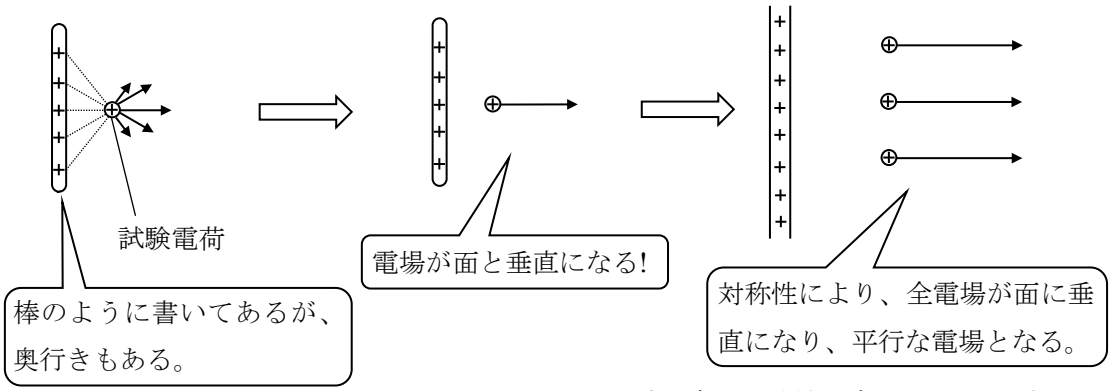
テーマ 6 一様な電場

複数並べた電荷が電場を作る場合を考える。

モデル　金属の板に正電荷を帯電させ周辺の電場を調べる（このような電荷を面電荷と呼ぶ）

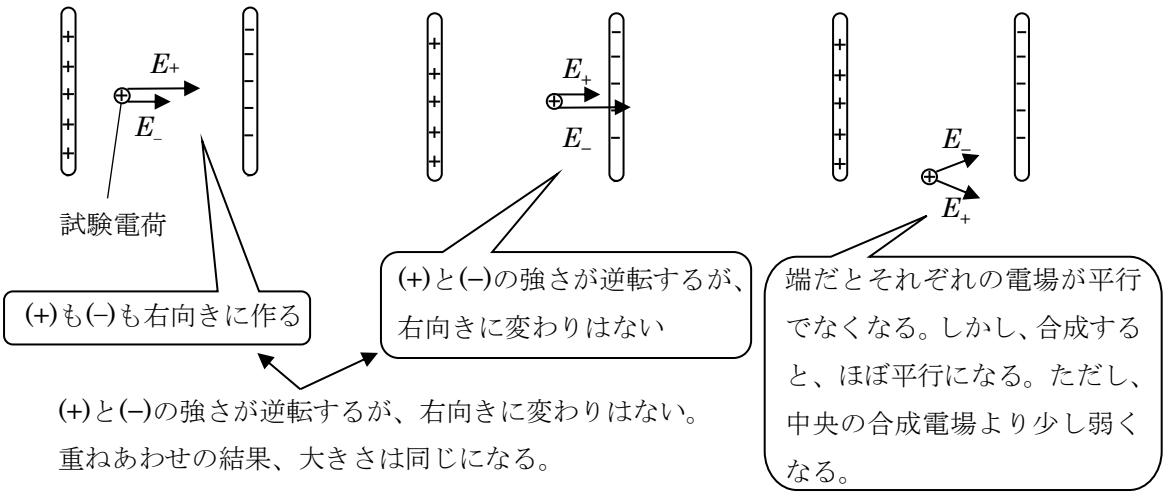
（個別に電場を書き込む）　（重ね合わせる）　（無限に長い面で考える）



＊ 面の端の方は対称性が崩れるので、平行ではなくなる。通常、端は無視して考える

モデル　それぞれ正と負に帯電させた金属板(極板という)を向かい合わせ、間の電場を調べる

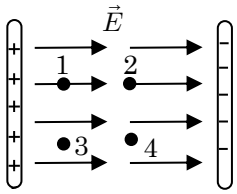
(+の面に近いエリア)　(−の面に近いエリア)　(端の方のエリア)



(+)と(−)の強さが逆転するが、右向きに変わりはない。
重ねあわせの結果、大きさは同じになる。

ConcepTest8　金属板に挟まれた空間の電場

それぞれ(+)と(−)に帯電させた金属板を向かい合わせたところ、図のように電場が発生した。図中の1、2、3、4 の点において、電場が強い順番に並び替えよ。ただし、金属板は十分に大きいものとする。



ConcepTest8 解答　1 = 2 = 3 = 4　全て同じ大きさ

ConcepTest8 解答　十分に大きい金属板の間では一様な電場が発生する。1、2、3、4 全ての場所で大きさは同じになるのだ。

《よくある勘違い》

・1 と 2 を比べると、1 の方が＋に近いので、1 の方が強い。

⇒ ＋から離れる分、−が近くなるので、結果として大きさは一定に保たれる。

・2 はベクトルの最初から始まっているが、1 はベクトルの半分から始まっていので、電場が半分しか残っていない。

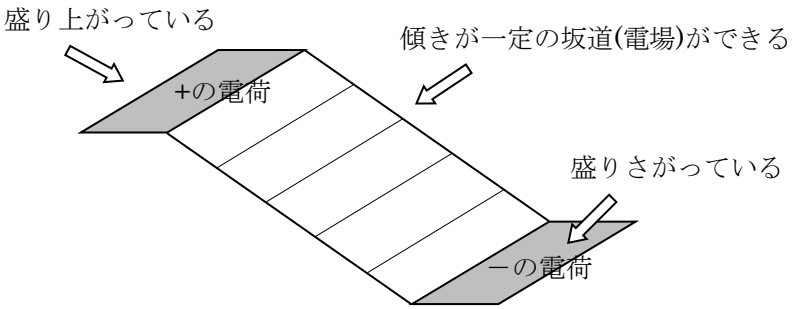
⇒ ベクトルは模式的に書いているだけで、起点に意味はない。全体に一様に電場が作られている。

・3 と 4 にはベクトルがないから、電場はない。

⇒ ベクトルは模式的に書いているだけで、金属板の間全体に発生している。

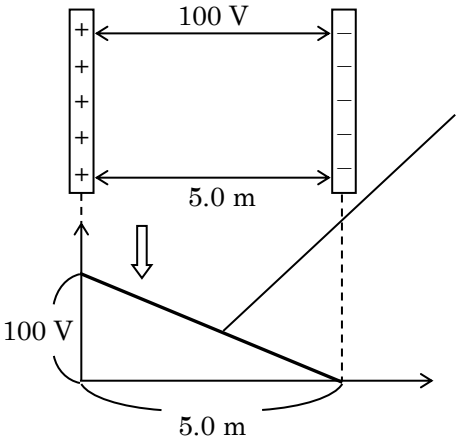
テーマ 7　一様な電場での電位

一様な電場は下図のような場を作っているイメージである。



このときの電場は、『電位の傾きが電場』という特徴から導かれる。

モデル　2 枚の金属板 5.0 m 離して置き、その電位差を 100 V とした。



この斜面の傾きが電場の大きさ!!

傾きは $\frac{100\ \mathrm{V}}{5.0\ \mathrm{m}} = 20$ で、これが電場である。

一般化すると、

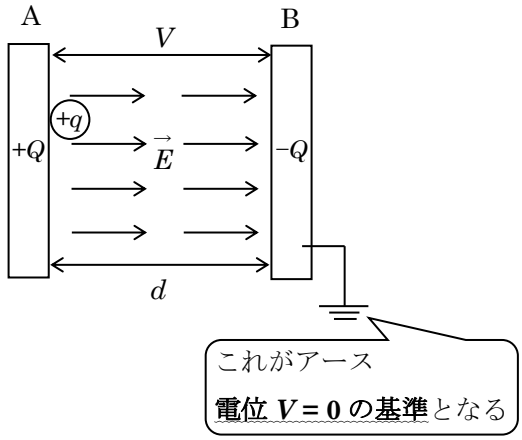
$$\boxed{\text{電場 } E = \frac{(\text{電位差})}{(\text{極板間距離})} = \frac{V}{d}\ \text{〔V/m〕}}$$

となる。

電場は、〔N/C〕と〔V/m〕の 2 つの単位があるのだ。

問題 7 一様電場内での力と仕事

正負にそれぞれ電気量 Q に帯電させた 2 枚の極板 A、B を距離 d だけ離して置いた。AB 間の電位差は V であった。極板 B にはアースをつなぎ、接地した。以下の誘導に従い、一様電場の要素を整理しよう。



《電場と力について》

極板間に電気量$+q$ の電荷をおいた。極板間の電場$\vec{E}$の大きさは ア であり、$+q$ の電荷が受ける力の大きさは イ である。

$+Q$ の電荷は極板 A 全体に分布しているものであり、$F = k\frac{|q_1||q_2|}{r^2}$の公式では、力を求めることができないことがポイントである。点電荷同士の時しか使えない公式となる。

$E = k\frac{Q}{r^2}$、 $V = k\frac{Q}{r}$ の公式も同様に一様電場の場合は使えないので注意しよう。

《仕事について》

極板 A のすぐ近くに$+q$ の電荷をおくと、静電気力により仕事をされ、極板 B の方に運ばれる。電位の定義式から仕事の量を求めると、$W =$ ウ となる。

力と移動距離による仕事の公式 エ から仕事の量を求めると、$W =$ オ となる。

電荷の質量を m としたら、極板 A を初速度 0 でスタートし、極板 B に到達したとき、その速さは カ となる。電荷を打ち出したいときは、このような装置を使って射出するのである。

《アースと電位について》

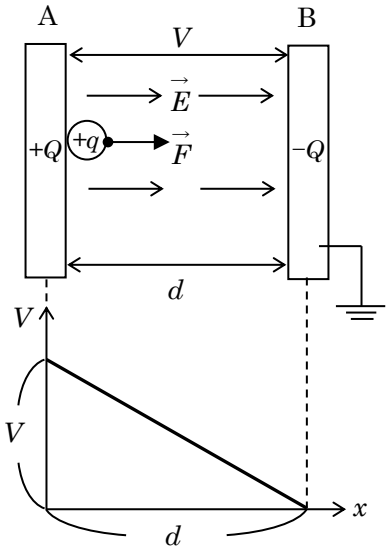
点電荷の時は、無限遠点を $V = 0$〔V〕の基準としていたが、現実には、地面が 0 V の基準となっており、アースは地面につないでいることを示す。つまり、今回の場合、極板 B の地点の電位が 0 V ということになる。

これを基に、電位と座標のグラフを書いて考えると、極板 A から $\frac{d}{3}$ だけ極板 B に進んだ点の電位は キ といえる。

問題７解答　ア：$E=\dfrac{V}{d}$　イ：$F=\dfrac{qV}{d}$　ウ：$W=qV$　エ：$W=Fx$　オ：$W=qV$

カ：$v=\sqrt{\dfrac{2qV}{m}}$　　キ：$V_P=\dfrac{2V}{3}$

問題７解説　下図のような V–x グラフを書いて、電場をイメージできるようにしよう。



ア：電場 E は電位の傾きなので、V–x グラフの傾き

求めて、$E=\dfrac{V}{d}$

イ：電場は１C あたりの電荷が受ける力なので、q〔C〕の電荷が受ける力 F は $F=qE$ となる。よって、

$$F=qE=q\times\frac{V}{d}=\frac{qV}{d}$$

＊$+Q$ の電荷は極板全体に分布していて、

ウ：電位の定義は、$+q$〔C〕を V〔V〕持ち上げるときの仕事 W〔J〕が qV というものである。よって、

$W=qV$

エ：仕事の定義の復習である。$W=Fx$

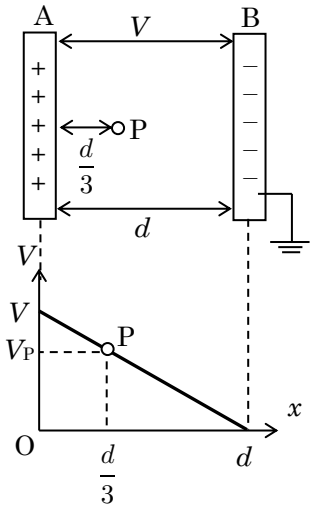
オ：はたらく力の大きさ F はイより $\dfrac{qV}{d}$、移動する距離が d、これを $W=Fx$ に代入すると、

$W=\dfrac{qV}{d}\times d=qV$　　＊ ウ と同じ結果になることがポイント

カ：運動エネルギーと仕事の関係式　(前)運動エネ ＋ 仕事 ＝ (後)運動エネ　から求める。

$$0+qV=\frac{1}{2}mv^2 \qquad \therefore\ v=\sqrt{\frac{2qV}{m}}$$

キ：



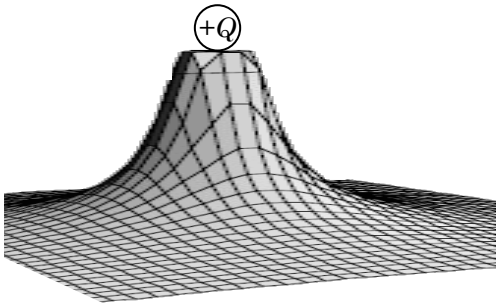
左図のように、V–x グラフと点 P を考えることができ、点 P の電位 V_P は、

$V_P=\dfrac{2V}{3}$　となる。

テーマ 7 等電位線と電気力線

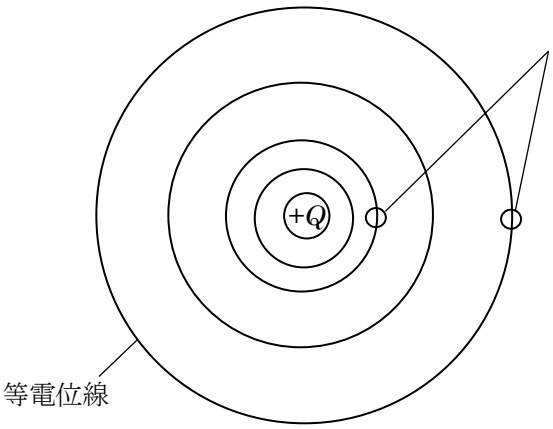
『場』を考えるにあたり、『坂道の傾き』を示す『電場 E』と、『その地点の標高』を示す『電位 V』がキーだったが、これを平面で表したい。山を地図に示す。そんな感じだ。

電位を平面に示すのは、我々は慣れている、『等高線』と同じ要領で、同じ高さの点を結べばよい。これを『等電位線』という。



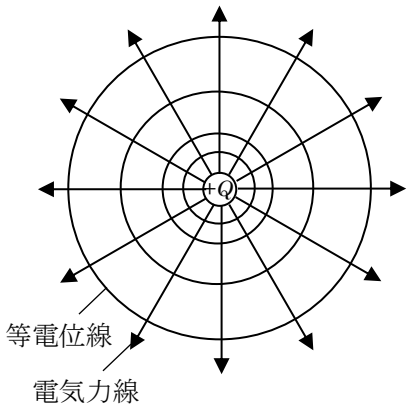
真上から見下ろす形で
地図を書くと

等電位線を書いた地図に、もう 1 種類線を加える。それが『電気力線』である。電気力線は、電場を平面に示すためのもので、各地点で電場を考えて、それらをつなぎ合わせたものになる。



例えば、この 2 点では受ける力は共に右向き。
それらをつなぎわせる。
すると、その線上ならどの地点でも右向きに力を受けることがわかる。これが電気力線なのだ

改めて等電位面と電気力線を書いてみる。



ここで、ある特徴が見えてくる。

① 電気力線と等電位線は、必ず垂直に交わっている。
② 等電位線の間隔が狭いほど、急な坂道になる。
（つまり狭いほど電場が強い）
③ 電気力線が密集している場所は、電場が強い。
（今回は点電荷に近ければ近いほど電気力線が密集している）

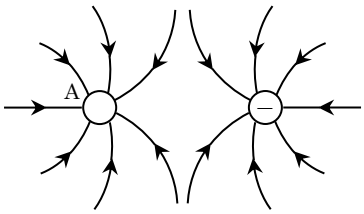
重要な性質です。しっかり頭に入れておこう。

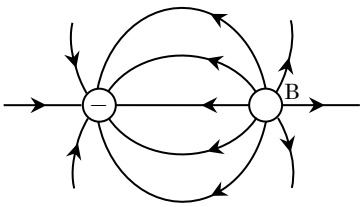
ConcepTest9 複数の点電荷の作る電場

以下の問いに答えよ。

(1) 以下の図は、点電荷 A、B の周辺の電気力線を示している。等電位線を大まかに作図せよ。

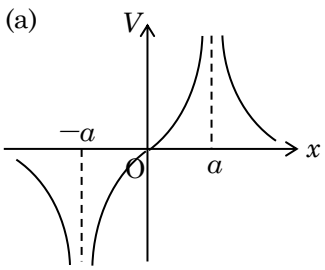
(2) 点電荷 A、B の正負の符号を答えよ。

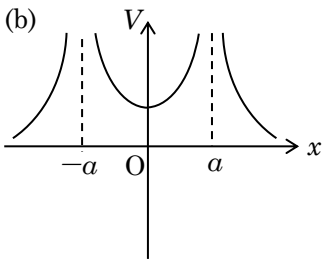


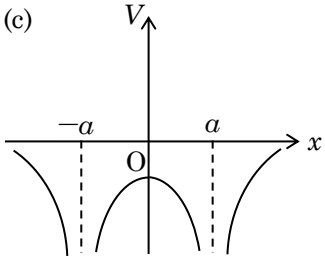


(3) $(-a\ ,\ 0)$と$(a\ ,\ 0)$に電気量 Q の負の点電荷を置いたときの x 軸上の $V-x$ グラフとして、最も適切なものは(a)〜(c)のどれか。

(4) $(-a\ ,\ 0)$ に電気量 Q の負の点電荷、$(a\ ,\ 0)$に電気量 Q の正の点電荷を置いたときの x 軸上の $V-x$ グラフとして、最も適切なものは(a)〜(c)のどれか。



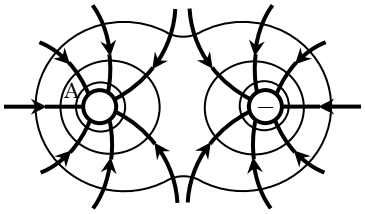


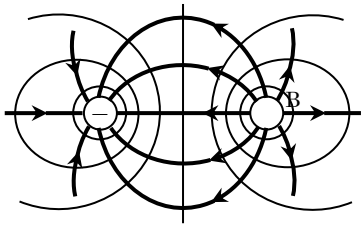


ConcepTest9 解答 (1) 下図参照　(2) A：－　B：＋　(3) c　(4) a

ConcepTest9 解説

(1) 等電位線は必ず電気力線と垂直になることを利用して作図をしていこう。



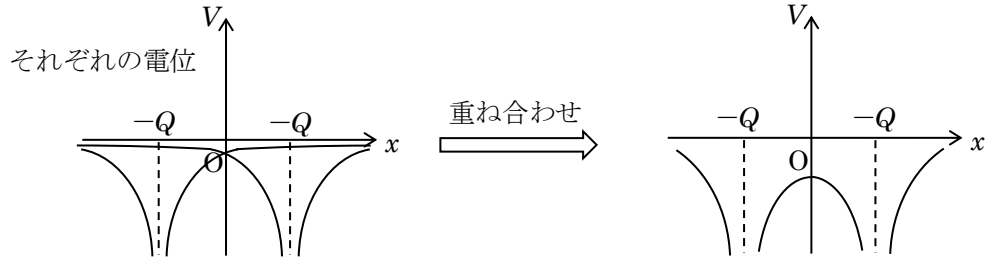


太字は電気力線、細字は等電位線である。

(2) A には、電気力線が入り込んでいっているので『－』
B からは電気力線が発射されているので『＋』

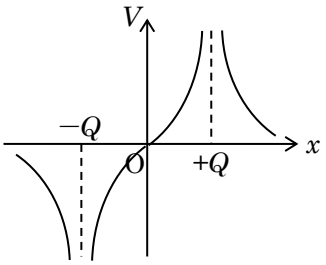
＊ 電気力線は、試験電荷（+1 C）をおいたときに力を受ける向き、という考え方でも、符号を考えることができる。A の近くに試験電荷（+1 C）をおいたら A に吸い寄せられる、ということから、A は『－』とわかる、といった感じ。

(3) ともに負電荷であれば、下図のように$(-a\ ,\ 0)$と$(a\ ,\ 0)$でマイナスに無限大に漸近する。また、原点付近ではちょっとマイナスになる。電位の重ねあわせで考えられるようにしよう。



ちなみに、これが、(1)の A の電荷のモデルの電場となる。等電位線を等高線としてイメージすると、この $V-x$ グラフのようになることを頭の中で確認しておこう。

(4) 負電荷と正電荷であれば、下図のように電位の重ねあわせが行われる。



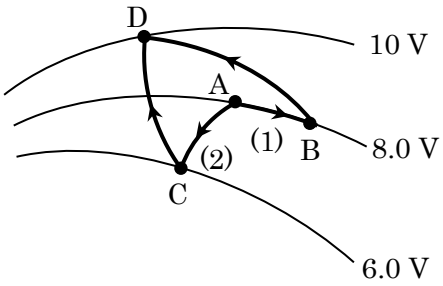
これは(1)の B のモデルとなる。こちらも等電位線を等高線としてイメージすると、この $V-x$ グラフのようになることを頭の中で確認しておこう。

問題 8 電荷を運ぶ仕事

図のような等電位線で示される空間で、(1)、(2)の経路で電気量$+q$〔C〕（$q>0$）の電荷をゆっくりと運ぶ際、電場がする仕事 W_E と、外力がする仕事 W_F をそれぞれ求めよ。

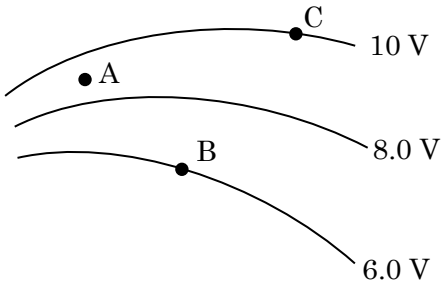
(1) A → B → D

(2) A → C → D



問題 9 電気力線と電場の強さ

図のような等電位線で示される空間で電場の大きさを比べる。A、B、C それぞれの点の周辺においては電場がほぼ一様であった場合、電場の強さが大きい順に並び替えるとどうなるか。



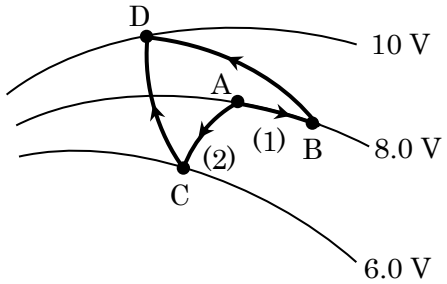
問題８解答 (1) $W_E = -2q$〔J〕　$W_F = (+)\ 2q$〔J〕

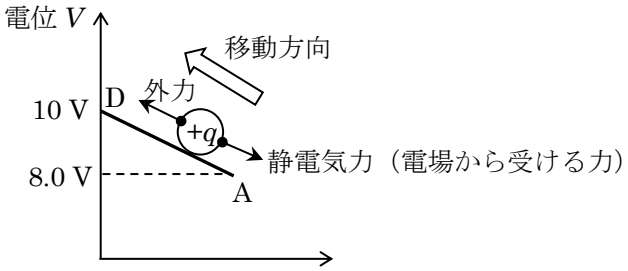
(2) $W_E = -2q$〔J〕　$W_F = (+)\ 2q$〔J〕

問題８解説

問題を解くだけなら、静電気力は保存力なので『途中経路に関係なく、最初と最後だけに注目』すればよい。

(1)も(2)も最初と最後で 2.0 V 高い電位に移動している。最初と最後だけの結果を示した図を書くと、下図のような移動であるとまとめられる。





よって $W = qV$ より、仕事量 W は

$W = 2q$〔J〕

となる。

次に、仕事の正負を考える。静電気力は移動方向と逆向きなので負の仕事、外力は移動方向と同じ向きなので正の仕事、といえる。よって、

$W_E = -2q$〔J〕　$W_F = (+)\ 2q$〔J〕　…(1)(2)答

となる。

＊ 正の仕事 W_F と負の仕事 W_E を同じ量だけ加えているので、電荷は運動エネルギーを増やさずに移動ができている　⇒　加速しない移動をしている　⇒ ゆっくりと移動している　という理解もしておこう。$W = qV$ の式でもとまるのは W_E だけなのだが、問題文に「ゆっくりと」とあるので、$W_E = W_F$ となるのだ。

＊ 試しに、各経路の外力による仕事 W_F を細かく考えてみると、

W_F　(1) A→B：0 J　　B→D：$+2q$〔J〕　　合計：$+2q$〔J〕

(2) A→C：$-2q$〔J〕　　C→D：$+4q$〔J〕　　合計：$+2q$〔J〕　　となる。

問題９解答 A > B > C

問題９解説

等電位線の間隔が狭いところほど、電位の傾きが大きく、電場が大きいといえるので A > B > C となる。問題文の『点周辺では一様な電場とみなせる』という注意書きがない場合、点の周辺だけ傾きが急激かもしれないので、解答には情報が足りなくなる。

テーマ８ ガウスの法則

このテーマでは、目的を意識しておくと理解がしやすくなる。

大目的

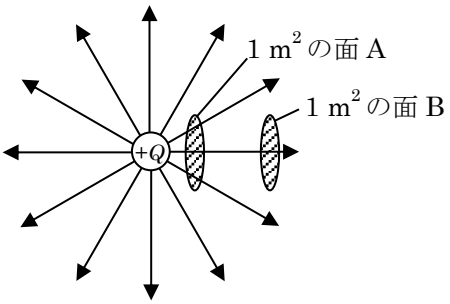
電荷+Q から出る電気力線の本数を定義する

電場を平面に表現するための技術である電気力線だったが、具体的に何本出ているか、というのを考えるのがガウスの法則なのである。

《STEP１》電気力線の定義を理解する

電気力線は『電場 E の場では 1 m² の面を電気力線は E 本貫いている』という風に定義されている（この定義がガウスの法則Ⅰ）。

具体的な数字で考えると、1 m² の面を 3 本貫いていたら、そこの電場は 3 N/C とするのだ。

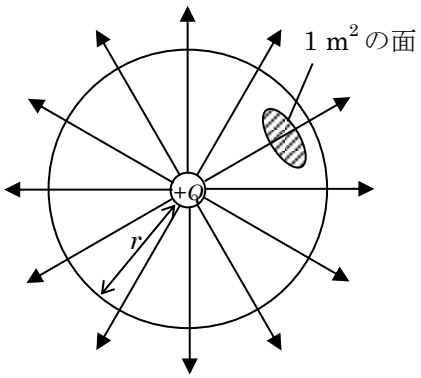


例えば左図のように電気力線が作図できたとき、面 A では電気力線が 3 本貫いているので電場 E_A = 3 N/C、面 B では電気力線が 1 本貫いているので電場 E_B = 1N/C、となる。

点電荷では、遠い方が電場が弱くなるので、この定義には矛盾はないといえるのだ。

《STEP2》点電荷の周りの電気力線の本数を厳密に数える

STEP1 の作図では電気力線を 12 本しか発射しておらず、厳密ではない。点電荷から何本発射されているのかを厳密に考えてみる。



電荷を中心にした半径 r の球面を想定

① 点 Q から r 離れたところ(左図の球面上)の電場は

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

② ガウスの法則Ⅰ『電気力線の定義』より、斜線部を通る電気力線の本数 n は

$$n = k\frac{Q}{r^2} \text{ 本}$$

(図では 1 本しか書いてないけれど、厳密にはこの本数貫いている)

③ 1 m² あたりに $n = k\frac{Q}{r^2}$ 本 あるので、球の表面積全体を貫く電気力線の本数 N は

$$N = k\frac{Q}{r^2} \times 4\pi r^2 = 4\pi kQ \text{ 本}$$

点電荷+Q からは $4\pi kQ$ 本の電気力線が出ているといえるのだ（これがガウスの法則Ⅱ）。

ガウスの法則

Ⅰ. 電場 E の場では 1 m² の面を電気力線は E 本貫くと定義する。

Ⅱ. 電荷$+Q$ からは、電気力線が $4\pi kQ$ 本出ている。(導出)

＊ ここで、$\frac{1}{4\pi k}$を『真空での誘電率 ε_0（読み：イプシロン　ゼロ)』と定義し、

$N = 4\pi kQ$ 本 $= \frac{Q}{\varepsilon_0}$ 本　と書いたりもする。両方覚えとくのがおすすめ。

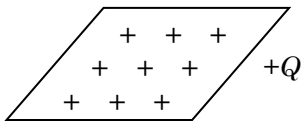
問題 10　ガウスの法則

電荷$+Q$ から出ている電気力線の本数 N を導出せよ。

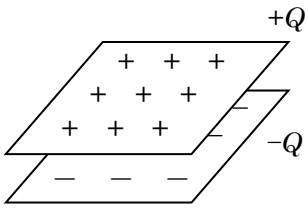
問題 11　極板間の電気力線

以下の問題ではクーロンの法則の比例定数を k、真空での誘電率を ε_0 とする。解答は k を使った形と、ε_0 を使った形の 2 つを答えよ。

(1) 1 辺の長さが L の正方形の金属板に電気量＋Q〔C〕（$Q > 0$）の電荷を帯電させた。平面から r 離れた点の電場の強さを求めよ。L は十分に大きいとする。



(2) 1 辺の長さが L の正方形の 2 枚の金属板に電気量＋Q〔C〕、$-Q$〔C〕（$Q > 0$）の電荷を帯電させた。2 枚の金属板を向かい合わせたとき、金属板の間の電場と、金属板の外側の電場の強さを求めよ。L は十分に大きいとする。



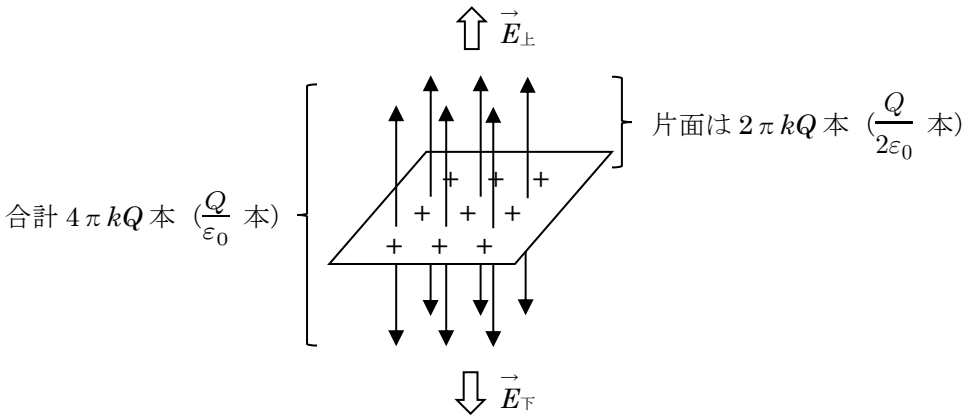
問題 10 解答 前ページの通り

問題 11 解答 (1) $\dfrac{2\pi kQ}{L^2}$, $\dfrac{Q}{2\varepsilon_0 L^2}$ (2) 金属板の間：$\dfrac{4\pi kQ}{L^2}$, $\dfrac{Q}{\varepsilon_0 L^2}$ 金属板の外側：0

問題 11 解説

(1) 十分に金属板が大きいとき、電気力線は面と垂直に発射される。また、電気力線は上面と下面の両面から発射される。よって、下図のように書いたとき、上面には上向きの電場 $E_{上}$、下面には下向きの電場 $E_{下}$が作られる。

また、両面から出ている電気力線の合計が $4\pi kQ$ 本（$\dfrac{Q}{\varepsilon_0}$ 本）となる。



すると、上図のように、片面では $2\pi kQ$ 本（$\dfrac{Q}{2\varepsilon_0}$ 本）の電気力線が出ていることになり、電気力線の定義『1m² あたりを貫く電気力線の本数が電場』と、金属板の面積が L^2 であることから

$E_{上} = \dfrac{2\pi kQ}{L^2}$ $\left(= \dfrac{Q}{2\varepsilon_0 L^2}\right)$ となる。下面も同様に求めて、$E_{下} = \dfrac{2\pi kQ}{L^2}$ $\left(= \dfrac{Q}{2\varepsilon_0 L^2}\right)$

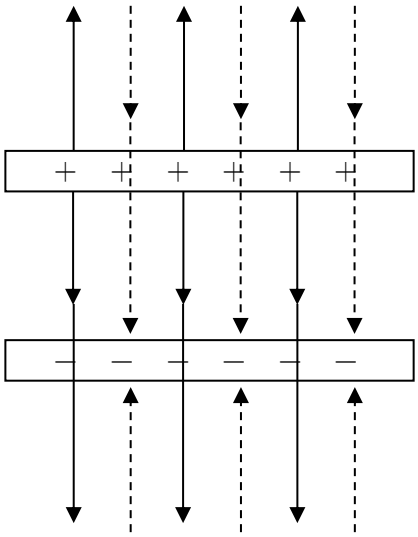
この答えのポイントをおさえておこう。

・金属板が十分大きいと一様電場となり、金属板から離れても、電場は弱くならない。（金属板からの距離 r に依らない）

・面での電荷では、点電荷の公式 $E = k\dfrac{Q}{r^2}$は成立しなかったが、ガウスの法則を用いることで、Q を使って電場の大きさを示すことができる。

問題 11 解説続き

(2) 正負の金属板を向かい合わせたときは、少し特殊な作図となる。金属板に厚みを持たせて横からみた図を書いてみる。



→ … ＋による電気力線

- - - - - - ▶ … －による電気力線

作図のポイント

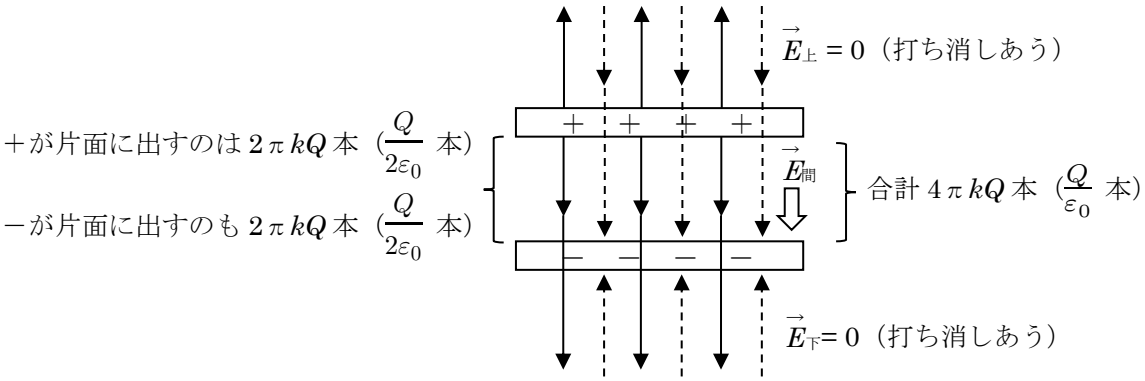
① ＋からは発射されて、－には入っていく。

② ＋の発射する電気力線は、－の極板を貫通している。（－の出す電気力線も同様）

＊ －による電気力線は、＋が発射したものではなく、－が作った独自のものなのだ。

③ 極板の外側は逆向きの電気力線が打ち消しあい、間では同じ向きの電気力線が強めあう

改めて、電気力線の本数を数えてみると、以下の図のようにまとめられる。



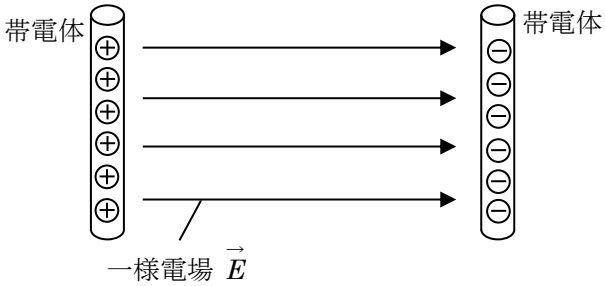
極板の間には、$4\pi kQ$ 本($\frac{Q}{4\varepsilon_0}$ 本)の電気力線があり、電気力線の定義『1m² あたりを貫く電気力線の本数が電場』と、金属板の面積が L^2 であることから

$$E_{間} = \frac{4\pi kQ}{L^2} \left(= \frac{Q}{\varepsilon_0 L^2}\right)$$ となる。

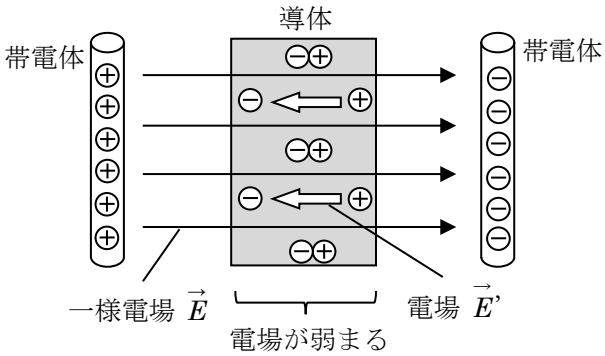
この装置を「コンデンサー」といい、次章のテーマとなる。構造と原理を覚えておこう。

テーマ 9 静電遮蔽

電場内に導体（金属など）を置くと、導体内で分極が起こる。分極が起きた後の電場について考えてみる。

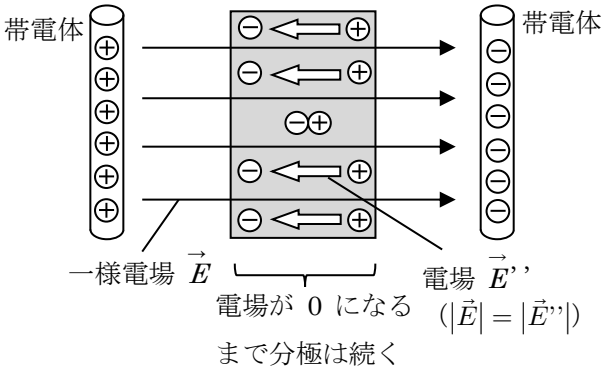


2 つの帯電体を用意して、一様な電場$\vec{E}$を作る。



導体を入れると、電場$\vec{E}$により分極が起こり、表面に＋と−の電荷が現れる。(今回の図中にはまだ分極を起こしていないペアも書いてある。)

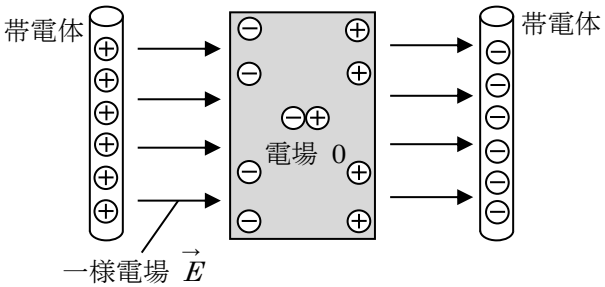
分極した電荷が新たな電場$\vec{E}'$（⇨）を作り$\vec{E}$と合成される。逆向きなので、打ち消し合い導体内の電場は弱まる。



まだ導体内に電場が残っているうちは、さらに分極が進む。

分極した電荷が作る電場が$\vec{E}'$（⇨）が強まり、打ち消しの度合いが強まる。完全に電場が打ち消しあうと、分極が止まる。

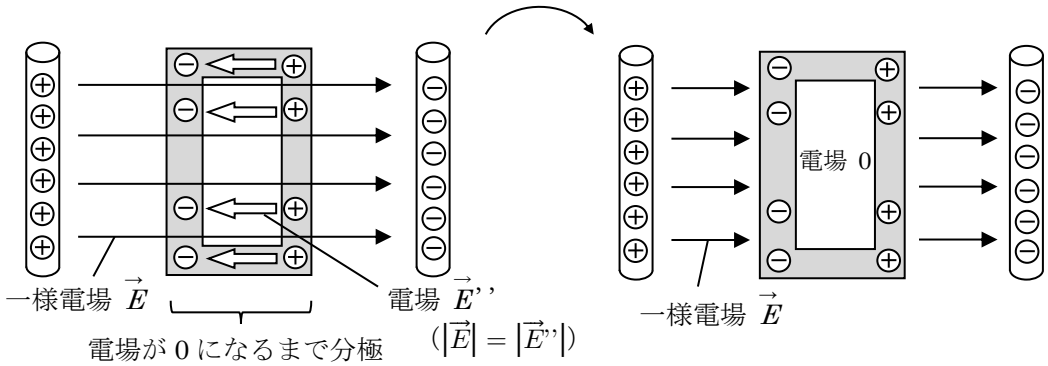
導体内の電場が 0 になるまで分極は続くのだ。



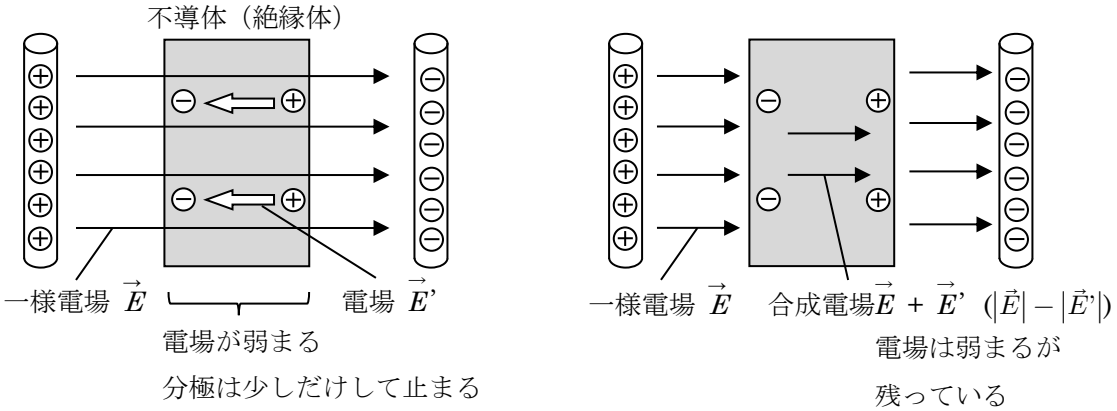
合成した電場だけを書くと左図のようになる。

導体内の電場は 0 になるが、導体の外側の電場は、電気力線の本数が変わっていないので入れる前と変化していないことがポイントである。

このように導体内では必ず電場が 0 になり、この現象を『静電遮蔽』と呼ぶ。そして、導体が中空の場合も下図のように分極が起こるので静電遮蔽は起こる。



入れるものが不導体（絶縁体）だと、電荷が少ししか分極しないので、電場を弱めるだけとなる。この分極を『誘電分極』ということも思い出しておこう。



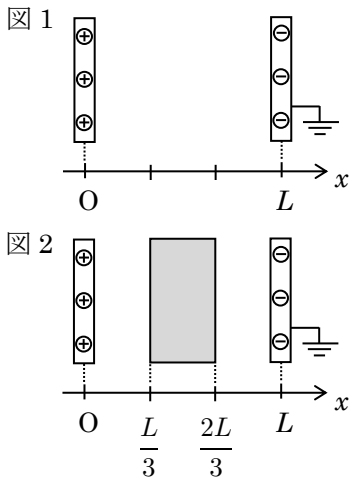
ConcepTest10 $V-x$ グラフと $E-x$ グラフ

図 1 のように正と負に帯電させた 2 つの金属板を L だけ離して置き、一様電場を発生させ、負に帯電した金属板にはアースをつなぎ接地した。正に帯電した金属板を原点 O とし、負に帯電した金属板の方に x 軸をとる。

(1) 図 1 の状態での、金属板の間の $V-x$ グラフと $E-x$ グラフの概形を示せ。

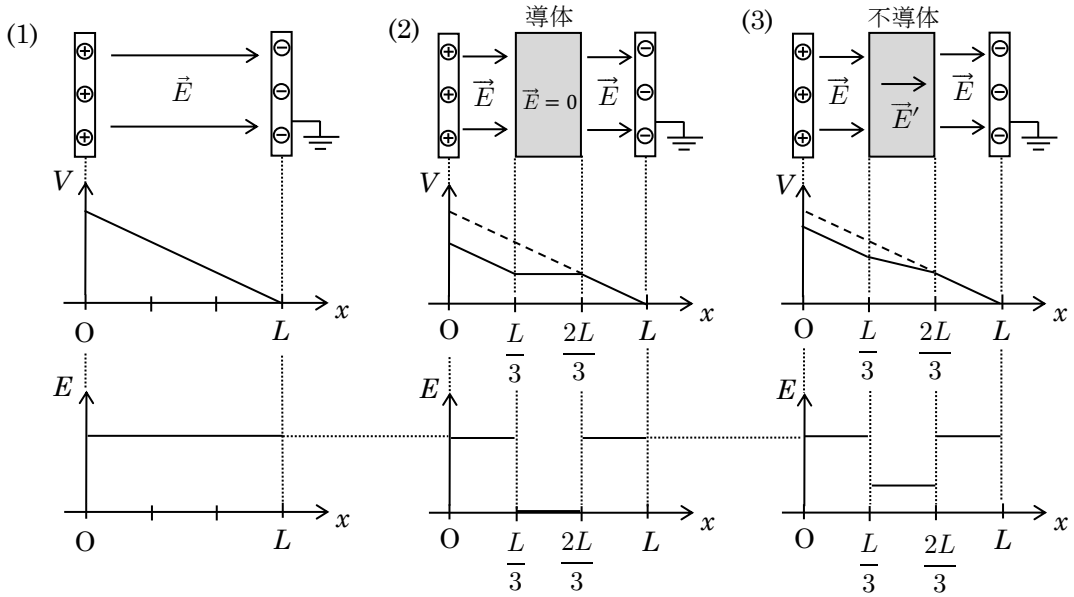
(2) 図 2 のように金属板の間に導体を入れた場合の $V-x$ グラフと $E-x$ グラフの概形を示せ。

(3) 図 2 で入れた導体を不導体に変えた場合の $V-x$ グラフと $E-x$ グラフの概形を示せ。



ConcepTest10 解答　下図参照

ConcepTest10 解説　アースとつながる場所が $V=0\,\mathrm{V}$ の基準となること、電位 V の傾きが電場 E であること、の 2 点がポイントとなる。



(1) 金属板間の電場は一様で、常に同じ大きさのグラフとなり、電位の傾きは常に一定の直線となる。

(2) 導体を入れた部分では、静電遮蔽がおきて電場が 0 となる。導体の外では、電気力線の本数が変わっていないので、(1)のときと同じ大きさの電場となる。このことより、$E-x$ グラフをかける。

$E-x$ グラフを材料に $V-x$ グラフを考えると、$x=\frac{L}{3}\sim\frac{2L}{3}$ の区間は電場が 0 なので、電位の傾きが 0 とわかり、$V-x$ グラフは横一直線となる。また、導体の外側の電場は(1)のときと同じなので、(1)の電位と同じ傾きとなる（点線と平行になる）。アースが 0 V の基準なので、$x=L$ からグラフを書き始めると、上図(2)のように $V-x$ グラフがかける。

(3) 不導体を入れた部分では、誘電分極により少しだけ電場が弱まる。導体の外では(2)と同様に、(1)と同じ大きさの電場となる。このことより、$E-x$ グラフをかける。

$E-x$ グラフを材料に $V-x$ グラフを考えると、$x=\frac{L}{3}\sim\frac{2L}{3}$ の区間は電場が弱まっているので、電位の傾きが少し緩やかになるといえる。また、導体の外側の電場は(1)のときと同じなので、(1)の電位と同じ傾きとなる（点線と平行になる）。アースが 0 V の基準なので、$x=L$ から書き始めると、上図(3)のように $V-x$ グラフがかける。

極板の間に何かを挟むと、電位差が小さくなる、という結果となるのだ。

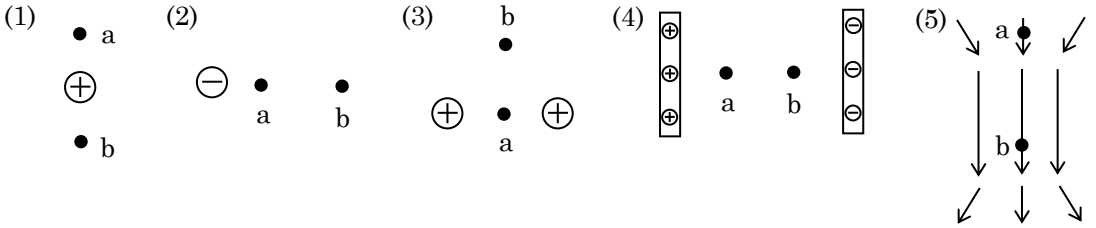
まとめの問題

ConcepTest11 電場による仕事

以下のようなとき、a 点から b 点に陽子が運動するとき、電子（負電荷）が運動するときの電場による仕事 W について、正負を答えよ。また、移動させた前後での静電気力による位置エネルギーの変化 ΔU の正負も答えよ。ただし、⊕、⊖は固定した電荷、(5)の矢印は電気力線を示している。

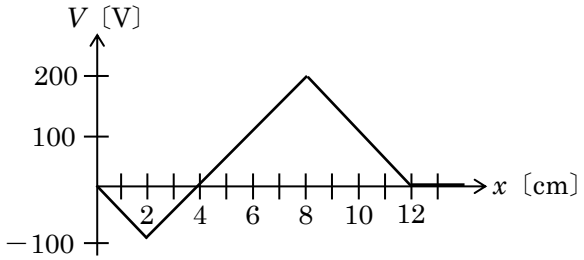
＊　陽子は正の電気量をもち、電子は負の電気量を持つ。

＊　静電気力による位置エネルギーを静電エネルギーと呼ぶ。



ConcepTest12 静電エネルギーとエネルギーの保存

右のグラフの電位で示されるような空間がある。



(1) x 軸正の方向から、原点 O に向かって $+q$〔C〕の電荷を発射したところ、原点 O を通過した。最大の速さとなる点はどこか。

(2) x 軸正の方向から−20 nC の電荷を、x 軸正の方向から 1.0 μJ の運動エネルギーを持たせて右側から発射した。次の各項目に答えよ。（1 nC は 10^{-9}C、1 μJ は 10^{-6}J である。ミリ→マイクロ→ナノの順に、10^{-3} → 10^{-6} → 10^{-9} と指数が変化することは暗記事項です。）

(a) この電荷の静電エネルギー U と座標の関係を示す $U-x$ グラフを書け。

(b) 最大の速さの位置はどこか。

(c) その点での粒子の運動エネルギーはいくらか。

(d) 折り返し点はどこか。

(e) 折り返し点で受ける力はいくらか。

ConcepTest11 解答

		$W_{電}$	ΔU
(1)	陽子	0	0
	電子	0	0

		$W_{電}$	ΔU
(2)	陽子	−	＋
	電子	＋	−

		$W_{電}$	ΔU
(3)	陽子	＋	−
	電子	−	＋

		$W_{電}$	ΔU
(4)	陽子	＋	−
	電子	−	＋

		$W_{電}$	ΔU
(5)	陽子	＋	−
	電子	−	＋

ConcepTest11 解説　保存力の仕事と、位置エネルギーの関係を理解しよう。

『位置エネルギー』は英訳すると『ポテンシャルエネルギー』であり、ポテンシャルは『潜在的』という意味である。運動エネに変換される潜在的なエネルギーを位置エネというのだ。また、仕事を通して変換されるので『保存力が仕事をする能力の量』と考えることもできる。

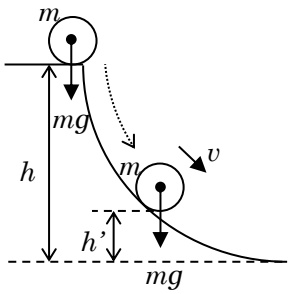
位置エネルギーを消費　→ 保存力が正の仕事をする　→　別のエネルギーに変換される

位置エネが増える変化をするときは　→　保存力が負の仕事をしている（サボっている）

このような理解をすることが目標となる。

（復習：重力による位置エネルギーについて）

高い点→低い点　の移動



重力による位置エネルギーが減少して、その分、運動エネルギーが増えている。結果として力学的エネルギーが保存する。

前力学エネ ＝ 後力学エネ　の式にすると、

$$0 + mgh = \frac{1}{2}mv^2 + mgh'$$

100　70　30

数字にすると、こんなイメージ

イメージ例の数字だと、位置エネが 70 減っている。この減った分が『重力がした正の仕事』に等しく、その分だけ運動エネルギーが増えているのだ。

低い点→高い点　の移動

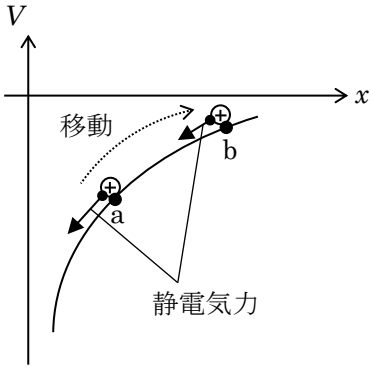
逆に持ち上げるような場合は、進行方向と重力が逆向きなので『重力による仕事は負』となっている。重力が負の仕事をした分だけ、位置エネがチャージされるのだ。

『保存力の負の仕事』は、『サボってエネルギーをチャージしている』イメージである。

ConcepTest11 解説続き

では、静電気力による位置エネルギーについて(2)を用いて考えてみる。

(2) a 点と b 点では、a 点の方が電位が低く、下図のような $V-x$ グラフとなる。

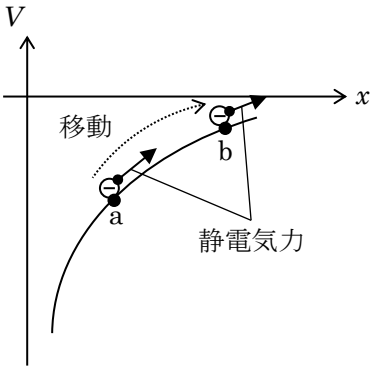


ここで、陽子（+の電荷）の場合を考えると、静電気力の仕事は、力と移動方向が逆向きなので負であるとわかる。静電気力はサボっており、位置エネルギーはチャージされているのだ。よって、

$W_{電}$ ：－　　ΔU：＋

となる。高さ（電位）が高くなっているので、ΔU が＋である、という考え方もできるようになっておきたい。

これが、電子（－の電荷）だった場合を考える。



静電気力の仕事は、力と移動方向が同じ向きなので正とわかる。静電気力は位置エネルギーを消費して仕事をしているのだ。よって、

$W_{電}$ ：＋　　ΔU：－

となる。電子（－の電荷）の場合、電位が高い方が位置エネルギーが小さいのである。

仮に a 点に電子を置いて静かに手ばなしたら、静電気力を受けて加速し b 点では速度を持って通過する。このとき以下の２通りの見方をできるようになっておこう。

① 運動エネルギーと仕事の関係
静電気力によって仕事をされて運動エネルギーを得た。ちなみに、仕事の量は位置エネルギーの消費量と等しい。

② 力学的エネルギーの保存
位置エネルギーが小さくなった分、運動エネルギーに変換されている。

これと同様に他の問題も考えてみる。

(1) 最終的に電位（高さ）が変わっていないので、$W_{電}=0$、$\Delta U=0$　となる。

＊ 厳密には a 点、b 点までの距離が等しいと書かれていないので、情報が足りずに解答できないが、今回はそういう問題だとみなし、このような解答とした。

＊ ＋の固定電荷の近くを通るような経路の場合、前半は登って、後半はくだる、という変化があるが、同じ高さに到着した場合、最終的にプラマイ０になっているのだ。

(3) a 点→b 点という移動では、高さが低い位置への移動となっている。このことから、

陽子を置いた場合、力の向きと移動の向きが同じなので、仕事は正。よって、

$W_{電}$ ：＋　　ΔU：－

電子を置いた場合、力の向きと移動の向きが逆向きなので仕事は負。よって、

$W_{電}$ ：－　　ΔU：＋

(4) a 点→b 点という移動では、高さが低い位置への移動となっている。このことから、

陽子を置いた場合、力の向きと移動の向きが同じなので、仕事は正。よって、

$W_{電}$ ：＋　　ΔU：－

電子を置いた場合、力の向きと移動の向きが逆向きなので仕事は負。よって、

$W_{電}$ ：－　　ΔU：＋

(5) 電気力線は電位の高いところから低いところに向かっている。よって a 点→b 点という移動では、高さが低い位置への移動となっている。このことから、

陽子を置いた場合、力の向きと移動の向きが同じなので、仕事は正。よって、

$W_{電}$ ：＋　　ΔU：－

電子を置いた場合、力の向きと移動の向きが逆向きなので仕事は負。よって、

$W_{電}$ ：－　　ΔU：＋

＊ 高さの差ではなく、＋の電荷は電気力線の向きに力を受ける、－の電荷は電気力線と逆向きに力を受ける、ということから力の向きを考えてもよい。

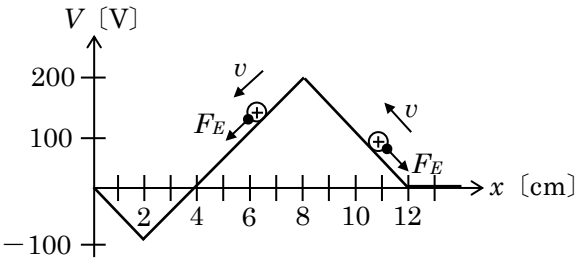
ConcepTest12 解答 (1) $x = 2.0$ cm　(2) (a)解説参照　(b)$x = 8.0$ cm

(c) $K = 5.0\times10^{-6}$ J　(5.0 μ J)

(d) $x = 3.0$ cm ($V = -50$ V の点)　(e) 1.0×10^{-4} N

ConcepTest12 解説

(1) ＋の電荷が、それぞれの電位の斜面でどの向きに静電気力 F_E を受けるか考えてみる。



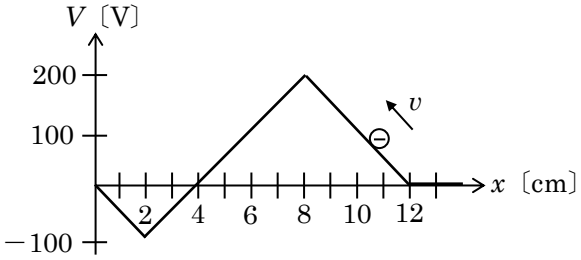
+ の電荷の場合、$x = 12$〜8 の登るときは減速する向きに力を受けて、$x = 8$〜2 のくだるときは加速する向きに力を受けていることがわかる。よって、速さが一番大きいのは $x = 2$ のくだり切ったときといえる。

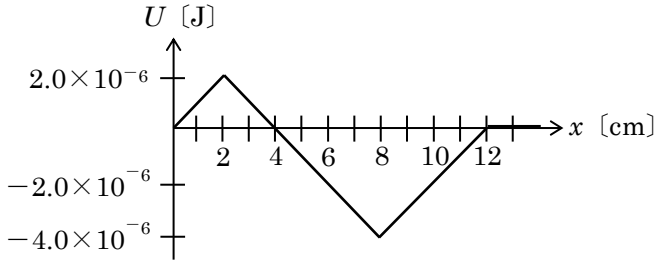
＊ 力学的エネルギーの保存で考えることもできる。位置エネルギーが最も小さいとき、運動エネルギーが最も大きいといえるので、$x = 2$ で最も低い位置のときに速さが最大、となる。

ConcepTest12 解説続き

(2)

(a) －の電荷の場合、電位が低いときの方が位置エネルギーが大きいということに注意が必要である。具体的な数字は電位の定義式 $U = qV$ で計算できる。





$x = 8$ での位置エネルギーUは

$U = qV$ より

$U = -20\times10^{-9}$〔C〕$\times200$〔V〕

$U = -4.0\times10^{-6}$〔J〕

同様に $x = 2$ での位置エネルギーUを求めると

$U = qV$ より

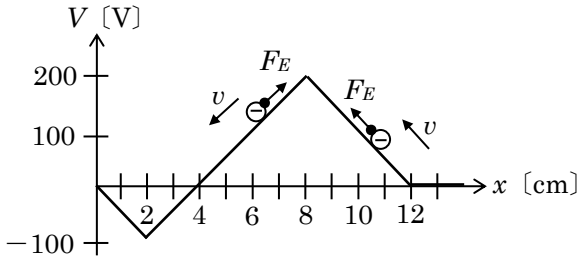
$U = -20\times10^{-9}$〔C〕$\times-100$〔V〕

$U = (+)\ 2.0\times10^{-6}$〔J〕

と求まる。これをグラフにすると左図のようになる。・・・答

＊ $U = qV$ の式では正負を含んで計算を行うと、電荷の正負による違いも含んだ結果が得られるのだ。

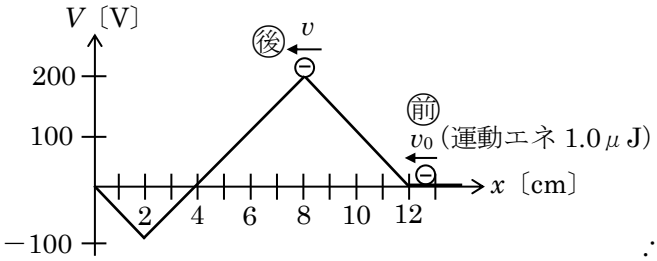
(b) 前問(1)のように受ける静電気力 F_E の向きで考えてみる。



$x = 8.0$〜12 の登るときに、－の電荷は加速する向きに力を受ける。よって <u>$x = 8.0$ の点が最高速</u>となるのだ。

ちなみに、$x = 2.0$〜8.0 でくだるときは、減速する向きに力を受けていることも理解しておこう。

(c) 前問(a)で書いた U–x グラフも参考にして考えよう。



後の運動エネルギーを K とおき、前と後で、力学的エネルギー保存の式を立てる。

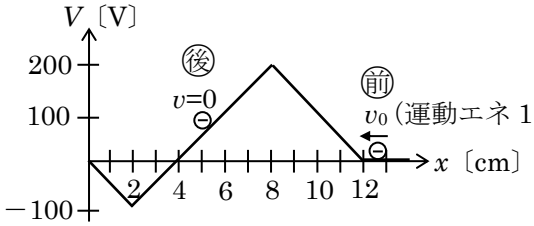
前　＝　後

1.0×10^{-6}〔J〕$+ 0 = K + (-4.0\times10^{-6})$〔J〕

$\therefore\ K = 5.0\times10^{-6}$ J

ConcepTest12 解説続き

(d) 折り返し点では運動エネルギーが 0 となっている。折り返し点での電位を V とおいて力学的エネルギー保存の式を立てる。



前　＝　後

1.0×10^{-6}〔J〕$+0=0+(-20\times10^{-9}$〔C〕$)\times V$

$\therefore\ V=-50$〔V〕

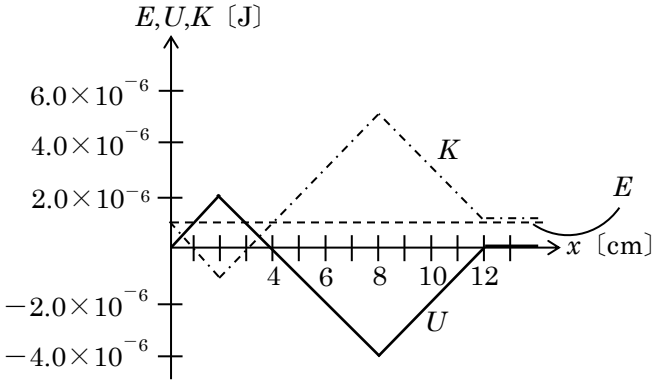
そして、電圧が−50 V となるのは

<u>$x=3.0$ cm の点</u>である。・・・答

(d)別解　速度が 0 になる点は、運動エネルギーをすべて消費して、位置エネルギーとしてチャージしたところ、といえる。よって、位置エネルギーUが、最初に持っていた運動エネルギーである 1.0×10^{-6}〔J〕となる点である。(a)で書いた $U-x$ グラフからその点を求めると <u>$x=3.0$ cm</u> とわかる。

(c)(d)別解　グラフ内に力学的エネルギーE、静電気力による位置エネルギーU、運動エネルギーK、を書き込んで考えることもできる。

（最初の位置エネルギーは 0）＋（最初の運動エネルギー1.0μJ（1.0×10^{-6}J））が力学的エネルギーE となり、これは保存する。よって、K と U の合計は常に 1.0μJ となり、(a)で書いた U–x グラフに合わせて K を書き込むことができる。

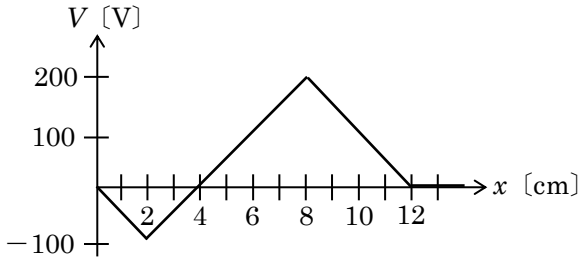


すると、運動エネルギーKが最大になるのは $x=8.0$ cm の点であり、その大きさが、5.0×10^{-6} J　(5.0μJ)とわかる・・・(c)答

折り返す点は、運動エネルギーK が 0 になる点なので、$x=3.0$ cm の点とわかる・・・(d)答

ConcepTest12 解説続き

(e) 受ける力を求める際には、一度電場 E を求める必要がある。電場 E は電位 V の傾きであり、$x = 2.0$〜4.0 の区間で 100V の電位差があるところで計算してみる。



$E = \dfrac{V}{d}$ より

$$E = \frac{100_{[\mathrm{V}]}}{2.0 \times 10^{-2}{}_{[\mathrm{m}]}} = 50 \times 10^2 = 5.0 \times 10^3{}_{[\mathrm{V/m}]}$$

受ける力 F は $|\vec{F}| = |q| \times \vec{E}$ より

$$|\vec{F}| = 20 \times 10^{-9}{}_{[\mathrm{C}]} \times 5.0 \times 10^3{}_{[\mathrm{V/m}]} = \underline{\underline{1.0 \times 10^{-4}{}_{[\mathrm{N}]}}}$$

ちなみに、−の電荷が受ける力は電場と逆向きなので、力の向きは x 軸正の向きである。