令 和 6 年 度 一 般 選 抜

個別学力試験問題(前期日程)

物　　　　理

注　意

1. 問題紙は指示があるまで開いてはいけません。
2. 問題紙は 11 ページです。解答用紙は 6 枚です。指示があってから確認し，解答用紙の所定の欄に受験番号を記入してください。
3. 答えはすべて解答用紙の所定のところに記入してください。
4. 解答用紙は持ち帰ってはいけません。
5. 試験終了後，問題紙は持ち帰ってください。

1 滑車を通して，細く伸び縮みしない丈夫な糸でつながれた２つの物体の運動について考える。重力加速度の大きさをg〔m/s^2〕として，空気抵抗，糸および滑車の質量，物体の大きさは無視できるものとする。また，滑車はなめらかに回転し，物体は滑車や地面にぶつからないものとする。

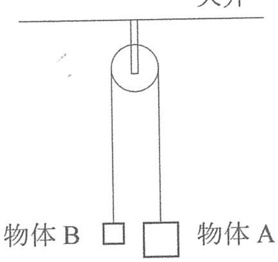


図１

問１　図１のように質量M〔kg〕の物体Ａと質量m〔kg〕の物体Ｂが滑車を通して糸でつながれている。物体をつなぐ糸の張力の大きさをT〔N〕，天井が滑車を支える力の大きさをT'〔N〕，鉛直下方を正として，以下の問いに答えよ。

最初に，mがMより小さい場合について考える。物体ＡとＢから静かに同時に手を放すと，物体Ａは鉛直下方に加速度の大きさa〔m/s^2〕で運動を始めた。

（１）　物体Ａおよび物体Ｂに加わるすべての力を，大きさの大小関係と向きに注意して解答用紙の図に矢印で描け。

（２）　物体Ａおよび物体Ｂの運動方程式を，g，T，M，m，aのうち必要なものを用いて表せ。

（３）　張力の大きさTおよび加速度の大きさaを，g，M，mのうち必要なものを用いて表せ。

（４）　天井が滑車を支える力の大きさT'を，g，M，mのうち必要なものを用いて表せ。

次に，物体Bの質量mが，無視できるほど小さく$m=0$と見なせる場合と，物体Aの質量Mと等しい$m=M$となる場合について，物体AとBから静かに同時に手を放すことを考える。

（5） 物体Bの質量mが$m=0$と見なせるとき，張力の大きさT，天井が滑車を支える力の大きさT'および物体Aの加速度の大きさaを，g，Mのうち必要なものを用いて表せ。また，物体Aに働く力に注目して，物体Aの運動について言葉で説明せよ。

（6） 物体Bの質量mが$m=M$となるとき，張力の大きさT，天井が滑車を支える力の大きさT'および物体Aの加速度の大きさaを，g，Mのうち必要なものを用いて表せ。また，物体Aに働く力に注目して，物体Aの運動について言葉で説明せよ。

問２　図２のように水平面と傾斜角 θ〔rad〕をなす板がある。θ は０から $\dfrac{\pi}{2}$ の範囲で自由に変えられる。板の端には滑車があり，その滑車を通して同じ質量 M〔kg〕の物体ＣとＤが糸でつながれている。物体Ｄと板の間の摩擦は小さく無視できるものとして，以下の問いに答えよ。

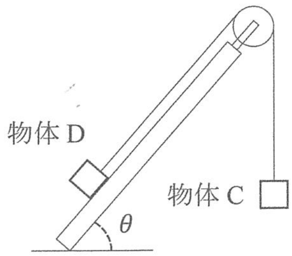
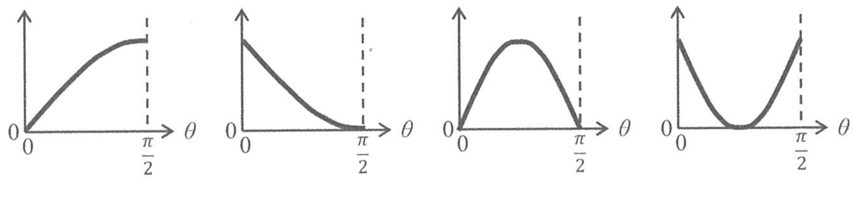


図２

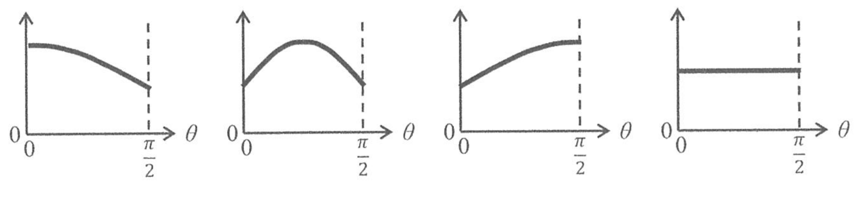
（１）　θ をある角度に固定し，物体ＣとＤから静かに同時に手を放すと，物体Ｃは鉛直下方に加速度の大きさ a〔m/s^2〕で運動を始めた。糸の張力の大きさ T〔N〕および物体Ｃの加速度の大きさ a を，g，M，θ のうち必要なものを用いて表せ。

（２）　（１）の操作を様々な傾斜角 θ に対して試みた。張力の大きさ T および物体Ｃの加速度の大きさ a の傾斜角 θ に対する変化として最も適当なグラフを，次の解答群のア～クからそれぞれ一つ選んで記号で答えよ。

解答群（グラフの縦軸は張力の大きさ T もしくは加速度の大きさ a を表す）



ア.　イ.　ウ.　エ.



オ.　カ.　キ.　ク.

2 光が波であることを示す実験について，以下の問いに答えよ。

問１　２枚の平面ガラス板に厚み a〔m〕の薄いシートをはさみ込み，くさび形のすき間を作った。そのときの断面を図に示す。真上から波長 λ〔m〕の単色光を照射し，真上から観察すると，等しい間隔 Δx〔m〕の明暗のしま模様がみえた。ガラスの屈折率は n_0($n_0 > 1$)であり，空気の屈折率を 1.0 とする。

（１）　空気中を進行する光の速さを c〔m/s〕とするとき，ガラス中の光の速さはいくらか答えよ。

（２）　上側のガラス板の下面で反射した光は，反射によって位相が変化するか。変化するとしたらどのように変化するか答えよ。

（３）　下側のガラス板の上面で反射した光は，反射によって位相が変化するか。変化するとしたらどのように変化するか答えよ。

図のように，２枚のガラスが接触する点Ｏからシートまでの下側のガラスに沿った距離を L〔m〕とし，点Ｏからシートに向かって距離 x〔m〕にある点を点Ｐとする。また，点Ｐでのすき間の間隔を d〔m〕とする。ただし，L は a より十分に大きいとする。

（４）　d を L，a，x を用いて表せ。

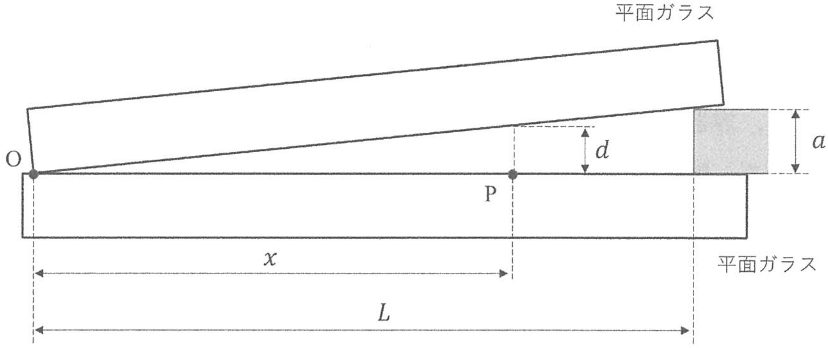
（５）　点Ｐで明線の中心が観測された。このときの d を，λ と整数 m(ただし，$m = 0$，1，2，…)を用いて表せ。

（６）　(５)のときの点Ｐの距離 x を，(４)と(５)の結果から求めよ。

（７）　しま模様の明線の中心の間隔 Δx を，(６)の結果から求めよ。

シートの厚み a が 1.5×10^{-5} m で点Oからシートまでの距離 L を 1.0×10^{-1} m としたとき，しま模様の明線の中心の間隔は 1.6 mm であった。

（8）　照射した光の波長は何 nm か求めよ。ただし，1 nm = 10^{-9} m である。



問２　次に，問１と同じ実験条件で２枚のガラス板の間に屈折率 n_1 ($n_0 > n_1 > 1$) の液体を満たし，真上から観察したところ，しま模様の明線の中心の間隔 $\Delta x'$〔m〕は液体を満たす前の間隔 Δx よりも短くなった。

（1）　この液体内を進行する光の波長 λ'〔m〕を，n_1 と λ で表せ。

（2）　液体の屈折率 n_1 を，$\Delta x'$ と Δx を用いて表せ。

（3）　液体を満たした後の明線の中心の間隔は 1.2 mm であった。このときの液体の屈折率 n_1 はいくらか求めよ。

3 シリンダーとなめらかに動くピストンからなる容器があり，その中に理想気体と見なせる単原子分子 n〔mol〕が閉じ込められている。これを使って以下に示す熱機関を作った。この熱機関は，容器内の気体の圧力，体積，温度がそれぞれ p_1〔Pa〕，V_1〔m^3〕，T_1〔K〕である状態1から始まる。最初に，状態1から断熱圧縮により，容器内の気体は圧力 p_2〔Pa〕，体積 V_2〔m^3〕，温度 T_2〔K〕である状態2に変化する。次に，状態2から定積変化により，容器内の気体は圧力 p_3〔Pa〕，体積 V_3〔m^3〕，温度 T_3〔K〕である状態3に変化する。さらに，状態3から断熱膨張により，容器内の気体は圧力 p_4〔Pa〕，体積 V_4〔m^3〕，温度 T_4〔K〕である状態4に変化する。最後に，定積変化により，容器内の気体は状態1に戻る。この過程において，容器内の気体の体積は $V_1 > V_2$，気体の圧力は $p_3 > p_2 > p_1$ という関係をもつ。

この熱機関について以下の問いに答えよ。このとき，気体定数を R〔J/(mol・K)〕，定積モル比熱を $\frac{3}{2}R$〔J/(mol・K)〕，比熱比を γ とする。

（1） この熱機関における気体の圧力－体積($p-V$)図の概略を描け。また，図中に状態1から状態4までを点で示し，その横に状態の番号を示せ。

（2） 断熱変化では，断熱変化前の気体の状態を圧力 p_0〔Pa〕，体積 V_0〔m^3〕，温度 T_0〔K〕とし，変化後の気体の状態を圧力 p〔Pa〕，体積 V〔m^3〕，温度 T〔K〕とすると，圧力と体積の関係は $p_0V_0{}^{\gamma} = pV^{\gamma}$ となる。この関係を使って，断熱変化での温度と体積の関係式 $T_0V_0{}^{\gamma-1} = TV^{\gamma-1}$ を導出せよ。

（3） 状態2の p_2 と T_2 を，p_1，V_1，V_2，T_1，γ のうち必要なものを用いて表せ。

（4） 状態3の p_3 と V_3 を，p_1，V_1，V_2，T_1，T_3，γ のうち必要なものを用いて表せ。

（5） 状態4の p_4，V_4，T_4 を，p_1，V_1，V_2，T_1，T_3，γ のうち必要なものを用いて表せ。

（6） 状態1から状態2，状態2から状態3，状態3から状態4および状態4から状態1へ変化する際に容器内の気体が吸収または放出する熱量をそれぞれ $Q_{1\to 2}$，$Q_{2\to 3}$，$Q_{3\to 4}$ および $Q_{4\to 1}$ とする。ただし，容器内の気体が熱量を吸収するときを正，放出するときを負とする。これら $Q_{1\to 2}$，$Q_{2\to 3}$，$Q_{3\to 4}$ および $Q_{4\to 1}$ を，V_1，V_2，T_1，T_3，γ，n，R のうち必要なものを用いて表せ。

（7） （6）の結果から，この熱機関の効率 e は $1-\left(\dfrac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1}$ となることを示せ。

（8） 状態2の V_2 を小さくした場合，この熱機関の効率 e はどうなるか以下のア〜ウから一つ選んで記号で答えよ。また，そうなる理由を，（7）の結果を元にして説明せよ。

ア．上がる　　　イ．下がる　　　ウ．変わらない

4 図1に示すように，真空中に置かれた面積 S〔m^2〕の4つの平行極板A，B，C，Dを導線でつなぎ，極板AとBの極板間距離を d〔m〕とし，極板CとDの極板間距離を $2d$ とした。極板AとDの間に電圧 V〔V〕を加えて十分時間が経過したとき，極板AとCには電荷 Q〔C〕$(Q>0)$ が帯電し，極板BとDには電荷 $-Q$ が帯電していた。真空中のクーロンの法則の比例定数を k_0〔N・m^2/C^2〕とし，極板の端の影響は無視できるものとする。

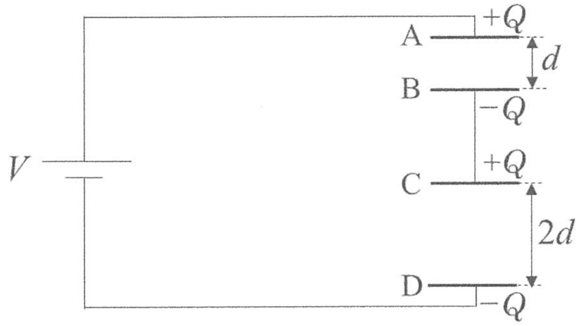


図1

問1　平行に置かれた極板A，Bと極板C，Dは，二つの平行板コンデンサーが直列に接続されているものとみなせる。以下の問いに答えよ。

（1）　極板Aから出る電気力線の数 N〔本〕として適当なものを，以下のア～カから一つ選んで記号で答えよ。

ア．$\dfrac{2\pi}{k_0 Q}$　　イ．$\dfrac{Q}{4\pi k_0}$　　ウ．$2\pi k_0 Q$

エ．$4\pi k_0 Q$　　オ．$\dfrac{4\pi k_0}{Q}$　　カ．$\dfrac{1}{4\pi k_0 Q}$

（2） 極板 A と B の間の電場の強さ E〔N/C〕として適当なものを，以下のア～カから一つ選んで記号で答えよ。

ア．$\dfrac{2\pi S}{k_0 Q}$　　イ．$\dfrac{4\pi S}{k_0 Q}$　　ウ．$\dfrac{2\pi k_0 Q}{S}$

エ．$\dfrac{Q}{4\pi k_0 S}$　　オ．$\dfrac{4\pi k_0 Q}{S}$　　カ．$\dfrac{4\pi k_0}{QS}$

（3） 極板 A と B の間の電圧 V_{AB}〔V〕として適当なものを，以下のア～カから一つ選んで記号で答えよ。

ア．$\dfrac{2\pi k_0 Qd}{S}$　　イ．$\dfrac{Q}{4\pi k_0 Sd}$　　ウ．$\dfrac{2\pi Sd}{k_0 Q}$

エ．$\dfrac{4\pi k_0 Qd}{S}$　　オ．$\dfrac{4\pi S}{k_0 Qd}$　　カ．$\dfrac{4\pi k_0}{QSd}$

（4） 真空中の誘電率 ε_0〔F/m〕が $\varepsilon_0 = (4\pi k_0)^{-1}$ であることを利用して，極板 A と B から構成される平行板コンデンサーの電気容量 C_{AB}〔F〕として適当なものを，以下のア～カから一つ選んで記号で答えよ。

ア．$\varepsilon_0 dS$　　イ．$\dfrac{\varepsilon_0 d}{S}$　　ウ．$\dfrac{\varepsilon_0 S}{d}$

エ．$\dfrac{d}{\varepsilon_0 S}$　　オ．$\dfrac{S}{\varepsilon_0 d}$　　カ．$\dfrac{1}{\varepsilon_0 dS}$

（5） 極板 A，B と極板 C，D の二つのコンデンサーの合成容量 C〔F〕と，電荷 Q および電圧 V には，$Q = CV$ の関係がある。合成容量 C として適当なものを，以下のア～カから一つ選んで記号で答えよ。

ア．$4\varepsilon_0 dS$　　イ．$\dfrac{S}{3\varepsilon_0 d}$　　ウ．$\dfrac{\varepsilon_0 S}{3d}$

エ．$\dfrac{d}{3\varepsilon_0 S}$　　オ．$\dfrac{3\varepsilon_0 d}{S}$　　カ．$\dfrac{4}{\varepsilon_0 dS}$

問２　次に，各極板が問１と同様に帯電した状態で，図２に示すように，極板Ａと B の間の領域 D_1 に磁束密度の大きさ B〔T〕の一様な磁場をかけた。その後，極板Ａと B の極板間距離を二等分する位置に，左から極板と平行に速さ v〔m/s〕で，質量 m〔kg〕，電荷 q〔C〕($q>0$)の荷電粒子を入射させた。極板Ａと B の間に入射した荷電粒子は等速直線運動を行い，領域 D_1 を出て領域 D_2 に入った。領域 D_2 には一様な磁場が存在しており，荷電粒子は磁場から受けるローレンツ力により，紙面手前から見て時計回りに半径 R〔m〕の等速円運動を行った。荷電粒子の運動はすべて紙面内で行われているとし，重力や荷電粒子の大きさ，荷電粒子の運動によって生じる電場や磁場の変化は無視できるものとする。以下の問いに答えよ。

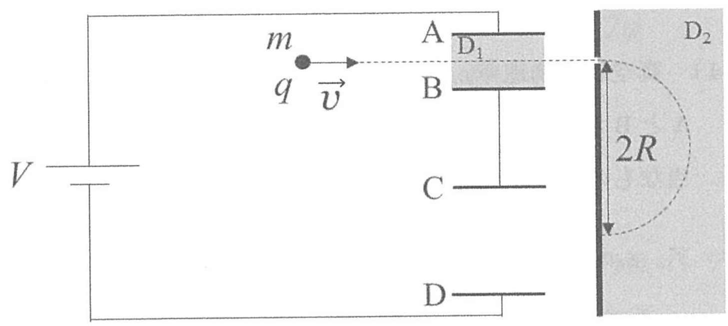


図２

（１）　領域 D_1 において，荷電粒子が電場から受ける静電気力 $\vec{F_1}$〔N〕と，荷電粒子が磁場から受けるローレンツ力 $\vec{F_2}$〔N〕を，解答欄の図に矢印で描き，矢印の隣に力の名称を書け。力の大きさの大小関係と向きに注意すること。

（２）　$\vec{F_2}$ の大きさ F_2 を，q，V_{AB}，d を用いて表せ。

（３）　領域 D_1 と D_2 の磁場の向きの関係として適当なものを，以下のア～エから一つ選んで記号で答えよ。

ア．平行で同じ向き　　　イ．平行で逆向き

ウ．垂直　　　　　　　　エ．平行でも垂直でもない

（4） 領域 D_2 の一様磁場の向きとして適当なものを，以下のア～カから一つ選んで記号で答えよ。

ア．紙面に平行で右から左　　イ．紙面に平行で左から右

ウ．紙面に平行で上から下　　エ．紙面に平行で下から上

オ．紙面に垂直で手前から奥　　カ．紙面に垂直で奥から手前

（5） 領域 D_2 における一様磁場の磁束密度の大きさは，領域 D_1 での大きさと同じであった。荷電粒子の速度 $\vec{v}$ の大きさ v を，m，d，V，q，R を用いて表せ。