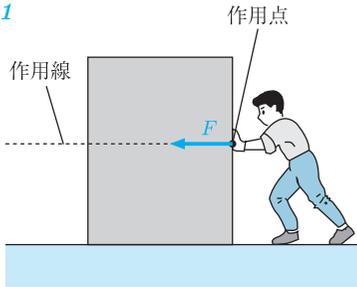


『理工系の基礎物理学』（町田光男・三浦好典 共著，学術図書出版社）

章末問題略解

第2章

2.1



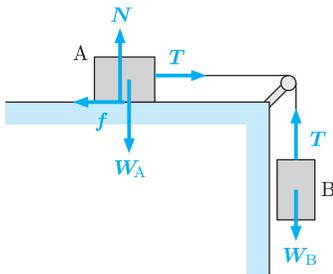
2.2 (1) $\mathbf{F}_1 = (|\mathbf{F}_1| \cos \theta_1, |\mathbf{F}_2| \sin \theta_1)$

(2) $\mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 = (|\mathbf{F}_1| \cos \theta_1 + |\mathbf{F}_2| \cos \theta_2, |\mathbf{F}_1| \sin \theta_1 + |\mathbf{F}_2| \sin \theta_2)$

(3) $\mathbf{F}_3 = (-|\mathbf{F}_1| \cos \theta_1 - |\mathbf{F}_2| \cos \theta_2, -|\mathbf{F}_1| \sin \theta_1 - |\mathbf{F}_2| \sin \theta_2)$

(4) $|\mathbf{F}_3| = |\mathbf{F}_1|^2 + |\mathbf{F}_2|^2 + 2|\mathbf{F}_1||\mathbf{F}_2|(\cos \theta_1 \cos \theta_2 + \sin \theta_1 \sin \theta_2)$
 $= |\mathbf{F}_1|^2 + |\mathbf{F}_2|^2 + 2|\mathbf{F}_1||\mathbf{F}_2| \cos(\theta_1 - \theta_2)$
 $(|\mathbf{F}_1|^2 + |\mathbf{F}_2|^2 + 2|\mathbf{F}_1||\mathbf{F}_2| \cos(\theta_2 - \theta_1))$ ても可)

2.3 (1)



(2) $|\mathbf{f}| = |\mathbf{T}|$

(3) $|\mathbf{f}| = |\mathbf{W}_B|$

2.4 (1) $W = T_3$

(2) 水平方向: $T_1 \cos \theta_1 - T_2 \cos \theta_2 = 0$

垂直方向: $T_1 \sin \theta_1 + T_2 \sin \theta_2 - T_3 = 0$

(3) $T_1 = \frac{W}{\sin \theta_1 + \cos \theta_1 \tan \theta_2}$

$T_2 = \frac{W}{\sin \theta_2 + \cos \theta_2 \tan \theta_1}$

$T_3 = W$

2.5 (1) AB間: 1.25 m/s, BC間: 0 m/s, CD間: 1.5 m/s

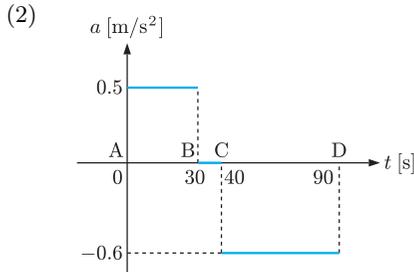
(2) 80 m

2.6 (1) 0.5 m/s^2

(2) 0.2 m/s^2

(3) 加速度は大きさ 1.5 m/s^2 で右向き.

2.7 (1) AB間： 0.5 m/s^2 , BC間： 0 m/s^2 , CD間： -0.6 m/s^2



(3) AB間： 675 m , BC間： 300 m , CD間： 750 m

第3章

3.1 (1) m_1 の物体： $F - T_1 = m_1 a$

m_2 の物体： $T_1 - T_2 = m_2 a$

m_3 の物体： $T_2 = m_3 a$

(2) $a = \frac{F}{m_1 + m_2 + m_3}$

(3) $T_1 = \frac{m_2 + m_3}{m_1 + m_2 + m_3} F$, $T_2 = \frac{m_3}{m_1 + m_2 + m_3} F$

3.2 (1) A： $10a = 50 - f$, B： $10a = f$

(2) $a = 2.5 \text{ m/s}^2$

(3) $f = 25 \text{ N}$

3.3 地表に置かれた物体の質量を m , 地球の質量を M , 万有引力定数を G とすると, 地表で物体に働く万有引力は $F = G \frac{mM}{R^2}$ である. r 離れた位置での万有引力は $\frac{F}{2}$ だから, $\frac{F}{2} = G \frac{mM}{r^2}$ となる. これら 2 つの式から, $r = \sqrt{2}R$ が得られる.

3.4 火星の重力加速度は $6.67 \times 10^{-11} \times \frac{6.42 \times 10^{23}}{(3.37 \times 10^6)^2} = 3.77 \text{ m/s}^2$ となる. したがって, 火星での

重力加速度の大きさは地球の $\frac{3.77}{9.80} \cong 0.385$ 倍となる.

3.5 (1) A： $-mg \sin \theta + T = ma$, B： $ma = mg - T$

(2) $\frac{g(1 - \sin \theta)}{2}$

(3) $\frac{g(1 - \sin \theta)}{2} t$

(4) $s - \frac{g(1 - \sin \theta)}{4} t^2$

(5) 床面に達する時間は, $s - \frac{g(1 - \sin \theta)}{4} t^2 = 0$ から, $2\sqrt{\frac{s}{g(1 - \sin \theta)}}$ となる. この t を (3) で得られた速さに代入して $\sqrt{sg(1 - \sin \theta)}$ が得られる.

3.6 (1) 水平方向の運動方程式： $ma = F \cos \theta$

鉛直方向のつり合いの式： $mg = N + F \sin \theta$

$$(2) \frac{F \cos \theta}{m}$$

$$(3) \frac{F \cos \theta}{m} t$$

$$(4) \frac{F \cos \theta}{2m} t^2$$

3.7 (1) $19.6 = \frac{1}{2} \times 9.8 \times t_G^2$ から, $t_G = 2.0$.

(2) $v_G = 9.8 \times 2.0 = 19.6 \cong 20 \text{ m/s}$

(3) $19.6 \times 2.0 - 0 \times 2.0 = 39.2 \cong 39 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$

3.8 (1) $-1.0 \text{ N} \cdot \text{s}$

(2) $F \times 0.10 = 1.0 \text{ N} \cdot \text{s}$ から, 撃力は $F = 10 \text{ N}$.

(3) $1.0 \text{ N} \cdot \text{s}$

3.9 (1) 水平方向の運動量変化: $0.2(50 \cos 60^\circ - 50) = -5 \text{ N} \cdot \text{s}$

鉛直方向の運動量変化: $0.2(50 \sin 60^\circ - 0) = 5\sqrt{3} \text{ N} \cdot \text{s}$

力積の大きさは運動量変化の大きさに等しいので, $\sqrt{(5)^2 + (5\sqrt{3})^2} = 10 \text{ N} \cdot \text{s}$.

(2) 200 N

3.10 (1) x 方向: $mv_0 = mv_A \cos 45^\circ + Mv_B \cos 60^\circ$

y 方向: $0 = -mv_A \sin 45^\circ + Mv_B \sin 60^\circ$

(2) $v_A = \frac{\sqrt{6}(\sqrt{3}-1)}{2} v_0$, $v_B = (\sqrt{3}-1) \frac{m}{M} v_0$

3.11 (1) 運動量保存則は, $0 = 50 \times 0.30 + 20v$ となる. これから, $v = -0.75 \text{ m/s}$ が得られる. したがって, 板は右方向へ 0.75 m/s の速さで動く.

(2) 運動量保存則は $50 \times 0.30 + 20 \times (-0.75) = 50 \times 1.0 + 20V$ となる. これから, $V = -2.5 \text{ m/s}$ が得られる. したがって, 板は右方向へ 2.5 m/s の速さで動く.

第4章

4.1 自由落下では, 落下時間 t と落下距離 h との関係は $h = \frac{1}{2}gt^2$ で表される. 数値を代入すると,

$19.6 = \frac{1}{2} \times 9.80 \times t^2$ となり, $t = 2.00 \text{ s}$ が得られる. また, 速さ v は $v = 2.00 \times 9.80 = 19.6 \text{ m/s}$ となる.

4.2 (1) 初速を v_0 とすると, 最高点では速度 $v = v_0 - gt$ が 0 なので, t_P は $v_0 - gt_P = 0$ から求まる. 数値を代入して, $29.4 - 9.80t_P = 0$ から, $t_P = 3.00 \text{ s}$.

(2) h_P は (1) で求めた t_P を物体の位置を表す式 $x = -\frac{1}{2}gt^2 + v_0t$ に代入すると求まる. 数値を代入すると, $h_P = -\frac{1}{2} \times 9.80 \times 3.00^2 + 29.4 \times 3.00 = 44.1 \text{ m}$.

(3) t_G は t_P の 2 倍なので, $t_G = t_P \times 2 = 6.00 \text{ s}$.

(4) 求めた t_G を速度の式に代入して, $v_G = 29.4 \text{ m/s}$.

4.3 投げ出したときの時刻を 0 とし, 図のように x, y 軸をとる. 時刻 t における x, y 方向の速度はそれぞれ $v_x = v_0$, $v_y = -gt$ となる. また, t における x, y 座標はそれぞれ $x = v_0t$, $y = h - \frac{1}{2}gt^2$ となる.

(1) 鉛直方向に $h = 19.6 \text{ m}$ 落下すると着地するので、 t_G は $h = \frac{1}{2}gt_G^2$ の関係から求まる。数値を代入すると、 $19.6 = \frac{1}{2} \times 9.80 \times t_G^2$ となり、 $t_G = 2.00 \text{ s}$ 。

(2) L は水平方向の速度に t_G をかければ求まるので、 $L = 2.00 \times 20.0 = 40.0 \text{ m}$ 。

(3) 着地する直前の鉛直方向の速さは $2.00 \times 9.80 = 19.6 \text{ m/s}$ 、水平方向の速さは 20.0 m/s である。したがって、着地する直前の速さは $v_G = \sqrt{19.6^2 + 20.0^2} \cong 28.0 \text{ m/s}$ 。

4.4 投げ出したときの時刻を 0 とし、図のように x, y 軸をとる。時刻 t における x, y 方向の速度はそれぞれ $v_x = v_0 \cos 30^\circ$ 、 $v_y = v_0 \sin 30^\circ - gt$ であり、 x, y 座標はそれぞれ $x = v_0 \cos 30^\circ \cdot t$ 、 $y = h + v_0 \sin 30^\circ \cdot t - \frac{1}{2}gt^2$ である。

(1) P では $v_y = 0$ なので、 $0 = 29.4 \sin 30^\circ - 9.80t_P$ となり、 $t_P = 1.50 \text{ s}$ が得られる。

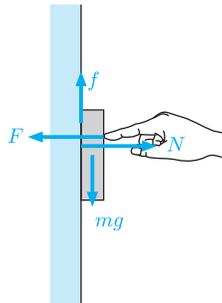
(2) t_P を y に代入して、 $19.6 + 29.4 \sin 30^\circ \times 1.50 - \frac{1}{2} \times 9.80 \times 1.50^2 \cong 30.6 \text{ m}$ が得られる。

(3) t_G は $y = 0$ の正の解なので、

$$t_G = \frac{v_0 + \sqrt{v_0^2 + 8gh}}{2g} = \frac{29.4 + \sqrt{29.4^2 + 8 \times 9.80 \times 19.6}}{2 \times 9.80} \cong 4.00 \text{ s}.$$

(4) x に t_G を代入して、 $L = 4.00 \times 29.4 \cos 30^\circ \cong 102 \text{ m}$ 。

4.5 物体には F のほかに、壁からの垂直抗力 N 、摩擦力 f 、重力 mg が働いている。 $F = N$ 、 $f = \mu F$ なので、 $\mu F \geq mg$ であれば物体は落下しない。したがって、 $F \geq \frac{mg}{\mu}$ 。

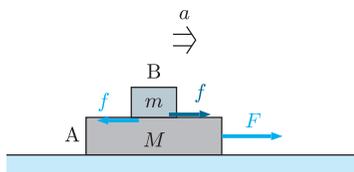


4.6 雨滴の密度を ρ 、半径を r とすると、雨滴の質量 m は $m = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho$ となる。終端速度は重力加速度の大きさを g 、抵抗力の比例定数を b とすると、 $v_\infty = \frac{mg}{b}$ なので、 ρ と r を用いて表すと

$v_\infty = \frac{4\pi r^3 \rho g}{3b}$ となる。一方、半径が $2r$ の雨滴の終端速度 v'_∞ は、抵抗の比例定数が $2b$ となるので、

$v'_\infty = \frac{mg}{2b} = \frac{4\pi(2r)^3 \rho g}{6b}$ となる。したがって、雨滴の半径が 2 倍になると終端速度は 4 倍になる。

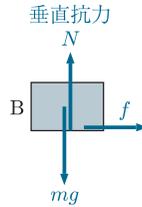
4.7 (1) (a) A, B には図に示した力が働く。したがって、A, B の運動方程式はそれぞれ $Ma = F - f$ 、 $ma = f$ 。



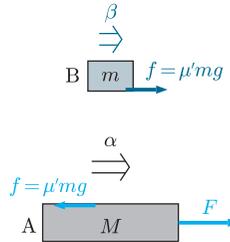
(b) これらの運動方程式から, $a = \frac{F}{m+M}$.

(2) (1) から静止摩擦力は $f = \frac{m}{m+M}F$. B が A に対して動かないためには $f \leq \mu mg$ であればよいので, $F \leq \mu g(m+M)$.

(3) (a) B には図に示した力が働く. したがって, 右に動く.



(b) A, B には図に示した力が働く. したがって, A, B の運動方程式はそれぞれ $M\alpha = F - \mu' mg$, $m\beta = \mu' mg$.

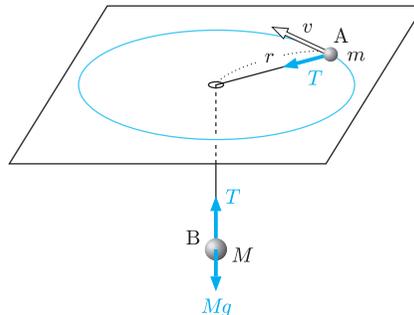


(c) $\alpha = \frac{F - \mu' mg}{M}$, $\beta = \mu' g$

4.8 (1) 向心力は重力と張力との和に等しいので, $m \frac{v^2}{l} = mg + T$.

(2) 糸がたるまないためには $T \geq 0$ だから, $v \geq \sqrt{gl}$.

4.9 A の速さを v , 糸の張力を T とすると, A の運動方程式は $m \frac{v^2}{r} = T$ となる. B は静止しているので, つり合いの式 $Mg - T = 0$ が成り立つ. これらの式から, $v = \sqrt{\frac{rgM}{m}}$.



4.10 (1) $mg - k\Delta l = 0$ から, $\Delta l = \frac{mg}{k}$.

(2) ばねの伸びは $x + \frac{mg}{k}$ だから, ばねの復元力は $-k \left(x + \frac{mg}{k} \right)$. おもりに鉛直下向きの重力 mg も働いているので, 運動方程式は $m \frac{d^2 x}{dt^2} = mg - k \left(x + \frac{mg}{k} \right) = -kx$ となる.

(3) 角振動数: $\sqrt{\frac{k}{m}}$, 周期: $2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$

4.11 (1) T_1 は長さ l の振り子の半周期に相当するので,

$$T_1 = \frac{1}{2}2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} = \pi\sqrt{\frac{l}{g}}.$$

(2) T_2 は長さ $\frac{2}{3}l$ の振り子の半周期に相当するので, $T_2 = \frac{1}{2}2\pi\sqrt{\frac{1}{g}\frac{2}{3}l} = \pi\sqrt{\frac{2l}{3g}}$.

(3) $T = \pi\sqrt{\frac{l}{g}}\left(1 + \sqrt{\frac{2}{3}}\right)$

第5章

5.1 (1) 加えた力の向きと物体が移動する方向が同じなので, 仕事は $30 \times 5.0 = 150 \text{ J}$.

(2) 摩擦力と物体は移動する方向が反対なので, 仕事は $-30 \times 5.0 = -150 \text{ J}$.

(3) 垂直抗力と物体の移動方向は垂直なので, 仕事は 0 J .

(4) 重力と物体の移動方向は垂直なので, 仕事は 0 J .

5.2 (1) 物体が移動する方向と F は垂直なので, 仕事は 0 .

(2) 重力 $F = mg$ と移動する方向が反対なので, 仕事は $-mgh$.

(3) 重力 $F = mg$ と移動する方向が同じなので, 仕事は mgh .

5.3 はじめの運動エネルギーがすべて摩擦力の仕事に変わってしまうので, 摩擦力がする仕事の大きさは $\frac{1}{2}mv_0^2$.

5.4 $\frac{1}{2} \times 1.0 \times 5.0^2 - \frac{1}{2} \times 1.0 \times 1.0^2 = 12 \text{ J}$

5.5 (1) $\frac{1}{2}mv_0^2 = mgh + \frac{1}{2}mv^2$ の関係から, $v = \sqrt{v_0^2 - 2gh}$.

(2) $\frac{1}{2}mv_0^2 = mgH$ の関係から, $H = \frac{v_0^2}{2g}$.

5.6 (1) $mgl(1 - \cos \theta) = \frac{1}{2}mV^2$ の関係から, $V = \sqrt{2gl(1 - \cos \theta)}$.

(2) $mgl(1 - \cos \theta) = \frac{1}{2}mv^2 + mgl(1 - \cos \phi)$ の関係から,
 $v = \sqrt{2gl(\cos \phi - \cos \theta)}$.

5.7 (1) つり合いの関係 $mg - kx = 0$ から, $x = \frac{mg}{k}$.

(2) Q に位置するときのおもりの力学的エネルギーは $\frac{1}{2}k(2x)^2 - mg(2x)$ と表せる. これに (1) で求めた x を代入すると, 力学的エネルギーは $\frac{1}{2}k\left(2\frac{mg}{k}\right)^2 - mg\left(2\frac{mg}{k}\right) = 0$.

(3) P に位置するときのおもりの力学的エネルギーは $\frac{1}{2}kx^2 - mgx + \frac{1}{2}mv^2$ と表せる. これに (1) で得られた x を代入すると, 力学的エネルギーは $\frac{1}{2}mv^2 - \frac{m^2g^2}{2k}$ となる. 力学的エネルギー保存則から P での力学的エネルギーも 0 となるので, $\frac{1}{2}mv^2 - \frac{m^2g^2}{2k} = 0$ から, $v = g\sqrt{\frac{m}{k}}$.

- (4) ばねが最も縮んだとき、力学的エネルギーは $mgz + \frac{1}{2}kz^2$ と表せる。力学的エネルギー保存則 $mgz + \frac{1}{2}kz^2 = 0$ より、 $z = -\frac{2mg}{k}$ が得られる。したがって、ばねの長さは $l - \frac{2mg}{k}$ 。

5.8 (1) おもりの速さ $v(t)$ は $x(t)$ を t で微分して、 $v(t) = \frac{dx}{dt} = C\omega \cos \omega t$ 。したがって、運動エネルギーは $K(t) = \frac{1}{2}mv(t)^2 = \frac{1}{2}mC^2\omega^2 \cos^2 \omega t = \frac{1}{2}kC^2 \cos^2 \omega t$ であり、弾性力による位置エネルギーは $U(t) = \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}kC^2 \sin^2 \omega t$ である。

- (2) $K(t) + U(t) = \frac{1}{2}kC^2 \cos^2 \omega t + \frac{1}{2}kC^2 \sin^2 \omega t = \frac{1}{2}kC^2$ 。これは力学的エネルギーが時間によらず一定であることを表す。

5.9 (1) $mv_A - mv_B = 2mv$ から、 $v = \frac{v_A - v_B}{2}$ 。 $v_A > v_B$ のとき、右方向へ進み、 $v_A < v_B$ のとき、左方向へ進む。また、 $v_A = v_B$ のとき、静止する。

- (2) 衝突前の運動エネルギーは $\frac{1}{2}m(v_A^2 + v_B^2)$ 、衝突後は $\frac{1}{4}m(v_A - v_B)^2$ であり、運動エネルギーの変化は $\frac{1}{4}m(v_A - v_B)^2 - \frac{1}{2}m(v_A^2 + v_B^2) = -\frac{1}{4}m(v_A + v_B)^2 < 0$ である。したがって、衝突後、運動エネルギーは $\frac{1}{4}m(v_A + v_B)^2$ だけ減少する。

5.10 (1) $mg\mu' \cos \theta$

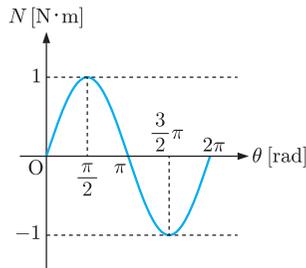
(2) $mg\mu' x \cos \theta$

(3) $mgx \sin \theta$

- (4) $\frac{1}{2}mv^2 - mgx \sin \theta = mg\mu' x \cos \theta$ から、 $x = \frac{v^2}{2g(\sin \theta + \mu' \cos \theta)}$ 。

第6章

6.1 $N = 1 \times 1 \times \sin \theta = \sin \theta$ から、図のように描ける。



6.2 (1) $3.0 \times 3.0 - 2.0 \times 5.0 \times \sin 30^\circ = 4.0 \text{ N} \cdot \text{m}$

(2) $-3.0 \times 5.0 \times \sin 30^\circ - 2.0 \times 3.0 = -13.5 \text{ N} \cdot \text{m}$

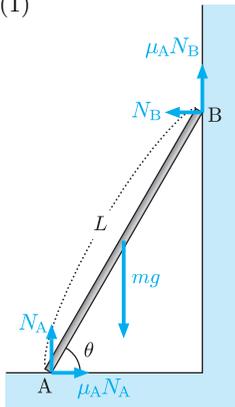
6.3 OAの長さを x とすると、力のモーメントのつり合いの式は、 $m_A g x - m_B g(l - x) = 0$ 。これから、 $x = \frac{m_B}{m_A + m_B} l$ が得られ、OBの長さは $\frac{m_A}{m_A + m_B} l$ 。したがって、 $\frac{OA}{OB} = \frac{m_B}{m_A}$ 。

6.4 Aのまわりの力のモーメントのつり合いから $T \sin 30^\circ \times l - mg \cos 30^\circ \times \frac{l}{2} = 0$ 。したがって、 $T = \frac{\sqrt{3}}{2} mg$ 。

6.5 (1) $-F_1(x_1 - x_0) - F_2(x_0 - x_2) + F_3(x_0 - x_3) = -F_1 x_1 + F_2 x_2 - F_3 x_3 + (F_1 - F_2 + F_3)x_0$

- (2) 力のつり合いは $F_2 - F_1 - F_3 = 0$. この関係を (1) に代入すると, $-F_1x_1 + F_2x_2 - F_3x_3$ が得られる.

6.6 (1)



- (2) 水平方向: $\mu_A N_A = N_B$
鉛直方向: $N_A + \mu_B N_B = mg$
- (3) $N_A = \frac{mg}{1 + \mu_A \mu_B}$, $N_B = \frac{\mu_A mg}{1 + \mu_A \mu_B}$
- (4) $N_B L \sin \theta + \mu_B N_B L \cos \theta - \frac{1}{2} mg L \cos \theta = 0$
- (5) (4) に (3) を代入して, $\tan \theta = \frac{1 - \mu_A \mu_B}{2\mu_A}$ が得られる. したがって, $\tan \theta \geq \frac{1 - \mu_A \mu_B}{2\mu_A}$.

6.7 粒子 1: 角運動量 $mr^2\omega$, z 軸の負の向き. 粒子 2: 角運動量 $4mr^2\omega$, z 軸の正の向き.

6.8 (1) 微小部分の質量は $dm = \sigma b dy$ なので, この微小部分の x 軸まわりの慣性モーメントは $y^2 dm = y^2 \sigma b dy$.

(2)
$$I = \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} y^2 \sigma b dy = \frac{\sigma}{12} a^3 b$$

(3) $M = \sigma ab$ なので, 慣性モーメントは $I = \frac{1}{12} Ma^2$.

第 7 章

7.1 100 g の銅製容器の熱容量は $100 \times 0.38 = 38 \text{ J/K}$. これと同じ熱容量を持つ水の質量は $\frac{38}{4.2} \cong 9.0 \text{ g}$.

7.2 銅の比熱を c とすると, $100 \times 2.0 \times c = 76$ の関係から, $c = \frac{76}{2.0 \times 100} = 0.38 \text{ J/(g} \cdot \text{K)}$.

7.3 金属球の比熱を c とする. 熱量保存の関係 $(42 + 4.2 \times 90) \times (40 - 30) = 200 \times c \times (90 - 40)$ から, $c = 0.42 \text{ J/(g} \cdot \text{K)}$.

7.4 (1) 平地では, 100°C で水が沸騰するため, 米の中まで火が通るが, 標高が高い所では, 100°C に達する前に水が沸騰する. そのため, 米の中まで十分火が通らず芯が残る.

(2) スケートシューズの歯には大きな圧力 (人の体重 \div 歯の面積) がかかるので, シューズの歯の圧力がかかると固体の氷が液体に変化する. そのため滑った所だけ氷が水になり, 軌跡として現れる.

7.5 (1) 図から 230°C .

(2) 吸収する熱量は $Q = 9.8 \times 7.0 \times 60 = 4116 \cong 4.1 \times 10^3 \text{ J}$.

- (3) 容器の熱容量を C 、スズの質量を m 、スズの比熱を c とする。容器全体の温度変化が ΔT のとき、 $Q = (mc + C)\Delta T$ が成り立つので、 $(50 \times c + 8.0) \times (230 - 20) = 4.1 \times 10^3$ 。したがって、 $c \cong 0.23 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ 。

7.6 体積が 5.0 m^3 、圧力が $0.20 \times 10^5 \text{ Pa}$ のとき気体の温度を T とする。ボイル・シャルルの法則 $\frac{0.80 \times 10^5 \times 1.0}{320} = \frac{0.20 \times 10^5 \times 5.0}{T}$ から $T = 400 \text{ K}$ 。

- 7.7** (1) シリンダー内の気体の圧力を p とすると、力のつり合いの条件

$$pS = p_0S + mg \text{ から, } p = p_0 + \frac{mg}{S}.$$

- (2) シリンダーを水平に置くと、ピストンの加重による圧力は働かなくなるので、シリンダー内の圧力は

$$p_0 \text{ に変化する。温度が一定なので、ボイルの法則 } pSh = p_0SL \text{ から, } L = \frac{p}{p_0}h = \left(\frac{mg}{p_0S} + 1 \right)h.$$

7.8 (1) ボイル・シャルルの法則 $\frac{p_1V_0}{T_1} = \frac{p_0V_0}{T_0}$ から、 $p_1 = \frac{T_1}{T_0}p_0$ 。

- (2) ボイル・シャルルの法則 $\frac{p_1V_2}{T_0} = \frac{p_0V_0}{T_0}$ に (1) の p_1 を代入すると、

$$V_2 = \frac{p_0}{p_1} \frac{T_0}{T_0} V_0 = \frac{T_0}{T_1} V_0.$$

第8章

8.1 $Q = 2.26 \times 10^3 \text{ J}$, $p = 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$, $\Delta V = 1.67 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-6} \cong 1.67 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ を内部エネルギー変化 $\Delta E = Q - p\Delta V$ に代入すると、 $\Delta E = 2.26 \times 10^3 - 1.01 \times 10^5 \times 1.67 \times 10^{-3} \cong 2.09 \times 10^3 \text{ J}$ が得られる。

8.2 等温変化なので内部エネルギーは一定 ($\Delta E = 0$) で、 $Q = -W$ 。したがって、式 (8.13) を用いて、

気体が吸収した熱量は $Q = nRT \log \frac{V_2}{V_1} = 0.500 \times 8.31 \times 300 \times \log 3 \cong 1.37 \times 10^3 \text{ J}$ 。

8.3 理想気体の等温膨張なので、 $Q = -W = \int_{V_i}^{V_f} p dV = nRT \int_{V_i}^{V_f} \frac{dV}{V} = nRT \log \frac{V_f}{V_i} = nRT \log \frac{p_i}{p_f} = 1.0 \times 8.3 \times 300 \times \log 15 \cong 6.7 \times 10^3 \text{ J}$ 。

8.4 熱力学の第1法則 $\Delta E = Q - p\Delta V$ を用いる。 $p = 1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$, $\Delta Q = 8.4 \text{ J}$, $\Delta V = 2.0 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ を代入すると、 $\Delta E = 8.4 - 1.0 \times 10^5 \times 2.0 \times 10^{-5} = 6.4 \text{ J}$ 。

8.5 (1) $A \rightarrow B$: 定積変化, $A \rightarrow C$: 定圧変化

- (2) $A \rightarrow C$. 定圧変化では、気体が膨張するとき外部に仕事をする。

- (3) $A \rightarrow C$ で外部にする仕事の大きさを W とし、 $A \rightarrow B$, $A \rightarrow C$ での内部エネルギーの変化量をそれぞれ ΔE_B , ΔE_C とする。熱力学の第1法則から $\Delta E_B = Q$, $\Delta E_C = Q - W < \Delta E_B$ となる。内部エネルギーの大きい方が高温なので、 B の方が高温。

8.6 (1) $W_I = p_f(V_f - V_i) = 1.00 \times 10^5 \times (1.00 \times 10^{-1} - 5.00 \times 10^{-2}) \cong 5.0 \text{ kJ}$

- (2) $W_{II} = nRT \log \frac{V_f}{V_i} = p_i V_i \log \frac{V_f}{V_i} = p_f V_f \log \frac{V_f}{V_i} = 1.0 \times 10^4 \times \log 2 \cong 6.9 \text{ kJ}$

第9章

9.1 $T_H = 303 \text{ K}$, $T_L = 278 \text{ K}$ を可逆サイクルの熱効率に代入すると、

$$e = \frac{T_H - T_L}{T_H} = \frac{303 - 278}{303} \cong 0.0825.$$

9.2 $T_i = 273 \text{ K}$, $T_f = 373 \text{ K}$, $m = 1.0 \text{ g}$, $c = 4.2 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ とすると、エントロピー変化は

$$\Delta S = \int_{T_i}^{T_f} \frac{mc}{T} dT = mc \log \frac{T_f}{T_i} = 1.0 \times 4.2 \times \log \frac{373}{273} \cong 1.3 \text{ J/K}.$$

9.3 0°C の水 1g が 0°C の水になるときのエントロピーの変化量を ΔS_1 , 0°C の水 1g が 100°C のお湯になるときのエントロピーの変化量を ΔS_2 , 100°C のお湯 1g が 100°C の水蒸気になるときのエントロピーの変化量を ΔS_3 とする. これらをそれぞれ求めると, $\Delta S_1 = \frac{0.335 \times 10^3}{273} \cong 1.23 \text{ J/K}$,

$\Delta S_2 = mc \log \frac{T_2}{T_1} = 1.00 \times 4.18 \times \log \frac{373}{273} \cong 1.30 \text{ J/K}$, $\Delta S_3 = \frac{2.26 \times 10^3}{373} \cong 6.06 \text{ J/K}$. したがって, 全エントロピーの増加は $\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 + \Delta S_3 = 8.59 \text{ J/K}$.

9.4 (1) 理想気体の内部エネルギーは温度のみの関数であるから等温過程では $\Delta E = 0$. したがって,

$$\text{熱力学の第 1 法則から, } \Delta Q = -\Delta W = \int_{V_1}^{V_2} p dV = RT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = RT \log \frac{V_2}{V_1}.$$

(2) 準静的変化なので系の中でのエントロピーの生成はなく, 系のエントロピーの増加は外部から流入した熱によるものだけである. したがって, $\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} = R \log \frac{V_2}{V_1}$.

9.5 (1) 断熱変化なので, $\Delta Q = 0$. 系は仕事をしないので, $\Delta W = 0$. したがって, $\Delta E = 0$ である. 理想気体の E は T だけの関数なので, T は一定となる.

(2) エントロピーは状態量であるから, 状態 i から状態 f への等温準静的過程を考えると, エントロピーの差は, $\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} = \frac{p\Delta V}{T} = \int_{V_1}^{V_1+V_2} \frac{R}{V} dV = R \log \frac{V_1 + V_2}{V_1}$ となる.

(3) $\Delta Q = 0$ にも関わらず, $\Delta S > 0$ である. 系の中でエントロピーが発生しているのので, 不可逆過程である.

9.6 物体のエントロピー変化は $\Delta S_1 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{mc dT}{T} = mc \log \frac{T_2}{T_1} = 100 \times 0.400 \times \log \frac{300}{400} \cong -11.5 \text{ J/K}$. 大気のエントロピー変化は $\Delta S_2 = \frac{100 \times 0.400 \times 100}{300} \cong 13.3 \text{ J/K}$. したがって, 全エントロピーの増加量は $\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = 1.8 \text{ J/K}$.

9.7 A は 400 K から 300 K に変化したので, エントロピー変化は $\Delta S_A = 40.0 \times \log \frac{300}{400} \cong -11.5 \text{ J/K}$.

B は 200 K から 300 K に変化したので, エントロピー変化は $\Delta S_B = 40.0 \times \log \frac{300}{200} \cong 16.2 \text{ J/K}$. A

と B を合わせたエントロピー変化は $\Delta S = \Delta S_A + \Delta S_B = 4.7 \text{ J/K}$ となる.

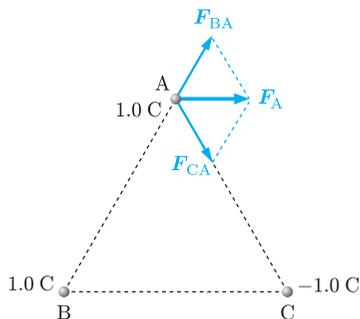
9.8 分子間の相互作用がない理想気体の混合は, それぞれの気体の自由膨張とみなせる. A は体積 V_A の領域から体積 $V_A + V_B$ の領域への自由膨張, B は体積 V_B の領域から体積 $V_A + V_B$ の領域への自由膨張なので, A と B を合わせた系のエントロピー変化は $\Delta S = n_A R \log \frac{V_A + V_B}{V_A} + n_B R \log \frac{V_A + V_B}{V_B}$ となる.

第 10 章

10.1 A と B の電荷は異符号, A と C の電荷は同符号なので, B と C の電荷は異符号である. したがって, B と C を近づけると, 互いに引き合う.

10.2 電荷を結ぶ線上で $1.0 \times 10^{-6} \text{ C}$ の電荷からの距離が x の点に -1.0 C の電荷を置いたとすると, この電荷に働く静電気力は, $F = k \frac{9.0 \times 10^{-6} \times (-1.0)}{(4.0 - x)^2} - k \frac{1.0 \times 10^{-6} \times (-1.0)}{x^2}$ となる. $F = 0$ から, $x = 1.0 \text{ m}$ が得られる.

10.3 A の電荷は, B の電荷から大きさ $F_{BA} = 9.0 \times 10^9 \times \frac{1.0 \times 1.0}{3.0^2} = 1.0 \times 10^9 \text{ N}$ の反発力を受け. また, A の電荷は C の電荷から大きさ $F_{CA} = 9.0 \times 10^9 \times \frac{1.0 \times 1.0}{3.0^2} = 1.0 \times 10^9 \text{ N}$ の引力を受け. A の電荷が B と C の電荷から受ける力の合力の大きさ F_A は $F_A = F_{BA} = F_{CA} = 1.0 \times 10^9 \text{ N}$ となり, 合力の向きは右向き (B \rightarrow C) となる.

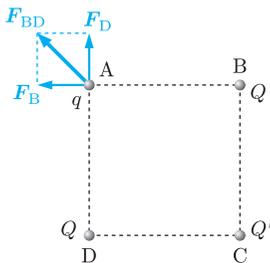


10.4 Pの電荷 Q が A, B の電荷から受ける力の大きさをそれぞれ F_{AP} , F_{BP} とすると, $F_{AP} = 9.0 \times 10^9 \times \frac{3.0 \times |Q|}{1.0^2} = 2.7 \times |Q| \times 10^{10}$ N, $F_{BP} = 9.0 \times 10^9 \times \frac{3.0 \times |Q|}{3.0^2} = 3.0 \times |Q| \times 10^9$ N. これらの力の合力が B に向かう力になるためには $Q > 0$ となる必要がある. したがって, $2.7 \times Q \times 10^{10} - 3.0 \times Q \times 10^9 = 2.4 \times 10^{10}$ から $Q = 1.0$ C.

10.5 正方形の辺の長さを L , 電荷 q と B の電荷 Q との間の静電気力の大きさを F_B , 電荷 q と D の電荷 Q との間の静電気力の大きさを F_D とすると, $F_B = F_D = k \frac{qQ}{L^2}$ であり, これらの合力の大きさは $F_{BD} = \sqrt{2} k \frac{qQ}{L^2}$ となる. この力を打ち消すためには, q と Q' の間の力が引力で, その大きさが F_{BD} になっていればよい. AC 間の距離は $\sqrt{2}L$ なので, 求める Q' は次の関係を満たす必要がある.

$$-\sqrt{2} k \frac{qQ}{L^2} = k \frac{qQ'}{(\sqrt{2}L)^2}$$

これから, $Q' = -2\sqrt{2}Q$ が得られる.

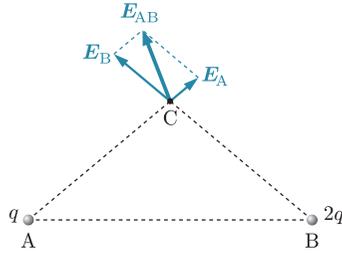


10.6 2つの小球の距離は $2L \sin \theta$ である. 糸の張力を T , 小球に与えられた電荷間に働くクーロン力を F とする. 小球には重力 mg も働いているので, つり合いの条件は $T \cos \theta = mg$, $T \sin \theta = F$ となる. これから, $F = mg \tan \theta$ が得られる. したがって, $k \frac{q^2}{(2L \sin \theta)^2} = mg \tan \theta$ が成立し, これから $q = 2L \sin \theta \sqrt{\frac{mg \tan \theta}{k}}$ が得られる.

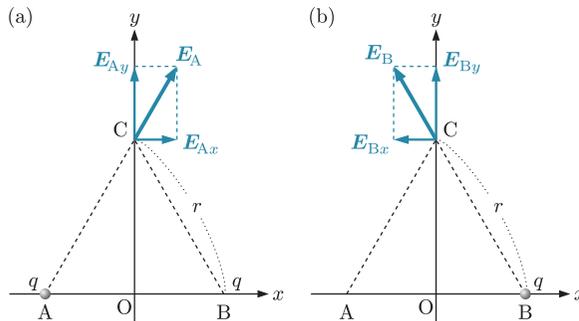
第 11 章

11.1 A, B の電荷が O につくる電場をそれぞれ E_A , E_B とする. x 軸の方向を電場の正の方向とすると, $E_A = -9.0 \times 10^9 \times \frac{4.0 \times 10^{-6}}{(-0.10)^2} = -3.6 \times 10^6$ N/C, $E_B = -9.0 \times 10^9 \times \frac{6.0 \times 10^{-6}}{(0.20)^2} \cong -1.4 \times 10^6$ N/C. したがって, O に生じる電場は負の方向に $E_A + E_B \cong 5.0 \times 10^6$ N/C.

11.2 A の電荷が C につくる電場を E_A , B の電荷が C につくる電場を E_B , 2つの電場を合成したものを E_{AB} として表すと図のようになる. したがって, 電場の向きは①である.



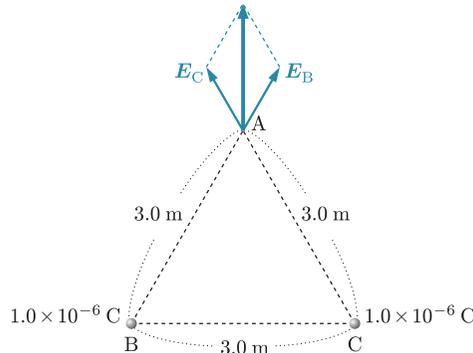
11.3 (1) A の電荷 q が C につくる電場の強さ E_A , B の電荷 q が C につくる電場の強さ E_B は $E_A = E_B = k \frac{q}{r^2}$ で同じであるが, 電場の向きはそれぞれ図 (a), (b) のようになる. A の電荷が C につくる電場の x, y 成分はそれぞれ $E_{Ax} = \frac{1}{2} k \frac{q}{r^2}$, $E_{Ay} = \frac{\sqrt{3}}{2} k \frac{q}{r^2}$ となる. また, B の電荷が C につくる電場の x, y 成分は $E_{Bx} = -\frac{1}{2} k \frac{q}{r^2}$, $E_{By} = \frac{\sqrt{3}}{2} k \frac{q}{r^2}$ となる. したがって, C における電場の x 成分と y 成分は $E_x = 0$, $E_y = \sqrt{3} k \frac{q}{r^2}$ となる.



(2) $F_x = 0$, $F_y = \sqrt{3} k \frac{q^2}{r^2}$

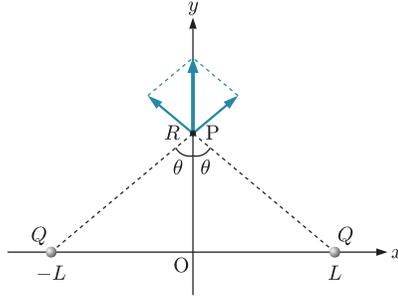
11.4 例題 11.8 から, 電荷 Q からの距離が r の点の電位は $V(r) = k \frac{Q}{r}$ となる. これを用いると, 電位は $V(x) = k \left(\frac{q}{|x-a|} - \frac{q}{|x+a|} \right)$ と求まる.

11.5 B, C の電荷が A につくる電場の強さをそれぞれ E_B, E_C とすると, これらは等しく, $E_B = E_C = 9.0 \times 10^9 \times \frac{1.0 \times 10^{-6}}{3.0^2} = 1.0 \times 10^3 \text{ N/C}$ となる. B の電荷がつくる電場の方向は B から A に向かう方向, C の電荷がつくる電場の方向は C から A に向かう方向であるので, これらを合成すると A の電場の強さは $\sqrt{3} \times 10^3 \text{ N/C}$, 方向は正三角形の中心から A に向かう方向になる.



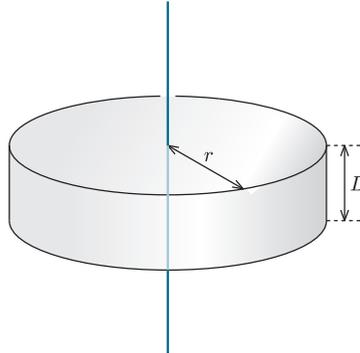
11.6 (1) 対称性から、Pにおける電場の x 成分 E_x は0. 電場の y 成分は

$$E_y = 2k \frac{Q}{L^2 + R^2} \cos \theta = 2kQ \frac{R}{(L^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}}.$$

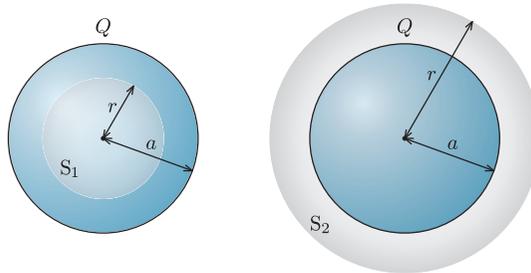


(2) $\frac{dE_y}{dR} = 2kQ \left(\frac{1}{(L^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} - 3 \frac{R^2}{(L^2 + R^2)^{\frac{5}{2}}} \right) = 0$ から、 $R = \frac{L}{\sqrt{2}}$.

11.7 電荷分布の対称性から、電場は導線に垂直な方向に放射状に生じている. ガウスの法則を適用する閉曲面として、図のような導線を中心軸とする半径 r 、長さ L の円筒を考える. 上下の面では電場のガウスの法則への寄与は0である. 側面では、電場は面に垂直なので、側面上での電場の強さを E としてガウスの法則を適用すると、 $2\pi r L E = \frac{\sigma L}{\epsilon_0}$ となる. したがって、 $E = \frac{\sigma}{2\pi r \epsilon_0}$ となる.



11.8 ガウスの法則の閉曲面として、球殻と中心を共有する半径 r の球面を考える. 球対称性から、球面上では電場は球面に垂直で、電場の強さは一定である. 球殻の内部に球面 S_1 ($r < a$)をとれば、球の内部には電荷が存在しないので電場は0となる. また、球殻の外部に球面 S_2 ($r > a$)をとれば、ガウスの法則から $4\pi r^2 E = \frac{Q}{\epsilon_0}$ が得られる. これから、 $E = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$ となる.



11.9 速さを v とすると、運動エネルギーは $\frac{1}{2}mv^2 = qV$. したがって、 $v = \sqrt{\frac{2qV}{m}}$ となる.

11.10 (1) 電荷 q_1 を固定して、電荷 q_2 を無限遠から r_2 まで移動させる. このとき電場からの力に

逆らってする仕事が静電的位置エネルギーなので、 $R = |\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1|$ を用いると、 $U_E = -\frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0} \int_{\infty}^{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|} \frac{1}{R^2} dR = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|}$ が得られる。

- (2) \mathbf{r}_2 における電位は $V_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{|\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1|}$ 、 \mathbf{r}_1 における電位は $V_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2}{|\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1|}$ となるので、 $U_E = \frac{1}{2}(q_1 V_1 + q_2 V_2)$ となる。同様にして、電荷が3つの場合に対して、 U_E, V_1, V_2, V_3 を求めると、 $U_E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{q_2 q_1}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|} + \frac{q_3 q_1}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_3|} + \frac{q_3 q_2}{|\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_3|} \right)$ 、 $V_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{q_2}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|} + \frac{q_3}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_3|} \right)$ 、 $V_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{q_3}{|\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_3|} + \frac{q_1}{|\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1|} \right)$ 、 $V_3 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{q_1}{|\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_1|} + \frac{q_2}{|\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_2|} \right)$ となる。これから、 $U_E = \frac{1}{2}(q_1 V_1 + q_2 V_2 + q_3 V_3)$ となる。また、この関係を一般化すると、 $U_E = \frac{1}{2} \sum_i q_i V_i$ となる。

11.11 (1) $V_B = 9.0 \times 10^9 \times \frac{2.0 \times 10^{-6}}{3.0} = 6.0 \times 10^3 \text{ V}$ 、 $V_C = 9.0 \times 10^9 \times \frac{2.0 \times 10^{-6}}{4.0} = 4.5 \times 10^3 \text{ V}$
から $V_B - V_C = 1.5 \times 10^3 \text{ V}$ 。

(2) $W_{C \rightarrow B} = 1.0 \times (V_B - V_C) = 1.0 \times 1.5 \times 10^3 = 1.5 \times 10^3 \text{ J}$

11.12 (1) $V_C = 9.0 \times 10^9 \times \frac{2.0 \times 10^{-6}}{9.0} \times 2 = 4.0 \times 10^3 \text{ V}$

(2) $W_C = 2.0 \times 10^{-6} \times 4.0 \times 10^3 = 8.0 \times 10^{-3} \text{ J}$

第12章

12.1 3つの6Ωの抵抗が並列に接続されているとその合成抵抗は2Ω、2つの4Ωの抵抗が並列に接続されているとその合成抵抗は2Ωになる。さらに、この2つが直列に接続されているので全体の合成抵抗は4Ωとなる。

12.2 可変抵抗の抵抗値を R 、回路を流れる電流を I とすると、 $E = I(R + r)$ なので、 $IR = E - Ir$ の関係が求まる。これから、 $V_1 = E - I_1 r$ 、 $V_2 = E - I_2 r$ が得られるので、電池の起電力と内部抵抗はそれぞれ $r = \frac{V_1 - V_2}{I_2 - I_1}$ 、 $E = \frac{V_1 I_2 - V_2 I_1}{I_2 - I_1}$ となる。

12.3 (1) 送電線を流れる電流は $I = P/V$ で表され、単位時間当たりが発生するジュール熱は

$$RI^2 = \frac{RP^2}{V^2} \text{ となる。}$$

(2) ジュール熱は V の2乗に反比例するので、4倍になる。したがって、送電する際のジュール熱による損失を減らすには、高電圧にした方がよい。

12.4 図では、キルヒホッフの第1法則が分岐点で満たされるように、電流 I_1, I_2 が示してある。ループ ABDA, BCDB にキルヒホッフの第2法則を適用すると $(R_1 + R_3)I_1 - R_3 I_2 = V_1$ 、

$$-R_3 I_1 + (R_2 + R_3)I_2 = V_2 \text{ が得られる。これらから、} I_1, I_2 \text{ を求めると、} I_1 = \frac{(R_2 + R_3)V_2 + R_3 V_1}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3},$$

$$I_2 = \frac{(R_1 + R_3)V_2 + R_3 V_1}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3} \text{ となる。}$$

12.5 (1) コンデンサー C_1 にかかる電圧と抵抗 R にかかる電圧は同じである。抵抗 r を流れる電流を I_1 とすると、抵抗 R を流れる電流も I_1 であり、抵抗 R にかかる電圧は RI_1 となる。経路 ABCG について、キルヒホッフの第2法則を適用すると、 $rI_1 + RI_1 = E$ となる。したがって、 $V_1 = \frac{RE}{R+r}$ となる。

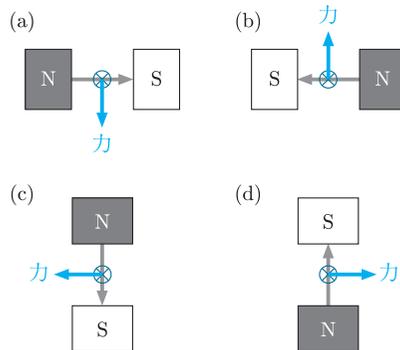
- (2) スイッチ S を b に入れると、コンデンサー C_1 に溜まっていた電荷がコンデンサー C_2 に移動する。そして、電荷の移動が終了すると、 C_1 の電圧と C_2 の電圧が等しくなる。この電圧を V' とする。スイッチ S を b に入れる前の電気を Q_0 とすると、 $Q_0 = C_1 V_1$ であり、b に入れた後のコンデンサー C_1 の電気を Q_1 、コンデンサー C_2 の電気を Q_2 とすると $Q_1 = C_1 V'$ 、 $Q_2 = C_2 V'$ である。電気量は保存されるので $Q_0 = Q_1 + Q_2$ 。これから V' を求めると、 $V' = \frac{C_1}{C_1 + C_2} V_1$ となる。以上のことから、 $Q_2 = C_2 V' = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} V_1$ が求まる。

第 13 章

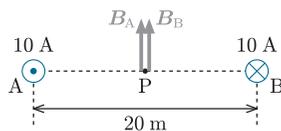
13.1 $F = \frac{q_m^2}{4\pi\mu_0 r^2}$ から、 $q_m = \sqrt{4\pi\mu_0 r^2 F} = \sqrt{1.58 \times 10^{-5} \times 0.100^2 \times 6.33 \times 10^2} \cong 0.0100 \text{ Wb}$.

13.2 $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 20}{2\pi \times 1.0} = 4.0 \times 10^{-6} \text{ T}$

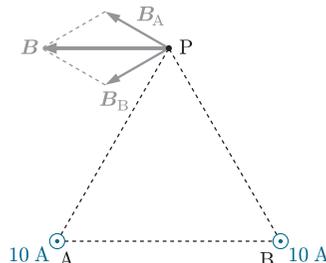
13.3 フレミングの左手の法則から力の向きは図のようになる。したがって、紙面に平行で上向きの力を受けるのは (b)。



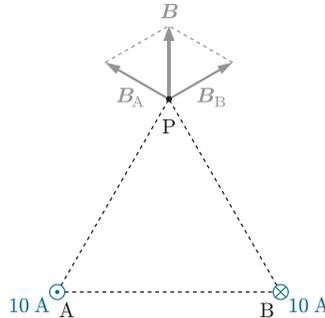
13.4 図のように、点 A, B の導線を通る電流が点 P につくる磁束密度の強さをそれぞれ B_A , B_B とすると、 $B_A = B_B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 10}{2\pi \times 10} = 2.0 \times 10^{-7} \text{ T}$ となる。また、磁束密度はともに AB に垂直で上向きなので、これらを合成すると、P の磁束密度は $B = 2.0 \times 10^{-7} \times 2 = 4.0 \times 10^{-7} \text{ T}$ となる。



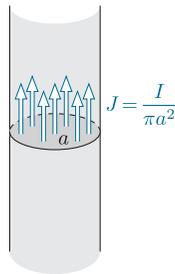
13.5 図のように、点 A, B の導線を通る電流が点 P につくる磁束密度の強さをそれぞれ B_A , B_B とすると、 $B_A = B_B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 10}{2\pi \times 10} = 2.0 \times 10^{-7} \text{ T}$ となる。また、磁束密度はそれぞれ線分 AP, BP に垂直で、これらを合成すると、P の磁束密度は B から A に向かう方向で、その強さは $B = 2.0 \times 10^{-7} \times \cos \frac{\pi}{6} \times 2 = 2.0 \times 10^{-7} \times \sqrt{3} \cong 3.5 \times 10^{-7} \text{ T}$ となる。



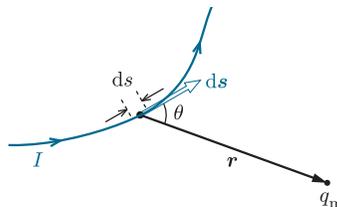
13.6 図のように、点 A, B の導線を通る電流が点 P につくる磁束密度の強さをそれぞれ B_A, B_B とすると、 $B_A = B_B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 10}{2\pi \times 10} = 2.0 \times 10^{-7} \text{ T}$ となる。また、磁束密度を合成すると、P の磁束密度は線分 AB に垂直で上向きとなり、その強さは $B = 2.0 \times 10^{-7} \times \cos \frac{\pi}{3} \times 2 = 2.0 \times 10^{-7} \text{ T}$ となる。



13.7 $r > a$ のとき、 $2\pi r H = I$ から、 $H = \frac{I}{2\pi r}$ 。導線を通る電流密度は $J = \frac{I}{\pi a^2}$ 。 $r < a$ のとき、アンペールの法則は $2\pi r H = J \times \pi r^2$ となるので、 $H = \frac{I r}{2\pi a^2}$ 。

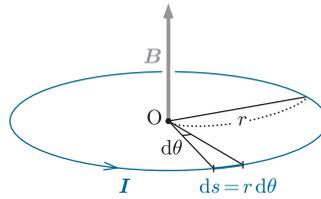


13.8 図のように、電流 I が流れている導線の微小部分 ds を大きさとし、微小部分における導線の接線方向を向きとするベクトルを ds とする。また、微小部分を始点とする位置ベクトル \mathbf{r} の終点に磁荷 q_m があるとす。 q_m が ds の部分につくる磁束密度は $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} = \frac{q_m}{4\pi r^3} (-\mathbf{r}) = -\frac{q_m}{4\pi r^3} \mathbf{r}$ となる。この磁場のため、 ds の部分は $I ds \times \mathbf{B} = -I ds \times \frac{q_m}{4\pi r^3} \mathbf{r}$ の力を受ける。作用・反作用の法則により、 q_m に $I ds$ が受ける力の符号を反対にした力 $\mathbf{F} = I ds \times \frac{q_m}{4\pi r^3} \mathbf{r}$ が作用することになる。これは ds が q_m の位置につくる磁場が $\frac{I ds \times \mathbf{r}}{4\pi r^3}$ であることを示す。また、 ds と \mathbf{r} のなす角度を θ とすると、磁束密度の強さは $\mu_0 \frac{I \sin \theta}{4\pi r^2} ds$ となる。



13.9 円の微小部分 $ds = r d\theta$ の電流が O につくる磁束密度の強さは $dB = \mu_0 \frac{I r d\theta \sin \frac{\pi}{2}}{4\pi r^2} = \mu_0 \frac{I d\theta}{4\pi r}$ 。微小部分を円周にわたって加え合わせると、O につくられる磁束密度の強さは、 $B = \mu_0 \frac{I}{4\pi r} \int_0^{2\pi} d\theta =$

$\frac{\mu_0 I}{2r}$. また、磁束密度の向きは、右ねじの法則から円に垂直で上向きになる。



13.10 $B = \frac{\mu_0 I}{2r} = \frac{1.26 \times 10^{-6} \times 10}{2 \times 0.100} = 6.3 \times 10^{-5} \text{ T}$

13.11 単位長さあたりの巻き数を n とすると、磁場の強さは、 $H = nI$ となる。したがって、 $\frac{1000}{0.50} \times 1.0 = 2.0 \times 10^3 \text{ A/m}$.

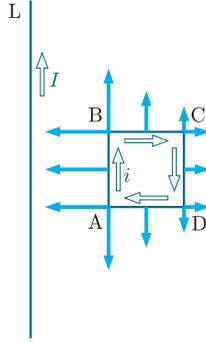
13.12 $B = \frac{F}{IL} = \frac{180}{6 \times 6} = 5 \text{ T}$

13.13 (1) 磁場中を進む荷電粒子はローレンツ力を受け、その大きさは qv_0B である。円運動の半径を r とすると、円運動の運動方程式は $m \frac{v_0^2}{r} = qv_0B$ となり、これから $r = \frac{mv_0}{qB}$ 、周期は $T = \frac{2\pi r}{v_0} = \frac{2\pi m}{qB}$ と求まる。また、回転の方向はフレミングの左手の法則を適用すると、 b となる。

(2) 磁場に平行な電場が加わったので、 q は紙面の裏から表に向かう方向に大きさ qE_1 の力を受け、 q は電場の方向に加速される。その加速度の大きさは運動方程式 $ma = qE_1$ から $\frac{qE_1}{m}$ であり、 t 秒後の速さは $\frac{qE_1}{m}t$ となる。三平方の定理を用いて、この速さと v_0 を合成すると、時刻 t における速さは $v = \sqrt{v_0^2 + \left(\frac{qE_1}{m}t\right)^2}$ と求まる。

13.14 A から B に向かう電場 $E = \frac{V}{d}$ による力とローレンツ力が釣り合えばよい。荷電粒子の電荷を q とすると、 $q \frac{V}{d} = qv_0B$ となる。これから、 $B = \frac{V}{v_0d}$.

13.15 電流 I が辺 AB の位置につくる磁束密度は紙面に垂直で表から裏に向かう。また、磁束密度の強さは $B_{AB} = \mu_0 H = \mu_0 \frac{I}{2\pi d}$ となる。これによって、AB が受ける力は、大きさが $F_{AB} = iB_{AB}a = \mu_0 \frac{iIa}{2\pi d}$ で、左向きである。同様にして、辺 CD が受ける力は、大きさが $F_{CD} = iB_{CD}a = \mu_0 \frac{iIa}{2\pi(a+d)}$ で、右向きである。辺 BC が受ける力は上向きで、辺 DA が受ける力は下向きであり、L から等しい距離はなれた部分では、同じ大きさの力が働くので、BC と DA が受ける力は打ち消し合う。したがって、合力は、その大きさが $F = F_{AB} - F_{CD} = \mu_0 \frac{iIa^2}{2\pi d(a+d)}$ で、左向きである。



第 14 章

14.1 回路を貫く磁束は $\Phi = \pi a^2 B = \pi a^2 B_0 \cos \omega t$. これから, 誘導起電力は $V = -\frac{d\Phi}{dt} = \pi a^2 B_0 \omega \sin \omega t$.

14.2 ω で回転する長さ L の導体が, 時間 t の間に掃引する面積は $S = \pi L^2 \frac{\omega t}{2\pi} = \frac{L^2 \omega t}{2}$. S を貫く磁束は $\Phi = BS = B \frac{L^2 \omega t}{2}$ となるので, 誘導起電力は $V = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{BL^2 \omega}{2}$.

14.3 導体棒 ef には $f \rightarrow e$ の向きに誘導電流が流れる. 誘導起電力の大きさは $V = BvL$ なので, 抵抗を流れる電流は $I = \frac{V}{R} = \frac{BvL}{R}$. 導体棒が受ける力は, 大きさが $F = IBL = \frac{vB^2 L^2}{R}$ で, 上向きである. 速さ v が一定に保たれるためには, F と導体棒に働く重力が等しければよい. したがって, $F = \frac{vB^2 L^2}{R} = mg$ から, $v = \frac{Rmg}{B^2 L^2}$.

14.4 (1) レンツの法則から, 誘導電流は磁束の変化を妨げる方向に流れるので, $t = 0 \sim 10$ s では電流は $a \rightarrow b$ へ, $t = 30 \sim 35$ s では $b \rightarrow a$ へ流れる. $t = 10 \sim 30$ s では磁束の変化はないので電流は流れない.

$$(2) \quad t = 0 \sim 10 \text{ s では, 電磁誘導の式 (14.5) から } V_{ab} = \left| -n \frac{d\Phi}{dt} \right| = 100 \times \frac{50 \times 2.0 \times 10^{-3}}{10} = 1.0 \text{ V.}$$

$$t = 30 \sim 35 \text{ s では, } V_{ab} = \left| -n \frac{d\Phi}{dt} \right| = 100 \times \frac{50 \times 2.0 \times 10^{-3}}{5} = 2.0 \text{ V. } t = 10 \sim 30 \text{ s では}$$

磁束の変化はないので, 誘導起電力は発生しない.

14.5 回路を貫く磁束を Φ , 生じる誘導起電力を V とする.

(i) $t < 0$ のとき, $\Phi = 0$, $V = 0$. (ii) $0 < t < \frac{b}{v}$ のとき, $\Phi = Bavt$, $V = -Bav$. 誘導電流の向きは ABCDA である. (iii) $\frac{b}{v} < t < \frac{L}{v}$ のとき, $\Phi = Bba$, $V = 0$. (iv) $\frac{L}{v} < t < \frac{L+b}{v}$ のとき, $\Phi = Ba(b+L-vt)$, $V = Bav$. 誘導電流の向きは ADCBA である. (v) $\frac{L+b}{v} < t$ のとき, $\Phi = 0$, $V = 0$.

14.6 (1) 回路を貫く磁束が増加するので, その変化を妨げる向きに誘導電流が流れる. 右ねじの法則から $b \rightarrow a$ の向き (adcba の向き) に誘導電流が流れる.

$$(2) \quad \text{時刻 } t \text{ における磁束密度は } B(t) = \frac{B_0}{T} t. \text{ これから, 回路を貫く磁束は } \Phi(t) = B(t)L^2 = \frac{B_0 L^2}{T} t$$

となるので, Δt の間の磁束の変化量は $\Delta\Phi = \frac{B_0 L^2}{T} \Delta t$.

$$(3) \quad \text{回路に発生する誘導起電力は } V = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{B_0 L^2}{T}.$$

第 15 章

15.1 $P = VI$ の関係から, $I = \frac{P}{V} = \frac{50}{100} = 0.5 \text{ A}$.

15.2 三角関数の加法定理を用いると, 電力は $P = \frac{1}{T} \int_0^T V(t)I(t) dt = \frac{V_0 I_0}{T} \int_0^T \cos \omega t \cos(\omega t - \phi) dt$
 $= \frac{V_0 I_0}{T} \int_0^T (\cos \omega t \cos \omega t \cos \phi + \cos \omega t \sin \omega t \sin \phi) dt$ と表される. ここで, $\int_0^T \cos \omega t \sin \omega t dt =$
 $\frac{1}{2} \int_0^T \sin 2\omega t dt = 0$ なので, $P = \frac{V_0 I_0}{2} \cos \phi$ が得られる. $\cos \phi$ は力率といわれる. 交流の場合, 負荷に加える電圧と流れる電流の積 (皮相電力 $\frac{V_0 I_0}{2}$) は, 負荷で熱や仕事として消費される電力 (有効電力) とは必ずしも一致しない. 力率は「力率 = $\frac{\text{有効電力}}{\text{皮相電力}}$ 」として定義され, 交流電力の効率を表す.

15.3 (1) スイッチを a に接続したときの時刻を 0 とし, 時刻 t においてコンデンサーに蓄えられている電荷, 回路を流れる電流をそれぞれ $Q(t), I(t)$ とする. キルヒホッフの第 2 法則から, $IR + \frac{Q}{C} = V_0$ の関係が得られ, $I = \frac{dQ}{dt}$ の関係を用いると, $R \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{C} = V_0$ と変形できる. 初期条件を $t = 0$ のとき $Q = 0$ とすると, コンデンサーの電荷は $Q(t) = CV_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right)$ となる. これから, 電流を求めると, $I(t) = \frac{dQ}{dt} = \frac{V_0}{R} e^{-\frac{t}{RC}}$ となる.

(2) スイッチを b に接続すると, $R \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{C} = 0$ となる. 初期条件を $t = 0$ のとき $Q = Q_0$ とすると, コンデンサーの電荷は $Q(t) = Q_0 e^{-\frac{t}{RC}}$ となる. また, 電流は $I(t) = -\frac{Q_0}{RC} e^{-\frac{t}{RC}}$ となる. 負の電流は電荷の放電を表す.

15.4 (1) スイッチを a に接続したときの時刻を 0 とし, 時刻 t において回路を流れる電流を $I(t)$ とする. キルヒホッフの第 2 法則から, $RI + L \frac{dI}{dt} = V_0$ の関係が得られる. 初期条件を $t = 0$ のとき $I = 0$ とすると, 回路を流れる電流は $I(t) = \frac{V_0}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right)$ となる.

(2) スイッチを b に接続すると, $RI + L \frac{dI}{dt} = 0$ となる. 初期条件を $t = 0$ のとき $I = I_0$ とすると, $I(t) = I_0 e^{-\frac{R}{L}t}$ が得られる.

15.5 スイッチが b に接続されているとき, キルヒホッフの第 2 法則から, $L \frac{d^2 Q}{dt^2} + \frac{Q}{C} = 0$ が得られる. これから, コンデンサーの電荷 $Q(t)$ の一般解を求めると, $Q(t) = A \cos \omega t + B \sin \omega t$ となるので, 回路を流れる電流は $I(t) = \frac{dQ}{dt} = -\omega A \sin \omega t + \omega B \cos \omega t$ と求まる. また, 初期条件 ($t = 0$ のとき $Q = Q_0, I = 0$) から, $A = Q_0, B = 0$ が得られ, 求める電流は $I(t) = -\omega Q_0 \sin \omega t$ となる.

15.6 (1) インピーダンスの定義から, $Z = \frac{100}{2.0} = 50 \Omega$.

(2) インピーダンス Z , 抵抗 R , リアクタンス ωL の間には $Z^2 = R^2 + (\omega L)^2$ の関係が成り立つ. したがって, リアクタンスは $(\omega L)^2 = Z^2 - R^2 = 2500 - 1600 = 900 \Omega^2$ より, $\omega L = 30 \Omega$ が得られる.

(3) コイルの自己インダクタンスは $L = \frac{30}{\omega} = \frac{30}{2\pi \times 50} \cong 0.096 \text{ H}$.

15.7 (1) インピーダンスの定義から,

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = \sqrt{100^2 + \left(2\pi \times 50.0 \times 1.00 - \frac{1}{2\pi \times 50.0 \times 2.00 \times 10^{-6}}\right)^2}$$

$$\cong 1.28 \times 10^3 \Omega.$$

(2) 回路を流れる電流の実効値は $\frac{100}{1.28 \times 10^3} \cong 0.0781 \text{ A}.$

(3) 共振角周波数は $\frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{1.00 \times 2.00 \times 10^{-6}}} \cong 707 \text{ rad/s}.$

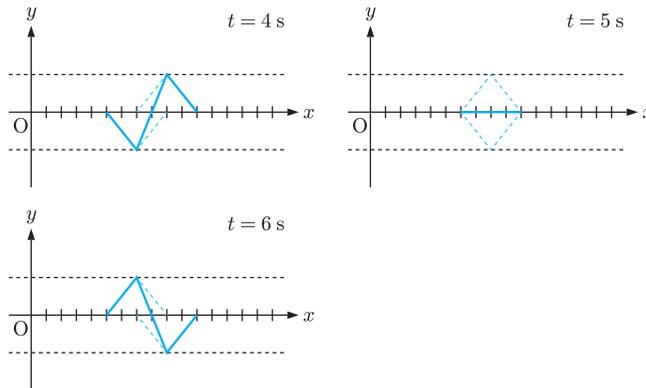
第 17 章

17.1 正の向きに進む波は $y = A \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{x}{v}\right)$ と表される. $T = 0.2 \text{ s}$, $\lambda = 8 \text{ m}$ から $v = \frac{\lambda}{T} = 40 \text{ m/s}$. $t = 0 \text{ s}$ のとき図の状態になるためには, $y = -1.2 \sin 10\pi \left(t - \frac{x}{40}\right).$

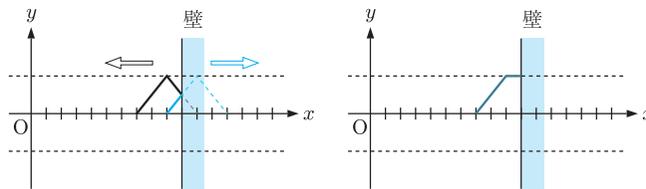
17.2 (1) 波を表す式 $y = A \sin 2\pi f \left(t - \frac{x}{v}\right) = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)$ と $y = 2 \sin 2\pi \left(\frac{t}{4} - \frac{x}{2}\right)$ を比較すると, 周期は $T = 4 \text{ s}$, 波長は $\lambda = 2 \text{ m}$, 振幅は $A = 2 \text{ m}$.

(2) 波の振動数は $f = \frac{1}{T} = 0.25 \text{ Hz}$, 伝わる速さは $v = \lambda f = 2 \times 0.25 = 0.5 \text{ m/s}$.

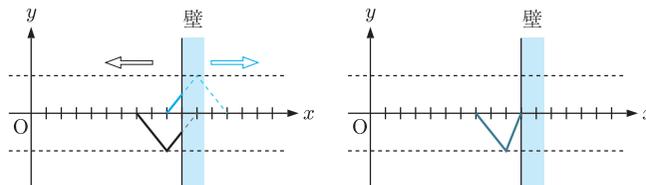
17.3



17.4 (1)



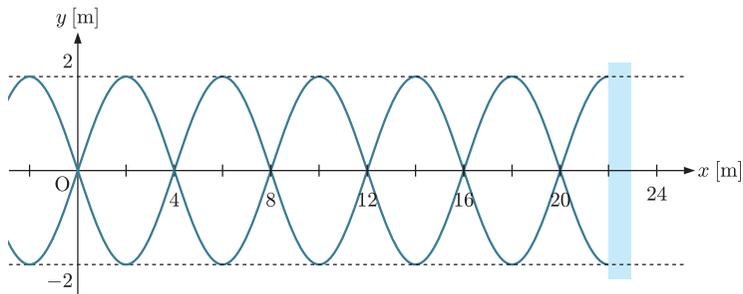
(2)



17.5 (1) 波形の山から谷向かう傾斜部の中点は密で, 谷から山に向かう傾斜部の中点は疎になるので, P_6, P_{14} が密の中心, P_2, P_{10} が疎の中心である.

- (2) 変位の大きさが最大の点は振動の折り返し点で、速さは0となるので、速度が0となる点は P_4 , P_8 , P_{12} である。
- (3) 変位が0のところでは速さが最大となる。波は x 軸の正の方向に進むので、 P_2 , P_6 , P_{10} , P_{14} のうち速度が正なのは P_6 と P_{14} である。
- (4) P_2 と P_{10} の間が1波長になるので、 $\lambda = 16 \text{ cm}$, $f = \frac{v}{\lambda} = 5 \text{ s}$.

17.6



- (1) $v = 4 \text{ cm/s}$
- (2) $x = 22 \text{ cm}$ で自由端反射されことにより生じる定常波は、 $x = 22 \text{ cm}$ を腹とする定常波である。
 (a) $x = 12 \text{ cm}$ における振幅は 0 cm , $x = 14 \text{ cm}$ における振幅は 2 cm .
 (b) $x = 6 \text{ cm}$ における変位は -0.3 cm , $x = 10 \text{ cm}$ における変位は 0.3 cm .

17.7 (1) P から腹 S までの距離を x とする。P と Q から出た波が強め合って腹となるための条件は $|\text{PS} - \text{QS}| = m\lambda$ ($m = 0, 1, 2, \dots$).

これから、 $|x - (12 - x)| = |2x - 12| = m\lambda$ が得られる。 $6 \text{ cm} \leq x < 12 \text{ cm}$ のとき、 $x = 6, 7.5, 9, 10.5 \text{ cm}$ が腹となる。また、 $0 \text{ cm} \leq x < 6 \text{ cm}$ のとき $x = 1.5, 3, 4.5 \text{ cm}$ が腹となる。

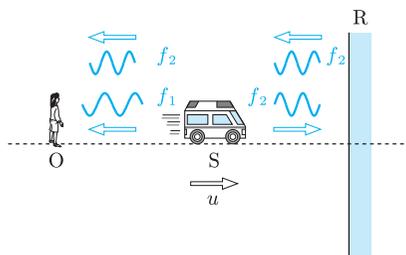
- (2) 線分 PQ の延長線上で、P, Q の外側では位相がそろった波が同じ速さ、同じ波長で進むので、振幅が2倍の波ができる。

第18章

18.1 長さ 0.25 m のメスシリンダーに基本音が生じたとき、その波長は $\lambda = 0.25 \times 4 = 1.0 \text{ m}$ 。これから、基本音の振動数は $f = \frac{v}{\lambda} = \frac{340}{1.0} = 340 \text{ Hz}$ 。

18.2 振動数 f の音波を出す音源が速さ u_s 、観測者が速さ u_o で直線上を動くとき、観測者が聞く音波の振動数は $f' = \frac{V - u_o}{V - u_s} f$ 。近づくときは $u_s = 26.0 \text{ m/s}$, $u_o = -16.0 \text{ m/s}$ なので $f' = \frac{340 + 16.0}{340 - 26.0} \times 800 \cong 907 \text{ Hz}$ 。遠ざかるときは $u_s = -26.0 \text{ m/s}$, $u_o = 16.0 \text{ m/s}$ なので $f' = \frac{340 - 16.0}{340 + 26.0} \times 800 \cong 708 \text{ Hz}$ 。

18.3 S の速さを $u = 2 \text{ m/s}$ 、音波の振動数を $f = 684 \text{ Hz}$ とする。



$$(1) f_1 = \frac{V}{V - (-u)} f = \frac{340}{340 + 2} \times 684 = 680 \text{ Hz}$$

$$(2) f_2 = \frac{V}{V-u} f = \frac{340}{340-2} \times 684 \cong 688 \text{ Hz}$$

$$(3) \Delta f = f_2 - f_1 = 8 \text{ Hz}$$

$$18.4 \quad v = \frac{c}{n} = \frac{3.0 \times 10^8}{1.5} = 2.0 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$18.5 \quad (1) n = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} \cong \frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} = \frac{PA}{P'A} = \frac{h}{h'}$$

$$(2) h' = \frac{h}{n} = \frac{2.6}{1.3} = 2.0 \text{ m}$$

18.6 波長が長波長側に変化しているのが、銀河は遠ざかっている。銀河が遠ざかる速さを u 、観測者が観測する波長を λ' とすると $\lambda' = \frac{c+u}{c}\lambda$ 。これから、波長変化は $\Delta\lambda = \frac{u}{c}\lambda$ 。この式

に、 $\Delta\lambda = 2.88 \times 10^{-10} \text{ m}$ 、 $\lambda = 3.934 \times 10^{-7} \text{ m}$ 、 $c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$ を代入して、 u を求めると
$$u = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} c = \frac{2.88 \times 10^{-10}}{3.934 \times 10^{-7}} \times 3.00 \times 10^8 \cong 2.20 \times 10^5 \text{ m/s}.$$

$$18.7 \quad (1) v = \frac{c}{n} = \frac{3.00 \times 10^8}{1.33} \cong 2.26 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$(2) \sin \theta_C = \frac{1.00}{1.33} \text{ から } \theta_C \cong 48.8^\circ.$$

$$18.8 \quad (1) \frac{\lambda}{n}$$

(2) 薄膜中での光速は $\frac{c}{n}$ 。S₁ から入射した光が S₂ で反射して再び S₁ に戻るまでの経路長は $2d$ なので、求める時間は $\frac{2nd}{c}$ 。

(3) m を 0 を含めた正の整数とすると、強め合う条件は $2nd = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda$ 、弱め合う条件は $2nd = m\lambda$ 。

$$(4) 1.1 \times 10^{-7} \text{ m}$$