物理学概論
―高校物理から大学物理への橋渡し―［熱・波・電磁気・原子編］

章末問題解答 (2024年12月2日更新)

第1章

問題 1.1♡

(1) 熱容量 C は

$$C = (2.0 \times 10^2 \text{ g}) \times 0.45 \text{ J/(g·K)}$$
$$= 9.0 \times 10^1 \text{ J/K}$$

となる．

(2) 必要な熱量 Q は

$$Q = (2.0 \times 10^2 \text{ g}) \times \{0.45 \text{ J/(g·K)}\} \times 10 \text{ K}$$
$$+ (1.0 \times 10^2 \text{ g}) \times \{4.2 \text{ J/(g·K)}\} \times 10 \text{ K}$$
$$= 5.1 \times 10^3 \text{ J}$$

となる．

問題 1.2♡

(1) 平衡になったときの温度を t〔°C〕とすると，熱量保存の法則より，低温の湯のみが得た熱量と，高温のお湯が失った熱量は等しいので，

$$(90 \text{ J/K}) \times (t - 20 \text{ °C}) = 50 \text{ g} \times \{4.2 \text{ J/(g·K)}\} \times (80 \text{ °C} - t)$$
$$t = 62 \text{ °C}$$

となる．

(2) 温度差 1 °C と温度差 1 K は同じであるので，20 °C と 62 °C の温度差 $\Delta T = (62 \text{ °C} - 20 \text{ °C}) = 42 \text{ °C} = 42 \text{ K}$ である．よって，

$$Q = (90 \text{ J/K}) \times 42 \text{ K}$$
$$= 3780 \text{ J}$$
$$= 3.8 \times 10^3 \text{ J}$$

となる．

問題 1.3♡

(1) 温度差 1 °C と温度差 1 K は同じであるので，それぞれの温度差は 100 °C − 23.0 °C = 77 °C = 77 K，23.0 °C − 20.0 °C = 3.0 °C =

3.0 K である．低温の熱量計および水が得た熱量と，高温の銅球が失った熱量は等しいので，

$$70\ \mathrm{g} \times c \times 77\ \mathrm{K} = (60\ \mathrm{J/K}) \times 3.0\ \mathrm{K} + 150\ \mathrm{g} \times \{4.2\ \mathrm{J/(g{\cdot}K)}\} \times 3.0\ \mathrm{K}$$

(2) (1) の方程式を解き

$$(5390\ \mathrm{g{\cdot}K})c = 2070\ \mathrm{J}$$
$$c = 0.384\cdots\ \mathrm{J/(g{\cdot}K)}$$

となるので，銅の比熱は $c = 3.8 \times 10^{-1}\ \mathrm{J/(g{\cdot}K)}$ となる．

問題 1.4$^{\heartsuit}$

(1) ボイルの法則より

$$(1.0 \times 10^5\ \mathrm{Pa}) \times (1.5 \times 10^{-2}\ \mathrm{m^3}) = (3.0 \times 10^5\ \mathrm{Pa}) \times V_1$$
$$V_1 = 5.0 \times 10^{-3}\ \mathrm{m^3}$$

(2) シャルルの法則より

$$\frac{1.5 \times 10^{-2}\ \mathrm{m^3}}{300\ \mathrm{K}} = \frac{V_2}{400\ \mathrm{K}}$$
$$V_2 = 2.0 \times 10^{-2}\ \mathrm{m^3}$$

(3) ボイル・シャルルの法則より

$$\frac{(1.0 \times 10^5\ \mathrm{Pa}) \times (1.5 \times 10^{-2}\ \mathrm{m^3})}{300\ \mathrm{K}} = \frac{(2.0 \times 10^5\ \mathrm{Pa}) \times V_3}{360\ \mathrm{K}}$$
$$V_3 = 9.0 \times 10^{-3}\ \mathrm{m^3}$$

問題 1.5$^{\heartsuit}$

気体の分子の個数を N，物質量を n〔mol〕，アボガドロ数を N_A〔$\mathrm{mol^{-1}}$〕とすると，$N = N_\mathrm{A} \times n$ であるので，気体の状態方程式は $pV = \dfrac{N}{N_\mathrm{A}}RT$ となる．よって

$$\begin{aligned} N &= \frac{pVN_\mathrm{A}}{RT} \\ &= \frac{(1.0 \times 10^5\ \mathrm{Pa}) \times (1.0 \times 10^{-6}\ \mathrm{m^3}) \times (6.0 \times 10^{23}\ \mathrm{mol^{-1}})}{\{8.3\ \mathrm{J/(mol{\cdot}K)}\} \times 300\ \mathrm{K}} \\ &= 0.240\cdots \times 10^{20} \\ &= 2.4 \times 10^{19} \end{aligned}$$

となるので，気体の分子の個数は， $N = 2.4 \times 10^{19}$ 個となる．

問題 1.6$^{\heartsuit}$

(1) 内部エネルギーは

$$\begin{aligned} U &= \frac{3}{2}nRT \\ &= \frac{3}{2} \times 2.0\ \mathrm{mol} \times \{8.3\ \mathrm{J/(mol\cdot K)}\} \times 300\ \mathrm{K} \\ &= 7470\ \mathrm{J} \\ &\simeq 7.5 \times 10^3\ \mathrm{J} \end{aligned}$$

となる．また，$U = \frac{1}{2}m\overline{v^2} \cdot nN_\mathrm{A}$ となるので，気体分子の運動エネルギーの平均値は

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}m\overline{v^2} &= \frac{3nRT}{2nN_\mathrm{A}} \\ &= \frac{3 \times \{8.3\ \mathrm{J/(mol\cdot K)}\} \times 300\ \mathrm{K}}{2 \times (6.0 \times 10^{23}\ \mathrm{mol^{-1}})} \\ &\simeq 6.2 \times 10^{-21}\ \mathrm{J} \end{aligned}$$

となる．

(2) 内部エネルギーは $U = \frac{3}{2}nRT = \frac{3}{2}pV$ となるので

$$\begin{aligned} U &= \frac{3}{2} \times (1.0 \times 10^5\ \mathrm{Pa}) \times (2.0 \times 10^{-2}\ \mathrm{m^3}) \\ &= 3.0 \times 10^3\ \mathrm{J} \end{aligned}$$

となる．

(3) 分子量 M〔g/mol〕の気体分子の平均 2 乗速度は $\sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3RT}{N_\mathrm{A}m}} = \sqrt{\frac{3RT}{M \times 10^{-3}}}$ となるので，

$$\begin{aligned} \sqrt{\overline{v^2}}_{\text{水素}} &= \sqrt{\frac{3 \times \{8.3\ \mathrm{J/(mol\cdot K)}\} \times 300\ \mathrm{K}}{2 \times 10^{-3}\ \mathrm{kg/mol}}} \\ &\simeq 1.9 \times 10^3\ \mathrm{m/s} \\ \sqrt{\overline{v^2}}_{\text{酸素}} &= \sqrt{\frac{3 \times \{8.3\ \mathrm{J/(mol\cdot K)}\} \times 300\ \mathrm{K}}{32 \times 10^{-3}\ \mathrm{kg/mol}}} \\ &\simeq 4.8 \times 10^2\ \mathrm{m/s} \end{aligned}$$

となる．

問題 1.7$^{\heartsuit}$

(1) 圧力が一定での気体がした仕事は $W' = p\Delta V$ となり，体積の変化は

(ピストンの断面積)×(ピストンが移動した距離) となるので，

$$W' = (1.0 \times 10^5\ \mathrm{Pa}) \times (1.5 \times 10^{-3}\ \mathrm{m}^2) \times 0.20\ \mathrm{m}$$
$$= 3.0 \times 10\ \mathrm{J}$$

となる．

(2)　熱力学第 1 法則 $Q = \Delta U + W'$ より

$$\Delta U = Q - W'$$
$$= (3.0 \times 10^2\ \mathrm{J}) - (3.0 \times 10\ \mathrm{J})$$
$$= 2.7 \times 10^2\ \mathrm{J}$$

となる．

問題 1.8$^\heartsuit$

(1)　温度が 400 K になったときの気体の体積を V とおくと，シャルルの法則より

$$\frac{3.0 \times 10^{-4}\ \mathrm{m}^3}{300\ \mathrm{K}} = \frac{V}{400\ \mathrm{K}}$$
$$V = 4.0 \times 10^{-4}\ \mathrm{m}^3$$

となる．

(2)　気体がした仕事 W' は

$$W' = p\Delta V$$
$$= (1.0 \times 10^5\ \mathrm{Pa}) \times (1.0 \times 10^{-4}\ \mathrm{m}^3)$$
$$= 10\ \mathrm{J}$$

となるので，気体の内部エネルギーの変化量は熱力学第 1 法則 $Q = \Delta U + W'$ より，

$$\Delta U = Q - W'$$
$$= 25\ \mathrm{J} - 10\ \mathrm{J}$$
$$= 15\ \mathrm{J}$$

となる．

問題 1.9$^\heartsuit$

(1)　気体の圧力を p として，ピストンに働く力のつり合いの式を立てると

$$p \times (1.0 \times 10^{-2}\ \mathrm{m}^2) = (1.0 \times 10^5\ \mathrm{Pa}) \times (1.0 \times 10^{-2}\ \mathrm{m}^2) + 50\ \mathrm{kg} \times 9.8\ \mathrm{m/s}^2$$
$$p = 1.49 \times 10^5\ \mathrm{Pa}$$
$$= 1.5 \times 10^5\ \mathrm{Pa}$$

となる．

(2) 気体の体積が半分になったときの気体の圧力を p とすると，ボイルの法則より

$$(1.49 \times 10^5 \text{ Pa}) \times V = p \times \frac{1}{2}V$$
$$p = 2.98 \times 10^5 \text{ Pa}$$

となる．ここでピストンに乗せたおもりの質量を m〔kg〕として，ピストンに働く力のつり合いの式を立てると

$$(2.98 \times 10^5 \text{ Pa}) \times (1.0 \times 10^{-2} \text{ m}^2) = (1.0 \times 10^5 \text{ Pa}) \times (1.0 \times 10^{-2} \text{ m}^2) + (50 \text{ kg} + m) \times 9.8 \text{ m/s}^2$$
$$m = 1.52 \times 10^2 \text{ kg}$$
$$= 1.5 \times 10^2 \text{ kg}$$

となる．

問題 1.10$^{\heartsuit}$

(1) 体積が 2.0 倍になったときの気体の圧力を p とすると，ボイルの法則より

$$(1.0 \times 10^5 \text{ Pa}) \times (5.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3) = p \times (5.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \times 2.0)$$
$$p = 5.0 \times 10^4 \text{ Pa}$$

となる．

(2) 等温変化なので，内部エネルギーの変化量 ΔU は 0 J となる．

(3) 気体がした仕事 $\Delta W'$ は

$$\Delta W' = \int_{5.0\times10^{-3}\text{m}^3}^{10\times10^{-3}\text{m}^3} p dV$$
$$= \int_{5.0\times10^{-3}\text{m}^3}^{10\times10^{-3}\text{m}^3} \frac{nRT}{V} dV$$
$$= nRT \int_{5.0\times10^{-3}\text{m}^3}^{10\times10^{-3}\text{m}^3} \frac{1}{V} dV$$

$pV = nRT$ を用いて，

$$= pV \log\left(\frac{10 \times 10^{-3} \text{ m}^3}{5.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3}\right)$$
$$= (1.0 \times 10^5 \text{ Pa}) \times (5.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3) \times \log 2$$
$$= (5 \log 2) \times 10^2 \text{ J}$$
$$= 3.5 \times 10^2 \text{ J}$$

となる．

問題 1.11$^{\heartsuit}$

(1) それぞれの過程での内部エネルギーの変化量 ΔU，気体がした仕事 $\Delta W'$，気体が吸収した熱量 Q はそれぞれ以下のようになる．

A→B

$$\begin{aligned}\Delta U &= \frac{3}{2}nR\Delta T\\ &= \frac{3}{2}nR(T_\mathrm{B}-T_\mathrm{A})\\ &= \frac{3}{2}(p_\mathrm{B}V_\mathrm{B}-p_\mathrm{A}V_\mathrm{A})\\ &= \frac{3}{2}(3p_0V_0-p_0V_0)\\ &= 3p_0V_0\end{aligned}$$

$$\Delta W' = 0\ \mathrm{J}$$

$$\begin{aligned}Q &= \Delta U + \Delta W'\\ &= 3p_0V_0\end{aligned}$$

B→C

$$\begin{aligned}\Delta U &= \frac{3}{2}nR\Delta T\\ &= \frac{3}{2}nR(T_\mathrm{C}-T_\mathrm{B})\\ &= \frac{3}{2}(p_\mathrm{C}V_\mathrm{C}-p_\mathrm{B}V_\mathrm{B})\\ &= \frac{3}{2}(6p_0V_0-3p_0V_0)\\ &= \frac{9}{2}p_0V_0\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta W' &= p\Delta V\\ &= 3p_0(2V_0-V_0)\\ &= 3p_0V_0\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}Q &= \Delta U + \Delta W'\\ &= \frac{9}{2}p_0V_0 + 3p_0V_0\\ &= \frac{15}{2}p_0V_0\end{aligned}$$

C→D

$$\Delta U = \frac{3}{2}nR\Delta T$$

$$
\begin{aligned}
&= \frac{3}{2}nR(T_{\mathrm{D}} - T_{\mathrm{C}}) \\
&= \frac{3}{2}(p_{\mathrm{D}}V_{\mathrm{D}} - p_{\mathrm{C}}V_{\mathrm{C}}) \\
&= \frac{3}{2}(2p_0V_0 - 6p_0V_0) \\
&= -6p_0V_0
\end{aligned}
$$

$$\Delta W' = 0\ \mathrm{J}$$

$$
\begin{aligned}
Q &= \Delta U + \Delta W' \\
&= -6p_0V_0
\end{aligned}
$$

D→A

$$
\begin{aligned}
\Delta U &= \frac{3}{2}nR\Delta T \\
&= \frac{3}{2}nR(T_{\mathrm{A}} - T_{\mathrm{D}}) \\
&= \frac{3}{2}(p_{\mathrm{A}}V_{\mathrm{A}} - p_{\mathrm{D}}V_{\mathrm{D}}) \\
&= \frac{3}{2}(p_0V_0 - 2p_0V_0) \\
&= -\frac{3}{2}p_0V_0
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
\Delta W' &= p\Delta V \\
&= p_0(V_0 - 2V_0) \\
&= -p_0V_0
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
Q &= \Delta U + \Delta W' \\
&= -\frac{3}{2}p_0V_0 - p_0V_0 \\
&= -\frac{5}{2}p_0V_0
\end{aligned}
$$

(2)　この 1 サイクルで気体がした仕事の和 W は

$$
\begin{aligned}
W &= 3p_0V_0 + (-p_0V_0) \\
&= 2p_0V_0
\end{aligned}
$$

となる.

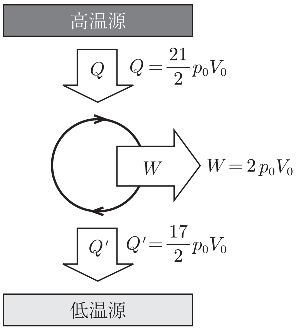


図 1.1

(3) この 1 サイクルで気体が吸収した熱量の和は

$$3p_0V_0+\frac{15}{2}p_0V_0=\frac{21}{2}p_0V_0$$

となるので，熱効率 e は

$$e=\frac{2p_0V_0}{\frac{21}{2}p_0V_0}=\frac{4}{21}=0.19$$

となる．

問題 1.12$^{\heartsuit}$

(1) 状態方程式 $pV=nRT$ より，状態 A の温度 T_{A} は

$$p_0\cdot 3V_0=nRT_{\mathrm{A}}$$

$$T_{\mathrm{A}}=\frac{3p_0V_0}{nR}$$

となる．

(2) A→B の過程で気体がした仕事 W' は

$$\begin{aligned}W'&=p_0(V_0-3V_0)\\&=-2p_0V_0\end{aligned}$$

となり，この過程での内部エネルギーの変化量 ΔU は

$$\begin{aligned}\Delta U&=\frac{3}{2}nR\Delta T\\&=\frac{3}{2}nR(T_{\mathrm{B}}-T_{\mathrm{A}})\\&=\frac{3}{2}(p_0V_0-3p_0V_0)\\&=-3p_0V_0\end{aligned}$$

となる．よって，熱力学第 1 法則より気体が吸収した熱量 Q は

$$\begin{aligned}Q&=\Delta U+W'\\&=-3p_0V_0+(-2p_0V_0)\\&=-5p_0V_0\end{aligned}$$

となる．

(3) B→C の過程で気体の内部エネルギーの変化量 ΔU は

$$\begin{aligned}\Delta U&=\frac{3}{2}nR\Delta T\\&=\frac{3}{2}nR(T_{\mathrm{C}}-T_{\mathrm{B}})\\&=\frac{3}{2}(3p_0V_0-p_0V_0)\\&=3p_0V_0\end{aligned}$$

となる．

(4) B→C の過程では体積の変化はないので気体がした仕事 W' は 0 J となる．よって，熱力学第 1 法則より気体が吸収した熱量 Q は

$$\begin{aligned} Q &= \Delta U + W' \\ &= 3p_0V_0 + 0\ \mathrm{J} \\ &= 3p_0V_0 \end{aligned}$$

となる．

(5) C→A の過程で気体がした仕事 W' は

$$\begin{aligned} W' &= \int_{V_0}^{3V_0} pdV \\ &= \int_{V_0}^{3V_0} \frac{nRT_\mathrm{A}}{V} dV \\ &= nRT_\mathrm{A} \int_{V_0}^{3V_0} \frac{1}{V} dV \\ &= 3p_0V_0 \Big[\log V \Big]_{V_0}^{3V_0} \\ &= 3p_0V_0 \log \frac{3V_0}{V_0} \\ &= 3p_0V_0 \log 3 \end{aligned}$$

となる．

(6) C→A の過程では等温変化なので内部エネルギーの変化量 ΔU は 0 J となる．よって，熱力学第 1 法則より気体が吸収した熱量 Q は

$$\begin{aligned} Q &= \Delta U + W' \\ &= 0\ \mathrm{J} + 3p_0V_0 \log 3 \\ &= 3p_0V_0 \log 3 \end{aligned}$$

となる．

(7) この 1 サイクルで気体が吸収した熱量の和は

$$3p_0V_0 + 3p_0V_0 \log 3 = (3\log 3 + 3)p_0V_0$$

となり，気体がした仕事の和は

$$-2p_0V_0 + 3p_0V_0 \log 3 = (3\log 3 - 2)p_0V_0$$

となる．よって，熱効率 e は

$$e = \frac{(3\log 3 - 2)p_0V_0}{(3\log 3 + 3)p_0V_0} = \frac{3\log 3 - 2}{3\log 3 + 3}$$

となる．

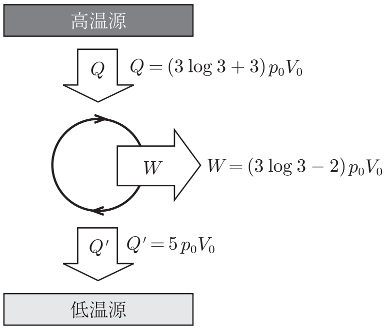


図 1.2

問題 1.13♡

(1)　図 1.3 のように等温曲線をひく．$T_\mathrm{A} > T_\mathrm{B}$ なので，状態 A の方が高温となる．

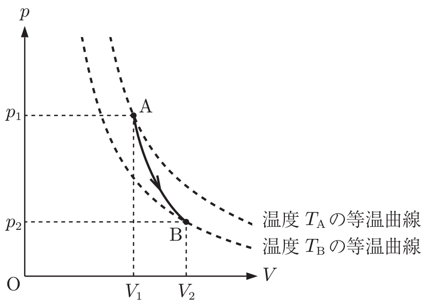


図 1.3

(2)　断熱変化においては $pV^\gamma =$ 一定となるので

$$p_1V_1^\gamma = p_2V_2^\gamma$$

$$p_2 = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^\gamma p_1$$

となる．

(3)　断熱変化においては気体が吸収した熱量 Q は 0 J となる．よって，熱力学第 1 法則 $Q = \Delta U + W'$ より

$$\begin{aligned} W' &= -\Delta U \\ &= -\frac{3}{2}nR\Delta T \\ &= -\frac{3}{2}nR(T_\mathrm{B} - T_\mathrm{A}) \\ &= -\frac{3}{2}(p_2V_2 - p_1V_1) \end{aligned}$$

$$= \frac{3}{2}(p_1V_1 - p_2V_2)$$

となる．

問題 1.14♡

おもりを載せると圧力は mg/S だけ増加するので，状態方程式よりそのときの温度は，

$$\frac{T_1}{T_0} = 1 + \frac{mg}{p_0S}$$

である．これだけの温度上昇に必要な熱は，

$$nC_V(T_1 - T_0) = nC_V\frac{mgT_0}{p_0S} = mgL\frac{C_V}{R}$$

である．次に，$p_0 + mg/S$ の圧力のまま体積を SH だけ増加させるとおもりを 2 階にまで動かすことができる．そのときの温度を T_2 とすると，

$$\left(p_0 + \frac{mg}{S}\right)S(L+H) = nRT_2$$

だから，

$$\frac{T_2}{T_0} = \left(1 + \frac{mg}{p_0S}\right)\left(1 + \frac{H}{L}\right)$$

とわかる．等圧変化なので，その温度変化に必要な熱は

$$\begin{aligned} nC_p(T_2 - T_1) &= nC_p\left(\left(1 + \frac{mg}{p_0S}\right)\left(1 + \frac{H}{L}\right)T_0 - \left(1 + \frac{mg}{p_0S}\right)T_0\right) \\ &= \frac{C_p}{R}(p_0S + mg)H \end{aligned}$$

である．したがって，最初の状態からおもりを 2 階まで動かすために必要な熱は $nC_V(T_1 - T_0) + nC_p(T_2 - C_1)$ である．取り出せた仕事は mgH であるから，効率は

$$e = \frac{mgH}{nC_V(T_1 - T_0) + nC_p(T_2 - T_1)} = \frac{RH}{C_VL + C_p\left(1 + \frac{p_0S}{mg}\right)H}$$

となる．

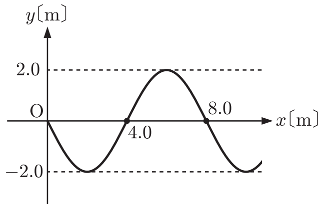
第 2 章

問題 2.1♡

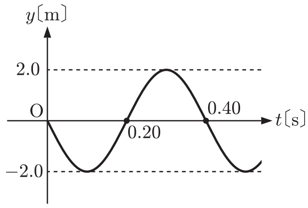
(1) グラフより，振幅 $A = 2.0$ m，波長 $\lambda = 8.0$ m となる．また，0.10 s 間で 2.0 m 進むので，速さ $v = \dfrac{2.0\ \text{m}}{0.10\ \text{s}} = 20$ m/s となる．

(2) $v = f\lambda = \dfrac{\lambda}{T}$ より，周波数 $f = \dfrac{v}{\lambda} = \dfrac{20\ \text{m/s}}{8.0\ \text{m}} = 2.5$ Hz，周期 $T = \dfrac{1}{f} = \dfrac{8.0\ \text{m}}{20\ \text{m/s}} = 0.40$ s となる．

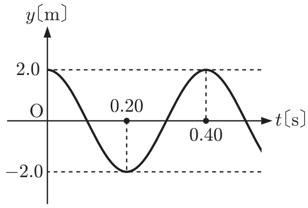
(3)



(4)



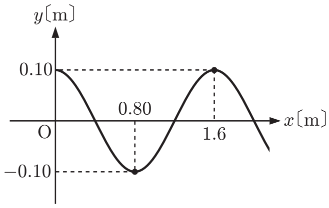
(5)



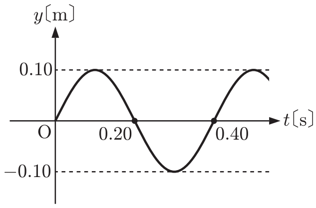
問題 2.2♡

(1)　グラフより, 振幅 $A = 0.10$ m, 周期 $T = 0.40$ s となる．また, 振動数は $f = \dfrac{1}{T} = \dfrac{1}{0.40\ \mathrm{s}} = 2.5$ Hz, 波長は $\lambda = vT = (4.0\ \mathrm{m/s}) \times (0.40\ \mathrm{s}) = 1.6$ m となる．

(2)



(3)



問題 2.3♡

(1)　この波の波長はグラフより $\lambda = 2.0$ m であるので，周期は $T = \dfrac{\lambda}{v} = \dfrac{2.0\ \mathrm{m}}{4.0\ \mathrm{m/s}} = 0.50$ s となる．

(2)　$t = 0$ s における波形を表す式 $y(x, 0)$ は

$$y(x,0) = (0.40\ \mathrm{m}) \sin \frac{2\pi}{2\ \mathrm{m}} x$$

となる．

(3)　この波の式 $y(x,t)$ は

$$y(x,t) = (0.40\ \mathrm{m}) \sin 2\pi \frac{x - vt}{2\ \mathrm{m}} = (0.40\ \mathrm{m}) \sin 2\pi \frac{x - (4\ \mathrm{m/s})t}{2\ \mathrm{m}}$$

となるので，$x = 0$ m の媒質の振動を表す式 $y(0,t)$ は

$$y(0,t) = (0.40\ \mathrm{m}) \sin 2\pi\{-(2\ \mathrm{s}^{-1})t\}$$

となる．

問題 2.4$^{\heartsuit}$

(1)　E

(2)　A，I

(3)　C，G

(4)　E

(5)　A，I

問題 2.5$^{\heartsuit}$

(1)　x 軸の正の方向に進む波は正弦波 B である．

(2)

$$\begin{aligned} y_1 &= (2.0\ \mathrm{m}) \sin 2\pi\{(2\ \mathrm{m}^{-1})x + (4\ \mathrm{Hz}) \cdot t\} \\ &= (2.0\ \mathrm{m}) \sin 2\pi \left(\frac{x}{\frac{1}{2}\ \mathrm{m}} + \frac{t}{\frac{1}{4}\ \mathrm{s}} \right) \end{aligned}$$

であるので，振幅 $A = 2.0$ m，波長 $\lambda = \dfrac{1}{2}$ m $= 0.50$ m，周期 $T = \dfrac{1}{4}$ s $= 0.25$ s となる．

(3)

$$\begin{aligned} y &= (2.0\ \mathrm{m}) \sin 2\pi\{(2\ \mathrm{m}^{-1}) \cdot x + (4\ \mathrm{Hz}) \cdot t\} \\ &\quad + (2.0\ \mathrm{m}) \sin 2\pi\{(2\ \mathrm{m}^{-1}) \cdot x - (4\ \mathrm{Hz}) \cdot t\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= (4.0\ \mathrm{m}) \sin \frac{2\pi\{(2\ \mathrm{m}^{-1}) \cdot x + (4\ \mathrm{Hz}) \cdot t\} + 2\pi\{(2\ \mathrm{m}^{-1}) \cdot x - (4\ \mathrm{Hz}) \cdot t\}}{2} \\ &\quad \times \cos \frac{2\pi\{(2\ \mathrm{m}^{-1}) \cdot x + (4\ \mathrm{Hz}) \cdot t\} - 2\pi\{(2\ \mathrm{m}^{-1}) \cdot x - (4\ \mathrm{Hz}) \cdot t\}}{2} \\ &= (4.0\ \mathrm{m}) \sin 2\pi\{(2\ \mathrm{m}^{-1}) \cdot x\} \cos 2\pi\{(4\ \mathrm{Hz}) \cdot t\} \end{aligned}$$

となる．

(4)　図 2.1 のような定常波ができるので，隣り合う腹と腹の距離は 0.25 m となる．

(5)　この定常波の周期は 0.25 s となる．

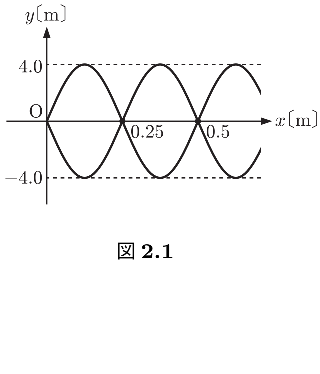
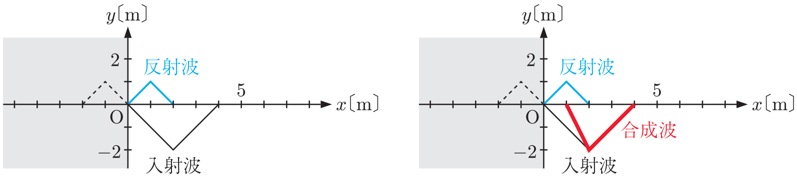


図 2.1

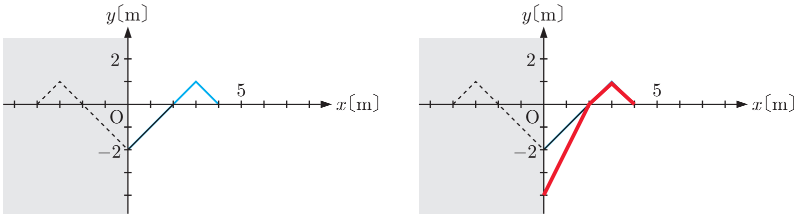
問題 2.6◇

(1)

(a)

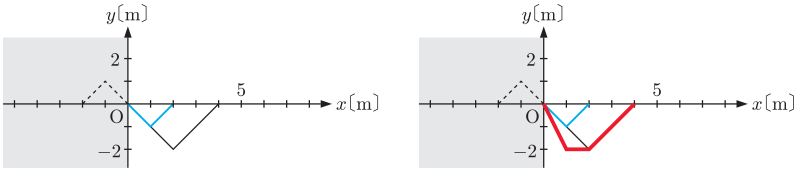


(b)

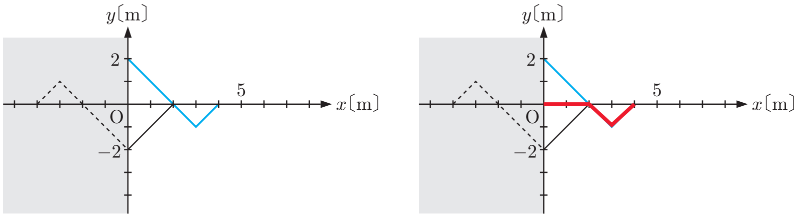


(2)

(a)

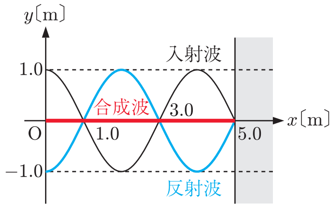


(b)

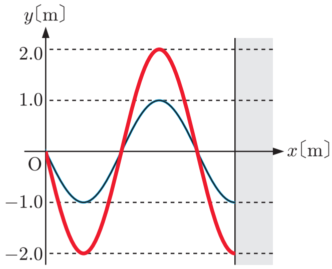


問題 2.7◇

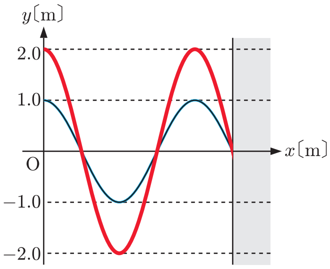
(1) (a)



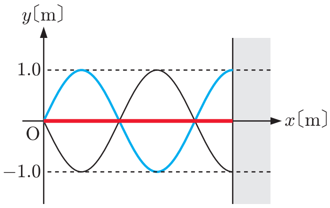
(b)



(2)　2.(a)



(b)



問題 2.8◇

(1)　線分 AB 上には定常波ができ，節の数は 4 個となるので，波が打ち消し合って振動しない点の数は 4 個となる．

(2)　P と R となる．

(3)　Q と S となる．

(4)　波源の振動の位相を逆にすると，腹線と節線の位置が逆転するので，Q と R となる．

問題 2.9◇

(1)　媒質 1 での波の速さは $v_1 = f_1\lambda_1 = (20\ \mathrm{Hz}) \times (1.4\ \mathrm{m}) = 28\ \mathrm{m/s}$ となる．

(2)　入射角は 30°，屈折角は 45° なので，媒質 1 に対する媒質 2 の屈折率を n_{12} とすると

$$n_{12} = \frac{\sin 30^\circ}{\sin 45^\circ} = \frac{\frac{1}{2}}{\frac{1}{\sqrt{2}}} = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0.70$$

となる．

(3)　屈折の法則 $\dfrac{\lambda_1}{\lambda_2} = n_{12}$ より，媒質 2 での波長は $\lambda_2 = \dfrac{\lambda_1}{n_{12}} = \dfrac{1.4\ \mathrm{m}}{0.70} = 2.0\ \mathrm{m}$ となる．また，屈折によって波の振動数は変化しないので，$f_2 = f_1 = 20\ \mathrm{Hz}$ となる．

(4)　媒質 2 での波の速さは $v_2 = f_2\lambda_2 = (20\ \mathrm{Hz}) \times (2.0\ \mathrm{m}) = 40\ \mathrm{m/s}$ となる．

第 3 章

問題 3.1♡

(1)　(a) と (b) では波形が異なるので，音の音色が異なる．

(2)　(a) と (c) では振動数が異なるので，音の高さが異なる．

(3)　(a) と (d) では振幅が異なるので，音の強さが異なる．

問題 3.2♡

音叉 A の振動数を f〔Hz〕とすると，$|260\ \mathrm{Hz} - f| = 1\ \mathrm{Hz}$，$|264\ \mathrm{Hz} - f| = 3\ \mathrm{Hz}$ より，$f = 261\ \mathrm{Hz}$ となる．

問題 3.3♢

(1)　腹が 3 個の定常波の波長は $1.2\ \mathrm{m} \times \dfrac{2}{3} = 0.80\ \mathrm{m}$ となる．また，糸を伝わる波の速さは 48 m/s なので，$f_1 = \dfrac{48\ \mathrm{m/s}}{0.80\ \mathrm{m}} = 60\ \mathrm{Hz}$ となる．

(2)　おもりの質量および音叉の振動数は変わらないので，糸にできる定常波の波長も変わらず 0.80 m となる．よって，腹が 4 個の定常波を作るためには，音叉から滑車までの距離を $\dfrac{0.80\ \mathrm{m}}{2} \times 4 = 1.6\ \mathrm{m}$ とすればよいので，動かした距離は $(1.6\ \mathrm{m}) - (1.2\ \mathrm{m}) = 0.40\ \mathrm{m}$ である．

(3)　腹が 4 個の定常波の波長は $1.2\ \mathrm{m} \times \dfrac{2}{4} = 0.60\ \mathrm{m}$ となる．また，おもりの質量は変えないので，糸を伝わる波の速さは変わらず 48 m/s である．よって，音叉の振動数は $f_2 = \dfrac{48\ \mathrm{m/s}}{0.60\ \mathrm{m}} = 80\ \mathrm{Hz}$ にすればよい．

(4)　定常波の振動数は 60 Hz, 波長は腹が 2 つの定常波なので $1.2\ \mathrm{m} \times \dfrac{2}{2} = 1.2\ \mathrm{m}$ である．よって, 糸を伝わる波の速さは $60\ \mathrm{Hz} \times 1.2\ \mathrm{m} = 72\ \mathrm{m/s}$ である．ここで, 糸の張力を S〔N〕, 単位長さあたりの質量を ρ〔kg/m〕とすると，糸を伝わる波の速さは $v = \sqrt{\dfrac{S}{\rho}}$ である．また，糸の張力の大きさはおもりにかかる重力の大きさと等しくなるので，腹が 3 つのときのおもりの質量を m〔kg〕，2 つのときのおもりの質量を m'〔kg〕とすると

$$48\ \mathrm{m/s} = \sqrt{\frac{mg}{\rho}}, \quad 72\ \mathrm{m/s} = \sqrt{\frac{m'g}{\rho}}$$

$$\sqrt{\frac{m'}{m}} = \frac{72\ \mathrm{m/s}}{48\ \mathrm{m/s}}$$

$$\frac{m'}{m} = \frac{9}{4}$$

となるので，$\dfrac{9}{4}$ 倍のおもりをつるせばよい．

問題 3.4$^{\diamondsuit}$

(1)　波長を λ〔m〕とすると，

$$\begin{aligned}\frac{1}{2}\lambda &= (29.5 \times 10^{-2}\ \mathrm{m}) - (9.5 \times 10^{-2}\ \mathrm{m}) \\ &= 20 \times 10^{-2}\ \mathrm{m} \\ &= 2.0 \times 10^{-1}\ \mathrm{m}\end{aligned}$$

なので，波長は 4.0×10^{-1} m となる．

(2)　音叉の振動数を f〔Hz〕とすると，

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{340\ \mathrm{m/s}}{0.40\ \mathrm{m}} = 850\ \mathrm{Hz}$$

となる．

(3)　開口端補正を Δx〔m〕とすると，

$$\Delta x + 9.5 \times 10^{-2}\ \mathrm{m} = (40 \times 10^{-2}\ \mathrm{m}) \times \frac{1}{4}$$

$$\Delta x = 0.50 \times 10^{-2}\ \mathrm{m}$$

より，開口端補正は 5.0×10^{-3} m となる．

問題 3.5$^{\heartsuit}$

(1)　f_0

(2)　$\dfrac{V-v}{f_0}$

(3)　$V = f_\mathrm{A}\dfrac{V-v}{f_0}$ より，$f_\mathrm{A} = \dfrac{V}{V-v}f_0$

(4)　$f_\mathrm{B} = \dfrac{V}{V+v}f_0$

問題 3.6$^{\heartsuit}$

(1)　$(V-v)\cdot 1\,\mathrm{s}$

(2)　$\dfrac{V}{f_0}$

(3)　$f_\mathrm{A} = \dfrac{(V-v)\cdot 1\,\mathrm{s}}{\frac{V}{f_0}} = \dfrac{V-v}{\frac{V}{f_0}} = \dfrac{V-v}{V}f_0$

(4)　$f_\mathrm{B} = \dfrac{V+v}{V}f_0$

問題 3.7$^{\heartsuit}$

(1)　$f_1 = \dfrac{340\ \mathrm{m/s}}{(340\ \mathrm{m/s}) - (20\ \mathrm{m/s})} \times 400\ \mathrm{Hz} = 425\ \mathrm{Hz} = 4.3 \times 10^2\ \mathrm{Hz}$

(2)　$f_2 = \dfrac{340\ \mathrm{m/s}}{(340\ \mathrm{m/s}) - (-20\ \mathrm{m/s})} \times 400\ \mathrm{Hz} = 377.\cdots\ \mathrm{Hz}$

$= 3.8 \times 10^2\ \mathrm{Hz}$

(3)　$f_3 = \dfrac{(340\ \mathrm{m/s}) - (-10\ \mathrm{m/s})}{340\ \mathrm{m/s}} \times 400\ \mathrm{Hz} = 411.\cdots\ \mathrm{Hz}$
$= 4.1 \times 10^2\ \mathrm{Hz}$

(4)　$f_4 = \dfrac{(340\ \mathrm{m/s}) - (10\ \mathrm{m/s})}{340\ \mathrm{m/s}} \times 400\ \mathrm{Hz} = 388.\cdots\ \mathrm{Hz} = 3.9 \times 10^2\ \mathrm{Hz}$

(5)　$f_5 = \dfrac{(340\ \mathrm{m/s}) - (10\ \mathrm{m/s})}{(340\ \mathrm{m/s}) - (40\ \mathrm{m/s}} \times 400\ \mathrm{Hz} = 440\ \mathrm{Hz} = 4.4 \times 10^2\ \mathrm{Hz}$

(6)　$f_6 = \dfrac{(340\ \mathrm{m/s}) - (-10\ \mathrm{m/s})}{(340\ \mathrm{m/s}) - (40\ \mathrm{m/s})} \times 400\ \mathrm{Hz} = 466.\cdots\ \mathrm{Hz}$
$= 4.7 \times 10^2\ \mathrm{Hz}$

問題 3.8$^{\diamondsuit}$

(1)　音源から直接伝わる音の振動数は

$$f_1 = \frac{V}{V-(-v)} f_0 = \frac{V}{V+v} f_0$$

となる．

(2)　壁の位置に観測者がいて，その観測者が観測する音の振動数を f_2' とすると

$$f_2' = \frac{V}{V-v} f_0$$

となる．今，壁は静止しているので壁で反射する音の振動数 f_2 は f_2' と等しく

$$f_2 = f_2' = \frac{V}{V-v} f_0$$

となる．

(3)　うなりの振動数を f とすると

$$\begin{aligned} f &= |f_1 - f_2| \\ &= \left| \frac{V}{V+v} f_0 - \frac{V}{V-v} f_0 \right| \\ &= \frac{2Vv}{V^2 - v^2} f_0 \end{aligned}$$

となる．

第 4 章

問題 4.1$^{\heartsuit}$

(1)　入射角と反射角は等しいので，$\theta_1 = 45^\circ$ となる．また，屈折の法則より

$$\frac{\sin 45^\circ}{\sin \theta_2} = \sqrt{2}$$

$$\sin \theta_2 = \frac{1}{2}$$

$$\theta_2 = 30°$$

となる.

(2) 媒質 II 中での光の速さを c_2〔m/s〕, 波長を λ_2〔m〕とすると

$$\frac{3.0\times10^8\ \mathrm{m/s}}{c_2} = \frac{6.0\times10^{-7}\ \mathrm{m}}{\lambda_2} = \sqrt{2}$$

となるので,

$$c_2 = \frac{3.0\times10^8\ \mathrm{m/s}}{\sqrt{2}} = 2.1\times10^8\ \mathrm{m/s}$$

$$\lambda_2 = \frac{6.0\times10^{-7}\ \mathrm{m}}{\sqrt{2}} = 4.2\times10^{-7}\ \mathrm{m}$$

となる. また, 媒質 II 中での光の振動数を f_2〔Hz〕, 媒質 I 中での光の速さを c_1〔m/s〕, 波長を λ_1〔m〕とすると,

$$f_2 = \frac{c_2}{\lambda_2} = \frac{\frac{c_1}{\sqrt{2}}}{\frac{\lambda_1}{\sqrt{2}}} = \frac{c_1}{\lambda_1} = \frac{3.0\times10^8\ \mathrm{m/s}}{6.0\times10^{-7}\ \mathrm{m}} = 5.0\times10^{14}\ \mathrm{Hz}$$

となる.

問題 4.2$^\heartsuit$

(1) 液体中から空気中への光の道筋が図のようであったとすると, 光源は P' の位置にあるように見える. この光源の深さ（見かけの水深）を h' とすると, 屈折の法則より

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = n$$

となる. θ_1 と θ_2 が十分に小さいとき

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{\tan\theta_1}{\tan\theta_2} = \frac{\frac{L}{h'}}{\frac{L}{h}} = \frac{h}{h'}$$

となるので, 見かけの水深は $h' = \dfrac{h}{n}$ となる.

(2) 空気中へ光が漏れないようにするための円板の最小半径を r とする. 図 4.1 のように, 円板の端に達した光の屈折角が 90° となればよい. 屈折の法則より

$$\frac{\sin\theta}{\sin 90°} = \frac{1}{n}$$

となり, $\sin\theta = \dfrac{r}{\sqrt{h^2+r^2}}$ であるので,

$$\frac{r}{\sqrt{h^2+r^2}} = \frac{1}{n}$$

$$h^2 + r^2 = n^2 r^2$$

$$(n^2-1)r^2 = h^2$$

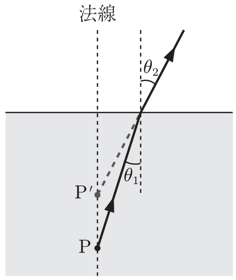


図 4.1

$$r = \frac{h}{\sqrt{n^2 - 1}}$$

となる．

問題 4.3$^\diamondsuit$

$\boxed{1}$　干渉

$\boxed{2}$　$m\lambda \ (m = 0, 1, 2, \cdots)$

$\boxed{3}$　$\left(m + \dfrac{1}{2}\right)\lambda \ (m = 0, 1, 2, \cdots)$

$\boxed{4}$　$\dfrac{d}{L}x$

$\boxed{5}$　$\dfrac{L\lambda}{d}$

(1)
$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{d\Delta x}{L} \\ &= \frac{(6.8 \times 10^{-4}\ \mathrm{m}) \times (9.8 \times 10^{-4}\ \mathrm{m})}{1.0\ \mathrm{m}} \\ &= 6.7 \times 10^{-7}\ \mathrm{m}\end{aligned}$$

となる．

(2)　屈折率 n の液体中では光の波長が $\dfrac{\lambda}{n}$ となるので，$\Delta x' = \dfrac{L\lambda}{nd}$ となる．よって，$\Delta x' = \dfrac{1}{n}\Delta x$ なので，明線どうしの距離は狭くなる．

問題 4.4$^\diamondsuit$

$\boxed{1}$　$d\sin\theta$

$\boxed{2}$　波長

$\boxed{3}$　$d\sin\theta$

問題 4.5$^\diamondsuit$

(1)　B

(2)　屈折の法則より

$$\begin{aligned}\frac{\sin 60^\circ}{\sin\theta} &= \sqrt{3} \\ \sin\theta &= \frac{1}{2} \\ \theta &= 30^\circ\end{aligned}$$

となる．

(3)　薄膜中での波長を λ' とすると，屈折の法則より

$$\begin{aligned}\frac{\lambda}{\lambda'} &= \sqrt{3} \\ \lambda' &= \frac{\lambda}{\sqrt{3}}\end{aligned}$$

となる．

(4) 図のように，光路差は $n \times$ (D − O − B の距離) となり

$$n \times (\mathrm{DO} + \mathrm{OB}) = n \times \mathrm{DF}$$
$$= n \times \mathrm{BF} \cos\theta$$
$$= 2nd \cos\theta$$

となる．

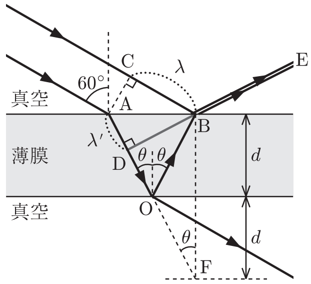


図 **4.2**

(5) O 点での反射では位相のずれはないが，B 点での反射では位相が π ずれるので，強め合う条件は $2nd\cos\theta = \left(m + \dfrac{1}{2}\right)\lambda$ $(m = 0, 1, 2, \cdots)$ となる．

問題 4.6$^{\diamondsuit}$

(1) 光路差はないが，平凸レンズの下面で反射する光の位相はずれず，平面ガラスの上面で反射する光の位相は π だけずれるので，中心では打ち消し合うように干渉する．よって，中心は暗くなる．

(2) 中心から距離 r での空気層の厚さは $\dfrac{r^2}{2R}$ となるので，平凸レンズの下面と平面ガラスの上面で反射する 2 つの光の経路差は $\dfrac{r^2}{2R} \times 2 = \dfrac{r^2}{R}$ となる．また，平凸レンズの下面で反射する光は位相がずれないが，平面ガラスの上面で反射する光の位相のずれは π となるので，明環となる条件は

$$\frac{r^2}{R} = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda$$
$$r = \sqrt{\left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda R}$$

となる．また，暗環となる条件は

$$\frac{r^2}{R} = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda$$
$$r = \sqrt{m\lambda R}$$

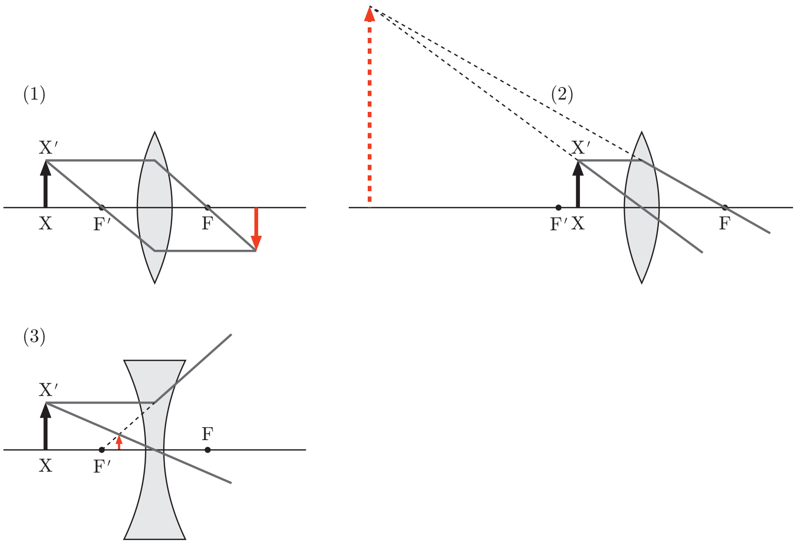
となる．ここで，$m = 0, 1, 2, \cdots$ である．

(3) 2 番目の明環の半径なので，明環となる条件 $r = \sqrt{\left(m + \dfrac{1}{2}\right)\lambda R}$ の $m = 1$ として

$$r = \sqrt{\left(1 + \frac{1}{2}\right) \times (5.0 \times 10^{-7}\ \mathrm{m}) \times 96\ \mathrm{m}}$$
$$= 8.5 \times 10^{-3}\ \mathrm{m}$$

となる．

問題 4.7$^{\diamond}$



問題 4.8$^{\diamond}$

レンズ A からレンズ A によってできる像までの距離を b_1〔cm〕とすると

$$\frac{1}{16\ \text{cm}}+\frac{1}{b_1}=\frac{1}{12\ \text{cm}}$$

$$b_1=48\ \text{cm}$$

となり，像の大きさは $2.0\ \text{cm}\times\dfrac{48\ \text{cm}}{16\ \text{cm}}=6.0\ \text{cm}$ となる．この像からレンズ B までの距離は $63\ \text{cm}-48\ \text{cm}=15\ \text{cm}$ である．よって，レンズ B からレンズ B によってできる像までの距離を b_2 とすると

$$\frac{1}{15\ \text{cm}}+\frac{1}{b_2}=\frac{1}{10\ \text{cm}}$$

$$b_2=30\ \text{cm}$$

となり，像の大きさは $6.0\ \text{cm}\times\dfrac{30\ \text{cm}}{15\ \text{cm}}=12\ \text{cm}$ となる．以上より，レンズ B によってできる像の位置はレンズ B の右 30 cm となり，その大きさは 12 cm となる．

問題 4.9$^{\diamond}$

(1)　ア : 紫　イ : 藍　ウ : 青　エ : 緑　オ : 黄　カ : オレンジ　キ : 赤

(2)　ク : 紫外線　ケ : 赤外線

(3)　ケ

(4)　ク

第 5 章

問題 5.1♡

(1) 2 つの電荷は異符号なので，はたらく力は引力となる．また，その大きさは $F = k_0 \dfrac{|q_1||q_2|}{r^2}$ より

$$F = (9.0 \times 10^9\ \mathrm{N{\cdot}m^2/C^2}) \times \frac{|6.0 \times 10^{-6}\ \mathrm{C}| \times |-2.0 \times 10^{-6}\ \mathrm{C}|}{(0.30\ \mathrm{m})^2}$$

$$= 1.2\ \mathrm{N}$$

となる．

(2) 小球 A，B を接触させると，負の電荷を与えた B から A に電子が移動して，A と B の電荷が等しくなる．このときの A と B の電荷を Q とすると，A と B の電荷の総和は接触の前後で保存されることより

$$(6.0 \times 10^{-6}\ \mathrm{C}) + (-2.0 \times 10^{-6}\ \mathrm{C}) = 2Q$$

$$Q = 2.0 \times 10^{-6}\ \mathrm{C}$$

となる．よって，2 つの電荷は同符号となるのではたらく力は斥力となる．また，その大きさは

$$F = (9.0 \times 10^9\ \mathrm{N{\cdot}m^2/C^2}) \times \frac{|2.0 \times 10^{-6}\ \mathrm{C}| \times |2.0 \times 10^{-6}\ \mathrm{C}|}{(0.30\ \mathrm{m})^2}$$

$$= 4.0 \times 10^{-1}\ \mathrm{N}$$

となる．

問題 5.2♡

q〔C〕の点電荷が受ける静電気力の大きさが 0 N となる位置を x とおく．今，原点 O と点 A にある点電荷は異符号であり $|3q| > |-q|$ なので，$x > 0$ m であることがわかる．

q の点電荷が原点 O にある点電荷から受ける力の向きは x 軸負の向きとなり，その大きさを F_O とすると

$$F_\mathrm{O} = k_0 \frac{|-q||q|}{(x - 0\ \mathrm{m})^2} = \frac{k_0 q^2}{x^2}$$

となる．また，q の点電荷が点 A にある点電荷から受ける力の向きは x 軸正の向きとなり，その大きさを F_A とすると

$$F_\mathrm{A} = k_0 \frac{|3q||q|}{(x - (-a))^2} = \frac{3k_0 q^2}{(x + a)^2}$$

となる．よって，静電気力の大きさが 0 N となるのは $F_\mathrm{O} = F_\mathrm{A}$ より

$$\frac{k_0 q^2}{x^2} = \frac{3k_0 q^2}{(x + a)^2}$$

$$x = \frac{1 \pm \sqrt{3}}{2}a$$

となり，$x > 0$ m より，$x = \dfrac{1+\sqrt{3}}{2}a$ となる．

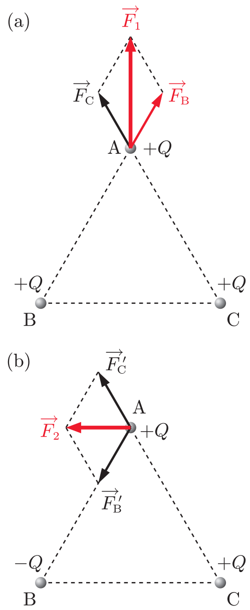


図 5.1

問題 5.3♡

(1) A の点電荷が B の点電荷から受ける力を $\vec{F}_B$ とすると，向きは図 5.1 (a) のようになり，その大きさは

$$F_B = k_0\frac{|Q||Q|}{a^2} = \frac{k_0Q^2}{a^2}$$

となる．

(2) A の点電荷が C の点電荷から受ける力を $\vec{F}_C$ とすると，向きは図 5.1 (a) のようになり，その大きさは

$$F_C = k_0\frac{|Q||Q|}{a^2} = \frac{k_0Q^2}{a^2}$$

となる．よって，点 A にある点電荷が受ける力の合力を $\vec{F}_1$ とすると，その向きは平行四辺形の対角線より図の矢印となり，大きさは

$$F_1 = \frac{k_0Q^2}{a^2} \times \cos 30^\circ \times 2 = \frac{\sqrt{3}k_0Q^2}{a^2}$$

となる．

(3) 同様にして，A の点電荷が B の点電荷から受ける力を $\vec{F}'_B$ とすると，向きは図 5.1 (b) のようになり，その大きさは

$$F'_B = k_0\frac{|Q||Q|}{a^2} = \frac{k_0Q^2}{a^2}$$

となる．また，A の点電荷が C の点電荷から受ける力を $\vec{F}'_C$ とすると，向きは図 5.1 (b) のようになり，その大きさは

$$F'_C = k_0\frac{|Q||Q|}{a^2} = \frac{k_0Q^2}{a^2}$$

となる．よって，点 A にある点電荷が受ける力の合力を $\vec{F}_2$ とすると，その向きは平行四辺形の対角線より図 5.1 (b) のようになり，大きさは

$$F_2 = \frac{k_0Q^2}{a^2} \times \cos 60^\circ \times 2 = \frac{k_0Q^2}{a^2}$$

となる．

問題 5.4♡

AB 間に働く静電気力は引力なので $qQ < 0$ であり，この力を F とする．また，糸の張力の大きさを T とすると金属球 A に働く力のつり合いより

$$F = T\sin\theta, \quad mg = T\cos\theta$$

となり，連立方程式を解くことにより $F = mg\tan\theta$ となる．また，$F = k_0\dfrac{|q||Q|}{r^2} = \dfrac{k_0|qQ|}{r^2}$ なので

$$\frac{k_0|qQ|}{r^2} = mg\tan\theta$$
$$|qQ| = \frac{mgr^2\tan\theta}{k_0}$$

となり，$qQ < 0$ より

$$Q = -\frac{mgr^2\tan\theta}{k_0 q}$$

となる．

問題 5.5$^{\heartsuit}$

(1) 正の点電荷は電場と同じ向きに力を受けるので，力の向きは右向きとなる．また，その大きさ F_1 は $2.0\ \mu\mathrm{C} = 2.0\ \times 10^{-6}$ C より

$$F = |2.0 \times 10^{-6}\ \mathrm{C}| \times 300\ \mathrm{V/m} = 6.0 \times 10^{-4}\ \mathrm{N}$$

となる．300 V/m = 300 N/C であることに注意.

(2) 負の点電荷は電場と逆向きの力を受けるので，力の向きは左向きとなる．また，その大きさ F_2 は $-4.0\ \mu\mathrm{C} = -4.0 \times 10^{-6}$ C より

$$F = |-4.0 \times 10^{-6}\ \mathrm{C}| \times 300\ \mathrm{V/m} = 1.2 \times 10^{-3}\ \mathrm{N}$$

となる．

問題 5.6$^{\heartsuit}$

(1) 点 A の電荷が原点 O に作る電場を $\vec{E}_{\mathrm{A}}$ とすると，その向きは x 軸の負の向きとなり，その大きさは

$$E_{\mathrm{A}} = k_0\frac{|-q|}{a^2} = \frac{k_0 q}{a^2}$$

となる．

(2) 点 B の電荷が原点 O に作る電場を $\vec{E}_{\mathrm{B}}$ とすると，その向きは x 軸の負の向きとなり，その大きさは

$$E_{\mathrm{B}} = k_0\frac{|+2q|}{a^2} = \frac{2k_0 q}{a^2}$$

となる．

(3) $\vec{E}_{\mathrm{A}}$ と $\vec{E}_{\mathrm{B}}$ を合成することにより，点 O に作られる電場の向きは負の向きとなり，その大きさは

$$\frac{2k_0 q}{a^2} + \frac{k_0 q}{a^2} = \frac{3k_0 q}{a^2}$$

となる．

(4)　点 A の電荷が点 C に作る電場を $\vec{E}'_{\mathrm{A}}$ とすると，その向きは x 軸の負の向きとなり，その大きさは

$$E'_{\mathrm{A}} = k_0 \frac{|-q|}{(2a-(-a))^2} = \frac{k_0 q}{9a^2}$$

となる．また，点 B の電荷が点 C に作る電場を $\vec{E}'_{\mathrm{B}}$ とすると，その向きは x 軸の正の向きとなり，その大きさは

$$E'_{\mathrm{B}} = k_0 \frac{|+2q|}{(2a-a)^2} = \frac{2k_0 q}{a^2}$$

となる．よって，$\vec{E}'_{\mathrm{A}}$ と $\vec{E}'_{\mathrm{B}}$ を合成することにより，点 C に作られる電場の向きは $E'_{\mathrm{B}} > E'_{\mathrm{A}}$ より x 軸の正の向きとなり，その大きさは

$$\frac{2k_0 q}{a^2} + \left(-\frac{k_0 q}{9a^2}\right) = \frac{17k_0 q}{9a^2}$$

となる．

(5)　電場の強さが 0 N/C となる位置を x とする．点 A にある点電荷と点 B にある点電荷が作る電場の様子は図のようになるので，$x < -a$ となることがわかる．また，点 A の電荷と点 B の電荷が作る電場の和が 0 N/C となることより

$$k_0 \frac{2q}{(a-x)^2} + k_0 \frac{-q}{(-a-x)^2} = 0\ \mathrm{N/C}$$

$$x = (-3 \pm 2\sqrt{2})a$$

となり，$x < -a$ より $x = (-3-2\sqrt{2})a$ となる．

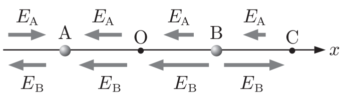


図 5.2

問題 5.7♡

(1)　A の点電荷が点 C につくる電場を $\vec{E}_{\mathrm{A}}$ とすると，向きは図 5.3 のようになり，その大きさは

$$E_{\mathrm{A}} = k_0 \frac{|Q|}{(\sqrt{2}L)^2} = \frac{k_0 Q}{2L^2}$$

となる．

B の点電荷が点 C につくる電場を $\vec{E}_{\mathrm{B}}$ とすると，向きは図 5.3 のようになり，その大きさは

$$E_{\mathrm{B}} = k_0 \frac{|Q|}{(\sqrt{2}L)^2} = \frac{k_0 Q}{2L^2}$$

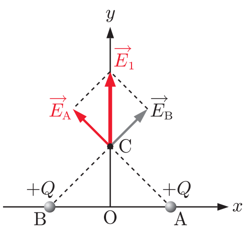


図 5.3

となる．よって，点 C に作られる電場を $\vec{E}_1$ とすると，$\vec{E}_\mathrm{A}$ と $\vec{E}_\mathrm{B}$ を合成することにより，$\vec{E}_1$ の向きは図 5.3 のようになり，その大きさは

$$E_1 = \frac{k_0 Q}{2L^2} \times \cos 45^\circ \times 2 = \frac{\sqrt{2}k_0 Q}{2L^2}$$

となる．

(2) A の点電荷が点 D につくる電場を $\vec{E}'_\mathrm{A}$ とすると，向きは図 5.4 のようになり，その大きさは

$$E'_\mathrm{A} = k_0 \frac{|Q|}{(2L)^2} = \frac{k_0 Q}{4L^2}$$

となる．

B の点電荷が点 D につくる電場を $\vec{E}'_\mathrm{B}$ とすると，向きは図 5.4 のようになり，その大きさは

$$E'_\mathrm{B} = k_0 \frac{|Q|}{(2L)^2} = \frac{k_0 Q}{4L^2}$$

となる．よって，点 D に作られる電場を $\vec{E}_2$ とすると，$\vec{E}'_\mathrm{A}$ と $\vec{E}'_\mathrm{B}$ を合成することにより，$\vec{E}_2$ の向きは図 5.4 のようになり，その大きさは

$$E_2 = \frac{k_0 Q}{4L^2} \times \cos 30^\circ \times 2 = \frac{\sqrt{3}k_0 Q}{4L^2}$$

となる．

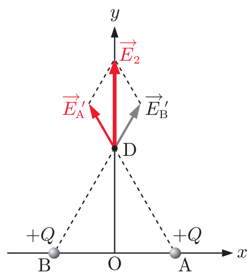


図 5.4

問題 5.8♡

(1) 球面上ではどこも点電荷からの距離が r であるので，電場の強さはどこも等しく $E = k_0 \dfrac{Q}{r^2}$ となる．

(2) 球面を貫いて出る電気力線の本数を N とすると

$$\begin{aligned} N &= (\text{電気力線の密度}) \times (\text{球面の面積}) \\ &= k_0 \frac{Q}{r^2} \times 4\pi r^2 \\ &= 4\pi k_0 Q \end{aligned}$$

となる．

問題 5.9♡

(1) 電気力線は導線に垂直な方向となる．よって，図 5.5 のように導線を中心とする半径 r〔m〕，高さ l〔m〕の円柱面（閉曲面）を考える．求める電場の強さを E_1〔V/m〕とすると，円柱側面を貫く電気力線の本数は（電気力線の密度）×（側面の面積）$= E_1 \times (2\pi r \times l)$ であり，上面と下面を貫く電気力線の本数は 0 である．また，この円柱内の電荷

(1)

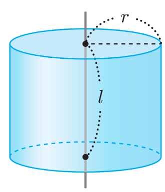


図 5.5

は λl であるので，ガウスの法則より，

$$E_1 \times (2\pi r l) = \frac{\lambda l}{\varepsilon_0}$$

$$E_1 = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 r}\text{〔V/m〕}$$

となる．

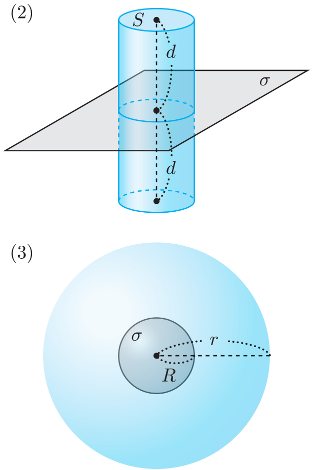


図 5.6

(2) 電気力線は極板に垂直な方向となる．そこで，図 5.6 のような底面積が S〔m^2〕で高さが $2d$〔m〕である円柱面（閉曲面）を考える．求める電場の強さを E_2 とすると，円柱の上面および下面を貫く電気力線の本数はどちらも $E_2 S$〔本〕となり，側面を貫く本数は 0 となる．また，この円柱内の電荷は σS〔C〕となるので，ガウスの法則より，

$$E_2 \times S + E_2 \times S = \frac{\sigma S}{\varepsilon_0}$$

$$E_2 = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}\text{〔V/m〕}$$

となる．

(3) 半径 R〔m〕の球面と中心が同じとなる半径 r〔m〕の球面（閉曲面）を考える．対称性より，球面上ではどこも電場の強さは等しい．この電場の強さを E_3 とすると，半径 r の球面を貫く電気力線の本数は $E_3 \times 4\pi r^2$ となる．また，この球面内の電荷は $\sigma \times 4\pi R^2$〔C〕となるので，ガウスの法則より，

$$E_3 \times 4\pi r^2 = \frac{\sigma \times 4\pi R^2}{\varepsilon_0}$$

$$E_3 = \frac{\sigma R^2}{\varepsilon_0 r^2}\text{〔V/m〕}$$

となる．

問題 5.10$^{\heartsuit}$

(1) 原点 O の電位を V_1 とすると

$$V_1 = k_0\frac{-q}{a} + k_0\frac{2q}{a} = \frac{k_0 q}{a}$$

となる．

(2) 点 C の電位を V_2 とすると

$$V_2 = k_0\frac{-q}{3a} + k_0\frac{2q}{a} = \frac{5k_0 q}{3a}$$

となる．

(3) 電位が 0 V となる位置を x とすると

(a) $x < -a$ の場合

$$k_0\frac{-q}{-a-x} + k_0\frac{2q}{a-x} = 0\ \text{V}$$

$$x = -3a$$

(b) $-a < x < a$ の場合

$$k_0 \frac{-q}{x-(-a)} + k_0 \frac{2q}{a-x} = 0\ \mathrm{V}$$

$$x = -\frac{1}{3}a$$

(c) $a < x$ の場合

$$k_0 \frac{-q}{x-(-a)} + k_0 \frac{2q}{x-a} = 0\ \mathrm{V}$$

$$x = -3a$$

となるが，$a < x$ より不適となる．

以上より，電位が 0 V となる位置は $x = -3a$，$-\dfrac{1}{3}a$ となる．

問題 5.11$^\heartsuit$

(1) 点 P での電場の向きは右向きとなる．また，極板間の電場の強さを E，極板間隔を d とすると，極板間の電位差 V は $V = Ed$ となるので，

$$E = \frac{V}{d} = \frac{12\ \mathrm{V}}{0.60\ \mathrm{m}} = 20\ \mathrm{V/m}$$

となるので，点 P の電場の強さは 20 V/m となる．

(2) 点 Q での電場の向きは右向きとなる．また，極板間の電場は一様となるので，点 Q の電場の強さは点 P の電場の強さと等しく 20 V/m となる．

(3) 点 P の電位を V_P とすると，$\mathrm{PB} = 0.30\ \mathrm{m}$ なので，$V_\mathrm{P} = (20\ \mathrm{V/m}) \times 0.30\ \mathrm{m} = 6.0\ \mathrm{V}$ となる．また，点 Q の電位を V_Q とすると，$\mathrm{QB} = 0.20\ \mathrm{m}$ なので，$V_\mathrm{Q} = (20\ \mathrm{V/m}) \times 0.20\ \mathrm{m} = 4.0\ \mathrm{V}$ となる．よって，2 点 P，Q 間の電位差は $6.0\ \mathrm{V} - 4.0\ \mathrm{V} = 2.0\ \mathrm{V}$ となる．

(4) 正の電荷が受ける力の向きは電場の向きと等しくなるので，力の向きは右向きとなる．また，その大きさを F とすると

$$F = (1.0 \times 10^{-6}\ \mathrm{C}) \times 20\ \mathrm{V/m} = 2.0 \times 10^{-5}\ \mathrm{N}$$

となる．

(5) 電場がした仕事を W とすると

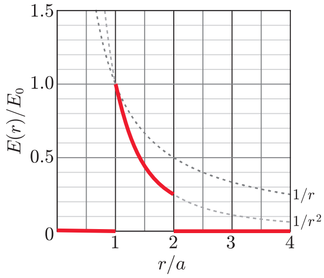
$$\begin{aligned} W &= \int_\mathrm{P}^\mathrm{Q} q\vec{E} \cdot d\vec{r} \\ &= q\left(\int_\mathrm{P}^\mathrm{O} \vec{E} \cdot d\vec{r} + \int_\mathrm{O}^\mathrm{Q} \vec{E} \cdot d\vec{r}\right) \end{aligned}$$

$$= q\left(\int_{\mathrm{O}}^{\mathrm{P}} (-\vec{E})\cdot d\vec{r} - \int_{\mathrm{O}}^{\mathrm{Q}} (-\vec{E})\cdot d\vec{r}\right)$$
$$= q(V_{\mathrm{P}} - V_{\mathrm{Q}})$$
$$= (1.0 \times 10^{-6}\ \mathrm{C}) \times (6.0\ \mathrm{V} - 4.0\ \mathrm{V})$$
$$= 2.0 \times 10^{-6}\ \mathrm{J}$$

となる．

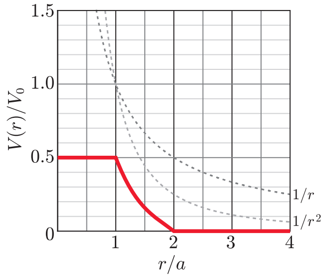
問題 5.12$^{\diamondsuit}$

$E(r)/E_0$ の図示



$r = a$ における電位は $\frac{1}{2}\times V_0$ である．

$V(r)/V_0$ の図示



問題 5.13$^{\heartsuit}$

(i)　$x > R$ の場合

電場の強さは $E = k_0\dfrac{Q}{x^2}$ となるので，金属球外部の電場は球の中心に電気量 Q の点電荷がある場合と等しくなる．よって，電位は

$$V(x) = k_0\frac{Q}{x}$$

となる．

(ii)　$x = R$ の場合

電位は

$$V(R) = k_0\frac{Q}{R}$$

となる．

(iii)　$x < R$ の場合

金属球内部に電場はできず，金属球内部の電位は一定となる．よっ

て，$x < R$ での電位は $x = R$ での電位の値と等しく

$$V(x) = k_0 \frac{Q}{R}$$

となる．

$V(x)$ のグラフは図のようになる．

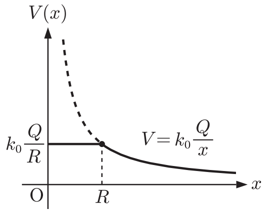


図 5.7

問題 5.14$^{\diamondsuit}$

(1)　スイッチを閉じて十分に時間が経過した後なので，極板間の電圧は電池の電圧と等しく $V_1 = V$ となる．また，電場の強さは $V = Ed$ より，$E_1 = \dfrac{V}{d}$ となる．このときのコンデンサーの電気容量を C_1 とすると $C_1 = \dfrac{\varepsilon_0 S}{d}$ なので，コンデンサーに蓄えられている電荷 Q_1 は $Q_1 = C_1 V_1 = \dfrac{\varepsilon_0 SV}{d}$ となる．

(2)　スイッチを閉じたままなので，極板間の電圧は $V_2 = V$ となる．また，電場の強さは $V_2 = E_2 \times 2d$ より，$E_2 = \dfrac{V}{2d}$ となる．このときのコンデンサーの電気容量を C_2 とすると $C_2 = \dfrac{\varepsilon_0 S}{2d}$ なので，コンデンサーに蓄えられている電荷 Q_2 は $Q_2 = C_2 V_2 = \dfrac{\varepsilon_0 SV}{2d}$ となる．

(3)　スイッチが開いているので電荷の移動はなく，コンデンサーに蓄えられている電荷は Q_1 と等しくなる．よって，$Q_3 = \dfrac{\varepsilon_0 SV}{d}$ となる．コンデンサーの極板に蓄えられて電荷は (1) の場合と等しいので極板間の電場の強さも等しく，$E_3 = \dfrac{V}{d}$ となる．また，極板間の電圧 V_3 は，$V_3 = E_3 \times 2d = 2V$ となる．

問題 5.15$^{\diamondsuit}$

(1)　$\mathrm{C_1}$ と $\mathrm{C_2}$ の合成容量を C' とすると，

$$\frac{1}{C'} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{1}{20\ \mu\mathrm{F}} + \frac{1}{30\ \mu\mathrm{F}} = \frac{1}{12\ \mu\mathrm{F}}$$

となるので，$C' = 12\ \mu\mathrm{F}$ となる．

(2)　$\mathrm{C_1}$，$\mathrm{C_2}$，$\mathrm{C_3}$ の合成容量を C'' とすると，

$$C'' = 12\ \mu\mathrm{F} + 8.0\ \mu\mathrm{F} = 20\ \mu\mathrm{F}$$

となる．

(3) 十分に時間が経過したのちのコンデンサー C_1，C_2，C_3 に蓄えられている電荷をそれぞれ Q_1，Q_2，Q_3 とする．
電気容量が C' であるコンデンサーに 10 V の電圧を加えたとき，コンデンサーに蓄えられる電気量を Q' とすると

$$Q' = C'V = (12 \times 10^{-6}\ \mathrm{F}) \times 10\ \mathrm{V} = 1.2 \times 10^{-4}\ \mathrm{C}$$

となる．よって，C_1，C_2 に蓄えられる電荷はともに

$$Q_1 = Q_2 = 1.2 \times 10^{-4}\ \mathrm{C}$$

となる．
また，コンデンサー C_3 にかかる電圧は 10 V なので，このコンデンサーに蓄えられている電荷は

$$Q_3 = (8.0 \times 10^{-6}\ \mathrm{F}) \times 10\ \mathrm{V} = 8.0 \times 10^{-5}\ \mathrm{C}$$

となる．

問題 5.16$^{\diamondsuit}$

(1) 極板 P_1P_2 間の電場は一様で，それぞれに $+Q$，$-Q$ の電荷が蓄えられているので，電場の強さ E とすると

$$E = \frac{Q}{\varepsilon_0 S}$$

となる．

(2) P_1P_2 間の電場の向きは P_1 から P_2 となるので，P_1 の電位を V とすると

$$V = Ed = \frac{Qd}{\varepsilon_0 S}$$

となる．

(3) スイッチ S を閉じてから十分に時間が経過したのちの極板 P_3 に蓄えられる電荷（P_1 から P_3 へ移動した電荷）を q とすると，それぞれの極板に蓄えられた電荷，および極板間の電場は図 5.8 のようになる．
極板 P_1P_2 間の電場の強さを E_1 とすると

$$E_1 = \frac{Q-q}{\varepsilon_0 S}$$

であり，P_2 の電位を基準としたときの P_1 の電位を V_1 とすると，

$$V_1 = E_1 d = \frac{(Q-q)d}{\varepsilon_0 S}$$

となる．また，極板 P_2P_3 間の電場の強さを E_2 とすると

$$E_2 = \frac{q}{\varepsilon_0 S}$$

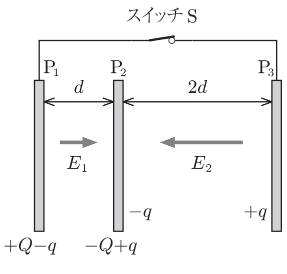


図 5.8

であり，P_2 の電位を基準としたときの P_3 の電位を V_3 とすると

$$V_3 = E_2 \cdot 2d = \frac{2qd}{\varepsilon_0 S}$$

となる．極板 P_1 と P_3 は導線でつながれているので等電位であるので $V_1 = V_3$ より

$$\frac{(Q-q)d}{\varepsilon_0 S} = \frac{2dq}{\varepsilon_0 S}$$

$$q = \frac{1}{3}Q$$

より，移動した電気量は $\frac{1}{3}Q$ となる．

問題 5.17$^{\diamond}$

何も挟まない場合のコンデンサーの電気容量 C_0 は

$$C_0 = \varepsilon_0 \frac{S}{d}$$

となる．

(a) コンデンサーに比誘電率 $\varepsilon_r = 2.0$ の誘電体を挿入したので，このコンデンサーの電気容量 C_1 は

$$C_1 = \varepsilon_r C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d} = \frac{2\varepsilon_0 S}{d} = 2C_0$$

となる．

(b) このコンデンサーの電気容量は極板間隔が $\frac{d}{2}$ だけ短くなったコンデンサーの電気容量と等しくなるので

$$C_2 = \varepsilon_0 \frac{S}{\frac{d}{2}} = \frac{2\varepsilon_0 S}{d} = 2C_0$$

となる．

(c) 図 5.9 のように，直列接続された 2 つのコンデンサーの合成容量と等しくなる．それぞれの電気容量を C_{31}，C_{32} とすると

$$C_{31} = \varepsilon_0 \frac{2S}{d},\ C_{32} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{2S}{d}$$

となる．よって，$\frac{1}{C_3} = \frac{1}{C_{31}} + \frac{1}{C_{32}}$ より

$$\frac{1}{C_3} = \frac{d}{2\varepsilon_0 S} + \frac{d}{2\varepsilon_0 \varepsilon_r S} = \frac{(1+\varepsilon_r)d}{2\varepsilon_0 \varepsilon_r S}$$

となるので，

$$C_3 = \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_r}{1+\varepsilon_r} \cdot \frac{S}{d} = \frac{4\varepsilon_0 S}{3d} = \frac{4}{3}C_0$$

となる．

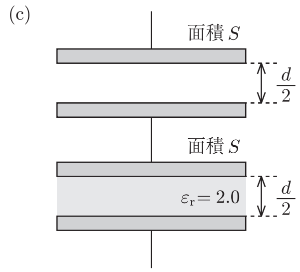


図 5.9

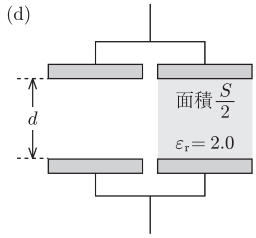


図 5.10

(d) 図 5.10 のように，並列接続された 2 つのコンデンサーの合成容量と等しくなる．それぞれの電気容量を C_{41}，C_{42} とすると

$$C_{41} = \varepsilon_0 \frac{\frac{S}{2}}{d} = \varepsilon_0 \frac{S}{2d},\ C_{42} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{2d}$$

となる．よって，$C_4 = C_{41} + C_{42}$ より

$$\begin{aligned} C_4 &= \varepsilon_0 \frac{S}{2d} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{2d} \\ &= \frac{(1+\varepsilon_r)\varepsilon_0}{2} \cdot \frac{S}{d} \\ &= \frac{3\varepsilon_0 S}{2d} = \frac{3}{2} C_0 \end{aligned}$$

となる．

問題 5.18$^{\diamondsuit}$

最初コンデンサーに蓄えられている電荷 Q_0 は $Q_0 = CV$，静電エネルギー U_0 は $U_0 = \dfrac{1}{2} CV^2$ である．

(1) 極板間隔を 2 倍に広げたので，このコンデンサーの電気容量を C_1 とすると，$C_1 = \dfrac{1}{2} C$ となる．スイッチを閉じたままなので電位差は変わらず V である．よって，コンデンサーに蓄えられている電荷を Q_1 とすると

$$Q_1 = C_1 V = \frac{1}{2} CV = \frac{1}{2} Q_0$$

となる．また，このときの静電エネルギーを U_1 とすると

$$U_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{C}{2} \right) V^2 = \frac{1}{4} CV^2 = \frac{1}{2} U_0$$

となる．

(2) コンデンサーに蓄えられている電荷を Q_2 とすると，スイッチを開けたままで極板間隔を広げたので，極板に蓄えられた電荷は変わらず

$$Q_2 = Q_0$$

である．また，このときのコンデンサーの電気容量を C_2 とすると，$C_2 = \dfrac{1}{2} C$ となる．よって，静電エネルギーを U_2 とすると

$$U_2 = \frac{Q_0^2}{2\left(\frac{1}{2} C\right)} = CV^2 = 2U_0$$

となる．

(3) このコンデンサーの電気容量は極板間隔が $\dfrac{1}{2}$ だけ短くなったコンデンサーの電気容量と等しくなるので，電気容量を C_3 とすると $C_3 = 2C$ となる．スイッチは閉じたままなので電位差は変わらず V である．

よって，極板に蓄えられた電荷を Q_3 とすると，

$$Q_3 = 2CV = 2Q_0$$

となる．また，静電エネルギーを U_3 とすると

$$U_3 = \frac{1}{2}(2C)V^2 = CV^2 = 2U_0$$

となる．

(4) コンデンサーに蓄えられている電荷を Q_4 とすると，スイッチを開けたままなので，極板に蓄えられた電荷は変わらず

$$Q_4 = Q_0$$

である．また，電気容量を C_4 とすると $C_4 = 2C$ となるので，静電エネルギーを U_4 とすると

$$U_4 = \frac{{Q_0}^2}{2\,(2C)} = \frac{1}{4}CV^2 = \frac{1}{2}U_0$$

となる．

問題 5.19$^{\diamondsuit}$

(1) $\mathrm{C_1}$，$\mathrm{C_2}$ に蓄えられた電荷をそれぞれ Q_1，Q_2 とすると

$$Q_1 = (12 \times 10^{-6}\ \mathrm{F}) \times 10\ \mathrm{V} = 1.2 \times 10^{-4}\ \mathrm{C}$$

となり，$Q_2 = 0$ C となる．また，静電エネルギーの和を U_1 とすると，

$$\begin{aligned} U_1 &= \frac{{Q_1}^2}{2C_1} + \frac{{Q_2}^2}{2C_2} \\ &= \frac{(1.2 \times 10^{-4}\ \mathrm{C})^2}{2 \times (12 \times 10^{-6}\ \mathrm{F})} + 0\ \mathrm{J} \\ &= 6.0 \times 10^{-4}\ \mathrm{J} \end{aligned}$$

となる．

(2) スイッチ $\mathrm{S_2}$ を閉じてから十分に時間が経過したのちのコンデンサー $\mathrm{C_1}$，$\mathrm{C_2}$ に蓄えられている電荷をそれぞれ Q_1'，Q_2' とする．スイッチ $\mathrm{S_2}$ を閉じる前後での電荷保存の法則より

$$Q_1' + Q_2' = 1.2 \times 10^{-5}\ \mathrm{C}$$

となる．また，十分に時間が経過したのちの 2 つのコンデンサーの電圧は等しいので

$$\frac{Q_1'}{12 \times 10^{-6}\ \mathrm{F}} = \frac{Q_2'}{3.0 \times 10^{-6}\ \mathrm{F}}$$

となる．これらを連立させて，$Q_1' = 9.6\times10^{-5}$ C, $Q_2' = 2.4\times10^{-5}$ C となる．また，静電エネルギーの和を U_2 とすると，

$$\begin{aligned} U_2 &= \frac{{Q_1'}^2}{2C_1} + \frac{{Q_2'}^2}{2C_2} \\ &= \frac{(9.6\times10^{-5}\ \mathrm{C})^2}{2\times(12\times10^{-6}\ \mathrm{F})} + \frac{(2.4\times10^{-5}\ \mathrm{C})^2}{2\times(3.0\times10^{-6}\ \mathrm{F})} \\ &= 4.8\times10^{-4}\ \mathrm{J} \end{aligned}$$

となる．

問題 5.20$^\diamondsuit$

(1) コンデンサーに蓄えられている静電エネルギー U_0 は

$$U_0 = \frac{Q^2}{2C_0}$$

となる．

(2) 極板間隔が d であるコンデンサーの電気容量 C_0 は誘電率を ε_0，極板面積を S とすると $C_0 = \varepsilon_0 \dfrac{S}{d}$ となるので，

$$C_1 = \varepsilon_0 \frac{S}{d+\Delta x} = \frac{d}{d+\Delta x} C_0$$

となる．また，静電エネルギー U_1 は

$$U_1 = \frac{Q^2}{2C_1} = \frac{Q^2(d+\Delta x)}{2C_0 d}$$

となる．

(3) 極板を引きはなすのに必要な力を F とする．この力がした仕事 $F\Delta x$ はコンデンサーが持つ静電エネルギーの変化量と等しいことより

$$\begin{aligned} F\Delta x &= U_1 - U_0 \\ &= \frac{Q^2(d+\Delta x)}{2C_0 d} - \frac{Q^2}{2C_0} \\ &= \frac{Q^2\Delta x}{2C_0 d} \end{aligned}$$

となり，極板間引力の大きさは $F = \dfrac{Q^2}{2C_0 d}$ とわかる．.

第 6 章

問題 6.1$^\heartsuit$

(1) 抵抗を流れる電流の大きさを I〔A〕とすると，オームの法則より

$$12\ \mathrm{V} = 50\ \Omega \times I$$

$$I = 0.24\ \mathrm{A}$$

となる．

(2)　抵抗の抵抗値を R〔Ω〕とすると，オームの法則より

$$60\ \mathrm{V} = R \times 20\ \mathrm{A}$$
$$R = 3.0\ \Omega$$

となる．

(3)　必要な電圧を V〔V〕とすると，オームの法則より

$$V = 30\ \Omega \times 3.0\ \mathrm{A} = 90\ \mathrm{V}$$

となる．

問題 6.2♡

抵抗値を R〔Ω〕とすると，$R = \rho\dfrac{l}{S}$，また $0.40\ \mathrm{cm^2} = 0.40 \times 10^{-4}\ \mathrm{m^2}$ より

$$R = (1.8 \times 10^{-8}\ \Omega \cdot \mathrm{m}) \times \frac{2.0\ \mathrm{m}}{0.40 \times 10^{-4}\ \mathrm{m^2}} = 9.0 \times 10^{-4}\ \Omega$$

となる．

問題 6.3♡

(1)　電流の向きは自由電子が動く向きとは逆なので，左向きとなる．

(2)　Δt〔s〕間に導線の断面を通過する電気量が ΔQ であるとき，電流の大きさ I は $I = \dfrac{\Delta Q}{\Delta t}$ となる．よって，1.0 s 間に断面を通過する自由電子の個数を N 個とすると

$$0.80\ \mathrm{A} = \frac{(1.6 \times 10^{-19}\ \mathrm{C}) \times N}{1.0\ \mathrm{s}}$$
$$N = 5.0 \times 10^{18}\ 個$$

となる．

(3)　自由電子の平均の速さを v とすると，電流の大きさ I は $I = envS$ となるので，

$$\begin{aligned} v &= \frac{I}{enS} \\ &= \frac{0.80\ \mathrm{A}}{(1.6 \times 10^{-19}\ \mathrm{C}) \times (8.5 \times 10^{28}\ \mathrm{m^{-3}}) \times (2.0 \times 10^{-7}\ \mathrm{m^2})} \\ &= 2.9 \times 10^{-4}\ \mathrm{m/s} \end{aligned}$$

となる．

問題 6.4♡

(a)　合成抵抗を R とすると，2 つの抵抗は直列接続なので

$$R = R_1 + R_2$$

となる．

(b) 合成抵抗を R とすると，2 つの抵抗は並列接続なので

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

より，$R = \dfrac{R_1R_2}{R_1+R_2}$ となる．

(c) 抵抗値が R_2 と R_3 の抵抗は並列接続なので，その合成抵抗は $\dfrac{R_2R_3}{R_2+R_3}$ となる．よって，3 つ抵抗の合成抵抗を R とすると

$$R = R_1 + \frac{R_2R_3}{R_2+R_3}$$

となる．

問題 6.5$^{\heartsuit}$

(1) AB 間の合成抵抗を R_{AB} とすると，

$$\frac{1}{R_{\mathrm{AB}}} = \frac{1}{10\ \Omega} + \frac{1}{15\ \Omega} = \frac{1}{6\ \Omega}$$

より，$R_{\mathrm{AB}} = 6.0\ \Omega$ となる．

(2) 抵抗値が R_3 の抵抗での電圧降下は $15\ \Omega \times 0.30\ \mathrm{A} = 4.5\ \mathrm{V}$ となる．よって，抵抗値が R_2 の抵抗に流れる電流の大きさを I_2 とすると，

$$I_2 = \frac{4.5\ \mathrm{V}}{10\ \Omega} = 0.45\ \mathrm{A}$$

となる．また，抵抗値が R_1 の抵抗に流れる電流の大きさを I_1 とすると，

$$I_1 = 0.45\ \mathrm{A} + 0.30\ \mathrm{A} = 0.75\ \mathrm{A}$$

となる．

(3) 抵抗値が R_1 の抵抗での電圧降下は $10\ \Omega \times 0.75\ \mathrm{A} = 7.5\ \mathrm{V}$ となるので，

$$E = 7.5\ \mathrm{V} + 4.5\ \mathrm{V} = 12\ \mathrm{V}$$

となる．

問題 6.6$^{\heartsuit}$

(1) ニクロム線に流れる電流の大きさを I_1〔A〕とすると，$P = VI$ より

$$I_1 = \frac{100\ \mathrm{W}}{100\ \mathrm{V}} = 1\ \mathrm{A}$$

となる．また，抵抗値を R〔Ω〕とすると，オームの法則より

$$R = \frac{100\ \mathrm{V}}{1\ \mathrm{A}} = 100\ \Omega$$

となる．

(2) ニクロム線の抵抗値は長さに比例するので，長さを半分にしたときの抵抗値は $\dfrac{100\ \Omega}{2} = 50\ \Omega$ となる．よって，抵抗に流れる電流の大きさを I_2 とするとオームの法則より

$$I_2 = \frac{100\ \mathrm{V}}{50\ \Omega} = 2\ \mathrm{A}$$

となる．また，消費電力を P とすると

$$P = 2\ \mathrm{A} \times 100\ \mathrm{V} = 200\ \mathrm{W}$$

となる．

(3) 発生するジュール熱を Q〔J〕とすると，3 分 $= 180$ s より

$$Q = 200\ \mathrm{W} \times 180\ \mathrm{s} = 3.6 \times 10^4\ \mathrm{J}$$

となる．

問題 6.7$^\diamondsuit$

(1) スイッチが閉じている状態での白熱電球にかかる電圧を V〔V〕，電流の大きさを I〔A〕とすると，キルヒホッフの法則より

$$100\ \mathrm{V} - V - (100\ \Omega)I = 0\ \mathrm{V}$$

すなわち，

$$I = -\frac{1}{100\ \Omega}V + 1\ \mathrm{A}$$

の関係が成り立つ．よって，この式の直線と図の曲線の交点を求めると，白熱電流になれる電流の大きさは 0.60 A とわかる．

(2) スイッチが閉じている状態での白熱電球にかかる電圧を V，電流の大きさを I とする．スイッチが閉じている状態では抵抗値が 50 Ω の抵抗にも電流が流れ，その大きさを I_1 とすると，$I_1 = \dfrac{V}{50\ \Omega}$ となる．抵抗値が 100 Ω の抵抗には $I + I_1 = I + \dfrac{V}{50\ \Omega}$ の電流が流れるので，電圧降下は $(100\ \Omega)\left(I + \dfrac{V}{50\ \Omega}\right)$ となる．よって，キルヒホッフの法則より

$$100\ \mathrm{V} - V - (100\ \Omega)\left(I + \frac{V}{50\ \Omega}\right) = 0\ \mathrm{V}$$

すなわち，

$$3V + (100\ \Omega)I = 100\ \mathrm{V}$$

$$I = -\frac{3}{100\ \Omega}V + 1\ \mathrm{A}$$

の関係が成り立つ．よって，図 6.1 のように，この式を表す直線と図の曲線の交点を求めて，白熱電流になれる電流の大きさは 0.40 A となる．

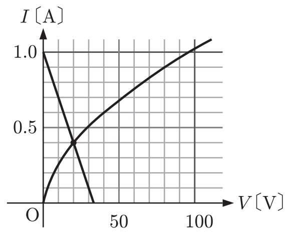


図 6.1

問題 6.8$^{\diamondsuit}$

各抵抗に流れる電流の向きと大きさを図のようにおく．キルヒホッフの第1法則より

$$I_1 + I_2 = I_3$$

となる．また，キルヒホッフの第2法則より

$$(\text{閉回路 I}):\ 14\ \mathrm{V} - (30\ \Omega)I_1 - (10\ \Omega)I_3 = 0\ \mathrm{V}$$
$$(\text{閉回路 II}):\ 9\ \mathrm{V} - (10\ \Omega)I_3 - (20\ \Omega)I_2 = 0\ \mathrm{V}$$

となる．これらを連立させて，$I_1 = 0.30\ \mathrm{A}$，$I_2 = 0.20\ \mathrm{A}$，$I_3 = 0.50\ \mathrm{A}$ となる．よって，

$$(\text{抵抗 } R_1):\ \text{左向きに } 0.30\ \mathrm{A}$$
$$(\text{抵抗 } R_2):\ \text{左向きに } 0.20\ \mathrm{A}$$
$$(\text{抵抗 } R_3):\ \text{下向きに } 0.50\ \mathrm{A}$$

となる．

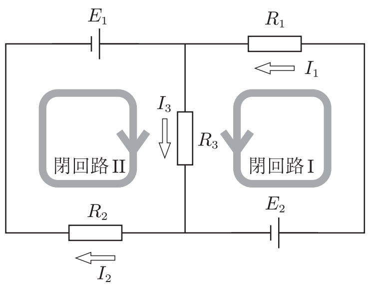


図 6.2

問題 6.9$^{\diamondsuit}$

(1)　各抵抗に流れる電流の向きと大きさを図のようにおく．キルヒホッフの第1法則より

$$I_1 + I_3 = I_2$$

となる．また，キルヒホッフの第2法則より

$$(\text{閉回路 I}):\ 6.0\ \mathrm{V} - (5.0\ \Omega)I_1 - (10\ \Omega)I_2 = 0\ \mathrm{V}$$
$$(\text{閉回路 II}):\ 4.0\ \mathrm{V} - RI_3 + (5.0\ \Omega)I_1 = 0\ \mathrm{V}$$

となる．これらを連立させて，$I_1 = \dfrac{2\{(3\ \mathrm{A})R - 20\ \mathrm{V}\}}{5(3R + 10\ \Omega)}$，$I_2 = \dfrac{2\{(3\ \mathrm{A})R + 25\ \mathrm{V}\}}{5(3R + 10\ \Omega)}$ となる．

(2)　$I_1 = 0$ A となる R を求めればよい．よって，$(3\text{ A})R - 20\text{ V} = 0\text{ V}$ より，$R = \dfrac{20\text{ V}}{3\text{ A}} = 6.7\ \Omega$ となる．

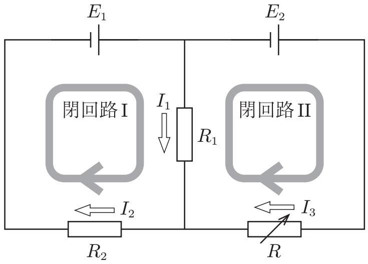


図 6.3

問題 6.10◇

(1)　スイッチを閉じた直後のコンデンサーの電圧は 0 V である．よって，スイッチを入れた直後の抵抗値が R_1 である抵抗を流れる電流の大きさを I_1〔A〕とすると

$$30\text{ V} = 10\ \Omega \times I_1$$
$$I_1 = 3.0\text{ A}$$

となる．

(2)　十分に時間が経過したのちにはコンデンサーには電流が流れ込まない．よって，十分に時間が経過したのちの抵抗値が R_1 である抵抗を流れる電流の大きさを I_2〔A〕とすると

$$30\text{ V} = (10\ \Omega + 20\ \Omega) \times I_2$$
$$I_2 = 1.0\text{ A}$$

となる．

第 7 章

問題 7.1♡

磁場の強さを H〔N/Wb〕とすると

$$H = \frac{F}{m} = \frac{6.0 \times 10^{-3}\text{ N}}{2.0 \times 10^{-4}\text{ Wb}} = 3.0 \times 10^{1}\text{ N/Wb}$$

問題 7.2$^{\heartsuit}$

(1)

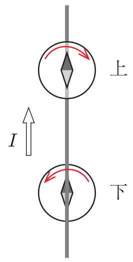


図 7.1

また，電流の向きを逆（下向き）にしたときは，方位磁針が振れる方向はすべて逆となる．

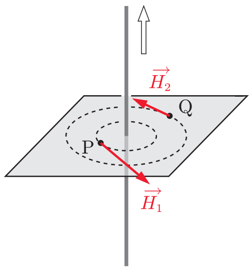


図 7.2

(2) 点 P の磁場を $\vec{H}_1$ とすると

$$\text{向き：円の接線方向（図の矢印の向き）}$$

$$\text{大きさ：} H_1 = \frac{4.0\ \mathrm{A}}{2\pi \times 0.10\ \mathrm{m}} = 6.4\ \mathrm{A/m}$$

となる．また，磁束密度の大きさを B_1〔T〕とすると

$$B_1 = \frac{(1.26 \times 10^{-6}\ \mathrm{N/A^2}) \times 4.0\ \mathrm{A}}{2\pi \times 0.10\ \mathrm{m}} = 8.0 \times 10^{-6}\ \mathrm{T}$$

となる．

点 Q の磁場を $\vec{H}_2$ とすると

$$\text{向き：円の接線方向（図の矢印の向き）}$$

$$\text{大きさ：} H_2 = \frac{4.0\ \mathrm{A}}{2\pi \times 0.20\ \mathrm{m}} = 3.2\ \mathrm{A/m}$$

となる．また，磁束密度の大きさを B_2〔T〕とすると

$$B_1 = \frac{(1.26 \times 10^{-6}\ \mathrm{N/A^2}) \times 4.0\ \mathrm{A}}{2\pi \times 0.20\ \mathrm{m}} = 4.0 \times 10^{-6}\ \mathrm{T}$$

となる．

問題 7.3$^{\heartsuit}$

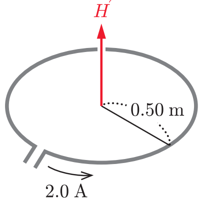


図 7.3

(1) コイルの中心の磁場を $\vec{H}$ とすると

$$\text{向き：図の矢印の向き}$$

$$\text{大きさ：} H = \frac{2.0\ \mathrm{A}}{2 \times 0.50\ \mathrm{m}} = 2.0\ \mathrm{A/m}$$

となる．

(2) コイルを n 重巻きにすると磁場の強さは n 倍となる．よって，2 重巻にすると磁場の強さは 2 倍になる．

問題 7.4♡

単位長さあたりの巻き数は $n = \dfrac{500}{0.20\ \mathrm{m}} = 2500\ \mathrm{m}^{-1}$ となる．よって，ソレノイド内部の磁場の強さ H は

$$\begin{aligned} H &= nI \\ &= 2500\ \mathrm{m}^{-1} \times (4.0 \times 10^{-2}\ \mathrm{A}) \\ &= 1.0 \times 10^{2}\ \mathrm{A/m} \end{aligned}$$

となる．

問題 7.5♡

(1)　導線を流れる電流が受ける力を $\vec{F}$ とすると，

向き：図の矢印の向き

大きさ：$F = IBl = 5.0\ \mathrm{A} \times 0.40\ \mathrm{T} \times (10 \times 10^{-2}\ \mathrm{m}) = 0.20\ \mathrm{N}$

となる．

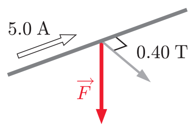


図 7.4

(2) 磁束密度 $\vec{B}$ の磁場の向きから角度 θ だけ傾いた向きに大きさ I の電流が流れているとき，電流の長さ l の部分に働く力 $\vec{F}$ の大きさは

$$F = IBl \sin\theta$$

となるので

(a)　$F = 3.0\ \mathrm{A} \times 0.20\ \mathrm{T} \times (20 \times 10^{-2}\ \mathrm{m}) \times \sin 0^\circ = 0\ \mathrm{N}$

(b)　$F = 3.0\ \mathrm{A} \times 0.20\ \mathrm{T} \times (20 \times 10^{-2}\ \mathrm{m}) \times \sin 90^\circ = 1.2 \times 10^{-1}\ \mathrm{N}$

(c)　$F = 3.0\ \mathrm{A} \times 0.20\ \mathrm{T} \times (20 \times 10^{-2}\ \mathrm{m}) \times \sin 30^\circ = 6.0 \times 10^{-2}\ \mathrm{N}$

となる．

問題 7.6♡

(1) 導線 A，B を流れる電流が導線 C の位置につくる磁場をそれぞれ $\vec{H}_1$，$\vec{H}_2$ とすると，その向きは図のようになる．（ここで，$\vec{H}_1$ は AC に垂直，$\vec{H}_2$ は BC に垂直である．）

また，それぞれの磁束密度を $\vec{B}_1$，$\vec{B}_2$ とすると，その大きさはどちらも

$$B_1 = B_2 = \frac{(1.26 \times 10^{-6}\ \mathrm{N/A^2}) \times 2.0\ \mathrm{A}}{2\pi \times 0.20\ \mathrm{m}} = 2.0 \times 10^{-6}\ \mathrm{T}$$

となる．よって，導線 C での磁束密度を $\vec{B}$ とすると，$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$ であることより

向き：上向き

大きさ：$B = (B_1 \cos 60^\circ) \times 2 = 2.0 \times 10^{-6}\ \mathrm{T}$

となる．

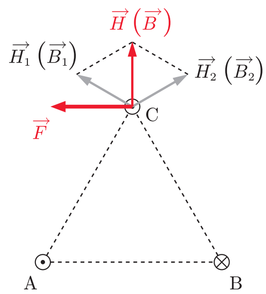


図 7.5

(2)　導線 C を流れる電流が受ける力を $\vec{F}$ の向きと長さ 1.0 m あたりが受ける力の大きさは

$$\text{向き：左向き}$$

$$\text{大きさ：}\ F = 2.0\ \mathrm{A} \times (2.0 \times 10^{-6}\ \mathrm{T}) \times 1.0\ \mathrm{m} = 4.0 \times 10^{-6}\ \mathrm{N}$$

となる．

問題 7.7$^{\heartsuit}$

(1)　自由電子が動く向きは電流の向きとは逆なので，左向きとなる．

(2)　自由電子の総数 N は

$$\begin{aligned} N &= (\text{電子の個数の密度}) \times (\text{体積}) \\ &= n \times (Sl) \\ &= nSl \end{aligned}$$

となる．

(3)　電流の大きさは $I = envS$ となることより，

$$\begin{aligned} f \times N &= (evB) \times (nSl) \\ &= IBl \end{aligned}$$

となる．よって，自由電子が磁場から受ける力 $f = evB$ の総和は，電流が磁場から受ける力 $F = IBl$ と等しくなることがわかる．

問題 7.8$^{\heartsuit}$

(1)　荷電粒子の円運動は時計回りとなるので，荷電粒子が磁場から受ける力の向きは運動する向きに対して右であることがわかる．よって，磁場の向きは紙面奥から手前向きとなる．

(2)　磁場から受ける力の大きさを f とすると

$$f = qvB$$

となる．

(3)　荷電粒子は磁場から受ける力を向心力として円運動する．よって，円運動の運動方程式は円運動の半径が a であることより，

$$m\frac{v^2}{a} = qvB$$

$$v = \frac{qBa}{m}$$

となる．

(4)　O から A に達するまでにかかる時間は円運動の周期 T の半分となる

ので

$$\frac{T}{2} = \frac{\frac{2\pi a}{v}}{2} = \frac{2\pi a}{2v} = \frac{\pi m}{qB}$$

となる．

問題 7.9♡

導体棒を流れる電流が磁場から受ける力の大きさを F とすると，$F = IBl$ となる．また，垂直抗力の大きさを N とすると，力のつりあいより

$$N\sin\theta = F$$
$$N\cos\theta = mg$$

となるので，$F = mg\tan\theta$ となる．よって，

$$IBl = mg\tan\theta$$
$$I = \frac{mg\tan\theta}{Bl}$$

となる．

問題 7.10

(1) (a) $m\dfrac{{v_1}^2}{r_1} = ev_1B$ より，$r_1 = \dfrac{mv_1}{eB}$ となる．

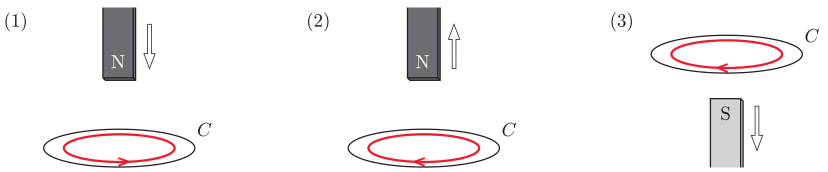
(b) 周期 T_1 は，$T_1 = \dfrac{2\pi r_1}{v_1} = \dfrac{2\pi m}{eB}$ となる．

(2) (a) $\dfrac{1}{2}m{v_2}^2 - \dfrac{1}{2}m{v_1}^2 = eV$ より，$v_2 = \sqrt{{v_1}^2 + \dfrac{2eV}{m}}$ となる．

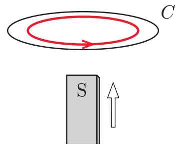
(b) $\mathrm{D_2}$ での円運動の半径を r_2 とすると，$m\dfrac{{v_2}^2}{r_2} = ev_2B$ より，$r_2 = \dfrac{mv_2}{eB}$ となる．よって，周期 T_2 は，$T_2 = \dfrac{2\pi r_2}{v_2} = \dfrac{2\pi m}{eB}$ となる．ここで，$T_2 = T_1$ となることに注意しよう．

第 8 章

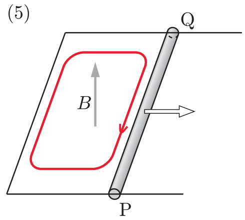
問題 8.1♡



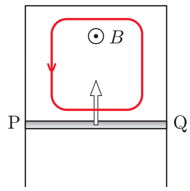
(4)



(5)



(6)



問題 8.2♡

誘導起電力を $V(t)$ とする．また，コイルの貫く磁束を Φ とすると，その変化量は断面積 S が一定であることより $\Delta\Phi = \Delta B \times S$ となる．

(i)　$0\ \mathrm{s} \leq t < 2.0 \times 10^{-2}\ \mathrm{s}$ のとき

このときの誘導起電力の大きさは

$$\left| -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right| = \left| -100 \times \frac{(2.0 \times 10^{-2}\ \mathrm{T}) \times (2.0 \times 10^{-3}\ \mathrm{m}^2)}{2.0 \times 10^{-2}\ \mathrm{s}} \right|$$
$$= 2.0 \times 10^{-1}\ \mathrm{V}$$

となる．また，レンツの法則より，Y に対して X の電位は高くなるので，

$$V(t) = 2.0 \times 10^{-1}\ \mathrm{V}$$

となる．

(ii)　$2.0 \times 10^{-2}\ \mathrm{s} \leq t < 4.0 \times 10^{-2}\ \mathrm{s}$ のとき

このときの誘導起電力の大きさは

$$\left| -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right| = \left| -100 \times \frac{0\ \mathrm{T} \times (2.0 \times 10^{-3}\ \mathrm{m}^2)}{2.0 \times 10^{-2}\ \mathrm{s}} \right|$$
$$= 0\ \mathrm{V}$$

となる．よって，

$$V(t) = 0\ \mathrm{V}$$

となる．

(iii)　$4.0 \times 10^{-2}\ \mathrm{s} \leq t < 8.0 \times 10^{-2}\ \mathrm{s}$ のとき

このときの誘導起電力の大きさは

$$\left| -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right| = \left| -100 \times \frac{(-2.0 \times 10^{-2}\ \mathrm{T}) \times (2.0 \times 10^{-3}\ \mathrm{m}^2)}{4.0 \times 10^{-2}\ \mathrm{s}} \right|$$
$$= 1.0 \times 10^{-1}\ \mathrm{V}$$

となる．また，レンツの法則より，Y に対して X の電位は低くなるので，

$$V(t) = -1.0 \times 10^{-1}\ \mathrm{V}$$

となる．

$V(t)$ のグラフは以下のようになる．

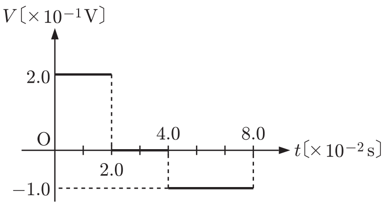


図 **8.1**

問題 8.3$^\heartsuit$

導体棒を矢印の向きに一定の速さで動かしたとき，導体棒中の自由電子は磁場から P→Q の向きに大きさ $F_{\mathrm{B}} = evB$ のローレンツ力を受けて導体棒の Q 側へ移動する．このため，導体中には P→Q の向きに電場が生じ，この電場からも大きさ $F_{\mathrm{E}} = eE$ の力を受ける．やがて，この 2 つの力がつりあう状態となると自由電子の移動がとまる．このときの電場の強さは $F_{\mathrm{B}} = F_{\mathrm{E}}$ より $E = vB$ となり，このときの PQ 間の電位差を V とすると

$$V = El = vBl$$

となる．この電位差は導体棒を速さ v で動かし続ける限り生じる．以上より

電位が高いのは：P

誘導起電力の大きさ：$V = vBl$

となる．

問題 8.4$^\heartsuit$

(1) 誘導起電力の大きさは vBl となる．また，P に対して Q の電位は低くなるので，

$$V = -vBl$$

となる．

(2) レンツの法則より，導体棒を流れる電流の向きは Q→P となる．また，電流の大きさを I とすると

$$I = \frac{V}{R} = \frac{vBl}{R}$$

となる．

(3) 抵抗 R で消費される電力 P_1 は

$$P_1 = IV$$

$$= (vBl) \times \frac{vBl}{R}$$
$$= \frac{v^2B^2l^2}{R}$$

となる．

(4)　導体棒を流れる電流が磁場から受ける力の大きさを F' とすると

$$F' = IBl = \frac{vB^2l^2}{R}$$

となる．よって，導体棒を一定の速さで運動をさせるために必要な力の大きさを F とすると

$$F = F' = \frac{vB^2l^2}{R}$$

となる．

(5)　(4) の力がした仕事率 P_2 は

$$P_2 = Fv = \frac{vB^2l^2}{R} \times v = \frac{v^2B^2l^2}{R}$$

となる．

問題 8.5$^\heartsuit$

(1)　導体棒 PQ に流れる電流の

$$\text{向き：}\ \mathrm{P} \to \mathrm{Q}$$
$$\text{大きさ：}\ I = \frac{vBl\cos\theta}{R}$$

となる．

(2)　導体棒 PQ に働くローレンツ力の大きさは

$$F = IBl = \frac{vB^2l^2\cos\theta}{R}$$

となる．

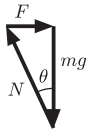


図 8.2

(3)　導体棒の速さが一定であると，働く力はつりあう．レースから導体棒に働く垂直抗力の大きさを N とすると，力のつりあいより

$$N\sin\theta = F$$
$$N\cos\theta = mg$$

となるので，$F = mg\sin\theta$ となる．よって，

$$\frac{vB^2l^2\cos\theta}{R} = mg\tan\theta$$
$$v = \frac{mgR\tan\theta}{B^2l^2\cos\theta}$$

となる．

問題 8.6♡

(1)　導体棒が磁場から受ける力の大きさを F_1，垂直抗力の大きさを N_1 とすると，力のつり合いより

$$N_1 \sin\theta = F_1$$
$$N_1 \cos\theta = mg$$

となるので，

$$F_1 = mg\tan\theta$$

また，導体棒を流れる電流の大きさは $I_1 = \dfrac{E}{R_0}$ なので，

$$F_1 = I_1 Bl = \frac{EBl}{R_0}$$

であり，

$$mg\tan\theta = \frac{EBl}{R_0}$$
$$R_0 = \frac{EBl}{mg\tan\theta}$$

となる．

(2)　導体棒が磁場から受ける力の大きさを F_2 とすると，斜面に沿っての運動方程式は，

$$ma = F_2\cos\theta - mg\sin\theta$$

となる．また，導体棒を流れる電流の大きさは $I_2 = \dfrac{E}{R_1}$ なので，

$$F_2 = I_2 Bl = \frac{EBl}{R_1}$$

である．よって，

$$a = \frac{EBl\cos\theta}{mR_1} - g\sin\theta$$

となる．

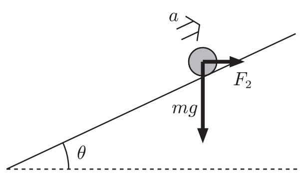


図 8.3

(3)　斜面に沿って速さ v で動くとき，導体棒に生じる誘導起電力は Q に対して P の電位が高く，その大きさ V は

$$V = vBl\cos\theta$$

となる．よって，導体棒を流れる電流の大きさを I_3 とすると

$$I_3 = \frac{E - vBl\cos\theta}{R}$$

となる（$vBl\cos\theta$ の負符号はレンツの法則より明らか）．一定の速さで動くとき，斜面方向力のつり合いより，

$$F_3\cos\theta = mg\sin\theta$$

が成立しないといけない．また，

$$F_3 = I_3 Bl = \frac{Bl(E - vBl\cos\theta)}{R}$$

であるので，

$$\begin{aligned}\frac{Bl(E - vBl\cos\theta)}{R}\cos\theta &= mg\sin\theta \\ E - vBl\cos\theta &= \frac{mgR\tan\theta}{Bl} \\ v &= \frac{1}{Bl\cos\theta}\left(E - \frac{mgR\tan\theta}{Bl}\right)\end{aligned}$$

となる．

問題 8.7

(1) スイッチ S を閉じた瞬間，コイルには誘導起電力が生じて電流の変化が妨げられる．よって，回路を流れる電流の大きさ $I_0 = 0$ A となる．

(2) キルヒホッフの第 2 法則より

$$\begin{aligned}&9.0\ \mathrm{V} - V - 30\ \Omega \times 0.20\ \mathrm{A} = 0\ \mathrm{V} \\ &V = 3.0\ \mathrm{V}\end{aligned}$$

となる．

(3) 自己インダクタンス L のコイルを流れる電流を I とすると，コイルに生じる誘導起電力は $V = -L\dfrac{dI}{dt}$ となる．よって，

$$\begin{aligned}-3.0\ \mathrm{V} &= -(0.15\ \mathrm{H})\frac{dI}{dt} \\ \frac{dI}{dt} &= 20\ \mathrm{A/m}\end{aligned}$$

となる．

(4) スイッチ S を閉じてから十分に時間が経過した後は，電流の大きさは一定となるので $\dfrac{dI}{dt} = 0$ A/s となり，コイルの両端の電圧は 0 V となる．よって，オームの法則より

$$\begin{aligned}9.0\ \mathrm{V} &= 30\ \Omega \times I \\ I &= 0.30\ \mathrm{A}\end{aligned}$$

となる．

(5) コイルに蓄えられているエネルギーは

$$\begin{aligned}U &= \frac{1}{2}LI^2 \\ &= \frac{1}{2} \times (0.15\ \mathrm{H}) \times (0.30\ \mathrm{A})^2 \\ &= 6.75 \times 10^{-3}\ \mathrm{J}\end{aligned}$$

$$= 6.8 \times 10^{-3}\ \mathrm{J}$$

となる.

問題 8.8$^{\diamondsuit}$

(1) コイルを貫く磁束 $\Phi(0)$〔Wb〕は

$$\Phi(0) = BS$$

となる.

(2) ある時刻 t〔s〕のとき，コイルは鉛直上向きを始線として反時計回りに ωt だけ回転している．よって，図よりコイルを貫く磁束 $\Phi(t)$ は

$$\Phi(t) = B \times (S\cos\omega t) = BS\cos\omega t$$

となる.

(3) コイルに生じる誘導起電力 $V(t)$〔V〕は

$$V(t) = -n\frac{d\Phi}{dt}$$
$$= nBS\omega\sin\omega t$$

となる.

問題 8.9$^{\diamondsuit}$

(1) この交流の電圧の最大値はグラフより $V_0 = 100$ V となる．また，実効値は $V_e = \dfrac{V_0}{\sqrt{2}} = 50\sqrt{2}$ V $= 71$ V となる.

(2) この交流の周期 T はグラフより $T = 2.0 \times 10^{-2}$ s となる．よって，周波数を f とすると

$$f = \frac{1}{T}$$
$$= \frac{1}{2.0 \times 10^{-2}\ \mathrm{s}}$$
$$= 5.0 \times 10^{1}\ \mathrm{Hz}$$

となる.

(3) オームの法則より，抵抗を流れる電流は $I = \dfrac{V}{R}$ となる．よって，抵抗を流れる電流のグラフは図 8.4 のようになる.

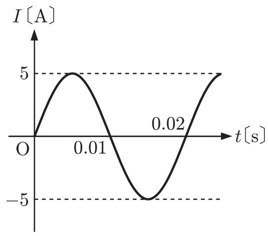


図 8.4

問題 8.10$^{\diamondsuit}$

(A) 交流電源の起電力とコンデンサーの両端の電圧は等しくなる．よって，コンデンサーに蓄えられている電荷を Q とすると，コンデンサーの両端の電圧は $\dfrac{Q}{C}$ となるので,

$$\frac{Q}{C} = V_0\sin\omega t$$

$$Q = CV_0 \sin\omega t$$

となる．よって，回路を流れる電流はコンデンサーに流れ込む電流の大きさと等しく

$$\begin{aligned} I(t) &= \frac{dQ}{dt} \\ &= \omega C V_0 \cos\omega t \\ &= \frac{V_0}{\frac{1}{\omega C}} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned}$$

となる．

(B) コイルに流れる電流が I であるとき，コイルに生じる誘導起電力は $-L\dfrac{dI}{dt}$ である．よって，キルヒホッフの第 2 法則より

$$\begin{aligned} V - L\frac{dI}{dt} &= 0 \text{ V} \\ \frac{dI}{dt} &= \frac{V_0}{L}\sin\omega t \end{aligned}$$

となるので，

$$\begin{aligned} I(t) &= -\frac{V_0}{\omega L}\cos\omega t \\ &= \frac{V_0}{\omega L}\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned}$$

となる．

問題 8.11$^\diamondsuit$

(1) 回路全体のインピーダンスの大きさは

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{2\pi f C}\right)^2}$$

となる．

(2) 抵抗にかかる電圧の実効値 V_1 は

$$V_1 = I_e R$$

となる．また，コンデンサーにかかる電圧の実効値 V_2 は

$$V_2 = I_e \times \frac{1}{2\pi f C} = \frac{I_e}{2\pi f C}$$

となる．

(3) $V_e = I_e Z$ より

$$I_e = \frac{V_e}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{2\pi f C}\right)^2}}$$

となる．

問題 8.12$^\diamondsuit$

(1) 回路全体のインピーダンスの大きさは

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

となる．

(2) $V_e = I_e Z$ より

$$I_e = \frac{V_e}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

となる．

(3) 消費電力の平均値を $\bar{P}$ とすると，

$$\bar{P} = \frac{I_0 V_0}{2}\cos\alpha = I_e V_e \cos\alpha$$

となる．ここで，$\tan\alpha = \dfrac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$ である．また，$I_e = \dfrac{V_e}{Z}$，$\cos\alpha = \dfrac{R}{Z}$ となるので，

$$\begin{aligned}\bar{P} &= \frac{V_e}{Z}\cdot V_e \cdot \frac{R}{Z}\\ &= \frac{R}{Z^2}V_e^2\\ &= \frac{R}{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}V_e^2\end{aligned}$$

となる．

(4) Z が最小となるとき回路を流れる電流が最小となり，(1) より $\omega L - \dfrac{1}{\omega C} = 0\ \Omega$ のとき，つまり

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

のとき，回路を流れる電流は最小となる．また，このときの周波数 f_0 は

$$f_0 = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

となる．

問題 8.13$^\diamondsuit$

(1) コンデンサーに蓄えられている電荷が $+q(t)$，$-q(t)$ であるとき，回路を流れる電流を反時計回りを正として $I(t)$ とする．このとき，

$$I(t) = \frac{dq(t)}{dt}$$

となる．また，コンデンサーの極板間の電位差は $\dfrac{q}{C}$ であり，コイルに生じる誘導起電力は $-L\dfrac{dI}{dt}$ となるので，キルヒホッフの第 2 法則より

$$-L\frac{dI}{dt}-\frac{q}{C}=0\ \mathrm{V}$$

となる．よって，

$$\frac{d^2q}{dt^2}=-\frac{1}{LC}q$$

となるので，振動の周期は $T=2\pi\sqrt{LC}$ となり，周波数は $f=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ となる．

(2) コンデンサーに蓄えられていたエネルギーがすべてコイルに蓄えられるエネルギーになったとき，回路を流れる電流の大きさは最大となるので，

$$\frac{1}{2}LI^2=\frac{1}{2}CV_0^2$$
$$I=V_0\sqrt{\frac{C}{L}}$$

となる．

第 9 章

問題 9.1◇

(1) 速さに比例する空気抵抗は油滴の落下の速さの増加と主に大きくなり，重力とつりあったところで落下の速さは一定となる．よって，

$$mg=kv_0$$
$$v_0=\frac{mg}{k}$$

となる．

(2) 重力が電場から受ける静電気力の大きさとつりあえば油滴は静止する．よって，

$$mg=qE$$
$$E=\frac{mg}{q}$$

となる．

(3) (1)(2) より，

$$kv_0=qE$$
$$q=\frac{kv_0}{E}$$

となる．

(4)　測定値を小さいものから並びかえると

$$4.86,\ 8.05,\ 9.67,\ 11.25,\ 16.02\ 〔\times 10^{-19}\ \mathrm{C}〕$$

となり，互いに隣り合う値の差は

$$3.19,\ 1.62,\ 1.58,\ 4.77\ 〔\times 10^{-19}\ \mathrm{C}〕$$

となる．さらに，もう一度小さいものから並べかえて差をとると，

$$0.04,\ 1.57,\ 1.58\ 〔\times 10^{-19}\ \mathrm{C}〕$$

となり，これらの値はおよそ 1.6 の整数倍になっていることがわかる．
また，それぞれの測定値はおおよそ $1.6(\times 10^{-19})$ の

5 倍，7 倍，6 倍，3 倍，10 倍

となっているので，電気素量の値は

$$\begin{aligned} e &= \frac{8.05+11.25+9.67+4.86+16.02}{5+7+6+3+10} \times 10^{-19}\ \mathrm{C} \\ &= 1.61 \times 10^{-19}\ \mathrm{C} \end{aligned}$$

と求められる．

問題 9.2$^{\heartsuit}$

光子のエネルギーおよび運動量はそれぞれ

$$\text{エネルギー：}\ \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6.6\times 10^{-34}\ \mathrm{J{\cdot}s})\times(3.0\times 10^{8}\ \mathrm{m/s})}{3.3\times 10^{-7}\ \mathrm{m}} = 6.0\times 10^{-19}\ \mathrm{J}$$

$$\text{運動量：}\ \frac{h}{\lambda} = \frac{6.6\times 10^{-34}\ \mathrm{J{\cdot}s}}{3.3\times 10^{-7}\ \mathrm{m}} = 2.0\times 10^{-27}\ \mathrm{kg\cdot m/s}$$

となる．

問題 9.3$^{\diamondsuit}$

(1)　極板 P，Q 間の電場の強さを E とすると，

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

となる．

(2)　極板 P，Q 間を通り抜けるのにかかる時間を t とすると，x 軸方向の運動は等速運動なので

$$t = \frac{l}{v}$$

となる．

(3)　極板 P，Q 間では電子には $F = eE = \dfrac{eV}{d}$ の力が y 軸方向に働くので，電子の加速度の y 軸方向の成分は $a_y = \dfrac{eV}{md}$ となる．よって，極

板 P，Q 間から出た直後の電子の速度の y 軸方向の成分 v_y は，

$$v_y = a_y t = \frac{eV}{md} \cdot \frac{l}{v} = \frac{eVl}{mdv}$$

となる．

(4) 極板 P，Q 間から出た直後の電子の y 軸方向のずれ y_1 は，

$$y_1 = \frac{1}{2}a_y t^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{eV}{md} \cdot \left(\frac{l}{v}\right)^2 = \frac{eVl^2}{2mdv^2}$$

となる．

(5) $\tan\theta = \dfrac{v_y}{v} = \dfrac{eVl}{mdv^2}$ となる．

(6) 極板 P，Q 間を出てから蛍光面に達するまでは等速直線運動となるので，電子の y 軸方向のずれ y_2 は $\dfrac{y_2}{r} = \tan\theta$ より，

$$y_2 = r\tan\theta = r \cdot \frac{v_y}{v} = \frac{eVlr}{mdv^2}$$

となる．

（別解）

極板 P，Q 間を出てから蛍光面に達するまでにかかる時間は $\dfrac{r}{v}$ なので，

$$y_2 = v_y \cdot \frac{r}{v} = \frac{eVl}{mdv^2}$$

となる．

(7) $\tan\theta = \dfrac{v_y}{v} = \dfrac{eVl}{mdv^2}$ より，

$$\frac{e}{m} = \frac{dv^2\tan\theta}{Vl}$$

となる．

問題 9.4$^{\diamondsuit}$

(1) 連続 X 線

(2) 特性（固有）X 線

(3) 加速電圧 V で加速した電子がもつ運動エネルギーは eV となり，波長 λ の X 線のエネルギーは $\dfrac{hc}{\lambda}$ となる．最短波長 λ_0 の X 線は，電子の運動エネルギーが全て X 線のエネルギーに変換されたときに生じるので，

$$\frac{hc}{\lambda_0} = eV$$

$$\lambda_0 = \frac{hc}{eV}$$

となる．

問題 9.5$^\diamondsuit$

(1)　エネルギー保存の法則の式は

$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda'} + \frac{1}{2}mv^2$$

となる．

(2)　運動量保存の法則の式は，入射方向を正とすると

$$\frac{h}{\lambda} = -\frac{h}{\lambda'} + mv$$

となる．

(3)　(1) より

$$m^2v^2 = 2mhc\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda'}\right)$$

となり，(2) より

$$m^2v^2 = h^2\left(\frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\lambda'}\right)^2$$

となる．よって

$$2mhc\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda'}\right) = h^2\left(\frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\lambda'}\right)^2$$

$$\Delta\lambda = \frac{h}{2mc}\left(\frac{\lambda'}{\lambda} + \frac{\lambda}{\lambda'} + 2\right)$$

となる．ここで，$(\Delta\lambda)^2 = (\lambda - \lambda')^2 = \lambda^2 - 2\lambda\lambda' + {\lambda'}^2 = 0$ より，$\dfrac{\lambda}{\lambda'} + \dfrac{\lambda'}{\lambda} = 2$ となるので

$$\Delta\lambda = \frac{h}{2mc}(2+2) = \frac{2h}{mc}$$

となる（これは，p.158 の式 (9.12) に $\theta = \pi$ を代入したものと等しい）．

問題 9.6$^\heartsuit$

(1)　光電効果

(2)　光電子

(3)　振動数（または周波数）

(4)　光子

(5)　仕事関数

(6)　$E > W$

(7)　$E - W$

問題 9.7$^\heartsuit$

(1)　光電子の持つ最大の運動エネルギーは eV_0 である．また，光が電子に与えるエネルギーは $h\nu$ であり，電子を放出させるために必要な最低

のエネルギーを W とすると，光電面から飛び出した光電子が持つ最大の運動エネルギーは $h\nu - W$ であるので，

$$eV_0 = h\nu - W$$
$$W = h\nu - eV_0$$

となる．

(2)

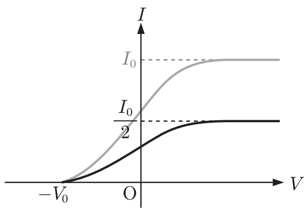


図 9.1

第 10 章

問題 10.1♡

(1)　$n = 2$，$n' = 1$ を代入して

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2}\right) = \frac{3R}{4}$$

となるので，$\lambda = \dfrac{4}{3R}$ となる．

(2)　振動数を ν とすると $c = \nu\lambda$ より，$\nu = \dfrac{c}{\lambda} = \dfrac{3Rc}{4}$ となる．

(3)　光子のエネルギーを E とすると $E = h\nu$ より，$E = \dfrac{3Rhc}{4}$ となる．

問題 10.2♢

(1)　$m\dfrac{v^2}{r}$

(2)　$k_0\dfrac{e^2}{r^2}$

(3)　電子波の波長は $\dfrac{h}{mv}$

(4)

$$m\frac{v^2}{r} = k_0\frac{e^2}{r^2}$$
$$2\pi r = \frac{nh}{mv}$$

2 式より v を消去して

$$r = \frac{n^2h^2}{4\pi^2k_0me^2}$$

である．したがって，(4) は $\dfrac{h^2}{4\pi^2k_0me^2}$ となる．

(5)

$$E_n = -k_0 \frac{e^2}{r} + \frac{1}{2} m v^2$$
$$= -k_0 \frac{e^2}{r} + \frac{1}{2} k_0 \frac{e^2}{r}$$
$$= -\frac{1}{2} k_0 \frac{e^2}{r}$$
$$= -\frac{2\pi^2 k_0^2 m e^4}{n^2 h^2}$$

である．したがって，(5) は $-\dfrac{2\pi^2 k_0^2 m e^4}{h^2}$ となる．

(6)　量子数

(7)　エネルギー準位

問題 10.3♡

1 u は質量数が 12 の炭素原子 ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$ 1 個の質量の $\dfrac{1}{12}$ である．よって，

$$\frac{12.0\ \mathrm{g/mol}}{6.02 \times 10^{23}\ \mathrm{mol}^{-1}} \times \frac{1}{12} = 1.661 \times 10^{-27}\ \mathrm{kg}$$

なので，1.66×10^{-27} kg となる．

問題 10.4♡

(1)　はじめの個数を N_0，60 時間後の個数を N とすると $N = N_0 \left(\dfrac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}$ より

$$\frac{N}{N_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{60\ \mathrm{h}}{15\ \mathrm{h}}} = \frac{1}{16}\ 倍$$

となる．

(2)　個数が $\dfrac{1}{128}$ になるまでにかかる時間を t とすると，

$$\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{15\ \mathrm{h}}} = \frac{1}{128}$$
$$= \left(\frac{1}{2}\right)^7$$

となるので，$\dfrac{t}{15\ \mathrm{h}} = 7$ より $t = 105$ 時間後となる．

問題 10.5♡

重水素核の質量欠損を ΔM とすると

$$\Delta M = (1.6727 \times 10^{-27}\ \mathrm{kg} + 1.6750 \times 10^{-27}\ \mathrm{kg}) - 3.3437 \times 10^{-27}\ \mathrm{kg}$$
$$= 4.0 \times 10^{-30}\ \mathrm{kg}$$

となる．よって，重水素核の結合エネルギーを ΔE とすると

$$\begin{aligned}\Delta E &= \Delta M c^2 \\ &= (4.0\times10^{-30}\ \mathrm{kg})\times(3.0\times10^{8}\ \mathrm{m/s})^2 \\ &= 3.6\times10^{-13}\ \mathrm{J}\end{aligned}$$

となる．

問題 10.6$^\heartsuit$

(1)　${}^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \to {}^{17}_{8}\mathrm{O} + {}^{1}_{1}\mathrm{H}$

(2)　${}^{9}_{4}\mathrm{Be} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \to {}^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}$

(3)　${}^{27}_{13}\mathrm{Al} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \to {}^{30}_{15}\mathrm{P} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}$

問題 10.7$^\heartsuit$

(1)　$3\,{}^{1}_{0}\mathrm{n}$

(2)　質量欠損を Δm とすると

$$\begin{aligned}\Delta m &= (235.0439 + 1.0087 - 140.9139 - 91.8973 - 1.0087\times3) \\ &\quad\times(1.66\times10^{-27}\ \mathrm{kg}) \\ &= 3.573\times10^{-28}\ \mathrm{kg} \\ &= 3.57\times10^{-28}\ \mathrm{kg}\end{aligned}$$

となる．

(3)　発生するエネルギーを E とすると

$$\begin{aligned}E &= \Delta m c^2 = (3.573\times10^{-28}\ \mathrm{kg})\times(3.00\times10^{8}\ \mathrm{m/s})^2 \\ &= 3.2157\times10^{-11}\ \mathrm{J} \\ &= 3.22\times10^{-11}\ \mathrm{J}\end{aligned}$$

となる．

問題 10.8$^\heartsuit$

この核融合反応での質量欠損を Δm とすると

$$\Delta m = (4\times1.0073 - 4.0015 - 0.0005\times2)\ \mathrm{u} = 0.0267\ \mathrm{u}$$

となる．よって，1.00 kg の水素が全て反応したとき

$$\begin{aligned}&\frac{1.0\ \mathrm{kg}}{4\times1.0073\times1.66\times10^{-27}\ \mathrm{kg}}\times(0.0267\times1.66\times10^{-27}\ \mathrm{kg}) \\ &= 0.00662\ \mathrm{kg}\end{aligned}$$

の質量が減少することになる．よって，放出されるエネルギー E は

$$E = 0.00662\ \mathrm{kg}\times(3.00\times10^{8}\ \mathrm{m/s})^2$$

$$
\begin{aligned}
&= 5.958 \times 10^{14}\ \mathrm{J} \\
&= 6.0 \times 10^{14}\ \mathrm{J}
\end{aligned}
$$

となる.