

安全 静電気は、瞬間的に高電圧を放電する現象から人に不快感を与えることが多い。また、静電気は電子部品の内部破壊や電子機器の誤作動の原因ともなるので注意する。

静電気は、その吸引力や反発力の性質を利用し、身近な工業製品や設備などに利用されている。ここでは、静電気の性質について学ぶ。

1 帯電と電荷

図1のように、ガラス棒を絹の布で摩擦すると、ガラス棒は、電気を帯びて紙片などを吸いつける。このように電気を帯びることを**帯電**（たいでん）とい、帯電した物体を帯電体という。

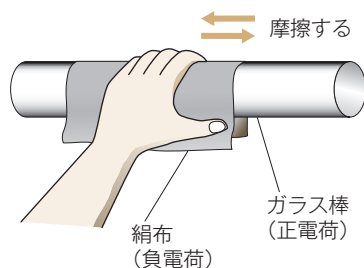


図1 帯電現象

帯電体が絶縁されていれば、電荷（蓄えられた電気）は移動しない。このような移動しない電気を**静電気**（じでんき）という。

異なる物体を摩擦すると、一方の物体は正に、他方の物体は負に帯電する^②。このように、電荷には正負の2種類があり、同種の電荷は反発し合い、異種の電荷は吸引し合う。このように電荷の間に働く力を**静電力**（じでんりき）という。

1 静電気に関するクーロンの法則

図2のように、二つの点電荷^③ Q_1 、 Q_2 [C]を、距離 r [m]だけ離して置いた

とき、二つの点電荷の間に働く静電力は、二つの点電荷の積に比例し、距離の2乗に反比例する。これを**静電気に関するクーロンの法則**という。静電気に関するクーロンの法則は式(1)で表される。

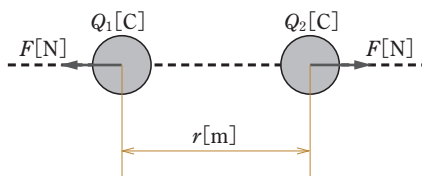


図2 静電気に関するクーロンの法則

● 静電気に関するクーロンの法則

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \text{ [N]} \quad (1)$$

Q [C]を正電荷のとき正、負電荷のとき負で表せば、静電力 F [N]は、計算結果が正のとき反発力、負のとき吸引力となる。

① static electricity

② 次の物体を摩擦すると、左側の物体はプラス、右側の物体はマイナスとなる。

+	毛皮	フセ	セガ	紙	絹	金	ゴ	硫	セ
	ラ	ラ	ラ	ラ	ム	属	ム	黄	ル
	ン	ミ	ス						ロ
	ネ	ッ							イ
	ル	ク							ド
	ス								

③ electrostatic force

電気集じん装置や静電塗装などは、この静電力を利用している。

④ 帯電した物体の大きさが物体間の距離に比べてじゅうぶん小さいときには、物体の大きさを見捨てて電荷は1点に集まっているとみなすことができる。この電荷を点電荷という。

なお k は比例定数であり、真空の場合には $k = 9 \times 10^9$ ^①となる。
したがって、真空中の静電力の大きさ F [N]は、次の式(2)で表される。

●真空中の静電力
の大きさ

$$F = 9 \times 10^9 \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \text{ [N]} \quad (2)^{\text{②}}$$

① $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \times 10^9$
 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$
 ϵ_0 は真空の誘電率を表す。

② 空気中では、真空中とほぼ同じと考えてよい。

2 静電誘導

図3のように、絶縁された導体Bに、正に帯電した導体Aを近づけると、導体BのAに近い側に負、遠い側に正の電荷が現れる。これはBに一樣に分布していた正・負の電荷がAの電荷によって吸引または反発され、それぞれ両端に移動したため、このような現象を静電誘導^③という。

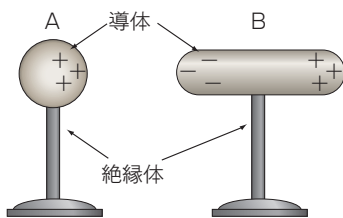


図3 静電誘導

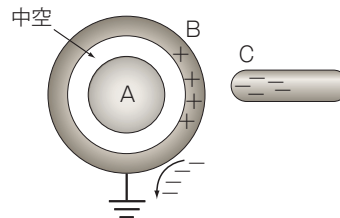


図4 静電遮へい

図4のように、導体Aを接地した中空導体Bで包むと中空内の導体Aは、負の帯電体Cの影響を受けることはないで、静電気は発生しない。これを静電遮へい^④という。

③ electrostatic induction

④ electrostatic shielding



column

雷の発生

雷は静電誘導によって生じる静電気の放電現象である。たとえば、雲Aの中に負の電荷が生じると、他の雲Bや大地に静電誘導によって正の電荷が発生する。このため雲Aと雲B、あるいは雲Aと大地の異種の電荷の間で吸引力が働き、その結果、空気中あるいは雷雲と大地の間で静電気が放電する。このとき強い光と音、つまり雷光と雷鳴が発生するのである。

高い建築物などを落雷から守るために、先端のとがった導体を屋上に設け、それを接地する。この先端のとがった導体を避雷針という。

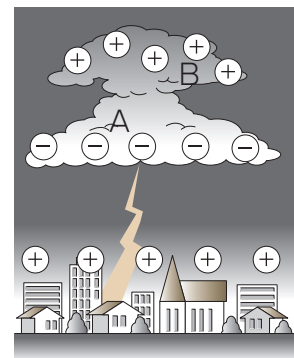


図5

2 静電容量

1 コンデンサ

図6のように、金属板を電極として平行に置き、その間に誘電体（絶縁体）を挿入したものを**コンデンサ^①**という。コンデンサは電荷を蓄える働きがあり、コンピュータやテレビジョン受信機などの回路を構成する重要な素子である。

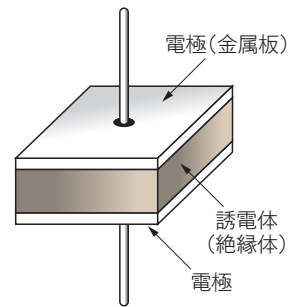


図6 コンデンサ

2 コンデンサの充電と放電

抵抗とコンデンサの直列回路について調べてみよう。

図7(a)の回路で、スイッチ S_1 を閉じ、電圧 $V[V]$ を加える。ab間には誘電体があるため、電流は流れないはずであるが、コンデンサに電荷が蓄えられるため、電流計の指針が振れ、瞬間的に電流が流れたことがわかる。この電流 $i[A]$ の大きさは、時間とともにしだいに減少し、ついには0となる。

また、コンデンサの両端の電圧 $v_c[V]$ は、0からしだいに増加し、電源電圧 $V[V]$ に近づく。

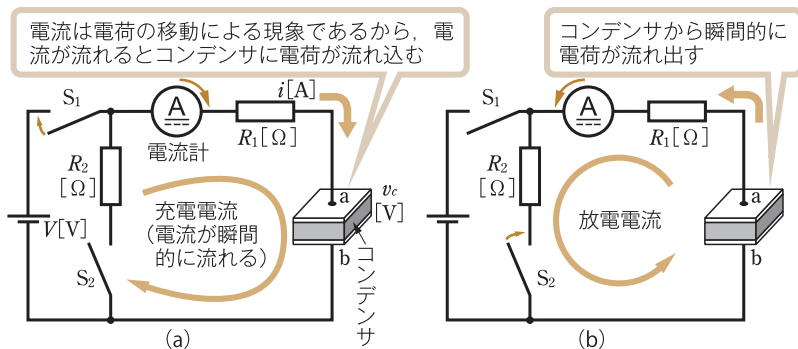


図7 充電と放電

次に、図(b)のように、スイッチ S_1 を開いて S_2 を閉じると、前と逆向きの電流が流れる。

このように、電圧を加えることによって、コンデンサに電荷を蓄えることを**充電^②**、蓄えられた電荷を放出することを**放電^③**という。

3 コンデンサに蓄えられる電荷

コンデンサに蓄えられる電荷 $Q[C]$ は、加える電圧 $V[V]$ に比例する。このとき比例定数を C で表し、これを**静電容量**という。静電容量の単位は

① capacitor

② charge
③ discharge

ファラド(単位記号F)を用いる。1Fは1Vの電圧を加えたとき、1Cの電荷が蓄えられる静電容量である。

実際には1Fという単位は大きいため、 $1\mu\text{F}=10^{-6}\text{F}$ 、 $1\text{pF}=10^{-12}\text{F}$ などが用いられる。

5 コンデンサに蓄えられる電荷は、式(3)で表される。

$$\text{●コンデンサに蓄えられる電荷} \quad Q = CV [\text{C}] \quad (3)$$

例題1 コンデンサに10Vの電圧を加えたとき、 $2 \times 10^{-6}\text{C}$ の電荷が蓄えられた。このコンデンサの静電容量はいくらか。

解答… 式(3)に、 $Q = 2 \times 10^{-6}\text{C}$ 、 $V = 10\text{V}$ を代入する。

10
$$C = \frac{2 \times 10^{-6}}{10} = 0.2 \times 10^{-6}\text{F} = 0.2\mu\text{F}$$

問1 $10\mu\text{F}$ のコンデンサに、20Vの電圧を加えたとき、コンデンサに蓄えられた電荷を求めよ。

4 コンデンサの静電容量

図8で、電極の面積を $A[\text{m}^2]$ 、電極間の距離を $l[\text{m}]$ 、誘電体の誘電率^{イブシロン}を ε

15 とすると、このコンデンサの静電容量 $C[\text{F}]$ は、次の式(4)で表される。

$$\text{●コンデンサの静電容量} \quad C = \varepsilon \frac{A}{l} [\text{F}] \quad (4)$$

ε と真空の誘電率 ε_0 の比を比誘電率といい、 ε_r とする。比誘電率 ε_r は次の式(5)で表される。なお、表1に比誘電率の例を示す。

$$\text{●比誘電率} \quad \varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (5)$$

20 したがって式(4)は、次の式(6)で表される。

$$C = \varepsilon \frac{A}{l} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{l} = 8.85 \times 10^{-12} \varepsilon_r \frac{A}{l} [\text{F}] \quad (6)$$

問2 電極の面積が 1cm^2 、電極間の距離が 0.5mm の平行板コンデンサの静電容量を求めよ。なお、誘電率は真空の誘電率 ε_0 とする。

① 誘電率 ε は、電荷の蓄えやすさを示す数値で材質により違う。真空の誘電率は、 $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}\text{F/m}$ である。

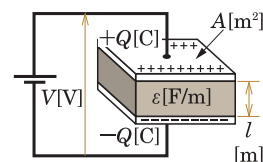


図8

表1 比誘電率の例

材 料	比誘電率 ε_r
パラフィン	2.1~2.5
ガラス	5.4~9.9
雲母	2.5~6.6
紙	2.0~2.6
陶器	5.7~6.8
木材	2.5~7.7
エポナイト	2.8
セレン	6.1~7.4
ゴム	2.0~3.5
水	81
酸化チタン	83~183
硫黄	3.6~4.2

(電気学会編「電気工学ハンドブック 新版(1988年)」による)

3 コンデンサの接続

1 コンデンサの 並列接続

図9(a)のように、静電容量がそれぞれ C_1, C_2, C_3 [F] のコンデンサを並列に接続した場合について考えてみよう。

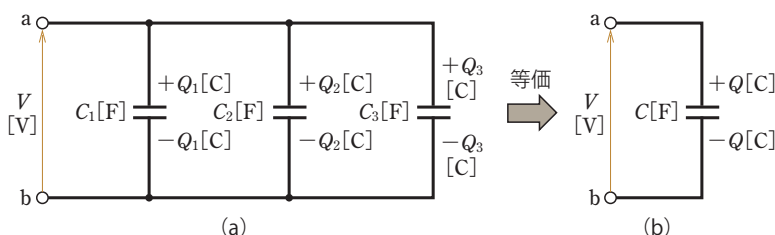


図9 コンデンサの並列接続

図(a)の回路の全体としての静電容量を、図(b)のように一つの静電容量 C [F] で表したとき、この C を**合成静電容量^①**という。この場合の合成静電容量 C [F] を求めてみよう。

端子 a, b 間に電圧 V [V] を加えたとき、各コンデンサに Q_1, Q_2, Q_3 [C] の電荷が蓄えられたとすると、次の式がなりたつ。

$$Q_1 = C_1 V, \quad Q_2 = C_2 V, \quad Q_3 = C_3 V \quad (7)$$

また、端子 a, b からみた全電荷 Q [C] は、 Q_1, Q_2, Q_3 [C] の和であるから、次の式がなりたつ。

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = (C_1 + C_2 + C_3) V \quad (8)$$

したがって、図(b)から合成静電容量 C [F] は、次の式(9)で表される。

●並列接続の合成静電容量
$$C = \frac{Q}{V} = C_1 + C_2 + C_3 \text{ [F]} \quad (9)$$

すなわち、コンデンサの並列接続回路の合成静電容量は、各静電容量の和に等しい。

一般に、 n 個のコンデンサを図10のように並列に接続したときの合成静電容量 C は、次の式(10)で表される。

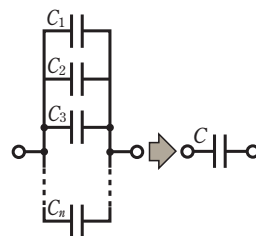


図10

●並列接続の合成静電容量
$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \cdots + C_n \text{ [F]} \quad (10)$$

① combined (electrostatic) capacity

例題 2 $0.1\mu\text{F}$, $0.2\mu\text{F}$, $0.3\mu\text{F}$ のコンデンサを並列に接続したときの合成静電容量はいくらか。

解答… 式(9)から, $C = 0.1 + 0.2 + 0.3 = 0.6\mu\text{F}$

問 3 $2\mu\text{F}$, $3\mu\text{F}$, $4\mu\text{F}$ のコンデンサを並列に接続して, 100V の電圧を加えた。各コンデンサの電荷および合成静電容量はいくらか。

2 コンデンサの直列接続

図 11(a) のように, 静電容量が, それぞれ C_1 , C_2 , C_3 [F] のコンデンサを直列に接続した場合の合成静電容量 C [F] を求めよう。

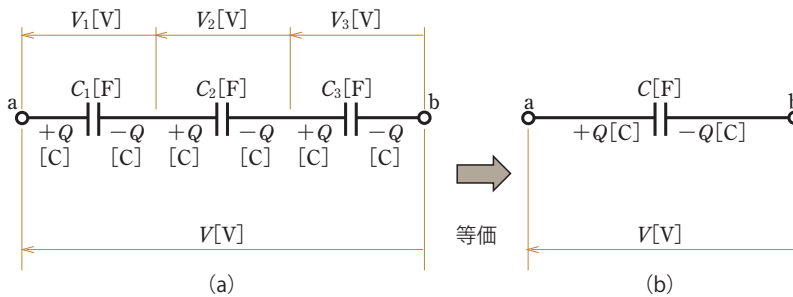


図 11 コンデンサの直列接続

端子 a, b 間に電圧 V [V] を加えたとき, 端子に直接つながっている電極板に $\pm Q$ [C] の電荷が生じたとする。中間の電極板には, 静電誘導によって, 図(a)のように, それぞれ $+Q$ [C] と $-Q$ [C] の電荷が現れる。

このとき, 各コンデンサに加わる電圧を, V_1 , V_2 , V_3 [V] とすると, 式(3)から, 次の式がなりたつ。

$$V_1 = \frac{Q}{C_1}, \quad V_2 = \frac{Q}{C_2}, \quad V_3 = \frac{Q}{C_3} \quad [\text{V}] \quad (11)$$

この電圧 V_1 , V_2 , V_3 [V] の和は, 電源電圧 V [V] に等しいから, 次の関係がなりたつ。

$$V = V_1 + V_2 + V_3 = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3} = Q \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right) \quad [\text{V}] \quad (12)$$

したがって, 図(b)から合成静電容量 C [F] は, 次の式(13)で表される。

●直列接続の合成静電容量

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}} \quad [\text{F}] \quad (13)$$

例題3 1 μF, 4 μF, 8 μFのコンデンサを直列に接続したときの合成静電容量はいくらか。

解答… 式(13)から, 合成静電容量 C [μF] は,

$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}} = \frac{1}{\frac{1}{1} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8}} = \frac{8}{11} = 0.727 \mu\text{F}$$

一般に, n 個のコンデンサを図12のように直列に接続したときの合成静電容量 C は, 次の式(14)で表すことができる。

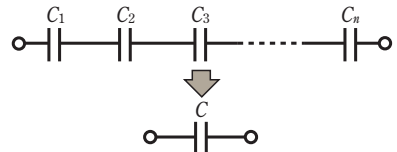


図12 コンデンサの合成静電容量

●直列接続の合成静電容量

$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}} \quad [\text{F}] \quad (14)$$

問4 2 μF, 3 μF, 6 μFのコンデンサを直列に接続して, 30Vの電圧を加えたときの合成静電容量と, 各コンデンサの両端の電圧を求めよ。

4 いろいろなコンデンサ

1 コンデンサの種類

電極の間に挿入した誘電体の種類によって, 空気コンデンサ・マイカコンデンサ・紙コンデンサ・電解コンデンサなどのいろいろなコンデンサがある。

図13は平行板コンデンサの構造である。小形で静電容量の大きなコンデンサをつくるためには, 電極の対向面積を大きくしたり, 間隔を小さくして, いろいろな形がくふうされている。たとえば, 図14(a)のように, 金属はくと絶縁紙を重ねて巻いたり, 図(b)のように, 多数の金属板を平行に並べて, 1枚おきに交互に接続したりする。高い電圧が加わる回路に使用するコンデンサには, マイカ(雲

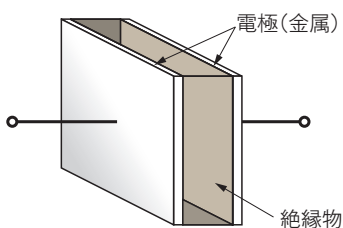


図13 平行板コンデンサ

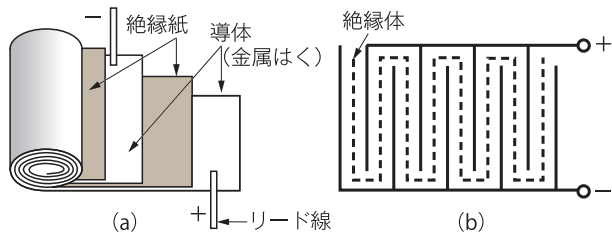


図14 コンデンサの構造例

母)のように, 薄くても高い電圧に耐えられる材料が用いられている。







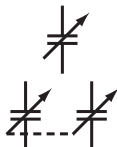



2 固定コンデンサと
可変コンデンサ

静電容量が一定のコンデンサを**固定コンデンサ**^①といい, 静電容量を変えることのできるコンデンサを**可変コンデンサ**^②という。

- ① fixed capacitor
② variable capacitor

5 空気可変コンデンサや, 表2に示すポリエステル可変コンデンサは, 絶縁物がそれぞれ空気やポリエステルで, 軸を回すと電極板の対向面積が連続的に変わり, 静電容量が変化する。セラミックトリマコンデンサは, 絶縁物がセラミックで, ねじを回すと電極板の間隔が変わり, 静電容量が変化する。これを**半固定コンデンサ**という。

表2 いろいろなコンデンサ

	図記号	外観例	特徴・用途例
固定コンデンサ	 コンデンサ	 セラミック コンデンサ	小形, 比較的小さい静電容量, 通信機器用
		 ポリプロピレン コンデンサ	高絶縁, 低損失, 小形軽量, 耐圧も高い。 高周波, パルス大電流のスイッチング電源やインバータ回路用
	 電解 コンデンサ	 タンタル電解 コンデンサ	小形, 比較的大きい静電容量, 通信機器用, 測定機器用
		 アルミニウム 電解コンデンサ	大容量, 一般電子回路用
可変コンデンサ	 (連動のとき)	 ポリエステル 可変コンデンサ	静電容量を変化させることができる。通信機器用
	 半固定 コンデンサ	 セラミックトリマ コンデンサ	静電容量を変化させたあと, 固定できる。通信機器用

3 コンデンサの
静電容量の表記

コンデンサの静電容量の表示方法には, 図15のように, 容量の値を直接表示する方法, 2~3桁の数字で表記する方法, また, 許容差や定格電圧を記号で表記する方法がある。

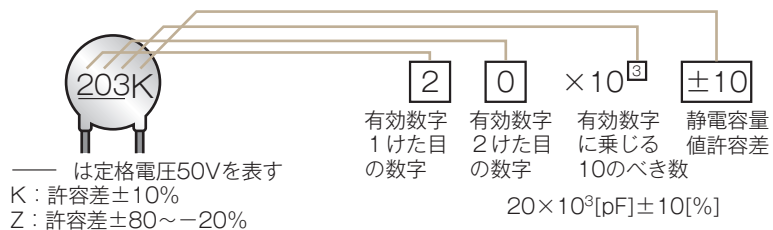


図15 静電容量の表記例

問 5 図16に示すコンデンサの静電容量はいくらか。

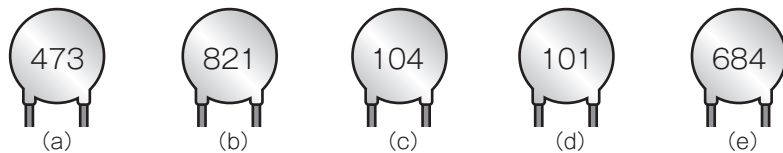


図16



静電式複写機 (コピー機)

静電式複写機は、図17のように、帯電によって発生した電荷の極性が異なるため吸引力が生じる現象を利用している。

複写の手順は次のような順序で行われる。

- ① 原稿に光を当てると、文字や絵柄など黒い部分は光を吸収し、白い部分は光を反射する。
- ② 原稿の白部分から反射した光は、プラスに帯電した感光ドラムに当たり、文字や図柄の形を残してプラス電荷が消え、目に見えないプラス電荷による画像が、感光ドラム上に形づくられる。
- ③ トナーをマイナスに帯電させると、感光ドラム上の文字や図柄の形状に残ったプラス電荷にトナーが吸着する。
- ④ 次にプラスに帯電させた紙をドラムに押しつけながら流すと、感光ドラムから紙にトナーが吸着される。
- ⑤ 最後に加熱したローラーを通過すると、トナーが紙に定着する。

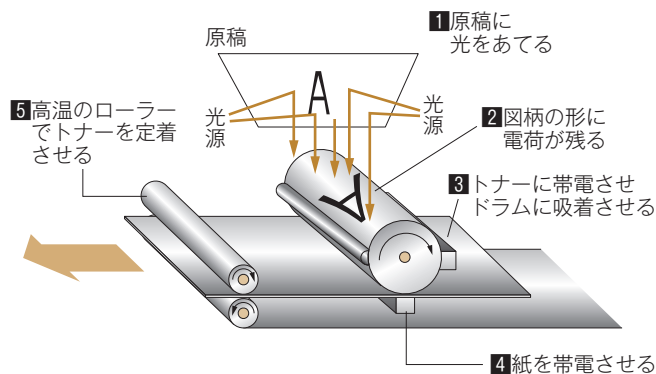


図17