令和５年度 次世代の科学技術を担う人材育成事業

福岡県
高校生科学技術コンテスト
ファーストステージ

物理

解答解説

受験番号	
氏　　名	
所属校名	

福岡県教育委員会

第１問

【出題のねらい】

力学，電磁気，波動，熱，原子の各分野の基礎となる法則・概念の理解や，その応用力をみると同時に，問題を通してそれらの理解度を高める。

【解答】

問１　(イ)
問２　(イ)
問３　(キ)
問４　(ウ)，(キ)
問５　(エ)

【解説】

問１　大きさのある物体が１点で支えられ，それが安定のつり合いにある条件は，外力の作用点（この問題ではやじろべえをささえる指の位置）が物体（この問題ではやじろべえ）の重心の鉛直上方にあることである。この配置では，物体が傾いても，その傾きを修正しようとする復元的な回転モーメントが生じるので倒れない。

(イ)　……**(答)**

問２　①　a にスイッチを入れるとき

コイルの手前を図２の下から上に電流が流れ始め，次第に増加していくので鉄心内を磁力線が右から左に増加する。同じ磁力線がリング内も貫くので，リングには誘導電流がコイルとは逆向きに流れる。このとき，コイルやリングを磁石とみなすと，コイル側の磁石は右側がＳ極，リング側の磁石は左側がＳ極となり，同種の極どうしが近い配置だから反発力がはたらき，リングは右に動き出す。

②　a からスイッチを外すとき

コイルの電流は急には０にならないので，スイッチが外れても左向きの磁力線は残り次第に減少する。一方，リングは，この磁力線の変化を妨げる向きの誘導電流が，リングの手前を下から上に流れる。このとき，コイルやリングを磁石とみなすと，コイル側の磁石は右側がＳ極，リング側の磁石は左側がＮ極となり，異種の極どうしが近い配置だから引きつけ合う力がはたらき，リングは左に引き込まれる。

b にスイッチを入れたり切ったりする場合は，①，②の場合でＮとＳを入れ替えた結果になり，リングにはたらく力の向きには変化がない。(イ)　……**(答)**

問３　十分遠方では，０次腹線上の点は，波源 S_1，S_2，S_3 からの距離差がないので，同位相の３つの波は互いに強め合い，合成波の振幅は $3A$ となるので，振幅は 1.5 倍になる。

１次腹線上の点は，波源 S_1，S_3 からの距離差が半波長だから，この２つの波は合成して消滅する。したがって，波源 S_2 からの波のみ残るので，振幅は A となる。これより振幅は 0.5 倍になる。

２次腹線上の点は，波源 S_1，S_3 からの距離差が１波長となる，同様に，波源 S_2，S_3 からの距離差も１波長となる。したがって，３つの波は互いに強め合い，合成波の振幅は $3A$ となるので，振幅は 1.5 倍になる。　(キ)　……**(答)**

問４

(ウ)　$Q_{ab} = \Delta U_{ab} + W_{ab}$
$= 0 -$（曲線 ab の下の面積）< 0

(キ)　$Q_{ab} + Q_{bc} + Q_{ca}$

$$= (\Delta U_{ab} + W_{ab}) + (\Delta U_{bc} + W_{bc}) + (\Delta U_{ca} + W_{ca})$$
$$= (\Delta U_{ab} + \Delta U_{bc} + \Delta U_{ca}) + (W_{ab} + W_{bc} + W_{ca})$$

$= 0 +$（閉区間線 abc の面積）> 0

(ウ)，(キ)　……**(答)**

問５　t 年後の A, B の残量が等しいことより，

$$4N\times\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}=N\times\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{2T}} \Leftrightarrow 2^{2-\frac{t}{T}}=2^{-\frac{t}{2T}}$$

$$\Leftrightarrow \quad 2-\frac{t}{T}=-\frac{t}{2T} \quad \Leftrightarrow \quad t=4T$$

(エ)　……(答)

第２問

【出題のねらい】

〔A〕非慣性系の観測者が運動を記述する場合に必要となる慣性力の考え方を導入し，日常生活からイメージしやすいであろう「みかけの重力」を例にとって紹介している。変化したみかけの重力の下で起こる現象を想像する柔軟な発想力が問われる。次の〔B〕へのウォーミングアップになっている。

〔B〕アポロ 17 号以来となる有人月面着陸が現実のものになりつつある今日，地上の施設で容易に月面を体験することはできないだろうか。時代を先取りしてそのような夢の施設を考案してみた。地球上よりも重力が小さい月面に身を置いたときに何が起こるのか。想像力への挑戦である。自分の身に置き替えて想像し，楽しみながら解いてもらいたい。

【解答】

〔A〕

問１ $\dfrac{2\sqrt{3}}{3}g$

問２ (イ)

〔B〕

問３ (カ)

問４ $\boxed{1}$ (イ)

$\boxed{2}$ (カ)

$\boxed{3}$ (イ)

問５ $\sqrt{6}$（≒2.4）倍

問６ $\boxed{1}$ (イ)

$\boxed{2}$ (イ)

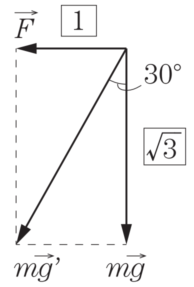
問７ (ア)

【解説】

〔A〕

問１ みかけの重力加速度の大きさは，

$$g' = \frac{g}{\cos 30^\circ} = \frac{2}{\sqrt{3}}g = \frac{2\sqrt{3}}{3}g \quad \cdots\cdots\textbf{(答)}$$



問２ 電車の加速時も減速時もその加速度の大きさが等しければ，加速時と減速時でみかけの重力加速度の大きさは等しく，地上の重力加速度の大きさより大きくなる。振り子の周期は重力加速度の大きさの平方根に反比例するので，周期は短くなる。つまり振り子の振動はせわしなくなるので加速時も減速時も時計の針の進み方は速くなり，振り子時計の示す時刻は駅の時計より速く進むことになる。したがって，(イ) ……**(答)**

〔B〕

問３ みかけの重力加速度の大きさが $\dfrac{1}{6}g$ になるためには，ブース自体が $\dfrac{5}{6}g$ の加速度で落下する必要がある。ブースの外の観測者から見た（ブース＋重り）の運動方程式は，

$$(M + M_0) \times \frac{5}{6}g = Mg - M_0 g$$

これより，

$$5(M + M_0) = 6(M - M_0)$$

$$\therefore M = 11M_0$$

よって，

$M : M_0 = 11 : 1$ (カ) ……**(答)**

問４ $\boxed{1}$ 単振り子の周期公式より，周期は，

$$2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \fallingdotseq 2\times 3.14\times\sqrt{\frac{5}{9.8}}$$
$$= 2\times 3.14\times\sqrt{\frac{100}{49\times 4}}$$
$$= \frac{3.14\times 10}{7} \fallingdotseq 4.5\,〔\mathrm{s}〕$$

(イ) ……(答)

$\boxed{2}$ $g \longrightarrow \frac{1}{6}g$ となり，周期は$\sqrt{6}$倍になるので，

$$\frac{3.14\times 10}{7}\times\sqrt{6} \fallingdotseq 11.0\,〔\mathrm{s}〕$$

(カ) ……(答)

$\boxed{3}$ ブースの加速度は$\vec{0}$になり，みかけの重力の大きさは$\frac{1}{6}g \longrightarrow g$となるので，周期は地上モード時と等しくなる。

(イ) ……(答)

問５ 周期公式より，ばね振り子の周期は重力加速度の大きさに依存しないので，ばね振り子の周期は月面モード時でも地上モード時と変わらない。一方，単振り子（ブランコ）の周期は重力加速度の大きさに依存し，月面モード時の周期は地上モード時の周期の$\sqrt{6}$倍になる。よって，$\sqrt{6}$（$\fallingdotseq 2.4$）倍 ……(答)

問６ 月面モードでは重力加速度の大きさは地上モードでの値の$\frac{1}{6}$倍となるので，砲丸そのものの重さは地上での$\frac{1}{6}$倍となり，手渡された砲丸は軽く感じられる。しかし，いざ静止状態の砲丸を押して速度を与えようとすると，その速度変化，すなわち加速度は，運動方程式より，加えた力を質量で割ったものになる。ここで現れる質量は「慣性質量」と呼ばれるもので，運動の変化を妨げる度合いを表す物理量である。この「物体の加速のしにくさ」は地上とかわらず，月面モード時と地上モード時で手に感じる抗力の大きさには変化はない。

打ち出された初速が同じであれば，水平到達距離は初速に落下時間を乗じて得られる。落下時間tは，

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

より，重力加速度の大きさの平方根に反比例する。したがって，月面モード時の水平到達距離は地上モード時の$\sqrt{6}$（$\fallingdotseq 2.4$）倍となる。

$\boxed{1}$ (イ) ……(答)
$\boxed{2}$ (イ) ……(答)

問７ 鉛直投げ上げの到達高度をH〔m〕とすると，等加速度公式より，

$$-v_0{}^2=2\times(-g)\times H \qquad \therefore\ H=\frac{v_0{}^2}{2g}$$

これより，到達高度は重力加速度の大きさに反比例するので，月面モードでは地上モード時のおよそ6倍になる。Aさんは地上で70 cm飛び上がれるのだから，

$$0.7\times 6 = 4.2\ \mathrm{m}$$

まで飛び上がることが予想される。

(ア) ……(答)

第３問

【出題のねらい】

〔A〕は２枚の極板間に挿入された導体板に起こる静電誘導が理解できているかの確認問題である。極板表面の電荷の受ける静電気力に関しては，冒頭のまとめを参考にすればよい。まとめの文章を正しく理解する力も試される。

〔B〕では，短絡された導体板の向かい合う表面には電荷は現れないことに気付く必要がある。鉛直に振動するばねの単振動の問題と同じ扱いになる。運動方程式を立てることから考察が始まる。

〔C〕では，３枚極板のコンデンサーの両端の極板を短絡させると，２つのコンデンサーの並列接続と等価になることに気づく必要がある。電荷保存則と極板間引力とばねの力のつり合いを連立させる。

【解答】

〔A〕

問１　**力の向き**　(ア)

力の大きさ　$\dfrac{Q^2}{2\varepsilon_0 S}$

問２　(ウ)

〔B〕

問３　$ma = -kx + \dfrac{Q^2}{2\varepsilon_0 S}$

問４　$2\pi\sqrt{\dfrac{m}{k}}$

問５　$\dfrac{Q^2 d}{8\varepsilon_0 S}$

〔C〕

問６　$\dfrac{Q^2 d}{16\varepsilon_0 S}$

問７　$\dfrac{Q^2}{4\varepsilon_0 S}$

【解説】

〔A〕

問１　極板βのα側の面には静電誘導により$-Q$の電荷が分布する。このときの静電気力は，βからαへ向かう向きに，

$$\frac{\sigma^2}{2\varepsilon_0}S = \frac{Q^2}{2\varepsilon_0 S}$$ ……**(答)**

問２　極板βのγ側の面にも静電誘導によりQの電荷が分布する。このときの静電気力は，βからγへ向かう向きになるので，極板βに働く静電気力の合力は0になる。

〔B〕

問３　極板βのα側の面の電荷は0となり，γ側の面はQの電荷が分布するので，静電気力は下向きに，$\dfrac{Q^2}{2\varepsilon_0 S}$（＝一定）となる。極板$\beta$の運動方程式は，

$$ma = -kx + \frac{Q^2}{2\varepsilon_0 S}$$ ……**(答)**

問４　運動方程式を変形して，

$$a = -\frac{k}{m}\left(x - \frac{Q^2}{2\varepsilon_0 Sk}\right)$$

これより運動は，中心が$x_c = \dfrac{Q^2}{2\varepsilon_0 Sk}$，角振動数が$\omega = \sqrt{\dfrac{k}{m}}$の単振動となる。

したがって，周期は，

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$ ……**(答)**

問５　極板βの力のつり合いより，

$$\frac{Q^2}{2\varepsilon_0 S} = k \times \frac{d}{2} \qquad k = \frac{Q^2}{\varepsilon_0 S d}$$

運動開始時のエネルギーU_1は，静電エネルギーのみで，

$$U_1 = \frac{Q^2}{2C} = \frac{Q^2 d}{2\varepsilon_0 S}$$

最後のエネルギーU_2は，（静電エネルギー）＋（ばねの弾性エネルギー）だから，

$$U_2 = \frac{Q^2}{2\varepsilon_0 S}\frac{d}{2} + \frac{1}{2}k\left(\frac{d}{2}\right)^2$$

$$= \frac{Q^2 d}{4\varepsilon_0 S} + \frac{Q^2 d}{8\varepsilon_0 S} = \frac{3Q^2 d}{8\varepsilon_0 S}$$

失われたエネルギーは,

$$U_1 - U_2 = \frac{Q^2 d}{2\varepsilon_0 S} - \frac{3Q^2 d}{8\varepsilon_0 S}$$

$$= \frac{Q^2 d}{8\varepsilon_0 S} \quad \cdots\cdots(\text{答})$$

〔C〕

問６　スイッチをγ側につないだ後の静電エネルギーは,

$$U_3 = \frac{Q^2}{2\left(\frac{2\varepsilon_0 S}{3d} + \frac{2\varepsilon_0 S}{d}\right)} = \frac{3Q^2 d}{16\varepsilon_0 S}$$

極板γにつながる抵抗で失われたジュール熱は,

$$\frac{Q^2 d}{4\varepsilon_0 S} - U_3 = \frac{Q^2 d}{4\varepsilon_0 S} - \frac{3Q^2 d}{16\varepsilon_0 S}$$

$$= \frac{Q^2 d}{16\varepsilon_0 S} \quad \cdots\cdots(\text{答})$$

問７　つり合い状態で，$\alpha-\beta$間の容量$C_{\alpha-\beta}$と$\beta-\gamma$間の容量$C_{\beta-\gamma}$は，極板間距離がそれぞれ$\frac{3d}{2}$，$\frac{d}{2}$だから,

$$C_{\alpha-\beta} : C_{\beta-\gamma} = 1 : 3$$

これより，極板βのα側の面の電荷$=\frac{1}{4}Q$, 極板βのγ側の面の電荷$=\frac{3}{4}Q$

極板βに加える外力をFとすると，極板βの力のつり合いより,

$$F + \frac{\left(\frac{3Q}{4}\right)^2}{2\varepsilon_0 S} = \frac{\left(\frac{Q}{4}\right)^2}{2\varepsilon_0 S} + \frac{kd}{2}$$

$$F = \frac{\left(\frac{Q}{4}\right)^2}{2\varepsilon_0 S} + \frac{kd}{2} - \frac{\left(\frac{3Q}{4}\right)^2}{2\varepsilon_0 S}$$

$$= \left(\frac{1}{32} + \frac{1}{2} - \frac{9}{32}\right)\frac{Q^2}{\varepsilon_0 S}$$

$$= \frac{Q^2}{4\varepsilon_0 S} \quad \cdots\cdots(\text{答})$$

第４問

【出題のねらい】

〔A〕では，列車のダイヤグラムに応用されているように，複数の物体が同一直線上を等速度で運動するとき，その様子を位置－時刻グラフで表現すると，問題が視覚的に捉えやすくなる。この手法でドップラーの振動数公式を導く。

〔B〕では，運動する物体に向かって音波を送り出すと，戻ってきた音波のデータから物体の運動に関する情報が取り出せることを，魚群を追うイルカの例で調べる。

【解答】

〔A〕

問１ $\boxed{1}$ $V-v$

$\boxed{2}$ $V+u$

$\boxed{3}$ ㈠

$\boxed{4}$ $\dfrac{V+u}{V-v}$

$\boxed{5}$ ㈠

〔B〕

問２ ㈡

問３ ㈡

問４ $\dfrac{(V-u)(V+v)}{(V-v)(V+u)}$

問５ $\dfrac{L_0}{V-u}$〔s〕

問６ $\dfrac{L}{V+u}$〔s〕

問７ $\dfrac{(V-v)(V+u)}{2V}T$〔m〕

【解説】

〔A〕

問１ ①　図２より，bb’を底辺とする三角形は「追いつきタイプ」であるから，

bb’＝$(V-v)\times T_0$　……(答)

②　cc’を底辺とする三角形は「出会いタイプ」であるから，

cc’＝$(V+u)\times T_1$　……(答)

③　bb’＝cc’は，同時刻の隣り合う密部の距離を表すので，波長のことである。波が進行しても波長は変化しないことを表している。㈠　……(答)

④　$(V-v)\times T_0=(V+u)\times T_1$・・・(1)

よって，

$\dfrac{1}{T_1}=\dfrac{V+u}{V-v}\times\dfrac{1}{T_0}$　……(答)

$\dfrac{1}{T_1}$や$\dfrac{1}{T_0}$はそれぞれ振動数である。

いろいろなuの場合の観測者の動きを図に表示すれば，相対速度が正の場合，受け取る波の周期は必ず大きくなり，相対速度が負の場合，周期は必ず小さくなることがわかる。

㈠　……(答)

〔B〕

問２　送り出した波の数（波数）は，受け取った波の数（波数）と等しいので，

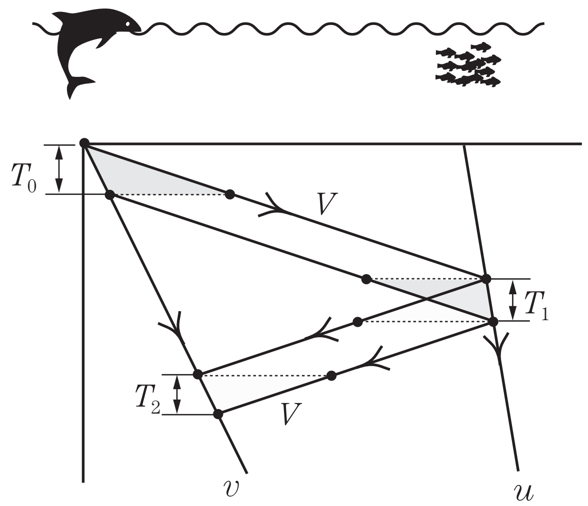
$\Delta t'=\dfrac{f_0}{\gamma f_0}\Delta t>\Delta t$　㈡　……(答)

問３　振動数が小さくなったということは，相対的に離れていくということである。

㈡　……(答)

問４　T_0とT_1の関係は(1)式でuを$-u$として，

$(V-v)\times T_0=(V-u)\times T_1$・・・(2)



同様に，T_1 と T_2 の関係は次の（3）式となる。

$$(V+u)\times T_1=(V+v)\times T_2 \quad \cdot\cdot\cdot(3)$$

（2），（3）式の両辺どうしをかけて，

$$(V-v)(V+u)\,T_0=(V-u)(V+v)\,T_2$$

$$\frac{1}{T_2}=\frac{(V-u)(V+v)}{(V-v)(V+u)}\frac{1}{T_0}$$

これより，

$$\gamma=\frac{(V-u)(V+v)}{(V-v)(V+u)} \quad \cdot\cdot\cdot(4) \quad \cdots\cdots\textbf{(答)}$$

〈参考〉この式から u を求めることができ，

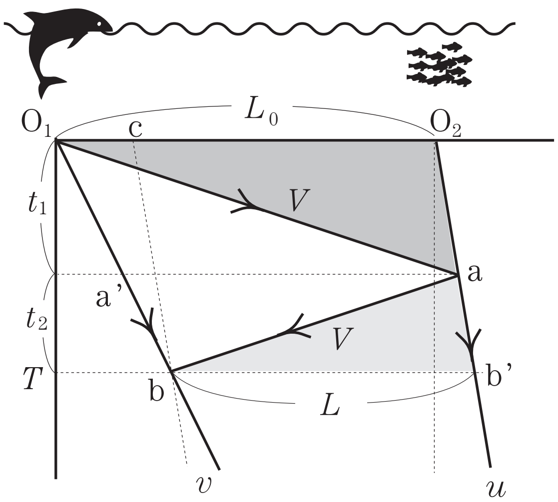
$$u=\frac{-(\gamma-1)V+(\gamma+1)v}{(\gamma+1)V-(\gamma-1)v}V$$

となる。

問５　$\triangle O_1O_2a$ に「追いつきタイプ」の「L 公式」を適用して，

$$L_0=(V-u)\,t_1$$

$$t_1=\frac{L_0}{V-u} \quad \cdot\cdot\cdot(5) \quad \cdots\cdots\textbf{(答)}$$



問６　$\triangle abb'$ に「出会いタイプ」の「L 公式」を適用して，

$$L=(V+u)\,t_2$$

$$t_2=\frac{L}{V+u} \quad \cdot\cdot\cdot(6) \quad \cdots\cdots\textbf{(答)}$$

問７　（5），（6）式より，

$$T=t_1+t_2=\frac{L_0}{V-u}+\frac{L}{V+u} \quad \cdot\cdot\cdot(7)$$

上の図で補助線 cb は，魚群の直線に平行である。このとき，

$$L=L_0-(v-u)\,T \quad \cdot\cdot\cdot(8)$$

（7），（8）式より，L_0 を消去して，

$$L=\frac{(V-v)(V+u)}{2V}T \quad \cdots\cdots\textbf{(答)}$$

〈別解〉　$\triangle O_1aa'$ と $\triangle ba'a$ に「L 公式」を適用して，

$$(V-v)\,t_1=(V+v)\,t_2 \quad \cdot\cdot\cdot(9)$$

（5），（6）式を（9）式に代入して，

$$(V-v)\frac{L_0}{V-u}=(V+v)\frac{L}{V+u}$$

$$L_0=\frac{(V-u)(V+v)}{(V-v)(V+u)}L$$

これを（7）式に代入して，

$$T=\frac{1}{V-u}\frac{(V-u)(V+v)}{(V-v)(V+u)}L+\frac{L}{V+u}$$

$$=\frac{2V}{(V-v)(V+u)}L$$

$$L=\frac{(V-v)(V+u)}{2V}T \quad \cdots\cdots\textbf{(答)}$$