $x$  座標を求めよ。  
 ④ 電場が0となっている点の  $x$  座標を求めよ。  
 ⑤ 電場が0となっている点の電位はいくらか。  
 ・  $x$  軸上負の領域で充分遠くで  $+q$  [C] の正電荷を静かにおいたところ、右方向に加速され、  
 ある位置で方向転換して左方向に動いた。  
 ⑥ この正電荷が最も速くなった位置の  $x$  座標を求めよ。また、そのときこの正電荷の持  
 つ運動エネルギーはいくらか。  
 ⑦ この正電荷が最も点電荷Aに近づいた位置の  $x$  座標はいくらか。  
 ⑧ ⑦の位置の電場の強さはいくらか。

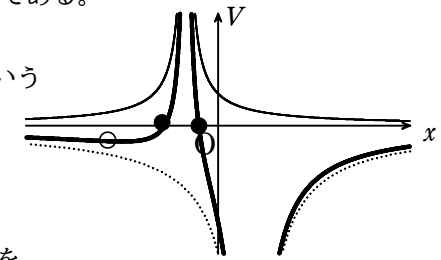
$$\frac{kQ}{|x+a|} - \frac{4kQ}{|x-a|}$$

④



- (4) ① 電位が0になっている位置は  $V=0$  の位置である。  
 よって、右のグラフの黒点である。

- ② 電場は電位の傾きである。電場が0であるとい  
 うことは電位グラフの接線の傾きが0であること  
 である。よって、右図の白丸の位置である。



- ③ (3)より電位は

$\frac{kQ}{|x+a|} - \frac{4kQ}{|x-a|}$  なので、この値が0となる  $x$  を  
 求めればよい。

$$\frac{kQ}{|x+a|} - \frac{4kQ}{|x-a|} = 0$$

$$\frac{kQ}{|x+a|} = \frac{4kQ}{|x-a|} \quad \text{分母を被って } kQ \text{ で割ると、}$$

$$|x-a| = 4|x+a|$$

両辺を平方して差をとると、

$$16(x+a)^2 - (x-a)^2 = 0$$

$$\{4(x+a) - (x-a)\}\{4(x+a) + (x-a)\} = 0$$

$$(3x+5a)(5x+3a) = 0$$

$$x = -\frac{3}{5}a, -\frac{5}{3}a$$

電位の計算で絶対値を忘れると、片方の解しか出てこないので注意を要する。

$x < -a$ ,  $-a < x < a$ ,  $a < x$  に場合分けして求めても良い。

- ④ 電場が0ということは座標  $x$  においた  $+1C$  の電荷とA,B 2 電荷からのクーロン力がつ  
 りあっているということである。

$$A \text{ からのクーロン力の大きさ} = \frac{kQ}{(x+a)^2}$$

$$B \text{ からのクーロン力} = \frac{4kQ}{(x-a)^2}$$

$$\text{よって、} \frac{4kQ}{(x-a)^2} = \frac{kQ}{(x+a)^2}$$

分母を被って  $kQ$  で割ると

$$4(x+a)^2 = (x-a)^2$$

$$\{2(x+a) - (x-a)\}\{2(x+a) + (x-a)\} = 0$$

$$(x+3a)(3x-a)=0$$

$$x=-3a, \frac{1}{3}a$$

この解の内グラフと比較して  $x=\frac{1}{3}a$  は解ではない。

よって、 $x=-3a$

⑤ 電位  $\frac{kQ}{|x+a|} - \frac{4kQ}{|x-a|}$  の式に  $x=-3a$  を代入して

$$\frac{kQ}{|-3a+a|} - \frac{4kQ}{|-3a-a|} = \frac{kQ}{2a} - \frac{4kQ}{4a} = -\frac{kQ}{2a}$$

⑥ 電位は位置エネルギーであるから、重力による位置エネルギーと同じように考えることができる。物体は低いところほど速く動くので、正電荷が最も速くなるのは電位が最も低くなったところである。すなわち、 $x=-3a$

充分離れた位置での電位は0であり、運動エネルギーも0である。電場が0となる位置での電位は⑤より  $-\frac{kQ}{2a}$  であるから、クーロン力の位置エネルギーは電位が+1Cの位置エネルギーであることから  $-\frac{kQq}{2a}$  となる。この失われた位置エネルギーが運動エネルギーになっている。よって、

$$\frac{kQq}{2a}$$

⑦ 重力の世界で自然に転がした時、同じ高さになるところでUターンする。それと同じで、電位0のところから転がしているの、電位が0になるところでUターンする。

よって、③より  $x=-\frac{5}{3}a$

⑧ ⑦の位置に+1Cをおいてその電荷に作用する力の合力を求めればよい。

$$Aからのクーロン力の大きさは \frac{kQ}{\left(-\frac{5}{3}a+a\right)^2} = \frac{9}{4} \frac{kQ}{a^2} \quad \text{方向は左向き}$$

$$Bからのクーロン力の大きさは \frac{4kQ}{\left(-\frac{5}{3}a-a\right)^2} = \frac{9}{16} \frac{kQ}{a^2} \quad \text{方向は右向き}$$

$$\text{よって、合力は } \frac{9}{4} \frac{kQ}{a^2} - \frac{9}{16} \frac{kQ}{a^2} = \frac{27}{16} \frac{kQ}{a^2} \quad \text{左向き}$$

<別解>  $x=-\frac{5}{3}a < -a$  より、絶対値をはずすと

$$V = \frac{kQ}{|x+a|} - \frac{4kQ}{|x-a|} = -\frac{kQ}{x+a} + \frac{4kQ}{x-a}$$

電場は電位を微分すると求められる。

$$\frac{kQ}{(x+a)^2} - \frac{4kQ}{(x-a)^2}$$

41. 電気力線とクーロンの法則

(1) 右図は $xy$ 平面上の座標 $(a,0)$ を点A

座標 $(-a,0)$ を点Bとし、点Aに

電荷 $+q$ 、点Bに電荷 $-q$ をおいた。

右図の曲線は電気力線を表わしている。

クーロン定数を $k$ として以下の問いに

答えよ。

① 座標 $(x,y)$ の点A、Bそれぞれからの電位をそれぞれ $x,y,k,q,a$ で表わせ。

② 点 $(x,y)$ の実際の電位を $x,y,k,q,a$ で表わせ。

③  $y$ 軸上の点 $(x=0)$ の電位はいくらか。

④ 点電荷Aに作用するクーロン力はいくらか。

・  $y$ 軸上に十分に広い面積を持つ薄い金属板をおいた。

⑤ 金属板表面の電位はいくらか

⑥ 金属板表面の電荷はどうなっているか

⑦ 電気力線はどうなるか

⑧ 点電荷Aに作用するクーロン力はいくらか。

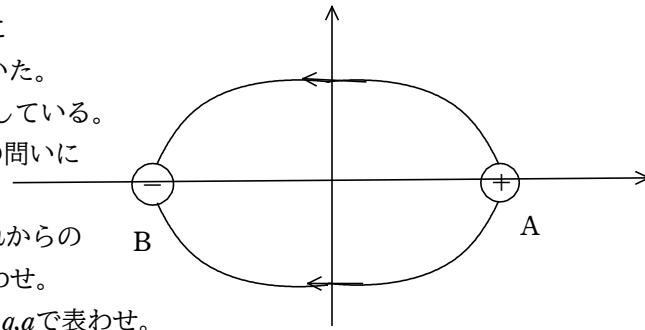
・ 点B上の電荷を取り除いた。

⑨ 金属板表面の電位はどうなるか。(金属板は無限に広いと考えても良い)

⑩ 金属板表面の電荷はどうなっているか

⑪ 電気力線はどうなるか。

⑫ 金属板と点電荷Aの間に作用するクーロン力はいくらか



$x = -\frac{5}{3}a$ を代入して

$$E = \frac{kQ}{(x+a)^2} - \frac{4kQ}{(x-a)^2} = \frac{kQ}{\left(-\frac{5}{3}a+a\right)^2} - \frac{4kQ}{\left(-\frac{5}{3}a-a\right)^2} = \frac{27}{16} \frac{kQ}{a^2}$$

解説

(1) ① 点 $(x,y)$ と点Aとの距離は $\sqrt{(x-a)^2+y^2}$ なので、Aからの電位は $\frac{kQ}{\sqrt{(x-a)^2+y^2}}$

同様にBからの電位は $-\frac{kQ}{\sqrt{(x+a)^2+y^2}}$

② 実際の電位はA,Bの電位の和である。

$$V = \frac{kQ}{\sqrt{(x-a)^2+y^2}} - \frac{kQ}{\sqrt{(x+a)^2+y^2}}$$

③ ②に $x=0$ を代入すると、 $V=0$ となる。

$y$ 軸上の電位はすべて0V

④ クーロンの法則により  $F = \frac{kq^2}{4a^2}$

⑤ 電位0Vのところへ金属板をおいたのであるから電位0V

⑥ 電気力線は薄い金属面に直角に通っているため、電荷は動かない。よって、新しく電荷は生じない。(金属板の右側に負電荷、左側に正電荷が生じるとしてもよい)

⑦ 電荷に変化がないので、電気力線はそのままである。

⑧ 電気力線に全く変化がないので、Aに作用するクーロン力は金属板を挿入する前と全く変わらない。 $F = \frac{kq^2}{4a^2}$

⑨ 金属板は無限に広い。電位の基準は無限の彼方なので、無限の彼方の電位は0Vである。金属板は導体であるため自由電子が自由に動ける。自由電子が動いた後は自由電子が動かないので、金属内に電気力線がないことになり金属表面はすべて同じ電位である。よって、金属板の表面はすべて電位0V

⑩ 点Bに電荷があるときは電気力線が金属板を貫いていたが、点Bに電荷がなくなると、 $x < 0$ の領域での電気力線がなくなる。Aからの電気力線の終点が金属表面になるために、金属表面に負電荷が生じる。

⑪ 金属板の電位は電荷Bを取り除く前と全く同じく0Vなので、電気力線は以前と全く変わらない。

⑫ 電気力線に変化がないのでクーロン力も前と変わらない。 $F = \frac{kq^2}{4a^2}$

このときの金属板の電荷の様子は下図の通り

42. 点電荷の周りの電位

