令和６年度　一般選抜個別学力検査【前期日程】「理科（物理）」出題意図・解答例（略解）

**I** 出題意図：　滑車を題材として，重力下の運動，摩擦力，力のモーメントを組み合わせた運動を考察できるかをみるとともに，力学の理解を問うた。

**問 1**

（１）動滑車 E が動滑車 D を引いているので，$T_1$ と $T_2$ の関係式は $\underline{T_2 = 2\,T_1}$ となる。

（２）物体 A が動滑車 E を引いているので，力のつり合いから，$2\,T_2 = mg$ より，$\underline{T_2 = \dfrac{mg}{2}}$ となる。
また（１）より $T_2 = 2\,T_1$ なので，$\underline{T_1 = \dfrac{mg}{4}}$ となる。

**問 2**

（１）動滑車が 2 つ繋がっているので，物体 A と物体 B の移動距離の関係は 1 : 4 である。したがって，物体 B が距離 $L$ だけ移動したときの物体 A の移動距離は，$\underline{\dfrac{L}{4}}$ となる。

（２）重力が物体 A にした仕事は，物体 A に働く重力の大きさ $mg$ と（１）の移動距離を用いて，
$\underline{W_\mathrm{A} = \dfrac{mgL}{4}}$ となる。

（３）物体 A，B の加速度の大きさをそれぞれ $a_\mathrm{A}$，$a_\mathrm{B}$ とすると，物体 A と B の運動方程式は，このときの糸 1 と糸 2 の張力の大きさを $T_1'$，$T_2'$ とすると，

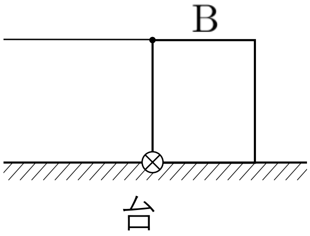
$$\text{物体 A の運動方程式}\quad ma_\mathrm{A} = mg - 2\,T_2'$$
$$\text{物体 B の運動方程式}\quad Ma_\mathrm{B} = T_1'$$

となる。
これをまとめると，$T_2' = 2T_1'$ が成り立つので，物体 A の運動方程式は $ma_\mathrm{A} = mg - 2\,T_2' = mg - 4\,T_1' = mg - 4Ma_\mathrm{B}$ となる。また，動滑車が 2 つ繋がっているので，物体 A と物体 B の加速度の大きさの関係は $a_\mathrm{B} = 4a_\mathrm{A}$ である。これを代入し，整理すると $ma_\mathrm{A} = mg - 4M \cdot 4a_\mathrm{A}$ より，物体 A の加速度の大きさは $\underline{a_\mathrm{A} = \dfrac{mg}{m + 16M}}$ となる。また，これを用いて物体 B の加速度の大きさは $\underline{a_\mathrm{B} = \dfrac{4mg}{m + 16M}}$ となる。

（４）距離 $L$ だけ移動した後の物体 B の速さ $v$ の二乗は，$v^2 = 2\,a_\mathrm{B}L$ である。これを用いて，物体 B の運動エネルギー $K_\mathrm{B}$ は $K_\mathrm{B} = \dfrac{1}{2}Mv^2$ に $v^2$ を代入して，$\underline{K_\mathrm{B} = \dfrac{4gmML}{m + 16M}}$ となる。

**問 3**

（1）物体 B の左下が回転の中心になる。




（2）すべらない条件を張力の大きさ $T_1$ と最大摩擦力の大きさ $F$ を用いて表すと $T_1 \leq F$ となる。

ここで $T_1 = \dfrac{mg}{4}$， $F = \mu Mg$ より，すべらない条件は $\dfrac{mg}{4} \leq \mu Mg$ である。$\mu$ についてまとめると $\underline{\mu \geq \dfrac{m}{4M}}$ となる。

（3）回転し始める条件は，$T_1$ による力のモーメントの大きさ $M_1$ と垂直抗力による力のモーメントの大きさ $M_{\mathrm{N}}$ を用いて，$M_1 > M_{\mathrm{N}}$ となる。

$T_1$ による力のモーメントの大きさは $M_1 = T_1 h = \dfrac{mg}{4}h$，垂直抗力による力のモーメントの大きさは $M_{\mathrm{N}} = Mg\dfrac{w}{2}$ となる。これらを用いて回転し始める条件は，$\dfrac{mg}{4}h > Mg\dfrac{w}{2}$ となる。

$m$ についてまとめると $\underline{m > M\dfrac{2w}{h}}$ となる。

**II** 出題意図 : 金属平板間での荷電粒子の運動，および抵抗を精密に測定する回路を題材として，電磁気学に関する基礎的な知識を問うとともに，物理法則を適切に用いる思考力についても問うた。

**問 1**

（1）金属平板間 A，B，C の電圧はそれぞれ $0$，$V$，$\dfrac{1}{4}V$ なので，それぞれの平板間の電場は，

$$E_{\mathrm{AB}} = \frac{-V}{L}, \quad E_{\mathrm{BC}} = \left(1 - \frac{1}{4}\right)\frac{V}{L} = \frac{3V}{4L}$$

である。

$E_{\mathrm{AB}}$の大きさ : $\dfrac{V}{L}$，　$E_{\mathrm{AB}}$ の向きは，$x$ 軸の負の向き

$E_{\mathrm{BC}}$の大きさ : $\dfrac{3V}{4L}$，　$E_{\mathrm{BC}}$ の向きは，$x$ 軸の正の向き

（2）電荷 $-q(q > 0)$ を持った粒子が ab 間と bc 間で受けた仕事は，

$$W_{\mathrm{ab}} = -q\left(V_{\mathrm{A}} - V_{\mathrm{B}}\right) = -q(0 - V) = qV$$

$$W_{\mathrm{bc}} = -q\left(V_{\mathrm{B}} - V_{\mathrm{C}}\right) = -q(V - \frac{1}{4}V) = -\frac{3}{4}qV$$

である。

$W_{\mathrm{ab}} = qV$，　$W_{\mathrm{bc}} = -\dfrac{3}{4}qV$

（3）$v_{\mathrm{a}} = 0$ なので，点 b での粒子の運動エネルギーは ab 間で受けた仕事と等しく，

$\dfrac{1}{2}mv_{\mathrm{b}}^2 = qV$　より，　$v_{\mathrm{b}} = \sqrt{\dfrac{2qV}{m}}$

である。

点 c での粒子の運動エネルギーは，点 b での運動エネルギーと bc 間で受けた仕事の和となり，

$\dfrac{1}{2}mv_{\mathrm{c}}^2 = qV - \dfrac{3}{4}qV = \dfrac{1}{4}qV$　より，　$v_{\mathrm{c}} = \sqrt{\dfrac{qV}{2m}}$

である。

（4）ab 間と bc 間は等加速度直線運動なので，それぞれで平均速度からかかる時間を求め，和を取る。

$v_{\mathrm{a}} = 0$，$v_{\mathrm{b}} = \sqrt{\dfrac{2qV}{m}}$，$v_{\mathrm{c}} = \sqrt{\dfrac{qV}{2m}}$ より，

ab 間の平均速度とかかる時間は，$\bar{v}_{\mathrm{ab}} = \dfrac{v_{\mathrm{a}} + v_{\mathrm{b}}}{2} = \sqrt{\dfrac{qV}{2m}}$，　$T_{\mathrm{ab}} = \dfrac{L}{\bar{v}_{\mathrm{ab}}} = L\sqrt{\dfrac{2m}{qV}}$

bc 間の平均速度とかかる時間は，$\bar{v}_{\mathrm{bc}} = \dfrac{v_{\mathrm{b}} + v_{\mathrm{c}}}{2} = \dfrac{1}{2}\left(\sqrt{\dfrac{2qV}{m}} + \sqrt{\dfrac{qV}{2m}}\right) = \dfrac{3}{2}\sqrt{\dfrac{qV}{2m}}$，

$$T_{\mathrm{bc}} = \frac{L}{v_{\mathrm{bc}}} = \frac{2L}{3}\sqrt{\frac{2m}{qV}}$$

ac 間にかかる時間は，$T = T_{\mathrm{ab}} + T_{\mathrm{bc}} = \dfrac{5L}{3}\sqrt{\dfrac{2m}{qV}}$ である。

時間： $\dfrac{5}{3}L\sqrt{\dfrac{2m}{qV}}$

**問 2**

（１）検流計に流れる電流が 0 より，$r_1 : r_2 = r_3 : r_x$ が成り立つので，$r_x = \dfrac{r_2 r_3}{r_1}$ である。

（２）検流計 G に電流が流れないように測定するので，検流計の内部抵抗の影響を受けずに，未知抵抗の抵抗値を（１）の式より，精密に測定することができる。

（３）抵抗 $r_1$ と $r_3$ の合成抵抗は，$r_{13} = r_1 + r_3$

抵抗 $r_2$ と $r_x$ の合成抵抗は，$r_{2x} = r_2 + r_x = r_2 + \dfrac{r_2 r_3}{r_1} = \dfrac{r_2}{r_1}(r_1 + r_3)$

点 d を流れる電流の大きさは，$I_{\mathrm{d}} = \dfrac{E}{r_{2x}} = \dfrac{r_1 E}{r_2(r_1 + r_3)}$ である。

全抵抗の合成抵抗は，$r = \dfrac{r_{13} r_{2x}}{r_{13} + r_{2x}} = \dfrac{\dfrac{r_2}{r_1}(r_1 + r_3)^2}{(r_1 + r_3) + \dfrac{r_2}{r_1}(r_1 + r_3)} = \dfrac{r_2(r_1 + r_3)}{r_1 + r_2}$

電池から流れる電流の大きさは，$I = \dfrac{E}{r} = \dfrac{(r_1 + r_2)E}{r_2(r_1 + r_3)}$ である。

点 d を流れる電流の大きさ：$\dfrac{r_1 E}{r_2(r_1 + r_3)}$，　電池から流れる電流の大きさ：$\dfrac{(r_1 + r_2)E}{r_2(r_1 + r_3)}$

**III** 出題意図：原子物理学における，水素原子の構造，ボーア模型，線スペクトル等に関する基本的な事柄の理解を問うた。

**問 1**

（１）電子の運動エネルギー $T$ は $T=\dfrac{1}{2}mv^2$，静電気力による位置エネルギー $V$ は位置エネルギーの基準を無限遠とすると $V=-k_0\dfrac{e^2}{r}$ と表すことができる。したがって，電子の持つ力学的エネルギー $E=T+V$ は，$\underline{E=\dfrac{1}{2}mv^2-k_0\dfrac{e^2}{r}}$ である。

（２）電子の円運動の半径方向の運動方程式より，$m\dfrac{v^2}{r}=k_0\dfrac{e^2}{r^2}$ である。これより，$\underline{v=\sqrt{\dfrac{k_0e^2}{mr}}}$ である。

（３）（１）で求めた $E$ に （２）で求めた $v$ を代入すると，$\underline{E=-\dfrac{k_0e^2}{2r}}$ である。

**問 2**

（１）ボーアの量子条件より，電子軌道の円周の長さは $2\pi r_n=\dfrac{nh}{mv_n}$ である。この軌道上にある電子の電子波の波長は $\lambda_e=\dfrac{h}{mv_n}$ であるから， $\underline{2\pi r_n=n\lambda_e}$ である。

（２）問１（２）の結果より，量子数 $n$ の軌道上にある電子の速さ $v_n$ は $v_n=\sqrt{\dfrac{k_0e^2}{mr_n}}$ である。この $v_n$ を量子条件に代入すると，$\underline{r_n=\dfrac{n^2h^2}{4\pi^2mk_0e^2}}$ である。

（３）問１（３）の結果より，量子数 $n$ の軌道上にある電子の持つ力学的エネルギーは $E_n=-\dfrac{k_0e^2}{2r_n}$ である。これに（２）で求めた $r_n$ を代入して $\underline{E_n=-\dfrac{k_0e^2}{2}\dfrac{4\pi^2mk_0e^2}{n^2h^2}=-\dfrac{2\pi^2k_0^2me^4}{n^2h^2}}$ である。

**問 3**

ボーアの振動数条件より，$h\nu = E_n - E_{n'}$ であるので，

$\boxed{\quad 1 \quad}$ $\underline{\dfrac{E_n - E_{n'}}{h}}$

$\dfrac{1}{\lambda} = \dfrac{\nu}{c} = \dfrac{1}{c}\dfrac{E_n - E_{n'}}{h}$ であることを用いて，

$\boxed{\quad 2 \quad}$ $\underline{\dfrac{A}{ch}\left(\dfrac{1}{n'^2} - \dfrac{1}{n^2}\right)}$

前問 $\boxed{\ 2\ }$ より $R = \dfrac{A}{ch}$ と書けることがわかる。問 2（3）の結果より $A = \dfrac{k_0 e^2}{2}\dfrac{4\pi^2 m k_0 e^2}{h^2}$ であるから，

$\boxed{\quad 3 \quad}$ $\underline{\dfrac{2\pi^2 k_0^2 m e^4}{ch^3}}$