

電気工学2第5回

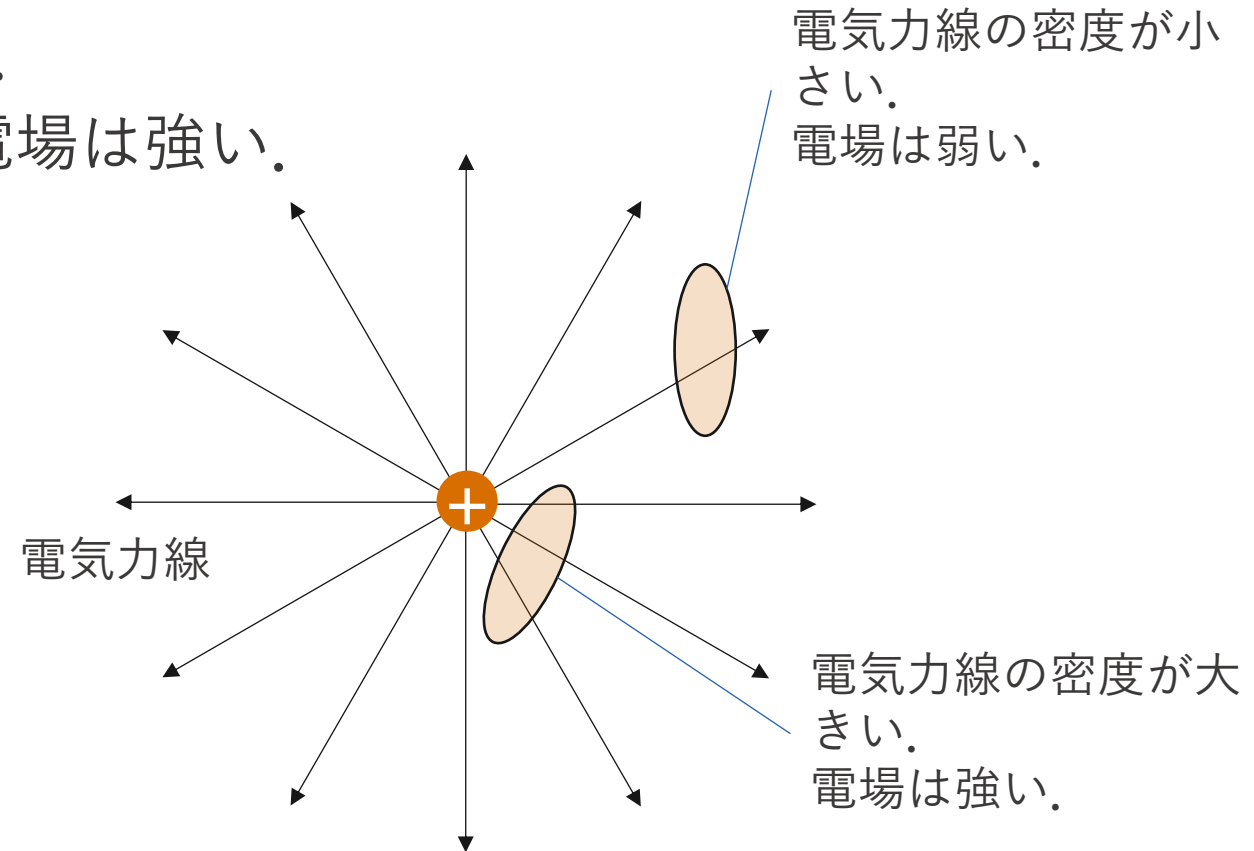
藤田 一寿

電気力線

あくまでも、仮想的なものである。
実際に存在するわけではない。

電気力線

- 電気力線は電場の様子を表すために用いられる。
 - 仮想的なものである。
 - 電場の方向を表す。
 - 正から負へ向かう。
 - 単位面積あたりE（電場）本である。
 - 単位面積あたりの本数が多ければ電場は強い。



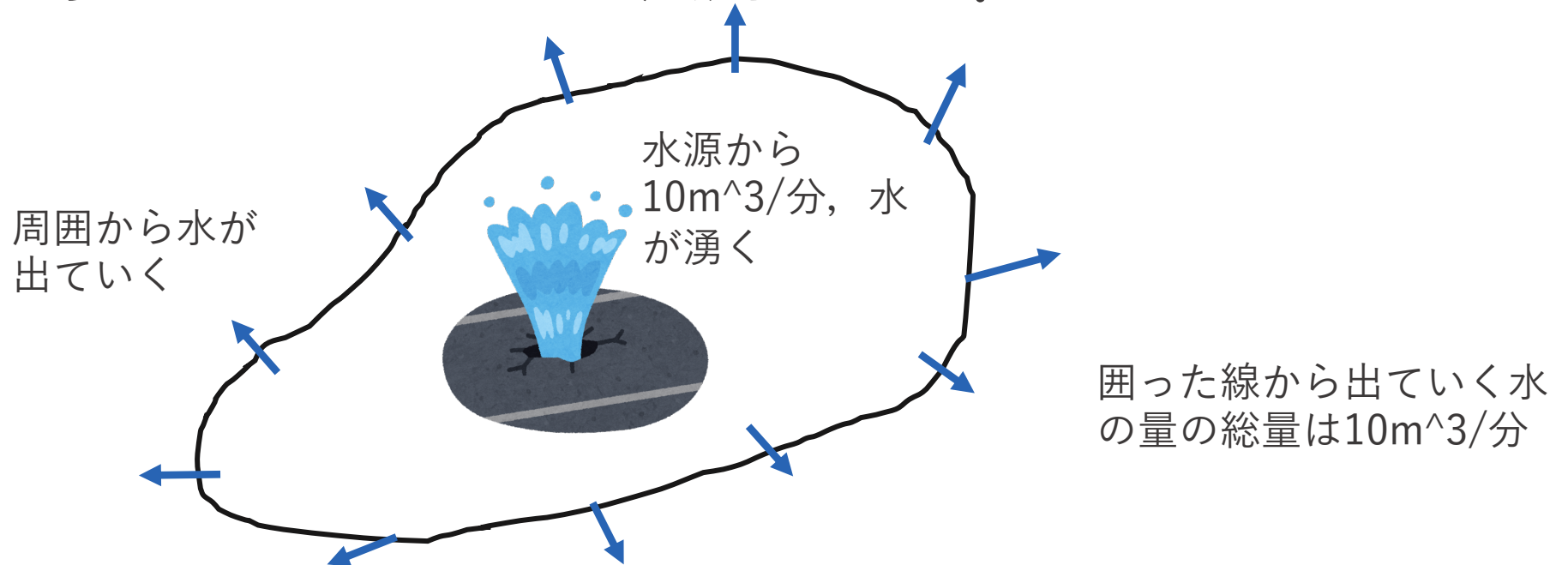
■ 電気力線の総量

- R離れたところの点電荷Qが作る電気力線の本数を求める
- Qが作る場所rの電場Eは
- $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$
- よって、点電荷Qが出す電気力線の総量Nは
- $N = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \cdot S = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \cdot 4\pi r^2 = \frac{Q}{\epsilon_0}$
- つまり、電荷の出す電気力線の総量は電荷Qを誘電率で割ったものである。

ガウスの法則

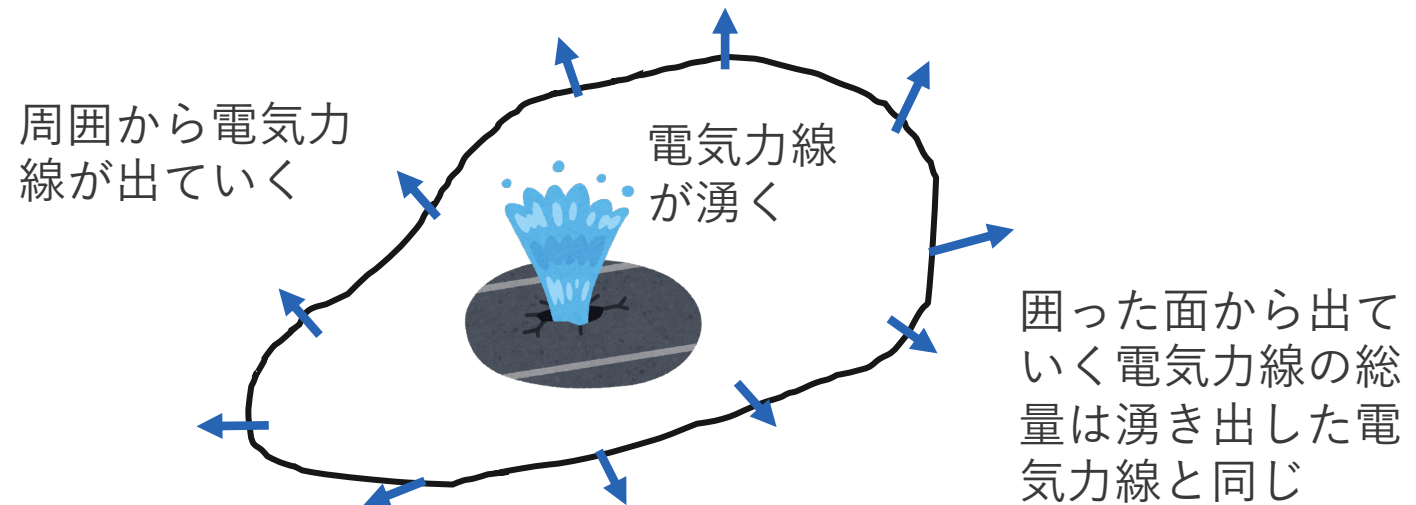
■ ガウスの法則（積分形）

- ガウスの法則は様々な物理現象で見られる。
 - 電磁気学
 - 熱力学
 - 流体力学
- ガウスの法則は、閉曲面内の水源から湧き出す水の量と出ていく水の量が等しいというだけの法則である。



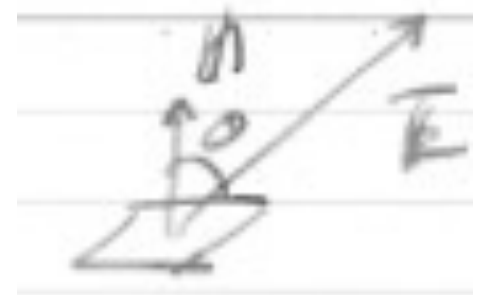
■ 電磁気学でのガウスの法則

- 電磁気学では
 - 水源→電荷
 - 水→電気力線
 - 水の流れ→電場
- のように対応する.
- つまり、ガウスの法則は、水源である電荷から出てくる電気力線の総量と閉曲面から出ていく電気力線の総量は等しいことを示している.



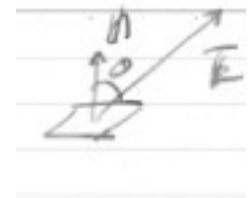
■ 閉曲面から出ていく電気力線の本数

- 閉曲面の微小領域を考える。
- 微小領域の場所を \boldsymbol{x} ，面積を $\Delta S(\boldsymbol{x})$ ，電場を $\boldsymbol{E}(\boldsymbol{x})$ とすると，微小領域から出ていく電気力線の本数 ΔN は
- $\Delta N = \boldsymbol{E}(\boldsymbol{x}) \cdot \boldsymbol{n}(\boldsymbol{x}) \Delta S$
- ここで $\boldsymbol{n}(\boldsymbol{x})$ は微小領域に対し垂直な単位ベクトルである。
- 閉曲面 S から出ていく電気力線の総本数 N は ΔN を面積分すれば求まる。
- $N = \int_S \boldsymbol{E}(\boldsymbol{x}) \cdot \boldsymbol{n}(\boldsymbol{x}) dS$



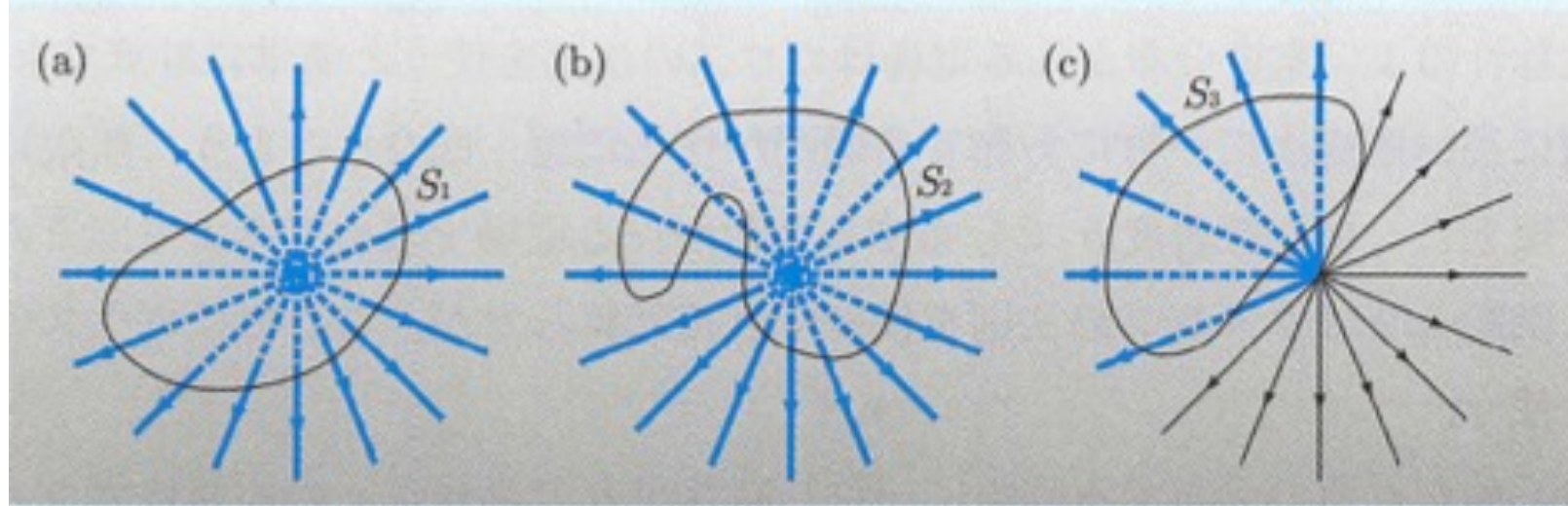
■ ガウスの法則（積分形）

- 電気力線の本数は閉曲面内の電荷を Q とすると Q/ε_0 だから
- $N = \int_S \mathbf{E}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{n}(\mathbf{x}) dS = \frac{Q}{\varepsilon_0}$
- 単位体積当たりの電荷を $\rho(\mathbf{r})$ をすると Q は
- $Q = \int_V \rho(\mathbf{x}) dV = \int_V \rho(\mathbf{x}) d^3x$
- と表せる． 以上をまとめると，
- $\int_S \mathbf{E}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{n}(\mathbf{x}) dS = \int_V \rho(\mathbf{x}) d^3x$
- となる． これをガウスの法則（積分形） という．



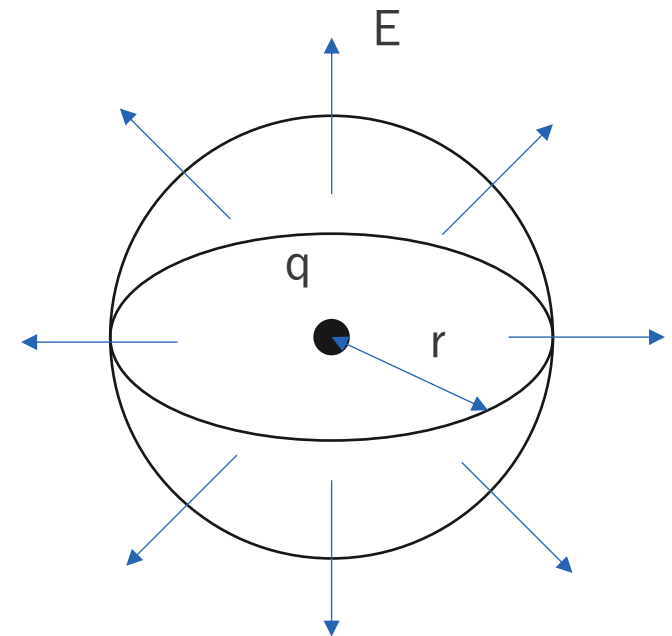
■ もう一度、ガウスの法則

- 電荷 Q から発生する電気力線の本数 $\frac{Q}{\epsilon_0}$ は、その電荷を囲んだ領域から出ていく電気力線の本数 ES と等しい。
- $ES = \frac{Q}{\epsilon_0}$



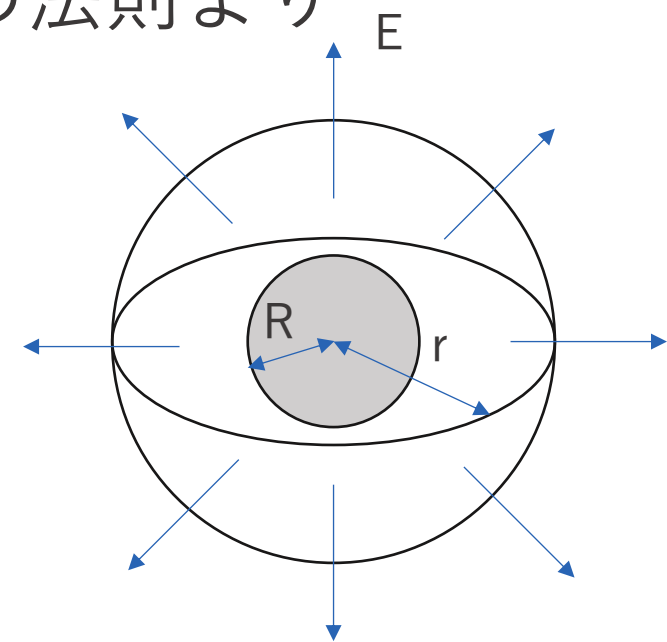
■ 点電荷が作る電場

- 電荷 q をもつ点電荷が、それを中心とした半径 r の球で囲まれているとする.
- 球の表面積は $4\pi r^2$ だから、ガウスの法則より
- $4\pi r^2 E = \frac{q}{\epsilon_0}$
- よって、点電荷が作る電場は
- $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$
- となる.



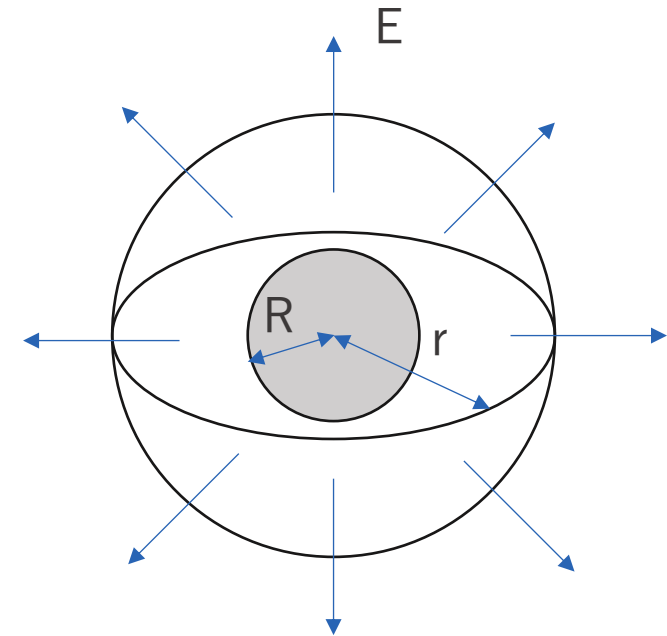
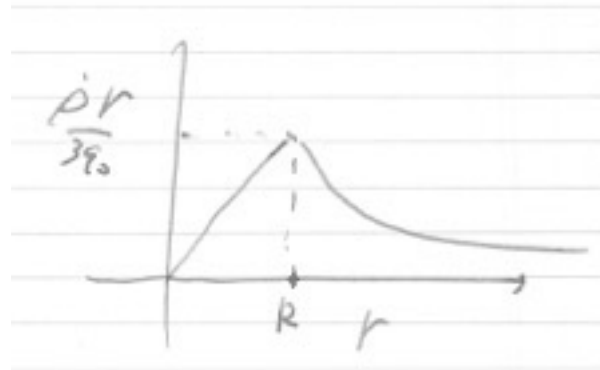
■ 球内の一様に分布する電荷が作る電場

- 半径 R の球に電荷密度 ρ で均一に電荷が分布しているとする.
- この球の中心から r の場所の電場を求める.
- 電荷が分布している球と同心の半径 r の球を考える.
- $R \leq r$ の時,
- 半径 r の球内にある電荷は $\frac{4}{3}\pi R^3 \rho$, よってガウスの法則より
- $4\pi r^2 E = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho / \epsilon_0$
- $E = \frac{\rho R^3}{3\epsilon_0 r^2}$



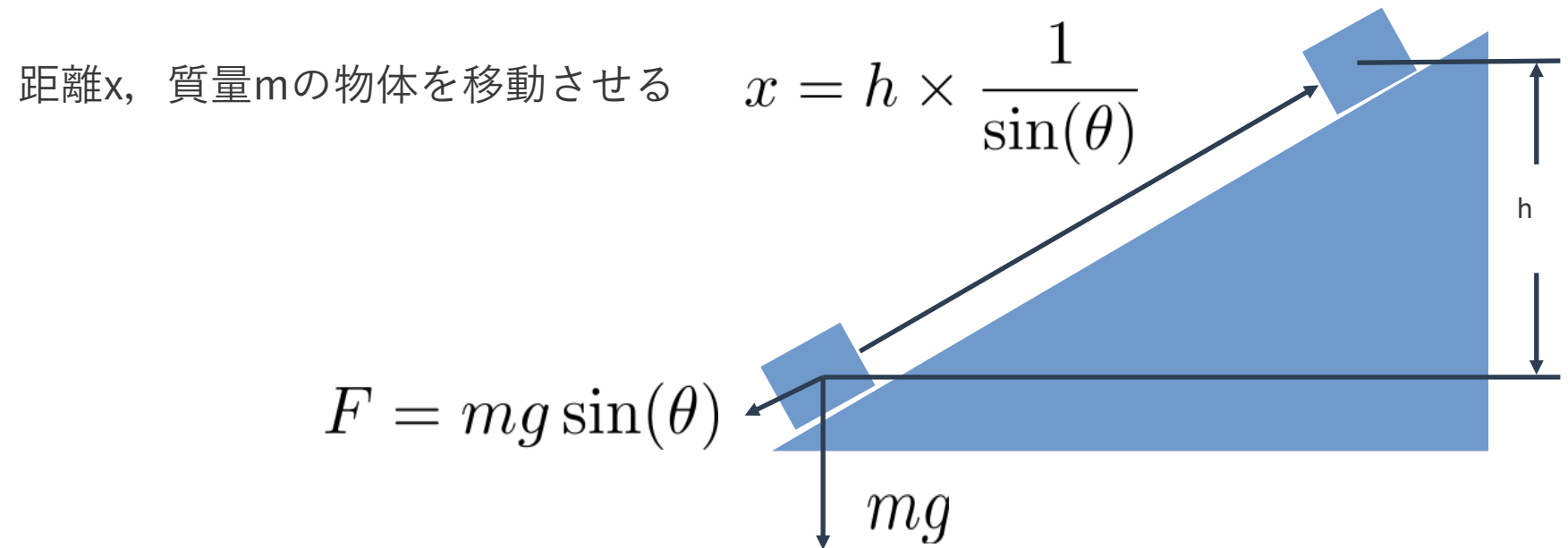
■ 球内の一様に分布するが作る電場

- $R > r$ の時,
- 半径 r の球内にある電荷は $\frac{4}{3}\pi r^3 \rho$, よってガウスの法則より
- $4\pi r^2 E = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho / \epsilon_0$
- $E = \frac{r\rho}{3\epsilon_0}$



電位

■ 力学でのポテンシャルエネルギー



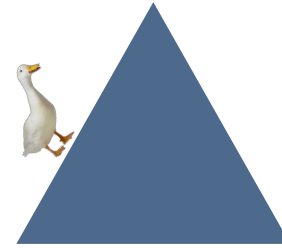
距離 x 移動させるのに必要な仕事 $w = Fx$

$$= mg \sin(\theta) \times h \times \frac{1}{\sin(\theta)}$$
$$= mgh \quad \text{位置エネルギーの式になる}$$

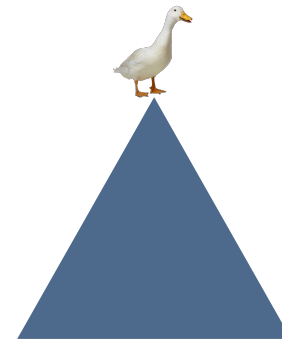
仕事をした分はポテンシャルエネルギーとして貯まる。

■ もうすこし簡単に言えば

- 山登りするためには，仕事をしなければならない。

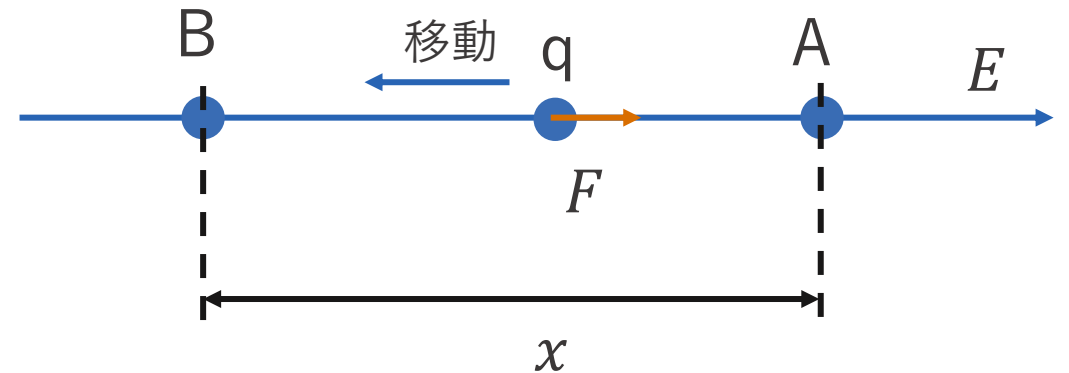


- 山にのぼるために使った仕事は，山の高さ分のポテンシャルエネルギーに変換される。



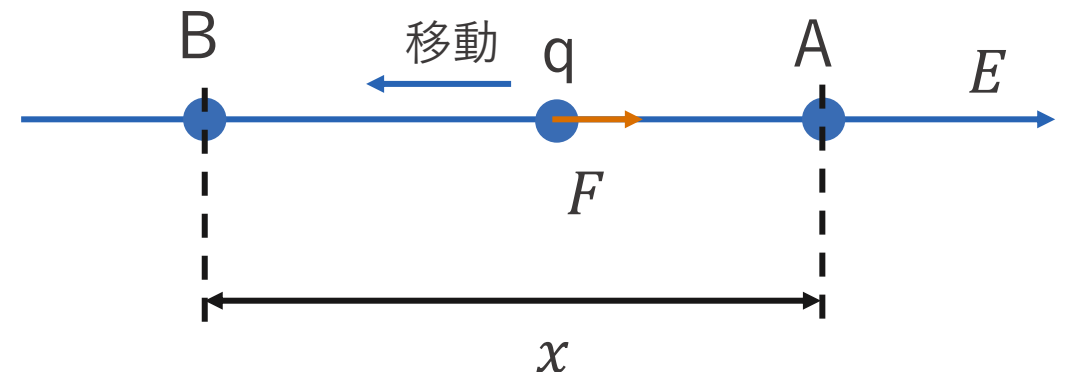
■ 電場と電位と仕事

- 簡単な場合
- 図のように電場 E と同じ向きの直線上に距離 x 離れた点A, Bがある.
- 電荷 q を点Aから点Bまで移動させる. このとき必要な仕事 W はいくらか?
- 電荷 q が電場から受ける力 F は
- $F = qE$
- AB間の移動に要する仕事は
- $W = Fx = qEx$



■ 電場と電位と仕事

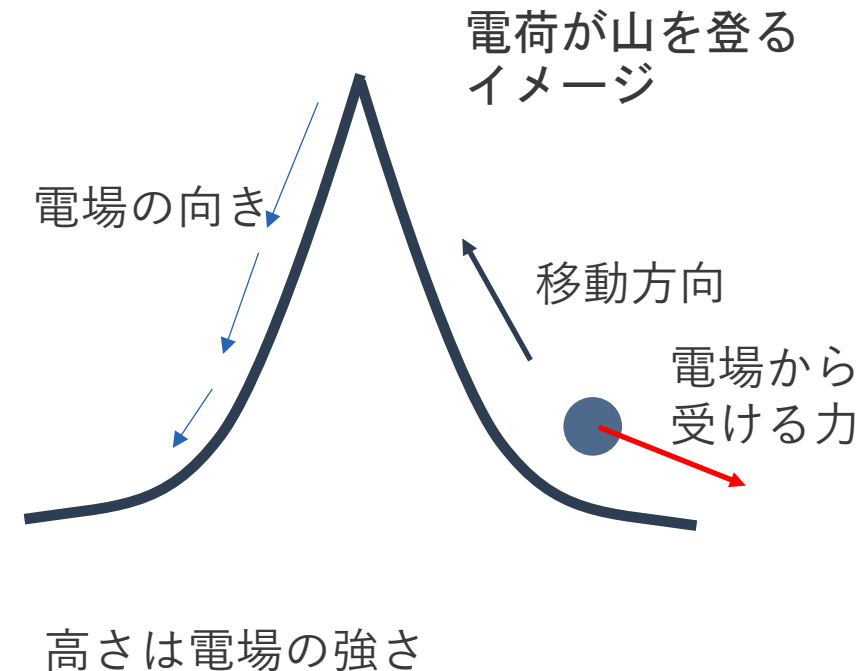
- 図のように電場 E と同じ向きの直線上に距離 x 離れた点A, Bがある.
- 電荷 q を点Aから点Bまで移動させる. このとき必要な仕事 W は
- $W = Fx = qEx$
- $q=1$ のときの仕事は
- $W = Ex$
- この仕事は, 1Cの電荷のポテンシャルエネルギーとなる.



■ 電場と電位と仕事

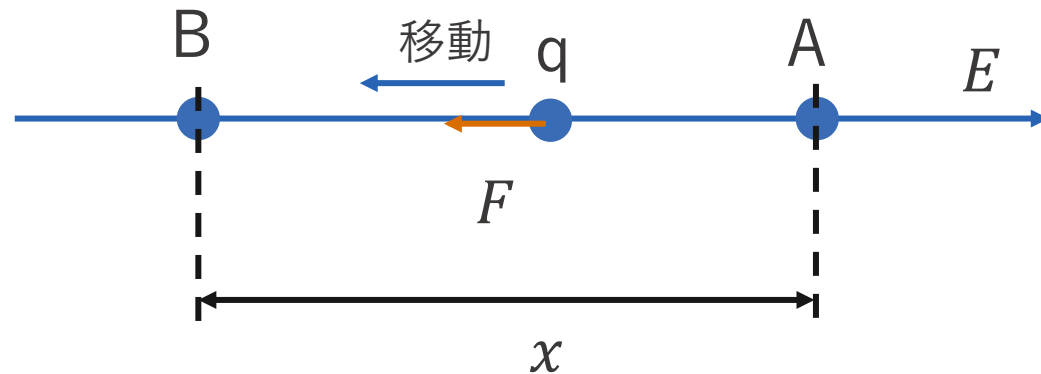
- 電荷を電場という坂を登るために仕事をする。
- その仕事は電荷のポテンシャルエネルギーとしてたまる。
- 電荷が1Cのとき、このポテンシャルエネルギーを電位、静電エネルギーという。

- 電場：坂
- 電場の向き：坂の下る方向
 - 下る方向に重力が加わる
- 電場の強さ：坂の傾き
- 電位：位置エネルギー



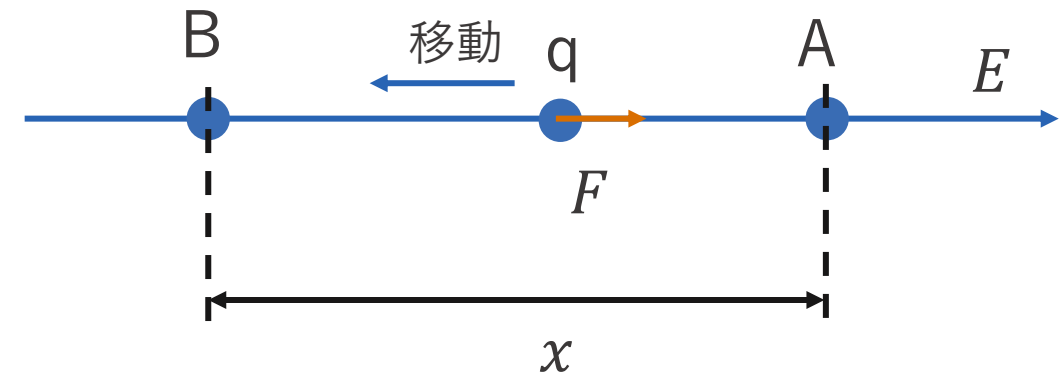
■ 仕事と積分

- 図のような場合，仕事は力と距離をかけたものと高校では習ったかもしれない．
- $W = Fx$
- この式は，点Aから点Bまで移動するために必要な力を積分したものである．つまり，
- $W = \int_{AB} F r \, dr = Fx$



■ 仕事と積分

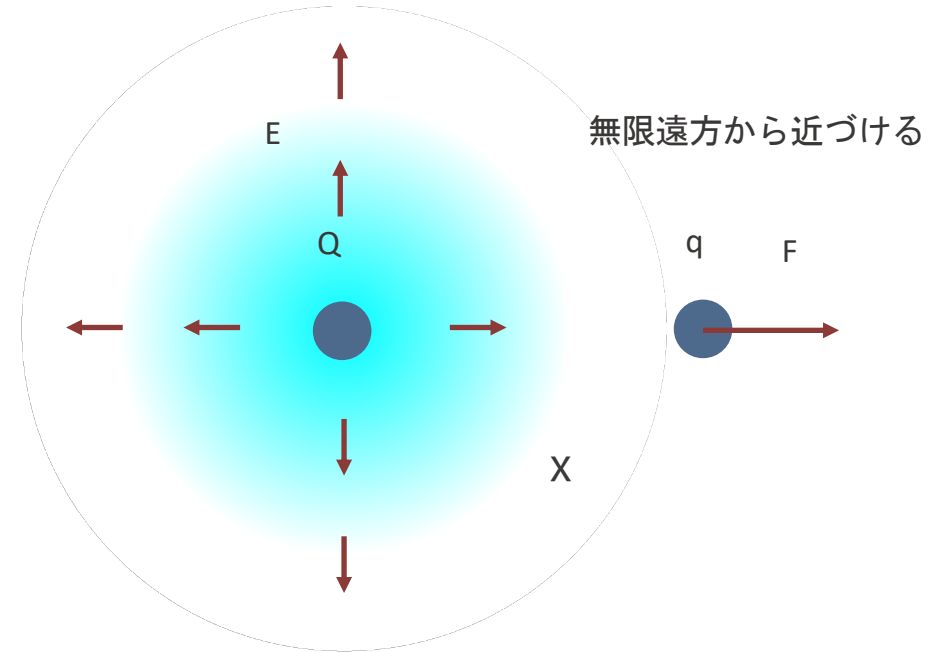
- 図のように，力 F に逆らって移動するとすると，
- $W = -\int_{AB} Fr \, dr = Fx$
- と書ける． 逆らうので力 F は移動方向に対し反対方向である． つまり F は負となり， 仕事は正となる． この式を用いると， 力に沿って移動するときは負の仕事をすることとなる．
- 感覚的には
 - 力に逆らう場合（上り坂）は疲れる．
 - 力に沿う場合（下り坂）は楽ちん．



■ 点電荷の電位

- 点電荷 Q が作る電場中を点電荷 q を基準点（無限遠方）から点電荷 Q に移動させると考える．その時必要な仕事は

$$\begin{aligned} W &= - \int_{\infty}^x F dr \\ &= - \int_{\infty}^x q E dr \\ &= - \int_{\infty}^x \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qq}{r^2} dr \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qq}{x} \end{aligned}$$



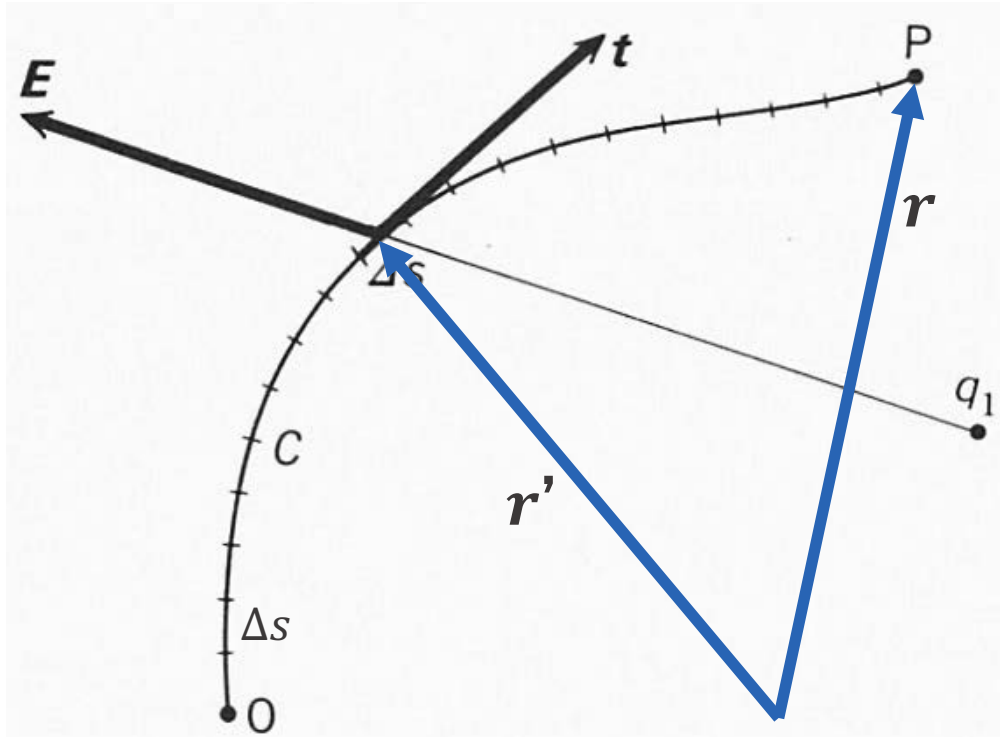
- ただし， x を Q と q の距離とする．

■ 点電荷の電位

- q を1Cと考えると
- $\phi(x) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{x}$
- 点電荷 Q が電場を作り, 1 Cの電荷を基準点 (無限遠方) から Q から x の距離のところまで移動させるのに必要な仕事である.
- 無限遠方と基準としたときの, 点電荷が作る電位である.

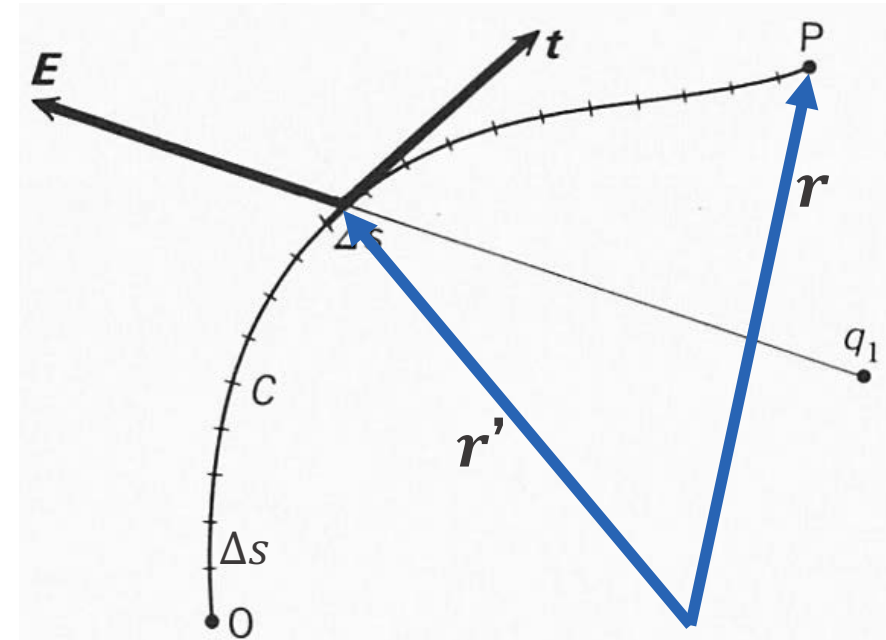
■ もっと一般的に考える

- 基準を点Oとして点Pでの電位（静電ポテンシャル）は
- $\phi(\mathbf{r}) = - \int_{OP} \{ \mathbf{E}(\mathbf{r}') \cdot \mathbf{t}(\mathbf{r}') \} ds'$



■ 電位の一般的な式

- 電場 $\mathbf{E}(\mathbf{r}')$ 中にある1Cの電荷を基準点OからPに移動させる．電荷が場所 \mathbf{r}' にあるときに電荷が電場から受ける力を $\mathbf{F}(\mathbf{r}')$ とすると，移動させるために必要な仕事は
- $W(\mathbf{r}) = - \int_{OP} \{ \mathbf{F}(\mathbf{r}') \cdot \mathbf{t}(\mathbf{r}') \} ds'$
- ここで $\mathbf{t}(\mathbf{r}')$ は移動方向を表す単位ベクトルである．
- 電場から $\mathbf{F}(\mathbf{r}') = \mathbf{E}(\mathbf{r}')$ の力を受けるから
- $W(\mathbf{r}) = - \int_{OP} \{ \mathbf{E}(\mathbf{r}') \cdot \mathbf{t}(\mathbf{r}') \} ds'$
- これが電位である．

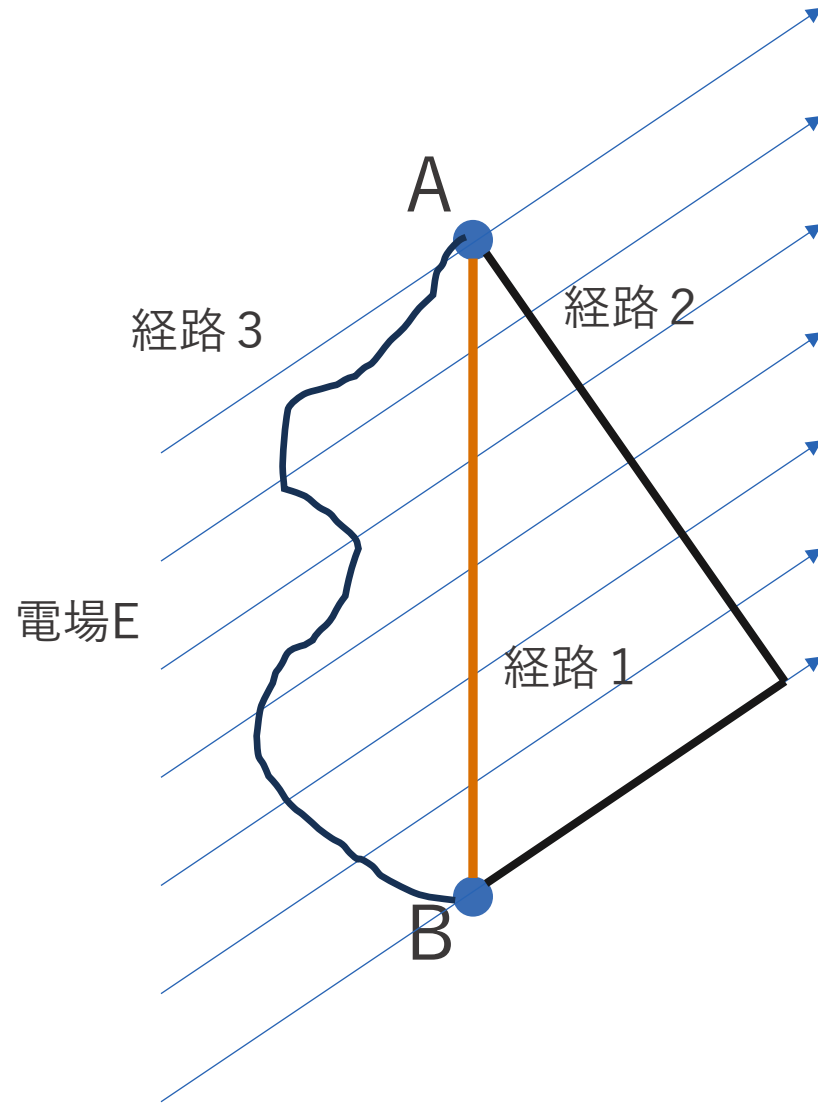


■ 電位差

- 任意の点と任意の点での電位の差を電位差という.
 - 任意の点と任意の点の間で積分したものになっている.
- 2点, 点Pと点P'電位差は
- $\phi(\mathbf{r}_{P'}) - \phi(\mathbf{r}_P) = - \int_{OP'} \{\mathbf{E}(\mathbf{r}') \cdot \mathbf{t}(\mathbf{r}')\} ds' - (- \int_{OP} \{\mathbf{E}(\mathbf{r}') \cdot \mathbf{t}(\mathbf{r}')\} ds')$
- とかける.
- $\int_{OP'} \{\mathbf{E}(\mathbf{r}') \cdot \mathbf{t}(\mathbf{r}')\} ds' = \int_{OP} \{\mathbf{E}(\mathbf{r}') \cdot \mathbf{t}(\mathbf{r}')\} ds' + \int_{PP'} \{\mathbf{E}(\mathbf{r}') \cdot \mathbf{t}(\mathbf{r}')\} ds'$
- だから
- $\phi(\mathbf{r}_{P'}) - \phi(\mathbf{r}_P) = - \int_{OP} \{\mathbf{E}(\mathbf{r}') \cdot \mathbf{t}(\mathbf{r}')\} ds' - \int_{PP'} \{\mathbf{E}(\mathbf{r}') \cdot \mathbf{t}(\mathbf{r}')\} ds' - (- \int_{OP} \{\mathbf{E}(\mathbf{r}') \cdot \mathbf{t}(\mathbf{r}')\} ds') = - \int_{PP'} \{\mathbf{E}(\mathbf{r}') \cdot \mathbf{t}(\mathbf{r}')\} ds'$

■ 電位， 電位差は積分経路によらない

- 電位および電位差の値は積分経路によらない.



経路 1, 2, 3 どの経路で積分しても電位は同じ.

もちろん，電荷をどの経路で移動させても同じ仕事が必要である.

■ 仕事具体的に計算してみる

点電荷 q を電場 E 中を点Aから点B(距離 x)まで移動するときに必要な仕事を計算してみる.

経路ABの移動に必要な仕事は, 移動に必要な力は $F = qE$ なので

$$W = qEx$$

経路ACBの移動に必要な仕事はどうか?

経路ACの移動に必要な仕事は, 移動距離は $x \cos \theta$ で必要な力は $F = qE \cos \theta$ なので

$$W_{AC} = Fx \cos \theta = qEx \cos^2 \theta$$

経路CBの移動に必要な仕事は, 移動距離は $x \sin \theta$ で必要な力は $F = qE \sin \theta$ なので

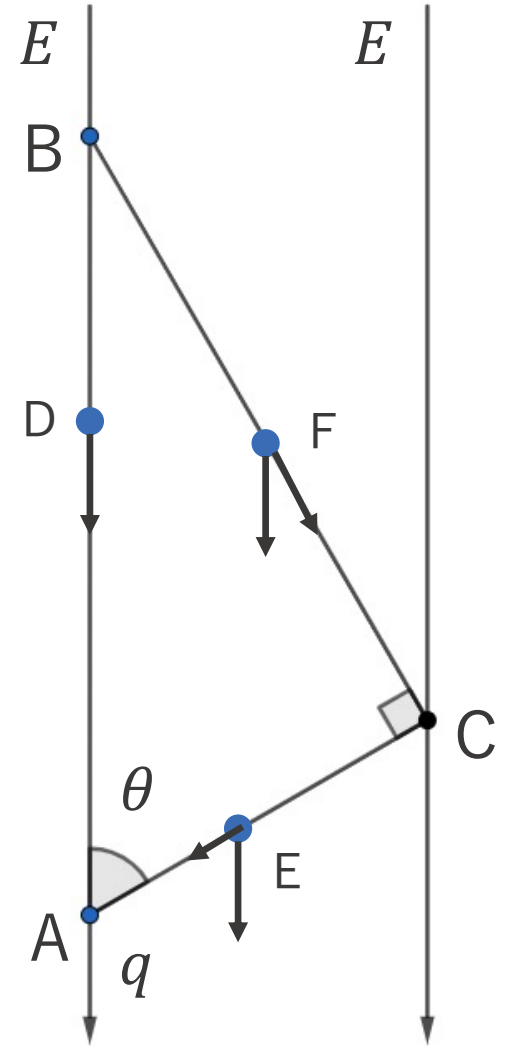
$$W_{CB} = Fx \sin \theta = qEx \sin^2 \theta$$

よって, 経路ACBの移動に必要な仕事は

$$W = qEx \cos^2 \theta + qEx \sin^2 \theta$$

$$W = qEx(\cos^2 \theta + \sin^2 \theta) = qEx$$

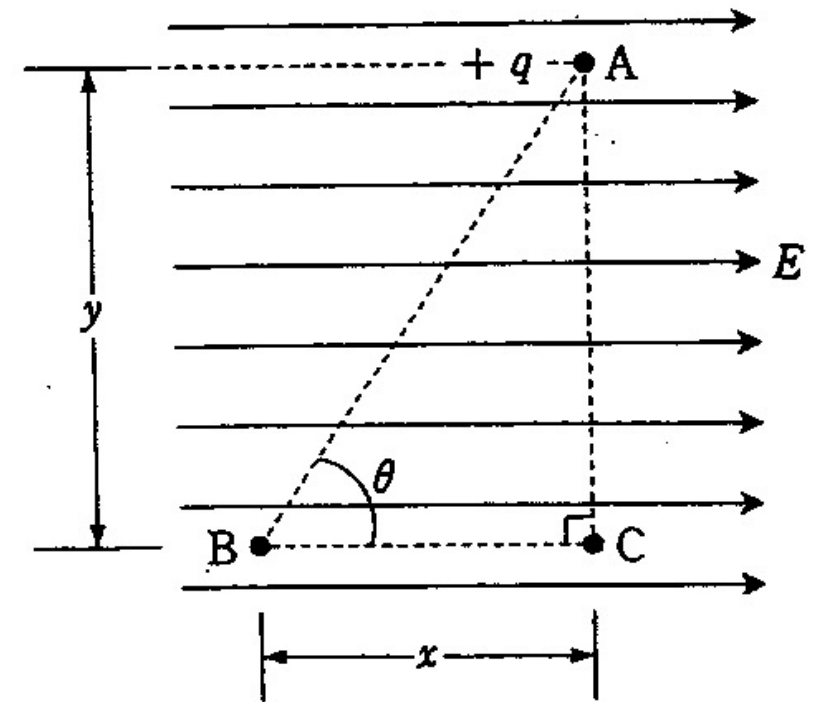
となり, 経路が異なっても同じことが分かる.



問題

- 図のような一様電場中の点 A に $+q[C]$ の電荷がある．この電荷を A から B へ動かすときの仕事 $[J]$ はどれか．ただし，電界の強さを $E[V/m]$ ， B C 間の距離を $x[m]$ ， A C 間の距離を $y[m]$ とする．

1. qEx
2. qEy
3. $qEx + qEx$
4. $qEx / \sin \theta$
5. $qEx / \cos \theta$



問題

- 図のような一様電場中の点Aに $+q[C]$ の電荷がある。この電荷をAからBへ動かすときの仕事[J]はどれか。ただし、電界の強さを $E[V/m]$ 、BC間の距離を $x[m]$ 、AC間の距離を $y[m]$ とする。

1. qEx
2. qEy
3. $qEx + qEy$
4. $qEx / \sin \theta$
5. $qEx / \cos \theta$

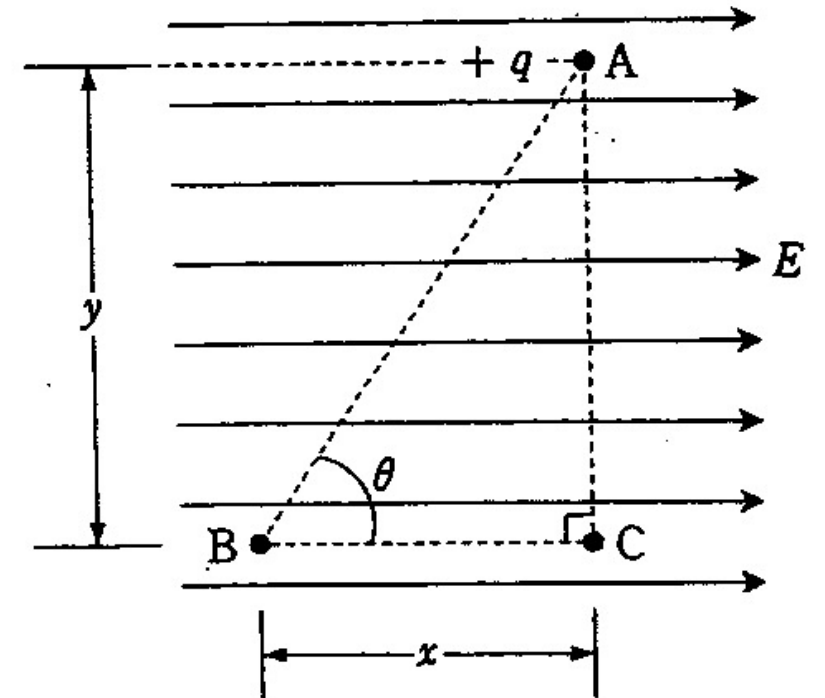
経路ABの移動に必要な仕事と経路ACBの移動に必要な仕事は同じである。

また、AC間は等電位面なので仕事は必要ない。

よって移動に必要な仕事はBC間の移動に必要な仕事のみである。

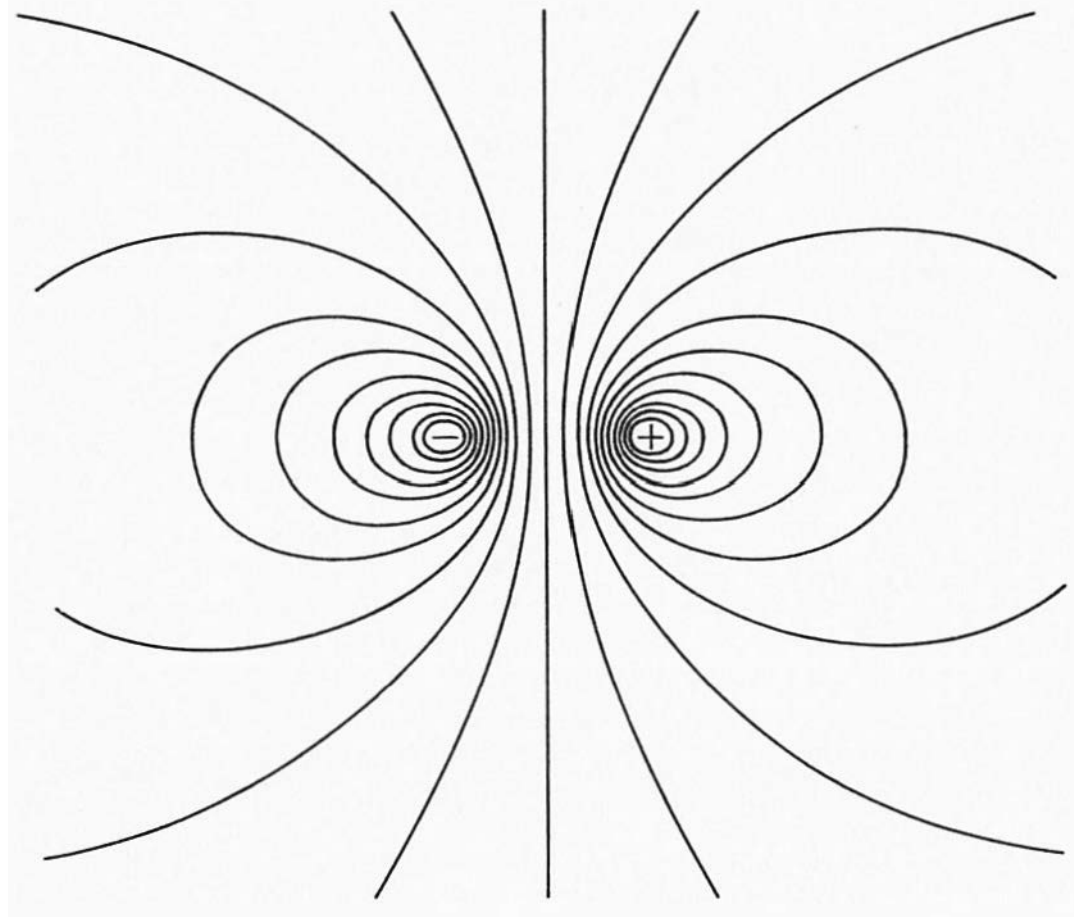
よって移動に必要な仕事は

$$W = qEx$$



■ 等電位面

- 電位が等しい面を等電位面という。



点電荷の電位

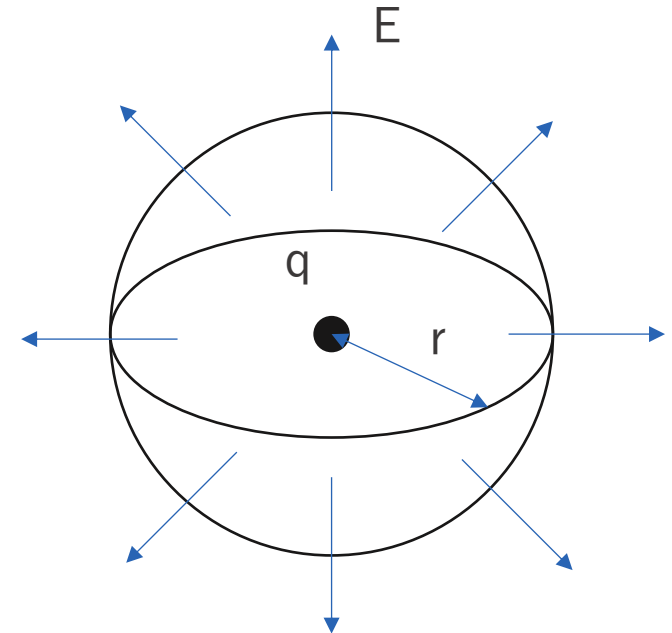
- 電荷 q をもつ点電荷が作る電場は

- $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$

- である.

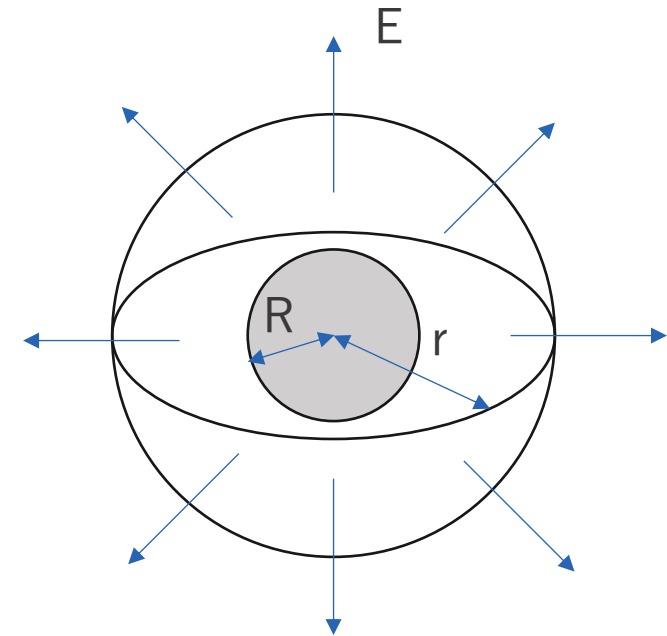
- 無限遠方を0として電荷からの距離 r の場所の電位は

- $V = - \int_{\infty}^r \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{x^2} dx = \left[\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{x} \right]_{\infty}^r = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$



■ 球内の一様に分布する電荷の電位

- 半径 R の球に電荷密度 ρ で均一に電荷が分布しているとする。
- 無限遠方を基準としたとき，この球の中心から r の場所の電位は
- $R \leq r$ の時，
- 電場 $E = \frac{\rho R^3}{3\epsilon_0 r^2}$ なので電位は
- $V = - \int_{\infty}^r \frac{\rho R^3}{3\epsilon_0 x^2} dx = \left[\frac{\rho R^3}{3\epsilon_0 x} \right]_{\infty}^r = \frac{\rho R^3}{3\epsilon_0 r}$

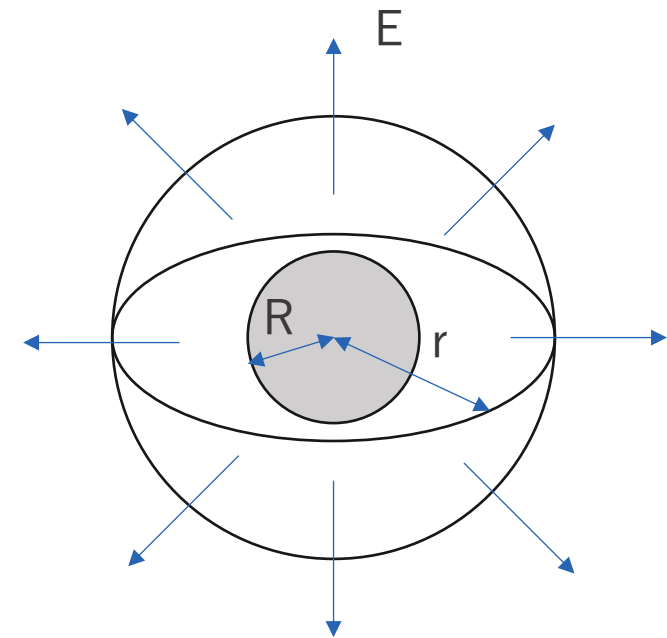
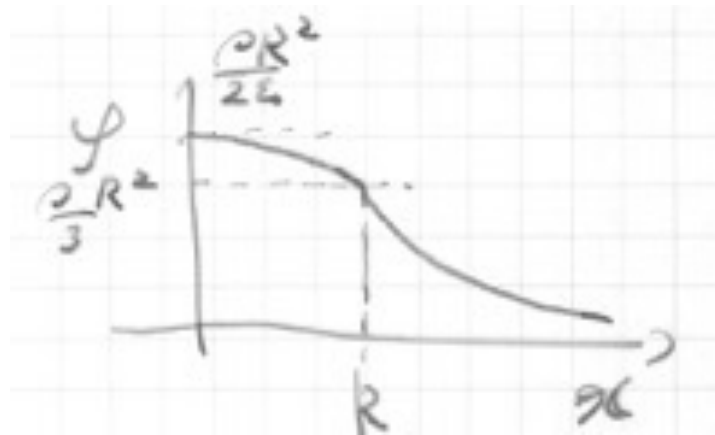


■ 球内の電荷が作る電場

- $R > r$ の時,
- 電場は $E = \frac{r\rho}{3\varepsilon_0}$ なので電位は

$$\bullet V = -\int_{\infty}^r E dx = -\int_R^r \frac{x\rho}{3\varepsilon_0} dx - \int_{\infty}^R \frac{\rho R^3}{3\varepsilon_0 x^2} dx = -\left[\frac{x^2\rho}{6\varepsilon_0}\right]_R^r + \frac{\rho R^2}{3\varepsilon_0}$$

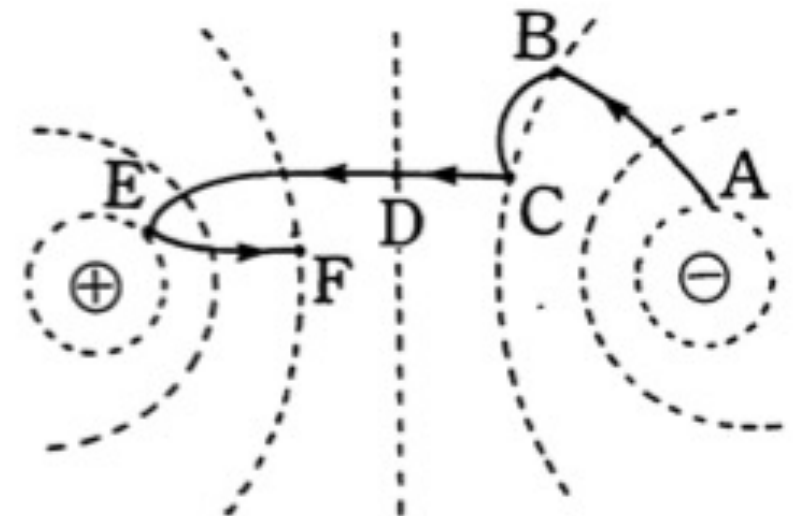
$$\bullet V = -\frac{r^2\rho}{6\varepsilon_0} + \frac{R^2\rho}{6\varepsilon_0} + \frac{\rho R^2}{3\varepsilon_0} = \frac{\rho}{6}(3R^2 - r^2)$$



問題

- 図は正負等量の2つの点電荷の周りの電場を3Vごとの等電位線で示したものである。この電場中で $2.0 \times 10^{-5} \text{C}$ のn電荷を $A \rightarrow B \rightarrow \dots \rightarrow F$ の経路で運ぶ時、外力のする仕事が次のようになる区間はどれか。

1. 最大
2. 0
3. 負

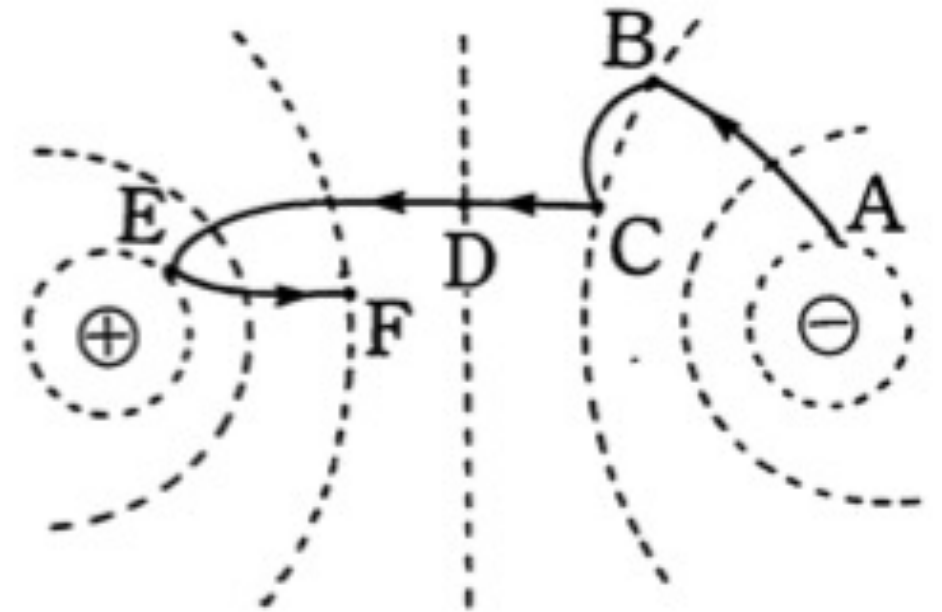


問題

- 図は正負等量の2つの点電荷の周りの電場を3Vごとの等電位線で示したものである。この電場中で $2.0 \times 10^{-5} \text{C}$ のn電荷を $A \rightarrow B \rightarrow \dots \rightarrow F$ の経路で運ぶ時、外力のする仕事が次のようになる区間はどれか。

1. 最大
2. 0
3. 負

1. 正の電荷を運ぶとき、最も高く電位を上げる移動が最も仕事を必要とする。よって、DからEへの移動が最も仕事を必要とする。
2. 等電位面上を移動する場合、仕事を必要としない。よってBからCへの移動に必要な仕事は0である。
3. 正の電荷を運ぶ時、電位が下がる移動は負の仕事になる。よってEからFへの移動は負の仕事となる。



■ 問題

- $10\mu\text{C}$ の点電荷を電位が 10V から 20V までゆっくり動かすために必要な仕事 [μJ] を求めよ.

■ 問題

- $10\mu\text{C}$ の点電荷を電位が10Vから20Vまでゆっくり動かすために必要な仕事 $[\mu\text{J}]$ を求めよ.

電位差は10Vなので移動に必要な仕事 W は

$$W = qV = 10 \times 10^{-6} \times 10 = 1.0 \times 10^{-4} [\text{J}] = 1.0 \times 10^2 [\mu\text{J}]$$

■ 問題

- $-5\mu\text{C}$ の点電荷を点 A から点 B までゆっくり動かすのに $40\mu\text{J}$ の仕事が必要であった．点 A の電位が $V_A = 5\text{V}$ であるとき，点 B の電位 V_B を求めよ．

問題

- $-5\mu\text{C}$ の点電荷を点Aから点Bまでゆっくり動かすのに $40\mu\text{J}$ の仕事が必要であった．点Aの電位が $V_A = 5\text{V}$ であるとき，点Bの電位 V_B を求めよ．

電位差は $V_B - 5[\text{V}]$ なので移動に必要な仕事 W は

$$W = qV = -5 \times 10^{-6} \times (V_B - 5) = 40[\mu\text{J}] = 40 \times 10^{-6}[\text{J}]$$

よって

$$-5 \times 10^{-6} \times (V_B - 5) = 40 \times 10^{-6}$$

$$-5 \times (V_B - 5) = 40$$

$$5V_B = 25 - 40 = -15$$

$$V_B = -3[\text{V}]$$

■ 問題

- 電場内に2点A, Bがあり, AはBよりも電位が $3.0 \times 10^2 \text{ V}$ だけ低い.
質量 $6.4 \times 10^{-27} \text{ kg}$, 電気量 $3.2 \times 10^{-19} \text{ C}$ の粒子がA→Bの向きに進んできて, 速さ $2.0 \times 10^5 \text{ m/s}$ でAを通過した. Bを通過するときの速さは何 m/s か.

問題

- 電場内に2点A, Bがあり, AはBよりも電位が $3.0 \times 10^2 \text{V}$ だけ低い.
質量 $6.4 \times 10^{-27} \text{kg}$, 電気量 $3.2 \times 10^{-19} \text{C}$ の粒子がA→Bの向きに進んできて, 速さ $2.0 \times 10^5 \text{m/s}$ でAを通過した. Bを通過するときの速さは何 m/s か.

電位差 V を高い方へ移動するときに失うエネルギーは

$$W = qV$$

初速 v_0 とし, Bを通過するときの速さを v とすると, 粒子の運動エネルギーは

$$\frac{1}{2}mv_0^2 - qV = \frac{1}{2}mv^2$$

よって, Bを通過するときの粒子の速さは

$$v = \sqrt{v_0^2 - \frac{2qV}{m}} = \sqrt{2.0 \times 2.0 \times 10^{10} - \frac{2 \times 3.2 \times 10^{-19} \times 3.0 \times 10^2}{6.4 \times 10^{-27}}} = \sqrt{4.0 \times 10^{10} - 3.0 \times 10^{-19+2+27}}$$

よって, $v = 1.0 \times 10^5 \text{m/s}$

■ 問題

- 正しいのはどれか。 アルファベットで答えよ.
- a. 電場の強さは+1[C]の電荷に働く力によって定義される.
- b. 電場の強さの単位は[m/V]で表される.
- c. 単一電荷によって生じる電場の強さは電荷からの距離の 2 乗に比例する.
- d. 電場はスカラー量である.
- e. 電位は電場中で+1[C]に要する仕事である.
- f. 単一電荷によって生じる電位は電荷からの距離に反比例する.
- g. 電位はベクトル量である.

■ 問題

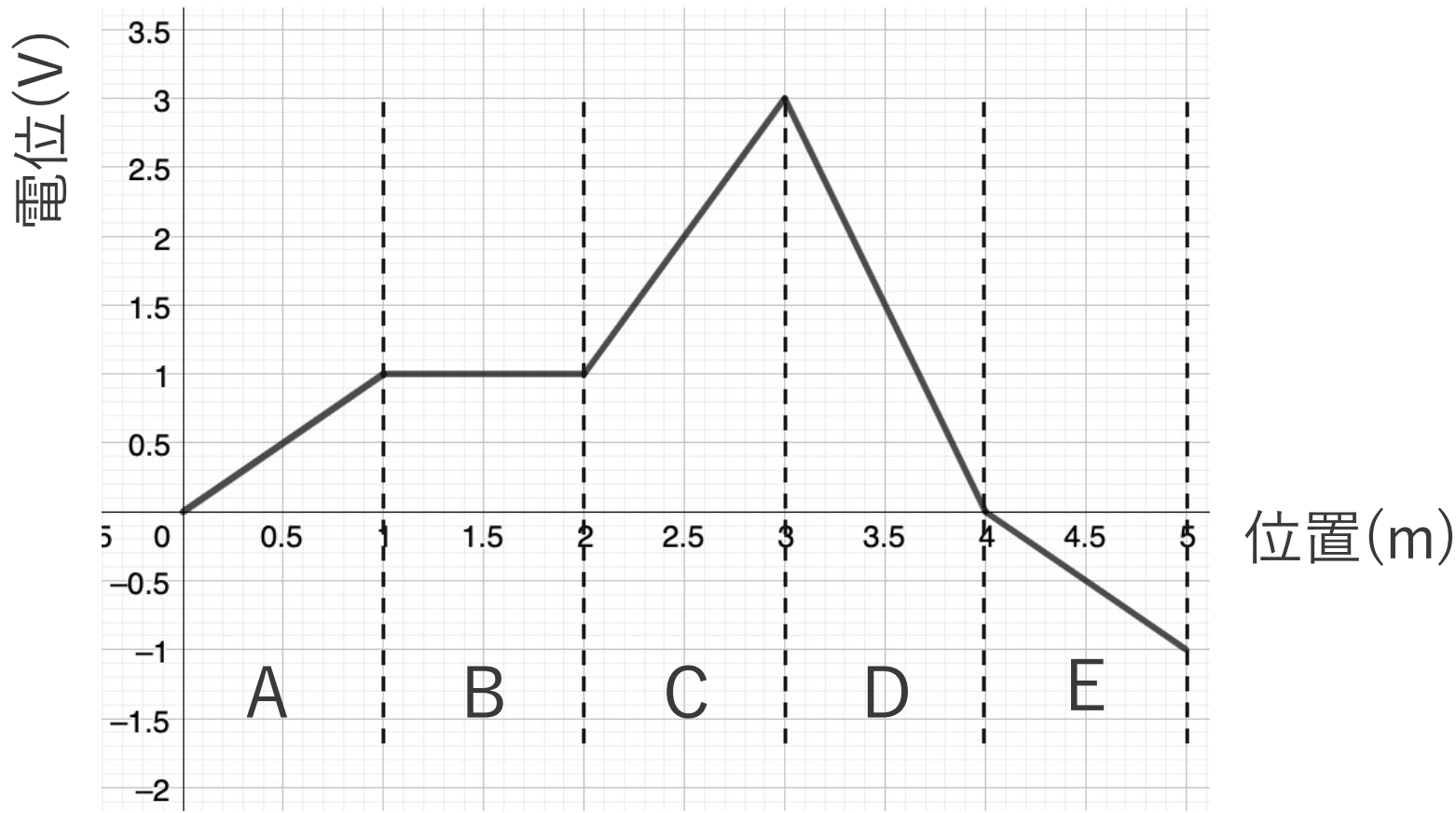
- 正しいのはどれか。 アルファベットで答えよ.
- a. 電場の強さは+1[C]の電荷に働く力によって定義される.
- b. 電場の強さの単位は[m/V]で表される.
- c. 単一電荷によって生じる電場の強さは電荷からの距離の2乗に比例する.
- d. 電場はスカラー量である.
- e. 電位は電場中で+1[C]の電荷を移動させるのに要する仕事である.
- f. 単一電荷によって生じる電位は電荷からの距離に反比例する.
- g. 電位はベクトル量である.

問題

- 正しいのはどれか。アルファベットで答えよ。
 - a. 電場の強さは+1[C]の電荷に働く力によって定義される。
 - b. 電場の強さの単位は[m/V]で表される。
 - c. 単一電荷によって生じる電場の強さは電荷からの距離の2乗に比例する。
 - d. 電場はスカラー量である。
 - e. 電位は電場中で+1[C]の電荷を移動させるのに要する仕事である。
 - f. 単一電荷によって生じる電位は電荷からの距離に反比例する。
 - g. 電位はベクトル量である。
 - a. 正しい。
 - b. V/mである。
 - c. 電場は逆二乗則が成り立つので反比例である。
 - d. 電場はベクトル量である。
 - e. 正しい
 - f. 正しい。
 - g. 電位はスカラー量である。

問題

- 図のように電位が変化するとき，以下の問いに答えよ.
- 電場のグラフを描け．ただし，電場は右向きを正とする．
 - 区間 A と電場の大きさ（絶対値）が等しい区間を求めよ．



問題

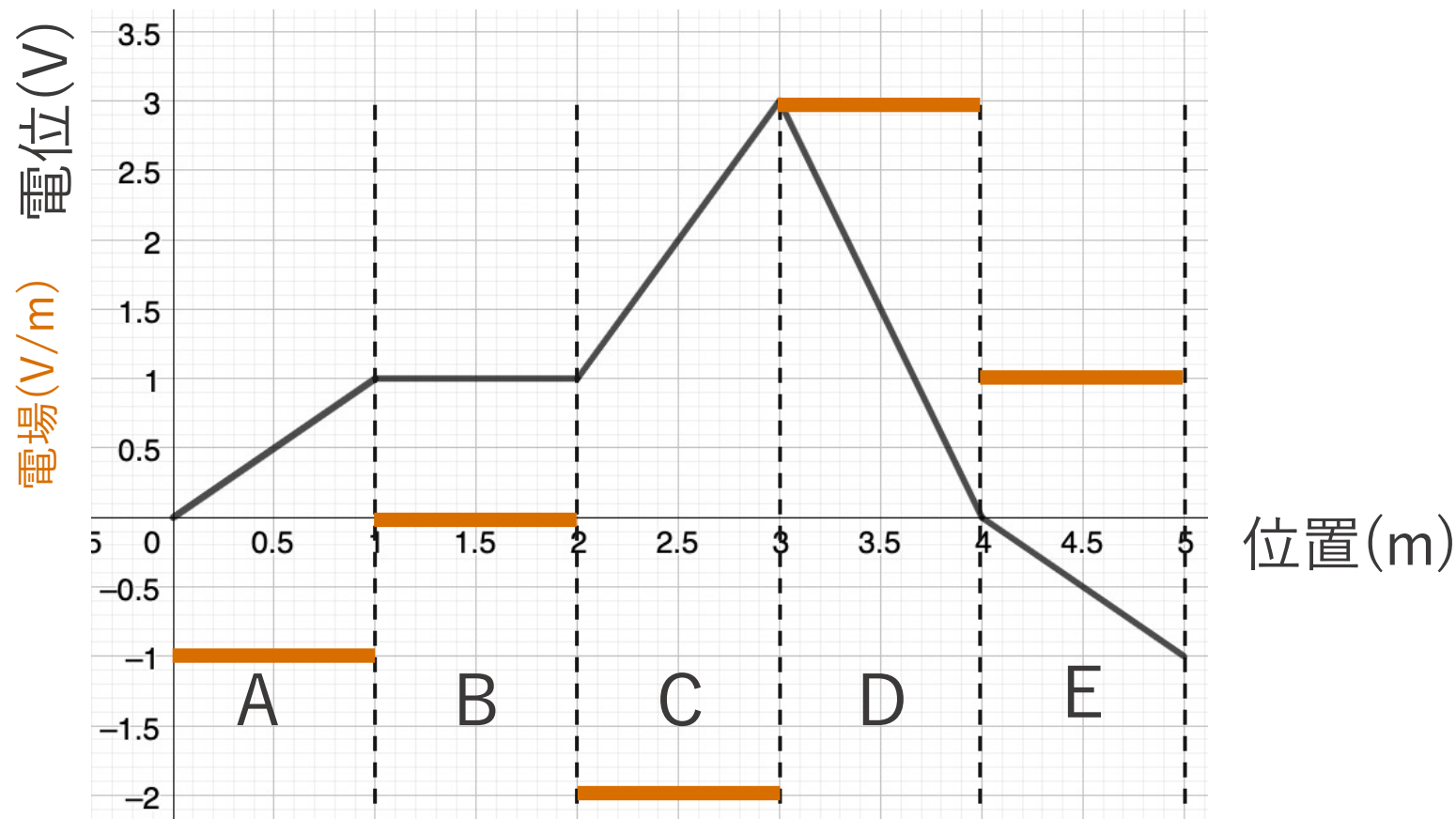
- 図のように電位が変化するとき，以下の問いに答えよ。
- 電場のグラフを描け．ただし，電場は右向きを正とする．
 - 区間 A と電場の大きさが等しい区間を求めよ．

1. 電位は1Cをx移動させるのに必要な仕事なので

$$V = (-E)x$$

つまり，電場Eは傾きx(-1)である．
よって，グラフは図のようになる．

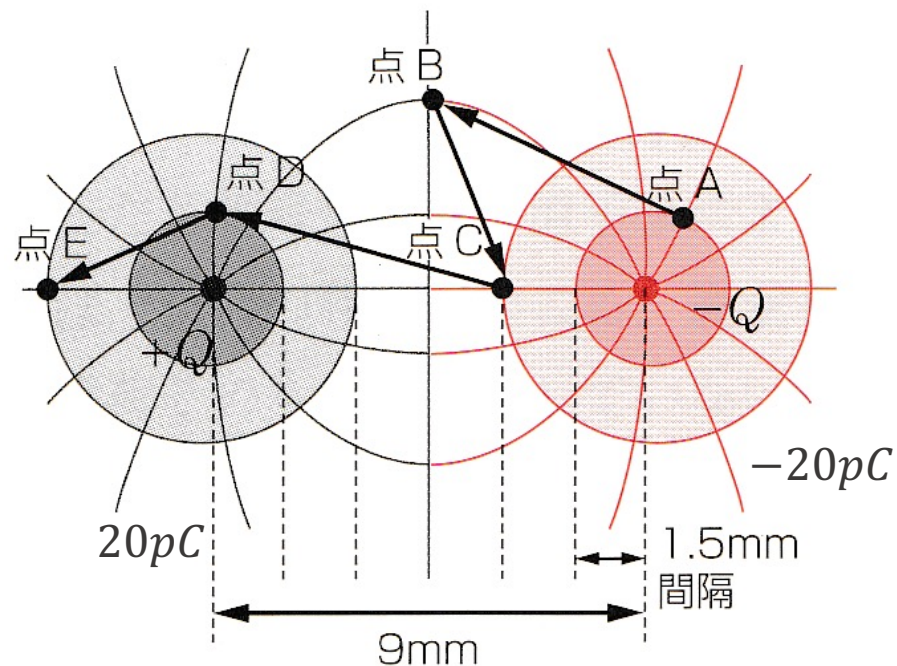
2. 区間Aと電場の大きさが等しい区間は，区間Aと傾きの大きさが等しい区間であるので，区間Eが答えである．



問題

- 真空中に $\pm 20\text{pC}$ の点電荷が 9mm 離れて静置している。以下の問いに答えよ。ただし、 $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ を $9.0\times 10^9\text{Nm}^2/\text{C}^2$ とする。また、図の閉曲線は等電位面を表す。

- 図のように、正負電荷間を 1.5mm 間隔で区切ったときのABCDE各点の電位を求めよ。
- 図において、単位正電荷（ $+1\text{C}$ ）を次のように移動した。
 $A \rightarrow B$, $B \rightarrow C$, $C \rightarrow D$, $D \rightarrow E$ 各区間の仕事を求めよ。
- 単位正電荷を $A \rightarrow E$ の経路で直線的に移動したときの仕事を求めよ。



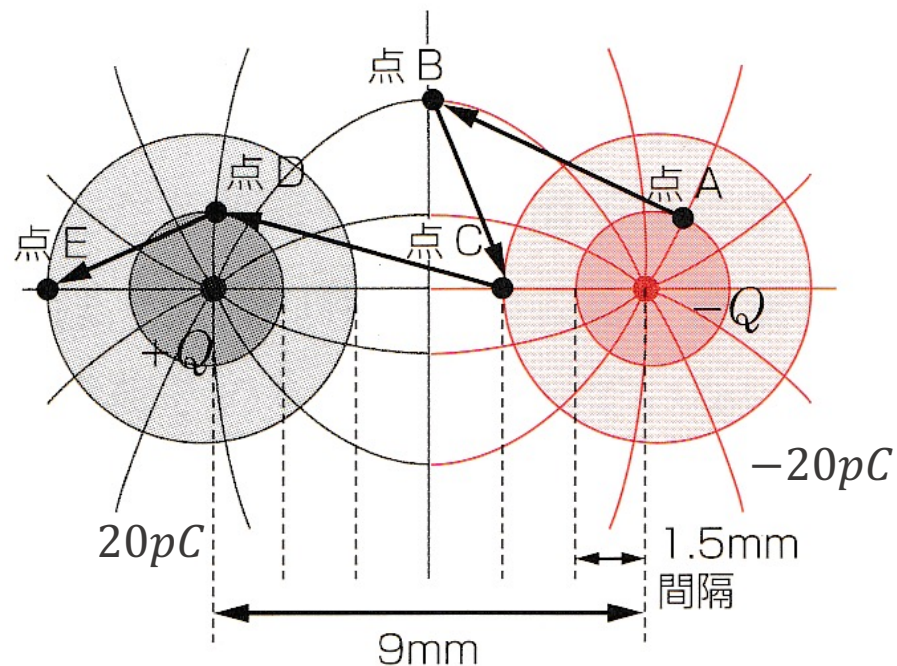
- ## 1. 点電荷の作る電位は

よって、それぞれの点での電位は

B : 0V

D : 96V

$$E : 30V$$



問題

- 真空中に $\pm 20\text{pC}$ の点電荷が 9mm 離れて静置している。以下の問いに答えよ。ただし、 $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ を $9.0 \times 10^9 \text{Nm}^2/\text{C}^2$ とする。また、図の閉曲線は等電位面を表す。

2. 図において、単位正電荷 ($+1\text{C}$) を次のように移動した。

$A \rightarrow B$, $B \rightarrow C$, $C \rightarrow D$, $D \rightarrow E$ 各区間の仕事を求めよ。

3. 単位正電荷を $A \rightarrow E$ の経路で直線的に移動したときの仕事を求めよ。

2.

$$A \rightarrow B : W_{AB} = q(V_B - V_A) = 96\text{J}$$

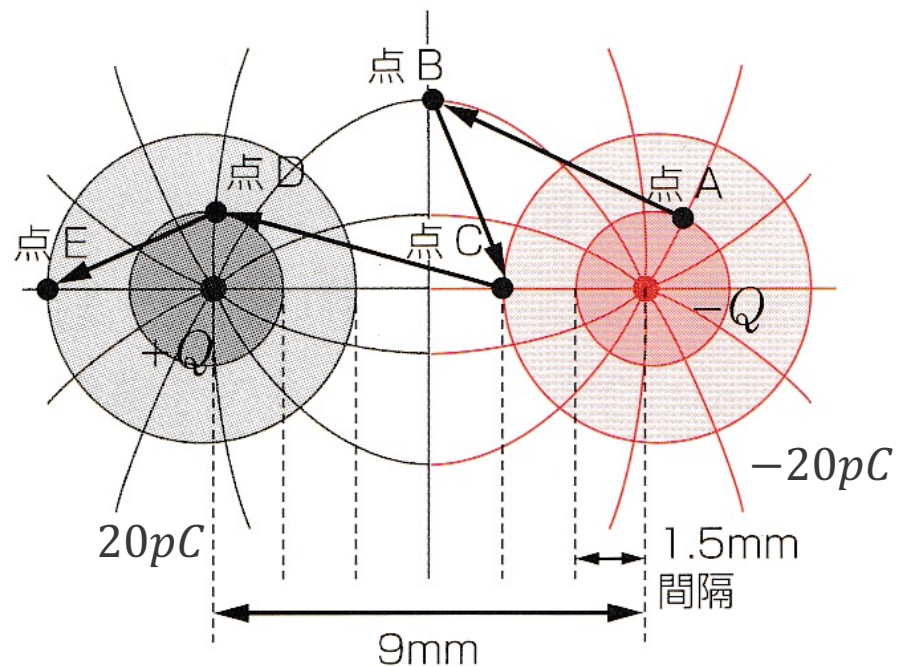
$$B \rightarrow C : W_{BC} = q(V_C - V_B) = -30\text{J}$$

$$C \rightarrow D : W_{CD} = q(V_D - V_C) = 126\text{J}$$

$$D \rightarrow E : W_{DE} = q(V_E - V_D) = -66\text{J}$$

3.

$$A \rightarrow E : W_{AE} = 96 - 30 + 126 - 66 = 126\text{J}$$



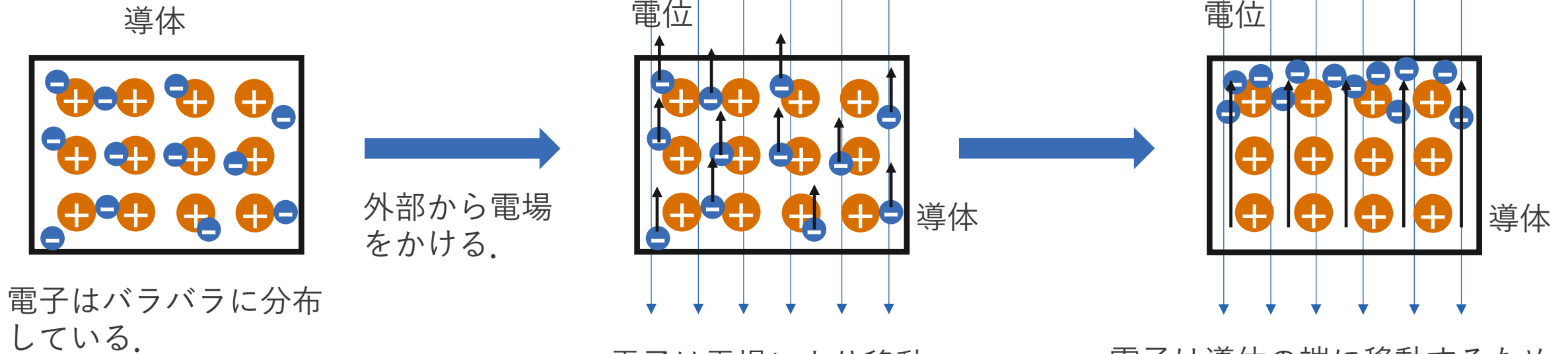
導体

■ 導体とは

- 電気を伝える物質
 - 導体
- 電気を伝えない物質
 - 不導体, 絶縁体

■ 導体と電場

- 電場中に導体を置くとどうなるか？



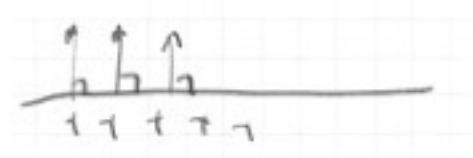
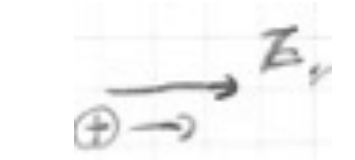
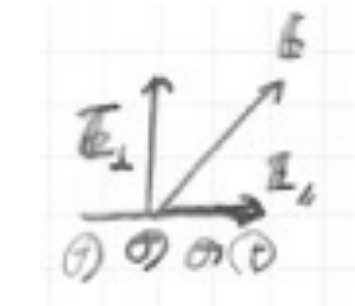
電子は電場により移動する。

電子は導体の端に移動するため導体内部に電場が発生する。内部に発生した電場と外部の電場が相殺する。

- 導体内では
 - 電場が0
 - 電位が一定（接地すると0）

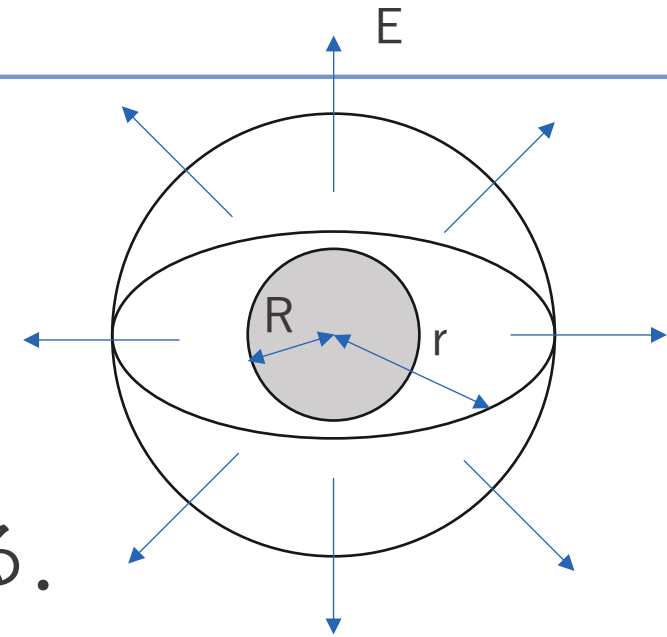
■ 導体表面の電場

- 導体表面に電荷が一様に分布しているとき
- もし電場が導体面に対し斜めなら，電場は導体面に対し平行な成分を持つ．
- そうならば，導体表面の電荷は電場によって移動し続けることになる．
- つまり，電場が導体表面に対し斜めなら，導体表面に電荷は一様に分布できない．
- よって，電場は導体表面に対し垂直でなければならない



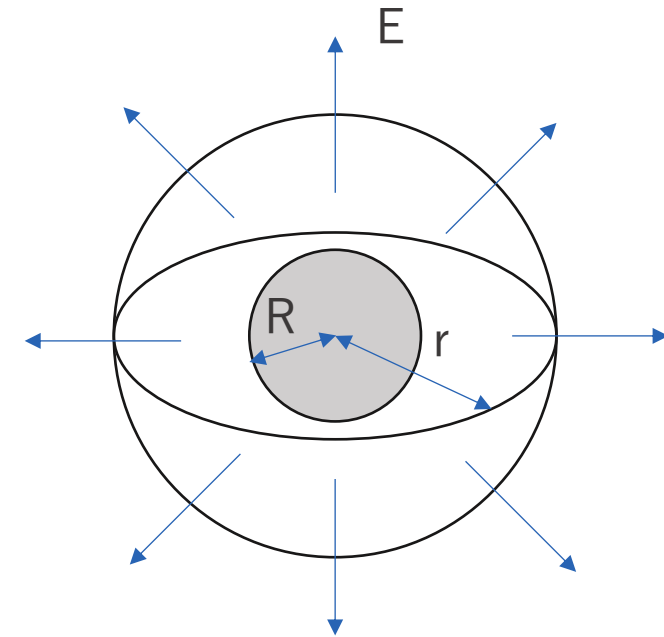
■ 導体球に分布する電荷が作る電場

- 半径 R の導体球に電荷 Q が分布しているとする.
- この球の中心から r の場所の電場を求める.
- 電荷が分布している球と同心の半径 r の球を考える.
- $R < r$ の時,
- 導体の電荷は Q だから、よってガウスの法則より
- $4\pi r^2 E = \frac{Q}{\epsilon_0}$
- $E = \frac{Q}{4\epsilon_0 r^2}$
- $R \leq r$ の時、導体内部の電場は0である.



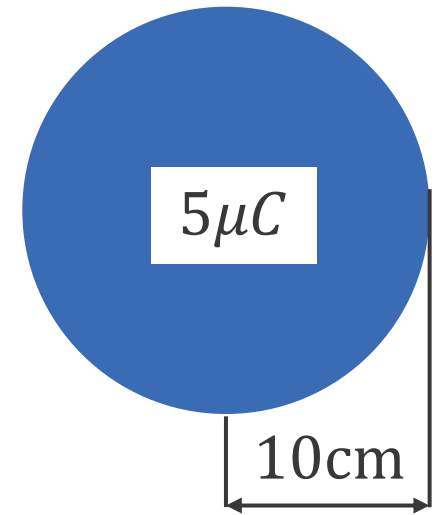
■ 導体球に分布する電荷が作る電位

- 半径 R の導体球に電荷 Q が分布しているときの電位を求める。ただし、無限遠方を基準とする。
- 電荷が分布している球と同心の半径 r の球を考える。
- $R < r$ の時の電場は $E = \frac{Q}{4\epsilon_0 r^2}$ だから、電位は
- $V = -\int_{\infty}^r \frac{Q}{4\epsilon_0 x^2} dx = \left[\frac{Q}{4\epsilon_0 x} \right]_{\infty}^r = \frac{Q}{4\epsilon_0 r}$
- $R \leq r$ の時、導体内部の電場は0なので、電位は
- $V = \frac{Q}{4\epsilon_0 R}$



問題

- 半径10cmの導体球に $5\mu\text{C}$ が帯電している。以下の問に答えよ。ただし、 $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ を $9.0\times 10^9\text{Nm}^2/\text{C}^2$ とする。

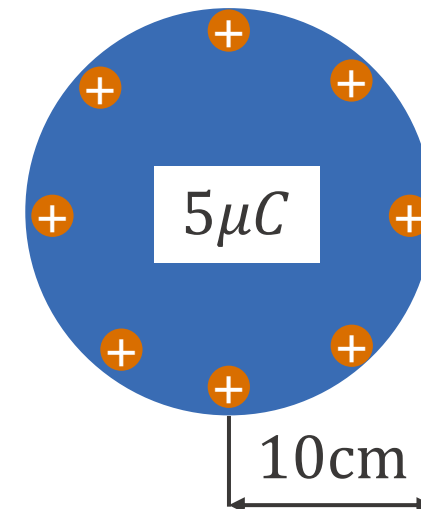


1. 帯電した電荷は導体球のどこに分布するか。
2. 中心から5cmの場所における電場を求めよ。
3. 中心から5cmの場所における電位を求めよ。
4. 中心から100cmの場所における電場を求めよ。
5. 中心から100cmの場所における電位を求めよ。

問題

- 半径10cmの導体球に $5\mu\text{C}$ が帯電している。以下の問に答えよ。ただし、 $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ を $9.0\times 10^9\text{Nm}^2/\text{C}^2$ とする。

1. 帯電した電荷は導体球のどこに分布するか。
2. 中心から5cmの場所における電場の強さを求めよ。
3. 中心から100cmの場所における電場の強さを求めよ。
4. 中心から5cmの場所における電位を求めよ。ただし無限遠方を0とする。
5. 中心から100cmの場所における電位を求めよ。ただし無限遠方を0とする。



1. 導体表面に分布する。
2. 導体内の電場の強さは 0N/C である。
3. 電場の強さは $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} = 9.0\times 10^9 \times 5\times 10^{-6} / 1^2 = 4.5\times 10^4\text{N/C}$
4. 導体内部の電位は導体表面と同じである。つまり、 $V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r} = 9.0\times 10^9 \times 5\times 10^{-6} / 0.1 = 4.5\times 10^5\text{V}$
5. 電位は $V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r} = 9.0\times 10^9 \times 5\times 10^{-6} / 1 = 4.5\times 10^4\text{V}$

■ 問題

- 真空中に正電荷で帯電した半径 r の球形導体がある。電界強度が最も大きい部分はどれか。

1. 導体の中心点
2. 導体の中心から $0.5r$ 離れた位置
3. 導体表面近傍で導体内の位置
4. 導体表面近傍で導体外の位置
5. 導体中心から $2r$ 離れた位置

問題

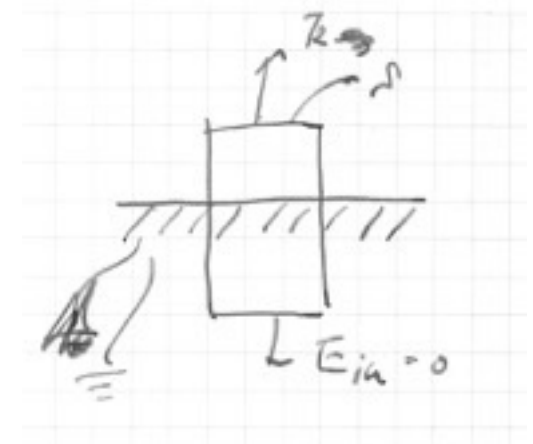
- 真空中に正電荷で帯電した半径 r の球形導体がある。電場強度が最も大きい部分はどれか。

1. 導体の中心点
2. 導体の中心から $0.5r$ 離れた位置
3. 導体表面近傍で導体内の位置
4. 導体表面近傍で導体外の位置
5. 導体中心から $2r$ 離れた位置

1. 導体内の電場は0
2. $0.5r$ の場所は導体内なので電場は0
3. 表面近傍であっても導体内の電場は0
4. 電場の強さは逆二乗則に従っているので5の $2r$ 離れた場所より導体球近傍の方が電場は強い

■ 無限に広い導体平面にある電荷が生成する電場と電位

- 無限に広い導体表面に面密度 σ で電荷が帯電しているとする.
- この時生じる電場を求める.
- 図のように底面積 S の四角柱を考える. 導体を作る電気力線は, 導体表面に対し垂直であるので, 電場は四角柱の側面から出ない. さらに, 導体中は電場は無い. よってガウスの法則は
- $ES = \frac{\sigma S}{\epsilon_0}$
- とかける. 電場 E は
- $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$



■ 無限に広い導体平面にある電荷が生成する電場と電位

- 無限に広い導体平面にある電荷が作る電場 E は
- $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$
- である。では電位は導体表面を基準とし導体表面からの距離を d とすると,
- $V = - \int_d^0 \frac{\sigma}{\epsilon_0} dx = \frac{\sigma d}{\epsilon_0}$
- つまり, 電位は導体表面からの距離に比例する.

