

物 理

物理 問題 I

図1のような2つの円柱が一体となった形状の密度が一様な物体がある。この物体の上部の円柱部分は底面積 S 、高さ $2h$ 、下部の円柱部分は底面積 $4S$ 、高さ h であり、両円柱部分の中心軸は一致している。この物体を、十分大きな容器に入った密度 ρ の液体に静かに浮かべたところ、図2のように液面から上に出ている部分の高さが h になった状態でつり合って静止した。この問題では物体の底面は水平な液面と常に平行であり、物体の運動は上下方向のみで、運動によって液面の高さは変わらず、物体は容器の底に達しないものとする。また、重力加速度の大きさを g とし、重力と浮力以外に物体にはたらく力は無視できるものとして、次の問いに答えよ。

問1. 物体の底面から物体の重心の位置までの高さを求めよ。

問2. 物体の密度を求めよ。

図2において静止した位置から、物体の上面に鉛直下向きの力をゆっくりと加えていき、液面から物体の上面までの高さが $\frac{h}{2}$ になるまで沈めた。

問3. 静止した位置から変位 Δx ($0 \leq \Delta x \leq \frac{h}{2}$) だけ沈めたときに加えた力の大きさを求めよ。

このとき加えた力の大きさと変位 Δx は比例するので、ばねに力を加えたときの弾性力と同様に考えることができる。液面から物体の上面までの高さを $\frac{h}{2}$ まで下げた後、力を取り除くと物体は上下に単振動を始めた。

問4. 物体の振動の周期を求めよ。

次に、物体の上下を逆にして同じ液体に静かに浮かべたところ、図3のようにつり合って静止した。

問5. 液面から上に出ている部分の高さを求めよ。

問6. 静止した位置から物体が液面下に完全に沈まないように鉛直下向きの力を加えた後、力を取り除くと断面積が S の円柱部分が液面上に出ることなく、物体は上下に単振動を始めた。このときの物体の振動の周期は、問4で求めた周期の何倍になるか。

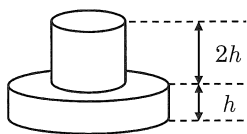


図1

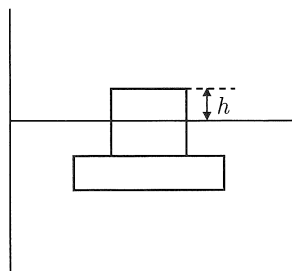


図2

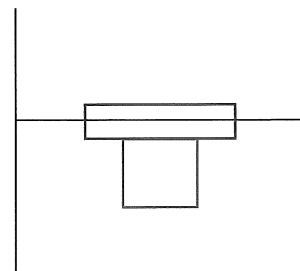
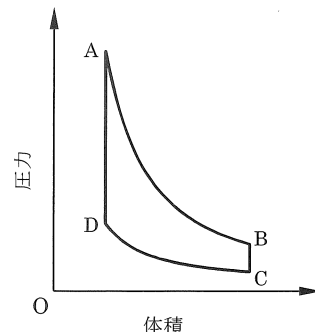


図3

物理 問題 II

外部から仕事をすることにより低温熱源から熱を奪い、高温熱源に熱を与える熱機関（ヒートポンプ）について考える。絶対温度 T_L の低温熱源と絶対温度 T_H の高温熱源、および単原子分子の理想気体 1 mol をなめらかに動くピストンで封入したシリンダーがある。シリンダーを使って次のような過程で低温熱源から高温熱源へ熱を移動させた。図はその間の気体の圧力と体積の関係の概略を表すグラフであり、A, B, C, D は各過程の開始時（終了時）の状態を示している。各過程の終了時から次の過程の開始時までの気体の状態変化は無視でき、両熱源の熱容量は十分大きいとする。気体定数を R とし、断熱変化においては、単原子分子の理想気体の絶対温度 T と体積 V の間には、 $TV^{\frac{5}{3}} = \text{一定}$ が成立することを用いて、次の問いに答えよ。



- [過程 1] シリンダー内の気体の初期状態は、体積が V_0 、温度が T_L よりも低い温度であった。このシリンダーを体積一定の状態 で低温熱源に接触させたところ、シリンダー内の気体は熱を吸収し、しばらくして気体の温度は低温熱源と同じ温度 T_L になった。
- [過程 2] シリンダーを低温熱源からはなして気体を断熱圧縮させたところ、シリンダー内の気体の体積は $a^3 V_0$ ($0 < a < 1$) になった。このときの気体の温度は T_H よりも高くなった。
- [過程 3] シリンダーを体積一定の状態 で高温熱源に接触させたところ、シリンダー内の気体は熱を放出し、しばらくして気体の温度は高温熱源と同じ温度 T_H になった。
- [過程 4] シリンダーを高温熱源からはなして気体を断熱膨張させたところ、シリンダー内の気体の体積は V_0 になった。このときの気体の温度は、[過程 1] の初期状態と同じ温度になった。

問 1. 次の状態を図の A, B, C, D の中からそれぞれ一つずつ選び、記号で答えよ。

(1) [過程 1] の初期状態

(2) [過程 1] が終了したときの状態

問 2. [過程 1] が終了したときの気体の圧力を求めよ。

問 3. [過程 2] が終了したときの気体の温度を求めよ。

問 4. [過程 2] が終了したときの気体の温度が T_H よりも高くなるための a の条件を、 V_0 、 T_L 、 T_H の中から必要なものを用いて表せ。

問 5. [過程 2] で外部から気体にした仕事 W_0 を、 V_0 、 T_L 、 R 、 a の中から必要なものを用いて表せ。

問 6. [過程 3] で気体が高温熱源に与えた熱量 Q を、 V_0 、 T_L 、 T_H 、 R 、 a の中から必要なものを用いて表せ。

問 7. [過程 4] で外部から気体にした仕事を W_1 としたとき、この熱機関の 1 サイクルの間に外部から気体にした仕事の合計 $W = W_0 + W_1$ は、高温熱源に与えた熱量 Q を用いて、 $W = (1 - a^2)Q$ と表される。このサイクルによる仕事と熱量に関する以下の選択肢の記述のうち、正しいものをすべて選び、記号で答えよ。

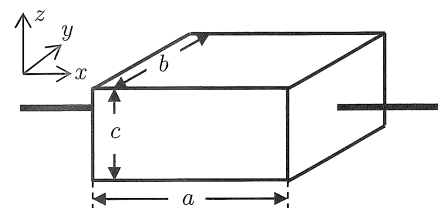
選択肢

- (ア) 高温熱源に与えた熱量は、外部から気体にした仕事の合計よりも大きい。
- (イ) 高温熱源に与えた熱量は、外部から気体にした仕事の合計に等しい。
- (ウ) 高温熱源に与えた熱量は、外部から気体にした仕事の合計よりも小さい。
- (エ) 絶対温度 T_H の高温熱源に熱量 Q を与えるのに必要な外部からの仕事を小さくするには、低温熱源との温度差が大きい方がよい。
- (オ) 絶対温度 T_H の高温熱源に熱量 Q を与えるのに必要な外部からの仕事を小さくするには、低温熱源との温度差が小さい方がよい。
- (カ) 低温熱源から高温熱源に熱量を移動させることができるのは、外部から気体にした仕事の合計が負になるときだけである。

物理 問題 III

導体や半導体に電圧を加えると電流が流れる。ここに、電流と垂直に磁場（磁界）を加えると、導体や半導体の表面が帯電し内部に電位差が生じる。この現象をホール効果といい、発生した電位差（ホール電圧）を調べることにより電流の担い手（キャリア）の情報が得られる。この現象を理解するために、あらい水平な台に置かれた直方体の試料を考える。

図のように、鉛直上向きが z 軸の正の向きになるように直方体の試料の 3 辺に沿って x 軸、 y 軸、 z 軸を取り、それぞれの方向の辺の長さを a, b, c 、キャリアの電荷を $q (> 0)$ 、単位体積あたりのキャリアの個数を n とし、試料は全体としては電氣的に中性であるとする。試料に電圧を加えると、 x 軸の正の向きに一定の電流 $I (> 0)$ が流れた。



ベクトルの向きを答える問いでは、以下の選択肢の中から最も適切なものを一つ選び、記号で答えること。

- 選択肢 (ア) x 軸の正の向き (イ) x 軸の負の向き (ウ) y 軸の正の向き (エ) y 軸の負の向き
 (オ) z 軸の正の向き (カ) z 軸の負の向き (キ) (ア) から (カ) 以外の向き
 (ク) ベクトルの大きさは 0 であり、向きはない

問 1. このときのキャリアの平均速度の向きを記号で答え、その大きさ v を求めよ。

試料に電流が流れている状態で、 z 軸の正の向きに磁束密度 $B (> 0)$ の一定の磁場を加えると、運動しているキャリアにはローレンツ力がはたらく。

問 2. 問 1 の平均速度で運動するキャリア 1 個にはたらくローレンツ力の向きを記号で答え、その大きさを、 q, n, I, v, B の中から必要なものを用いて表せ。

問 3. このときも電流は x 軸の正の向きに I のままであったとして、試料全体にはたらくローレンツ力の合計を考える。その向きを記号で答え、大きさを、 a, b, c, q, n, I, B の中から必要なものを用いて表せ。

ローレンツ力を受けたキャリアは曲げられ、その平均速度の向きは問 3 のローレンツ力の向きに傾く。その結果、この向きにある試料の側面にキャリアが蓄積し、帯電する。一方、この側面の向かい側の側面ではキャリアが不足するため、符号が逆の電荷が蓄積する。この電荷配置は平行板コンデンサーと同様であり、蓄積した電荷は試料内部にほぼ一様な電場（電界）を生じさせる。

この電場からキャリアが受ける力の向きは平均的なローレンツ力と逆向きであり、十分な時間が経ち側面の電荷がある量になると、キャリアが受ける平均的なローレンツ力はこの電場からの力とつり合うようになり、側面の電荷は一定になる。一方で、この電場は、電子や原子核等の試料を構成するキャリア以外の物質にも力を及ぼす。十分時間が経った状態に関し、キャリアが蓄積している側面を基準として向かい側の側面の電位を $-V_H$ とし、試料は水平台上に静止したままだったとして、次の問いに答えよ。

問 4. 蓄積した電荷により試料内部に生じた電場の向きを記号で答え、その大きさを、 q, n, I, v, B の中から必要なものを用いて表せ。

問 5. 単位体積あたりのキャリアの個数 n を、 a, b, c, q, I, B, V_H の中から必要なものを用いて表せ。

問 6. 試料にはたらく摩擦力の向きを記号で答え、その大きさを、 a, b, c, q, I, B の中から必要なものを用いて表せ。