第 1 問

問 1 720m 離れているところから，340 m/s の速さで音が伝わるので，サイレンの音が観測者に伝わる時間は

$$\frac{720}{340} \fallingdotseq \mathbf{2.1}_{ア} 秒$$

である．また，サイレンの振動数が f_0 [Hz] のとき，観測者が聞く振動数を f' [Hz] として，ドップラー効果の式より

$$f' = \frac{340}{340-20} f_0 = \frac{17}{16} f_0$$

$f_0 = 960\,\mathrm{Hz}$ のとき，$f' = \mathbf{1020}_{イ}\,\mathrm{Hz}$ であり，$f_0 = 770\,\mathrm{Hz}$ のとき，$f' \fallingdotseq 820\,\mathrm{Hz}$ である．

以上から，$\boxed{\ 1\ }$ ⑤ **(答)**

問 2 ランプの抵抗を R とする．回路に流れる電流を I とすると，ランプの消費電力は I^2R であり，I が大きいほど，ランプが明るくなる．コンデンサーをつなげてしまうと，十分時間が経過したときに，電流が流れなくなってしまうので不適．回路の電流を大きくするには，回路の合成抵抗をなるべく小さくすればよい．十分時間が経つとコイルに生じる誘導起電力が 0 になり，実質抵抗 0 の導線とみなせる．よって，ランプが最も明るくなる回路素子の組み合わせは，

導線とコイル　$\boxed{\ 2\ }$ ① **(答)**

一方，交流回路の場合，コイルとコンデンサーのリアクタンスが等しい条件から，コイルとコンデンサーとランプのインピーダンスは R となる．[*1] よって，ランプが最も明るくなる回路素子の組み合わせは，**コイルとコンデンサー**

$\boxed{\ 3\ }$ ④ **(答)**

問 3 図 4 においては，慣性力は進行方向と反対方向にはたらいている．つまりカメラ A からみると（図 5），左方向に慣性力がはたらいている．

一方，図 6 の状況では慣性力は円運動の中心と反対方向，つまり，カメラ B からみると（図 7），右方向に慣性力がはたらいている．よって，図 5 を参考にすれば，風船の様子として最も適当なものは，$\boxed{\ 4\ }$ ② **(答)**[*2]

問 4 電子の運動エネルギーの増加の分，X 線のエネルギーは小さくなる．よって，散乱 X 線の波長は，入射 X 線の波長より **大きい**$_{ウ}$[*3] また，衝突前後の運動量保存則に，$\lambda = \lambda'$，$\theta = 90°$ を代入すると

$$x 方向 : \frac{h}{\lambda} = 0 + mv\cos\phi$$
$$y 方向 : 0 = \frac{h}{\lambda} - mv\sin\phi$$

これらの式から，$mv\cos\phi = mv\sin\phi$，つまり，$\tan\phi = 1$ であるから，$\phi = \mathbf{45°}_{エ}$．よって，$\boxed{\ 5\ }$ ② **(答)**

問 5 圧力と気体の体積が等しいので，状態方程式（圧力）×（体積）＝（物質量）×（気体定数）×（絶対温度）より，（物質量）×（気体定数）×（絶対温度）は等しい．

(a) 単原子分子理想気体の内部エネルギーは $\frac{3}{2}$ ×（物質量）×（気体定数）×（絶対温度）と表されるので，内部エネルギーは等しい．

(b) 分子 1 個あたりの平均運動エネルギーは，分子の質量を m，ボルツマン定数を k，絶対温度を T として，$\frac{3}{2}kT$ と表される．2 つの気体は温度が異なっているので，分子 1 個あたりの平均運動エネルギーは等しくない．

---

*1 角振動数 ω の交流電源につなぎ，コンデンサーの電気容量を C，コイルの自己インダクタンスを L とすると，抵抗，コンデンサー，コイルを直列につないだときのインピーダンス Z は

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

であり，いま，$\omega L = \frac{1}{\omega C}$ の条件から，インピーダンスは $Z = R$

*2 ちなみに，ヘリウム風船が慣性力と逆方向に傾いているのは，ヘリウム風船にはたらく慣性力（ヘリウム風船の質量に比例）よりも，まわりの空気が押す力（浮力：ヘリウム風船がおしのけた空気の質量に比例）の方が大きいためである．

*3 光子 1 個のエネルギーは，プランク定数を h，波長を λ，光速を c として，$\frac{hc}{\lambda}$ と表されるため，λ が大きいほど光子 1 個のエネルギーは小さくなる．

（c）分子の速度の 2 乗平均を $\overline{v^2}$ とすると，二乗平均速度は $\sqrt{\overline{v^2}}$ である．

$$\frac{1}{2}m\overline{v^2} = \frac{3}{2}kT \qquad \therefore \quad \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

であり，ここ物質量 n をかけると

$$n\sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3kn^2T}{m}}$$

nT は同じであるが，n は異なるので，n^2T も異なる．よって，分子の二乗平均速度と物質量の積は等しくない．
以上から，$\boxed{\;6\;}$ ①**（答）**

第 2 問

問 1 衝突後の小物体 A の速さは ev_0 であるから，失った力学的エネルギーは

$$\frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{1}{2}m(ev_0)^2 = \boldsymbol{\frac{1}{2}mv_0^2(1-e^2)}$$

$\boxed{\ 7\ }$ **④（答）**

問 2 運動量保存則およびはねかえり係数の式（弾性衝突なので，はねかえり係数は 1）より

$$\begin{cases} mv_0 = mv + MV_1 \\ 1 = -\dfrac{v - V_1}{v_0 - 0} \end{cases} \qquad \therefore \quad v = \boldsymbol{\frac{m-M}{m+M}v_0}, \qquad V_1 = \boldsymbol{\frac{2m}{m+M}v_0}$$

よって，$\boxed{\ 8\ }$ **③（答）**，$\boxed{\ 9\ }$ **②（答）**

問 3 A と B の間の反発係数は $e = -\dfrac{v-V}{v_0-0} = \underbrace{\boldsymbol{\dfrac{V-v}{v_0}}}_{ア}$ である．

V の定義（問題文に書かれているが，V は B_1 と B_2 の重心速度）より，A と衝突直後の V の式を立てると[*4]

$$V = \frac{MV_1 + M\times 0}{M+M} = \frac{1}{2}V_1$$

これを $e = \dfrac{V-v}{v_0}$ に代入して，問 2 で得た，$v = \dfrac{m-M}{m+M}v_0$, $V_1 = \dfrac{2m}{m+M}v_0$ を代入すると

$$e = \frac{\frac{1}{2}V_1 - v}{v_0} = \frac{\frac{1}{2}\cdot\frac{2m}{m+M}v_0 - \frac{m-M}{m+M}v_0}{v_0} = \frac{M}{m+M} < 1$$

よって，反発係数は **1 より小さい**$_{イ}$．$\boxed{\ 10\ }$ **⑥（答）**

問 4 衝突直後の B の力学的エネルギーは，B_1 の速度が $V_1 = 2V$，B_2 の速度が 0 であるから，これらの運動エネルギーの和を考えて

$$\frac{1}{2}MV_1^2 + \frac{1}{2}M\cdot 0^2 = \frac{1}{2}M\cdot(2V)^2 = \boldsymbol{2MV^2}_{ウ}$$

[*5] また，ばねの自然長からの伸び x が最大になるときは，B_1 と B_2 の速度が等しいときで，その速度を V'' とすると，運動量保存則より

$$MV_1 = MV'' + MV'' \qquad \therefore \quad V'' = \frac{1}{2}V_1 = V$$

力学的エネルギー保存則より

$$\frac{1}{2}\cdot 2M\cdot V''^2 + \frac{1}{2}kx^2 = 2MV^2 \qquad \therefore \quad x = \boldsymbol{\sqrt{\frac{2M}{k}}V}$$

[*6]以上から，$\boxed{\ 11\ }$ **⑥（答）**

[*4] 外力がはたらかないので，重心速度は一定であるが，欲しい値は衝突直後の B_1 の速度

[*5] 一般に，質量 m_1, m_2 の速度を v_1, v_2 とすると，重心速度 $v_G = \dfrac{m_1v_1 + m_2v_2}{m_1+m_2}$ と，相対速度 $v_1 - v_2$，換算質量 $\mu = \dfrac{m_1m_2}{m_1+m_2}$ を用いて，

$$\frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 = \underbrace{\frac{1}{2}(m_1+m_2)v_G^2}_{\text{重心の運動エネルギー}} + \underbrace{\frac{1}{2}\mu(v_1-v_2)^2}_{\text{相対運動のエネルギー}}$$

と表すことができる．衝突直後の B の力学的エネルギーは相対運動のエネルギーを用いれば

$$\frac{1}{2}\cdot 2MV^2 + \frac{1}{2}\cdot\frac{M\cdot M}{M+M}(V_1-0)^2 = 2MV^2$$

とも計算ができる．

[*6] 相対運動のエネルギーが弾性力による位置エネルギーに変化したと考えることもできる．

$$\frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}\cdot\frac{M\cdot M}{M+M}(V_1-0)^2 \qquad \therefore \quad x = \sqrt{\frac{2M}{k}}V$$

第3問

A 問1 A → B での内部エネルギー変化 ΔU_{AB} は，内部エネルギーの式より

$$\Delta U_{\mathrm{AB}} = \frac{3}{2}(10p_0 \times 10V_0 - 10p_0 \times V_0) = 135p_0V_0$$

A → B での気体がした仕事 W_{AB} は pV 図の面積より

$$W_{\mathrm{AB}} = 10p_0 \times 9V_0 = 90p_0$$

熱力学第1法則より

$$Q = \Delta U_{\mathrm{AB}} + W_{\mathrm{AB}} = 135p_0V_0 + 90p_0V_0 = \mathbf{225} \times p_0V_0$$

$\boxed{12}$ ⑤（答）

問2 (a) の太線で囲まれた部分の面積は $58p_0V_0$，(b) の太線で囲まれた部分の面積は $73p_0V_0$ であるから，その平均値は

$$W = \frac{58p_0V_0 + 73p_0V_0}{2} = \frac{\mathbf{131}}{\mathbf{2}} \times p_0V_0$$

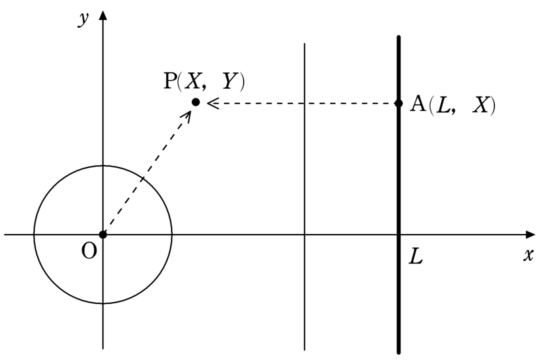
$\boxed{13}$ ④（答）

問3 1サイクルで放出する熱量を Q_{out} として，1サイクルの熱力学第1法則より

$$0 = Q - Q_{\mathrm{out}} - W \qquad \therefore \quad Q_{\mathrm{out}} = \boldsymbol{Q - W}_{ア}$$

熱効率は，$\dfrac{\boldsymbol{W}}{\boldsymbol{Q}}$[*7] $\boxed{14}$ ③（答）

B 問4 P(X, Y) では下図の O(0, 0) から伝わる波と A(L, Y) から伝わる波が干渉する．OP $= \sqrt{X^2 + Y^2}$，AP $= L - X$ から，



強め合いの条件は

$$\left| \boldsymbol{L - X - \sqrt{X^2 + Y^2}} \right| = \boldsymbol{m\lambda}$$

$\boxed{15}$ ③（答）

問5 m' を整数として，問4の強め合いの条件を書き直すと

$$L - X - \sqrt{X^2 + Y^2} = m'\lambda$$

この式に $Y = 0$, $X = x$, $L = 11\lambda$ を代入して

$$11\lambda - 2x = m'\lambda \qquad \therefore \quad x = \frac{11 - m'}{2}\lambda$$

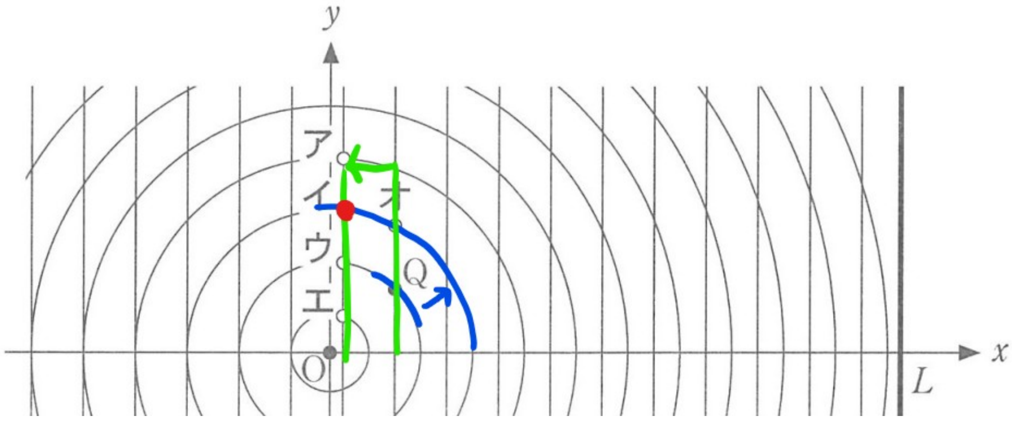
[*7] 熱効率 e は，$e = \dfrac{\text{気体がした仕事の和}}{\text{吸収した熱量}} = \dfrac{(\text{吸収した熱量}) - (\text{放出した熱量})}{\text{吸収した熱量}}$

$0.2\lambda < x < 10.8\lambda$ の不等式に代入して

$$0.2\lambda < \frac{11-m'}{2}\lambda < 10.8\lambda \qquad \therefore \quad -10.6 < m' < 10.6$$

この不等式を満たす整数 m' は $m' = -10, -9, \cdots, 9, 10$ の 21 個あるので，強め合う条件を満たす点の数は **21** 個．$\boxed{\;16\;}$ ④ **(答)**

問 6　図 4 の時刻で Q を通る円形波の波面と平面波の波面が 1 周期後に通るそれぞれの波面を考える．これらの交点が Q の後に通過する点である．つまり，**イ**．$\boxed{\;17\;}$ ② **(答)**



第4問

問1 極板間は一様な電場であることから，極板の電荷の移動がないことがわかる．つまり，回路に電流は流れておらず，抵抗器にかかる電圧はゼロで，直流電源の電圧と極板間の電圧は等しく $\boldsymbol{Ed}$ **である**$_{ア}$.

また，負電荷が図2の下向きに加速していることから，電場の向きは極板B側からA側で極板Aに比べて極板Bの方が電位が **高い**$_{イ}$. $\boxed{\;18\;}$ ③ **(答)**

問2 入射したときの飛び出したときの運動エネルギーが変化していないので，静電気力が荷電粒子にした仕事は **0**.

$\boxed{\;19\;}$ ⑦ **(答)**

問3 図2の上向きの加速度を a として，運動方程式を立てると

$$ma = -eE \qquad \therefore \quad a = -\frac{eE}{m}$$

荷電粒子が入射してから上向き速度が0になるまでの時間を t_0 として，等加速度運動の速度の式より

$$0 = v_0 \sin 45^\circ - \frac{eE}{m}t_0 \qquad \therefore \quad t_0 = \frac{mv_0}{\sqrt{2}eE}$$

この間に図4での右向きに $\dfrac{L}{2}$ 変位したときの変位と速度と時間の関係式より

$$\frac{L}{2} = v_0 \cos 45^\circ \times t_0 \qquad \therefore \quad \frac{L}{2} = \frac{v_0}{\sqrt{2}} \times \frac{mv_0}{\sqrt{2}eE}$$

この式を E について解くと，$E = \boldsymbol{\dfrac{mv_0^2}{eL}}$. $\boxed{\;20\;}$ ③ **(答)**

問4 点Qにおける荷電粒子が受ける力の向きは中心向きと一致し，**d** であり，Qの位置でのフレミング左手の法則より*8磁場は紙面に垂直で **裏から表** 向きである. $\boxed{\;21\;}$ ⑧ **(答)**

問5 図3における円運動の半径を r，磁束密度の大きさを B として，向心方向の運動方程式を立てると

$$m\frac{v_0^2}{r} = v_0Be \qquad \therefore \quad r = \frac{mv_0}{Be} \quad \cdots ①$$

問3で得た，$E = \dfrac{mv_0^2}{eL}$ の式から，$v_0 = \sqrt{\dfrac{eEL}{m}}$ として，①に代入すると

$$r = \frac{m}{Be}\sqrt{\frac{eEL}{m}} = \frac{1}{B}\sqrt{\frac{EL}{e}m}$$

ここで，e，E，L，B は変化させないので，質量が m' のときの円運動の半径は

$$r' = \frac{1}{B}\sqrt{\frac{EL}{e}m'}$$

よって，

$$\frac{\mathrm{PR}'}{\mathrm{PR}} = \frac{2r'}{2r} = \sqrt{\boldsymbol{\frac{m'}{m}}}$$

$\boxed{\;22\;}$ ① **(答)**

*8 親指をdの方向，中指（電流）をaの方向に向ける