第 091 講 容量・電荷・電圧

この講でできるようになること

- コンデンサーの 2 枚の極板に蓄えられる電荷と、電位差・電気容量の関係を説明できる。
- 平行板コンデンサーの面積・間隔・誘電体から電気容量を求められる。
- 電池につないだままの場合と、充電後に切り離した場合で、一定に保たれる量を区別できる。
- 条件の変化に応じて、電気容量・電荷・電位差・電場がどう変わるかを判断できる。
- 電荷と電位差のグラフから電気容量を読み取れる。

1. コンデンサーは何を蓄えるのか

2 枚の導体板と電荷

電子機器には、電気を一時的に蓄えるための**コンデンサー**という部品が使われている。最も基本的なものは、2 枚の導体板を向かい合わせ、その間を絶縁した構造である。

この 2 枚の導体板を**極板**という。電池などを使って一方の極板を正に、もう一方を負に帯電させると、極板の間には電場ができる。

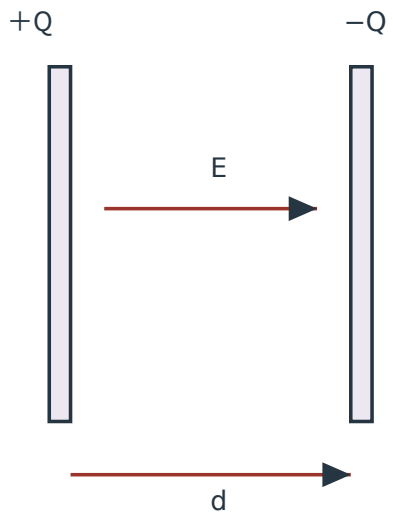

図 1　平行板の断面。左が高電位、E は左から右。各板の対向面積は S。

図では左の極板に正の電荷、右の極板に負の電荷が蓄えられている。極板に蓄えられた正味の自由電荷を、それぞれ $+Q$、$-Q$ と表す。

ここで $Q>0$ は、**片方の極板に蓄えられた自由電荷の大きさ**である。

極板	自由電荷
左の正極板	$+Q$
右の負極板	$-Q$
2 枚の電荷の代数和	0
2 枚の電荷の絶対値の和	$2Q$

コンデンサーの電荷を Q と表すとき、通常はこの片極板の電荷の大きさを指す。2 枚の電荷を足した 0 や、絶対値を合計した $2Q$ をそのまま用いるわけではない。

©ミライコーチング

充電中、電子は外部の導線や電池を含む経路を通じて移動し、両極板の電荷が変化する。極板間が真空や絶縁体である場合、電子がその隙間を自由に横切って充電されるわけではない。

図の E は正極板から負極板へ向かう電場を表す。一方、d の矢印は極板間の距離を示す寸法記号であり、電流や電場の向きを示す矢印ではない。

電荷と電位差を結ぶ電気容量

第 088 講で学んだ電位差は、2 点間の電位の差を表す量である。

ここでは正極板の電位を $V_{\text{正}}$、負極板の電位を $V_{\text{負}}$ とし、電位差を

$$V = V_{\text{正}} - V_{\text{負}} > 0$$

と定める。

同じ構造・同じ媒質のコンデンサーでは、蓄えられる電荷の大きさ Q は、電位差 V に比例する。

その比例係数を**電気容量**といい、記号 C で表す。

電気容量

コンデンサーの電気容量 C は、片極板の自由電荷の大きさ Q と極板間の電位差 V を結ぶ比例係数である。

$$Q = CV$$

$V > 0$ のとき、次のようにも表せる。

$$C = \frac{Q}{V}$$

- Q：片極板の自由電荷の大きさ（単位 C）
- V：正極板と負極板の電位差（単位 V）
- C：電気容量（単位 F）

電気容量の単位 F は**ファラド**と読む。

電気容量の単位と電荷の単位は、次の関係にある。

$$1\,\text{F} = 1\,\frac{\text{C}}{\text{V}}$$

この式で分子に現れる単位 C はクーロンであり、電気容量を表す量記号 C とは意味が異なる。同じ文字でも、量記号か単位記号かを区別する必要がある。

実際の計算では、次の単位もよく使う。

表記	読み方	基本単位との関係
μF	マイクロファラド	10^{-6} F
pF	ピコファラド	10^{-12} F
μC	マイクロクーロン	10^{-6} C
nC	ナノクーロン	10^{-9} C

電気容量は電荷そのものではない

例えば、電気容量が 2.0 μF のコンデンサーでは、電位差を 3.0 V から 6.0 V にすると、電荷の大きさは 2 倍になる。

しかし、極板の形や大きさ、極板間の距離、間にある媒質が変わらなければ、電気容量は変化しない。

電気容量は、その構造と媒質で決まる比例係数である。

電位差を 2 倍にしたから電気容量も 2 倍になる、という考え方は誤りである。

電荷が 0 でも電気容量が 0 とは限らない

同じ構造のコンデンサーで電位差を $V=0$ とすると、理想的な関係 $Q=CV$ から $Q=0$ となる。

しかし、$V=0$ かつ $Q=0$ の状態で $\frac{Q}{V}$ を計算すると $\frac{0}{0}$ となり、この割り算では容量を求められない。

電気容量は構造と媒質で決まる係数なので、この状態でも元の電気容量をもつ。$Q=0$ だから $C=0$ と判断してはいけない。

例題 1

電気容量 $2.0\,\mu\mathrm{F}$ のコンデンサーに、正極板の電位が負極板より $6.0\,\mathrm{V}$ 高くなるように電圧をかけた。充電後は静電平衡にあるものとする。

例題 1(1) 片極板に蓄えられる自由電荷の大きさ Q を求めよ。

例題 1(2) 正極板と負極板の自由電荷をそれぞれ符号付きで示し、2 枚の電荷の代数和を求めよ。

例題 1(3) 電圧だけを $3.0\,\mathrm{V}$ に変更し、構造と媒質は変えない。このときの電荷の大きさと電気容量を求めよ。

例題 1 の解答・解説

例題 1(1) 電気容量と電位差が与えられているので、$Q=CV$ を使う。

$$\begin{aligned} Q &= (2.0\,\mu\mathrm{F})(6.0\,\mathrm{V}) \\ &= 12\,\mu\mathrm{C} \end{aligned}$$

したがって、片極板の自由電荷の大きさは $12\,\mu\mathrm{C}$ である。

例題 1(2) Q は片極板の電荷の大きさなので、正極板は $+12\,\mu\mathrm{C}$、負極板は $-12\,\mu\mathrm{C}$ である。

2 枚の電荷の代数和は

$$(+12\,\mu\mathrm{C})+(-12\,\mu\mathrm{C})=0\,\mu\mathrm{C}$$

となる。

正負の電荷が打ち消し合っても、それぞれの極板に電荷が蓄えられていないという意味ではない。

例題 1(3) 電圧だけを変更しても、構造と媒質が同じなので電気容量は $2.0\,\mu\mathrm{F}$ のままである。

$$\begin{aligned} Q &= (2.0\,\mu\mathrm{F})(3.0\,\mathrm{V}) \\ &= 6.0\,\mu\mathrm{C} \end{aligned}$$

よって、電荷の大きさは $6.0\,\mu\mathrm{C}$、電気容量は $2.0\,\mu\mathrm{F}$ である。

©ミライコーチング

2. 平行板コンデンサーの容量を決めるもの

面積と間隔による違い

2 枚の平らな導体板を平行に向かい合わせたものを、**平行板コンデンサー**という。

ここでは、極板間の距離が板の縦・横の寸法に比べて十分小さく、端付近で電場が曲がる効果を無視できる理想的なモデルを考える。

まず極板間は真空とし、次の量を定める。

- S：2 枚の極板が向かい合う面積（単位 m^2）
- d：極板間の垂直距離（単位 m）
- ε_0：真空の誘電率

真空の誘電率は

$$\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}\,\mathrm{F/m}$$

とする。

真空の平行板コンデンサー

極板間隔が板の寸法に比べて十分小さく、端の効果を無視できる真空の平行板コンデンサーでは、

$$C = \varepsilon_0 \frac{S}{d}$$

が成り立つ。

したがって、ほかの条件が同じなら次の関係がある。

- 対向面積 S が大きいほど電気容量 C は大きい。
- 極板間隔 d が大きいほど電気容量 C は小さい。

面積 S は、極板の断面図で見える細い線の面積ではない。2 枚の極板が実際に向かい合っている面の面積である。

これを正面から見て確かめよう。

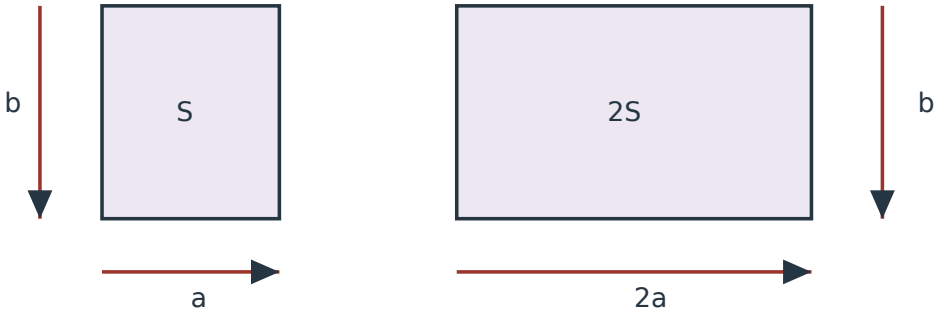

図 2　対向面の正面比較：S と 2S。間隔 d と媒質は同じ。

図は各コンデンサーの片方の極板を正面から見たものである。もう一方の極板も同じ面積で奥に重なっているが、見やすさのため省略している。

左は横 a、縦 b なので $S = ab$ である。右は横 $2a$、縦 b なので面積は $2S$ となる。

板間隔 d は紙面に垂直な奥行き方向であり、両方とも同じである。板の厚さを増やした図ではない。

このように S だけが 2 倍になれば、

$$C' = \varepsilon_0 \frac{2S}{d} = 2C$$

となる。

電位差 V も同じに保つなら、$Q = CV$ より電荷の大きさも 2 倍になる。

極板間の電場と電位差

平行板コンデンサーの中央付近では、端の効果を無視すると、極板間の電場を一様とみなせる。

正極板から負極板へ向かう電場の大きさを E とすると、

$$V = Ed$$

が成り立つ。

したがって、

$$E = \frac{V}{d}$$

である。

ここでの E は、極板間中央の一様な電場の大きさである。実際の極板の端付近まで、どこでも同じ値だとする式ではない。

電場の単位は $\mathrm{V/m}$ である。

この関係から、電位差が一定でも、極板間隔を変えれば電場の大きさが変わり得ることが分かる。

例題 2

真空中に置かれた平行板コンデンサーの対向面積は $S = 2.0 \times 10^{-2}\,\mathrm{m}^2$、極板間隔は $d = 1.0 \times 10^{-3}\,\mathrm{m}$ である。

極板を電池につなぎ、電位差を $100\,\mathrm{V}$ に保つ。端の効果を無視できるものとし、$\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}\,\mathrm{F/m}$ とする。

例題 2(1) 電気容量を F と pF で求めよ。

例題 2(2) 片極板の自由電荷の大きさを C と nC で求めよ。

例題 2(3) 極板間中央の電場の大きさを求めよ。

例題 2(4) 極板の対向面積だけを $2S$ に増やし、間隔と電位差は変えなかった。変更後の電気容量、電荷の大きさ、電場の大きさをそれぞれ求めよ。

例題 2 の解答・解説

例題 2(1) 真空の平行板コンデンサーなので、電気容量は $C = \varepsilon_0 \frac{S}{d}$ である。

$$
\begin{aligned}
C &= \left(8.85 \times 10^{-12}\,\mathrm{F/m}\right)\frac{2.0 \times 10^{-2}\,\mathrm{m}^2}{1.0 \times 10^{-3}\,\mathrm{m}} \\
&= 1.77 \times 10^{-10}\,\mathrm{F} \\
&= 177\,\mathrm{pF}
\end{aligned}
$$

答えは $1.77 \times 10^{-10}\,\mathrm{F} = 177\,\mathrm{pF}$ である。

例題 2(2) 電荷の大きさは $Q = CV$ で求める。

$$
\begin{aligned}
Q &= \left(1.77 \times 10^{-10}\,\mathrm{F}\right)(100\,\mathrm{V}) \\
&= 1.77 \times 10^{-8}\,\mathrm{C} \\
&= 17.7\,\mathrm{nC}
\end{aligned}
$$

よって、片極板に蓄えられる自由電荷の大きさは $17.7\,\mathrm{nC}$ である。正極板と負極板の電荷はそれぞれ $+17.7\,\mathrm{nC}$、$-17.7\,\mathrm{nC}$ となる。

例題 2(3) 中央付近の一様電場について、$E = \frac{V}{d}$ を使う。

$$
\begin{aligned}
E &= \frac{100\,\mathrm{V}}{1.0 \times 10^{-3}\,\mathrm{m}} \\
&= 1.00 \times 10^{5}\,\mathrm{V/m}
\end{aligned}
$$

答えは $1.00 \times 10^{5}\,\mathrm{V/m}$ である。

例題 2(4) 対向面積を S から $2S$ にすると、極板間隔 d が同じなので、電気容量は 2 倍になる。

$$C' = 2(177\,\mathrm{pF})$$
$$= 354\,\mathrm{pF}$$

電池につないでいるため電位差は $100\,\mathrm{V}$ のままである。よって、

$$Q' = (354 \times 10^{-12}\,\mathrm{F})(100\,\mathrm{V})$$
$$= 35.4\,\mathrm{nC}$$

電場は電位差と極板間隔で決まるため、これらが変わらなければ、

$$E' = \frac{100\,\mathrm{V}}{1.0 \times 10^{-3}\,\mathrm{m}} = 1.00 \times 10^{5}\,\mathrm{V/m}$$

である。

物理量	変更前	面積を 2 倍にした後
対向面積	S	$2S$
極板間隔	d	d
電位差	$100\,\mathrm{V}$	$100\,\mathrm{V}$
電気容量	$177\,\mathrm{pF}$	$354\,\mathrm{pF}$
電荷の大きさ	$17.7\,\mathrm{nC}$	$35.4\,\mathrm{nC}$
電場の大きさ	$1.00 \times 10^{5}\,\mathrm{V/m}$	$1.00 \times 10^{5}\,\mathrm{V/m}$

面積を 2 倍にすると、同じ電位差のもとで蓄えられる電荷は 2 倍になるが、中央の電場の大きさは変わらない。

3. 誘電体を入れると電気容量はどうなるか

絶縁体を極板の間に入れる

コンデンサーの極板間には、真空だけでなく、電気を通しにくい物質を入れることがある。

このような物質を、ここでは**誘電体**という。

誘電体は電場の影響を受けて内部の電荷分布が変化する性質をもつが、導体のように自由電荷が物質全体を移動できるものではない。

極板間を誘電体で満たすと、同じ形状でも電気容量が変わる。

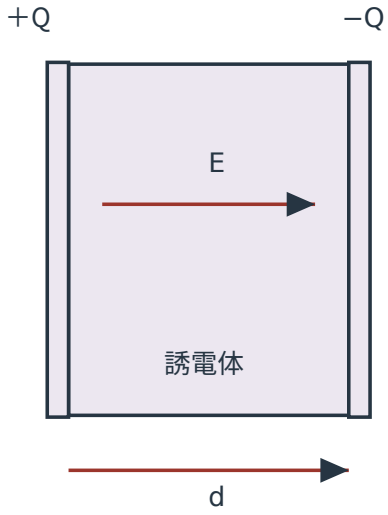

図 3　平行板の断面。左が高電位、E は左から右。各板の対向面積は S。

図は、極板間を一様な誘電体で隙間なく満たした状態である。

図中の $+Q$ と $-Q$ は、引き続き導体の極板に蓄えられた自由電荷を表す。誘電体内部に生じる電荷の偏りを、そのまま極板の自由電荷と数えているわけではない。

誘電体を入れた後も正極板が高電位であれば、電場の向きは正極板から負極板へ向かう。

誘電体をどこまで入れるか、何種類重ねるかで状況は変わるため、この講では**一様な誘電体が極板間を隙間なく完全に満たす場合**だけを扱う。

比誘電率と電気容量

誘電体によって、電気容量が真空の場合の何倍になるかを表す量を**比誘電率**という。

比誘電率を κ（カッパ）で表す。真空を基準にした比であるため、単位はない。

誘電体を全挿入した平行板コンデンサー

端の効果を無視できる平行板コンデンサーで、均質な誘電体が極板間を隙間なく満たすとき、

$$C = \kappa \varepsilon_0 \frac{S}{d}$$

が成り立つ。

- κ：誘電体の比誘電率
- S：対向面積
- d：極板間隔

真空では $\kappa = 1$ とみなせる。

一般的な誘電体について $\kappa > 1$ なら、同じ極板面積・間隔の真空の場合に比べて電気容量は κ 倍となる。

例えば、比誘電率 $\kappa = 3.0$ の誘電体で極板間を完全に満たすと、電気容量は真空の場合の 3 倍になる。

ただし、**電気容量が 3 倍になることと、電荷や電場が 3 倍になることは別の話**である。

電荷や電場がどう変わるかは、コンデンサーが電池につながっているかどうかによって異なる。

4. 電池につないだままか、切り離したか

コンデンサーの形や媒質を変える問題では、最初に確認すべきことがある。

それは、**電池との接続状態**である。

コンデンサーが静電平衡に達した状態を比べるとき、電池につながっていれば電位差が一定に保たれる。一方、充電後に両端を電池から切り離して絶縁すれば、極板の自由電荷が保存される。

この 2 つの違いを回路図で確認する。

電池につないだままの場合

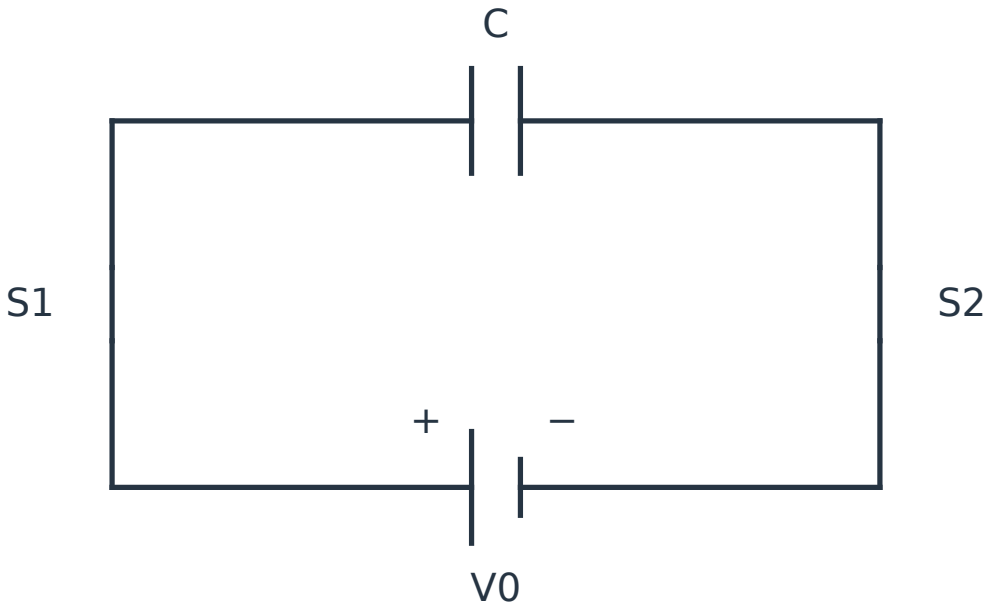

図 4　電池接続を保つ条件

図ではスイッチ $S1$ と $S2$ が両方とも閉じている。理想電池の正極は長い線で表される側で、左極板につながっている。

この状態では、コンデンサーの両端が電池につながっており、電位差が電池の電圧 V_0 に保たれる。

極板間隔や誘電体を変えて電気容量が変化すると、外部の導線と電池を通じて電荷が移動する。十分時間が経ち、新しい静電平衡に達した後では、

$$V = V_0 = \text{一定}$$

となる。

この条件では $Q = CV_0$ だから、電気容量が大きくなれば電荷の大きさも増える。

電荷が移動するのは状態が変化する過程であり、静電平衡に達した後もコンデンサーの内部に電流が流れ続けるという意味ではない。

充電後に電池から切り離した場合

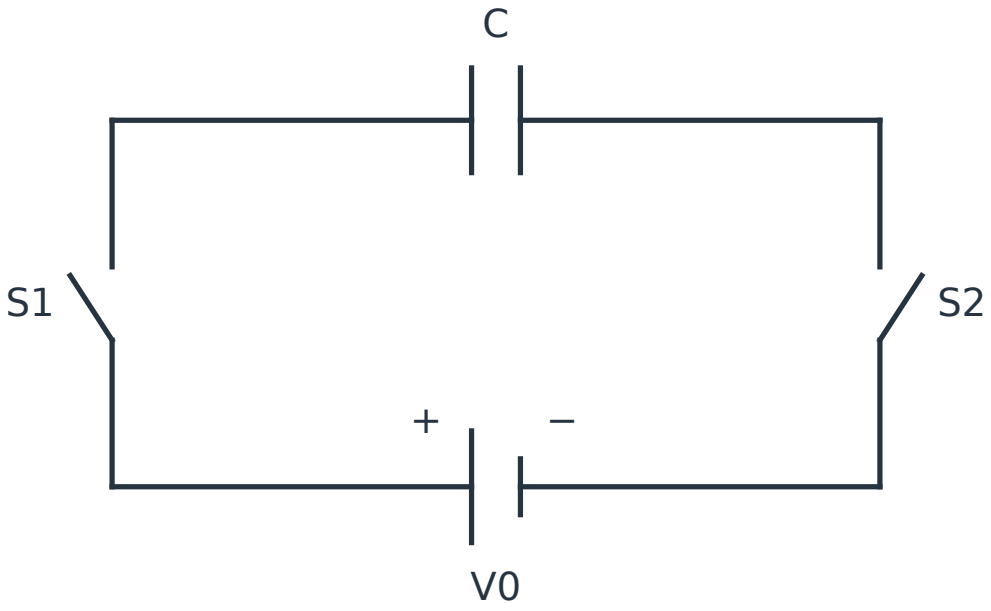

図 5　充電後に電池から両端を切り離す条件

この図では、充電後に $S1$ と $S2$ の両方を開いている。両極板は電池から切り離され、外部から電荷が出入りしない。

極板間は理想的に絶縁され、電荷の漏れもないものとする。

このとき、各極板の自由電荷は保存される。

$$Q = \text{一定}$$

ただし、電気容量が変化すれば、

$$V = \frac{Q}{C}$$

によって電位差が変わる。

電池から切り離した後も、電池の電圧がそのままコンデンサーに固定されるわけではない。

最初に固定する量を決める

コンデンサーの状態変化では、次の順に考えるとよい。

1. 面積・間隔・媒質のうち、何を変えたかを確認する。
2. 電池につながっているなら V を一定とする。
3. 充電後に両端を切り離して絶縁したなら Q を一定とする。
4. C を求め、$Q = CV$ と $E = \frac{V}{d}$ から残りの量を判断する。

この順序を守れば、電気容量が増えたから電荷も必ず増える、といった誤りを避けられる。

5. 極板間隔を 2 倍にするとどうなるか

極板の面積と媒質を変えず、間隔だけを d から $2d$ に広げる場合を考える。

極板間隔を広げる前後の配置は、次のようになる。

元の間隔 d の状態は最初の断面図に対応し、変更後は次の図で表される。

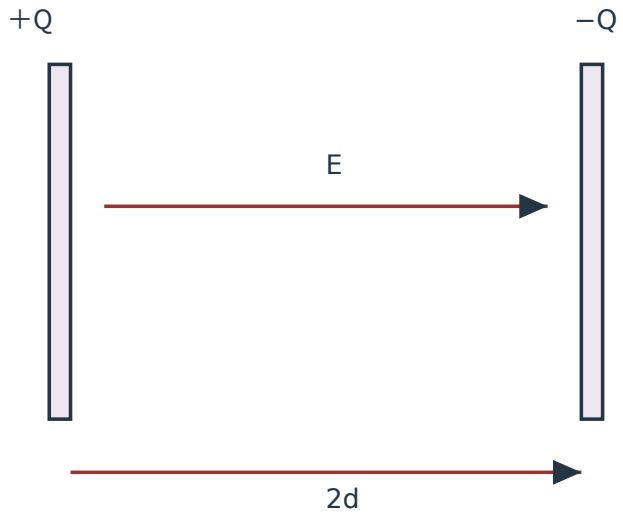

図 6　平行板の断面。左が高電位、E は左から右。各板の対向面積は S。

図の $2d$ は、極板間隔が元の 2 倍になったことを示す。実際の図の長さを定規で測って比を調べる必要はない。

また、図の電場の矢印が長く描かれていても、電場が強くなったことは意味しない。電場の大きさは式 $E = \frac{V}{d}$ から判断する。

真空の平行板コンデンサーについて、

$$C = \varepsilon_0 \frac{S}{d}$$

であるため、間隔だけが 2 倍になると、

$$C' = \varepsilon_0 \frac{S}{2d} = \frac{C}{2}$$

となる。

ここから先の電荷・電位差・電場の変化は、電池との接続条件で分かれる。

例題 3

例題 2 と同じ真空の平行板コンデンサーを考える。

変更前の状態は、電気容量 $177\,\mathrm{pF}$、電位差 $100\,\mathrm{V}$、片極板の電荷の大きさ $17.7\,\mathrm{nC}$、極板間隔 $1.0\times10^{-3}\,\mathrm{m}$ である。

対向面積と媒質を変えず、極板間隔だけをゆっくり 2 倍に広げる。各操作の前後は静電平衡にあり、端の効果は無視できるものとする。

次の 2 つの操作は、それぞれ変更前の同じ状態から独立に行う。

- 操作 A：$100\,\mathrm{V}$ の理想電池につないだまま広げる。
- 操作 B：充電後に電池から両端を切り離して絶縁し、漏れがない状態で広げる。

例題 3(1) 極板間隔を 2 倍にした後の電気容量を求めよ。

例題 3(2) 操作 A における変更後の電位差・電荷の大きさ・電場の大きさを求めよ。

例題 3(3) 操作 B における変更後の電位差・電荷の大きさ・電場の大きさを求めよ。

例題 3 の解答・解説

例題 3(1) 対向面積と媒質は同じなので、極板間隔を 2 倍にすれば電気容量は半分になる。

$$\begin{aligned} C' &= \frac{177\,\mathrm{pF}}{2} \\ &= 88.5\,\mathrm{pF} \end{aligned}$$

これは電池接続の有無にかかわらず同じである。

例題 3(2) 操作 A は電池につながったままなので、電位差が $100\,\mathrm{V}$ に保たれる。

したがって、電荷の大きさは、

$$\begin{aligned} Q' &= C'V \\ &= (88.5\times10^{-12}\,\mathrm{F})(100\,\mathrm{V}) \\ &= 8.85\,\mathrm{nC} \end{aligned}$$

となる。

極板間隔は $2.0\times10^{-3}\,\mathrm{m}$ なので、中央の電場の大きさは、

$$\begin{aligned} E' &= \frac{100\,\mathrm{V}}{2.0\times10^{-3}\,\mathrm{m}} \\ &= 5.00\times10^{4}\,\mathrm{V/m} \end{aligned}$$

となる。

操作 A では、電位差は一定で、電荷と電場の大きさが半分になる。

例題 3(3) 操作 B では、充電後に両極板を電池から切り離し、漏れなく絶縁している。したがって片極板の自由電荷の大きさは $17.7\,\mathrm{nC}$ のままである。

電気容量は半分になったので、電位差は、

$$\begin{aligned} V' &= \frac{Q}{C'} \\ &= \frac{17.7 \times 10^{-9}\,\mathrm{C}}{88.5 \times 10^{-12}\,\mathrm{F}} \\ &= 200\,\mathrm{V} \end{aligned}$$

となる。

この電位差を用いると、中央の電場の大きさは、

$$\begin{aligned} E' &= \frac{200\,\mathrm{V}}{2.0 \times 10^{-3}\,\mathrm{m}} \\ &= 1.00 \times 10^{5}\,\mathrm{V/m} \end{aligned}$$

である。

操作 B では、電荷が一定で電位差が 2 倍になる。そのため、間隔も 2 倍になっていても、中央の電場の大きさは変わらない。

両操作を比較すると、次のようになる。

物理量	変更前	操作 A：電池接続	操作 B：両端切離し
間隔	$1.0\,\mathrm{mm}$	$2.0\,\mathrm{mm}$	$2.0\,\mathrm{mm}$
容量	$177\,\mathrm{pF}$	$88.5\,\mathrm{pF}$	$88.5\,\mathrm{pF}$
電位差	$100\,\mathrm{V}$	$100\,\mathrm{V}$	$200\,\mathrm{V}$
電荷の大きさ	$17.7\,\mathrm{nC}$	$8.85\,\mathrm{nC}$	$17.7\,\mathrm{nC}$
電場の大きさ	$1.00 \times 10^{5}\,\mathrm{V/m}$	$5.00 \times 10^{4}\,\mathrm{V/m}$	$1.00 \times 10^{5}\,\mathrm{V/m}$

同じように間隔を広げても、電池につながっているかどうかで結果が異なる。

この違いは、容量の公式ではなく、**どの物理量が一定に保たれるか**によって決まる。

6. 誘電体の全挿入と電池接続の違い

極板間隔を変える場合と同じように、誘電体を入れる場合も接続条件を確認する必要がある。

ここでは対向面積 S と極板間隔 d を固定し、真空だった極板間を比誘電率 κ の均質な誘電体で隙間なく満たす。

この操作によって、

$$C' = \kappa C$$

となる。

では、電場は必ず小さくなるだろうか。

電池に接続したまま全挿入する場合

電池との接続を維持すれば、極板間の電位差 V は一定である。

極板間隔 d も変わらないため、

$$E = \frac{V}{d}$$

から、中央の電場の大きさは変わらない。

一方、電気容量が κ 倍になるので、$Q = CV$ より極板の自由電荷の大きさも κ 倍になる。

この自由電荷の増加は、電池との電荷のやり取りによって起こる。誘電体を導体とみなして、電荷がその内部を流れたと考える必要はない。

充電後に両端を切り離してから全挿入する場合

両端を切り離し、漏れがなければ極板の自由電荷 Q は一定である。

電気容量が κ 倍になるので、

$$V' = \frac{Q}{\kappa C} = \frac{V}{\kappa}$$

となる。

間隔 d は一定だから、

$$E' = \frac{V'}{d} = \frac{E}{\kappa}$$

となり、中央の電場は小さくなる。

誘電体を入れると電場が必ず小さくなるわけではない

誘電体を入れることで電場が小さくなるという説明は、極板の自由電荷が一定に保たれる場合に当てはまる。

電池につないだままなら、一定に保たれるのは電位差である。極板間隔も同じなら、中央の電場の大きさは変わらない。

何を固定するかを明示せずに、電場の増減を判断してはいけない。

例題 4

例題 2 と同じ真空の平行板コンデンサーを考える。

変更前は、

- 電気容量：$177\,\mathrm{pF}$
- 電位差：$100\,\mathrm{V}$
- 片極板の自由電荷の大きさ：$17.7\,\mathrm{nC}$
- 極板間隔：$1.0\times10^{-3}\,\mathrm{m}$

である。

対向面積と極板間隔を変えず、比誘電率 $\kappa=3.0$ の均質な誘電体を極板間に隙間なく完全に挿入する。

次の 2 つの操作は、それぞれ変更前の同じ状態から独立に行う。端の効果を無視し、状態変化の前後は静電平衡とする。

- 操作 A：電池につないだまま挿入する。
- 操作 B：充電後に両端を電池から切り離し、漏れなく絶縁してから挿入する。

例題 4(1) 誘電体を全挿入した後の電気容量を求めよ。

例題 4(2) 操作 A における変更後の電荷の大きさと電場の大きさを求めよ。

例題 4(3) 操作 B における変更後の電位差と電場の大きさを求めよ。

例題 4(4) 2 つの操作で電場の変化が異なる理由を、一定に保たれる量に着目して説明せよ。

例題 4 の解答・解説

例題 4(1) 誘電体が極板間を完全に満たすため、電気容量は比誘電率 $\kappa=3.0$ 倍になる。

$$\begin{aligned}C' &= 3.0(177\,\mathrm{pF})\\ &= 531\,\mathrm{pF}\end{aligned}$$

したがって、$531\,\mathrm{pF}$ である。

例題 4(2) 操作 A では電池につながっているため、電位差は $100\,\mathrm{V}$ のままである。

新しい電荷の大きさは、

$$\begin{aligned}Q' &= (531\times10^{-12}\,\mathrm{F})(100\,\mathrm{V})\\ &= 53.1\,\mathrm{nC}\end{aligned}$$

となる。

極板間隔は変わらないので、

$$\begin{aligned}E' &= \frac{100\,\mathrm{V}}{1.0\times10^{-3}\,\mathrm{m}}\\ &= 1.00\times10^{5}\,\mathrm{V/m}\end{aligned}$$

である。

電荷の大きさは 3 倍になるが、電場の大きさは変わらない。

例題 4(3) 操作 B では電池から両端を切り離しているので、片極板の自由電荷の大きさは $17.7\,\mathrm{nC}$ のままである。

電気容量が 531 pF に増加するため、

$$V' = \frac{17.7 \times 10^{-9}\,\mathrm{C}}{531 \times 10^{-12}\,\mathrm{F}} = \frac{100}{3}\,\mathrm{V}$$

となる。

中央の電場の大きさは、

$$E' = \frac{\left(\frac{100}{3}\right)\mathrm{V}}{1.0 \times 10^{-3}\,\mathrm{m}} = \frac{1.00 \times 10^{5}}{3}\,\mathrm{V/m}$$

である。

電位差と電場は、どちらも変更前の $\frac{1}{3}$ になる。

例題 4(4) 操作 A では電池によって電位差が一定に保たれる。極板間隔も同じなので $E = \frac{V}{d}$ により電場の大きさは変わらず、容量の増加に応じて電池から自由電荷が供給される。

操作 B では電池から切り離しているため自由電荷が一定である。容量の増加により電位差が減少し、極板間隔は同じなので電場も減少する。

両操作の結果は次のように整理できる。

物理量	変更前	操作 A：電池接続	操作 B：両端切離し
比誘電率	1	3.0	3.0
電気容量	177 pF	531 pF	531 pF
電位差	100 V	100 V	$\left(\frac{100}{3}\right)$ V
電荷の大きさ	17.7 nC	53.1 nC	17.7 nC
電場の大きさ	1.00×10^{5} V/m	1.00×10^{5} V/m	$\left(1.00 \times \frac{10^{5}}{3}\right)$ V/m

誘電体による容量の増加は共通している。しかし、電池との接続条件が違うため、自由電荷や電場の変化は同じにならない。

7. 電荷–電位差グラフから容量を読む

電荷が比例して増えることをグラフで確かめる

構造と媒質を一定に保ったコンデンサーでは、

$$Q = CV$$

である。

これは、横軸に電位差 V、縦軸に電荷の大きさ Q を取ると、原点を通る直線の関係になることを意味する。

直線の傾きは、

$$\frac{\Delta Q}{\Delta V}$$

であり、これが電気容量 C に等しい。

したがって、電荷–電位差グラフでは、直線の傾きが大きいほど電気容量が大きい。

例題 5

同じ構造・媒質のコンデンサーについて、電位差と片極板の自由電荷の大きさを調べたところ、次の値が得られた。

電位差 V	電荷の大きさ Q
$2.0\,\mathrm{V}$	$6.0\,\mu\mathrm{C}$
$4.0\,\mathrm{V}$	$12\,\mu\mathrm{C}$
$6.0\,\mathrm{V}$	$18\,\mu\mathrm{C}$

このコンデンサーでは $Q = CV$ が成り立つものとする。

例題 5(1) 横軸を電位差、縦軸を電荷の大きさとしたとき、グラフはどのような形になるか。原点と表の 3 点を用いて説明せよ。

例題 5(2) グラフの傾きから電気容量を求めよ。

例題 5(3) 電位差を $0\,\mathrm{V}$ にしたときの電荷の大きさと電気容量を答え、その理由を説明せよ。

例題 5 の解答・解説

例題 5(1) 横軸に電位差 V（単位 V）、縦軸に片極板の電荷の大きさ Q（単位 μC）を取る。

表のデータは、

- A：$(2.0\,\mathrm{V},\,6.0\,\mu\mathrm{C})$
- B：$(4.0\,\mathrm{V},\,12\,\mu\mathrm{C})$
- C：$(6.0\,\mathrm{V},\,18\,\mu\mathrm{C})$

である。

電荷が電位差に比例するため、これらは原点 O と同じ直線上に並ぶ。

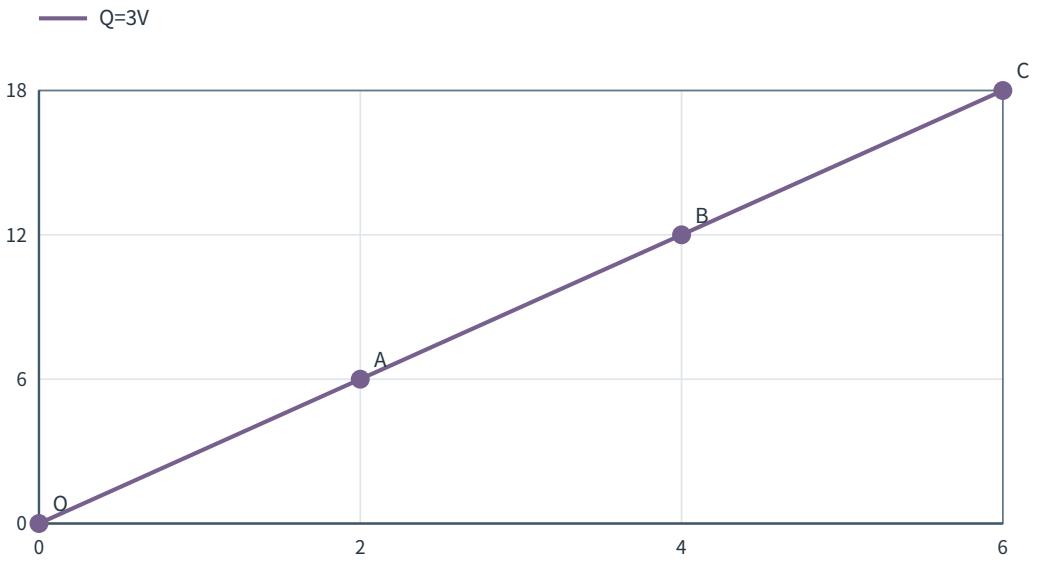

図 7　横軸 V（V）、縦軸 Q（μC）。傾きは容量 3μF。

図の横軸の数値 x は電位差を V 単位で表したもの、縦軸の数値 y は電荷を μC 単位で表したものである。

原点 $O=(0,0)$ から 3 点 A,B,C まで、すべて 1 本の直線でつながる。

例題 5(2) グラフの傾きは、縦の増加量を横の増加量で割ることで求められる。

例えば原点と点 A を使うと、

$$\begin{aligned} C &= \frac{\Delta Q}{\Delta V} \\ &= \frac{6.0\,\mu\mathrm{C}}{2.0\,\mathrm{V}} \\ &= 3.0\,\mu\mathrm{F} \end{aligned}$$

となる。

答えは $3.0\,\mu\mathrm{F}$ である。

このグラフの凡例にある $Q=3V$ は、横軸を V、縦軸を μC で表したときの数値関係である。物理量の式としては $Q=(3.0\,\mu\mathrm{F})V$ に対応する。

例題 5(3) $V=0\,\mathrm{V}$ では、$Q=CV$ により $Q=0\,\mu\mathrm{C}$ となる。

しかし電気容量は構造と媒質で決まるので、同じコンデンサーなら $3.0\,\mu\mathrm{F}$ のままである。

原点で電荷と電位差がともに 0 になっても、グラフの傾きが 0 になるわけではない。

電気容量を決めるのは、原点での $\frac{Q}{V}$ という割り算ではなく、直線全体の比例関係である。

演習問題

演習 1

電気容量 $2.4\,\mu\mathrm{F}$ のコンデンサーを、正極板の電位が負極板より $5.0\,\mathrm{V}$ 高くなるように充電した。

演習 1(1) 片極板に蓄えられる自由電荷の大きさを求めよ。

演習 1(2) 両極板の自由電荷をそれぞれ符号付きで示し、2 枚の電荷の代数和を求めよ。

演習 1(3) 構造と媒質を変えずに電位差を $0\,\mathrm{V}$ にした。このとき、電気容量も $0\,\mathrm{F}$ になるという考えは正しいか。理由とともに答えよ。

対応解説：巻末「演習 1 の解答・解説」を参照。

演習 2

真空中の平行板コンデンサーについて、対向面積 $S=4.0\times10^{-2}\,\mathrm{m}^2$、極板間隔 $d=2.0\times10^{-3}\,\mathrm{m}$ である。

極板を $150\,\mathrm{V}$ の理想電池につなぎ、静電平衡に達したものとする。端の効果を無視でき、真空の誘電率を $\varepsilon_0=8.85\times10^{-12}\,\mathrm{F/m}$ とする。

演習 2(1) 電気容量を pF で求めよ。

演習 2(2) 片極板の自由電荷の大きさを nC で求めよ。

演習 2(3) 極板間中央の電場の大きさを求めよ。

対応解説：巻末「演習 2 の解答・解説」を参照。

演習 3

真空中の平行板コンデンサーを理想電池につないでいる。

初めの電気容量は 90 pF、電位差は 12 V、極板間隔は 3.0×10^{-3} m である。

電池との接続を維持したまま、極板の対向面積だけを 2 倍に増やした。極板の間隔と媒質は変わらず、前後とも端の効果を無視できる静電平衡にあるものとする。

演習 3(1) 変更後の電気容量を求めよ。

演習 3(2) 変更前と変更後の電荷の大きさを、それぞれ nC で求めよ。

演習 3(3) 変更前と変更後の中央の電場の大きさを比較し、変わるかどうかを理由とともに説明せよ。

対応解説：巻末「演習 3 の解答・解説」を参照。

演習 4

真空中にある平行板コンデンサーの電気容量は 60 pF、極板間隔は 1.5×10^{-3} m である。

初めは 90 V の理想電池につながれ、静電平衡にある。

対向面積と媒質を変えず、極板間隔だけをゆっくり 2 倍に広げる操作を考える。端の効果は無視できるものとする。

次の操作 A・操作 B は、同じ初期状態から独立に行う。

- 操作 A：電池につないだまま広げる。
- 操作 B：充電後に電池から両端を切り離し、電荷の漏れがない状態で広げる。

演習 4(1) 間隔を 2 倍にした後の電気容量を求めよ。

演習 4(2) 操作 A で、変更後の電位差・電荷の大きさ・電場の大きさを求めよ。

演習 4(3) 操作 B で、変更後の電位差・電荷の大きさ・電場の大きさを求めよ。

演習 4(4) 操作 A と操作 B で、変更後の電場の大きさが異なる理由を説明せよ。

対応解説：巻末「演習 4 の解答・解説」を参照。

©ミライコーチング

演習 5

真空中の平行板コンデンサーの電気容量は $120\,\mathrm{pF}$、極板間隔は $1.0\times10^{-3}\,\mathrm{m}$ である。

初めは $30\,\mathrm{V}$ の理想電池につながれ、静電平衡にある。

対向面積・極板間隔を変えずに、比誘電率 $\kappa=2.5$ の均質な誘電体を極板間に隙間なく完全に挿入する。

次の操作 A・操作 B は、同じ初期状態から独立に行う。極板間は理想的に絶縁され、端の効果は無視できるものとする。

- 操作 A：電池につないだまま挿入する。
- 操作 B：充電後に電池から両端を切り離し、漏れなく絶縁してから挿入する。

演習 5(1) 誘電体を挿入した後の電気容量を求めよ。

演習 5(2) 操作 A で、変更後の電位差・電荷の大きさ・電場の大きさを求めよ。

演習 5(3) 操作 B で、変更後の電位差・電荷の大きさ・電場の大きさを求めよ。

演習 5(4) 「誘電体を入れると電場は必ず弱くなる」という説明は正しいか。操作 A・操作 B を比較して答えよ。

対応解説：巻末「演習 5 の解答・解説」を参照。

演習 6

構造と媒質を一定に保ったコンデンサーについて、次の電位差と片極板の自由電荷の大きさの組が得られた。

電位差 V	電荷の大きさ Q
$1.0\,\mathrm{V}$	$4.0\,\mu\mathrm{C}$
$3.0\,\mathrm{V}$	$12\,\mu\mathrm{C}$
$5.0\,\mathrm{V}$	$20\,\mu\mathrm{C}$

このコンデンサーは $Q=CV$ に従うものとする。

演習 6(1) 横軸を V、縦軸を Q としたグラフについて、表の 3 点と原点の位置関係を説明せよ。

演習 6(2) グラフの傾きに対応する電気容量を求めよ。

演習 6(3) 電位差を $6.0\,\mathrm{V}$ にしたときの電荷の大きさを求めよ。

演習 6(4) 電位差を $0\,\mathrm{V}$ にしたときの電荷と電気容量を答え、2 つの量が同じようには変化しない理由を説明せよ。

対応解説：巻末「演習 6 の解答・解説」を参照。

演習問題の解答・解説

演習 1 の解答・解説

演習 1(1) 電気容量と電位差の関係 $Q = CV$ より、

$$Q = (2.4\,\mu\mathrm{F})(5.0\,\mathrm{V})$$
$$= 12\,\mu\mathrm{C}$$

したがって、片極板の自由電荷の大きさは $12\,\mu\mathrm{C}$ である。

演習 1(2) 正極板の自由電荷は $+12\,\mu\mathrm{C}$、負極板は $-12\,\mu\mathrm{C}$ である。

代数和は、

$$(+12\,\mu\mathrm{C}) + (-12\,\mu\mathrm{C}) = 0\,\mu\mathrm{C}$$

となる。

コンデンサーの電荷 Q は片極板の電荷の大きさであり、2 枚の電荷の和を指すわけではない。

演習 1(3) 正しくない。

構造と媒質を変えなければ、電気容量は $2.4\,\mu\mathrm{F}$ のままである。

電位差が $0\,\mathrm{V}$ のときは $Q = CV$ によって $Q = 0$ となるが、電気容量が 0 になるわけではない。

この状態では $\frac{Q}{V}$ は $\frac{0}{0}$ となり計算できない。電気容量は、同じ構造での Q と V の比例係数として決まる。

演習 2 の解答・解説

演習 2(1) 真空の平行板コンデンサーなので、

$$C = \varepsilon_0 \frac{S}{d}$$

を使う。

$$\begin{aligned} C &= (8.85 \times 10^{-12}\,\mathrm{F/m}) \frac{4.0 \times 10^{-2}\,\mathrm{m}^2}{2.0 \times 10^{-3}\,\mathrm{m}} \\ &= 1.77 \times 10^{-10}\,\mathrm{F} \\ &= 177\,\mathrm{pF} \end{aligned}$$

答えは 177 pF である。

演習 2(2) 電荷の大きさは $Q = CV$ から、

$$\begin{aligned} Q &= (1.77 \times 10^{-10}\,\mathrm{F})(150\,\mathrm{V}) \\ &= 2.655 \times 10^{-8}\,\mathrm{C} \\ &= 26.55\,\mathrm{nC} \end{aligned}$$

となる。

したがって、26.55 nC である。有効数字 3 桁で表せば 26.6 nC となる。

演習 2(3) 極板間中央の一様電場では、$E = \frac{V}{d}$ が成り立つ。

$$\begin{aligned} E &= \frac{150\,\mathrm{V}}{2.0 \times 10^{-3}\,\mathrm{m}} \\ &= 7.50 \times 10^{4}\,\mathrm{V/m} \end{aligned}$$

よって、電場の大きさは $7.50 \times 10^4\,\mathrm{V/m}$ である。

この電場は正極板から負極板へ向かう。端付近の電場まで一様とする計算ではない。

演習 3 の解答・解説

演習 3(1) 極板の対向面積だけが 2 倍になる。真空の平行板では $C = \varepsilon_0 \frac{S}{d}$ なので、電気容量も 2 倍になる。

$$\begin{aligned} C' &= 2(90\,\mathrm{pF}) \\ &= 180\,\mathrm{pF} \end{aligned}$$

答えは 180 pF である。

演習 3(2) 電池につないだままなので、電位差は 12 V に保たれる。

変更前の電荷の大きさは、

$$\begin{aligned} Q &= (90 \times 10^{-12}\,\mathrm{F})(12\,\mathrm{V}) \\ &= 1.08\,\mathrm{nC} \end{aligned}$$

である。

変更後は、

$$\begin{aligned} Q' &= (180 \times 10^{-12}\,\mathrm{F})(12\,\mathrm{V}) \\ &= 2.16\,\mathrm{nC} \end{aligned}$$

となる。

答えは、変更前が 1.08 nC、変更後が 2.16 nC である。

演習 3(3) 電位差と極板間隔のどちらも変わっていないので、電場の大きさは変わらない。

変更前後とも、

$$\begin{aligned} E &= \frac{12\,\mathrm{V}}{3.0 \times 10^{-3}\,\mathrm{m}} \\ &= 4.0 \times 10^{3}\,\mathrm{V/m} \end{aligned}$$

である。

面積が 2 倍になって容量と電荷の大きさが増えても、電池につながったままなら電位差は一定である。間隔も一定なので、電場の大きさは $4.0 \times 10^{3}\,\mathrm{V/m}$ **のまま** となる。

演習 4 の解答・解説

演習 4(1) 対向面積と媒質が同じで極板間隔だけが 2 倍になるので、電気容量は半分になる。

$$\begin{aligned} C' &= \frac{60\,\mathrm{pF}}{2} \\ &= 30\,\mathrm{pF} \end{aligned}$$

答えは 30 pF である。

演習 4(2) 操作 A では電池につながっているので、電位差は 90 V に保たれる。

変更後の電荷の大きさは、

$$\begin{aligned} Q' &= (30\times10^{-12}\,\mathrm{F})(90\,\mathrm{V}) \\ &= 2.7\,\mathrm{nC} \end{aligned}$$

となる。

変更後の極板間隔は、

$$d' = 2\bigl(1.5\times10^{-3}\,\mathrm{m}\bigr) = 3.0\times10^{-3}\,\mathrm{m}$$

である。

したがって、中央の電場の大きさは、

$$\begin{aligned} E' &= \frac{90\,\mathrm{V}}{3.0\times10^{-3}\,\mathrm{m}} \\ &= 3.0\times10^{4}\,\mathrm{V/m} \end{aligned}$$

である。

操作 A の答えは、

- 電位差：$90\,\mathrm{V}$
- 電荷の大きさ：$2.7\,\mathrm{nC}$
- 電場の大きさ：$3.0\times10^{4}\,\mathrm{V/m}$

となる。

演習 4(3) 操作 B では両端を切り離し、漏れがないので、極板の自由電荷が保存される。

まず変更前の電荷の大きさは、

$$\begin{aligned} Q &= (60\times10^{-12}\,\mathrm{F})(90\,\mathrm{V}) \\ &= 5.4\,\mathrm{nC} \end{aligned}$$

である。

これが一定なので、変更後の電位差は、

$$\begin{aligned} V' &= \frac{5.4\times10^{-9}\,\mathrm{C}}{30\times10^{-12}\,\mathrm{F}} \\ &= 180\,\mathrm{V} \end{aligned}$$

となる。

中央の電場の大きさは、

$$\begin{aligned} E' &= \frac{180\,\mathrm{V}}{3.0\times10^{-3}\,\mathrm{m}} \\ &= 6.0\times10^{4}\,\mathrm{V/m} \end{aligned}$$

である。

操作 B の答えは、

- 電位差：$180\,\mathrm{V}$
- 電荷の大きさ：$5.4\,\mathrm{nC}$
- 電場の大きさ：$6.0\times10^{4}\,\mathrm{V/m}$

となる。

演習 4(4) 操作 A では電池につながっているため、電位差が一定である。極板間隔が 2 倍になるので、$E = \frac{V}{d}$ により電場の大きさは半分になる。

操作 B では電池から切り離され、自由電荷が一定である。電気容量が半分になるため、電位差は 2 倍になる。極板間隔も 2 倍なので $\frac{V}{d}$ は変わらず、電場の大きさは一定である。

物理量	初めの状態	操作 A	操作 B
電気容量	$60\,\mathrm{pF}$	$30\,\mathrm{pF}$	$30\,\mathrm{pF}$
電位差	$90\,\mathrm{V}$	$90\,\mathrm{V}$	$180\,\mathrm{V}$
電荷の大きさ	$5.4\,\mathrm{nC}$	$2.7\,\mathrm{nC}$	$5.4\,\mathrm{nC}$
電場の大きさ	$6.0\times10^{4}\,\mathrm{V/m}$	$3.0\times10^{4}\,\mathrm{V/m}$	$6.0\times10^{4}\,\mathrm{V/m}$

同じ間隔変更でも、一定に保たれる量が違うことが、電場の変化の違いを生む。

演習 5 の解答・解説

演習 5(1) 比誘電率 $\kappa = 2.5$ の均質な誘電体が極板間を隙間なく満たすため、電気容量は真空の場合の 2.5 倍になる。

$$\begin{aligned} C' &= 2.5(120\,\mathrm{pF}) \\ &= 300\,\mathrm{pF} \end{aligned}$$

したがって、$300\,\mathrm{pF}$ である。

演習 5(2) 操作 A は電池につながったままなので、電位差は $30\,\mathrm{V}$ のままである。

電荷の大きさは、

$$\begin{aligned} Q' &= \left(300\times10^{-12}\,\mathrm{F}\right)(30\,\mathrm{V}) \\ &= 9.0\,\mathrm{nC} \end{aligned}$$

となる。

極板間隔が変わらないため、中央の電場の大きさは、

$$\begin{aligned} E' &= \frac{30\,\mathrm{V}}{1.0\times10^{-3}\,\mathrm{m}} \\ &= 3.0\times10^{4}\,\mathrm{V/m} \end{aligned}$$

となる。

操作 A では、

- 電位差：$30\,\mathrm{V}$
- 電荷の大きさ：$9.0\,\mathrm{nC}$
- 電場の大きさ：$3.0\times10^{4}\,\mathrm{V/m}$

である。

演習 5(3) 操作 B では、両端を電池から切り離して漏れなく絶縁しているため、極板の自由電荷が保存される。

初めの電荷の大きさは、

$$\begin{aligned} Q &= (120 \times 10^{-12}\,\mathrm{F})(30\,\mathrm{V}) \\ &= 3.6\,\mathrm{nC} \end{aligned}$$

である。

この値が変わらないので、変更後の電位差は、

$$\begin{aligned} V' &= \frac{3.6 \times 10^{-9}\,\mathrm{C}}{300 \times 10^{-12}\,\mathrm{F}} \\ &= 12\,\mathrm{V} \end{aligned}$$

となる。

中央の電場の大きさは、

$$\begin{aligned} E' &= \frac{12\,\mathrm{V}}{1.0 \times 10^{-3}\,\mathrm{m}} \\ &= 1.2 \times 10^{4}\,\mathrm{V/m} \end{aligned}$$

となる。

操作 B では、

- 電位差：$12\,\mathrm{V}$
- 電荷の大きさ：$3.6\,\mathrm{nC}$
- 電場の大きさ：$1.2 \times 10^{4}\,\mathrm{V/m}$

である。

演習 5(4)「必ず弱くなる」という説明は正しくない。

操作 A では、電池が電位差を一定に保つ。極板間隔も一定なので、電場の大きさは変わらない。

操作 B では、極板の自由電荷が一定である。容量が 2.5 倍になったため、電位差と電場の大きさはそれぞれ $\frac{1}{2.5}$ 倍になる。

比較すると、次のようになる。

物理量	初めの状態	操作 A	操作 B
電気容量	$120\,\mathrm{pF}$	$300\,\mathrm{pF}$	$300\,\mathrm{pF}$
電位差	$30\,\mathrm{V}$	$30\,\mathrm{V}$	$12\,\mathrm{V}$
電荷の大きさ	$3.6\,\mathrm{nC}$	$9.0\,\mathrm{nC}$	$3.6\,\mathrm{nC}$
電場の大きさ	$3.0 \times 10^{4}\,\mathrm{V/m}$	$3.0 \times 10^{4}\,\mathrm{V/m}$	$1.2 \times 10^{4}\,\mathrm{V/m}$

誘電体を入れると容量は増えるが、電荷や電場の変化は接続条件によって異なる。

誘電体を金属の導体と同じものとして考えるのではなく、容量を変える媒質として扱うことが重要である。

演習 6 の解答・解説

演習 6(1) 横軸は電位差 V（単位 V）、縦軸は電荷の大きさ Q（単位 μC）である。

表の 3 点は、

- $(1.0\,\mathrm{V}, 4.0\,\mu\mathrm{C})$
- $(3.0\,\mathrm{V}, 12\,\mu\mathrm{C})$
- $(5.0\,\mathrm{V}, 20\,\mu\mathrm{C})$

となる。

いずれも $\frac{Q}{V}$ が同じであり、$Q = CV$ に従うため、原点 $(0, 0)$ と表の 3 点は、右上がりの 1 本の直線上に並ぶ。

演習 6(2) グラフの傾きが電気容量に等しい。

例えば原点と最初の点を使うと、

$$\begin{aligned} C &= \frac{\Delta Q}{\Delta V} \\ &= \frac{4.0\,\mu\mathrm{C}}{1.0\,\mathrm{V}} \\ &= 4.0\,\mu\mathrm{F} \end{aligned}$$

となる。

よって、電気容量は $4.0\,\mu\mathrm{F}$ である。

演習 6(3) 構造と媒質が同じなので電気容量は変わらない。

$$\begin{aligned} Q &= (4.0\,\mu\mathrm{F})(6.0\,\mathrm{V}) \\ &= 24\,\mu\mathrm{C} \end{aligned}$$

答えは $24\,\mu\mathrm{C}$ である。

演習 6(4) 電位差が $0\,\mathrm{V}$ になると、$Q = CV$ より電荷の大きさは $0\,\mu\mathrm{C}$ となる。

しかし、構造と媒質は変わっていないため、電気容量は $4.0\,\mu\mathrm{F}$ のままである。

電荷は電位差に比例して変わる量である。一方、電気容量はその比例関係を決める係数なので、電位差が 0 になっても変わらない。

この違いは、グラフが原点を通っていても、直線の傾きは $4.0\,\mu\mathrm{F}$ のままであることからも分かる。