

2026年度

理 科

RA

【 物 理 】

3月12日(木) 理 学 部 (物理学科, 生物科学科, 創造理学コース)
【後期日程】 工 学 部
農 学 部 9 : 40 ~ 11 : 00

注 意 事 項

試験開始前

- 1 監督者の指示があるまで、問題冊子、解答用紙に手を触れてはいけません。
- 2 監督者の指示に従い、出願時に選択した科目の問題冊子、解答用紙であるかどうかを確かめ、全部の解答用紙（3枚）に受験番号を記入しなさい。
- 3 出願時に選択した科目と解答した科目が異なる場合は採点されません。

試験開始後

- 4 この問題冊子は、6ページあります。はじめに、問題冊子、解答用紙を確かめ、枚数の不足や、印刷の不鮮明なもの、ページの落丁・乱丁があった場合は、手をあげて監督者に申し出なさい。
- 5 解答はすべて解答用紙に記入しなさい。
- 6 問題は、声を出して読むではいけません。
- 7 各問ごとの配点は、比率(%)で表示してあります。

試験終了後

- 8 問題冊子は、必ず持ち帰りなさい。

問題補足説明

科目 物理 (RA)

補足説明箇所

3 ページ 問題 2 問1 (2)

金属棒PQとおもりは糸でつながっており、それぞれの加速度および速度を求めるには物体ごとに運動方程式を考える必要がある。時刻 t の時に・・・

(下線部を追加する。)

- 1 天体にかぎらず、2つの物体の間には、それらの質量と距離だけで定まる万有引力がはたらく。万有引力の大きさ F は、2つの物体の質量 M と m の積に比例し、距離 r の2乗に反比例する。すなわち、

$$F = G \frac{Mm}{r^2}$$

である。比例定数 G は万有引力定数とよばれる。キャベンディッシュは、室内にある球体の間にはたらく微小な万有引力を計測することに成功し、この結果をもとに G が計算された。のちに、キャベンディッシュの実験とは異なる、振動の周期を利用した G の決定方法が開発された。

以下では、そのような G の決定方法を単純化した問題として、鉛直ばね振り子の単振動を考える。室内にある2つの小球の間にはたらく万有引力(これ以降、2小球間の万有引力とよぶ)で単振動の角振動数を変化させる。この変化を用いて、 G を決定する。ただし、重力(地球が鉛直下向きに物体を引く力)は室内で一定とする。すなわち、重力加速度の大きさを g として、質量 m の小球にはたらく重力の大きさは常に mg である。また、小球の大きさ、ばねの質量、空気抵抗は無視できるとする。(配点 34%)

問 1 はじめに、図1のように小球1に重力とばねの弾性力だけがはたらく場合を考える。ばね定数 k のばねの一端を天井に固定し、他端に質量 m_1 の小球1を静かにつるす。ばねが自然長のときの小球1の位置を原点 O として鉛直下向きに x 軸をとる。原点 O で小球1を手にのせ、そこからゆっくりと鉛直下向きに手を動かす。室内の物体の間にはたらく万有引力は無視できるとする。

- (1) 小球1の位置が x_0 のとき、小球1が手からはなれて静止した。小球1にはたらく力のつり合いの関係から、 x_0 を求めよ。
- (2) 位置 x_0 から鉛直上向きに小球1をゆっくりと動かし、位置 $x_0 - A$ で静かに手をはなした。ただし、 $A > 0$ である。小球1は位置 x_0 を中心とする振幅 A の単振動をはじめた。
 - (ア) 小球1が位置 $x_0 + x'$ にあるとき、小球1にはたらく合力を求めよ。
 - (イ) 単振動の角振動数 ω_0 を求めよ。
 - (ウ) 小球1の速さの最大値を k, m_1, A を用いて表せ。
 - (エ) 単振動をする小球1の力学的エネルギーを k, x_0, A を用いて表せ。ただし、重力による位置エネルギーの基準点を原点 O にとる。

問 2 つぎに、重力とばねの弾性力に加えて、図2のように2小球間の万有引力も小球1にはたらく場合を考える。小球1の鉛直下方に質量 m_2 の小球2を固定し、その位置を L とする。原点 O で小球1を手にのせ、そこからゆっくりと鉛直下向きに手を動かす。以下では、小球同士は衝突しないとする。また、室内の物体の間にはたらく万有引力のうち、2小球間の万有引力以外は無視できるとする。

- (1) 小球1の位置が X_0 のとき、小球1が手からはなれて静止した。 X_0 を用いて、小球1にはたらく力のつり合いの関係を表せ。 X_0 を求める必要はない。
- (2) 小球1にはたらく力がつり合うときの、小球1と小球2の間の距離を l とする($l = L - X_0$)。位置 X_0 から鉛直上向きに小球1をゆっくりと動かし、位置 $X_0 - A$ で静かに手をはなした。ただし A は l よりも十分に小さい($\frac{A}{l} \ll 1$)とする。小球1は位置 X_0 を中心とする振幅 A の単振動をはじめた。
- (ア) 小球1が位置 $X_0 + x'$ にあるとき、 $|x'|$ は l よりも十分に小さい($\frac{|x'|}{l} \ll 1$)ので、2小球間の万有引力の大きさは $G \frac{m_1 m_2}{\ell^2} + \frac{d}{\ell^3} x'$ と表せる。 d を G , m_1 , m_2 を用いて表せ。ただし $|p|$ が1に比べて十分に小さい($|p| \ll 1$)とき、 n を実数として $(1+p)^n \approx 1+np$ と近似できることを用いてよい。
- (イ) 小球1が位置 $X_0 + x'$ にあるとき、小球1にはたらく合力は $-(k - k')x'$ と表せる。 k' を d , l を用いて表せ。
- (ウ) 小球1が単振動をするためには、 l はある値 l_c よりも大きい必要がある。 l_c を d , k を用いて表せ。
- (エ) 小球1は角振動数 ω_1 の単振動をした。 ω_1 は $\omega_1 = \omega_0 \sqrt{1 - \alpha}$ と表せる。 α を k , k' を用いて表せ。ここで、 ω_0 は問1(2)(イ)の角振動数である。
- (オ) G は $G = h(\omega_0^2 - \omega_1^2)$ と表せる。 h を l , m_2 を用いて表せ。
- (カ) l , m_2 , ω_0 , ω_1 はいずれも計測できる。計測の結果、 $l = 2.00 \times 10^{-1} \text{ m}$, $m_2 = 1.60 \times 10^2 \text{ kg}$, $\omega_0 = 5.10 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$, $\omega_1 = 4.83 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$ であったとする。これらの値を用いて、 G の値を有効数字3桁で単位をつけて求めよ。ただし、 $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$ を用いて、 G の単位はN, m, kgの組み合わせで表せ。

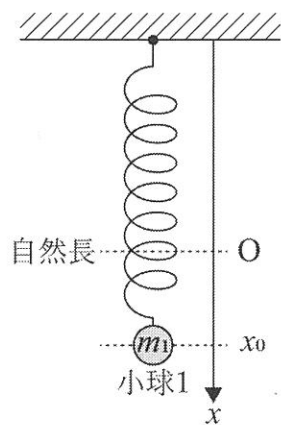


図1

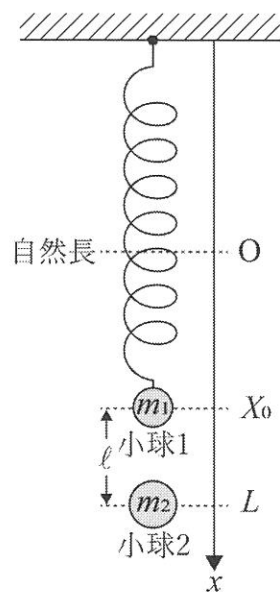


図2

2 水平面に鉛直上向きの、一様で時間変化しない磁束密度 B の磁場中に、図 1 のような導体でできた直線レールを含む電気回路を考える。各々のレールは十分長く、平行で距離 l だけ離れており、水平面に対して θ ($0^\circ < \theta < 90^\circ$) の角度で固定されている。このレールの上に質量 m の金属棒 PQ がレールに垂直に渡してあり、金属棒 PQ の中央に質量の無視できる糸がくくりつけられている。糸は定滑車に通してあり、糸の反対側の端には、金属棒 PQ と同じ質量 m のおもりが吊るされている。金属棒 PQ はレールから離れずに垂直を保ったまま、レールに沿って滑らかに移動することができる。図 1 に示した抵抗値 R 以外の電気抵抗は、この回路においては無視できる。回路に流れる電流によって生じる磁場は無視でき、磁場が相互に影響し合うことも無視できるとする。レールと金属棒 PQ の間の摩擦と空気抵抗、糸の伸びおよび滑車の摩擦も無視できるとする。金属棒 PQ とレールの太さは無視する。重力は鉛直下向きで、重力加速度の大きさは g とする。(配点 33%)

問 1 最初、金属棒 PQ は ac の位置にあってストッパーがかかって止まっており、スイッチ S_1 と S_2 はともに開いている。時刻 $t = 0$ でストッパーを静かに解除すると、金属棒 PQ はレールから離れることなく、斜面上方 bd の位置に向けて滑らかに動き始めた。

- (1) 金属棒 PQ 内の電子が受ける力の方向は、端点 P から端点 Q か、端点 Q から端点 P か、解答欄の選択肢のどちらかに○をつけて答えよ。
- (2) 時刻 t の時に金属棒がレール上を動く速さ v_1 を、 g 、 θ 、 t のうちから必要なものを用いて表せ。
- (3) 時刻 t の時の誘導起電力の大きさ V_1 を、 B 、 l 、 g 、 θ 、 t のうちから必要なものを用いて表せ。

問 2 次に、金属棒 PQ を ac の位置に戻してストッパーをかけた。スイッチ S_1 を閉じたのち、時刻 $t = 0$ でストッパーを静かに解除すると、金属棒 PQ はレールから離れることなく、斜面上方 bd の位置に向けて滑らかに動き始め、時刻 t での速さは v_2 となった。

- (1) 時刻 t における端点 PQ 間に生じる誘導起電力の大きさ V_2 を、 v_2 、 B 、 l 、 θ のうちから必要なものを用いて表せ。
- (2) 端点 PQ 間に流れる誘導電流の大きさ I を、 v_2 、 R 、 B 、 l 、 θ のうちから必要なものを用いて表せ。

問 3 問 2 の状態でしばらく時間が経つと、金属棒 PQ の速さは一定の v_3 となり、回路に流れる電流は I_1 となった。

- (1) このときの、レールに沿った方向での金属棒 PQ へ働く力のつり合いの式を、 I_1 , B , g , l , m , θ のうちから必要なものを用いて表せ。
- (2) 端点 PQ 間に流れる電流の大きさ I_1 を、 B , g , l , m , θ のうちから必要なものを用いて表せ。
- (3) 金属棒 PQ の速さ v_3 を、 R , B , g , l , m , θ のうちから必要なものを用いて表せ。
- (4) 抵抗値 R の電気抵抗で単位時間あたりに消費するエネルギー Q を、 R , B , g , l , m , θ のうちから必要なものを用いて表せ。

問 4 再び、金属棒 PQ を ac の位置に戻してストッパーで固定する。スイッチ S_1 を開け、スイッチ S_2 を閉じて起電力 E の電池とつないだのち、ストッパーを静かに解除した。金属棒 PQ がストッパーを解除しても、金属棒 PQ は ac の位置から動かなかった。電池の起電力 E の大きさを、 R , B , g , l , m , θ のうちから、必要なものを用いて表せ。

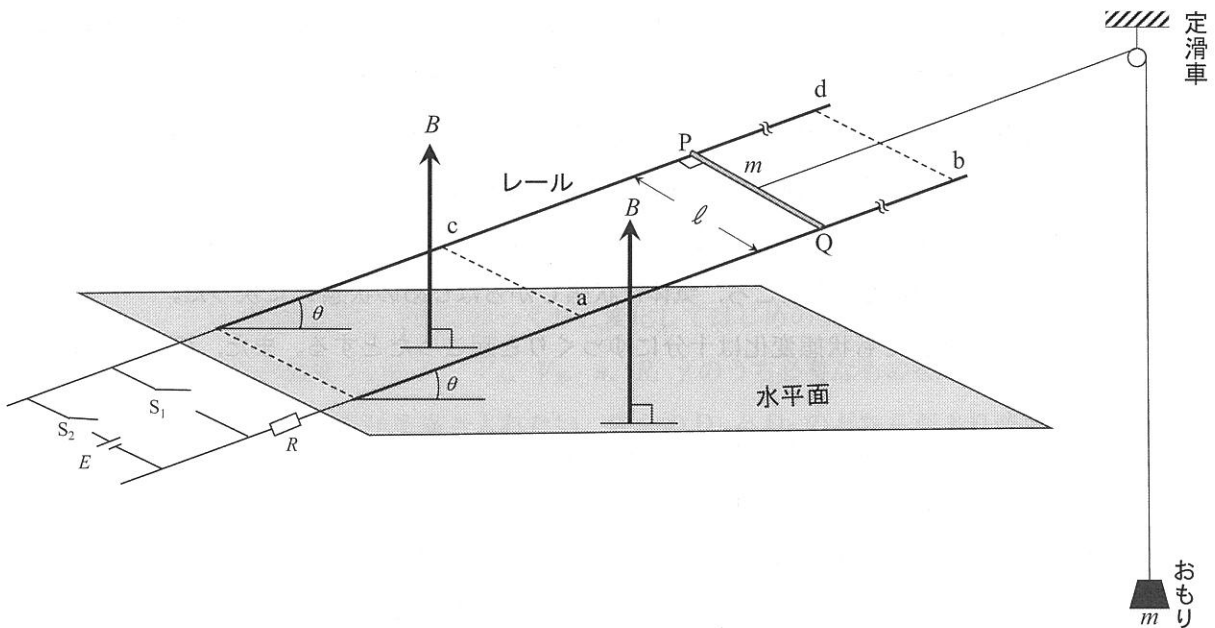


図 1

- 3 気体定数を R として、以下の問いに答えよ。この問いにおいて温度とは絶対温度のことである。以下のそれぞれの過程における仕事の正負は、気体が外部に仕事をするときを正、外部から仕事をされるときの負とする。また、熱量の正負は、気体が熱を吸収するときを正、熱を放出するときを負とする。(配点 33%)

問 1 図 1 のようにシリンダーとピストンと熱制御装置からなる密閉容器があり、ピストンの左側に n モルの単原子分子理想気体が入っている。ピストンの右側は真空である。シリンダーとピストンは熱を通さない材料(断熱材)でできている。ピストンは左右になめらかに動かすことや、適当な位置で止めることができる。熱制御装置を動作させると、気体に熱を加えたり、気体から熱を奪ったりできる。ピストンの厚みや熱制御装置の大きさは無視できるとする。また、理想気体における十分にゆっくりとした断熱変化では、変化途中の気体の圧力 p と体積 V の間に $pV^\gamma = \text{一定}$ という関係が成り立つ。ただし、定数 γ は $\gamma > 1$ を満たす。

はじめに、ピストンは容器の右端にあり、理想気体は温度 T_A 、体積 V_A の状態 A にあった。この理想気体に対し、以下の過程 a, b, c を順番に行って状態を変化させた(図 2)。

- ・過程 a : 熱制御装置を動作させ、圧力を一定に保ちながらピストンをゆっくりと動かして体積を V_A から V_B に変化させたところ、気体は状態 A から状態 B に変化した。
- ・過程 b : 熱制御装置を動作させ、ピストンを止めて体積を V_B に保ちながらしばらく待ったところ、気体は状態 B から状態 C に変化した。
- ・過程 c : 熱制御装置を動作させずに、ピストンをゆっくりと動かして体積を V_B から V_A に変化させたところ、気体は状態 C からはじめの状態 A に戻った。

いずれの過程でも状態変化は十分にゆっくりと起こったとする。また、 $V_A > V_B > 0$ である。

- (1) 状態 A の圧力 p_A を T_A, V_A, n, R を用いて表せ。
- (2) 状態 B の温度 T_B を T_A, V_A, V_B を用いて表せ。
- (3) (ア) 状態 C の圧力 p_C を p_A, V_A, V_B, γ を用いて表せ。
(イ) 状態 C の圧力 p_C を $T_A, V_A, V_B, n, R, \gamma$ を用いて表せ。
- (4) (ア) 状態 C の温度 T_C を p_C, V_B, n, R を用いて表せ。
(イ) 状態 C の温度 T_C を T_A, V_A, V_B, γ を用いて表せ。
- (5) 過程 a における仕事 W_a を $T_A, V_A, V_B, n, R, \gamma$ のうち必要なものを用いて表せ。
- (6) 過程 a における内部エネルギーの変化量 ΔU_a を $T_A, V_A, V_B, n, R, \gamma$ のうち必要なものを用いて表せ。
- (7) 過程 a における熱量 Q_a を $T_A, V_A, V_B, n, R, \gamma$ のうち必要なものを用いて表せ。
- (8) 過程 b における熱量 Q_b を $T_A, V_A, V_B, n, R, \gamma$ のうち必要なものを用いて表せ。
- (9) 過程 c における仕事 W_c を $T_A, V_A, V_B, n, R, \gamma$ のうち必要なものを用いて表せ。



図 1

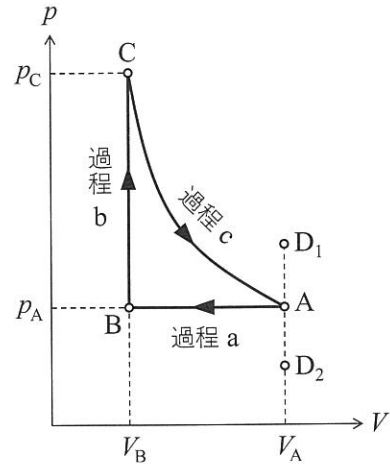


図 2

問 2 問 1 と同様にシリンダーとピストンと熱制御装置からなる密閉容器内の n モルの単原子分子理想気体の状態変化を考える。ここでは、過程 a と過程 b は問 1 と同じであるが、問 1 の過程 c の代わりに以下の過程 d と過程 e を順番に行った。

- ・過程 d : 状態 C において、断熱材でできた厚みの無視できる仕切りをピストンにぴったりと沿って入れた後にピストンを取り払う(図 3)。この段階では気体は状態 C のままである。その後、熱制御装置を動作させずに仕切りを引き抜いたところ、気体は容器全体に均一に広がり、最終的に状態 C から状態 D に変化した。ただし、容器全体の体積は V_A であるとする。また、仕切りの出し入れやピストンを取り払う際に仕事のやり取りや熱の出入りはないとする。
- ・過程 e : 熱制御装置を動作させ、体積を V_A に保ちながらしばらく待ったところ、気体は状態 D から十分にゆっくりと変化してはじめての状態 A に戻った。

- (1) 状態 D の温度 T_D を $T_A, V_A, V_B, n, R, \gamma$ のうち必要なものを用いて表せ。
- (2) 図 2 の中に状態 D を書き入れたい。図 2 の D_1 と D_2 のどちらがより適切か。解答欄の選択肢のどちらかに○をつけて答えよ。また、その理由について数式を交えた文章を解答欄に記述せよ。特に、 $\gamma > 1$ であることと $V_A > V_B$ であることに言及せよ。
- (3) 過程 e における熱量 Q_e を $T_A, V_A, V_B, n, R, \gamma$ のうち必要なものを用いて表せ。

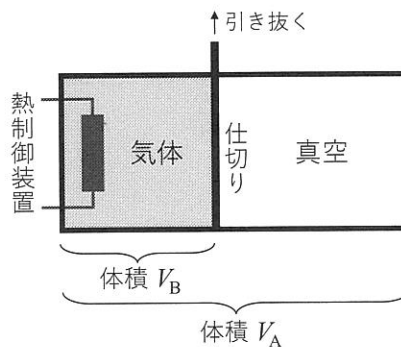


図 3