$\boxed{1}$ 力学（等加速度運動（時間追跡，エネルギー），衝突）

【メモ】

・等加速度運動は①時間追跡，②エネルギーの 2 通りで考えることができる．時刻を問わない場合，基本的に②で考えると楽である．

・衝突/分裂時は力の詳細が不明なため，問題文で考えているモデル（平たく言えば条件）を与える必要がある．

$$\begin{cases} \text{外力のない方向の運動量保存則} \\ \text{問題文の条件} \end{cases}$$

なお，固定面など外力制御された面との衝突では運動量は保存しない．

・仕事の計算の分類：

$$W = \begin{cases} f\text{ が既知：}\begin{cases} f\text{ が一定：}\vec{f}\cdot\Delta\vec{x} \\ f\text{ が一定でない：}\displaystyle\int_{x_1}^{x_2} f\,dx \end{cases} \\ f\text{ が未知：エネルギー収支から逆算} \end{cases}$$

・ア，イ，キ，ク，サ，シ，ス，は等加速度運動のエネルギー．ウ，エは等加速度運動の時間追跡，オ，カは衝突，ケは仕事の計算．

・物理法則としては平易だが，全体的に計算量が多い．

【解答】

台の上端を $(0, h)$ となるように水平方向に x 軸，鉛直方向に y 軸を定める．物体の位置を (x, y)，速度を (v_x, v_y) とする．

問 1（ア）：力学的エネルギー保存則より，

$$\frac{1}{2}m{v_1}^2 + mgh = \frac{1}{2}mv^2 \qquad \therefore v_1 = \underline{\sqrt{v^2 - 2gh}}.$$

（イ）：y 方向に折り返しているとき，速度の y 方向成分は 0 である．物体 A は重力のみを受けて運動しているので，x 方向の速度成分は変化せず $v_1\cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}v_1$ である．よって，力学的エネルギー保存則より，

$$\frac{1}{2}m\left(\frac{\sqrt{3}}{2}v_1\right)^2 + mgh_1 = \frac{1}{2}mv^2 \qquad \therefore h_1 = \underline{\frac{v^2}{2g}\left(1 - \frac{3{v_1}^2}{4v^2}\right)}.$$

（ウ）：上端から飛び出した時刻を $t = 0$ とすると，時刻 t における物体の位置 (x, y) は，

$$\begin{cases} x = \dfrac{\sqrt{3}}{2}v_1 t\,, \\ y = h + \dfrac{1}{2}v_1 t - \dfrac{1}{2}gt^2 \end{cases}$$

と書ける．$y=0$ を満たす時刻は，

$$h+\frac{1}{2}v_1t-\frac{1}{2}gt^2=0 \qquad \therefore t=\frac{v_1}{2g}\left(1+\sqrt{1+\frac{8gh}{{v_1}^2}}\right)$$

であり[*1]，この時刻における x 座標を求めて，

$$d_1=\underset{\sim\sim\sim\sim\sim\sim\sim\sim\sim\sim\sim\sim\sim}{\frac{\sqrt{3}\,{v_1}^2}{4g}\left(1+\sqrt{1+\frac{8gh}{{v_1}^2}}\right)}\,.$$

（エ）: 知っているものは，高さ h_1 からの落下ゆえはね返り後の高さは $\underset{\sim\sim}{e^2h_1}$ であると判断してもよい．また，（ウ）の時刻における速度の y 成分 v_y は

$$v_y=\frac{1}{2}v_1-gt=-\frac{1}{2}\sqrt{{v_1}^2+8gh}$$

であるから，衝突直後の速度成分は $v_y=\dfrac{e\sqrt{{v_1}^2+8gh}}{2}$ である．この時刻を再度 $t=0$ とすれば，物体の位置 y，および速度成分 v_y は，

$$\begin{cases} y=\dfrac{e\sqrt{{v_1}^2+8gh}}{2}t-\dfrac{1}{2}gt^2\,, \\ v_y=\dfrac{e\sqrt{{v_1}^2+8gh}}{2}-gt \end{cases}$$

と書ける．折り返し時刻は $y=0$ を解いて $t=\dfrac{e\sqrt{{v_1}^2+8gh}}{2g}$ であるから，

$$h_2=y=\frac{e\sqrt{{v_1}^2+8gh}}{2}\cdot\frac{e\sqrt{{v_1}^2+8gh}}{2g}-\frac{g}{2}\left(\frac{e\sqrt{{v_1}^2+8gh}}{2g}\right)^2=\frac{e^2{v_1}^2}{8g}+e^2h$$

と求まる．ここで $h=\dfrac{v^2-{v_1}^2}{2g}$，$h_1=\dfrac{v^2}{2g}\left(1-\dfrac{3{v_1}^2}{4v^2}\right)$ より，

$$h_2=\frac{e^2}{8g}\left({v_1}^2+8gh\right)=\frac{e^2}{8g}\left(4v^2-3{v_1}^2\right)=e^2\left(\frac{v^2}{2g}-\frac{3{v_1}^2}{8g}\right)=\underset{\sim\sim}{e^2h_1}\,.$$

問 2 (1)（オ）（カ）: 運動量保存則，および条件（力学的エネルギー保存則）より，

$$\begin{cases} mv_{\mathrm{A}}+\dfrac{m}{2}v_{\mathrm{B}}=mv+\dfrac{m}{2}\cdot v\,, \\ \dfrac{1}{2}m{v_{\mathrm{A}}}^2+\dfrac{1}{2}\dfrac{m}{2}{v_{\mathrm{B}}}^2=\dfrac{1}{2}mv^2+\dfrac{1}{2}\dfrac{m}{2}(2v)^2 \end{cases} \qquad \therefore v_{\mathrm{A}}=\underset{\sim}{\frac{5}{3}}v\,,\quad \therefore v_{\mathrm{B}}=\underset{\sim}{\frac{2}{3}}v\,.$$

(2)（キ）: 力学的エネルギー保存則より，

$$\frac{1}{2}\frac{m}{2}\left(\frac{2}{3}v\right)^2=\frac{m}{2}gh \qquad \therefore v=\underset{\sim\sim\sim}{\sqrt{\frac{9}{2}gh}}\,.$$

*1 $t>0$ の解を選択．

（ク）：h_1 を $v \to \frac{5}{3}v$ として計算すればよい．よって，

$$H_1 = \frac{\left(\frac{5}{3}v\right)^2}{2g} - \frac{3}{8g}\left\{\left(\frac{5}{3}v\right)^2 - 2gh\right\} = \underset{\sim\sim}{\frac{37}{16}h}\,.$$

問 3 (1)（ケ）：仕事の定義より，

$$W = \begin{pmatrix} -\mu' mg \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 4h \\ 0 \end{pmatrix} = \underset{\sim\sim}{-4\mu' mg}\,.$$

（コ）：物体のエネルギー収支を考えて，

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}m\cdot 0^2 - \frac{1}{2}mv^2 &= \begin{pmatrix} -\mu' mg \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 4h \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -mg \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \\ h \end{pmatrix} \\ &= -4\mu' mgh - mgh \\ \therefore \mu' &= \underset{\sim\sim}{\frac{1}{4}\left(\frac{v^2}{2gh} - 1\right)}\,. \end{aligned}$$

（サ）：物体のエネルギー収支を考えて，

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}m\cdot 0^2 - \frac{1}{2}mv^2 &= \begin{pmatrix} -\mu' mg \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 4h + D \\ 0 \end{pmatrix} \\ &= -\mu' mg(4h + D) \\ \therefore D &= \underset{\sim\sim}{\frac{v^2}{2\mu' h} - 4h}\,. \end{aligned}$$

あるいは，力学的エネルギー収支を考えて，

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{2}m\cdot 0^2 - \frac{1}{2}m\cdot 0^2\right) + (mg\cdot 0 - mgh) &= \begin{pmatrix} \mu' mg \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -D \\ 0 \end{pmatrix} \\ &= -\mu' mgD \\ \therefore D &= \underset{\sim\sim}{\frac{h}{\mu'}}\,. \end{aligned}$$

（シ）（ス）：$D = 2h$ を用いて[*2]，

$$\begin{cases} \mu' = \frac{1}{4}\left(\frac{v^2}{2gh} - 1\right), \\ 2h = \frac{v^2}{2\mu' h} - 4h \end{cases} \qquad \therefore v = \underset{\sim\sim}{\sqrt{6gh}}, \quad \mu' = \underset{\sim}{\frac{1}{2}}\,.$$

[*2] サの出題ミス（2 通りの表現で解答可能）により，μ' についても $\mu' = \frac{v^2}{12gh}$ と解答できる．本来想定された解答は $\frac{1}{2}$ と考えられる．採点の際に，$\mu' = \frac{v^2}{12gh}$ と解答と解答した学生にも不利益が生じないように採点されたことを願う．

2 電磁気（電気回路）

【メモ】

・回路の状態決定（電荷の決定）は，以下に従う．

$$\begin{cases} \text{キルヒホッフの法則（第 2 法則）} \\ \text{電荷保存則（キルヒホッフ第 1 法則を含む）} \\ \text{素子の性質} \end{cases}$$

・ジュール熱 J の計算は以下のように行う．

$$J = \begin{cases} RI^2 \times (\text{経過時間}) & (I \text{ 一定のとき}), \\ \text{エネルギー収支から逆算} & (I \text{ 一定でないとき}). \end{cases}$$

この問題の問 1 では，I は一定だが r が一定ではないため上記定石では下に該当する．

【解答】

問 1 (1) (ア) : 始状態におけるコンデンサの帯電量を Q_0 とする．はじめ，コンデンサの電位差が V_0 であることから

$$V_0 = \frac{Q_0}{C} \qquad \therefore Q_0 = \underset{\sim\sim}{CV_0}\,.$$

(イ) : コンデンサの帯電量を Q とする．キルヒホッフの法則は，

$$\frac{Q}{C} - rI = 0$$

となる．$t = 0$ において，$Q = Q_0 = CV_0$，$r = R_0$ より，

$$\frac{CV_0}{C} - R_0 I = 0 \qquad \therefore I_0 = \underset{\sim\sim}{\frac{V_0}{R_0}}\,.$$

(ウ) : コンデンサの正に帯電している極板から電流が湧き出している．よって，電流の定義より $I = -\dfrac{dQ}{dt}$ と書ける．今，$I = I_0$ で一定ゆえ $\dfrac{dQ}{dt} = \dfrac{\Delta Q}{\Delta t}$ としてよく，

$$I_0 = -\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{V_0}{R_0}$$

$$\therefore \frac{Q - CV_0}{t - 0} = -\frac{V_0}{R_0} \qquad \therefore Q = \underset{\sim\sim\sim\sim\sim\sim}{-\frac{V_0}{R_0}(t - CR_0)}\,.$$

なお，微分を差分に置き換えなくとも，以下のように両辺を t で積分すれば同様の結果を得る．

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{V_0}{R_0}$$

$$\int_0^t \frac{dQ}{dt}\,dt = -\int_0^t \frac{V_0}{R_0}\,dt$$

$$\int_{Q(0)}^{Q(t)} dQ = -\frac{V_0}{R_0}t$$

$$Q - Q_0 = -\frac{V_0}{R_0}t \qquad \therefore Q = CV_0 - \frac{V_0}{R_0}t = -\frac{V_0}{R_0}(t - R_0C)\,.$$

（エ）：$Q = 0$ を解いて，

$$-\frac{V_0}{R_0}(t - CR_0) = 0 \qquad \therefore t = \underset{\sim\sim}{R_0C}\,(=T)\,.$$

(2)（オ）：キルヒホッフの法則，および $I_0 = \dfrac{V_0}{R_0}$，$Q = -\dfrac{V_0}{R_0}(t - R_0C)$ より，

$$\frac{Q}{C} - rI_0 = 0 \qquad \therefore r = \frac{Q}{I_0C} = \underset{\sim\sim\sim}{R_0 - \frac{t}{C}}\,.$$

(3)（カ）：消費電力は公式より，

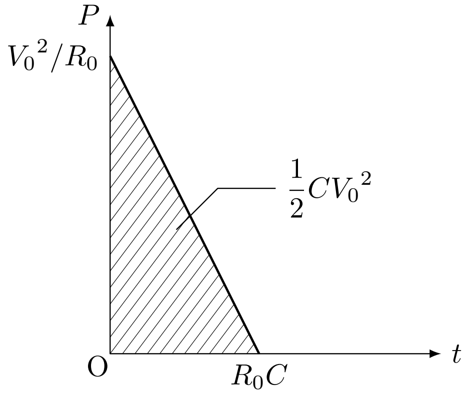
$$P = r{I_0}^2 = \underset{\sim\sim\sim\sim\sim\sim}{\left(R_0 - \frac{t}{C}\right)\left(\frac{V_0}{R_0}\right)^2}\,.$$

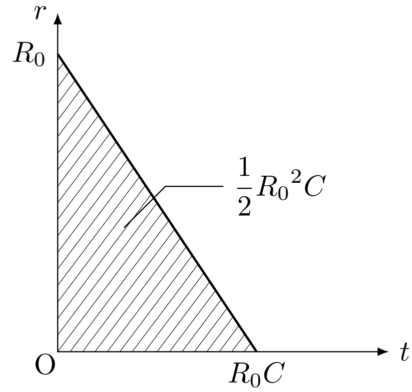
（キ）：回路のエネルギー収支より，

$$J = -\Delta U = -\frac{1}{2}\frac{0^2}{C} + \frac{1}{2}\frac{(CV_0)^2}{C} = \underset{\sim\sim\sim}{\frac{1}{2}C{V_0}^2}\,.$$

なお，誘導に従ってもよい．消費電力を t で積分して，

$$J = \underbrace{\int_0^T P\,dt}_{Pt\ \text{図の面積}} = \left(\frac{V_0}{R_0}\right)^2 \underbrace{\int_0^{R_0C}\left(R_0 - \frac{t}{C}\right)dt}_{rt\ \text{図の面積}} = \underset{\sim\sim\sim}{\frac{1}{2}C{V_0}^2}\,.$$





問 2 (1) (ク)：始状態以前（スイッチを閉じているとき）において，コイルに流れている電流を I，可変抵抗を図の右向きに流れている電流を i とする．キルヒホッフの法則より，

$$\begin{cases} V_0 - R_0(I+i) - L\dfrac{dI}{dt} = 0\,, \\ V_0 - R_0(I+i) - ri = 0 \end{cases}$$

が成り立つ．スイッチを閉じてから十分時間経過後 $L\dfrac{dI}{dt} = 0$ となり，このとき各素子を流れる電流 I，i をそれぞれ I_0，i_0 とする．$r = R_0$ より，

$$\begin{cases} V_0 - R_0(I_0+i_0) - 0 = 0\,, \\ V_0 - R_0(I_0+i_0) - R_0 i_0 = 0 \end{cases} \qquad \therefore i_0 = 0\,, \quad I_0 = \frac{V_0}{R_0}$$

と求まる．

さて，スイッチ切断後のキルヒホッフの法則は

$$-L\frac{dI}{dt} - rI = 0$$

である．コイルの性質より，スイッチ切り替えの前後で電流は連続値を取るため[*3]，$t=0$ において回路に流れる電流は $I = \dfrac{V_0}{R_0}$ である．よって，$r = R_0$ より，

$$-L\frac{dI}{dt} - R_0 \cdot \frac{V_0}{R_0} = 0 \qquad \therefore \frac{dI}{dt} = -\underset{\sim\sim}{\frac{V_0}{L}}\,.$$

（ケ）：傾き（時間変化率）が一定ゆえ $\dfrac{dI}{dt} = \dfrac{\Delta I}{\Delta t}$ としてよく，

$$\begin{aligned} \frac{\Delta I}{\Delta t} &= -\frac{V_0}{L} \\ \therefore \frac{I - V_0/R_0}{t-0} &= -\frac{V_0}{L} \qquad \therefore I = \underset{\sim\sim\sim\sim}{-\frac{V_0}{L}\left(t - \frac{L}{R_0}\right)}\,. \end{aligned}$$

なお，微分を差分に置き換えなくとも，以下のように両辺を t で積分すれば同様の結果を得る．

$$\begin{aligned} \frac{dI}{dt} &= -\frac{V_0}{L} \\ \int_0^t \frac{dI}{dt}\,dt &= -\int_0^t \frac{V_0}{L}\,dt \\ \int_{I(0)}^{I(t)} dI &= -\frac{V_0}{L}t \\ I - I_0 &= -\frac{V_0}{L}t \qquad \therefore I = \frac{V_0}{R_0} - \frac{V_0}{L}t = -\frac{V_0}{L}\left(t - \frac{L}{R_0}\right)\,. \end{aligned}$$

*3 本質的にはエネルギー保存則である．

（コ）：$I=-\frac{V_0}{L}\left(t-\frac{L}{R_0}\right)$ より，コイルに発生する誘導起電力（コイルの電位降下）は

$$L\frac{dI}{dt}=\frac{d}{dt}\left\{-\frac{V_0}{L}\left(t-\frac{L}{R_0}\right)\right\}=-V_0$$

となる．よって，I の時間変化率 $\frac{dI}{dt}$ を妨げる方向（ここでは時間変化率が負となる向きを正と読む）を正と取れば，

$$L\left(-\frac{dI}{dt}\right)=\underline{V_0}\,.$$

(2)（サ）：キルヒホッフの法則，および $I=-\frac{V_0}{L}\left(t-\frac{L}{R_0}\right)$ より，

$$-L\frac{dI}{dt}-rI=0 \qquad \therefore r=-\frac{L\frac{dI}{dt}}{I}=\underline{\frac{L}{L-R_0t}}R_0\,.$$

(3)（シ）：消費電力は公式より，

$$P=rI^2=\left(-L\frac{dI}{dt}\right)\cdot I=\underline{-\left(t-\frac{L}{R_0}\right)\frac{{V_0}^2}{L}}\,.$$

（ス）：$I=0$ を解いて，

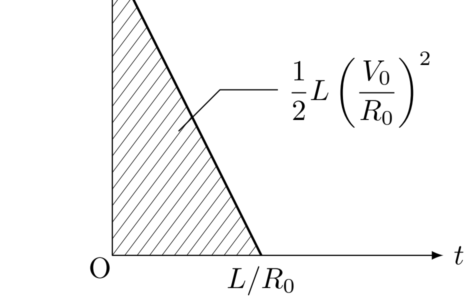
$$-\frac{V_0}{L}t+\frac{V_0}{R_0}=0 \qquad \therefore t=\underline{\frac{L}{R_0}}\,(=T)\,.$$

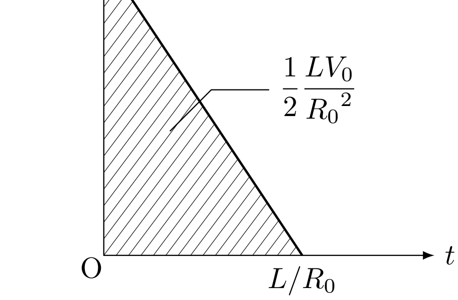
（セ）：回路のエネルギー収支より，

$$J=-\mathit{\Delta}U=-\frac{1}{2}L\cdot\frac{0^2}{+}\frac{1}{2}L\left(\frac{V_0}{R_0}\right)^2=\underline{\frac{1}{2}L\left(\frac{V_0}{R_0}\right)^2}\,.$$

なお，誘導に従ってもよい．消費電力を t で積分して，

$$J=\underbrace{\int_0^T P\,dt}_{Pt\text{ 図の面積}}=V_0\underbrace{\int_0^{\frac{L}{R_0}}\left\{-\frac{V_0}{L}\left(t-\frac{L}{R_0}\right)\right\}dt}_{It\text{ 図の面積}}=\underline{\frac{1}{2}L\left(\frac{V_0}{R_0}\right)^2}\,.$$





$\boxed{3}$ 波（正弦進行波，干渉）

【メモ】

・波のグラフは，波形グラフから読み取るのが基本．波形グラフ→振動グラフ，振動グラフ→波形グラフの行き来もできるようにしたい．

$$\begin{cases} \text{波形グラフ} & \to & \text{グラフの波 1 個分が波長}\lambda \\ \text{振動グラフ} & \to & \text{グラフの波 1 個分が周期 } T \end{cases}$$

振動グラフは，媒質ごとの力学で学んだ変位と時刻のグラフである．

・波の式は，日本語で言語化してから立式する習慣をつける（以下正弦波の式）．

$$y(x,t) = A\sin(\omega t \mp kx + \theta_0)\,.$$

$\omega = \dfrac{2\pi}{T}$ は角振動数（T は周期），$k = \dfrac{2\pi}{\lambda}$ は波数（λ は波長），θ_0 は初期位相である．また，位相（三角関数の中身）の符号から進行方向を読み取れる（負のとき正方向に伝播，正のとき負方向に伝播）．

・干渉条件は整数を m として，

$$\begin{aligned} (\text{位相差}) &= \frac{2\pi}{\lambda}(\text{経路差}) + (\text{初期位相差}) + (\text{反射に伴う位相のずれ}) \\ &= \begin{cases} 2m\pi & (\text{強めあい})\,, \\ (2m-1)\pi & (\text{弱めあい})\,. \end{cases} \end{aligned}$$

特に，媒質中では $\lambda \to \dfrac{\lambda}{n}$ とする（n は屈折率）．

・問 2(2) では，経路差による位相差がなく，反射も関与しておらず，初期位相差のみで干渉を論じる．

・これは 2016 年 2 月 25 日に実施された入試問題である．2015 年 9 月 14 日，マイケルソン干渉計を利用した重力波観測装置 LIGO によって人類史上初めて重力波が観測された．この観測結果は 2016 年 2 月 11 日に発表され，世界的ニュースとなった．そしてこの観測結果は 2017 年，つまりその約 1 年後に異例の早さでノーベル物理学賞を受賞することとなる．この年のこの問題の最後にマイケルソン干渉計が入っているのは単なる偶然ではないだろう．

【解答】

問 1 (1)（ア）（イ）: グラフより $A = \underbrace{0.15\,\mathrm{m}}_{ア}$，$\lambda = \underbrace{0.40\,\mathrm{m}}_{イ}$ である．

（ウ）: 波形グラフにおける波 1 個分の長さ（波長）が $0.40\,\mathrm{m} = \dfrac{2}{5}\,\mathrm{m}$ であり，図より $+\sin$ 型である．よって，

$$y = 0.15\sin\left(\frac{2\pi}{2/5}x\right) = \underline{0.15\sin(5\pi x)}\,.$$

（エ）：波の基本式より，

$$T = \frac{1}{f} = \frac{\lambda}{v} = \underset{\sim\sim\sim\sim}{0.20\,\mathrm{s}}.$$

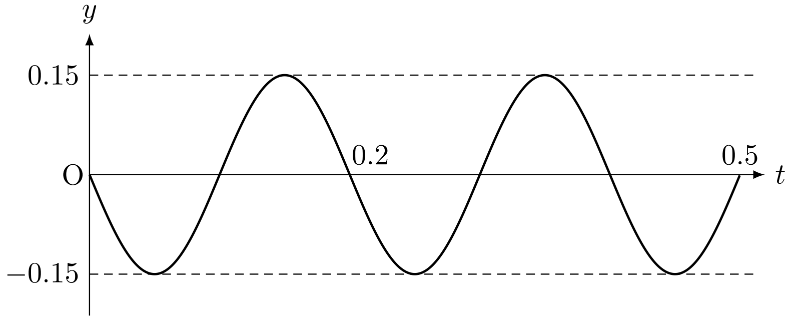
（オ）：$0 < t_1 < T$ より，t_1 の波形は $t = 0$ の波形が $0.05\,\mathrm{m} = \dfrac{1}{20}\,\mathrm{m}$ だけ平行移動したものである．よって，速度の定義より，

$$\frac{1}{20}\,\mathrm{m} = vt_1 = 2t_1 \qquad \therefore t_1 = \frac{1}{40}\,\mathrm{s} = \underset{\sim\sim\sim\sim\sim\sim\sim\sim}{2.5 \times 10^{-2}\,\mathrm{s}}.$$

(2)　時刻 $t = 0$ より少し後の波形を考えれば，$x = 0$ にある媒質の変位 y が $y < 0$ となっていることが読み取れる．よって，$x = 0$ の振動グラフは $-\sin$ 型であることがわかる．振動グラフにおける波 1 個分の長さ（周期）が $0.20\,\mathrm{s} = \dfrac{1}{5}\,\mathrm{s}$ であることから，

$$y = -0.15\sin\left(\frac{2\pi}{1/5}t\right) = \underset{\sim\sim\sim\sim\sim\sim\sim\sim\sim\sim}{-0.15\sin(10\pi t)}.$$

これを $0 \leq t \leq 0.5\,\mathrm{s}$ 図示すれば以下のようになる．



(3)　原点で生じた波が位置 x まで伝わるのに要する時間は $\dfrac{x}{v}$ である．よって，

（位置 x での今の変位）＝（原点での x/v 前の変位）

である．よって，$v = 2.0\,\mathrm{m/s}$ より，

$$y(x,t) = y\left(0, t - \frac{x}{2}\right) = -0.15\sin\left\{10\pi\left(t - \frac{x}{2}\right)\right\} = \underset{\sim\sim\sim\sim\sim\sim\sim\sim\sim\sim\sim\sim\sim\sim}{-0.15\sin(10\pi t - 5\pi x)}.$$

問 2 (1)（カ）：与式より，

$$\begin{aligned}
y = y_1 + y_2 &= A\sin(\omega t - kr_1) + A\sin(\omega t - kr_2) \\
&= A\{\sin(\clubsuit) + \sin(\spadesuit)\} \\
&= A\left\{\sin\left(\frac{\clubsuit + \spadesuit}{2} + \frac{\clubsuit - \spadesuit}{2}\right) + \sin\left(\frac{\clubsuit + \spadesuit}{2} - \frac{\clubsuit - \spadesuit}{2}\right)\right\} \\
&= 2A\sin\left(\frac{\clubsuit + \spadesuit}{2}\right)\cos\left(\frac{\clubsuit - \spadesuit}{2}\right) \\
&= \underset{\sim\sim\sim\sim\sim\sim\sim\sim\sim\sim\sim\sim}{2A\cos\left\{\frac{k}{2}(r_1 - r_2)\right\}}\sin\left\{\omega t - \frac{k}{2}(r_1 + r_2)\right\}
\end{aligned}$$

（キ）：$\cos\left\{\dfrac{k}{2}(r_1-r_2)\right\}=\pm1$ となるとき，最も大きく振動する．よって，

$$\frac{k}{2}(r_1-r_2)=0\,,\ \pm\pi\,,\ \pm2\pi\,,\ \cdots \qquad \therefore |r_1-r_2|=\underset{\sim\sim\sim}{\frac{2m\pi}{k}}\,.$$

ここで m は 0 以上の整数である．

（ク）：$\cos\left\{\dfrac{k}{2}(r_1-r_2)\right\}=0$ となるとき，P で振動が観測されなくなる．よって，

$$\frac{k}{2}(r_1-r_2)=\pm\frac{\pi}{2}\,,\ \pm\frac{3}{2}\pi\,,\ \pm\frac{5}{2}\pi\,,\ \cdots \qquad \therefore |r_1-r_2|=\underset{\sim\sim\sim}{\frac{(2m+1)\pi}{k}}\,.$$

ここで m は 0 以上の整数である．

(2)（ケ）：題意より，y_1，y_2 は以下のように書ける．

$$\begin{aligned} y_1&=A\sin(\omega t-kR)\,,\\ y_2&=\underset{\sim\sim\sim}{A\sin(\omega t-kR+\beta)}\,. \end{aligned}$$

（コ）：同時刻での 2 つの波の位相差 $\varDelta\phi$ は，

$$\varDelta\phi=(-kR+\beta)-(-kR)=\beta$$

である．よって，弱めあいの干渉条件を考えて，

$$\beta=\underset{\sim\sim\sim}{(2m+1)\pi}\,.$$

問 3 (1) s 動かすと，往復 $\underset{\sim}{2s}$ だけ光路長が長くなる．なお，屈折率は 1 だから，光路長は経路長と等しい．

(2) 始状態のハーフミラーと固定ミラーの距離を L_a，ハーフミラーと移動ミラーの距離を L_b とする．始状態では強めあいゆえ，これを m 次の干渉とすれば，

$$\frac{2\pi}{\lambda}(2L_\mathrm{b}-2L_\mathrm{a})=2m\pi$$

が成り立つ．移動ミラーを s だけ遠ざけたとき，ハーフミラーと移動ミラーの距離は $L_\mathrm{b}+s$ となる．この間，弱めあった後，強めあい，再度弱めあったことから，位相差は $2m\pi+3\pi$ とわかる．以上より，

$$\begin{cases} \dfrac{2\pi}{\lambda}(2L_\mathrm{b}-2L_\mathrm{a})=2m\pi\,,\\ \dfrac{2\pi}{\lambda}(2L_\mathrm{b}+2s-2L_\mathrm{a})=2m\pi+3\pi \end{cases} \qquad \therefore s=\frac{3}{4}\lambda=\underset{\sim\sim\sim}{4.8\times10^{-7}\,\mathrm{m}}\,.$$