第 085 講 電荷・帯電とクーロン力

この講でできるようになること

- 電荷の正負と電子の移動から、帯電と電荷保存を説明できる。
- 電荷の符号と配置から、二つの電荷に働く力の向きを判断できる。
- クーロンの法則を使い、電荷の大きさと距離から力の大きさを計算できる。
- 力を受ける電荷を指定し、複数の電荷から受ける力を合成できる。

1. こすった物体が引き合うのはなぜか

乾いたプラスチック製の下敷きを布でこすると、小さな紙片を引き寄せることがある。また、種類や状態によっては、こすり合わせた二つの物体が互いに反発する場合もある。

このような電気的な現象を理解するには、物体がもつ**電荷**に注目する必要がある。

電荷には正と負の 2 種類がある。物体どうしが電気的な力を及ぼし合うとき、その力の向きを決める重要な手がかりが電荷の符号である。

電荷と帯電

電荷とは、電気的な力に関係する物理量であり、正と負の符号をもつ。電荷を表す記号には q を用い、単位はクーロン（記号 C）である。

帯電とは、物体が正または負の電荷を正味でもつ状態になることである。

電荷が正味で正の物体を正に帯電した物体、正味で負の物体を負に帯電した物体という。

一方、正と負の電荷の総和が 0 C の物体を、電気的に中性の物体という。

ここで重要なのは、**中性とは電荷が存在しないことではない**という点である。物体の内部に正と負の電荷があっても、その総和が 0 なら中性となる。

2. 帯電は電子の移動で起こる

原子に含まれる正負の電荷

物質は原子からできている。原子には、正の電荷をもつ陽子と、負の電荷をもつ電子が含まれる。

陽子は原子核の中にあり、電子は原子核の周囲に存在する。通常の固体どうしの帯電では、主に電子の移動が関係する。

電子 1 個の電気量は、次の値である。

$$-1.60 \times 10^{-19}\ \mathrm{C}$$

電子が負の電荷をもつことから、物体の帯電状態について次のように判断できる。

電子の変化	物体の正味の電荷
電子を受け取る	負の方向へ変化する
電子を失う	正の方向へ変化する
電子の出入りがない	電子移動による正味の電荷の変化はない

たとえば、初めに中性だった物体 A から物体 B へ電子が移動したとする。

A は負の電荷を失うため正に帯電し、B は負の電荷を受け取るため負に帯電する。

©ミライコーチング

このとき、A の内部の陽子が B へ自由に移動したわけではない。

電荷保存の法則

電荷保存の法則

外部と電荷のやり取りをしない物体系では、正負の符号を含めて加えた電荷の総量は変化しない。

$$q_{\text{全体,前}} = q_{\text{全体,後}}$$

二つの物体が初めに中性で、外部との電荷のやり取りがなければ、電子が一方から他方へ移動しても、二つの物体の電荷の総和は 0 C のままである。

摩擦によって帯電する場合も、摩擦が電荷を無から生み出しているわけではない。接触した物体間で電子が移動し、離れたときにそれぞれが正味の電荷をもつことがある。

電荷の移動と分離を区別する

電荷が物体間を移動すると、それぞれの物体の正味の電荷が変化することがある。一方、物体内で正負の電荷の位置が偏って分離しても、物体全体の電荷の総和は変わらない。

電荷の位置が変わることと、電荷そのものが新しく作られることは別である。

導体と絶縁体

物体の中で電荷が移動しやすいかどうかも、帯電を考える手がかりとなる。

導体と絶縁体

導体は、内部で電荷が移動しやすい物質である。金属などが代表例である。

絶縁体は、内部で電荷が移動しにくい物質である。乾いたプラスチックやゴムなどが代表例である。

金属の内部では移動できる電子が存在するため、電荷が広がりやすい。一方、絶縁体では移動が制限されるため、帯電した部分に電荷がとどまりやすい。

ただし、絶縁体で電子が絶対に移動しないという意味ではない。また、導体や絶縁体のどちらであっても、外部との電荷のやり取りがない限り、全電荷は保存される。

3. 電荷どうしには力が働く

同符号は反発、異符号は引力

正または負の電荷をもつ二つの物体は、電気的な力を及ぼし合う。

その基本的な向きの規則は次のとおりである。

電荷の組合せ	力の性質
正と正	反発
負と負	反発
正と負	引力

反発とは、互いに遠ざける向きに働く力である。

引力とは、互いに近づける向きに働く力である。

この規則は、力の大きさを計算する前に使える。

クーロンの法則

電荷をもつ物体どうしの力を数量的に扱うため、まず点電荷という理想化した模型を考える。

点電荷とは、電荷が大きさをもたない 1 点に集中しているとみなす模型である。

クーロンの法則

真空中で静止している二つの点電荷の間に働く静電気力の大きさ F は、二つの電気量の積の絶対値に比例し、距離の 2 乗に反比例する。

$$F = k\frac{|\,q_1 q_2\,|}{r^2}$$

- F：静電気力の大きさ（N）
- q_1, q_2：各点電荷の電気量（C）
- r：二つの点電荷間の距離（m）
- k：比例定数

本講では真空中の比例定数を次の値として計算する。

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

この法則に従う静電気力を**クーロン力**という。

電荷には正負の符号があるが、力の「大きさ」は負にならない。そのため、クーロンの法則では電気量の積に絶対値を付ける。

電荷の符号から力の向きを決め、電荷の絶対値と距離から力の大きさを求める。 この二つの判断を分けることが重要である。

実際の球形物体に使うときの条件

実際の帯電した球には大きさがあるため、常に点電荷の式をそのまま適用できるわけではない。

本講で有限の球を点電荷として近似する場合は、**球の半径が中心間距離に比べて十分小さいなど、電荷の分布を点に集中したものとして扱える条件**を満たすものとする。

その場合、式の r は二つの球の**中心間距離**である。球の表面どうしの距離ではない。

特に、球どうしが接触している最中には、二つの独立した点電荷としてクーロンの式を直接適用しない。接触時の電荷の移動と、離した後の静電気力は区別して考える。

4. クーロン力の向きを図で読む

同符号の二つの電荷

真空中に静止した点電荷 A、B を水平に並べ、A を左、B を右に置く。

電気量と距離を次のように定める。

$$q_A = +2.0\,\mu\mathrm{C}$$

$$q_B = +3.0\,\mu\mathrm{C}$$

$$r = 0.30\,\mathrm{m}$$

μ（マイクロ）は 10^{-6} 倍を表すため、

$$1\,\mu\mathrm{C} = 10^{-6}\,\mathrm{C}$$

である。

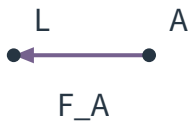
A も B も正に帯電しているため、互いに反発する。

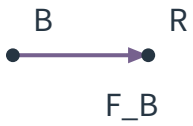
クーロンの法則から、両電荷間に働く力の大きさは、

$$\begin{aligned} F &= k\frac{|\,q_A q_B\,|}{r^2} \\ &= \frac{(9.0\times10^{9}\,\mathrm{N\,m^2/C^2})(2.0\times10^{-6}\,\mathrm{C})(3.0\times10^{-6}\,\mathrm{C})}{(0.30\,\mathrm{m})^2} \\ &= 0.60\,\mathrm{N} \end{aligned}$$

となる。

次の図では、A が受ける力を左向き、B が受ける力を右向きの矢印で表す。各矢印は 0.60 N の力を表す模式図であり、A と B の実際の距離は 0.30 m である。





図の A と B が電荷の位置であり、L と R の黒丸は**矢印の終点を示す補助点**であって電荷ではない。矢印は電荷の移動ではなく、それぞれの電荷に働く力を表す。

図の座標や矢印の長さは模式的なもので、実際の距離や力の数値尺度ではない。同じ図の二つの矢印は、等しい大きさの力を表している。

©ミライコーチング

異符号の二つの電荷

次に、A の電気量は変えず、右側の B だけを $-3.0\,\mu\mathrm{C}$ に変更する。

$$q_A = +2.0\,\mu\mathrm{C}$$

$$q_B = -3.0\,\mu\mathrm{C}$$

$$r = 0.30\,\mathrm{m}$$

今度は異符号なので引力となる。A が受ける力は右向き、B が受ける力は左向きである。

電荷の絶対値と距離は変わらないため、力の大きさも 0.60 N のままである。



図の A と B が電荷の位置であり、P と Q の黒丸は**力の矢印の終点を示す補助点**である。新たな電荷を表す点ではない。

矢印は電荷が移動する経路ではなく、各電荷に作用する力の向きを表す。位置座標は模式的であり、実際の中心間距離は 0.30 m、それぞれに働く力の大きさは等しく 0.60 N である。

二つの力が等しい理由

A が B から受ける力と、B が A から受ける力は、互いに大きさが等しく、向きが反対である。

これは作用・反作用の関係である。

ただし、一方は A に、もう一方は B に働く力である。**異なる物体に働く二つの力を、A だけ、または B だけの合力として足して相殺してはいけない。**

5. 距離と電荷を変えると力はどう変わるか

クーロンの法則の形は、万有引力と同じ逆二乗の関係を含んでいる。

ただし、万有引力は質量をもつ物体間の引力であるのに対し、クーロン力には引力と反発の両方がある。

距離を変える場合

二つの電気量を固定すると、

$$F \propto \frac{1}{r^2}$$

となる。

したがって、距離を 2 倍にすると力は $\frac{1}{4}$ 倍、距離を半分にすると力は 4 倍となる。

電荷の大きさを変える場合

距離を固定すると、

$$F \propto | q_1 q_2 |$$

である。

一方の電気量の絶対値を 2 倍にし、もう一方を 3 倍にすると、力の大きさは $2 \times 3 = 6$ 倍となる。

ここでの比較は、ほかの条件を変えないことが前提である。

例題 1

真空中に静止した二つの点電荷 A、B の電気量をそれぞれ $+2.0\,\mu\mathrm{C}$、$+3.0\,\mu\mathrm{C}$ とする。距離が $0.30\,\mathrm{m}$ のとき、力の大きさは $0.60\,\mathrm{N}$ である。

例題 1(1) 電気量を変えず、距離を $0.60\,\mathrm{m}$ にしたときの力の大きさを求めよ。また、距離を $0.15\,\mathrm{m}$ にした場合についても求めよ。

例題 1(2) 距離を $0.30\,\mathrm{m}$ に戻し、A の電気量を $+4.0\,\mu\mathrm{C}$、B の電気量を $+9.0\,\mu\mathrm{C}$ にした。力の大きさと、元の何倍になったかを求めよ。

解答・解説　例題 1(1) 電気量を固定しているため、力は距離の 2 乗に反比例する。

距離が $0.60\,\mathrm{m}$ の場合は、

$$
\begin{aligned}
F &= 0.60\,\mathrm{N}\left(\frac{0.30\,\mathrm{m}}{0.60\,\mathrm{m}}\right)^2 \\
&= 0.15\,\mathrm{N}
\end{aligned}
$$

となる。

距離が $0.15\,\mathrm{m}$ の場合は、

$$
\begin{aligned}
F &= 0.60\,\mathrm{N}\left(\frac{0.30\,\mathrm{m}}{0.15\,\mathrm{m}}\right)^2 \\
&= 2.4\,\mathrm{N}
\end{aligned}
$$

となる。

よって、距離を 2 倍にすると $0.15\,\mathrm{N}$、半分にすると $2.4\,\mathrm{N}$ である。

解答・解説　例題 1(2) A の電気量の絶対値は 2 倍、B は 3 倍になっているため、力は 6 倍になる。

$$
F = 0.60\,\mathrm{N} \times 2 \times 3 = 3.6\,\mathrm{N}
$$

直接クーロンの法則に代入しても、

$$
\begin{aligned}
F &= \frac{(9.0\times10^{9}\,\mathrm{N\,m^2/C^2})(4.0\times10^{-6}\,\mathrm{C})(9.0\times10^{-6}\,\mathrm{C})}{(0.30\,\mathrm{m})^2} \\
&= 3.6\,\mathrm{N}
\end{aligned}
$$

と一致する。よって、力は $3.6\,\mathrm{N}$ で元の 6 倍である。

6. 電子の個数と電気量を結びつける

電子 1 個の電気量が分かっていれば、移動した電子の個数から電気量の変化を求められる。

電子が n 個移動するとき、その電子が運ぶ電気量は、

$$
q_{\text{電子}} = n \times (-1.60\times10^{-19}\,\mathrm{C})
$$

である。

この値は負である。しかし、電子を失った物体の電気量の変化は正、受け取った物体の電気量の変化は負となる。

©ミライコーチング

例題 2

初めに中性だった物体 A、B がある。A から B へ、電子が 2.0×10^{12} 個移動した。ほかの物体との電荷のやり取りはないものとする。

電子 1 個の電気量を $-1.60 \times 10^{-19}\,\mathrm{C}$ とする。

例題 2(1) 移動した電子全体の電気量を求めよ。

例題 2(2) 移動後の A、B それぞれの電気量を求めよ。

例題 2(3) A と B を合わせた電荷の総和を求め、電荷保存との関係を説明せよ。

解答・解説　例題 2(1) 電子 1 個の電気量に個数を掛ける。

$$\begin{aligned} q_{\text{電子}} &= \left(2.0 \times 10^{12}\right)\left(-1.60 \times 10^{-19}\,\mathrm{C}\right) \\ &= -3.2 \times 10^{-7}\,\mathrm{C} \end{aligned}$$

よって、移動した電子全体の電気量は $-3.2 \times 10^{-7}\,\mathrm{C}$ である。

解答・解説　例題 2(2) A は負の電荷を失い、B は負の電荷を受け取る。初めはどちらも中性なので、

$$q_A = +3.2 \times 10^{-7}\,\mathrm{C}$$

$$q_B = -3.2 \times 10^{-7}\,\mathrm{C}$$

となる。

解答・解説　例題 2(3) 移動後の全電荷は、

$$\begin{aligned} q_A + q_B &= \left(+3.2 \times 10^{-7}\,\mathrm{C}\right) \\ &\quad + \left(-3.2 \times 10^{-7}\,\mathrm{C}\right) \\ &= 0\,\mathrm{C} \end{aligned}$$

である。初めの総電荷も 0 C なので、全電荷は保存されている。

電子の移動で各物体が帯電しても、二物体全体の電荷が新たに増えたわけではない。

7. 導体球を接触させたときの電荷

導体では電荷が移動しやすいため、帯電した導体球どうしを接触させると、電荷が移動することがある。

ここでは次の条件を満たす場合だけを考える。

- 二つの球は同じ形、同じ大きさ、同じ材質の導体球である。
- 二つの球は外部と電荷をやり取りしない。
- 接触時は、周囲の物体や外部の電気的影響が無視できる対称な環境である。
- 接触して十分に電荷が移動した後、球を離す。

この条件では、二つの球は対称であるため、接触後に等しい電荷をもつ。

したがって、接触前の電気量が q_A, q_B なら、離した後の各球の電気量は、

$$q' = \frac{q_A + q_B}{2}$$

となる。

これは、どのような物体どうしでも電荷が等分されるという法則ではない。異なる大きさや形の導体、絶縁体などに無条件で適用してはいけない。

例題 3

同じ形、大きさ、材質の導体球 A、B があり、初めの電気量はそれぞれ $+6.0\,\mathrm{nC}$、$-2.0\,\mathrm{nC}$ である。

二つの球を外部と電荷のやり取りがない状態に置き、周囲の影響を無視できる対称な環境で接触させ、十分に電荷が移動した後に離す。

nC はナノクーロンであり、

$$1\,\mathrm{nC} = 10^{-9}\,\mathrm{C}$$

とする。

例題 3(1) 接触前の二つの球の電荷の総和を求めよ。

例題 3(2) 離した後の各球の電気量を求めよ。

例題 3(3) 二つの球の半径が中心間距離に比べて十分小さく、点電荷として近似できるものとする。中心間距離を $0.10\,\mathrm{m}$ にしたとき、真空中で働く力の大きさと向きを答えよ。

解答・解説　例題 3(1) 電気量は符号を含めて足す。

$$q_{\text{全体}} = (+6.0\,\mathrm{nC}) + (-2.0\,\mathrm{nC}) = +4.0\,\mathrm{nC}$$

よって、電荷の総和は $+4.0\,\mathrm{nC}$ である。

解答・解説　例題 3(2) 同形同材で同じ大きさの孤立した導体球を対称な条件で接触させるため、全電荷が等分される。

$$q'_A = q'_B = \frac{+4.0\,\mathrm{nC}}{2} = +2.0\,\mathrm{nC}$$

どちらの球も $+2.0\,\mathrm{nC}$ となる。

解答・解説　例題 3(3) 離した後の両球はともに正の電荷をもつため、互いに反発する。

点電荷近似が成立するとして、

$$F = \frac{(9.0\times10^{9}\,\mathrm{N\,m^2/C^2})(2.0\times10^{-9}\,\mathrm{C})^2}{(0.10\,\mathrm{m})^2}$$

$$= 3.6\times10^{-6}\,\mathrm{N}$$

となる。

よって、力の大きさは $3.6\times10^{-6}\,\mathrm{N}$ であり、互いに遠ざかる向きに働く。

この計算は、接触中ではなく、球を離して点電荷近似が成立する状態についての計算である。

8. 三つの電荷がある場合は対象を一つ決める

二つ以上の電荷から一つの電荷が力を受けるときは、それぞれの力をベクトルとして合成する。

その際、**どの電荷に働く力を求めるのか**を最初に固定する。

たとえば、一直線上に A、B、C の三つの点電荷があるとき、B に働く合力を求めるなら、A が B に及ぼす力と C が B に及ぼす力を合成する。

A と C の間に働く力は、B に働く力ではないため、B の合力に直接加えない。

一直線上の問題では、右向きを正とすれば、右向きの力を正、左向きの力を負の値として足すことができる。

©ミライコーチング

例題 4

真空中で三つの点電荷 A、B、C が一直線上に静止している。

位置を右向き正の x 軸で表し、次のようにする。

点電荷	位置	電気量
A	$-0.30\,\mathrm{m}$	$+2.0\,\mu\mathrm{C}$
B	$0\,\mathrm{m}$	$+1.0\,\mu\mathrm{C}$
C	$+0.30\,\mathrm{m}$	$+2.0\,\mu\mathrm{C}$

例題 4(1) B が A から受ける力の向きと大きさを求めよ。

例題 4(2) B が C から受ける力の向きと大きさを求めよ。

例題 4(3) B に働く合力を求めよ。

例題 4(4) C の電気量だけを $-2.0\,\mu\mathrm{C}$ に変更した。B に働く合力を求めよ。

解答・解説　例題 4(1) A と B はともに正に帯電しているため反発する。A が B の左にあるので、B は右向きの力を受ける。

$$F_{A\to B}=\frac{(9.0\times10^{9}\,\mathrm{N\,m^2/C^2})(2.0\times10^{-6}\,\mathrm{C})(1.0\times10^{-6}\,\mathrm{C})}{(0.30\,\mathrm{m})^2}$$

$$=0.20\,\mathrm{N}$$

よって、B が A から受ける力は右向きに $0.20\,\mathrm{N}$ である。

解答・解説　例題 4(2) B と C も同符号なので反発する。C は B の右にあるため、B が C から受ける力は左向きである。

電気量の絶対値と距離が例題 4(1)と同じなので、大きさは $0.20\,\mathrm{N}$ となる。

よって、B が C から受ける力は左向きに $0.20\,\mathrm{N}$ である。

解答・解説　例題 4(3) 右向きを正にして足すと、

$$F_{\mathrm{B,合}}=(+0.20\,\mathrm{N})+(-0.20\,\mathrm{N})=0\,\mathrm{N}$$

となる。

B に働く合力は $0\,\mathrm{N}$ である。ただし、B の電気量が 0 になったわけでも、A と C から力を受けていないわけでもない。二つの力が互いに打ち消し合っている。

解答・解説　例題 4(4) C が負になると、B と C は異符号なので引き合う。B は右側の C に引かれるため、C から受ける力は右向きに変わる。

電気量の絶対値は変わらないので、その大きさは $0.20\,\mathrm{N}$ のままである。

A から受ける力も右向きであるから、

$$F_{\mathrm{B,合}}=(+0.20\,\mathrm{N})+(+0.20\,\mathrm{N})=+0.40\,\mathrm{N}$$

となる。

よって、B に働く合力は右向きに $0.40\,\mathrm{N}$ である。

©ミライコーチング

9. 力から電荷間の距離を求める

クーロンの法則は、電荷と力が分かっているとき、距離を逆算するためにも使える。

$$F = k\frac{|\,q_1 q_2\,|}{r^2}$$

の両辺を整理すると、

$$r^2 = \frac{k\,|\,q_1 q_2\,|}{F}$$

となる。

距離は負にならないため、$F > 0$ のときには右辺の**正の平方根**を取る。

$$r = \sqrt{\frac{k\,|\,q_1 q_2\,|}{F}}$$

ここで求めた r^2 と、求めたい距離 r は別の量である。平方根を取る操作を忘れないことが重要である。

例題 5

真空中に、電気量がそれぞれ $+1.0\,\mu\mathrm{C}$、$+4.0\,\mu\mathrm{C}$ の二つの静止点電荷がある。

二つの電荷間に働く力の大きさが $0.40\,\mathrm{N}$ であった。

例題 5(1) 二つの電荷間の距離を求めよ。

例題 5(2) 二つの電荷に働く力は引力と反発のどちらか、理由とともに答えよ。

解答・解説　例題 5(1) クーロンの法則を距離の 2 乗について整理する。

$$\begin{aligned} r^2 &= \frac{k\,|\,q_1 q_2\,|}{F} \\ &= \frac{(9.0\times10^{9}\,\mathrm{N\,m^2/C^2})(1.0\times10^{-6}\,\mathrm{C})(4.0\times10^{-6}\,\mathrm{C})}{0.40\,\mathrm{N}} \\ &= 0.090\,\mathrm{m^2} \end{aligned}$$

距離は正なので、

$$r = \sqrt{0.090\,\mathrm{m^2}} = 0.30\,\mathrm{m}$$

となる。

よって、距離は $0.30\,\mathrm{m}$ である。$r^2 = 0.090\,\mathrm{m^2}$ から $r = 0.090\,\mathrm{m}$ とするのは誤りである。

解答・解説　例題 5(2) 二つの電荷はいずれも正なので、同符号の電荷どうしは反発する。

よって、互いに遠ざかる向きの力が働く。左右のどちらを向くかまで決めるには、二つの電荷の配置が必要である。

クーロン力を判断する順序

クーロン力の問題では、次の順序で考えると判断が安定する。

1. 力を受ける対象の電荷を決める。
2. 正負の符号から引力か反発かを判断し、配置から向きを決める。
3. 電気量を C、距離を m にそろえる。
4. クーロンの法則で力の大きさを計算する。
5. 複数の力が働く場合は、対象に働く力だけをベクトルとして合成する。

力の大きさと向きを別々に判断し、最後に一つの答えとして組み合わせる。

演習問題

演習 1

帯電と電荷保存

演習 1(1) 次のア〜エから、正しい説明を一つ選べ。

- ア：中性の物体には、正負いずれの電荷も存在しない。
- イ：摩擦によって帯電すると、正の電荷と負の電荷が新しく作られる。
- ウ：通常の固体の帯電では、物体間で電子が移動することがある。
- エ：金属どうしをこすると、陽子が原子核から自由に抜け出して移動する。

演習 1(2) 初めに中性だった物体 X、Y の間で、Y から X へ電子が 5.0×10^{11} 個移動した。ほかの物体との電荷のやり取りはない。電子 1 個の電気量を $-1.60 \times 10^{-19}\,\mathrm{C}$ として、移動後の X と Y の電気量をそれぞれ求めよ。

演習 1(3) 導体と絶縁体では、内部の電荷の移動のしやすさがどのように異なるか説明せよ。

演習 2

二つの電荷に働く力

真空中に静止した点電荷 A、B を水平に並べ、A を左、B を右に置く。

A の電気量は $-4.0\,\mu\mathrm{C}$、B の電気量は $+2.0\,\mu\mathrm{C}$、距離は $0.60\,\mathrm{m}$ である。

演習 2(1) A と B に働く力の向きをそれぞれ答えよ。

演習 2(2) 二つの電荷間に働く力の大きさを求めよ。

演習 2(3) 電気量を変えず、距離を $0.30\,\mathrm{m}$ にしたときの力の大きさを求めよ。

演習 2(4) 「A が受ける力と B が受ける力は大きさが等しく向きが反対だから、B に働く合力は必ず 0 になる」という説明は正しいか。理由とともに答えよ。

©ミライコーチング

演習 3

ナノクーロンと逆二乗の関係

真空中に二つの静止点電荷があり、電気量はそれぞれ $-2.0\,\mathrm{nC}$、$-8.0\,\mathrm{nC}$ である。

二つの電荷間の距離を $0.20\,\mathrm{m}$ とする。

演習 3(1) 二つの電荷に働く力は引力と反発のどちらか、理由とともに答えよ。

演習 3(2) 力の大きさを求めよ。

演習 3(3) 電気量を固定し、距離を $0.40\,\mathrm{m}$ にしたときの力の大きさを求めよ。

演習 4

接触した導体球

同じ形、大きさ、材質の導体球 A、B があり、それぞれ $+10\,\mathrm{nC}$、$-4.0\,\mathrm{nC}$ の電気量をもつ。

二つの球は外部と電荷をやり取りしないものとする。周囲の影響を無視できる対称な環境で接触させ、十分に電荷が移動した後、離す。

演習 4(1) 接触前の二つの球の電荷の総和を求めよ。

演習 4(2) 離した後の各球の電気量を求めよ。

演習 4(3) 二つの球の半径は中心間距離に比べて十分小さく、点電荷として近似できるとする。真空中で中心間距離を $0.30\,\mathrm{m}$ にしたとき、二つの球の間に働く力の大きさと向きを求めよ。

演習 4(4) 演習 4(3)の計算方法を、二つの球が接触している最中にそのまま適用してよいか。理由とともに答えよ。

演習 5

三つの電荷の合力

真空中に静止した三つの点電荷 A、B、C が一直線上にある。

右向きを正とし、位置と電気量を次の表に示す。

点電荷	位置	電気量
A	$-0.30\,\mathrm{m}$	$-1.0\,\mu\mathrm{C}$
B	$0\,\mathrm{m}$	$+2.0\,\mu\mathrm{C}$
C	$+0.30\,\mathrm{m}$	$+1.0\,\mu\mathrm{C}$

演習 5(1) B が A から受ける力の向きと大きさを求めよ。

演習 5(2) B が C から受ける力の向きと大きさを求めよ。

演習 5(3) B に働く合力を求めよ。

演習 5(4) C の電気量だけを $-1.0\,\mu\mathrm{C}$ に変えた場合、B に働く合力を求めよ。

©ミライコーチング

演習 6

力から距離を求める

真空中で、電気量が $+2.0\,\mu\mathrm{C}$ と $-8.0\,\mu\mathrm{C}$ の二つの静止点電荷がある。

二つの電荷間に働く力の大きさは $0.90\,\mathrm{N}$ である。

演習 6(1) 二つの点電荷間の距離を求めよ。

演習 6(2) 正の電荷を左、負の電荷を右に置いたとき、それぞれの電荷に働く力の向きを答えよ。

演習 6(3) ある生徒が、距離を求める途中で $r^2 = 0.16\,\mathrm{m}^2$ を得て、「したがって距離は $0.16\,\mathrm{m}$ である」と答えた。どこが誤りかを説明せよ。

演習 6(4) 点電荷ではなく、半径がそれぞれ $0.18\,\mathrm{m}$ の二つの帯電した導体球を考える。中心間距離が $0.40\,\mathrm{m}$ のとき、二つの球を十分小さい点電荷とみなして同じ式を直接使うことは適切か。理由とともに答えよ。

演習問題の解答・解説

演習 1 の解答・解説

解答・解説　演習 1(1) 正解はウである。通常の固体の帯電では、物体間の電子の移動によって正味の電荷が変わる場合がある。

各選択肢を確認する。

- **アは誤り**。 中性とは正負の電荷の総和が 0 であることであり、電荷が存在しないという意味ではない。
- **イは誤り**。 摩擦帯電では電子が移動する場合があるが、電荷が無から生成されるわけではない。外部とのやり取りがなければ全電荷は保存される。
- **ウは正しい**。 通常の固体どうしの帯電には、電子の移動が関係することがある。
- **エは誤り**。 陽子は原子核に含まれており、通常の固体の帯電で原子核から自由に抜け出して移動するものではない。

解答・解説　演習 1(2) Y から X へ負の電荷をもつ電子が移動したため、X は負、Y は正に帯電する。

移動した電子の電気量は、

$$\begin{aligned} q_{\text{電子}} &= \left(5.0 \times 10^{11}\right)\left(-1.60 \times 10^{-19}\,\mathrm{C}\right) \\ &= -8.0 \times 10^{-8}\,\mathrm{C} \end{aligned}$$

である。

よって、移動後の電気量は、

$$q_X = -8.0 \times 10^{-8}\,\mathrm{C}$$

$$q_Y = +8.0 \times 10^{-8}\,\mathrm{C}$$

となる。

両者の和は 0 C なので、電荷保存も成り立っている。

解答・解説　演習 1(3) 導体は内部で電荷が移動しやすく、絶縁体は移動しにくい。

たとえば、金属は導体の代表例であり、乾いたプラスチックやゴムは絶縁体の代表例である。ただし、絶縁体でも電荷が絶対に移動しないわけではない。

演習 2 の解答・解説

解答・解説　演習 2(1) A は負、B は正なので、異符号の電荷どうしは引き合う。

A は B の左側にあるため、A が受ける力は右向きである。B が受ける力は左向きである。

解答・解説　演習 2(2) 電気量をクーロンへ換算してから代入する。

$$|\,q_A\,| = 4.0 \times 10^{-6}\,\mathrm{C}$$

$$|\,q_B\,| = 2.0 \times 10^{-6}\,\mathrm{C}$$

したがって、

$$\begin{aligned} F &= k\frac{|\,q_A q_B\,|}{r^2} \\ &= \frac{(9.0 \times 10^{9}\,\mathrm{N\,m^2/C^2})(4.0 \times 10^{-6}\,\mathrm{C})(2.0 \times 10^{-6}\,\mathrm{C})}{(0.60\,\mathrm{m})^2} \\ &= 0.20\,\mathrm{N} \end{aligned}$$

となる。

よって、力の大きさは 0.20 N である。二つの電荷はこの大きさの力を互いに反対向きに受ける。

解答・解説　演習 2(3) 距離が 0.60 m から 0.30 m へ半分になるため、力は 4 倍になる。

$$F' = 0.20\,\mathrm{N} \times 4 = 0.80\,\mathrm{N}$$

よって、力の大きさは 0.80 N である。電荷の符号は変わらないため、引力のままである。

解答・解説　演習 2(4) 誤りである。A が受ける力と B が受ける力は、互いに等しい大きさで反対向きの作用・反作用の関係にあるが、異なる電荷に働いている。

B の合力を求めるとき、A が受ける力を加えてはいけない。ほかの力がなければ、B には A から受ける電気的な力がそのまま働く。

演習 3 の解答・解説

解答・解説　演習 3(1) 二つの電荷はともに負なので、同符号の電荷どうしは反発する。

したがって、互いに遠ざかる向きの力が働く。

解答・解説　演習 3(2) ナノクーロンをクーロンへ換算する。

$$|\,q_1\,| = 2.0 \times 10^{-9}\,\mathrm{C}$$

$$|\,q_2\,| = 8.0 \times 10^{-9}\,\mathrm{C}$$

クーロンの法則より、

$$F = \frac{(9.0 \times 10^{9}\,\mathrm{N\,m^2/C^2})(2.0 \times 10^{-9}\,\mathrm{C})(8.0 \times 10^{-9}\,\mathrm{C})}{(0.20\,\mathrm{m})^2}$$

$$= 3.6 \times 10^{-6}\,\mathrm{N}$$

となる。

よって、力の大きさは $3.6 \times 10^{-6}\,\mathrm{N}$ である。電荷が負であっても、力の大きさは正の値で表す。

解答・解説　演習 3(3) 電気量を固定して距離を 2 倍にするため、力の大きさは $\frac{1}{4}$ 倍になる。

$$F' = (3.6 \times 10^{-6}\,\mathrm{N}) \times \frac{1}{4}$$

$$= 9.0 \times 10^{-7}\,\mathrm{N}$$

よって、力の大きさは $9.0 \times 10^{-7}\,\mathrm{N}$ である。

演習 4 の解答・解説

解答・解説　演習 4(1) 符号を含めて足すと、

$$q_{\text{全体}} = (+10\,\mathrm{nC}) + (-4.0\,\mathrm{nC}) = +6.0\,\mathrm{nC}$$

となる。

よって、接触前の電荷の総和は $+6.0\,\mathrm{nC}$ である。

解答・解説　演習 4(2) 同じ形、大きさ、材質の導体球を、外部と電荷をやり取りしない対称な条件で接触させるため、全電荷が二つの球に等しく分配される。

$$q'_A = q'_B = \frac{+6.0\,\mathrm{nC}}{2} = +3.0\,\mathrm{nC}$$

よって、離した後の各球の電気量は $+3.0\,\mathrm{nC}$ である。

解答・解説　演習 4(3) 両球はともに正の電荷をもつため、反発する。

点電荷近似が成立するという条件で、

$$F = \frac{(9.0\times10^{9}\,\mathrm{N\,m^2/C^2})(3.0\times10^{-9}\,\mathrm{C})^2}{(0.30\,\mathrm{m})^2}$$

$$= 9.0\times10^{-7}\,\mathrm{N}$$

となる。

よって、互いに遠ざかる向きに $9.0\times10^{-7}\,\mathrm{N}$ の力が働く。

解答・解説　演習 4(4) そのまま適用してはいけない。接触している最中の二つの導体球では、電荷が移動・再分布し得るため、二つの独立した点電荷として直接扱う条件が成立しない。

本問の計算は、接触後に球を離し、半径が中心間距離より十分小さいなどの点電荷近似が成立する状態について行ったものである。

演習 5 の解答・解説

解答・解説　演習 5(1) A は負、B は正なので引力が働く。A は B の左側にあるため、B が A から受ける力は左向きである。

大きさは、

$$F_{A\to B} = \frac{(9.0\times10^{9}\,\mathrm{N\,m^2/C^2})(1.0\times10^{-6}\,\mathrm{C})(2.0\times10^{-6}\,\mathrm{C})}{(0.30\,\mathrm{m})^2}$$

$$= 0.20\,\mathrm{N}$$

となる。

よって、B は A から左向きに 0.20 N の力を受ける。

解答・解説　演習 5(2) B と C はともに正なので反発する。C は B の右側にあるため、B が C から受ける力は左向きである。

電荷の絶対値と距離は演習 5(1)と同じなので、大きさは 0.20 N である。

よって、B は C から左向きに 0.20 N の力を受ける。

解答・解説　演習 5(3) 右向きを正とすると、A から受ける力も C から受ける力も負である。

$$F_{\mathrm{B,合}} = (-0.20\,\mathrm{N}) + (-0.20\,\mathrm{N})$$

$$= -0.40\,\mathrm{N}$$

よって、B に働く合力は左向きに 0.40 N である。

A と C の間に働く力は B に作用する力ではないため、加えない。

解答・解説　演習 5(4) C が負になると、B と C の間には引力が働く。C は B の右側にあるので、B が C から受ける力は右向きになる。

電荷の絶対値と距離は同じため、大きさは 0.20 N のままである。

A から受ける力は左向きに 0.20 N なので、

$$F_{\mathrm{B,合}} = (-0.20\,\mathrm{N}) + (+0.20\,\mathrm{N})$$

$$= 0\,\mathrm{N}$$

となる。

よって、B に働く合力は 0 N である。

これは B が電荷を失ったからではなく、B に働く二つの力が等大逆向きであるためである。

演習 6 の解答・解説

解答・解説　演習 6(1) クーロンの法則から、距離の 2 乗を求める。

$$r^2 = \frac{k \mid q_1 q_2 \mid}{F}$$

電気量をクーロンに換算して代入すると、

$$r^2 = \frac{(9.0 \times 10^9\,\mathrm{N\,m^2/C^2})(2.0 \times 10^{-6}\,\mathrm{C})(8.0 \times 10^{-6}\,\mathrm{C})}{0.90\,\mathrm{N}}$$

$$= 0.16\,\mathrm{m^2}$$

となる。

距離は正なので、

$$r = \sqrt{0.16\,\mathrm{m^2}} = 0.40\,\mathrm{m}$$

である。

よって、二つの点電荷の距離は 0.40 m である。

解答・解説　演習 6(2) 正と負の電荷は引き合う。正の電荷が左、負の電荷が右にあるため、正の電荷が受ける力は右向き、負の電荷が受ける力は左向きとなる。

それぞれの力の大きさは等しく 0.90 N である。

解答・解説　演習 6(3) r^2 と r を混同していることが誤りである。

得られた値は距離の 2 乗なので、平方根を取る必要がある。

$$r = \sqrt{0.16\,\mathrm{m^2}} = 0.40\,\mathrm{m}$$

となり、正しい距離は 0.40 m である。

また、r^2 の単位は $\mathrm{m^2}$ であり、距離 r の単位は m である。単位の違いからも誤りを確認できる。

解答・解説　演習 6(4) 適切ではない。各球の半径 0.18 m は、中心間距離 0.40 m に比べて十分小さいとはいえない。

そのため、球の広がりや電荷の分布を無視して、それぞれの電荷が中心の 1 点に集中していると近似する条件が満たされていない。

二つの球が接触していないというだけでは、点電荷近似が成立するとは限らない。

したがって、この条件ではクーロンの点電荷の式をそのまま使って実際の力を求めることは適切ではない。

©ミライコーチング