物　　理

【解答・採点基準】　(100点満点)

問題番号	設問	解答番号	正解	配点	自己採点
第1問	問1	1	4	4	
	問2	2	3	5	
	問3	3	3	6	
	問4	4	2	5	
	問5	5	7	5	
第1問　自己採点小計				(25)	
第2問	問1	6	1	4	
	問2	7	2	4	
	問3	8	1	4	
	問4	9	3	4	
	問5	10	4	5	
	問6	11	5	4	
第2問　自己採点小計				(25)	
第3問	問1	12	5	4	
	問2	13	3	4	
	問3	14	1	5	
	問4	15	4	4	
	問5	16	4	4	
	問6	17	1	4	
第3問　自己採点小計				(25)	

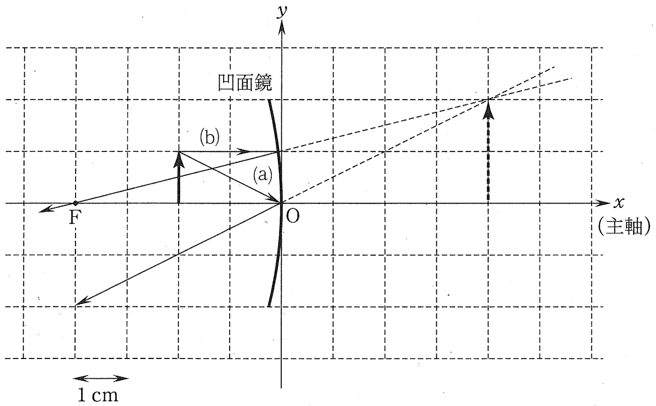
問題番号	設問	解答番号	正解	配点	自己採点
第4問	問1	18	4	3	
		19	3	3	
		20	1	4	
	問2	21	4	4	
	問3	22	1	5※	
		23	7		
		24	4		
	問4	25	1	3	
		26	2	3	
第4問　自己採点小計				(25)	
自己採点合計				(100)	

※は，全部正解の場合のみ点を与える。

【解説】

第１問　小問集合

問１　凹面鏡で反射される光線(a)と(b)をマス目を利用して作図する。



凹面鏡の中心Ｏに入射する光線(a)は，主軸(x 軸)に関して対称になる向きに反射する。主軸と平行に進んで凹面鏡に入射する光線(b)は，焦点Ｆを通過する向きに反射する。これらの反射光線を凹面鏡の裏側(右側)に延長したときの交点が物体の虚像の位置である。図より，

$x = \underline{4}\ \mathrm{cm}$

<別解>　焦点距離を f，物体と凹面鏡の距離を a，像と凹面鏡の距離を b(実像は $b>0$，虚像は $b<0$)とすると，

$$\frac{1}{a}+\frac{1}{b}=\frac{1}{f}$$

この場合，$f=4\ \mathrm{cm}$，$a=2\ \mathrm{cm}$ なので，

$$\frac{1}{2}+\frac{1}{b}=\frac{1}{4} \qquad \therefore\ \ b=-4\ \mathrm{cm}$$

これより，$x=\underline{4}\ \mathrm{cm}$ となる。

$\boxed{1}$ の答　1

問２　シリンダーが熱を通しやすい場合，内部の気体は周囲の空気と同じ温度になり，**等温変化**になる。シリンダーが熱を通しにくい場合，内部の気体は**断熱変化**になる。

同じ重さの荷物をつり下げると考えると，シリンダーにはたらく力のつりあいより，変化後の気体の圧力は変化の種類によらず同じである。次ページの図に示されるように，変化後の圧力が同じなら，変化後の体積は断熱変化より等温変化の方が大きくなる。

【ポイント】

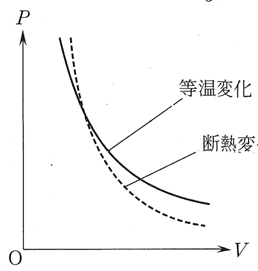
等温変化と断熱変化

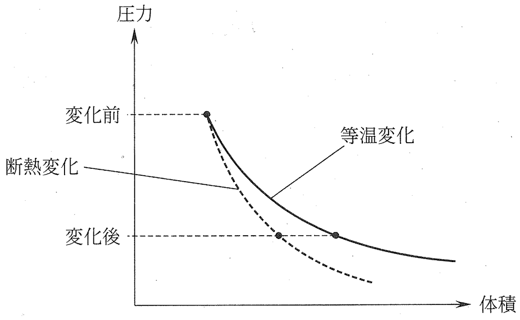
理想気体の圧力 P と体積 V は次のように変化する。

等温変化：$PV=$ 一定

断熱変化：$PV^{\gamma}=$ 一定

単原子理想気体では $\gamma=\frac{5}{3}$





したがって，シリンダーが熱を通しやすい場合(等温変化)の方が，熱を通しにくい場合(断熱変化)より体積の増加が大きく，シリンダーが抜け落ちやすい。③が正解である。

$\boxed{2}$ の答　③

問3　電気素量を e，金属棒に沿った向きの自由電子の平均の速さを v とし，公式 $I=enSv$ を用いる。自由電子1個が磁場(磁界)から受けるローレンツ力の大きさ f は，

$$f=evB$$

$I=enSv$ より，$ev=\dfrac{I}{nS}$ となるので，

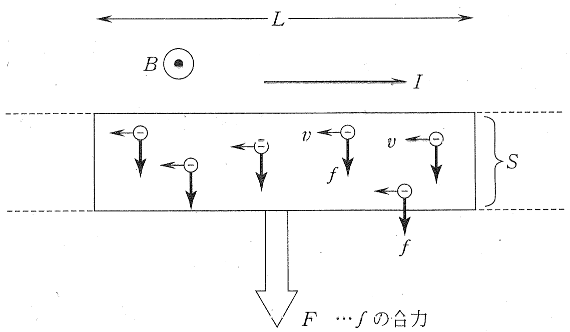
$$f=\frac{I}{nS}\times B=\underline{\frac{IB}{nS}}$$

<別解>　金属棒の長さ L の部分が磁場から受ける力の大きさ F は，

$$F=IBL$$

また，この部分の体積は SL なので，その中の自由電子の数 N は，

$$N=nSL$$



したがって，自由電子1個が受ける力の大きさ f は，

$$f=\frac{F}{N}=\frac{IBL}{nSL}=\underline{\frac{IB}{nS}}$$

なお，力の向きは**フレミングの左手の法則**より求められる。

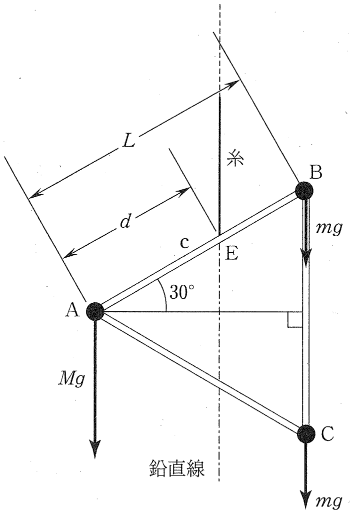
$\boxed{3}$ の答　③

問4　重力加速度の大きさを g とすると，各小球にはたらく重力は

フレミングの左手の法則

左手の中指，人差し指，親指を直角に開いたとき，電流の向きが中指，磁場の向きが人差し指，力の向きが親指に対応している。

次図のようになる。

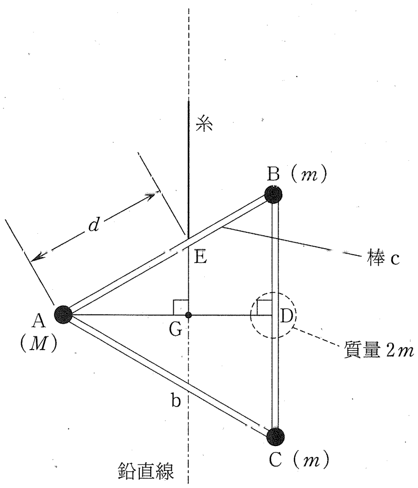


棒 c に糸を取りつけた点を E として，点 E まわりの力のモーメントのつりあいより，

$$Mg\times\frac{\sqrt{3}}{2}d-2\times mg\times\frac{\sqrt{3}}{2}(L-d)=0$$

$$\therefore\quad d=\underline{\underline{\frac{2mL}{M+2m}}}$$

<別解>　重心を考える。小球 B と C を合わせた部分の重心は BC の中点(点 D とする)である。全体の重心を考えるには，B と C の質量を合わせた $2m$ の質量の物体が点 D にあると考える。



全体の重心 G は AD 間を質量の逆比に内分する点である。また，点 G は点 E の真下なので，

$$\mathrm{AE}:\mathrm{EB}=\mathrm{AG}:\mathrm{GD}=2m:M$$

$$\therefore\quad \mathrm{AE}=\frac{2m}{M+2m}\times\mathrm{AB}=\underline{\underline{\frac{2mL}{M+2m}}}\quad(=d)$$

$\boxed{4}$ の答　②

問5　アルミニウム板に光を当てると，光電効果によって，$\underline{\text{電子}}_{ア}$が飛び出す。光の振動数を ν とすると，その光子1個のエネルギーは $h\nu$ なので，そのエネルギーが**仕事関数** W より大きくないと電子は飛び出さない。

$$h\nu > W \qquad \therefore \quad \nu > \underline{\frac{W}{h}}_{イ}$$

したがって，振動数が $\dfrac{W}{h}$ より$\underline{\text{大きい}}_{ウ}$ときに電子が飛び出し，箔は閉じていく。

$\boxed{5}$ の答　⑦

仕事関数
金属内の自由電子を金属の外に取り出すのに必要な仕事(エネルギー)の最小値を仕事関数という。

第2問　力学分野総合

問1　小球1の質量を m とする。力学的エネルギー保存則より，

$$\frac{1}{2}mv_1^2 = mgH \qquad \therefore \quad H = \underline{\frac{v_1^2}{2g}}$$

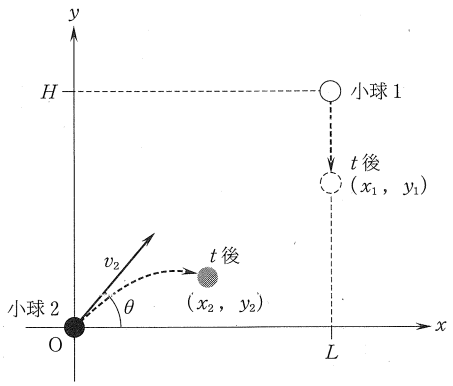
<別解>　最高点では小球1の速さは0になる。鉛直上向きを正として，等加速度直線運動の公式より，

$$0^2 - v_1^2 = 2(-g)H \qquad \therefore \quad H = \underline{\frac{v_1^2}{2g}}$$

$\boxed{6}$ の答　①

問2　小球1も小球2も，同じ重力加速度で運動するので，小球1に対する小球2の相対加速度は0である。したがって，相対運動は等速度運動になり，軌道は直線の$\underline{②}$になる。

<参考>　小球2を投げ上げた点を原点Oとし，水平右向きに x 軸，鉛直上向きに y 軸をとる。小球2を投げ上げてから時間 t 後の小球1の位置を $(x_1,\ y_1)$，小球2の位置を $(x_2,\ y_2)$ とすると，



$$x_1 = L \qquad y_1 = H - \frac{1}{2}gt^2$$

$$x_2 = v_2\cos\theta \times t \qquad y_2 = v_2\sin\theta \times t - \frac{1}{2}gt^2$$

次に，小球1から見た小球2の運動を考える。小球1に固定した座標軸 X(水平右向き)，座標軸 Y(鉛直上向き)，原点 O′ (小球1の位置)を用いて小球2の位置を表すと，

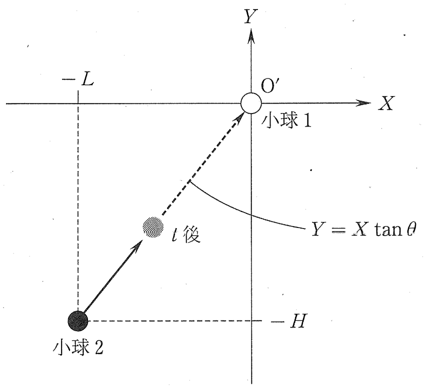
$$X = x_2 - x_1 = v_2 t\cos\theta - L$$

$$Y = y_2 - y_1 = v_2 t\sin\theta - H$$

2式から t を消去して，

$$Y = L\tan\theta - H + X\tan\theta$$

すなわち，Y は X の1次式なので，小球1に対する小球2の軌跡は直線である。更に，$H = L\tan\theta$ のときは $Y = X\tan\theta$ となり，軌跡は原点 O′ (小球1の位置)を通る直線になるので，小球1と2が衝突する。

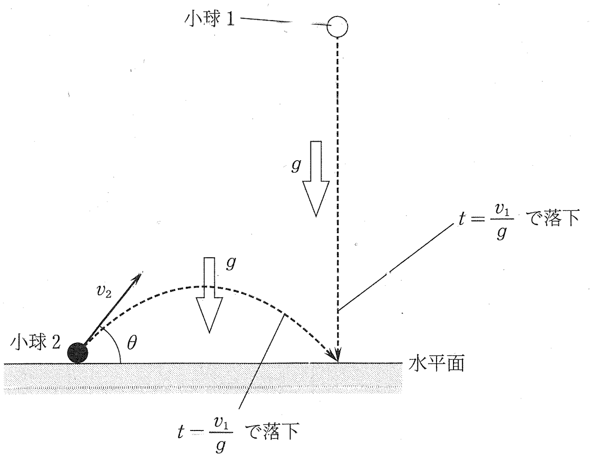


$\boxed{7}$ の答　②

問3　小球1が最高点から水平面に達するまでの時間を t とする。

$$H = \frac{1}{2}gt^2 \qquad \therefore \quad t = \sqrt{\frac{2H}{g}}$$

問1より，$H = \dfrac{{v_1}^2}{2g}$ を代入して，$t = \dfrac{v_1}{g}$ である。



この間に，小球2が水平面に落下(鉛直方向の変位が0)すれば

いい。

$$v_2\sin\theta\times\frac{v_1}{g}-\frac{1}{2}\times g\times\left(\frac{v_1}{g}\right)^2=0$$

$$\therefore\quad \underline{v_2=\frac{v_1}{2\sin\theta}}$$

$\boxed{8}$ の答　①

問4　衝突するまでの小球2の運動は，単振動(**単振り子**)の端から中心までの運動なので，時間は周期の $\frac{1}{4}$ 倍である。糸の長さが a なので，

$$t=\frac{1}{4}\times 2\pi\sqrt{\frac{a}{g}}=\underline{\frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{a}{g}}}$$

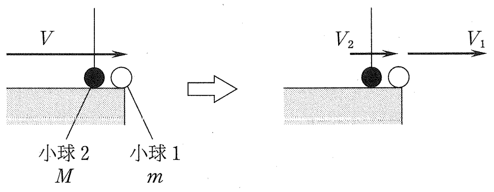
$\boxed{9}$ の答　③

単振り子

糸の長さが L のとき，振幅の小さい単振り子の運動は単振動とみなされ，その周期 T は，

$$T=2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$

問5　右向きを正とし，衝突前の小球2の速度を V ($V>0$)，衝突直後の小球1と小球2の速度を，それぞれ V_1，V_2 とする。



運動量保存則と反発係数の式より，

$$MV=mV_1+MV_2\qquad e=-\frac{V_1-V_2}{0-V}$$

2式より，

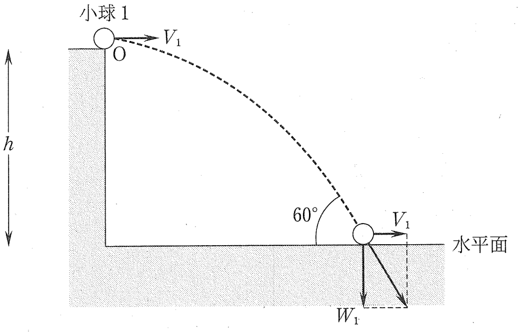
$$V_2=\frac{M-em}{M+m}V$$

$M>em$ のときは $V_2>0$ なので，衝突後の小球2の速度の向きは右向きである。$M<em$ のときは $V_2<0$ なので，衝突後の小球2の速度の向きは左向きである。エネルギーに着目すると，衝突後の小球2の運動エネルギーは衝突前の運動エネルギーより小さいので，M と em の大小関係に関わらず，$|V_2|<V$ となり，単振動の振幅は d より小さくなる。

以上より，<u>$M<em$ の場合，衝突直後の小球2の速度の向きは左向きで，その後，振幅が d より小さい単振動をする。</u>

$\boxed{10}$ の答　④

問6　水平面と衝突する直前の小球1の速度の水平成分は点Oから飛び出すときの速さと同じ V_1 である。このときの速度の鉛直成分の大きさを W_1 とする。



鉛直方向の運動に着目して，

$$W_1{}^2-0^2=2gh \qquad \therefore \quad W_1=\sqrt{2gh}$$

あるいは，力学的エネルギー保存則より，

$$\frac{1}{2}mV_1{}^2+mgh=\frac{1}{2}m(V_1{}^2+W_1{}^2)$$

$$\therefore \quad W_1=\sqrt{2gh}$$

水平面との衝突の角度が60°なので，$V_1=\dfrac{1}{\sqrt{3}}W_1$ である。

よって，

$$V_1=\underline{\sqrt{\frac{2gh}{3}}}$$

$\boxed{11}$ の答　⑤

第3問　ドップラー効果

問1　問題の図2より，Δt の間に5回振動しているので，振動数 f は，

$$f=\underline{\frac{5}{\Delta t}}$$

$\boxed{12}$ の答　⑤

問2　音が距離 D を伝わるのに t_1 の時間がかかっている。また，音が距離 D' を伝わるのに (t_2-t_1) の時間がかかっている。

$$D=Vt_1 \qquad D'=V(t_2-t_1)$$

2式から V を消去して，

$$D'=\underline{\frac{t_2-t_1}{t_1}D}$$

$\boxed{13}$ の答　③

問3　まず，マイク1に音が達し始めた時刻を考える。音源が動いていても音速は変化しないので，マイク1に音が達し始めた時刻は t_1 のままである。

次に，音の継続時間を考える。音源が近づいているので，**ドップラー効果**によって，マイクに達する音の振動数は音源が出している音の振動数よりも高くなる。音の周期は短くなるので音の継続時間(5周期分)も Δt より短くなる。あるいは，音源がマイクに近づくので，最後の音はマイクに届くまでの距離が短い。その

ドップラー効果

$$f=\frac{V-u}{V-v}f_0$$

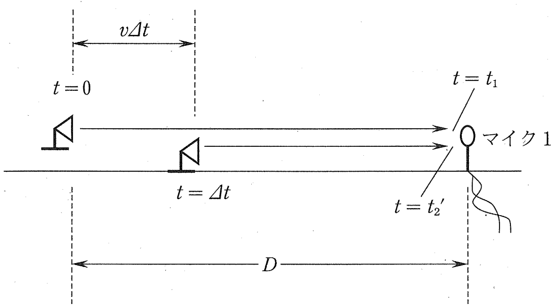
f_0：音源の振動数
f：観測される振動数
V：音速
v：音源の速度
u：観測者の速度
(v，u は V と同じ向きのときを正とする)

ため，音の継続時間が Δt より短くなると考えてもよい。

以上より，求めるグラフは①である。

$\boxed{14}$ の答　①

問4　音源とマイク1との距離が D になる瞬間を時刻 $t=0$ とする。その直前に音源から出た音がマイク1に達する時刻は**問3**で示されているように $t=t_1$ である。時刻 $t=\Delta t$ 直後に音源から出た音がマイク1に達する時刻を $t=t_2'$ とする。



音速は V なので，

$$t_1=\frac{D}{V}$$

音源の速さは v なので，時刻 $t=\Delta t$ におけるマイク1と音源の距離は $D-v\Delta t$ である。

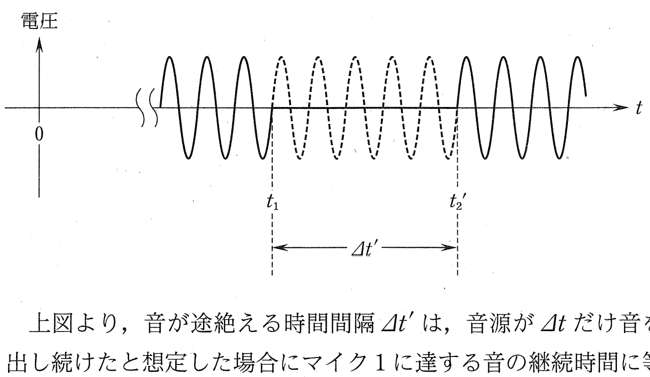
よって，

$$t_2'=\Delta t+\frac{D-v\Delta t}{V}$$

音が途絶える時間間隔 $\Delta t'$ は，

$$\Delta t'=t_2'-t_1=\underline{\frac{V-v}{V}\Delta t}$$

<別解>　次図のように，音源が音を出し続けたと想定した場合の測定結果も破線で描き入れると，



上図より，音が途絶える時間間隔 $\Delta t'$ は，音源が Δt だけ音を出し続けたと想定した場合にマイク1に達する音の継続時間に等しい。

ここでは波の数(1周期分を1個と数える)に着目する。音源が Δt の間に出した波の数は $f\times\Delta t$ 個である。マイク1に達する

音の振動数はドップラー効果の公式より $\dfrac{V}{V-v}f$ なので，マイク1に達する波の数は $\dfrac{V}{V-v}f\times\Delta t'$ 個である。これらは等しいので，

$$f\Delta t=\frac{V}{V-v}f\Delta t' \qquad \therefore\quad \Delta t'=\underline{\frac{V-v}{V}\Delta t}$$

$\boxed{15}$ の答　④

問5　音源が速さ 10 m/s でマイク1から遠ざかるときに出た音が最小の振動数 $f_{\min}$ の音である。ドップラー効果の公式に数値を代入する。

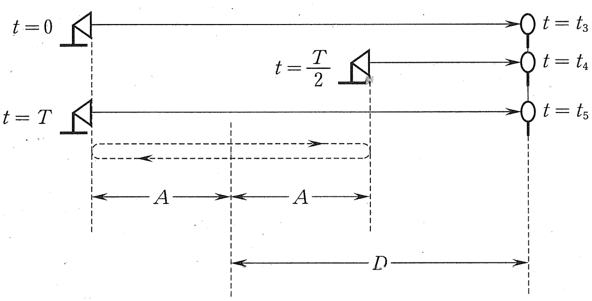
$$f_{\min}=\frac{340}{340+10}\times 440\fallingdotseq \underline{427}\ \mathrm{Hz}$$

$\boxed{16}$ の答　④

問6　$f_{\max}$ は音源が振動中心を右へ通過するときに出された音であり，$f_{\min}$ は左へ通過するときに出された音である。

音源が振動の左端に位置した時刻を $t=0$ とする。このときの音がマイク1に達する時刻を $t=t_3$ とし，音源が右端に位置したときの音がマイク1に達する時刻を $t=t_4$ とする。マイク1では $t=t_3$ から $t=t_4$ の間に $f\to f_{\max}\to f$ と振動数が変化する。

また，再び音源が左端に位置したときの音がマイク1に達する時刻を $t=t_5$ とすると，マイク1では $t=t_4$ から $t=t_5$ の間に $f\to f_{\min}\to f$ と振動数が変化する。



単振動の振幅を A とすると，左端の音源とマイクの距離が $D+A$ で，右端の音源とマイクの距離は $D-A$ である。音源が移動する時間と音が伝わる時間を考慮して，

$$t_3=\frac{D+A}{V} \qquad t_4=\frac{T}{2}+\frac{D-A}{V}$$

$$t_5=T+\frac{D+A}{V}$$

したがって，

$$\Delta T_1=t_4-t_3=\frac{T}{2}-\frac{2A}{V}$$

$$\Delta T_2=t_5-t_4=\frac{T}{2}+\frac{2A}{V}$$

∴　$\underline{\Delta T_1 < \Delta T_2}$

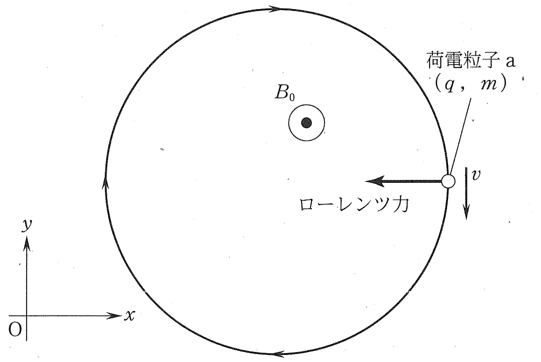
<別解>　マイク1で振動数fの音を観測するのは音源が一瞬静止したとき出された音であり，単振動の左端と右端が該当する。また，$f_{\max}$は音源が振動中心を右へ通過したときに出された音である。よって，$f \to f_{\max} \to f$は音源が単振動の左端から右端へと移動したことを表していて，その間の時間は半周期$\dfrac{T}{2}$である。このとき，音源はマイク1に近づいているので，観測された時間間隔ΔT_1は$\dfrac{T}{2}$より短い(**問**3参照)。

同様に考えると，$f \to f_{\min} \to f$は音源が単振動の右端から左端へと移動したことを表している。音源はマイク1から遠ざかっているので，ΔT_2は$\dfrac{T}{2}$より長い。したがって，$\underline{\Delta T_1 < \Delta T_2}$である。

$\boxed{17}$の答　①

第4問　電磁場中の荷電粒子の運動

問1　**ローレンツ力**が向心力としてはたらくので，その向きは荷電粒子aの進行方向に垂直な向きである。



円運動の半径をrとする。円運動の運動方程式より，

$$m\frac{v^2}{r} = |q|vB_0 \qquad \therefore \quad r = \frac{mv}{|q|B_0}$$

ローレンツ力の向きより，$\underline{q>0}$ である。

$\boxed{18}$の答　④

$\boxed{19}$の答　③

$\boxed{20}$の答　①

問2　磁束密度の大きさをBとして，荷電粒子aの場合(図2)を考える。$q>0$ なので，**問**1のrの式より，

$$r = \frac{mv}{qB}$$

また，円運動における周期Tと速さ，半径の関係式より，

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$$

ローレンツ力

電気量の大きさがqの荷電粒子が磁束密度の大きさBの磁場中を，磁場に垂直な向きに速さvで運動する場合，荷電粒子にはたらくローレンツ力の大きさfは，

$f = qvB$

力の向きはフレミングの左手の法則を用いる。

円運動

速さvで半径rの円運動している物体の加速度(向心加速度)の大きさaは，

$a = \dfrac{v^2}{r}$

運動方程式にはこの加速度を用いる。

図2の場合，$B=B_0$ のとき $T=T_0$ なので，

$$T_0=\frac{2\pi m}{qB_0}$$

荷電粒子bの場合(図3)を考える。荷電粒子bの質量を m_b，周期を T_b とすると，上式を参考に，

$$T_b=\frac{2\pi m_b}{qB}$$

図3の場合，$B=B_0$ のとき $T_b=\frac{1}{2}T_0$ なので，

$$\frac{1}{2}T_0=\frac{2\pi m_b}{qB_0}$$

$$\therefore\quad m_b=\frac{qT_0B_0}{4\pi}$$

$T_0=\frac{2\pi m}{qB_0}$ を代入して，

$$m_b=\frac{1}{2}m$$

なお，T および T_b と B の関係式に速さが入っていないので，荷電粒子の速さはいくらでもよいことになる。したがって，最も適当なものは，④の荷電粒子bは質量が $\frac{1}{2}m$ で，速さが v である。

$\boxed{21}$ の答　④

問3　荷電粒子cの質量を m_c，電気量を q_c とし，加速電圧を V としてエネルギー保存則を用いる。

$$q_cV=\frac{1}{2}m_cv_c^{\,2}$$

$$v_c=\sqrt{\frac{2q_cV}{m_c}}$$

$$=\sqrt{\frac{2\times2.5\times10^{-5}\times5.0\times10^{3}}{9.0\times10^{-10}}}=\sqrt{\frac{25}{9.0}\times10^{8}}$$

$$=\frac{5}{3}\times10^{4}\fallingdotseq\underline{1.7\times10^{4}}\ \mathrm{m/s}$$

$\boxed{22}$ の答　①

$\boxed{23}$ の答　⑦

$\boxed{24}$ の答　④

問4　図1と同様，放射線は時計回りの円運動なので，正に帯電している。よって，α 線である。単位時間に通過する回数(回転数) N は，

$$N=\frac{1}{T'}$$

電流の強さ I は，単位時間に通過する電気量の大きさである。

$$I=QN=\frac{Q}{T'}$$

$\boxed{25}$ の答　①

$\boxed{26}$ の答　②