H24年度実施（H25年1月10日）学習到達度試験（物理）の解答

H25. 11. 11

領域１；変位・速度・加速度

1

（1） 始めの速度 $v_0 = 36$ km/h = +10 m/s で時刻 $t = 5.0$ s で速度 $v = 0.0$ m/s より，加速度 a は次のように得られる。

$$a = \frac{v - v_0}{t} = \frac{0 - 10}{5} = -2.0 \text{ m/s}^2.$$

→ ア －， イ 2， ウ 0

（2） 時刻 $t = 0.0$ s で，初速度 $v_0 = 0.0$ m/s で，位置 $x_0 = 0.0$ m にあった物体が，等加速度運動(加速度 a)して，時刻 t で，速度 $v = 3.6$ m/s，位置 $x = 5.4$ m に到達したので，$v^2 - v_0{}^2 = 2ax$ より，加速度 a は次のように得られる。

$$a = \frac{v^2 - v_0{}^2}{2x} = \frac{3.6^2 - 0^2}{2 \times 5.4} = +1.2 \text{ m/s}^2.$$

→ エ ＋， オ 1， カ 2

（3） グラフより，時刻 $t = 0.0$ s では初速度 $v_0 = 2.5$ m/s となり，時刻 $t = 3.0$ s では速度 $v = 7.5$ m/s となる等加速度運動(加速度 a)なので，$v = v_0 + at$ より，加速度 a は次のように得られる。

$7.5 = 2.5 + a\,t$ → 加速度 $a = (7.5 - 2.5)/3.0 = 1.666 \fallingdotseq +1.7 \text{ m/s}^2$.

→ キ ＋， ク 1， ケ 7

（4） A 君の速度 $v_A = 1.2$ m/s, B 君の速度 $v_B = 7.0$ m/s とすると，A 君に対する B 君の速度は，A 君から見た B 君の速度(A 君を基準にした B 君の速度) $v_{A\to B}$ は次のように得られる。

$v_{A\to B} = v_B - v_A = 7.0 - 1.2 = +5.8$ m/s.

→ コ ＋， サ 5， シ 8

2

水平投射運動(初速 v_0 で水平方向に投射)投げた時刻 $t = 0$ とし，水平方向を x 方向，鉛直下向きを y 方向とすると，投げてからの時刻 t での，水平投射運動速度の x 成分 v_x と y 成分 v_y は重力加速度の大きさを g として，次のように表される。

$v_x = v_0$, ①　　$v_y = g\,t$. ②

さらに，投げた地点を原点として，時刻 t での位置の x 成分(水平方向の距離)と y 成分(鉛直方向の落下距離)は次のように表される。

$x = v_0\,t$, ③　　$y = g\,t^2/2$. ④

（1） ボールが地面に着く時，y 方向に進む長さは屋上から地面までの距離に等しいので，④式に，高さ $y = 4.9$ m を代入する。→ $4.9 = 9.8\,t^2/2$, → 時刻 t =1.0 s (落下するまでの時刻は正) となる。

→ ア 1， イ 0

（2） ③式に，初速度 $v_0=9.8$ m/s，時刻 $t=1.0$ s を代入すると，水平距離 x は，$x=9.8\times1.0=9.8$ m となる。

→ $\boxed{ウ}$ **9** ， $\boxed{エ}$ **8**

（3） 地面に到達する時，速度の x 成分は①式より，$v_x=9.8$ m/s，速度の y 成分は②式より，$v_y=9.8\times1.0=9.8$ m/s となる。従って，速さ v は，三平方の定理より $v=\sqrt{{v_x}^2+{v_y}^2}=\sqrt{9.8^2+9.8^2}=9.8\sqrt{2}=13.86$ ≒ 14 m/s となる。

→ $\boxed{オ}$ **1** ， $\boxed{カ}$ **4**

領域２； 力の性質と運動方程式

$\boxed{1}$

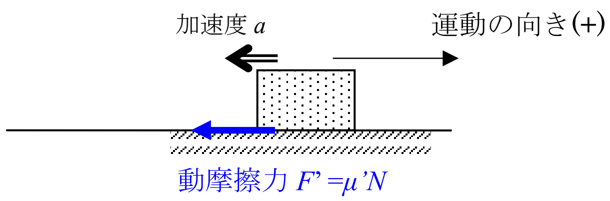
（1） 図より，力 $\vec{F}_A$ の x 成分 $F_{A,x} = -F_A \cos 45° = -6.0\times\dfrac{\sqrt{2}}{2} = -3\sqrt{2}$ N，力 $\vec{F}_B$ の x 成分 $F_{B,x} = F_B \cos 60° = 4.0\times\dfrac{1}{2} = 2.0$ N，従って，2 つの力の合力の x 成分 F_x は，$F_x = F_{A,x} + F_{B,x} = -3\sqrt{2} + 2 = -2.242 ≒ -2.2$ N となる。

→ $\boxed{\text{ア}}$ – ， $\boxed{\text{イ}}$ **2** ， $\boxed{\text{ウ}}$ **2**

（2） 静止摩擦力と引く力がつりあっている間は，物体は止まったままである。動き始める時の静止摩擦力が最大静止摩擦力となる。机の上に水平に置かれているので，物体に働く垂直抗力の大きさ N は，$N = mg = 10\times9.8 = 98$ N である。したがって，物体に働く最大静止動摩擦力の大きさ $F_0 = \mu N$ より，静止摩擦係数 $\mu = F_0/N = 49/98 = 0.50$ となる。

→ $\boxed{\text{エ}}$ **5** ， $\boxed{\text{オ}}$ **0**

（3） 粗い面上で動いている質量 m の物体に働く動摩擦力は運動の向きと逆向きに働く。動摩擦力の大きさ F' は，垂直効力の大きさ N(水平面に置かれた物体では，重力加速度の大きさ g を用いて，$N = mg$ と表される)と動摩擦係数 μ' とすると，$F' = \mu' N$ という関係式が成り立つ。従って，動摩擦力の向きは–方向なので，加速度 a を下の運動方程式より求める。



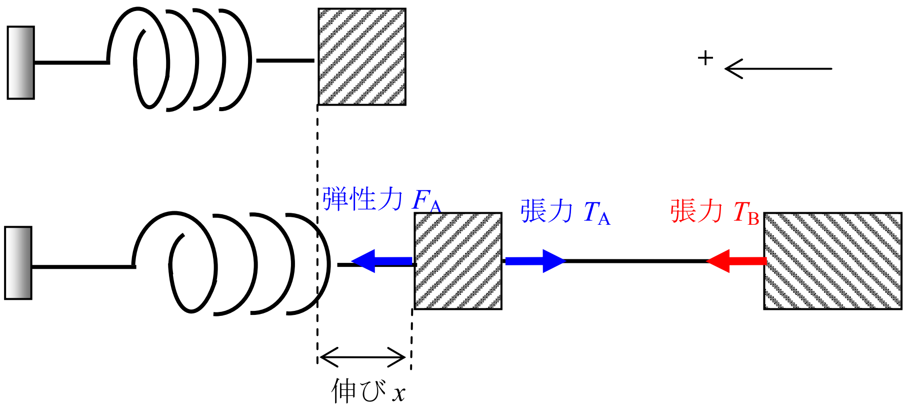
$$m a = -\mu' N \quad \rightarrow \quad a = -\mu' N/m = -\mu' m g/m = -\mu' g = -0.1\times9.8 = -0.98 \text{ m/s}^2.$$

→ $\boxed{\text{カ}}$ – ， $\boxed{\text{キ}}$ **9** ， $\boxed{\text{ク}}$ **8**

（4） 壁や床から働く鉛直抗力は壁面や床面から垂直方向に働く。また，床面からの摩擦力は床面と平行に滑らない向きに働く。以上の 2 つの条件に合致する図は②である。

→ ②

$\boxed{2}$ 下の図のようにばねが伸び x だけ伸びているときに物体 A は働く力は弾性力 $F_A(=kx)$ と糸の張力 T_A である。物体 B には糸の張力 T_B が働いている。張力 T_A と T_B は作用反作用の関係にある力である。



（1） この状態では物体 A は静止したままなので，物体 A に働く力はつりあっている。張力の大きさ T_A と弾性力の大きさ F_A $(= kx)$は等しいので，次の式が成り立つ。

$$T_A = F_A = kx.$$

→　⑤

（2） 質量 m の物体 A と質量 $2m$ の物体 B は糸で結ばれているので同じ加速度 a で運動する。従って，物体 A と物体 B で成立する運動方程式は左向きを+とすると，次の式で与えられる。

物体 A； $ma = F_A - T_A = kx - T_A$,　①

物体 B； $2ma = T_B$.　②

上の 2 つの式をそれぞれの辺で加え，作用反作用の法則($T_A = T_B$)を適用すると次の式が得られる。

$$3ma = kx \quad \rightarrow \quad \text{加速度 } a = \frac{kx}{3m}.$$

→　④

（3） 上の問で求めた加速度 a を②式に代入して張力の大きさ T_B を求める。

$$T_B = \frac{2kx}{3}.$$

→　③

領域３．　力学的エネルギー・運動量

$\boxed{1}$

（1）　物体の質量 m，速度 v とすると，物体が持つ運動エネルギーK は次のように得られる。

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\times 4.0\times(-5.0)^2 = 50\ \mathrm{J}.$$

→ $\boxed{ア}$　＋，$\boxed{イ}$　**5**，$\boxed{ウ}$　**0**

（2）　ばね定数 k のばねが自然長より縮み x の状態にある時，ばねの弾性エネルギーU は次のように得られる。

$$U = \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}\times 2.4\times 10^2\times(-0.2)^2 = 4.8\ \mathrm{J}.$$

→ $\boxed{エ}$　**4**，$\boxed{オ}$　**8**

（3）　質量 m の物体が始め速さ v_0 で動いていた。その後，物体に力 F を時間 Δt の間加えられたら，速度 v となった。「運動量の変化=力積」の関係より，終わりの速度 v は次のように得られる。

$$mv - mv_0 = F\Delta t \quad \rightarrow \quad v = v_0 + F\Delta t/m = 0 + 4.0\times 1.5 = 6.0\ \mathrm{m/s}.$$

→ $\boxed{カ}$　**6**，$\boxed{キ}$　**0**

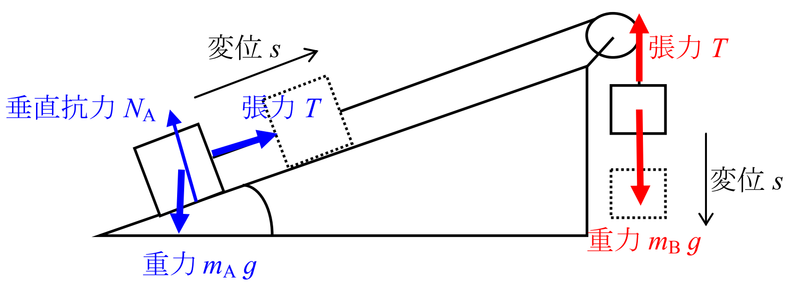
（4）　質量 m_A の物体 A と質量 m_B の物体 B が始め，速度 v_A と速度 v_B で動いていたが，2 つの物体は衝突して，衝突後は速度が v_A' と速度 v_B' となった。この時，物体 B の衝突後の速度 v_B' は「**運動量保存則**」より，次のように得られる。

$$m_Av_A + m_Bv_B = m_Av_A' + m_Bv_B' \quad \rightarrow \quad 1.0\times 0.9 + 2.0\times 0 = 1.0\times(-0.3) + 2v_B'$$

$$\rightarrow \quad v_B' = (0.9+0.3)/2 = 0.60\ \mathrm{m/s}.$$

→ $\boxed{ク}$　**6**，$\boxed{ケ}$　**0**

$\boxed{2}$　下の図のように 2 つの物体に働く力を表す。



（1）　物体 A に働く張力 T がした仕事 $W_{A,張力}$ は張力の向きと変位の向きが同じなので，「$W_{A,張力} = Ts$」となる。

→ ③

(２) 物体 A に働く重力による位置エネルギーの変化 $\Delta U_{A,重力}$ は高さ $h_A = s\sin 30° = s/2$ だけ上昇したので，$\Delta U_{A,重力} = m_A\,g\,h_A = m_A\,g\,s/2 = m\,g\,s/2$ となる。一方，物体 B に働く重力による位置エネルギーの変化 $\Delta U_{B,重力}$ は高さ $h_B = -s$ となるので，$\Delta U_{B,重力} = -m_B\,g\,h_B = -m\,g\,s$ となる。従って，物体 A と物体 B の重力による位置エネルギー変化 ΔU(= 終わりの位置エネルギー – 始めの位置エネルギー)は，「$\Delta U = \Delta U_{A,重力} + \Delta U_{B,重力} = m\,g\,s/2 - m\,g\,s = -m\,g\,s/2$」となる。

→ ⑦

(３) 「始めの全力学的エネルギー ＝ 終わりの全力学的エネルギー」という力学的エネルギー保存則が成立する。始めは 2 つの物体が止まっているので，始めの全運動エネルギーは「0」となる。物体 B が長さ s だけ下降した時(終わりの状態)，物体 B の速さを v とすると，物体 B と物体 A は糸で結ばれていので同じ速さになる。従って，終わりの全運動エネルギーは「$mv^2/2+mv^2/2 = mv^2$」となる。力学的エネルギー保存則を適用させて，速さ v は次のように得られる。

0 + 始めの位置エネルギー $= mv^2 +$ 終わりの位置エネルギー

→ $mv^2 = -\Delta U$ → $v^2 = g\,s/2$ → $v = \sqrt{g\,s/2}$.

→ ④

領域４；円運動・単振動・万有引力

1

（1） 半径 r，角速度 ω で等速円運動する宇宙ステーションに乗っている質量 m の物体に働く遠心力の大きさ F は「$F = mr\omega^2$」と表される。これが地上の重力 mg と等しいので，角速度 ω は次のように得られる。

$$mr\omega^2 = m\,g \quad \rightarrow \quad \omega^2 = g/r \quad \rightarrow \quad \omega = \sqrt{g/r} = \sqrt{9.8/49} = \sqrt{0.2} = 0.4472 ≒ 0.45 \text{ rad/s.}$$

→ ア **4，** イ **5**

（2） 距離 r だけ離れている質量 m_1 と m_2 の物体の間に働く万有引力の大きさ F は，万有引力定数を G として，次のように得られる。

$$F = G\frac{m_1\,m_2}{r^2} = 6.7\times10^{-11}\times\frac{2.0\times10^3\times4.0\times10^3}{20^2} = 1.34\times10^{-6} = 1.3\times10^{-6}\text{ N.}$$

→ ウ **1，** エ **3**

（3） 長さ(半径)r の円の円周上を角速度 ω $(=2\pi/T$；周期を T とする)で等速円運動する物体の速さ v は次のように得られる。

$$v = r\omega = 2\pi r/T = 2\pi\times0.5/0.5 = 2\pi = 6.28 ≒ 6.3 \text{ m/s.}$$

→ オ **6，** カ **3**

（4） 長さ ℓ の糸に先のつけたおもりを少し動かして単振り子を作る。この時単振り子の周期 T と長さ ℓ，重力加速度の大きさ g の間には，$T=2\pi\sqrt{\ell/g}$ の関係があるので，糸の長さ ℓ は次のようにして得られる。

$$\ell = g\,(T/2\pi)^2 = 9.8\times(3.14/2\pi)^2 = 2.45 ≒ 2.5 \text{ m.}$$

→ キ **2，** ク **5**

2

時刻 t での単振動している物体の変位(位置)x は一般に，次の式で表される。

$$x = A\sin(\omega\,t + \theta_0) = A\sin\left(2\pi\frac{t}{T} + \theta_0\right),$$

ここで，振幅 A，角振動数 ω，周期 T，初期位相 θ_0 である。さらに，上式で表された変位 x のもとで，速度 v と加速度 a は下の式のように表すことができる。

$$v = A\omega\cos(\omega\,t + \theta_0)\,, \qquad a = -A\omega^2\sin(\omega\,t + \theta_0) = -\omega^2 x\,.$$

（1） 角振動数 ω と周期 T の間には，$\omega=\theta/t=2\pi/T$ の関係が成り立つので，角振動数 ω は次のように得られる。

$$\omega = 2\pi/T = 2\pi/3.1 = 2.026 ≒ 2.0 \text{ rad/s.}$$

→ ア **2，** イ **0**

（2） 速度 v が最大になるのは $\cos(\omega\,t + \theta_0) = 1$ となる時なので，その時の速度 v_{max} は次のように得られる。

$$v_{max} = A\omega\times1 = A\omega = 0.5\times2.026 = 1.013 ≒ 1.0 \text{ m/s.}$$

→ $\boxed{\text{ウ}}$ **1**, $\boxed{\text{エ}}$ **0**

(３) 加速度 a と位置 x の間には，$a = -\,\omega^2 x$ の関係があるので加速度 a は次のように得られる。

$$a = -\,\omega^2 x = -\,2.026^2 \times 0.2 = -\,0.8209\ \mathrm{m/s^2}.$$

さらに，物体に働く復元力 F は $F = m\,a$ より，$F = 2.0 \times (-\,0.8209) = -\,1.642 \fallingdotseq -\,1.6\ \mathrm{N}.$

→ $\boxed{\text{オ}}$ **–**, $\boxed{\text{カ}}$ **1**, $\boxed{\text{キ}}$ **6**

領域５．　熱

1

（１） ある物体に熱量 Q を加えたとき，温度が ΔT 上昇した時，物体の熱容量 C は物体の温度を 1 K 上昇させるのに必要な熱量なので，次のように得られる。

$$C = Q/\Delta T = 4.0\times10^2/2.0 = 2.0\times10^2\ \mathrm{J/K}.$$

→ $\boxed{ア}$ **2，** $\boxed{イ}$ **0**

（２） 単原子分子 1 個の質量を m，単原子分子の速さの 2 乗平均を $\overline{v^2}$ とすると，理想気体 1 mol (アボガドロ数 N_{AV} 個の分子がある)の内部エネルギーU は理想気体分子の全運動エネルギーとなるので，次の関係式が成り立つ。

$$U = N_{AV}\, m\overline{v^2}/2 = M\,\overline{v^2}/2.$$

ここで，質量 M は分子 1 mol に相当する質量で，$M = m N_{AV}$ となる。上の式より，速さの 2 乗平均 $\overline{v^2}$ は $\overline{v^2} = 2U/M$ となる。従って，2 乗平均速さは次のように得られる。

$$\sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{2U}{M}} = \sqrt{\frac{2\times3.6\times10^3}{4.0\times10^{-3}}} = \sqrt{1.8\times10^6} = 1.342\times10^3 \fallingdotseq 1.3\times10^3\ \mathrm{m/s}.$$

→ ③

（２） 気体の圧力を p，気体の体積変化を ΔV とすると，外から気体にした仕事 ΔW は，$\Delta W = -p\,\Delta V$ と表される。逆に，気体が外にした仕事 $\Delta W'$は，$\Delta W' = p\,\Delta V$ と表される。

気体が膨張した時，体積変化 ΔV は正で，$\Delta V =$ (断面積)×(ピストンの移動距離) $= 4.0\times10^{-2}\times0.2 = 8.0\times10^{-3}\ \mathrm{m^3}$ となる。従って，気体から外にした仕事 $\Delta W'$は次のように得られる。

$$\Delta W' = p\,\Delta V = 1.0\times10^5\times8.0\times10^{-3} = 8.0\times10^2\ \mathrm{J}.$$

→ $\boxed{エ}$ **8，** $\boxed{オ}$ **0**

2

（１） 方法 I で熱平衡状態での温度を T_1 とし，3 つの物体の熱容量を C とすると，熱量保存則より，温度 T_1 は次のように得られる。

高温の物体が失った熱量 $= C(T - T_1)$=低温の物体が得た熱量 $= 2C(T_1 - T/2)$ →

$3T_1 = 2T$ → $T_1 = 2T/3$.

→ $\boxed{ア}$ **2，** $\boxed{イ}$ **3**

（２） 方法 II で始めに A と B を接触させた後での熱平衡状態での温度を T_2'，その後の A と C を接触させた後での熱平衡状態での温度の温度を T_2''とする。始めの過程の熱平衡状態での温度を T_2'は熱量保存則より，次のように得られる。

$C(T - T_2') = C(T_2' - T/2)$ → $T_2' = 3T/4$.

次に，次の過程の熱平衡状態での温度を T_2''は熱量保存則より，次のように得られる。

$C\,(T_2' - T_2'') = C(T_2'' - T/2)$ → $(3T/4 - T_2'') = (T_2'' - T/2)$ →

$2T_2'' = 3T/4 + T/2 = 5T/4$ → $T_2'' = 5T/8$.

→ ウ **5** , エ **8**

3

（1） 理想気体は，温度 T が一定の場合はボイルの法則「$p_1 V_1 = p_2 V_2$ =一定」が成り立つ。これより，圧力 p_2 は，体積比 V_2 / V_1=1.5 (V_1/V_2= 1/1.5)より, 次のように得られる。

$$p_2 = p_1 V_1 / V_2 = 1.0\times10^5/1.5 = 6.6660\times10^4 \fallingdotseq 6.7\times10^4 \text{ Pa.}$$

→ ア **6**, イ **7** , ウ **4**

（2） 理想気体の内部エネルギーU は絶対温度 T に比例する。物質量 n mol，気体定数 R とすると，$U = 3nRT/2$ と表される。温度が一定の変化なので，内部エネルギーU の変化はない。さらに，理想気体では内部エネルギーは気体分子が持つ全運動エネルギーにほぼ等しいので，平均の運動エネルギーの変化もない。

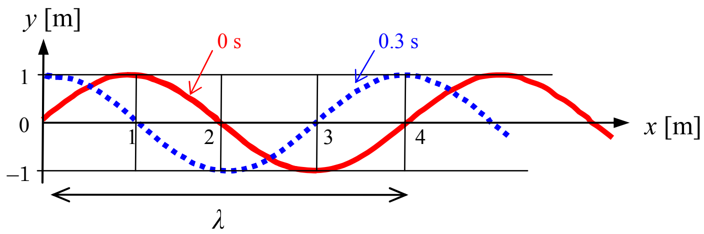
→ エ **1**, オ **0** , カ ③

（2） 外から気体に加える熱 ΔQ，外から気体に加えた仕事を ΔW とすると，熱力学第 1 法則により，気体の内部エネルギー変化 ΔU は，$\Delta U = \Delta Q + \Delta W$ と表される。逆に，気体が外に与える熱を $\Delta Q'$ (= $-\Delta Q$)，気体が外にした仕事を $\Delta W'$(= $^{-}\Delta W$ となる)とすると，熱力学第 1 法則は $\Delta U = -\Delta Q' - \Delta W'$ 上と表すことができる。さらにここで，上の問(２)の答から，内部エネルギー変化 $\Delta U = 0$ となるので，気体が外に与える熱 $\Delta Q' = -\Delta W' = -2.0\times10^2$ J となり，$\Delta Q'$ は負の量となる。従って，気体は外から熱を吸収した。

→ キ **2**, ク **0** , ケ **2**, コ ②

領域６．波動

$\boxed{1}$　図より，波長 $\lambda = 4.0$ m となる。



（1）時刻 $t = 0$ s で山の位置は $x = 1.0$ m であった。その後，波は移動し，時刻 $t = 0.3$ s では山の位置は $x = 4.0$ m となった。時間 $t = 0.3$ s の間に波は距離 $x = 3.0$ m 進んだ。従って，波の速さ $v = 3.0/0.3 = 10$ m/s である。

→　ア　**1**，イ　**0**

（2）振動数 f，波長 λ，速さ v の間の関係として，$v=f\lambda$ が成立する。従って，振動数 f は次のように得られる。

$$f = v/\lambda = 10/4 = 2.5 \text{ Hz.}$$

→　ウ　**2**，エ　**5**

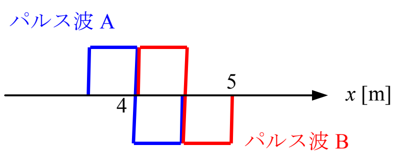
$\boxed{2}$　時刻 $t = 0$ s における 2 つのパルス波で右にあるパルス波を A(+x 方向に進む波)とし，左にあるパルス波を B(−x 方向に進む波)とする。時刻 $t = 0$ s でのパルス波 A とパルス波 B の谷と山の位置は下のようになる。

パルス波 A $\begin{cases} \text{山; } 1.5\text{ m} < x < 2.0\text{ m} \\ \text{谷; } 2.0\text{ m} < x < 2.5\text{ m,} \end{cases}$　　パルス波 B $\begin{cases} \text{山; } 6.0\text{ m} < x < 6.5\text{ m} \\ \text{谷; } 6.5\text{ m} < x < 7.0\text{ m.} \end{cases}$

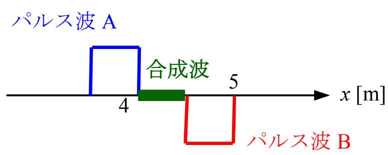
（1）時刻 $t = 2.0$ s では時刻 $t = 0$ s と比べてパルス波 A は+x 方向に 2.0 m，パルス波 B は−x 方向に 2.0 m 移動した。その結果，2 つの波は下のようになる。

パルス波 A $\begin{cases} \text{山; } 3.5\text{ m} < x < 4.0\text{ m} \\ \text{谷; } 4.0\text{ m} < x < 4.5\text{ m,} \end{cases}$　　パルス波 B $\begin{cases} \text{山; } 4.0\text{ m} < x < 4.5\text{ m} \\ \text{谷; } 4.5\text{ m} < x < 5.0\text{ m.} \end{cases}$

パルス波 A とパルス波 B は 4.0 m < x < 4.5 m の領域で重なりあい，谷と山がぶつかるので打ち消し合う。その図を下に示す。下の図より正解を選ぶ。



合成波を書く

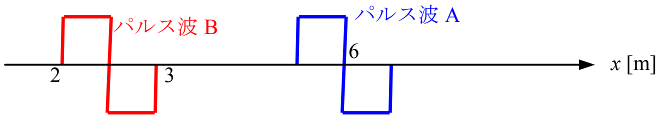


→　①

（2） 時刻 $t = 4.0$ s では時刻 $t = 0$ s と比べてパルス波 A は$+x$ 方向に 4.0 m，パルス波 B は$-x$ 方向に 4.0 m 移動した。その結果，2 つの波は下のようになる。

$$\text{パルス波 A}\begin{cases}\text{山}; 5.5\ \text{m} < x < 6.0\ \text{m} \\ \text{谷}; 6.0\ \text{m} < x < 6.5\ \text{m},\end{cases} \qquad \text{パルス波 B}\begin{cases}\text{山}; 2.0\ \text{m} < x < 2.5\ \text{m} \\ \text{谷}; 2.5\ \text{m} < x < 3.0\ \text{m}.\end{cases}$$

パルス波 A とパルス波 B は重なる領域はない。正解を選ぶ。



→ ⑤

3 波源 S が時間 t の間に振動した回数は，$f_0 t$ となる。点 P の位置で観測する見かけの波長 λ'は，図より元の(波源が静止していた状態)波長 λ (= V/f_0)より縮んだ量として観測され，次のように得られる。

$$\lambda' = \frac{\text{SPの距離}}{\text{振動の回数}} = \frac{(V-v)\,t}{f_0\,t} = \frac{(V-v)}{f_0}.$$

従って，点 P で観測される振動数 f は，$f = V/\lambda'$ より，$f = f_0\dfrac{V}{V-v}$ と得られる。

→ ア ②， イ ⑤， ウ ⑥

領域７．電気

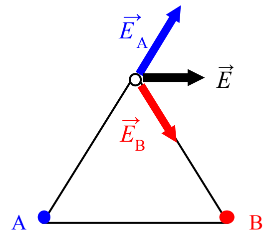
1

（1） 同符号となる電荷の間には「斥力」が，異符号となる電荷の間には「引力」が働く。距離 r だけ離れた電荷 q_1 と q_2 の間に働く静電気力の大きさ F は，静電気力に関するクーロン則の定数を k_e とすると，次のように得られる。

$$F = k_e \frac{|q_1 q_2|}{r^2} = 9.0\times10^9 \frac{1.0\times10^{-7}\times2.0\times10^{-7}}{0.2^2} = 4.5\times10^{-3}\,\mathrm{N}.$$

→ ア **4，** イ **5，** ウ ②

（2） 点 A に正の電荷 $q_A = 2.0\times10^{-8}$ C を，点 B に負の電荷 $q_B = -2.0\times10^{-8}$ C を置いた。AP 間の距離 r と BP 間の距離 r は同じで $r = 0.1$ m となる。点 A に置いた電荷によって点 P にできる電場を $\vec{E}_A$，点 B に置いた電荷によって点 P にできる電場を $\vec{E}_B$ とすると下の図のようになる。また 2 つの電場の大きさは等しく，$E_A = E_B = k_e \dfrac{|q_A|}{r^2} = 9.0\times10^9 \dfrac{2.0\times10^{-8}}{0.1^2} = 1.8\times10^4$ N/C となる。



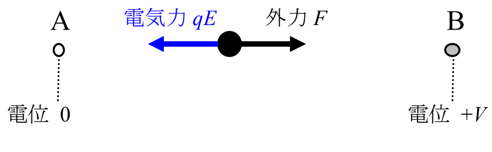
合成電場 $\vec{E}$ は，$\vec{E} = \vec{E}_A + \vec{E}_B$ より得られ，上の図より合成電場の向きは右向きでその大きさ E は下のように得られる。

$$E = 2\,E_A \cos 60° = 2\times1.8\times10^4\times(1/2) = 1.8\times10^4\ \mathrm{N/C}.$$

→ エ **1，** オ **8，** カ ③

（3） 正の電荷 q を点 A から点 B へ(AB 間の電位差$=V$)移動させるのにしたのに外力 F がした仕事 W は，$W = qV$ と表されるので，電位差 V は次のように得られる。点 A から見て点 B は高い電位 V にあるとすると，正の荷電粒子の感じる電気力は点 B から点 A へ向かい，外力はこの電気力と同じ大きさで逆向きに働く。

$$V = W/q = 1.2\times10^{-7}\ \mathrm{J}/(3.0\times10^{-9}\ \mathrm{C}) = 4.0\times10^1\ \mathrm{V} = 40\ \mathrm{V}.$$



→ キ **+，** ク **4 ，** ケ 0

（4） 断面積 S の導線を電流 I が流れている場合，電流密度 i は，$i = I/S$ と表される。また，電荷 q を持った荷電粒子の粒子数密度を n，平均の速さを v とすると，電流密度 i は，$i = nqv$ と表されるの

で，導線内の荷電粒子の平均の速さ v は下のように得られる。

$I/\mathrm{S} = nqv \quad \rightarrow \quad v = I/(Snq) = 8.5/(2.5\times10^{-6}\times8.5\times10^{28}\times1.6\times10^{-19}) = 2.5\times10^{-4}$ m/s.

→ $\boxed{\text{コ}}$ **2，** $\boxed{\text{サ}}$ **5**

$\boxed{2}$ 質量 m, 点電荷 $q = -e$ を持つ荷電粒子が電位差 V で幅 d の平行板が作る電場 $E = V/d$ の中にあるとき，電界から受ける力の大きさ F は，$F = qE$ と表されるので，粒子の加速度を a とすると運動方程式は次のように書けるので，加速度 a は下のように得られる。

運動方程式; $ma = qE = -eV/d \quad \rightarrow a = -eV/(md)$.

(上の式で加速度の負の符号は電場と逆向きとなることを意味する)

加速度の値が一定なので，等加速度運動における移動距離 y は下のように得られる。

$$y = \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2}\frac{eV}{md}\left(\frac{L}{v_0}\right)^2 = \frac{eVL^2}{2mdv_0^2}\ .$$

さらに，電場がした仕事 W は移動距離が変位 y となるので下のように得られる。

$$W = Fy = eEy = e\frac{V}{d}\frac{eVL^2}{2mdv_0^2} = \frac{e^2V^2L^2}{2md^2v_0^2}\ .$$

→ $\boxed{\text{ア}}$ ③， $\boxed{\text{イ}}$ ⑤， $\boxed{\text{ウ}}$ ⑧

3

領域８．磁気

1

（1） 磁束密度 B の中にある面積 S の面を貫く磁束 Φ は下のように得られる。

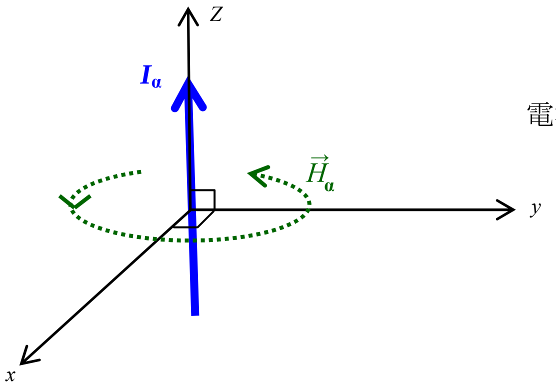
$$\Phi = BS = 2.0\times4.0\times10^{-2} = 8.0\times10^{-2}\ \mathrm{Wb.}$$

→ ア **8**， イ **0**

（2） 半径 r の円の中心における磁場 H_{tot} は直線電流の作る磁場 H_1 と円形電流の作る磁場 H_2 の重ねあわせでできる。直線電流の作る磁場の向きは，右ネジの法則より「紙面の表から裏方向」で，その大きさ $H_1 = I/(2\pi r)$となる。次に，円形電流の作る磁場の向きも右ネジの法則より「紙面の表から裏方向」でその大きさ $H_2 = I/(2r)$となる。従って，合成磁場の向きも「紙面の表から裏方向」で，その大きさ $H_{tot} = H_1 + H_2 = \dfrac{I}{2\pi r} + \dfrac{I}{2r} = \dfrac{I}{2r}\left(1 + \dfrac{1}{\pi}\right)$ となる。

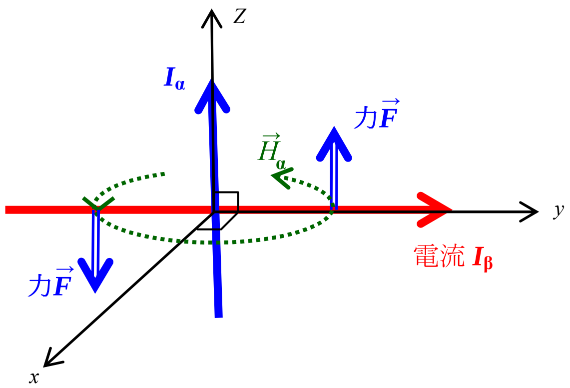
→ ウ ①， エ ⓪

（3） z 軸方向を向いた電流 $\boldsymbol{I}_\alpha$ よって作られる磁場 $\vec{H}_\alpha$ は右ネジの法則より図のように xy 平面上で渦巻き状となる。y 軸上の+側では，磁場 $\vec{H}_\alpha$ は，$\vec{H}_\alpha = (-|H_\alpha|, 0, 0)$となり$-x$ 方向を向く。y 軸上の–側では，磁場 $\vec{H}_\alpha$ は，$\vec{H}_\alpha = (|H_\alpha|, 0, 0)$となり$+x$ 方向を向く。



電流 $\boldsymbol{I}_\alpha$ によって作られる磁場 $\vec{H}_\alpha$

y 軸上で$+y$ 方向へ電流 $\boldsymbol{I}_\beta$ を流すと電流 $\boldsymbol{I}_\beta$ が流れる導線にローレンツ力 $\vec{\boldsymbol{F}}$ が働く。ローレンツ力 $\vec{\boldsymbol{F}}$ は, $\vec{\boldsymbol{F}} = \vec{\boldsymbol{I}}_\beta \times \mu_0 \vec{H}_\alpha$ と表され，右ネジの法則より力の向きは下の図のようになる。



電流 $\boldsymbol{I}_\beta$ に働くローレンツ力 $\vec{\boldsymbol{F}}$

図より，y 軸の–側ではローレンツ力$\vec{F}$の向きは「$-z$ 方向」を向き，y 軸の+側ではローレンツ力$\vec{F}$の向きは「$+z$ 方向」を向く。

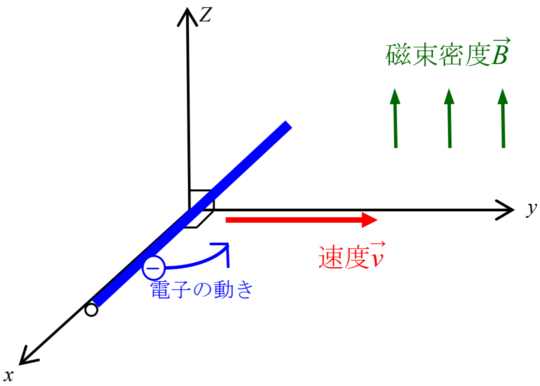
→ $\boxed{\text{オ}}$ ⑥ , $\boxed{\text{カ}}$ ⑤

（4） ソレノイドコイルの単位長さ当たりの巻き数を n，コイルに流す電流を I とすると，コイルの中心にできる磁場の大きさ H は下のように得られる。

$$H = n\,I = \frac{1.0\times10^{4}}{0.4}\times1.0 = 2.5\times10^{4}\ \text{A/m}.$$

→ $\boxed{\text{キ}}$ **2** , $\boxed{\text{ク}}$ **5**

$\boxed{2}$

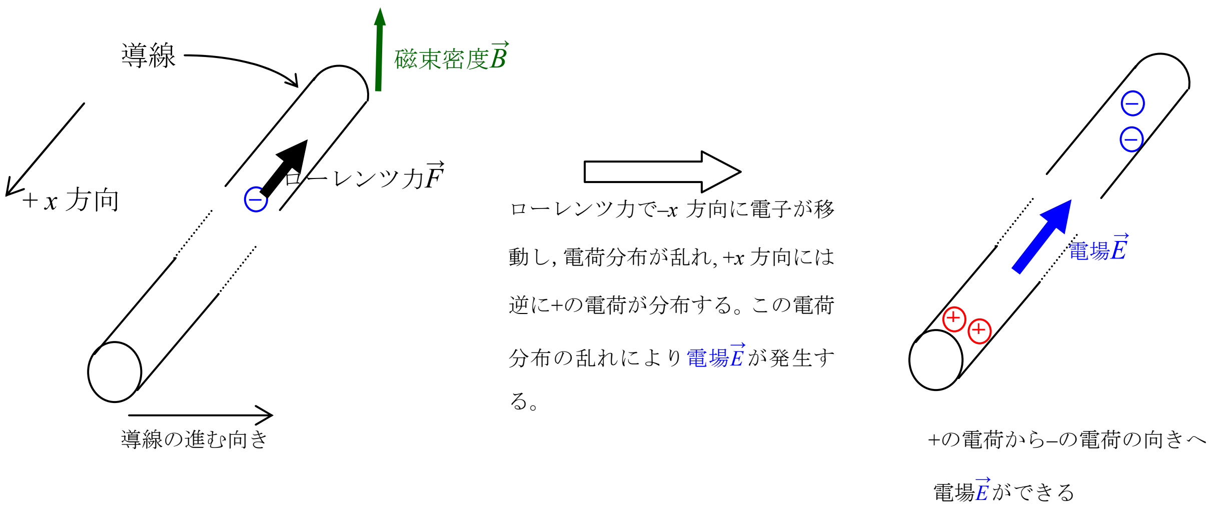


（1） 電荷 $q = -e$ の電子が磁束密度$\vec{B}$の中を速度$\vec{v}$で進む場合に受けるローレンツ力$\vec{F}$は，$\vec{F} = q(\vec{v}\times\vec{B}) = -e\,(\vec{v}\times\vec{B})$と表される。従って，導線内の電子が進む向きは$+y$ 方向と見なせるので，ローレンツ力の向きは右ネジの法則より，$-x$ 方向となる。さらに，磁場と電子の速度の向きは直交しているので，その大きさ F は下のように得られる。

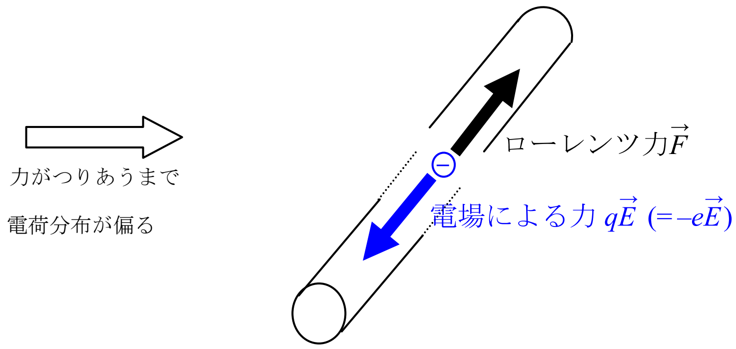
$$F = e\,v\,B = 1.6\times10^{-19}\times0.5\times0.40 = 3.2\times10^{-20}\ \text{N}.$$

→ $\boxed{\text{ア}}$ **–** , $\boxed{\text{イ}}$ **3** , $\boxed{\text{ウ}}$ **2**

（2） 導線内の電子はローレンツ力によって$-x$ 方向に移動し，導線の両端は開いているので，電子は導線の$-x$ 方向の境界にたまる。電荷分布が偏るため，図のように電場$\vec{E}$が発生する。



導線内で発生する電場の大きさは電荷分布によるが, 最終的に, ローレンツ力と電場による力がつりあうまで電荷分布は偏る。



従って,「合力$= q(\vec{v}\times\vec{B}) + q\vec{E} = 0$」が成立する。これより, 電場$\vec{E} = -(\vec{v}\times\vec{B})$ となる。電場の向きは, 図よりローレンツ力と同じ向きでその大きさ E は下のように得られる。

$E = v\,B = 0.5\times0.40 = 0.20$ V/m (=N/C).

→ $\boxed{\text{エ}}$ **－ ,** $\boxed{\text{オ}}$ **2 ,** $\boxed{\text{カ}}$ **0**

(３) 電位差 V は電場の大きさ E と長さ d の積で表されるので, 下のように得られる。

$V = E\,d = 0.20\times0.12 = 0.024 = 2.4\times10^{-2}$ V.

→ $\boxed{\text{キ}}$ **2 ,** $\boxed{\text{ク}}$ **4**

領域 9．微分積分を用いた力学

1

（1） 時刻 t での速度 $v(t)$は位置 x を時間微分することで得られる。

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = 6t^2 - 6t - 2.$$

時刻 $t = 1.0$ s での速度は上の式に代入して，$v(t{=}1\ \mathrm{s}) = 6\times1.0^2 - 6\times1.0 - 2 = -2.0$ m/s.

→ ア **－，** イ **2，** ウ **0**

（2） 下のように時刻 t での位置 $x(t)$は速度 v を時間 t で積分することで得られる。

$$x(t) = x(0) + \int_0^t v(t)\ dt = 0 + \int_0^t 2\sin(6t)\ dt = \frac{2}{6}\left[-\cos(6t)\right]_0^t = \frac{1}{3}\left(1-\cos(6t)\right).$$

→ ⑦

（3） 下のように仕事 W は力 F を位置 x で積分することで得られる。

$$W = \int_1^2 F(x)\ dx = \int_1^2 \frac{8}{x^2}\ dx = -8\left[\frac{1}{x}\right]_1^2 = -4 + 8 = 4.0\ \mathrm{J}.$$

→ エ **＋，** オ **4，** カ **0**

（4） 下のように位置 x での力 $F(x)$は位置エネルギー$U(x)$を位置 x で微分することで得られる。

$$F(x) = -\frac{dU}{dx} = -\frac{3}{2}x^2.$$

上の式に位置 $x = 2.0$ m を代入すると，$F(x) = -\frac{3}{2}\times2.0^2 = -6.0$ N と得られる。

→ キ **－，** ク **6，** ケ **0**

2

質量 m の物体が空気中を落下するとき，物体は重力 $W = mg$ と空気からの抵抗力を受ける。抵抗力 $F_{抵抗}$は物体の速度 v に比例し，比例定数 γ とすると，$F_{抵抗} = -\gamma v$ と表すことができる。従って，運鉛直下向きを+方向とすると(1)式のようになる。さらに，その解 $v(t)$は(2)式のようになる。

$$m\frac{dv}{dt} = W + F_{抵抗} = mg - \gamma v, \qquad (1)$$

$$v(t) = A\exp(-\lambda t) + B. \qquad (2)$$

（1） 充分時間が経過したとき，速度 v が一定$(dv/dt = 0)$となり，重力と抵抗力がつりあうので，上の(1)式の右辺= 0 より，その一定の速度 $v_{stedy} = mg/\gamma$ となる。

→ ④

（2） 充分時間が経過したとき，速度 v が一定$(dv/dt = 0)$となるので，(2)式より，「$v_{stedy} = B = mg/\gamma$」となる。また，(2)式で時刻 $t = 0$ を代入すると，$v(0) = A + B = 0$」となる。従って，$A = -B = -mg/\gamma$，B

$= m g/\gamma$ となる。

→ $\boxed{ア}$ ⑥，$\boxed{イ}$ ④

（３） (2)式より，速度 v を時刻 t で微分すると，$dv/dt = -A\lambda \exp(-\lambda t)$ となる。これを(1)式に代入することで下のように λ が得られる。

$$-mA\lambda \exp(-\lambda t) = m g - \gamma (A \exp(-\lambda t) - A)$$
$$= m g - m g (\exp(-\lambda t) - 1) = -m g \exp(-\lambda t).$$

→ $\lambda = g/A = \gamma/m.$

→ ⑦