物理基礎・物理 （3　問）

〔Ⅰ〕 図1のようなレールの上を，鉛直下向きの重力の作用を受けながら転がることなく滑る小球の運動を考える。レールは滑らかで小球との間に摩擦はないものとする。点Aに小球1を置き静かに手を離すとレールに沿って動き始め，点Bに静止状態で置かれた小球2と衝突する。小球1，2の質量をそれぞれ m_1，m_2，点Bの直前での小球1の運動の向きを正とし，そのときの速度を v_1 とする。点Bに対する点A，Cの高さをそれぞれ a，c とし，点B付近ではレールは水平であるとする。また，重力加速度の大きさを g とする。

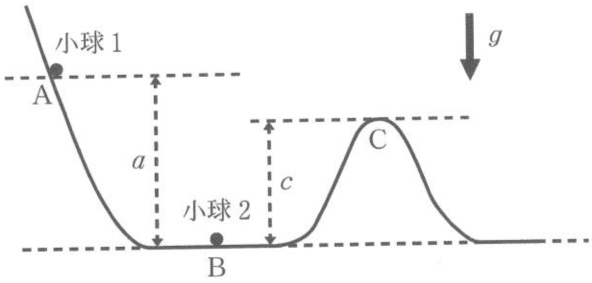

図1

問1 まず図1のように $a > c$ である場合を考える。以下の問いに答えよ。

(1) 以下の文章中の $\boxed{(あ)}$ から $\boxed{(え)}$ には適切な語句を，また，$\boxed{(a)}$ から $\boxed{(c)}$ には適切な式を解答欄に記入せよ。式は，m_1，m_2，g，a，c，v_1 の中から必要なものを用いて表せ。

手を離した直後に小球1に作用する力は $\boxed{(あ)}$ と $\boxed{(い)}$ である。これらの合力の作用により，小球1はレールに沿って点Bの方へ動き始める。$\boxed{(い)}$ は常に運動方向に垂直に作用することから小球1に対し仕事をしない。小球1に対し仕事をするのは $\boxed{(あ)}$ のみである。このような場合，$\boxed{(う)}$ エネルギーと $\boxed{(え)}$ エネルギーの和である力学的エネルギーは一定に保たれる。これを力学的エネルギーの保存と呼ぶ。点Aに置かれた小球1は最初静止していることから，その $\boxed{(う)}$ エネルギーはゼロである。一方，点Aでの小球1の $\boxed{(え)}$ エネルギーは点Bを基準とすると

$\boxed{\text{(a)}}$ である。点Bの直前での小球1の $\boxed{\text{(う)}}$ エネルギーは v_1 を用いて $\boxed{\text{(b)}}$ と書ける。力学的エネルギーが保存されることから v_1 の大きさを求めると $\boxed{\text{(c)}}$ となる。

(2) まず，点Bでの衝突の前後で $v_1 = u_2 - u_1$ という関係式が成り立つ弾性衝突の場合を考える。ここで u_1，u_2 は，それぞれ衝突後の小球1，2の速度である。

(i) 小球1，2の質量が等しく $m_1 = m_2 = m$ であるとき，u_1 と u_2 を m，g，a，c の中から必要なものを用いて表せ。導き方も示すこと。

(ii) また，$a > c$ であれば衝突後の小球2が点Cを越えることを示せ。

(3) 次に，点Bでの衝突後に二つの小球が同じ方向に同じ速度 $u = u_1 = u_2$ で動き出す完全非弾性衝突の場合を考える。ここでも小球1，2の質量は等しく $m_1 = m_2 = m$ とする。このとき，小球2が点Cを越えるための a と c の関係を不等式で表せ。導き方も示すこと。

問2　今度は図2に示すように点Aが点Cよりも低い場合 $(a < c)$ に，小球2が点Cを越える可能性があるかどうかを考える。ただし，点Bでの衝突は弾性衝突で，小球1，2の質量は同じでないとし，$m_1 = M$，$m_2 = m$ とする。なお，衝突は1回だけとし，複数回の衝突は考えない。次の問いに答えよ。

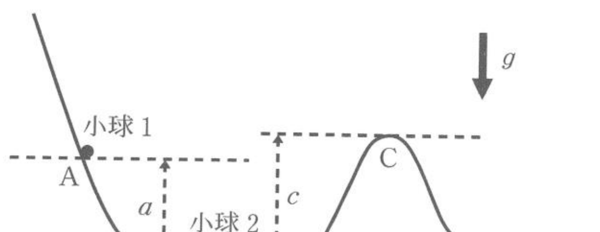

図2

(1) 点Bでの衝突後の小球2の速度u_2を，M，m，g，a，cの中から必要なものを用いて表せ。導き方も示すこと。

(2) 小球2が点Cを越えるために必要な小球2の質量mの条件を，M，g，a，cの中から必要なものを用いて表せ。導き方も示すこと。

(3) 点Aの高さがある高さよりも低くなると小球2はその質量mに関わらず点Cを越えなくなる。そのときのaとcの関係を不等式で表せ。導き方も示すこと。

このページは白紙です。

〔Ⅱ〕 問 1 滑らかに動く軽いピストンを持つ容器の中に 1 mol の単原子分子理想気体を閉じ込めたところ，状態①(圧力 P_1，体積 V_1，絶対温度 T_1)になった。この気体の状態を，図 1 のような 4 つの過程からなるサイクル①→②→③→④→①により変化させた。

[過程 1] 状態①から，ピストンを固定して気体の体積が一定のままゆっくり加熱して状態②(圧力 $P_2 = 2P_1$，体積 $V_2 = V_1$，絶対温度 T_2)まで変化させる。

[過程 2] 状態②から，気体の圧力が一定に保たれるようにゆっくり加熱して状態③(圧力 $P_3 = 2P_1$，体積 $V_3 = aV_1$，絶対温度 T_3)まで変化させる。ここで a は $a > 1$ の定数である。

[過程 3] 状態③から，ピストンを固定して気体の体積が一定のまま状態④(圧力 P_4，体積 $V_4 = aV_1$，絶対温度 T_4)まで変化させる。

[過程 4] 外部との熱のやり取りを遮断して，ピストンをゆっくり動かすと状態④から初めの状態①に戻った。この断熱過程では絶対温度 T と体積 V の間に $TV^{\frac{2}{3}} =$ 一定の関係が成り立つとする。

気体定数を R とすると，単原子分子理想気体の定積モル比熱は $\frac{3}{2}R$ である。また，状態ⓙ(j = 1，2，3，4)の内部エネルギーを U_j とする。以下の空欄 $\boxed{\text{(a)}}$ から $\boxed{\text{(i)}}$ に当てはまる数字，または a を用いた式を解答欄に記入せよ。

このサイクルで状態②の絶対温度 T_2 は T_1 の $\boxed{\text{(a)}}$ 倍，状態③の絶対温度 T_3 は T_1 の $\boxed{\text{(b)}}$ 倍，状態④の絶対温度 T_4 は T_1 の $\boxed{\text{(c)}}$ 倍となる。過程 1 (①→②) で変化する内部エネルギーの変化($U_2 - U_1$)は RT_1 の $\boxed{\text{(d)}}$ 倍，過程 2 (②→③) で変化する内部エネルギーの変化($U_3 - U_2$)は RT_1 の $\boxed{\text{(e)}}$ 倍であり，過程 1 と過程 2 (①→②→③) の間に気体が外部から吸収した熱量の総和 Q_{IN} は RT_1 の $\boxed{\text{(f)}}$ 倍である。過程 4 (④→①) で変化する内部エネルギーの変化($U_1 - U_4$)は RT_1 の $\boxed{\text{(g)}}$ 倍であり，この 1

サイクルで気体が外部にした仕事 W_T は RT_1 の $\boxed{\text{(h)}}$ 倍となることから，このサイクルを熱機関とみなしたときの熱効率は $\boxed{\text{(i)}}$ である。

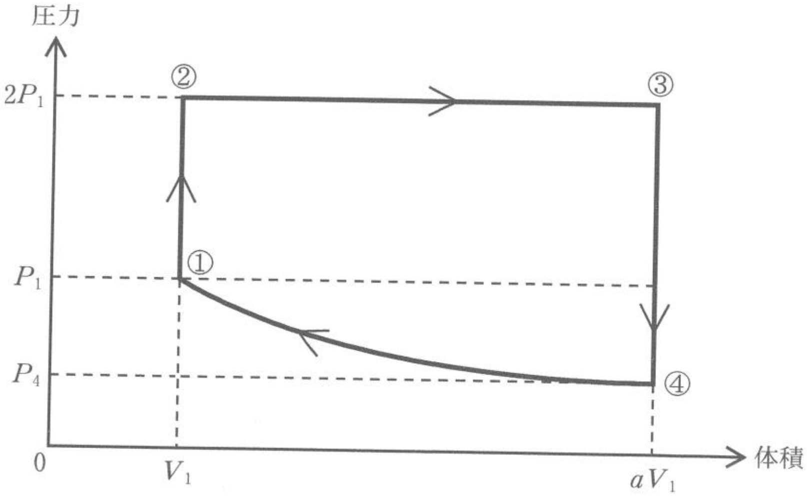

図 1

問 2　レンズによる光の集光や平面ガラス板による光の屈折について考える。次の文章の $\boxed{\text{ア}}$ には，中の選択肢から適切な用語を選び解答欄に記入し，$\boxed{\text{イ}}$ ～ $\boxed{\text{カ}}$ には，適切な式を解答欄に記入せよ。

(1)　図 2 のように，光源とスクリーンを距離 L の間隔で固定し，焦点距離 f のレンズ 1 枚を立てた移動式の台を，光源近くに設置して，光源からスクリーンの方向に徐々に平行移動させる。レンズが光源から距離 A の位置に来た時と，距離 B の位置に来た時の 2 度，スクリーン上に実像が現れた。

このレンズは $\boxed{\text{ア　凸レンズ・凹レンズ}}$ であり，距離 L を A と B を用いて表すと $L=$ $\boxed{\text{イ}}$ となる。また，焦点距離 f を A と B を用いて表すと，$f=$ $\boxed{\text{ウ}}$ となる。

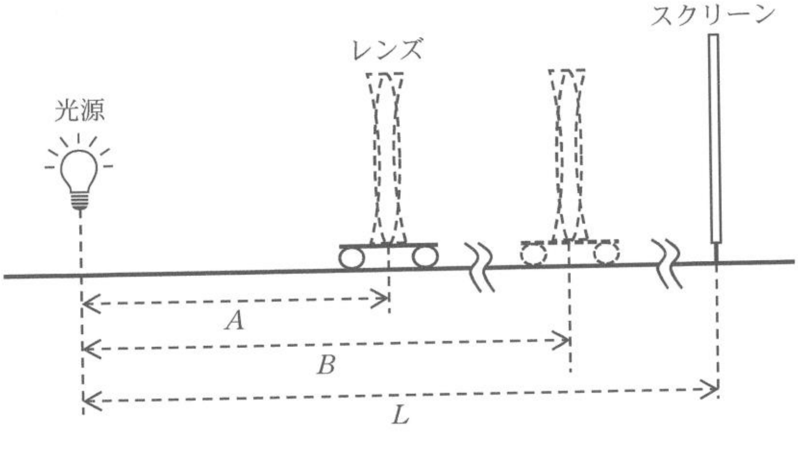

図 2

(2)　次に，図 3 のように焦点距離 f の凸レンズの光軸の真下にレーザー光源を設置して，レンズとレーザー光源を固定する。屈折率 n で厚さ d の平面ガラス板を乗せた移動式の台を凸レンズ後方に設置した。ここで空気の屈折率は 1 とする。焦点よりレンズに近い側に平面ガラス板がないときに，光軸と平行にレーザー光線を凸レンズに当てると，光線は焦点で光軸と交差する。

平面ガラス板が光軸と垂直になるように，台をレンズと焦点の間に移動させ

たとき，図 4 に示すように，光線は，平面ガラス板前面に対して入射角 θ で入射し，屈折角 θ_1 で平面ガラス板内部を通過し，屈折角 θ_2 で平面ガラス板後面から出た。屈折角 θ_1 が満たす式を，θ，n，d の中から必要なものを用いて表すと，$\sin\theta_1 =$ $\boxed{\text{エ}}$ であり，また屈折角 θ_2 が満たす式を，θ，n，d の中から必要なものを用いて表すと，$\sin\theta_2 =$ $\boxed{\text{オ}}$ である。また，平面ガラス板を通過した後，光線が光軸と交差する距離は焦点距離 f より L_1 だけ伸びた。L_1 を f，θ，n，d の中から必要なものを用いて表すと $L_1 =$ $\boxed{\text{カ}}$ となる。

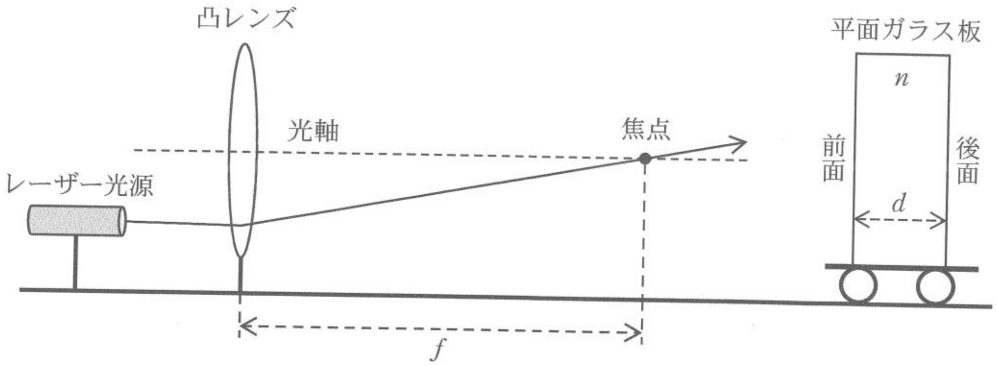

図 3

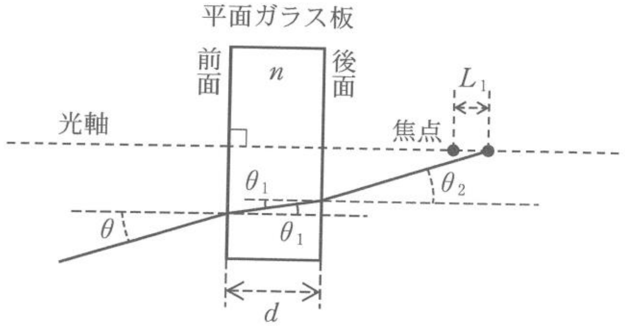

図 4

〔Ⅲ〕 直線状で一定断面積の導線について，その電気抵抗の機構を理解するため，次のようなモデルを考える。導線に電圧を加えたとき，導線内の個々の自由電子が電場の強さ E に比例する一定加速度を受けながら，導線の長さ方向に沿った直線上を運動し，周期的に導線内の原子と衝突して速度が 0 に戻るとする。このモデルでは，衝突直前の速度を $\frac{1}{2}$ 倍した速度が平均速度となる。電場の向きを正，電子の質量を m，電子の電荷を $-e(e>0)$，導線内の自由電子の数密度を n，導線の断面積を S として，以下の問いに答えよ。

問 1 自由電子の加速度の大きさを求めよ。ただし自由電子が衝突により速度を失う瞬間は除いて考えること。

問 2 A 案では，自由電子と原子との衝突は，電場の強さ E に関係なく，自由電子が一定距離 d 進むごとに起こると仮定して立式する。以下の問いに答えよ。導き方も示すこと。

(1) 自由電子の直線運動の平均速度 v_{A} を，m，e，E，d を用いて表せ。

(2) 導線を流れる電流の大きさ I_{A} を，m，e，E，n，S，d を用いて表せ。

問 3 B 案では，自由電子と原子との衝突は，電場の強さ E に関係なく，一定の時間間隔 T ごとに起こると仮定して立式する。以下の問いに答えよ。導き方も示すこと。

(1) 自由電子の直線運動の平均速度 v_{B} を，m，e，E，T を用いて表せ。

(2) 導線を流れる電流の大きさ I_{B} を，m，e，E，n，S，T を用いて表せ。

問 4 導線を流れる電流の大きさが導線に加える電圧に比例する，オームの法則が成り立つとき，これに合致するモデルとして，A 案と B 案のどちらがより適切か。より適切な案のアルファベットを解答欄に記入し，その理由を説明せよ。

問 5　導線の抵抗率 ρ は，導線の長さ L あたりの抵抗値を R として，$\rho = \dfrac{RS}{L}$ で表される。問 4 で選んだ案について，ρ を m，e，E，n，S，L，d，T のうち必要なものを用いて表せ。

問 6　ある常温の物質は，$\rho = 2.0 \times 10^{-8}\,\Omega\cdot\mathrm{m}$，$n = 6.0 \times 10^{28}\,\mathrm{m}^{-3}$ という値を示す。この物質でできた長さ 10 m の導線の両端に 1 V の電位差を与えて電流を流す。このとき，問 4 で A 案を選んだ場合は d を，問 4 で B 案を選んだ場合は T を求めよ。計算には，$m = 9.1 \times 10^{-31}\,\mathrm{kg}$，$e = 1.6 \times 10^{-19}\,\mathrm{C}$ を用い，求めた値は有効数字 2 桁の数字で表し，適切な単位を付けよ。

このページは白紙です。