第 089 講 点電荷の電位

この講でできるようになること

- 点電荷がつくる電位を、電荷の符号と距離から求められる。
- 複数の点電荷がつくる電位を、符号付きのスカラーとして重ね合わせられる。
- 電位の和と電場のベクトル和を区別し、電位が 0 の点と電場が 0 の点を判断できる。
- 試験電荷の位置エネルギー、電気力の仕事、2 つの点電荷の相互位置エネルギーを条件に応じて求められる。

1. 電荷の近くでは、電位はどう決まるのか

正の電荷の近くに別の正の電荷を置くと、互いに反発する。負の電荷を置けば、今度は引き合う。これは、電荷の周囲に電場ができ、置いた電荷が電気力を受けるためである。

一方、第 088 講で扱った電位は、その場所に試験電荷を置いたときの電気的な位置エネルギーを、試験電荷1 C当たりで表す量であった。

では、電荷が 1 個だけ置かれている場合、その周囲の電位はどのような値になるのだろうか。

電場は向きをもつが、電位には向きがない。**点電荷の電位を考えるときは、電場の矢印ではなく、源電荷の符号と観測点までの距離に注目する**。

1.1 点電荷の電位を表す式

真空中に、動かない点電荷Qが 1 個あるとする。この電荷を、電場や電位をつくる**源電荷**と呼ぶ。

源電荷から距離rだけ離れた点の電位Vは、次の式で表される。

点電荷がつくる電位

$$V = \frac{kQ}{r}$$

- V：観測点の電位（単位：V）
- Q：源電荷の電気量（単位：C）
- r：源電荷から観測点までの距離（単位：m）
- k：クーロンの法則の比例定数

真空中では、

$$k = 9.0 \times 10^{9}\ \frac{\mathrm{N \cdot m^2}}{\mathrm{C^2}}$$

とする。

この式では、十分遠く離れた無限遠で電位を0 Vと定めている。源電荷は局在しており、考える点は源電荷と重ならない、すなわち$r > 0$とする。

電位の単位V（ボルト）は、位置エネルギーの単位J（ジュール）と電気量の単位C（クーロン）を使って、$1\,\mathrm{V} = 1\,\mathrm{J/C}$と表される。

式には距離rが分母にあるため、源電荷から遠ざかるほど電位の絶対値は小さくなる。また、Qの正負をそのまま式へ入れる点が重要である。

©ミライコーチング

1.2 正の電荷と負の電荷では符号が異なる

源電荷が正なら$Q>0$であり、無限遠を0 Vとした電位は正になる。源電荷が負なら$Q<0$であり、電位は負になる。

源電荷	電位の符号	電場の向き
正の点電荷	正	源電荷から外向き
負の点電荷	負	源電荷へ向かう向き

ここで、電位の正負は電場の左右の向きを意味しない。電位はスカラー量であり、電場はベクトル量である。

また、電位の正負は**無限遠を 0 とする基準**に基づく。電位の基準を変えた場合まで、正の源電荷の電位が必ず正であるとはいえない。

1.3 具体的な数値で確かめる

源電荷を$Q=+2.0\times10^{-9}\,\mathrm{C}$、観測点までの距離を$r=0.30\,\mathrm{m}$とする。

このときの電位は、

$$\begin{aligned} V &= \frac{kQ}{r} \\ &= \frac{(9.0\times10^{9}\,\mathrm{N\cdot m^{2}\cdot C^{-2}})(2.0\times10^{-9}\,\mathrm{C})}{0.30\,\mathrm{m}} \\ &= +60\,\mathrm{V} \end{aligned}$$

となる。

同じ位置で、源電荷だけを$-2.0\times10^{-9}\,\mathrm{C}$に変えた場合、電位は$-60\,\mathrm{V}$となる。電荷の絶対値と距離が同じなので、電位の絶対値は変わらず、符号だけが反転する。

1.4 電位と電場では距離による変化が異なる

点電荷 1 個がつくる電場の大きさは、

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

である。$\vec{E}$は電場ベクトルを表し、$|\,\vec{E}\,|$はその大きさを表す。

電位の式と並べてみると、距離がどこに現れるかが異なる。

比較する量	式	距離を 2 倍にした場合
電位V	$V=\frac{kQ}{r}$	値は元の$\frac{1}{2}$倍
電場の大きさ$\lvert\,\vec{E}\,\rvert$	$\lvert\,\vec{E}\,\rvert=\frac{k\,\lvert\,Q\,\rvert}{r^{2}}$	元の$\frac{1}{4}$倍

たとえば、正の源電荷$Q=+2.0\,\mathrm{nC}$について、距離だけを変更した結果は次のようになる。ただし、$1\,\mathrm{nC}=10^{-9}\,\mathrm{C}$である。

源からの距離r	電位V	電場の大きさ$\lvert\,\vec{E}\,\rvert$
$0.15\,\mathrm{m}$	$120\,\mathrm{V}$	$800\,\mathrm{N/C}$
$0.30\,\mathrm{m}$	$60\,\mathrm{V}$	$200\,\mathrm{N/C}$
$0.60\,\mathrm{m}$	$30\,\mathrm{V}$	$50\,\mathrm{N/C}$

電位は距離の 1 乗に反比例し、電場の大きさは距離の 2 乗に反比例する。

©ミライコーチング

したがって、電場の変化を求めるときに、電位と同じ倍率を使ってはいけない。

点電荷の式を使える範囲

ここで扱う式は、有限個の局在した静止点電荷が真空中につくる電場・電位を考え、無限遠を電位の基準とするモデルの式である。源電荷と観測点が重なる$r=0$には適用しない。

大きさのある帯電球を点電荷と近似する場合、観測点までの距離は球の中心から測り、球の半径がその距離に比べて十分小さいなどの条件が必要である。2 つの球なら中心間距離を使い、各球の大きさがその距離に比べて十分小さい場合を考える。一般の球内部や球同士の接触状態まで、点電荷の式を無条件に用いてはいけない。

2. 複数の点電荷がある場合

実際には、電場や電位をつくる電荷が 1 個とは限らない。正の電荷と負の電荷が同時に存在する場合もある。

そのようなとき、電位はどのように求めればよいだろうか。

2.1 電位は符号を残して足す

有限個の静止点電荷$Q_1, Q_2, \ldots$があり、それぞれが観測点 P から距離$r_1, r_2, \ldots$だけ離れているとする。

このとき、P の電位は、それぞれの点電荷が単独でつくる電位を足して求める。

電位の重ね合わせ

$$V = \sum_i \frac{kQ_i}{r_i}$$

点電荷が 2 個なら、

$$V = \frac{kQ_1}{r_1} + \frac{kQ_2}{r_2}$$

となる。各r_iは正の距離であり、各Q_iの符号を残して加える。

このように、複数の影響をそれぞれ求めて足すことを**重ね合わせ**という。

電位はスカラーなので、正の寄与は正、負の寄与は負として足せばよい。左右や上下の方向に分けて計算する必要はない。

これに対し、電場は向きをもつため、各電場ベクトルを向きまで考えて足す必要がある。

2.2 電位が 0 でなくても電場が 0 になる

一直線上に、2 つの正の点電荷を対称に置く。

左側の A に$Q_A = +2.0\,\mathrm{nC}$、右側の B に$Q_B = +2.0\,\mathrm{nC}$があり、その中央を観測点 P とする。座標は右向きを正として、A を$x = -0.30\,\mathrm{m}$、P を$x = 0\,\mathrm{m}$、B を$x = +0.30\,\mathrm{m}$とする。したがって、$AP = PB = 0.30\,\mathrm{m}$である。

次の模式図では、電荷が存在するのは A と B だけである。P は電位・電場を調べる観測点であり、電荷ではない。L と R は電場の矢印を表示するための補助端点で、どちらも電荷や追加の観測点ではない。

矢印$\vec{E}_A$と$\vec{E}_B$は、**P における各源電荷の寄与電場**を表す。電荷の移動、試験電荷に働く力、空間内の移動距離を表す矢印ではない。図は位置関係を示す模式図であり、矢印の長さを実際の空間距離として測らない。



図 1　A・B は各+2.0nC、AP=PB=0.30m。P は観測点、L・R は矢印の補助端点で、P・L・R に電荷はない。矢印は P での寄与電場（右 200N/C と左 200N/C）で、力・移動・空間距離ではない。P の電位は+120V、合成電場は 0。

まず電位を考える。各源電荷が P につくる電位は、ともに+60 Vである。

したがって、

$$V_P = (+60\,\mathrm{V}) + (+60\,\mathrm{V}) = +120\,\mathrm{V}$$

となる。

一方、A の正電荷がつくる電場は P で右向き、B の正電荷がつくる電場は P で左向きである。大きさはどちらも200 N/Cで等しい。

右向きを正として合成すると、

$$E_x = (+200\,\mathrm{N/C}) + (-200\,\mathrm{N/C}) = 0\,\mathrm{N/C}$$

となる。

つまり、P では**電位が**+120 V**であるにもかかわらず、電場は 0** である。

電位は 2 つとも正なので加わるが、電場は互いに反対向きなので打ち消し合う。この違いが、スカラーとベクトルの重ね合わせの核心である。

2.3 電位が 0 でも電場が 0 とは限らない

今度は左側の A を$Q_A = +2.0\,\mathrm{nC}$のままにし、右側の B だけを$Q_B = -2.0\,\mathrm{nC}$に変更する。

A、P、B の位置は先ほどと同じであり、$AP = PB = 0.30\,\mathrm{m}$である。左側 A が正の源電荷、右側 B が負の源電荷であり、中央 P は電荷のない観測点である。

次の模式図の R は合成電場の矢印を描くための補助端点で、電荷ではない。矢印$\vec{E}$は **P における合成電場 1 本**を表し、電荷の移動、力、空間距離を示していない。

A と B からの寄与電場はともに右向き200 N/Cであり、その合成は右向き400 N/Cとなる。図の合成電場の矢印は、前の模式図の寄与電場 1 本の 2 倍の長さで表示しているが、空間距離が 2 倍という意味ではない。



図 2　A は+2.0nC、B は−2.0nC、AP=PB=0.30m。P は電荷のない観測点、R は電荷のない補助端点。矢印は P での右向き合成電場 400N/C で、力・移動・空間距離ではない。P の電位は 0V。負の試験電荷への力は電場と逆の左向き。

P の電位については、A からの寄与が+60 V、B からの寄与が−60 Vである。

よって、

$$V_P = (+60\,\mathrm{V}) + (-60\,\mathrm{V}) = 0\,\mathrm{V}$$

となる。

一方、A の正電荷がつくる電場は P で右向きである。B の負電荷がつくる電場も、P から B へ向かうため右向きとなる。

$$E_x = (+200\,\mathrm{N/C}) + (+200\,\mathrm{N/C}) = +400\,\mathrm{N/C}$$

したがって、P の合成電場は右向き400 N/Cである。

ここでは**電位が0 Vでも、電場は 0 ではない**。

もし P に負の試験電荷$q = -1.0\,\mathrm{nC}$を置けば、電場は右向きでも、電荷に働く力は左向きとなる。負の電荷に働く電気力は電場と反対向きだからである。

このように、電位が 0 であることだけから、そこに置いた電荷に力が働かないとは判断できない。

電位と電場を混同しない

- 電位Vは、各源電荷からの寄与を符号付きで足す。
- 電場$\vec{E}$は、各源電荷からの寄与を向きも考えて合成する。
- $V = 0$と$\vec{E} = \vec{0}$は異なる条件である。

電位を計算するときは符号、電場を合成するときは符号に加えて向きに注目する。

3. 電位と試験電荷の位置エネルギー

3.1 電位を決めるのは源電荷である

点電荷がつくる電位を調べるとき、電位をつくる電荷と、その場所に置く電荷を区別する必要がある。

ここでは、電位をつくる電荷をQ、その電位を調べるために置く小さい電荷をqとする。qを**試験電荷**と呼ぶ。

試験電荷は、源電荷の配置やもとの電場を変えないとみなせるものとする。電位Vは、固定された源電荷の配置と電位の基準によって決まるため、試験電荷を正から負へ変えても反転しない。

一方、試験電荷の位置エネルギーUは、その電気量qに依存する。

電位と位置エネルギー

$$U = qV$$

- U：試験電荷がもつ電気的な位置エネルギー（単位：J）
- q：試験電荷の電気量（単位：C）
- V：試験電荷以外の源電荷がつくる電位（単位：V）

この関係では、電位と位置エネルギーに対応する同じ基準を用いる。

たとえば、ある点の電位が+60 Vなら、そこへ置く試験電荷が正でも負でも、外部の源電荷がつくる電位は+60 Vのままである。

ただし、$U = qV$ではqの符号も掛けるため、位置エネルギーの符号は試験電荷の正負によって変わる。

ここで求めるのは、固定された源電荷による試験電荷の位置エネルギーである。試験電荷自身がつくる電位や、試験電荷自身の自己エネルギーを加えてはいけない。

3.2 試験電荷に働く力

試験電荷に働く電気力は、電場$\vec{E}$を使って、

$$\vec{F} = q\vec{E}$$

と表される。

$q > 0$なら力は電場と同じ向き、$q < 0$なら電場と反対向きである。

したがって、ある点の電位が 0 で位置エネルギー$U = qV$が 0 であっても、その点の電場が 0 でなければ、$q \neq 0$の試験電荷には力が働く。

電位の値と力の大きさは、同じ量ではない。

3.3 電位が変化すると位置エネルギーも変化する

源電荷の配置と電位の基準を固定したまま、試験電荷qを点 A から点 B へ移す。

そのときの位置エネルギーの変化は、

$$\Delta U = U_B - U_A = q(V_B - V_A)$$

である。

また、電気力が試験電荷にする仕事$W_{電}$は、

$$W_{電} = -\Delta U = q(V_A - V_B)$$

となる。

つまり、**電気力が正の仕事をすると、電気的な位置エネルギーは減少する。**

外力については注意が必要である。電気力以外に外力だけが仕事をする状況で、試験電荷を十分ゆっくり動かす準静的な移動、または始点と終点で速さが等しく運動エネルギーの変化が 0 になる移動なら、

$$W_{外} = \Delta U$$

と求められる。

しかし、任意の速さで移動させるときに、外力の仕事が必ずΔUに等しいわけではない。

4. 2 つの点電荷がもつ相互位置エネルギー

これまでは、固定された源電荷がつくる電位の中へ、試験電荷を置く場合を考えた。

今度は、2 つの点電荷そのものの組合せを考える。

点電荷Q_1とQ_2が距離rだけ離れているとする。一方の電荷を固定し、もう一方を無限遠からその位置まで運ぶことを考える。

2 つの電荷が無限に離れているときの相互位置エネルギーを 0 とすると、次の式が成り立つ。

2 つの点電荷の相互位置エネルギー

$$U_{12} = \frac{kQ_1Q_2}{r}$$

- U_{12}：2 つの点電荷の相互位置エネルギー（単位：J）
- Q_1, Q_2：それぞれの点電荷の電気量（単位：C）
- r：2 つの点電荷間の距離（単位：m）

この式では、Q_1とQ_2が同符号なら$U_{12} > 0$、異符号なら$U_{12} < 0$となる。

異符号の電荷では引力が働くため、無限遠から近づくと電気力が正の仕事をし、位置エネルギーが負になる。

4.1 同じ相互作用を 2 回数えない

たとえば、Q_1がつくる電位をV_1とし、そこへQ_2を置くなら、

$$U_{12} = Q_2V_1 = \frac{kQ_1Q_2}{r}$$

である。

反対に、Q_2がつくる電位をV_2としてQ_1の位置エネルギーを計算しても、同じ値を得る。

しかし、この 2 つは**同じ電荷の組合せによる相互作用**を別の側から計算したものである。

したがって、Q_2V_1とQ_1V_2を足して 2 倍にしてはいけない。

2 源電荷だけの相互位置エネルギーは、1 組につき 1 回分である。

なお、固定された 2 つの源電荷の間へ別の試験電荷qを置く問題では、qの位置エネルギーはqVで計算する。これは源電荷同士の相互位置エネルギーとは区別する。

5. 例題で確かめる

例題 1

真空中に点電荷$Q = +2.0\,\mathrm{nC}$を固定し、その右側$0.30\,\mathrm{m}$の点 P を考える。無限遠の電位を 0 とし、$k = 9.0 \times 10^{9}\,\mathrm{N \cdot m^2 \cdot C^{-2}}$とする。

例題 1(1) P の電位を求めよ。

例題 1(2) P の電場の大きさと向きを求めよ。

例題 1(3) 源電荷だけを$Q = -2.0\,\mathrm{nC}$に変更したとき、P の電位と電場の向きを求めよ。

例題 1(1) 解答・解説 P の電位は$+60\,\mathrm{V}$である。

源電荷は正なので、符号を正のまま代入する。

$$\begin{aligned} V_P &= \frac{kQ}{r} \\ &= \frac{(9.0 \times 10^{9}\,\mathrm{N \cdot m^2 \cdot C^{-2}})(2.0 \times 10^{-9}\,\mathrm{C})}{0.30\,\mathrm{m}} \\ &= +60\,\mathrm{V} \end{aligned}$$

例題 1(2) 解答・解説 電場の大きさは$200\,\mathrm{N/C}$、向きは右向きである。

電場の大きさは、

$$\begin{aligned} |\,\vec{E}\,| &= \frac{k\,|\,Q\,|}{r^2} \\ &= \frac{(9.0 \times 10^{9}\,\mathrm{N \cdot m^2 \cdot C^{-2}})(2.0 \times 10^{-9}\,\mathrm{C})}{(0.30\,\mathrm{m})^2} \\ &= 200\,\mathrm{N/C} \end{aligned}$$

となる。正の源電荷がつくる電場は外向きなので、源電荷の右側にある P では右向きである。

例題 1(3) 解答・解説 電位は$-60\,\mathrm{V}$、電場は左向きである。

源電荷を負にすると、

$$V_P = \frac{k(-2.0 \times 10^{-9}\,\mathrm{C})}{0.30\,\mathrm{m}} = -60\,\mathrm{V}$$

となる。ただし、この式のkには問題文で与えられた値と単位を用いている。

負の源電荷がつくる電場は源電荷へ向かう。P は源電荷の右側なので、電場は左向きとなる。電場の大きさは$200\,\mathrm{N/C}$のままである。

例題 2

一直線上に 2 つの静止点電荷 A、B がある。A の位置は$x = 0\,\mathrm{m}$、電気量は$Q_A = +3.0\,\mathrm{nC}$、B の位置は$x = 0.50\,\mathrm{m}$、電気量は$Q_B = -2.0\,\mathrm{nC}$である。

観測点 P は$x = 0.20\,\mathrm{m}$にある。各源電荷と P は重ならず、無限遠での電位を 0 とする。真空中で$k = 9.0 \times 10^{9}\,\mathrm{N \cdot m^2 \cdot C^{-2}}$とする。

例題 2(1) P の電位を求めよ。

例題 2(2) P に小さい正の試験電荷$q = +2.0\,\mathrm{nC}$を置いたとき、源電荷 A、B による試験電荷の位置エネルギーを求めよ。ただし、源電荷の配置は変わらないものとする。

例題 2(3) 試験電荷を$q = -2.0\,\mathrm{nC}$に変更した場合、P の電位と試験電荷の位置エネルギーはどうなるか。

例題 2(1) 解答・解説 P の電位は$+75\,\mathrm{V}$である。

A から P までの距離は$0.20\,\mathrm{m}$、B から P までの距離は$0.30\,\mathrm{m}$である。

A による電位は、

$$V_A = \frac{kQ_A}{0.20\,\mathrm{m}} = +135\,\mathrm{V}$$

B による電位は、

$$V_B = \frac{kQ_B}{0.30\,\mathrm{m}} = -60\,\mathrm{V}$$

である。V_AとV_Bは、いずれも観測点 P に対する各源からの寄与を表す。

したがって、

$$V_P = (+135\,\mathrm{V}) + (-60\,\mathrm{V}) = +75\,\mathrm{V}$$

となる。

例題 2(2) 解答・解説 試験電荷の位置エネルギーは$+1.5 \times 10^{-7}\,\mathrm{J}$である。

$$\begin{aligned} U &= qV_P \\ &= (2.0 \times 10^{-9}\,\mathrm{C})(75\,\mathrm{V}) \\ &= +1.5 \times 10^{-7}\,\mathrm{J} \end{aligned}$$

これは、試験電荷qと 2 つの固定源電荷との相互作用に対応する位置エネルギーである。源電荷 A と B 同士の相互位置エネルギーは加えない。

例題 2(3) 解答・解説 P の電位は$+75\,\mathrm{V}$のままで、試験電荷の位置エネルギーは$-1.5 \times 10^{-7}\,\mathrm{J}$となる。

電位をつくる源電荷 A と B は変わらないため、P の電位も変わらない。

一方、

$$\begin{aligned} U &= qV_P \\ &= (-2.0 \times 10^{-9}\,\mathrm{C})(75\,\mathrm{V}) \\ &= -1.5 \times 10^{-7}\,\mathrm{J} \end{aligned}$$

となる。試験電荷の符号で変わるのは、この位置エネルギーであって、固定源がつくる電位ではない。

例題 3

真空中に正の点電荷$Q = +4.0\,\mathrm{nC}$を固定し、その電場を変えない小さい試験電荷$q = +2.0\,\mathrm{nC}$を考える。

試験電荷を、源電荷から$r_A = 0.20\,\mathrm{m}$離れた点 A から、$r_B = 0.60\,\mathrm{m}$離れた点 B へ移す。無限遠で電位を 0 とし、$k = 9.0 \times 10^{9}\,\mathrm{N \cdot m^2 \cdot C^{-2}}$とする。

例題 3(1) 点 A、B の電位を求めよ。

例題 3(2) 試験電荷の位置エネルギーの変化ΔUと、電気力がする仕事$W_{\text{電}}$を求めよ。

例題 3(3) 電気力と外力だけが仕事をし、試験電荷を準静的に A から B へ運ぶとする。外力がする仕事を求めよ。また、準静的という条件がない任意の移動でも同じ値と断定できるか答えよ。

例題 3(1) 解答・解説 A の電位は$180\,\mathrm{V}$、B の電位は$60\,\mathrm{V}$である。

$$
\begin{aligned}
V_A &= \frac{kQ}{r_A} \\
&= \frac{(9.0 \times 10^{9}\,\mathrm{N \cdot m^2 \cdot C^{-2}})(4.0 \times 10^{-9}\,\mathrm{C})}{0.20\,\mathrm{m}} \\
&= 180\,\mathrm{V}
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
V_B &= \frac{kQ}{r_B} \\
&= \frac{(9.0 \times 10^{9}\,\mathrm{N \cdot m^2 \cdot C^{-2}})(4.0 \times 10^{-9}\,\mathrm{C})}{0.60\,\mathrm{m}} \\
&= 60\,\mathrm{V}
\end{aligned}
$$

例題 3(2) 解答・解説 位置エネルギーは$-2.4 \times 10^{-7}\,\mathrm{J}$だけ変化し、電気力は$+2.4 \times 10^{-7}\,\mathrm{J}$の仕事をする。

$$
\begin{aligned}
\Delta U &= q(V_B - V_A) \\
&= (2.0 \times 10^{-9}\,\mathrm{C})(60\,\mathrm{V} - 180\,\mathrm{V}) \\
&= -2.4 \times 10^{-7}\,\mathrm{J}
\end{aligned}
$$

電気力の仕事は、

$$
W_{\text{電}} = -\Delta U = +2.4 \times 10^{-7}\,\mathrm{J}
$$

となる。

正の試験電荷が正の源電荷から遠ざかるとき、電気力は移動を助ける向きに働く。このため、電気力の仕事は正となり、位置エネルギーは減少する。

例題 3(3) 解答・解説 外力の仕事は$-2.4 \times 10^{-7}\,\mathrm{J}$である。ただし、任意の移動で同じ値になるとは断定できない。

準静的に動かす場合は、運動エネルギーの変化を無視できるため、

$$
W_{\text{外}} = \Delta U = -2.4 \times 10^{-7}\,\mathrm{J}
$$

となる。外力は電気力による移動を抑える向きに働く。

一方、一般の移動では、電気力と外力だけが仕事をするとして、

$$W_{外} + W_{電} = \Delta K$$

である。ΔKは運動エネルギーの変化を表す。

始点と終点の速さが等しく$\Delta K = 0$である場合も、$W_{外} = \Delta U$となる。しかし、運動エネルギーが変化する場合には、外力の仕事を位置エネルギーの変化だけから決めることはできない。

例題 4

真空中で、点電荷$Q_1 = +2.0\,\mathrm{nC}$を固定し、別の点電荷$Q_2 = -3.0\,\mathrm{nC}$を距離$r = 0.30\,\mathrm{m}$の位置に置く。

2 つの電荷が無限に離れた状態の相互位置エネルギーを 0 とする。$k = 9.0 \times 10^9\,\mathrm{N \cdot m^2 \cdot C^{-2}}$とする。

例題 4(1) 2 つの点電荷の相互位置エネルギーを求めよ。

例題 4(2) Q_1を固定したまま、Q_2を無限遠から距離$0.30\,\mathrm{m}$の位置まで準静的に近づける。電気力と外力だけが仕事をするとき、外力と電気力がする仕事をそれぞれ求めよ。

例題 4(3) Q_1がつくる電位にQ_2を掛けて求めた位置エネルギーと、Q_2がつくる電位にQ_1を掛けて求めた位置エネルギーを足してよいか説明せよ。

例題 4(1) 解答・解説 相互位置エネルギーは$-1.8 \times 10^{-7}\,\mathrm{J}$である。

$$
\begin{aligned}
U_{12} &= \frac{kQ_1Q_2}{r} \\
&= \frac{(9.0 \times 10^9\,\mathrm{N \cdot m^2 \cdot C^{-2}})(2.0 \times 10^{-9}\,\mathrm{C})(-3.0 \times 10^{-9}\,\mathrm{C})}{0.30\,\mathrm{m}} \\
&= -1.8 \times 10^{-7}\,\mathrm{J}
\end{aligned}
$$

異符号の電荷なので、無限遠を基準にした相互位置エネルギーは負となる。

例題 4(2) 解答・解説 外力の仕事は$-1.8 \times 10^{-7}\,\mathrm{J}$、電気力の仕事は$+1.8 \times 10^{-7}\,\mathrm{J}$である。

準静的に近づけると、運動エネルギーの変化は無視できる。したがって、外力の仕事は相互位置エネルギーの変化に等しい。

$$
W_{\text{外}} = \Delta U_{12} = -1.8 \times 10^{-7}\,\mathrm{J}
$$

電気力の仕事はその反対符号なので、

$$
W_{\text{電}} = -\Delta U_{12} = +1.8 \times 10^{-7}\,\mathrm{J}
$$

となる。

2 つの電荷は引き合うため、電気力は近づく移動を助ける。これが電気力の仕事が正となる理由である。

例題 4(3) 解答・解説 2 つの計算結果を足してはいけない。同じ 1 組の相互位置エネルギーを二重に数えるためである。

どちらの電荷を電位の源として考えても、

$$
Q_2V_1 = Q_1V_2 = \frac{kQ_1Q_2}{r}
$$

となる。これは異なる 2 組のエネルギーではなく、同じ 1 組の相互作用を表している。

6. 電位の基準を変えた場合

ここまで、無限遠の電位を 0 として計算してきた。

しかし、電位の基準は必ずしも無限遠でなければならないわけではない。ある基準で求めた電位Vに、どの位置でも同じ定数Cを加えて、新しい電位V'を

$$V' = V + C$$

と定めることもできる。

このとき、電位そのものの数値や正負は変わる場合がある。

たとえば、ある点 A の電位が$+60\,\mathrm{V}$、点 B の電位が$-20\,\mathrm{V}$であるとする。両方に$+30\,\mathrm{V}$を加えれば、A は$+90\,\mathrm{V}$、B は$+10\,\mathrm{V}$となる。

しかし、2 点間の電位差は変わらない。

$$\begin{aligned} V'_B - V'_A &= (V_B + C) - (V_A + C) \\ &= V_B - V_A \end{aligned}$$

電場も、空間のどこでも同じ定数を電位に加えただけでは変化しない。

したがって、試験電荷が移動するときの位置エネルギーの変化$\Delta U = q(V_B - V_A)$や、電気力の仕事$W_{\text{電}}$も変化しない。ただし、位置エネルギー$U = qV$そのものの数値は基準に応じて変わり得る。

この違いを理解すると、電位の正負だけで電気力の向きや仕事を決められない理由が明確になる。

無限遠基準を使う条件

点電荷の式$V = \frac{kQ}{r}$を無限遠基準で用いるのは、ここで扱うような有限個の局在した源電荷についてである。

無限に広がる一様電場などでは、電位を無限遠で 0 とする設定を無条件に使うことはできない。電位の式を使う前に、どのモデルでどこを基準としているかを確かめる必要がある。

演習問題

以下の問題では、特に断らない限り、真空中の静止点電荷がつくる電位を考え、無限遠で電位を 0 とする。また、

$$k = 9.0 \times 10^9 \ \frac{\mathrm{N \cdot m^2}}{\mathrm{C^2}}$$

とする。各観測点は源電荷と異なる位置にあり、試験電荷を置く場合は、もとの源電荷の配置や電場を変えないものとする。

演習 1

点電荷$Q = -2.0\,\mathrm{nC}$を固定し、その右側$0.30\,\mathrm{m}$に観測点 P をとる。

演習 1(1) P の電位を求めよ。

演習 1(2) P の電場の大きさと向きを求めよ。

演習 1(3) P に試験電荷$q = -1.0\,\mathrm{nC}$を置く。試験電荷に働く電気力の大きさと向きを求めよ。また、P の電位が試験電荷の符号によって変わるか答えよ。 解答・解説は後掲の「演習 1 の解答・解説」を参照。

演習 2

正の点電荷$Q = +2.0\,\mathrm{nC}$を固定する。この源電荷から、それぞれ$0.30\,\mathrm{m}$、$0.60\,\mathrm{m}$、$0.15\,\mathrm{m}$離れた 3 つの観測点を考える。

演習 2(1) 距離$0.60\,\mathrm{m}$の点における電位と電場の大きさを求めよ。

演習 2(2) 距離$0.15\,\mathrm{m}$の点における電位と電場の大きさを求めよ。

演習 2(3) 距離を$0.30\,\mathrm{m}$から$0.60\,\mathrm{m}$へ 2 倍にしたとき、電位と電場の大きさはそれぞれ何倍になるか。式の違いから説明せよ。 解答・解説は後掲の「演習 2 の解答・解説」を参照。

演習 3

一直線上で、点 A は$x = -0.30\,\mathrm{m}$、点 B は$x = +0.30\,\mathrm{m}$、観測点 P は$x = 0\,\mathrm{m}$にある。右向きを正とする。

最初は A、B にそれぞれ$+2.0\,\mathrm{nC}$の点電荷を固定する。

演習 3(1) この場合の P の電位と、合成電場の大きさを求めよ。

次に、A の電気量は変えず、B だけを$-2.0\,\mathrm{nC}$に変更する。

演習 3(2) 変更後の P の電位と、合成電場の大きさ・向きを求めよ。

演習 3(3) 変更後の P に試験電荷$q = -1.0\,\mathrm{nC}$を置く。試験電荷の位置エネルギーと、働く電気力の大きさ・向きを求めよ。

演習 3(4) この問題の 2 つの配置を用いて、「電位が 0 なら電場も 0 である」という主張が正しいか説明せよ。 解答・解説は後掲の「演習 3 の解答・解説」を参照。

演習 4

一直線上の$x = 0\,\mathrm{m}$に源電荷$Q_A = +3.0\,\mathrm{nC}$、$x = 0.50\,\mathrm{m}$に源電荷$Q_B = -2.0\,\mathrm{nC}$を固定する。

観測点 P は$x = 0.20\,\mathrm{m}$にある。

演習 4(1) A と B からの寄与をそれぞれ計算し、P の電位を求めよ。

演習 4(2) P に試験電荷$q = +2.0\,\mathrm{nC}$を置く。試験電荷の位置エネルギーを求めよ。

演習 4(3) 源電荷 A、B を固定したまま、試験電荷だけを負の電荷に交換したとする。P の電位が負に変わると考えるのは正しいか。理由を説明せよ。 解答・解説は後掲の「演習 4 の解答・解説」を参照。

©ミライコーチング

演習 5

真空中に源電荷$Q = +4.0\,\mathrm{nC}$を固定し、試験電荷$q = +2.0\,\mathrm{nC}$を源から$0.20\,\mathrm{m}$離れた点 A から、$0.60\,\mathrm{m}$離れた点 B まで動かす。

演習 5(1) 点 A と点 B の電位をそれぞれ求めよ。

演習 5(2) A から B への移動による位置エネルギーの変化と、電気力の仕事を求めよ。

演習 5(3) 電気力と外力だけが仕事をし、A と B で試験電荷の速さが等しい場合、外力の仕事を求めよ。始点と終点の速さが異なる場合にも、同じ結果が必ず成立するか説明せよ。 解答・解説は後掲の「演習 5 の解答・解説」を参照。

演習 6

真空中に、点電荷$Q_1 = +2.0\,\mathrm{nC}$と$Q_2 = -3.0\,\mathrm{nC}$が距離$0.30\,\mathrm{m}$だけ離れて存在する。2 つの電荷が無限に離れているときの相互位置エネルギーを 0 とする。

演習 6(1) 2 つの点電荷の相互位置エネルギーを求めよ。

演習 6(2) Q_1を固定し、Q_2を無限遠から現在の位置まで準静的に運ぶ。電気力と外力だけが仕事をするとき、それぞれの仕事を求めよ。

演習 6(3) Q_1によるQ_2の位置エネルギーと、Q_2によるQ_1の位置エネルギーを足してよいか説明せよ。 解答・解説は後掲の「演習 6 の解答・解説」を参照。

演習 7

点電荷がつくる電位の式と、その適用条件について答えよ。

演習 7(1) ある基準で 2 点 A、B の電位が$V_A = +60\,\mathrm{V}$、$V_B = -20\,\mathrm{V}$である。すべての点の電位に$+30\,\mathrm{V}$を加えた場合、新しい A、B の電位と、B から A への電位差$V_A - V_B$を求めよ。

演習 7(2) 電位の基準を一定量だけ変更すると、電場、試験電荷の移動に伴う位置エネルギーの変化、電気力の仕事は変わるか説明せよ。

演習 7(3) 半径$0.10\,\mathrm{m}$の帯電球を、中心から$0.12\,\mathrm{m}$離れた点で点電荷と近似することについて、点電荷の式を無条件に適用してよいか説明せよ。

演習 7(4) 無限に広がる一様電場でも、有限個の局在点電荷と同じように無限遠の電位を 0 として$V = \frac{kQ}{r}$を用いてよいか答えよ。 解答・解説は後掲の「演習 7 の解答・解説」を参照。

©ミライコーチング

演習問題の解答・解説

演習 1 の解答・解説

演習 1(1) 解答・解説 P の電位は$-60\,\mathrm{V}$である。

点電荷の電位は、無限遠を 0 としたとき、

$$V = \frac{kQ}{r}$$

で表される。Qは負なので、符号を残して代入する。

$$\begin{aligned} V_P &= \frac{(9.0\times10^{9}\,\mathrm{N\cdot m^2\cdot C^{-2}})(-2.0\times10^{-9}\,\mathrm{C})}{0.30\,\mathrm{m}} \\ &= -60\,\mathrm{V} \end{aligned}$$

演習 1(2) 解答・解説 電場の大きさは$200\,\mathrm{N/C}$で、向きは左向きである。

$$\begin{aligned} |\,\vec{E}\,| &= \frac{k\,|\,Q\,|}{r^2} \\ &= \frac{(9.0\times10^{9}\,\mathrm{N\cdot m^2\cdot C^{-2}})(2.0\times10^{-9}\,\mathrm{C})}{(0.30\,\mathrm{m})^2} \\ &= 200\,\mathrm{N/C} \end{aligned}$$

負の源電荷がつくる電場は、源電荷に向かう。P は源電荷の右側にあるため、電場は左向きとなる。

演習 1(3) 解答・解説 試験電荷に働く力は右向きで、大きさは$2.0\times10^{-7}\,\mathrm{N}$である。P の電位は試験電荷の符号を変えても$-60\,\mathrm{V}$のままである。

電気力の大きさは、

$$\begin{aligned} |\,\vec{F}\,| &= |\,q\,|\,|\,\vec{E}\,| \\ &= (1.0\times10^{-9}\,\mathrm{C})(200\,\mathrm{N/C}) \\ &= 2.0\times10^{-7}\,\mathrm{N} \end{aligned}$$

となる。

試験電荷qは負なので、力は電場と反対の右向きである。

電位は固定された源電荷Qがつくる量である。試験電荷qを変えても、源電荷による P の電位そのものは変化しない。

演習 2 の解答・解説

演習 2(1) 解答・解説 距離0.60 mでは、電位は+30 V、電場の大きさは50 N/Cである。

$$
\begin{aligned}
V &= \frac{kQ}{r} \\
&= \frac{(9.0\times10^{9}\,\mathrm{N\cdot m^{2}\cdot C^{-2}})(2.0\times10^{-9}\,\mathrm{C})}{0.60\,\mathrm{m}} \\
&= 30\,\mathrm{V}
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
|\,\vec{E}\,| &= \frac{k\,|\,Q\,|}{r^{2}} \\
&= \frac{(9.0\times10^{9}\,\mathrm{N\cdot m^{2}\cdot C^{-2}})(2.0\times10^{-9}\,\mathrm{C})}{(0.60\,\mathrm{m})^{2}} \\
&= 50\,\mathrm{N/C}
\end{aligned}
$$

演習 2(2) 解答・解説 距離0.15 mでは、電位は+120 V、電場の大きさは800 N/Cである。

$$
\begin{aligned}
V &= \frac{(9.0\times10^{9}\,\mathrm{N\cdot m^{2}\cdot C^{-2}})(2.0\times10^{-9}\,\mathrm{C})}{0.15\,\mathrm{m}} \\
&= 120\,\mathrm{V}
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
|\,\vec{E}\,| &= \frac{(9.0\times10^{9}\,\mathrm{N\cdot m^{2}\cdot C^{-2}})(2.0\times10^{-9}\,\mathrm{C})}{(0.15\,\mathrm{m})^{2}} \\
&= 800\,\mathrm{N/C}
\end{aligned}
$$

演習 2(3) 解答・解説 距離を 2 倍にすると、電位は$\frac{1}{2}$倍、電場の大きさは$\frac{1}{4}$倍になる。

源電荷Qと比例定数kを固定すると、

$$V = \frac{kQ}{r}$$

より、電位は距離に反比例する。

一方、

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

より、電場の大きさは距離の 2 乗に反比例する。

したがって、距離の変更による倍率を考えるときには、分母がrかr^{2}かを区別する必要がある。

演習 3 の解答・解説

演習 3(1) 解答・解説 最初の配置では、P の電位は+120 V、合成電場の大きさは0 N/Cである。

A と B の電荷はどちらも+2.0 nCで、P からの距離はともに0.30 mである。

各源電荷による P の電位は、

$$\frac{kQ}{r} = +60\,\mathrm{V}$$

となる。したがって、

$$V_P = 60\,\mathrm{V} + 60\,\mathrm{V} = 120\,\mathrm{V}$$

である。

電場の大きさはそれぞれ200 N/Cだが、A による電場は右向き、B による電場は左向きである。

$$E_x = +200\,\mathrm{N/C} - 200\,\mathrm{N/C} = 0\,\mathrm{N/C}$$

となり、合成電場は 0 である。

演習 3(2) 解答・解説 B を負電荷に変更した後、P の電位は0 V、合成電場は右向き400 N/Cとなる。

電位は、

$$V_P = 60\,\mathrm{V} - 60\,\mathrm{V} = 0\,\mathrm{V}$$

である。

一方、A の正電荷による電場は P で右向き、B の負電荷による電場も P から B へ向かう右向きである。

$$E_x = +200\,\mathrm{N/C} + 200\,\mathrm{N/C} = +400\,\mathrm{N/C}$$

となるため、電場の向きは右向きである。

演習 3(3) 解答・解説 試験電荷の位置エネルギーは0 Jであり、電気力は左向き、大きさ$4.0 \times 10^{-7}\,\mathrm{N}$である。

位置エネルギーは、

$$U = qV_P = \left(-1.0 \times 10^{-9}\,\mathrm{C}\right)(0\,\mathrm{V}) = 0\,\mathrm{J}$$

となる。

電気力の大きさは、

$$\begin{aligned} |\,\vec{F}\,| &= |\,q\,|\,|\,\vec{E}\,| \\ &= \left(1.0 \times 10^{-9}\,\mathrm{C}\right)(400\,\mathrm{N/C}) \\ &= 4.0 \times 10^{-7}\,\mathrm{N} \end{aligned}$$

である。

試験電荷は負なので、電場とは反対の左向きに力を受ける。

ここで$U = 0\,\mathrm{J}$であるのは、指定した電位の基準で計算したためである。位置エネルギーの値が 0 であっても、電場が存在する以上、力が 0 とは限らない。

演習 3(4) 解答・解説 「電位が 0 なら電場も 0 である」という主張は誤りである。

最初の配置では、P の電位が+120 Vでも、互いに逆向きの電場が打ち消し合って電場は 0 になった。

変更後の配置では、電位は正負の寄与が打ち消し合って 0 になったが、電場はともに右向きであり、400 N/Cとなった。

この 2 つの例から、電位が 0 となる条件と電場が 0 となる条件は異なると分かる。

演習 4 の解答・解説

演習 4(1) 解答・解説 P の電位は$+75\,\mathrm{V}$である。

P から A までの距離は$0.20\,\mathrm{m}$、P から B までの距離は$0.30\,\mathrm{m}$である。

A による寄与は、

$$\begin{aligned} V_A &= \frac{kQ_A}{0.20\,\mathrm{m}} \\ &= +135\,\mathrm{V} \end{aligned}$$

B による寄与は、

$$\begin{aligned} V_B &= \frac{kQ_B}{0.30\,\mathrm{m}} \\ &= -60\,\mathrm{V} \end{aligned}$$

となる。

したがって、

$$V_P = +135\,\mathrm{V} - 60\,\mathrm{V} = +75\,\mathrm{V}$$

である。

演習 4(2) 解答・解説 試験電荷の位置エネルギーは$+1.5\times10^{-7}\,\mathrm{J}$である。

$$\begin{aligned} U &= qV_P \\ &= (2.0\times10^{-9}\,\mathrm{C})(75\,\mathrm{V}) \\ &= +1.5\times10^{-7}\,\mathrm{J} \end{aligned}$$

このUは、固定された A と B がつくる電位による試験電荷の位置エネルギーである。A と B 同士の相互位置エネルギーは含めない。

演習 4(3) 解答・解説 試験電荷を負にしても、P の電位は$+75\,\mathrm{V}$のままである。

電位は固定された源電荷 A、B の配置と電位の基準によって決まる。試験電荷の電気量を変更しても、もとの源電荷がつくる電位は変化しない。

試験電荷の符号により変化するのは$U = qV_P$で求める位置エネルギーの符号である。

演習 5 の解答・解説

演習 5(1) 解答・解説 A の電位は180 V、B の電位は60 Vである。

$$\begin{aligned} V_A &= \frac{(9.0\times10^{9}\,\mathrm{N\cdot m^2\cdot C^{-2}})(4.0\times10^{-9}\,\mathrm{C})}{0.20\,\mathrm{m}} \\ &= 180\,\mathrm{V} \\ V_B &= \frac{(9.0\times10^{9}\,\mathrm{N\cdot m^2\cdot C^{-2}})(4.0\times10^{-9}\,\mathrm{C})}{0.60\,\mathrm{m}} \\ &= 60\,\mathrm{V} \end{aligned}$$

演習 5(2) 解答・解説 位置エネルギーの変化は-2.4×10^{-7} J、電気力の仕事は$+2.4\times10^{-7}$ Jである。

$$\begin{aligned} \Delta U &= q(V_B - V_A) \\ &= (2.0\times10^{-9}\,\mathrm{C})(60\,\mathrm{V} - 180\,\mathrm{V}) \\ &= -2.4\times10^{-7}\,\mathrm{J} \end{aligned}$$

したがって、

$$W_{電} = -\Delta U = +2.4\times10^{-7}\,\mathrm{J}$$

となる。

正の試験電荷は正の源電荷から反発力を受けるため、遠ざかる移動では電気力が正の仕事をする。

演習 5(3) 解答・解説 始点と終点の速さが等しい場合、外力の仕事は-2.4×10^{-7} Jである。ただし、速さが異なる場合に同じ結果が必ず成り立つわけではない。

電気力と外力だけが仕事をするので、

$$W_{外} + W_{電} = \Delta K$$

となる。

始点と終点の速さが等しければ$\Delta K = 0$である。よって、

$$\begin{aligned} W_{外} &= -W_{電} \\ &= -2.4\times10^{-7}\,\mathrm{J} \end{aligned}$$

である。

一方、速さが異なる場合は$\Delta K \neq 0$となり得るため、

$$W_{外} = \Delta K - W_{電}$$

を用いる必要がある。外力の仕事を必ずΔUとすることはできない。

演習 6 の解答・解説

演習 6(1) 解答・解説 2 つの電荷の相互位置エネルギーは$-1.8\times10^{-7}\,\mathrm{J}$である。

$$\begin{aligned}U_{12}&=\frac{kQ_1Q_2}{r}\\&=\frac{(9.0\times10^{9}\,\mathrm{N\cdot m^2\cdot C^{-2}})(2.0\times10^{-9}\,\mathrm{C})(-3.0\times10^{-9}\,\mathrm{C})}{0.30\,\mathrm{m}}\\&=-1.8\times10^{-7}\,\mathrm{J}\end{aligned}$$

電荷は異符号なので、無限遠を 0 とする相互位置エネルギーは負である。

演習 6(2) 解答・解説 外力の仕事は$-1.8\times10^{-7}\,\mathrm{J}$、電気力の仕事は$+1.8\times10^{-7}\,\mathrm{J}$である。

最初の相互位置エネルギーは$0\,\mathrm{J}$、最後は$-1.8\times10^{-7}\,\mathrm{J}$なので、

$$\Delta U_{12}=-1.8\times10^{-7}\,\mathrm{J}$$

である。

準静的な移動では、運動エネルギーの変化を無視できる。よって、

$$W_{\text{外}}=\Delta U_{12}=-1.8\times10^{-7}\,\mathrm{J}$$

また、

$$W_{\text{電}}=-\Delta U_{12}=+1.8\times10^{-7}\,\mathrm{J}$$

となる。

異符号の電荷が引き合うため、電気力は近づく移動を助ける向きに働く。

演習 6(3) 解答・解説 2 つの位置エネルギーを足してはいけない。同じ電荷の組合せによる相互作用を二重に数えることになるためである。

Q_1がつくる電位の中にQ_2を置いた場合も、Q_2がつくる電位の中にQ_1を置いた場合も、

$$U_{12}=\frac{kQ_1Q_2}{r}$$

という同じ 1 組分の相互位置エネルギーを表している。

したがって、答えは$-3.6\times10^{-7}\,\mathrm{J}$ではなく、$-1.8\times10^{-7}\,\mathrm{J}$である。

演習 7 の解答・解説

演習 7(1) 解答・解説 新しい電位は A が+90 V、B が+10 Vであり、電位差$V_A - V_B$は80 Vのままである。

新しい電位は、

$$V'_A = 60\,\mathrm{V} + 30\,\mathrm{V} = 90\,\mathrm{V}$$

$$V'_B = -20\,\mathrm{V} + 30\,\mathrm{V} = 10\,\mathrm{V}$$

となる。

したがって、

$$V'_A - V'_B = 90\,\mathrm{V} - 10\,\mathrm{V} = 80\,\mathrm{V}$$

である。変更前も$V_A - V_B = 80\,\mathrm{V}$である。

演習 7(2) 解答・解説 電位に一定の定数を加えても、電場、試験電荷の位置エネルギーの変化、電気力の仕事は変わらない。

新しい電位を$V' = V + C$とすると、2 点間の電位差は、

$$V'_B - V'_A = V_B - V_A$$

となる。試験電荷の位置エネルギーの変化は、

$$\Delta U = q(V_B - V_A)$$

であり、電位差が変わらないため変化しない。

電気力の仕事も$W_{\text{電}} = -\Delta U$なので変化しない。また、電位全体に同じ定数を加えても、電場は変わらない。

ただし、$U = qV$で求める位置エネルギーそのものの数値は、新しい基準に応じて変わり得る。

演習 7(3) 解答・解説 この帯電球に点電荷の式を無条件に適用してはいけない。

球の半径が0.10 m、中心から観測点までの距離が0.12 mであり、球の半径は観測距離に比べて十分小さくない。

点電荷と近似するには、球の半径が観測距離に比べて十分小さいなどの条件が必要である。この問題の条件だけでは、球の帯電状態や内部の電荷分布を無視して、点電荷の式を無条件に用いることはできない。

演習 7(4) 解答・解説 無限に広がる一様電場へ、有限個の局在点電荷と同じ無限遠基準の式をそのまま用いてはいけない。

$$V = \frac{kQ}{r}$$

は、ここで扱った有限個の局在点電荷について、無限遠の電位を 0 とした場合の関係である。

無限一様電場では、無限遠を電位 0 の基準として無条件に扱うことはできない。電位や電位差を考える際には、その電場に適した基準と条件を設定する必要がある。