

T 3 物理 T 4 化学 T 5 生物

この冊子は、**物理**、**化学** 及び **生物** の問題を 1 冊にまとめてあります。

数学科、情報科学科、応用生物科学科及び経営工学科は、物理、化学、生物のいずれかを選択

物理学科は物理指定

物理の問題は、1 ページより 35 ページまであります。
化学の問題は、36 ページより 49 ページまであります。
生物の問題は、50 ページより 74 ページまであります。

〔注 意〕

- (1) 試験開始の指示があるまで、この冊子を開いてはいけません。
- (2) 監督者から受験番号等記入の指示があったら、解答用マークシートに受験番号と氏名を記入し、さらに受験番号をマークしてください。
- (3) 解答は、所定の解答用マークシートにマークしたものが採点されます。
- (4) 解答用マークシートについて
 - ① 解答用マークシートは、絶対に折り曲げてはいけません。
 - ② マークには黒鉛筆(HBまたはB)を使用してください。
指定の黒鉛筆以外でマークした場合、採点できないことがあります。
 - ③ 誤ってマークした場合は、消しゴムで丁寧に消し、消しくずを完全に取り除いたうえ、新たにマークしてください。
 - ④ 解答欄のマークは、横 1 行について 1 箇所に限ります。
2 箇所以上マークすると採点されません。
あいまいなマークは無効となるので、はっきりマークしてください。
 - ⑤ 解答用マークシートに記載されている解答上の注意事項を、必ず読んでから解答してください。
- (5) 試験開始の指示があったら、初めに問題冊子のページ数を確認してください。
ページの落丁・乱丁、印刷不鮮明等に気づいた場合は、手を挙げて監督者に知らせてください。
- (6) 問題冊子は、試験終了後、持ち帰ってください。

物 理

1

次の問題の の中に入れるべき最も適当なものをそれぞれの解答群の中から選び、その番号を解答用マークシートの指定された欄にマークしなさい。

(35 点)

以下では、長さ、質量、時間、角度の単位をそれぞれ m , kg , s , rad とし、その他の物理量に対してはこれらを組み立てた単位を使用する。例えば、密度の単位は kg/m^3 である。また、重力加速度の大きさを g とする。

- (1) 静止した電車の天井から、質量の無視できる糸で質量 m の小球が吊るされている。天井に固定された点から小球の中心までの長さは l である。このとき、糸がたるまないように鉛直面内で小球をわずかに横に引いて、そっと手を放したところ、小球は鉛直面内で単振動をはじめた。このとき、単振動の周期 T は、 $T =$ (ア) である。ただし、小問 (1) では、周囲の空気による影響は考えない。

次に、電車が静止した状態から加速をはじめ、水平方向に一定の大きさ a の加速度で等加速度運動をしているとき、車内にいる観測者から見ると小球には慣性力(見かけの力)がはたらいている。このとき、図 1-1 のように、車内にいる観測者から見て、小球は糸が鉛直と角 θ_0 をなす位置で静止していた。このとき、加速度の向きは、図中の (イ) の向きであり、 $\tan \theta_0$ は、 $\tan \theta_0 =$ (ウ) と表すことができる。また、糸の張力の大きさ S_0 は、 $S_0 =$ (エ) となる。

次に、糸がたるまないように紙面に平行な鉛直面内で小球をつり合いの位置からわずかにずらして、そっと手を放したところ、小球は鉛直面内で単振動をはじめた。このとき、単振動の周期 T_0 は、 $T_0 =$ (オ) である。

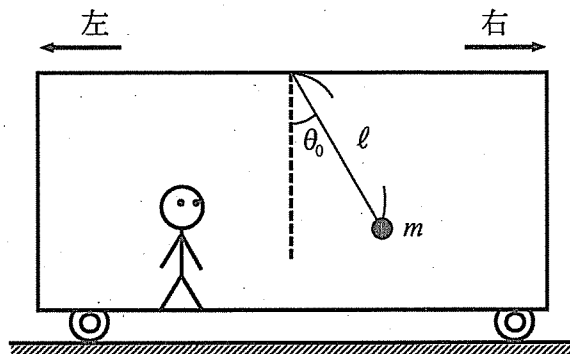


図 1-1

(ア) の解答群

- | | | | |
|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| ① $\frac{2\pi g}{\ell}$ | ② $2\pi\sqrt{\frac{g}{\ell}}$ | ③ $2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}$ | ④ $\pi\sqrt{\frac{g}{\ell}}$ |
| ⑤ $\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}$ | ⑥ $2\pi\sqrt{\ell g}$ | ⑦ $\frac{2\pi}{\ell g}$ | ⑧ $\sqrt{\frac{2\pi}{\ell g}}$ |

(イ) の解答群

- | | |
|-----|-----|
| ① 左 | ② 右 |
|-----|-----|

(ウ) の解答群

- | | | | |
|-----------------|------------------------|------------------|-------------------------|
| ① $\frac{g}{a}$ | ② $\sqrt{\frac{g}{a}}$ | ③ $\frac{a}{g}$ | ④ $\sqrt{\frac{a}{g}}$ |
| ⑤ ag | ⑥ $\sqrt{ag}$ | ⑦ $\frac{1}{ag}$ | ⑧ $\sqrt{\frac{1}{ag}}$ |

(エ) の解答群

① mg

① $m\sqrt{a^2 - g^2}$

② $m\sqrt{a^2 + g^2}$

③ $m\sqrt{\frac{a^2 + g^2}{\ell}}$

④ $m\sqrt{\frac{\ell}{\sqrt{a^2 + g^2}}}$

⑤ $m(g - a)$

⑥ $m\sqrt{a - g}$

⑦ $m\sqrt{a + g}$

(オ) の解答群

① $\pi\sqrt{\frac{\ell}{a^2 + g^2}}$

① $\pi\sqrt{\frac{a^2 + g^2}{\ell}}$

② $2\pi\sqrt{\frac{\ell}{a^2 + g^2}}$

③ $2\pi\sqrt{\frac{a^2 + g^2}{\ell}}$

④ $\pi\sqrt{\frac{\ell}{\sqrt{a^2 + g^2}}}$

⑤ $\pi\sqrt{\frac{\sqrt{a^2 + g^2}}{\ell}}$

⑥ $2\pi\sqrt{\frac{\ell}{\sqrt{a^2 + g^2}}}$

⑦ $2\pi\sqrt{\frac{\sqrt{a^2 + g^2}}{\ell}}$

左のページは白紙です。

- (2) 物体が、気体や液体などの媒質の中にあるとき、重力と逆向きに、その物体が押しつける媒質の重さに等しい力を受ける。これを物体にはたらく浮力という。浮力は、重力以外の力に対しても同様に定義することができる。すなわち、物体と媒質を含む系に慣性力がはたらいているとき、その物体が押しつける媒質にはたらく慣性力の大きさに等しい大きさの浮力を考えることができる。

その例として、一様な密度 ρ_w の水の中にある体積 V の円柱状の物体 P にはたらく力を考えてみよう。 P は一様な密度 ρ を持ち、 $\rho_w > \rho$ である。 P と水は x 軸の負の向きに一定の大きさ a の加速度 $\vec{a}$ で運動している。重力は考えず、
 図 1-2(a) のように、 P の重心は常に x 軸上にあり、 P の底面 S_1 と S_2 は常に x 軸に垂直であるとする。

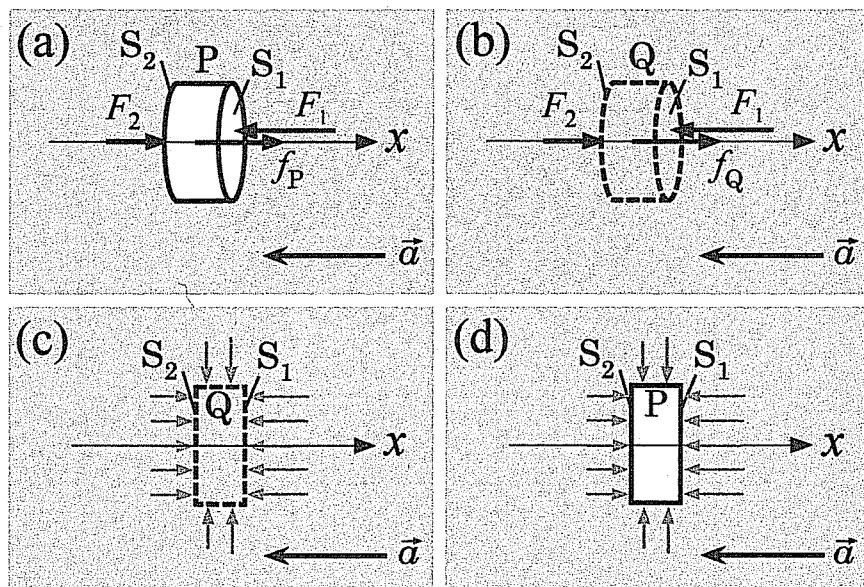


図 1-2

まず、Pにはたらく力を考える前に、Pがない場合を考えてみる。図 1-2(b)のように、Pと同じ位置にあり、Pと同じ形で体積がVの円柱状の水Qを考える。Qにはたらく慣性力は、Qのすべての質量がQの重心に集中したときにQにはたらく慣性力に一致する。いま、Qといつしよに運動している観測者から見ると、Qにはたらく慣性力の大きさ f_Q は ρ_w を用いて $f_Q = \boxed{\text{(力)}}$ と表される。さらに、図 1-2(c)(Qを真横から見た図)のように、Qには、右側の面 S_1 と左側の面 S_2 に水圧が作用している。そのため、 S_1 と S_2 には、それぞれ、水圧による力 F_1 と F_2 が作用しており、 F_1 、 F_2 の合力と慣性力がつり合っている。また、Qの側面に作用する水圧による力は、円柱の対向する側面に作用する水圧による力とつり合っているため、ここでは考慮する必要はない。

(力) の解答群

- ① $\rho_w V a^2$ ② $\rho_w V^2 a$ ③ $\rho_w V^3 a$ ④ $\rho_w V a$
- ⑤ $\frac{1}{2} \rho_w V a^2$ ⑥ $\frac{1}{2} \rho_w V^2 a$ ⑦ $\frac{1}{2} \rho_w V^3 a$ ⑧ $\frac{1}{2} \rho_w V a$

次に、Pがある場合を考える。図1-2(d)(Pを真横から見た図)のように、Pには、 S_1 と S_2 に水圧が作用しており、大きさ f_P の慣性力のほかに、水圧により S_1 に作用する力 F_1 と S_2 に作用する力 F_2 がはたらいている。このとき、Pにはたらく力の合力は、 x 軸の (キ) の向きであり、その大きさ f は、 $f =$ (ク) と表される。ここで、この合力はPにはたらく浮力と慣性力の合力と考えることができる。以上の議論は、他の形状の物体に対しても同様に成り立つ。例えば、球形の物体では、中心に質量が集中したときに物体にはたらく慣性力を用いて浮力を求めることができる。この結果をふまえて、以下では慣性力に由来する浮力の例をみてみよう。

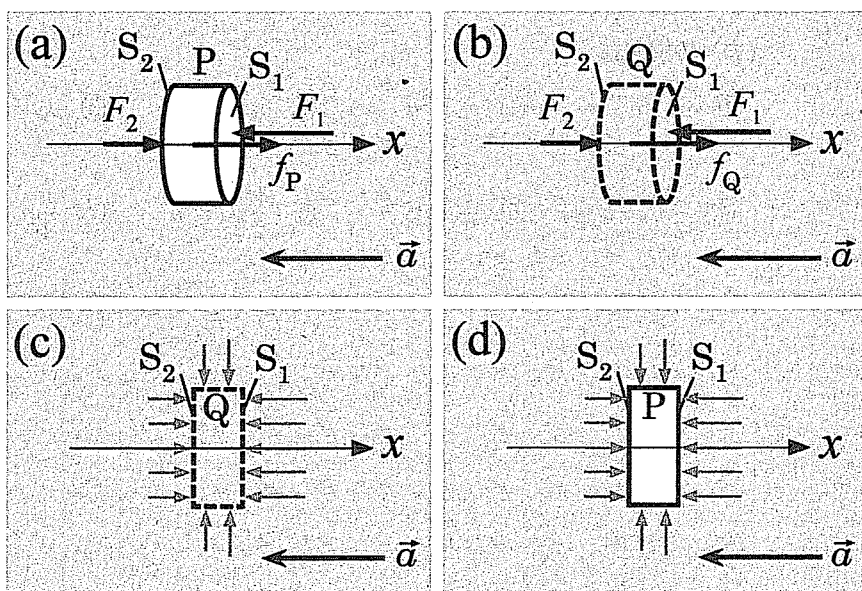


図 1-2 (再掲)

(キ) の解答群

⑩ 正

⑪ 負

(ク) の解答群

⑫ $\frac{\rho_w - \rho}{Va}$

⑬ $\rho_w Va^2$

⑭ ρVa^2

⑮ $\frac{\rho_w}{\rho} a^2$

⑯ $(\rho_w + \rho)a$

⑰ $(\rho_w - \rho)a$

⑱ $(\rho_w - \rho)Va$

⑲ $\frac{\rho_w - \rho}{a} V$

(3) 電車の床から、質量の無視できる糸で風船が固定されている。風船はゴムでできており、内部は気体のヘリウム(ヘリウムガス)で満たされており、球形で、その体積は V_b である(風船のゴムの厚みは無視できる)。床に固定された点から風船の中心までの長さは ℓ である。ヘリウムガスの密度を ρ_h 、周囲の空気の密度を ρ_a とする ($\rho_h < \rho_a$)。 ρ_h は風船の内部で場所によらず一定であり、 ρ_a は電車の内部で場所によらず一定である。ヘリウムガスを除く風船の質量を m_b とする。また、小問(3)では、空気抵抗は考えない。

糸を床に固定した状態で、電車が静止した状態から加速をはじめ、水平方向に一定の大きさ a の加速度で等加速度運動をしているとき、図 1-3 のように、車内にいる観測者から見て、風船は糸が鉛直との角 θ_1 をなす位置で静止していた。このとき、風船には、重力と糸の張力、慣性力のほかに、周りの空気から重力に由来する浮力と慣性力に由来する浮力がはたらいている。したがって、加速度の向きは、図中の (ケ) の向きであり、 $\tan \theta_1$ は、 $\tan \theta_1 =$ (コ) と表すことができる。風船にはたらく力のつり合いを考えると、糸の張力の大きさ S_1 は、 $S_1 =$ (サ) となる。ただし、風船とヘリウムガスの質量の和を $M_b = m_b + \rho_h V_b$ 、体積 V_b の空気の質量を $M_a = \rho_a V_b$ とする ($M_a > M_b$)。

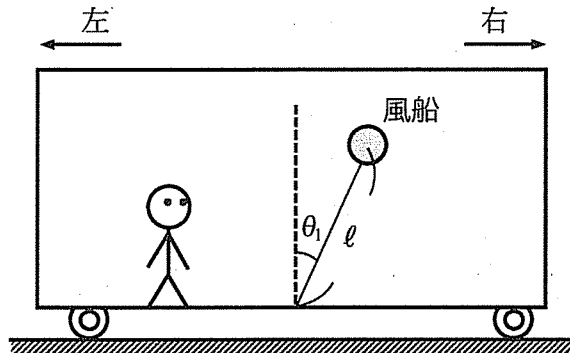


図 1-3

(ケ) の解答群

① 左

① 右

(コ) の解答群

① $\frac{g}{a} \sqrt{\frac{\rho_a}{\rho_h}}$

① $\sqrt{\frac{g}{a}}$

② $\frac{a}{g}$

③ $\frac{g}{a}$

④ $\sqrt{\frac{a}{g}}$

⑤ $\sqrt{m_b a g}$

⑥ $\frac{1}{a g} \sqrt{\frac{\rho_h}{\rho_a}}$

⑦ $\sqrt{\frac{1}{a g}}$

(サ) の解答群

① $\sqrt{a^2 + g^2}$

① $M_b a$

② $(M_a - M_b)g$

③ $M_b \sqrt{a + g}$

④ $(M_a - M_b) \sqrt{a + g}$

⑤ $M_b \sqrt{a^2 + g^2}$

⑥ $(M_a - M_b) \sqrt{a^2 + g^2}$

⑦ $(M_a + M_b) \sqrt{a^2 + g^2}$

次に、糸をたるませることなく風船をつり合いの位置から紙面に平行な鉛直面内でわずかにずらして、そっと手を放したところ、風船は鉛直面内で単振動をはじめた。このとき、単振動の周期 T_1 は、 $T_1 = \boxed{\text{(シ)}}$ である。
 $M_b = \boxed{\text{(ス)}} \times M_a$ のとき、 T_1 は小問(1)で扱った、天井から吊るされた球体の単振動の周期 T_0 と一致する。

(シ) の解答群

$$\textcircled{0} \quad \sqrt{\frac{M_b}{M_a - M_b} \frac{\ell}{a^2 + g^2}}$$

$$\textcircled{1} \quad \sqrt{\frac{M_b}{M_a - M_b} \frac{a^2 + g^2}{\ell}}$$

$$\textcircled{2} \quad 2\pi \sqrt{\frac{M_a - M_b}{M_b} \frac{\ell}{a^2 + g^2}}$$

$$\textcircled{3} \quad 2\pi \sqrt{\frac{M_a - M_b}{M_b} \frac{a^2 + g^2}{\ell}}$$

$$\textcircled{4} \quad 2\pi \sqrt{\frac{M_b}{M_a - M_b} \frac{\ell}{\sqrt{a^2 + g^2}}}$$

$$\textcircled{5} \quad \sqrt{\frac{M_b}{M_a - M_b} \frac{\sqrt{a^2 + g^2}}{\ell}}$$

$$\textcircled{6} \quad 2\pi \sqrt{\frac{M_b}{M_a} \frac{\ell}{\sqrt{a^2 + g^2}}}$$

$$\textcircled{7} \quad 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{\sqrt{a^2 + g^2}}}$$

(ス) の解答群

$$\textcircled{0} \quad \frac{1}{10}$$

$$\textcircled{1} \quad \frac{1}{5}$$

$$\textcircled{2} \quad \frac{2}{5}$$

$$\textcircled{3} \quad \frac{1}{2}$$

$$\textcircled{4} \quad \frac{2}{3}$$

$$\textcircled{5} \quad \frac{3}{4}$$

$$\textcircled{6} \quad 1$$

$$\textcircled{7} \quad \frac{3}{2}$$

(4) 図 1-4(a) のような水平面内に置かれている半径 R の円板状の回転台の溝の中に、バネ定数 k のバネの一端を回転台の中心 O に固定し、バネの他端には質量 m の小球 P を取り付ける。図 1-4(b) は回転台を上から見た様子を表している。図 1-4(b) のように O を原点として x 軸をとる。 x 軸は回転台に固定されており、回転台とともに回転する。図 1-4(a) の下図は x 軸方向から回転台を見た図である。 P は、 O を通り、 x 軸に平行に設けられた溝の中にあり、溝に沿って x 軸に平行な方向のみに運動する。また、溝の内側と P の間の摩擦は無視でき、 P は x 軸に沿ってなめらかに運動することができる。バネが自然の長さであるとき、 P は、その中心が $x = \ell$ の位置にある ($\ell < R$)。

回転台を一定の角速度 ω で回転させ、回転台上にいる観測者から見ると、 P は、その中心が $x = r$ の位置でつり合って静止していた。ただし、 $\ell < r < R$ である。このとき、 r は、 $r =$ (セ) と表すことができる。また、 $r < R$ となるために ω の満たすべき条件は (ソ) である。

(セ) の解答群

- ① $\frac{k\ell}{k + m\omega^2}$ ② $\frac{k\ell}{k - m\omega^2}$ ③ $\frac{\ell}{1 + m\omega^2}$ ④ $\frac{k\ell}{k + m\omega}$
- ⑤ $\frac{k - m\omega^2}{k\ell}$ ⑥ $\ell - \frac{k}{k + m\omega^2}$ ⑦ $\frac{k + m\omega^2}{k\ell}$ ⑧ $\ell - \frac{k - m\omega^2}{k\ell}$

(ソ) の解答群

- ① $\omega > \frac{k}{m} \sqrt{\frac{R - \ell}{\ell}}$ ② $\omega > \sqrt{\frac{R + \ell}{\ell} \frac{m}{k}}$ ③ $\omega > \sqrt{\frac{k\ell}{mR}}$
- ④ $\omega < \sqrt{\frac{R - \ell}{R} \frac{k}{m}}$ ⑤ $\omega > \sqrt{\frac{\ell}{m}}$ ⑥ $\omega < \sqrt{\frac{\ell}{mR}}$
- ⑦ $\omega > \sqrt{\frac{m\ell}{kR}}$ ⑧ $\omega < \sqrt{\frac{R - \ell}{\ell} \frac{m}{k}}$

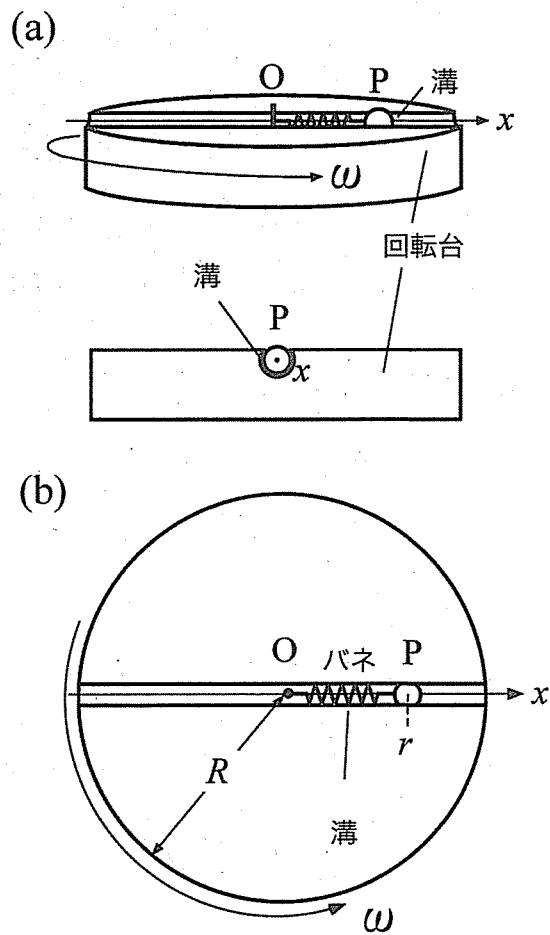


図 1-4

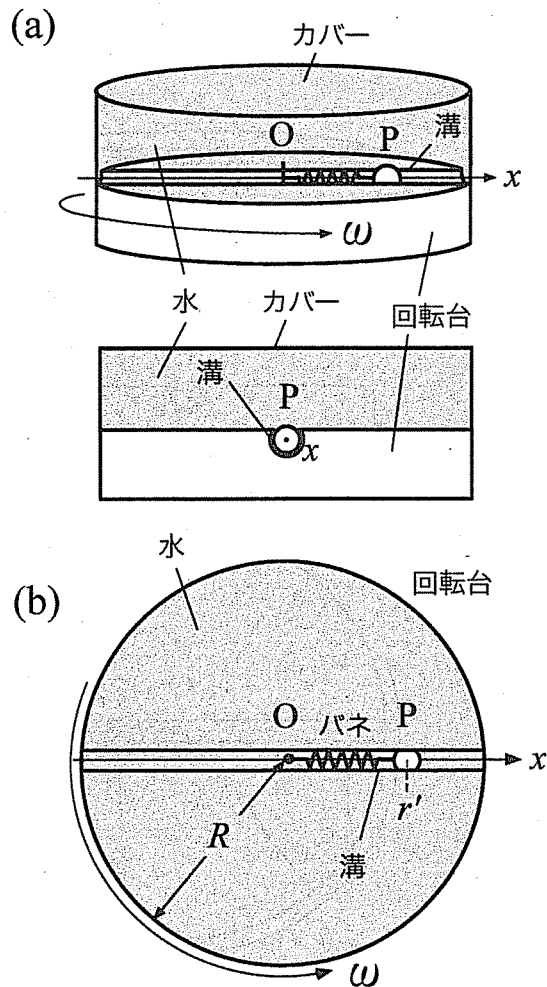


図 1-5

次に、図 1-5(a), (b) のように、回転台に、上部が閉じた円筒状のカバーを取り付け、内部を隙間なく水で満たして密閉した。その後、回転台を O を中心にして一定の角速度 ω で回転させた。水は回転台と一体となって回転し、流動しない。図 1-5(a) の下図は x 軸方向から回転台を見た図である。P は溝に沿って x 軸に平行な方向にのみ運動し、上方へ浮き上がることはない。回転してい

る回転台上にいる観測者から見ると、P は、その中心が $x = r'$ の位置で静止していた。P の密度を ρ_m 、水の密度を ρ_w 、P の体積を V とする。すなわち、 $m = \rho_m V$ である。ただし、 $\rho_w > \rho_m$ とする。また、 ρ_m は P の内部で場所によらず一定、 ρ_w はカバーの内部で場所によらず一定とする。水が P におよぼす力は浮力だけであるとする、P にはたらく慣性力とバネによる力、および周りの水からの慣性力に由来する浮力のつり合いより $r' = \boxed{\text{(タ)}}$ となる。ただし、P にはたらく慣性力は、P の中心にすべての質量が集中したときに P にはたらく慣性力に一致すると考えて良い。

次に、図 1-6 のように、図 1-5 で P を固定していたバネを取り除き、P が x 軸に沿って自由に運動できるようにする。はじめ、P を原点 O に置き、回転台を O を中心にして一定の角速度 ω で回転させた。その後、P を O からわずかにずらして、そつと手を放したところ、回転している回転台上にいる観測者から見ると、P は O を中心として x 軸に沿って単振動した。このとき、P の運動方程式から、回転台に固定された座標系 (回転座標系) から見た P の加速度の x 軸方向の成分 a_x は、P の x 座標を x_p とすると、 $a_x = \boxed{\text{(チ)}}$ と表されるので、単振動の周期 T_2 は、 $T_2 = \boxed{\text{(ツ)}}$ となる。したがって、 $\rho_m = \boxed{\text{(テ)}} \times \rho_w$ のとき、 T_2 は回転台の周期と一致する。

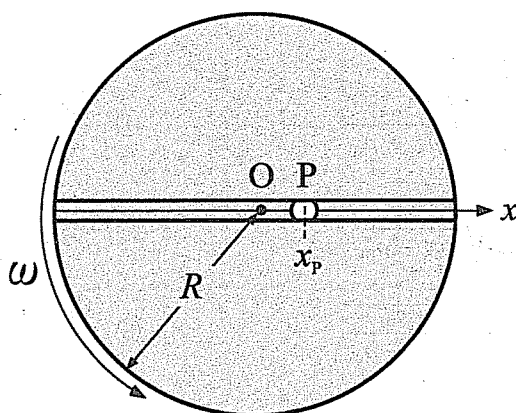


図 1-6

(タ) の解答群

$$\textcircled{0} \frac{k\ell}{k - \left(\frac{\rho_w}{\rho_m} - 1\right)V\omega^2}$$

$$\textcircled{2} \frac{k\ell}{k + (\rho_w - \rho_m)V\omega^2}$$

$$\textcircled{4} \frac{Vk\ell}{k + \left(\frac{\rho_m}{\rho_w} - 1\right)\omega^2}$$

$$\textcircled{6} \frac{k\ell}{k - \left(\frac{\rho_m}{\rho_w} + 1\right)V\omega^2}$$

$$\textcircled{1} \frac{k\ell}{k - \left(\frac{\rho_w}{\rho_m} + 1\right)V\omega^2}$$

$$\textcircled{3} \frac{k\ell}{k + (\rho_w + \rho_m)V\omega^2}$$

$$\textcircled{5} \frac{k\ell}{k + \left(\frac{\rho_w}{\rho_m} + 1\right)V\omega^2}$$

$$\textcircled{7} k(\omega\rho_m V - \ell)$$

(チ) の解答群

$$\textcircled{0} -(\rho_w - \rho_m)\omega^2 x_p$$

$$\textcircled{2} -\frac{\rho_w - \rho_m}{\rho_m x_p}\omega^2$$

$$\textcircled{4} -(\rho_w - \rho_m)\omega^2 x_p^2$$

$$\textcircled{6} -\frac{\rho_w}{\rho_m}\omega x_p$$

$$\textcircled{1} -\frac{\rho_w - \rho_m}{\rho_m}\omega x_p$$

$$\textcircled{3} -\frac{\rho_w - \rho_m}{\rho_m}\omega^2 x_p^2$$

$$\textcircled{5} -(\rho_w - \rho_m)\sqrt{\omega}x_p$$

$$\textcircled{7} -\frac{\rho_w - \rho_m}{\rho_m}\omega^2 x_p$$

(ツ) の解答群

$$\textcircled{0} \frac{2\pi}{\omega} \sqrt{\frac{\rho_m}{\rho_w - \rho_m}}$$

$$\textcircled{2} \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{\rho_m}{\rho_w - \rho_m}}$$

$$\textcircled{4} \frac{\omega}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_m}{\rho_w - \rho_m}}$$

$$\textcircled{6} \frac{\omega}{2\pi}$$

$$\textcircled{1} \frac{2\pi}{\omega} \sqrt{\frac{\rho_w - \rho_m}{\rho_m}}$$

$$\textcircled{3} \frac{1}{\omega^2} \sqrt{\frac{\rho_m}{\rho_w - \rho_m}}$$

$$\textcircled{5} \frac{2\pi}{\omega}$$

$$\textcircled{7} \frac{\omega}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_m}{\rho_w}}$$

(デ) の解答群

④ $\frac{1}{10}$

① $\frac{1}{5}$

② $\frac{2}{5}$

③ $\frac{1}{2}$

④ $\frac{2}{3}$

⑤ $\frac{3}{4}$

⑥ 1

⑦ $\frac{3}{2}$

2

次の問題の の中に入れるべき最も適当なものをそれぞれの解答群の中から選び、その番号を解答用マークシートの指定された欄にマークしなさい。

(35 点)

以下では、長さ、質量、時間、電流の単位をそれぞれ m , kg , s , A とし、その他の物理量に対してはこれらを組み立てた単位を使用する。また、真空中の誘電率を ϵ_0 、透磁率を μ_0 とする。

- (1) 直線状のじゅうぶんに長い導線を流れる電流の作る磁場は、電流を中心に同心円を描き、その向きは電流の向きに (ア) を進めようとするときのねじをまわす向きである。大きさ I の直線電流から距離 r だけ離れた点の磁場の強さは (イ) となる。

磁束密度の大きさ B の磁場中を磁場と垂直に速さ v で動く電気量 q の荷電粒子には大きさ qvB の力がはたらく。また、断面積 S の導線に沿って、電気量 $-e$ ($e > 0$)、数密度 n (単位体積あたり n 個) の自由電子が、一定の速さ v で移動しているとき、電流の大きさ I は (ウ) と表される。いま、じゅうぶんに長い 2 本の直線状の導線 C_1, C_2 を、真空中に距離 r だけ離して平行に張り、同じ向きにそれぞれ大きさ I_1, I_2 の電流を流す。導線 C_2 の長さ ℓ の部分にはたらく力の大きさは (エ) と求められる。その向きは導線どうしが (オ) 向きである。

(ア) の解答群

- ① 右ねじ ② 左ねじ

(イ) の解答群

- ① I ② $\mu_0 I$ ③ $\mu_0 r I$ ④ $\frac{I}{2r}$
⑤ $\frac{I}{2\pi r}$ ⑥ $\frac{\mu_0 I}{2\pi r}$

(ウ) の解答群

- ① env ② enS ③ evS ④ $envS$
⑤ $\frac{env}{S}$ ⑥ $\frac{enS}{v}$

(エ) の解答群

- ① $I_1 I_2 r \ell$ ② $\mu_0 I_1 I_2 r \ell$ ③ $\frac{I_1 I_2 \ell}{2r}$ ④ $\frac{I_1 I_2 \ell}{2\pi r}$
⑤ $\frac{\mu_0 I_1 I_2 \ell}{2r}$ ⑥ $\frac{\mu_0 I_1 I_2 \ell}{2\pi r}$

(オ) の解答群

- ① 引きあう ② 反発しあう

(2) 図 2-1 のように、じゅうぶんに長い 2 本の導線 C_1, C_2 を、 C_1 は点 $A(a, 0, 0)$ 、 C_2 は点 $B(-a, 0, 0)$ を通り xy 平面に垂直になるように配置する ($a > 0$ とする)。次に、厚さの無視できる導体レール R_1, R_2 を、点 $P(0, 0, \frac{\ell}{2})$ 、点 $Q(0, 0, -\frac{\ell}{2})$ を通り、 y 軸に平行になるように設置し、これに長さ ℓ 、質量 m の導体棒を xy 平面に常に垂直になるように装着する。導体棒はレールに沿って y 軸に平行な向きにだけなめらかに動くことができる。導体レールには、一定の電流を流すことのできる電源回路が接続されている。導体棒に発生する誘導起電力は無視できるほど小さいとする。導線 C_1, C_2 を流れる電流以外の電流の作る磁場の影響はすべて無視することができる。

C_1 に z 軸正の向き、 C_2 には負の向きに等しい大きさ I_1 の電流を流す。導体棒には z 軸正の向きに電流を流す。原点における磁場の強さは (カ) で、(キ) の向きである。このとき導体棒は (ク)。

次に、 C_1, C_2 に z 軸正の向きに等しい大きさ I_1 の電流を流し、導体棒には z 軸負の向きに電流を流す。導体棒を点 $R(0, b, 0)$ ($b > 0$) を通る位置に移動させてから静かに手を放す。点 R の位置における磁場の強さは (ケ) で、(コ) の向きである。したがって導体棒は (サ)。

今度は、 C_1, C_2 に z 軸正の向きに等しい大きさ I_1 の電流を流し、導体棒には z 軸正の向きに大きさ I_2 の電流を流す。導体棒を点 R を通る位置に移動させてから静かに手を放す。ただし、 $b \ll a$ とする。すると導体棒は単振動を始めた。その周期は $T = 2\pi \times$ (シ) である。

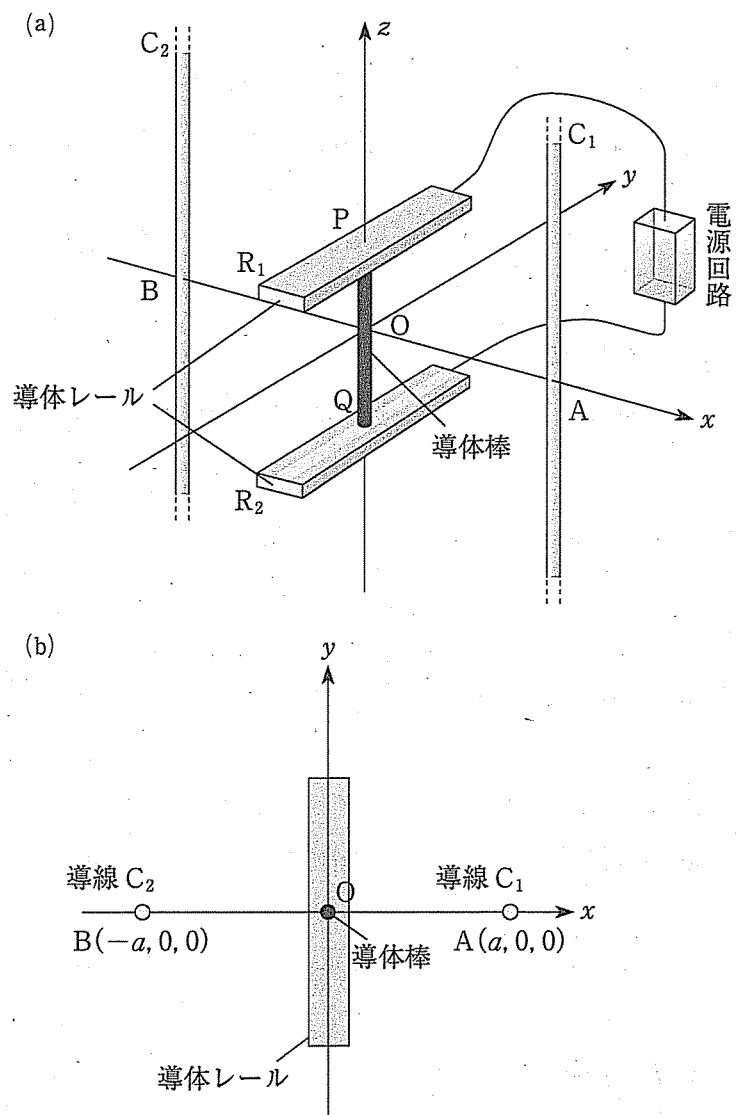


図 2-1 図 (b) は図 (a) を z 軸正の側から xy 平面を見た図である。導体レールと導体棒のそれぞれの位置が分かりやすいように、導体レール間にある導体棒も描かれている。

(力) の解答群

- ① 0 ② I_1 ③ $\frac{I_1}{2a}$ ④ $\frac{I_1}{a}$ ⑤ $\frac{I_1}{2\pi a}$ ⑥ $\frac{I_1}{\pi a}$

(キ) の解答群

- ① x 軸正 ② x 軸負 ③ y 軸正
④ y 軸負 ⑤ z 軸正 ⑥ z 軸負

(ク) の解答群

- ① 動かない ② y 軸正の向きに動く ③ y 軸負の向きに動く

(ケ) の解答群

- ① 0 ② $\frac{I_1 b}{2(a^2 + b^2)}$ ③ $\frac{I_1 b}{(a^2 + b^2)}$ ④ $\frac{I_1 b}{2\pi(a^2 + b^2)}$
⑤ $\frac{I_1 b}{\pi(a^2 + b^2)}$ ⑥ $\frac{I_1 a}{\pi(a^2 + b^2)}$ ⑦ $\frac{I_1 \pi(a^2 + b^2)}{b}$ ⑧ $\frac{I_1 \pi(a^2 + b^2)}{a}$

(コ) の解答群

- ① x 軸正 ② x 軸負 ③ y 軸正
④ y 軸負 ⑤ z 軸正 ⑥ z 軸負

(サ) の解答群

- ① 動かない ② y 軸正の向きに動く ③ y 軸負の向きに動く

(シ) の解答群

④ $\sqrt{\frac{a^2 m}{I_1 I_2 \ell}}$

① $\sqrt{\frac{a^2 m}{\mu_0 I_1 I_2}}$

② $\sqrt{\frac{a^2 m}{\mu_0 I_1 I_2 \ell}}$

③ $\sqrt{\frac{\mu_0 I_1 I_2 \ell}{a^2 m}}$

④ $\sqrt{\frac{\pi a^2 m}{I_1 I_2 \ell}}$

⑤ $\sqrt{\frac{\pi a^2 m}{\mu_0 I_1 I_2}}$

⑥ $\sqrt{\frac{\pi a^2 m}{\mu_0 I_1 I_2 \ell}}$

⑦ $\sqrt{\frac{\mu_0 I_1 I_2 \ell}{\pi a^2 m}}$

(3) 図 2-2 のように、じゅうぶんに長い導線 C_1, C_2, C_3, C_4 を、それぞれ、 C_1 は点 $A(a, 0, 0)$, C_2 は点 $B(-a, 0, 0)$, C_3 は点 $C(0, a, 0)$, C_4 は点 $D(0, -a, 0)$ を通り xy 平面に垂直になるように配置する。導体レールと導体棒は小問 (2) と同様の条件で設置する。導体棒は z 軸上に静止させる。導線 C_1, C_2, C_3, C_4 を流れる電流以外の電流の作る磁場の影響はすべて無視することができる。

C_3, C_4 には抵抗と、極板の面積が S , 極板間の距離 d の平行平板コンデンサーが接続されている。いま、スイッチを切った状態でコンデンサーに電気量 q を帯電させ、それを一定に保ったまま極板に力 F を加えてゆっくりと微小な距離だけ引き離れた。コンデンサーの静電エネルギーの変化が F による仕事に等しいとして得られる関係式をもちいると、真空中の誘電率 ϵ_0 は $\epsilon_0 = \frac{q^2}{2FS}$ のように表すことができる。

C_1, C_2 , および導体棒に z 軸正の向きに等しい大きさ I の電流を流す。スイッチを入れると、コンデンサーに蓄えられた電気量 q はすべて放出され、それによって C_3, C_4 にはそれぞれ z 軸正の向き、負の向きに電流が短い時間 Δt だけ流れたとする。このとき、 C_3, C_4 に流れる電流が原点に作る磁場により導体棒は撃力を受け、その結果、導体棒は振幅 L の単振動を開始した。 C_3, C_4 に流れる大きさ I_3 の電流が原点に作る合成磁場の強さは $\boxed{\text{(ス)}}$ で、 $\boxed{\text{(セ)}}$ の向きであり、導体棒がこの磁場から受ける力の大きさは $\boxed{\text{(ソ)}}$ である。 Δt がじゅうぶん小さいことから I_3 は近似的に平均値 $\frac{q}{\Delta t}$ で置き換えられるとすると、導体棒が受け取る力積の大きさは $\boxed{\text{(タ)}}$ となる。導体棒の初速度は、この力積によって決まるので、真空中の透磁率 μ_0 は q, ℓ, m, L などをもちいて $\mu_0 = \boxed{\text{(チ)}} \times L^2$ のように表すことができる。

真空中の誘電率、透磁率と光速 c の間には $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ の関係が成り立つことが知られている。誘電率と透磁率に関する上の考察の結果をもちいると、測定値 F, S, ℓ, L, m などから $c = \frac{1}{L} \times \boxed{\text{(ツ)}}$ のように光速の値を具体的に求めることができる。

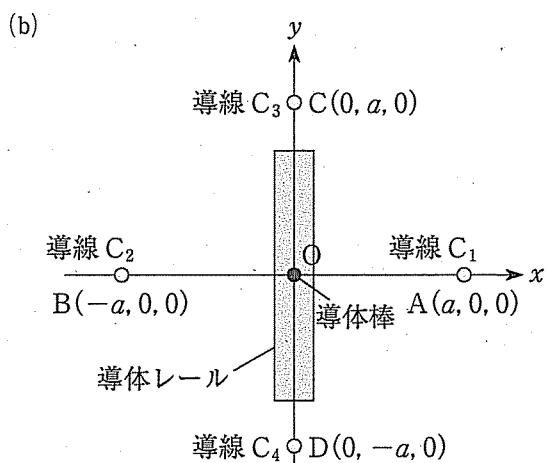
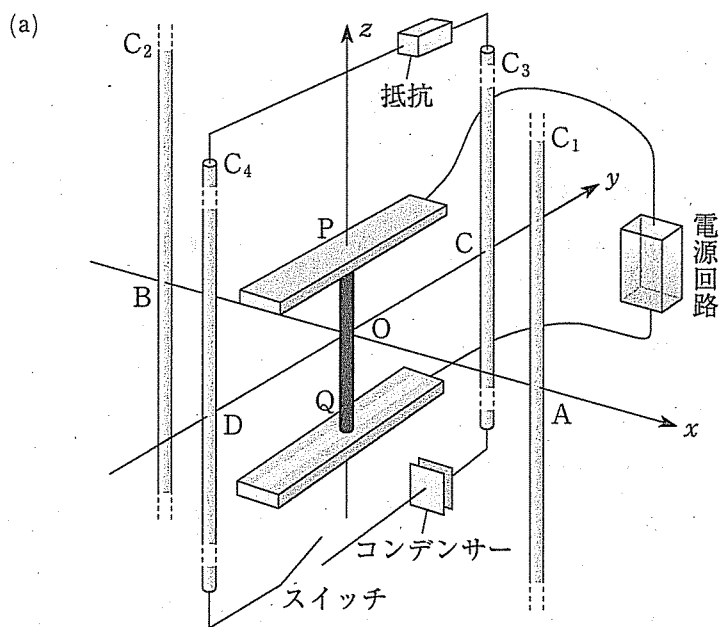


図 2-2 図 (b) は図 (a) を z 軸正の側から xy 平面を見た図である。導体レールと導体棒のそれぞれの位置が分かりやすいように、導体レール間にある導体棒も描かれている。

(ス) の解答群

- ① 0 ② I_3 ③ $\frac{I_3}{a}$ ④ $\frac{I_3}{\pi a}$ ⑤ $\frac{I_3}{2\pi a}$

(セ) の解答群

- ① x 軸正 ② x 軸負 ③ y 軸正 ④ y 軸負
⑤ z 軸正 ⑥ z 軸負

(ソ) の解答群

- ① 0 ② $\frac{I_3 I \ell}{a}$ ③ $\frac{I_3 I \ell}{\pi a}$ ④ $\mu_0 I_3 I \ell$
⑤ $\frac{\mu_0 I_3 I \ell}{2a}$ ⑥ $\frac{\mu_0 I_3 I \ell}{a}$ ⑦ $\frac{\mu_0 I_3 I \ell}{2\pi a}$ ⑧ $\frac{\mu_0 I_3 I \ell}{\pi a}$

(タ) の解答群

- ① 0 ② $\frac{I \ell q}{a}$ ③ $\frac{I \ell q}{\pi a}$ ④ $\mu_0 I \ell q$
⑤ $\frac{\mu_0 I \ell q}{2a}$ ⑥ $\frac{\mu_0 I \ell q}{a}$ ⑦ $\frac{\mu_0 I \ell q}{2\pi a}$ ⑧ $\frac{\mu_0 I \ell q}{\pi a}$

(チ) の解答群

① $\frac{m}{2\ell q^2}$

② $\frac{2m}{3\ell q^2}$

③ $\frac{m}{\ell q^2}$

④ $\frac{2m}{\ell q^2}$

⑤ $\frac{\pi m}{2\ell q^2}$

⑥ $\frac{2\pi m}{3\ell q^2}$

⑦ $\frac{\pi m}{\ell q^2}$

⑧ $\frac{2\pi m}{\ell q^2}$

(ツ) の解答群

① $\sqrt{\frac{\ell FS}{2m}}$

② $\sqrt{\frac{\ell FS}{m}}$

③ $\sqrt{\frac{3\ell FS}{2m}}$

④ $\sqrt{\frac{2\ell FS}{m}}$

⑤ $\sqrt{\frac{\ell FS}{2\pi m}}$

⑥ $\sqrt{\frac{\ell FS}{\pi m}}$

⑦ $\sqrt{\frac{3\ell FS}{2\pi m}}$

⑧ $\sqrt{\frac{2\ell FS}{\pi m}}$

3

次の問題の の中に入れるべき最も適当なものをそれぞれの解答群の中から選び、その番号を解答用マークシートの指定された欄にマークしなさい。
(同じ番号を何回用いてもよい。) (30 点)

以下では、長さや角度の単位をそれぞれ m , rad とする。

光は屈折率が異なる物質に入射すると屈折する。レンズはそのことを利用して、光を集めたり像を形成したりすることができる。図 3-1 は光軸上の点 A にある点光源から出た光が凸レンズにより光軸上の点 B に集光する様子を表している。このレンズは屈折率が n のガラスで作られており、半径 R の二つの球面（の一部）ではさまれた形状をしている。二つの球面での光の屈折を考えることで、このレンズの集光特性を考えよう。ただし、ガラスの屈折率は $n > 1$ で、空気の屈折率は 1 であるとする。また、必要であれば、 $|x|$ が小さいときに成立する三角関数の近似式 $\sin x \doteq \tan x \doteq x$ を用いてよい。

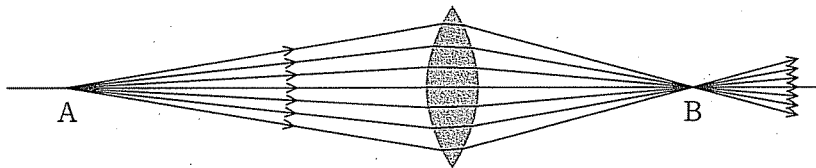


図 3-1

- (1) 図 3-2(a) は空気から屈折率が n のガラスに入射角 i で光が入射したとき、屈折角が r であることを表している。このとき、屈折の法則から関係式 $\sin r = \boxed{\text{(ア)}}がえられる。曲面に光が入射した場合にも、図 3-2(b) のように、入射した点に接する平面を考えることで、同じ関係式を適用することができる。$

(ア) の解答群

③ $\sin i$

① $n \sin i$

② $\frac{\sin i}{n}$

③ $\cos i$

④ $n \cos i$

⑤ $\frac{\cos i}{n}$

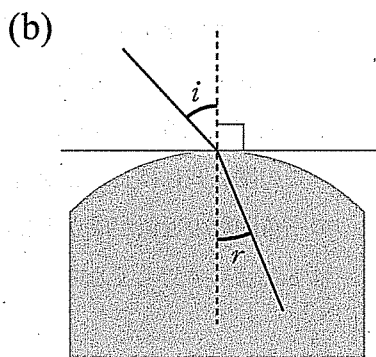
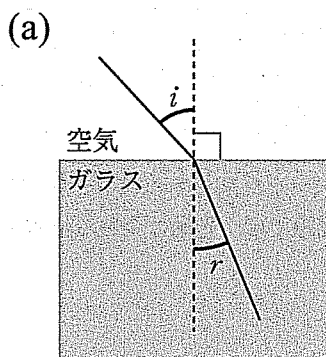


図 3-2

(2) まず、凸レンズの左側の球面での屈折に注目しよう。そのため、図3-3のように、球面の右側がガラスで満たされている状況を考える。点Aにある点光源から光軸と角度 α をなす方向に出た光線は、球面上の点Pで屈折し、点Dにおいて角度 β で光軸と交わっているとする。球面の中心を点Cとすると、線分PCの長さは半径 R である。また、線分PCと光軸のなす角度を ϕ と表す。さらに、点Pから光軸に垂直に引いた線と光軸が交わる点をHとし、線分AHの長さが ℓ_1 、線分HDの長さが ℓ_2 、線分HPの長さが h であるとする。

点Pでの屈折における入射角を i 、屈折角を r とすると、これらの角度は、 α 、 β 、 ϕ のうち必要なものを用いて、 $i = \text{ (イ) }$ 、 $r = \text{ (ウ) }$ と表すことができる。一方、 $\tan \alpha = \text{ (エ) }$ 、 $\tan \beta = \text{ (オ) }$ 、 $\sin \phi = \text{ (カ) }$ である。

これ以降は入射光線と光軸のなす角度 α が小さく、長さ h も球の半径 R に比べてじゅうぶん小さい場合を考えよう。すなわち角度 ϕ はじゅうぶん小さい。また、屈折の法則により $r < i$ であること、さらに、関係式 $i = \text{ (イ) }$ と $r = \text{ (ウ) }$ を考えあわせると、三つの角度 i 、 r 、 β もじゅうぶんに小さいことがわかる。このことを利用して、角度が小さい場合の三角関数の近似式を屈折の法則に適用すると、関係式 $\text{ (ウ) } = \text{ (キ) } \times \text{ (イ) }$ がえられる。さらに、この関係式における角度を三角関数の近似式を使って書き直すと、長さ ℓ_1 と ℓ_2 の関係式 $\frac{1}{\ell_1} = \text{ (ク) }$ がえられる。

この関係式には長さ h が含まれていないことに注目しよう。すなわち、上述の三角関数の近似が成立する角度範囲の光線では、光軸に交わる位置を示す ℓ_2 は h によらず等しくなる。

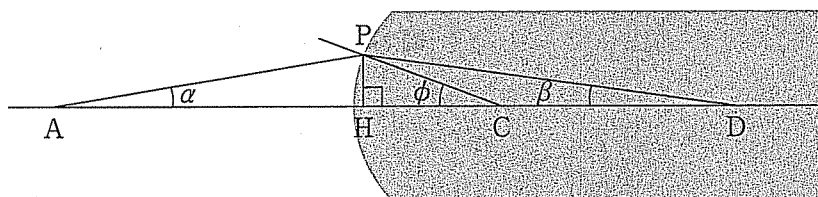


図 3-3

(イ), (ウ) の解答群

- ① $\frac{\pi}{2} - \alpha$ ② $\frac{\pi}{2} - \phi$ ③ $\alpha + \beta$ ④ $\alpha - \beta$
⑤ $\phi + \alpha$ ⑥ $\phi - \alpha$ ⑦ $\phi + \beta$ ⑧ $\phi - \beta$

(エ), (オ), (カ) の解答群

- ① $\frac{h}{\ell_1}$ ② $\frac{h}{\ell_2}$ ③ $\frac{h}{R}$ ④ $\frac{\ell_1}{h}$
⑤ $\frac{\ell_2}{h}$ ⑥ $\frac{R}{h}$

(キ) の解答群

- ① 1 ② n ③ $n-1$ ④ $\frac{1}{n}$ ⑤ $\frac{1}{n-1}$

(ク) の解答群

- ① $\frac{n-1}{R}$ ② $-\frac{1}{\ell_2} + \frac{n}{R}$ ③ $-\frac{n}{\ell_2} + \frac{n}{R}$
④ $-\frac{1}{\ell_2} + \frac{1}{R}$ ⑤ $-\frac{n}{\ell_2} + \frac{1}{R}$ ⑥ $-\frac{1}{\ell_2} + \frac{n-1}{R}$
⑦ $-\frac{n}{\ell_2} + \frac{n-1}{R}$ ⑧ $\frac{1}{\ell_2} + \frac{n-1}{R}$ ⑨ $\frac{n}{\ell_2} + \frac{n-1}{R}$

(3) 前問に続いて、光線が右側の球面で屈折する様子を考える。図 3-4 のように、左側の球面で屈折した光はレンズの内部を光軸と角度 β をなす方向に進んでいる（図の点線は右側の球面での屈折を考えない場合の光線の経路である）。点 Q で右側の球面に入射した光は屈折し、点 B において角度 γ で光軸と交わっている。右側の球面の中心を点 C' と表すと、C'Q の長さは半径 R である。また、線分 C'Q と光軸のなす角度を ϕ' と表す。点 Q から光軸に垂直に引いた線が光軸と交わる点を H' とし、線分 H'D の長さが ℓ_2 、線分 H'B の長さが ℓ_3 であるとする。

屈折の法則により関係式 (ケ) が成立する。前問と同様に、この関係式と角度が小さい場合の三角関数の近似式を用いると、長さに関する関係式 $\frac{1}{\ell_3} =$ (コ) がえられる。さらに、この凸レンズが薄いと仮定しよう。この場合、点 H' と点 H は接近しており、 ℓ_2 は近似的に ℓ_2 に等しい。このとき、距離 ℓ_1 と ℓ_3 に関して、関係式 $\frac{1}{\ell_1} + \frac{1}{\ell_3} =$ (サ) が成立する。

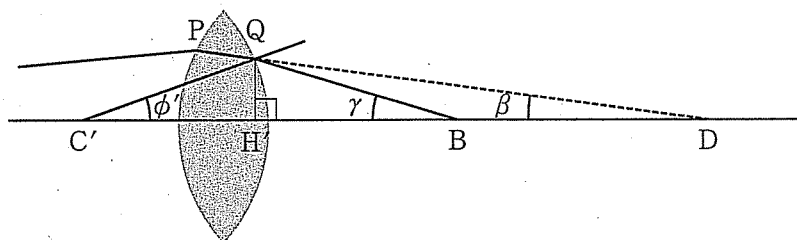


図 3-4

(ケ) の解答群

① $\sin(\phi' + \beta) = n \sin(\phi' + \gamma)$ ① $n \sin(\phi' + \beta) = \sin(\phi' + \gamma)$

② $n \sin(\phi' + \gamma) = \sin \phi'$ ③ $\sin(\phi' + \gamma) = n \sin \phi'$

④ $\cos(\phi' + \beta) = n \cos(\phi' + \gamma)$ ⑤ $n \cos(\phi' + \beta) = \cos(\phi' + \gamma)$

⑥ $n \cos(\phi' + \gamma) = \cos \phi'$ ⑦ $\cos(\phi' + \gamma) = n \cos \phi'$

(コ) の解答群

① $\frac{n-1}{R}$ ① $\frac{1}{\ell'_2} + \frac{n}{R}$ ② $\frac{n}{\ell'_2} + \frac{n}{R}$

③ $\frac{1}{\ell'_2} + \frac{1}{R}$ ④ $\frac{n}{\ell'_2} + \frac{1}{R}$ ⑤ $\frac{1}{\ell'_2} + \frac{n-1}{R}$

⑥ $\frac{n}{\ell'_2} + \frac{n-1}{R}$ ⑦ $-\frac{1}{\ell'_2} + \frac{n-1}{R}$ ⑧ $-\frac{n}{\ell'_2} + \frac{n-1}{R}$

(サ) の解答群

① $\frac{1}{R}$ ① $\frac{n}{R}$ ② $\frac{n-1}{R}$

③ $\frac{n+1}{R}$ ④ $\frac{2(n-1)}{R}$ ⑤ $\frac{2(n+1)}{R}$

点 A がレンズから無限に遠いとき、レンズに入射する光線は光軸に平行である。このとき、 $\ell_3 =$ **(シ)** を、この凸レンズの焦点距離 f と定義する。したがって、球面の半径 R が大きければ大きいほど f は **(ス)** なり、屈折率 n が大きければ大きいほど f は **(セ)** なる。関係式 $\frac{1}{\ell_1} + \frac{1}{\ell_3} =$ **(サ)** を使うと、光源の位置を変えたとき、どの点に光が集まるかを計算することができる。例えば、光源からレンズまでの距離が、レンズから集光点までの距離と等しくするには、 $\ell_1 = \ell_3 =$ **(ソ)** とすればよい。

ここまで考えたように、長さ ℓ_1 と ℓ_3 に関する関係式は、いくつかの近似を用いて導かれた。そのため、実際にレンズを使って集光実験を行うと、レンズの端付近を通る光線が、レンズの中心付近を通る光線とは異なる光軸上の点に集まる様子が観察されることがある。また、波長が異なる光が同じ点に集光されない場合がある。これは、物質の屈折率が光の波長によって異なることに原因がある。屈折率の波長依存性に関する別な光学現象としては **(タ)** が知られている。レンズの集光に関する問題を改善するために、表面の形状を非球面にしたり、異なるガラス材料でできた複数のレンズを組み合わせる工夫が行われている。

(シ) の解答群

- ① $\frac{R}{n-1}$ ② $\frac{R}{n+1}$ ③ $\frac{R}{2(n-1)}$ ④ $\frac{R}{2(n+1)}$
 ⑤ $\frac{n-1}{R}$ ⑥ $\frac{n+1}{R}$ ⑦ $\frac{2(n-1)}{R}$ ⑧ $\frac{2(n+1)}{R}$

(ス), (セ) の解答群

- ① 長く ② 短く

(ソ) の解答群

- ① $\frac{f}{4}$ ② $\frac{f}{2}$ ③ f ④ $2f$ ⑤ $4f$

(タ) の解答群

② 全反射

① 光吸収

② 蜃気楼

③ 虹

④ フラウンホーファー線

⑤ 夕焼け