

〔「物理基礎・物理」「化学基礎・化学」「生物基礎・生物」〕

(時間：2 出題科目で 120 分)

注 意 事 項

- 1 試験開始の合図があるまで、この問題冊子の中を見てはいけません。
- 2 出題科目、ページ及び選択方法は、下表のとおりです。

出 題 科 目	ページ	選 択 方 法
「物理基礎・物理」	1 ～ 3	左の 3 出題科目のうちから、あらかじめ届け出た 2 出題科目について解答しなさい。
「化学基礎・化学」	4 ～ 6	
「生物基礎・生物」	7 ～ 9	

- 3 試験中に問題冊子の印刷不鮮明、ページの落丁・乱丁および解答用紙の汚れ等に気付いた場合は、手を挙げて監督者に知らせなさい。
- 4 解答は、すべて解答用紙の所定の欄に記入しなさい。
- 5 字数制限のある設問では、指示がない限り句読点や英数字も 1 字につき解答欄 1 マスを使い解答しなさい。
- 6 問題冊子の余白は、計算等に用いて構いません。
- 7 試験終了後、解答用紙のみを回収します。

物理基礎・物理

〔1〕 次の文章を読み、空欄 ア , イ を適切に埋め、下の問い(問1～5)に簡潔な説明を付けて答えよ。

図1のように、直線の水平なレール上をなめらかに動くことができる質量 m_A の力学台車 A の上に質量 m_B の物体 B を乗せ、B に軽くて伸びない糸を取り付けた。糸を B に取り付けた点を通りレールに平行な直線を ℓ とする。

糸を持ち ℓ に沿って右向きに大きさ T の張力で引いた。A, B の加速度の大きさをそれぞれ a_A , a_B とし、A と B の間にはたらく摩擦力の大きさを f とすると、A, B についての ℓ に沿った方向の運動方程式はそれぞれ ア , イ と表される。ただし、B が A に対して動くときは、B は A の上面からはみ出ることはなく、向きを変えずに ℓ に沿って平行に移動するものとする。

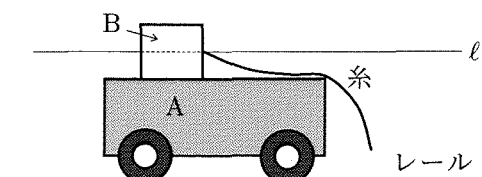


図1

A と B の間の静止摩擦係数を μ 、動摩擦係数を μ' 、重力加速度の大きさを g とし、糸は ℓ を含む鉛直面内にあるとして、次の一連の運動について考えよう。

はじめ、 $T = T_1$ で引いたところ、B は A に対しては動かず A と B は一体となって運動した。

問1 $T = T_1$ で引いたとき、 f を m_A , m_B , T_1 を用いて表せ。

その後、 $T = T_2$ で引いたところ B は A に対しても動き出した。B が A に対して動き出してから A に対する B の相対速度の大きさが v に達するまでの間に、B は A に対して距離 s だけ動いていた(図2)。

問2 $T = T_2$ で引いたとき、 a_A および a_B を g , m_A , m_B , T_2 , μ' から必要なものをを用いてそれぞれ表せ。

問3 $T = T_2$ で引いたとき、 T_2 を g , m_A , m_B , s , v , μ' を用いて表せ。

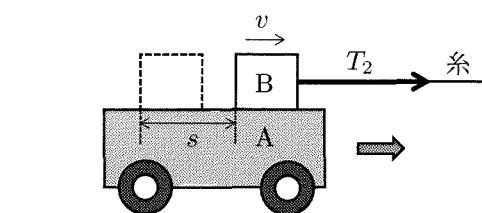


図2

次に、一旦 A と B を静止させた後、図3のように、 ℓ と糸のなす角を θ に保ちながら大きさ T' の張力で引いた。

問4 B が A から受ける垂直抗力の大きさ N を g , m_B , T' , θ を用いて表せ。

問5 A と B が一体となって運動する場合に、A と B に与えることのできる加速度の大きさ a の最大値 α を g , m_A , m_B , θ , μ を用いて表せ。

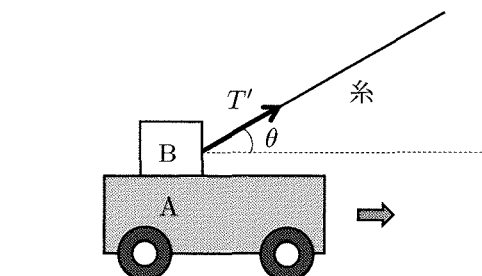


図3

〔2〕 次の文章を読み、空欄 ア ～ キ を適切に埋め、下の問い(問1～3)に簡潔な説明を付けて答えよ。ただし、キ には語句を入れよ。

電場(電界)中の電子は電場による力を受けると真空においては電場と逆方向に等加速度運動する。しかし、導体内の自由電子は熱運動する陽イオンなどに衝突するため等加速度運動を続けることができない。ここでは導体内の自由電子の運動と導体の電気抵抗について考察する。ただし、自由電子の電気量は電気素量 e を用いて $-e$ と表し、質量は m とする。なお、状況を単純化するために以下を仮定する。

- 衝突が起きてから次の衝突までは自由電子は電場による力を受けて等加速度運動する。衝突が起きてから次の衝突までの平均時間を衝突時間と呼び、 τ で表す。
- 衝突直後の自由電子の速度の平均は 0 m/s とする。よって、磁場がかけられていなければ、自由電子の運動は電場の方向を正とし、この方向に沿った1次元に限られる。

導体内の電場 E により自由電子が受ける力は e と E を用いて $(-1) \times$ ア と表される。負の符号は力が電場と逆方向であることを意味する。時刻 t における一つの自由電子の速度を $v(t)$ とする。微小時間 Δt 後($\Delta t < \tau$ とする)のこの自由電子の運動を考え

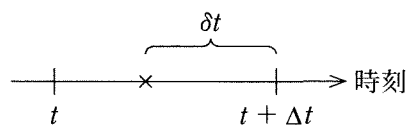


図1

る。 Δt の間に衝突する場合、 t から $t + \Delta t$ の間のどの時点で衝突するか予測することはできないが、図1の×印で示す $t + \Delta t - \delta t$ で衝突したとする。その場合、自由電子は衝突の直後から δt の間、電場による力で加速される。したがって、この自由電子の $t + \Delta t$ での運動量は $(-1) \times$ ア $\times \delta t$ である。一方、 Δt の間に衝突しない自由電子の $t + \Delta t$ での運動量は、 e , m , $v(t)$, E , Δt を用いて イ と表される。単位時間に衝突する回数の平均は $\frac{1}{\tau}$ なので、 Δt の間に衝突する確率は $\frac{\Delta t}{\tau}$ 、衝突しない確率は $(1 - \frac{\Delta t}{\tau})$ でそれぞれ与えられるとする。したがって $t + \Delta t$ での自由電子の運動量の平均は $mv(t + \Delta t) = \frac{\Delta t}{\tau} \times (-$ ア $\times \delta t) + (1 - \frac{\Delta t}{\tau}) \times$ イ と期待できる。この式を $m \frac{v(t + \Delta t) - v(t)}{\Delta t} =$ ウ $+$ エ $\times \Delta t +$ オ $\times \delta t$ と書き直す。ただし、ウ, エ, オ は e , m , $v(t)$, E , τ から必要なものを用いてそれぞれ表される。 Δt が短い極限では $\frac{v(t + \Delta t) - v(t)}{\Delta t}$ は加速度と考えてよいのでこれを a と表す。また、このとき エ と オ を含む項は非常に小さくなり無視できるとして式から除くと下線部(a)の式は $ma =$ ウ となる。これは自由電子の運動方程式を表している。この運動方程式は空気抵抗がはたらく物体の落下運動の運動方程式と同じ形であり、 τ を含む項が抵抗力に相当する。したがって、電場をかけてから τ に比べじゅうぶん長い時間が経過すると自由電子は e , m , E , τ を用いて カ と表される一定の速度になり、電場と逆方向に等速度運動することがわかる。ここまではある一つの自由電子に着目して考えてきたが、この考えを導体内のすべての自由電子に適用するならば、この導体に流れる電流は一定であると考えることができる。この一定の電流を定常電流と呼ぶ。

単位体積中の自由電子の数が n 、長さ ℓ 、断面積が d^2 の直方体の導体を、図2のように、面Xとx軸が、面Yとy軸がそれぞれ垂直になるように設置した。XX'間に電圧 V_0 をかけたところ、X→X'の方向に定常電流 I_0 ($I_0 > 0 \text{ A}$) が流れた。このときXX'間の抵抗は R であった。また、導体内にできる電場 E_0 は一様であるとする。この導体内での自由電子の衝突時間を τ_0 とし、定常電流が流れているときの自由電子の平均の速度を v_0 とする。単位断面積あたりの電流を電流密度と呼び、 j_0 で表す。オームの法則が成り立つならば j_0 と E_0 は比例関係にある。 $\rho = \frac{E_0}{j_0}$ で与えられる ρ は抵抗率と呼ばれ、物質の種類ごとの電流の流れにくさを表す量である。

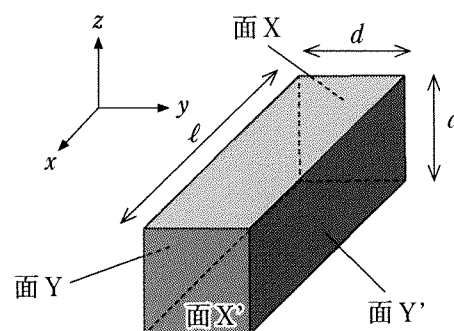


図2

問1 下線部(b)を示せ。また、 R を d , ℓ , ρ を用いて表せ。

問2 j_0 を e , n , v_0 を用いて表せ。また、 ρ を e , m , n , τ_0 を用いて表せ。

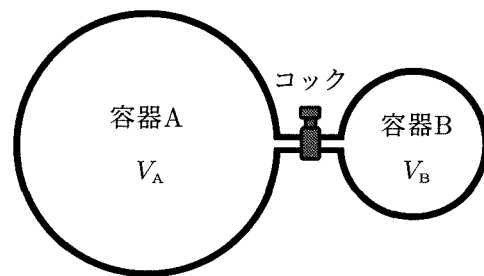
XX'間に電圧 V_0 をかけたまま z 軸正の方向に磁束密度 B ($B > 0 \text{ T}$) の一様な磁場(磁界)をかけた。しばらくすると、Yに対するY'の電位は V_y になり、YY'間に一様な電場が生じ、また、 x 軸方向に流れる定常電流は磁場をかけない場合と同じになった。これらの結果は次のように考えることができる。磁場をかけたことにより自由電子は キ を受けるため、電子の運動の方向が曲げられ y 軸方向に自由電子の偏りができ、その結果YY'間に電位差が生じる。やがてその y 軸方向の電場により自由電子が受ける力が キ とつり合うと自由電子は x 軸と平行に直進するようになる。したがって、定常状態ではYY'間に電位差が生じ、また、 x 軸方向にのみ定常電流が流れる。

問3 下線部(c)のことから、 V_y を d , e , ℓ , m , B , V_0 , τ_0 を用いて表せ。

〔3〕 次の文章を読み、空欄 ア ～ ウ を適切に埋め、下の問い(問1～4)に答えよ。ただし、問3と問4には簡潔な説明を付けよ。

図のように、容積が V_A の容器Aと容積が V_B の容器Bがコックのついた細管で接続されている。容器Aと容器Bの熱膨張、および細管の容積は無視できるものとする。なお、これらの容器には容器内の気体の温度を個別に調整できる機能が付いている。

はじめ、コックは閉じられていて、容器Aには圧力 p_0 、絶対温度 T_0 、定積モル比熱 C_A の理想気体 G_A が、容器Bには圧力 p_0 、絶対温度 T_0 、定積モル比熱 C_B の理想気体 G_B が閉じ込められていた。 G_A 、 G_B の物質質量 n_A 、 n_B は p_0 、 T_0 、 V_A 、 V_B 、および気体定数 R から必要なものを用いて、それぞれ $n_A = \text{ア}$ 、 $n_B = \text{イ}$ と表される。この状態から以下の一連の操作を行った。なお、理想気体の状態方程式は、酸素やヘリウムといった気体の種類にはよらず、また複数種類の混合気体であっても単一の理想気体と同様に成り立つ。



操作1：コックを閉じた状態で、 G_A の絶対温度は T_0 のまま、 G_B の絶対温度を $T_1 = 3T_0$ に保った。このときの G_B の圧力は $p_1 = \text{ウ} \times p_0$ であった。

操作2：装置全体を断熱材で覆い G_A と G_B に対する外部との熱の出入りを遮断した。その後、コックを開いてじゅうぶんな時間が経過するまでおいた。このときの混合気体の絶対温度は T_2 、圧力は p_2 であった。

操作3：断熱材を取り外し、コックは開けた状態で、容器A中の混合気体の絶対温度を T_3 、容器B中の混合気体の絶対温度を T_3' に保った。このときの混合気体の圧力は p_3 であった。

問1 操作1において、 G_B の絶対温度が T_0 から $3T_0$ に変化したことにより増加した G_B の内部エネルギー ΔU を p_0 、 C_B 、 R 、 V_B を用いて表せ。

問2 操作1終了後、つまり、 G_A の絶対温度が T_0 、 G_B の絶対温度が $T_1 = 3T_0$ のとき、 G_B の二乗平均速度 $\sqrt{v_B^2}$ は、 G_A の二乗平均速度 $\sqrt{v_A^2}$ の何倍か。ただし、 G_A のモル質量(1 mol 当たりの質量) M_A は、 G_B のモル質量 M_B の8倍であるとする。

問3 T_2 を C_A 、 C_B 、 T_0 、 V_A 、 V_B を用いて表せ。また、 p_2 を p_0 、 C_A 、 C_B 、 V_A 、 V_B を用いて表せ。

問4 p_3 を p_0 、 T_0 、 T_3 、 T_3' 、 V_A 、 V_B を用いて表せ。