

各問の ( ) の中に入れるべき適当な数値、数式または字句などを解答用紙の指定されたところに記入せよ。その他の設問に対する解答は、指示にしたがって解答欄に書け。問題に単位の指定がない場合、用いられる記号は SI (国際単位系) 単位にしたがっているものとする。各問に対する解答は、( ) 内に記号が示されていれば、その記号のうち必要なものを用いて記せ。

### 第 1 問

A 君が列車の中で投射運動の実験を行なうことになった。以下の問いに答えよ。

問 1 出発前に静止している列車の車窓から外を見ると雨が降っていた。雨粒は一定速度  $u_0$  で垂直に落下し、その状態を保ちながら降り続けるとする。出発後、列車が水平方向に時速 40.0 km の一定速度で動いている時、車窓から見た雨粒の軌跡は垂直から 60.0 度の角度をなしていた。雨粒の落下速度  $u_0$  の大きさを m/s の単位で求めると (ア) [m/s] となる。(ただし、 $\sqrt{2} = 1.41$ ,  $\sqrt{3} = 1.73$ ,  $\sqrt{5} = 2.24$ ,  $\sqrt{7} = 2.65$  とせよ)

次に、走行する列車内で、質量  $m$  で大きさの無視できる物体を、列車の進行方向逆向きに投射する実験を行なう。図 1 のように A 君の位置を原点 O とし、列車に固定された座標を考える。原点から距離  $R$  離れた B 点に向けて物体を放り投げて命中させることを考える。空気抵抗は無視し、重力加速度を  $g$  とする。

問 2 列車が水平方向に一定速度  $V$  で走行中、A 君が水平と角度 45 度をなして初速度  $U$  で斜め上方に物体を投げる場合、列車内で観測した時刻  $t$  秒後の物体の位置の  $x$  座標は (イ) ( $V, U, t, g, m$ )、 $y$  座標は (ウ) ( $V, U, t, g, m$ ) となる。ただし、物体は列車の天井や床に衝突しないとす。また、物体が図 1 の B 点に命中するとき、初速度  $U$  の大きさは (エ) ( $V, R, g, m$ ) となる。

問 3 次に、図 1 の進行方向に一定の加速度で列車の速度が増加しているとき、その加速度の大きさを  $a$  とする。問 2 と同様に水平と角度 45 度をなして物体を投射し、ちょうど図 1 の B 点に届くためには、初速度  $U$  の大きさは (オ) ( $a, R, g, m$ ) でなければならない。

また、原点 O から列車内の天井までの高さを  $H$  とする。天井に衝突することなく B 点に命中するには、B 点までの距離  $R$  は (カ) ( $a, R, g, m, H$ ) という条件を満たす必要がある。

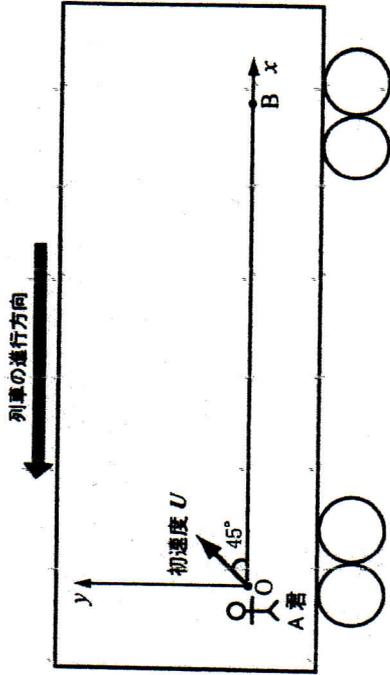


図 1

## 第2問

真空の電磁界中における電子の運動について考える。以下の問いでは電子の電荷を  $-e$  ( $e > 0$ ) [C]、電子の質量を  $m$  [kg] とする。また、電子に働く重力は無視できるとする。以下の各問いに答えよ。

補足説明：電子の座標は  $(x, y, z)$  とする。

問1 直交座標系において  $+z$  方向に強さ  $E$  [V/m] の一様な電界を加えた。この時、電子を原点  $O$  から速さ  $v$  [m/s] で  $yz$  面上に  $+x$  方向から  $+z$  方向に角度  $\theta$  ( $0 < \theta < 90^\circ$ ) をなす向きに放出した。この後の電子の運動について、電子の座標の  $z$  成分を表す式は  $z = (\quad \quad \quad)$  ( $e, E, v, m, \theta, x, y$ ) であり、電子が再び  $x$  軸に達する時刻は  $(\quad \quad \quad)$  ( $e, E, v, m, \theta, x, y$ ) である。

問2 次に、この系から電界をなくし、 $+z$  方向に磁束密度の大きさ  $B$  [T] の一様な電界を加えた。この時、電子が原点  $O$  から速さ  $v$  [m/s] で  $yz$  平面上に  $+y$  方向から  $+z$  方向に角度  $\theta$  ( $0 < \theta < 90^\circ$ ) をなす向きに放出されたとする。この後、電子は  $+z$  方向に、半径  $(\quad \quad \quad)$  [m] ( $e, E, B, v, m, \theta$ ) でらせん運動をする。このとき  $+z$  方向の速さは  $(\quad \quad \quad)$  [m/s] ( $e, E, B, v, m, \theta$ ) である。

問3 次に問2の磁界に加えて強さ  $E$  [V/m] の電界を  $x, y, z$  方向のうち、ある一方向に加えた。電子を問2と同様に原点  $O$  からある速さ  $v_0$  [m/s] で  $yz$  平面上に  $+y$  方向から  $+z$  方向に角度  $\theta$  ( $0 < \theta < 90^\circ$ ) をなす向きに放出したところ、電子は直進し続けた。このときの電界の向きは  $(\quad \quad \quad)$  ( $x, y, z$ ) で、電子の速さ  $v_0$  は  $(\quad \quad \quad)$  [m/s] ( $e, E, B, v, m, \theta$ ) であった。

### 第3問

熱機関とは、熱源から熱を受け取り、その熱の一部を仕事に変え、残りの熱が外部に放出される過程をくり返し行う装置の一般名称であり、蒸気機関、蒸気タービン、ディーゼル機関、ガソリン機関、ガスタービンなどが相当する。近年の地球温暖化問題に対する手段として、二酸化炭素をできるだけ排出しない熱効率の高い熱機関が求められている。

いま、図2のように、1モルの単原子分子の理想気体が、なめらかに動くピストンをもつシリンダー内に閉じ込められている。熱はシリンダーの左側端のみを通して出入りする。閉じ込められた気体の圧力  $p$  [Pa]、体積  $V$  [m<sup>3</sup>] を、図3のように A→B→C→D→A とゆっくり変化させた。ただし、A→B は断熱圧縮変化、B→C は定積変化、C→D は断熱膨張変化、D→A は定圧変化である。各状態 A、B、C、D の温度を  $T_A$  [K]、 $T_B$  [K]、 $T_C$  [K]、 $T_D$  [K]、状態 A の体積を  $V_0$  [m<sup>3</sup>]、気体定数を  $R$  [J/(mol·K)] として、以下の問いに答えよ。

問1 状態 A から状態 B に変化するとき、気体が外部にした仕事  $W_{AB}$  は (      ス      ) [J] ( $V_0$ ,  $R$ ,  $T_A$ ,  $T_B$ ) である。

問2 状態 B において熱を加えたことにより、状態 C に変化した。状態 B から状態 C に変化するとき、気体の圧力は2倍となった。この際、 $T_C$  を  $T_B$  を用いて示すと、(      セ      ) となる。また、気体に加えられた熱量  $Q_1$  は (      ソ      ) [J] ( $V_0$ ,  $R$ ,  $T_B$ ) となる。

問3 状態 C から状態 D に変化するとき、気体が外部にした仕事  $W_{CD}$  は (      タ      ) [J] ( $V_0$ ,  $R$ ,  $T_C$ ,  $T_D$ ) となる。

問4 状態 D から状態 A に変化するとき、気体の体積は  $2/3$  になった。この際、気体が放出した熱量  $Q_2$  は (      チ      ) [J] ( $V_0$ ,  $R$ ,  $T_D$ ) となる。

問5 このような A→B→C→D→A の状態変化を利用した熱機関サイクルはアトキンソンサイクルもしくはミラーサイクルと呼ばれており、ハイブリッド自動車などの低燃費自動車に用いられている。この熱機関の熱効率  $e$  を  $T_B$ ,  $T_D$  を用いて示すと、(      ツ      ) となる。

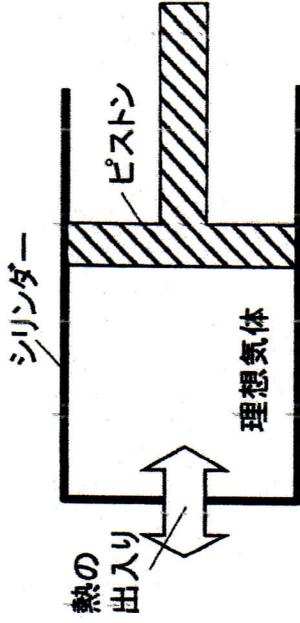


図2

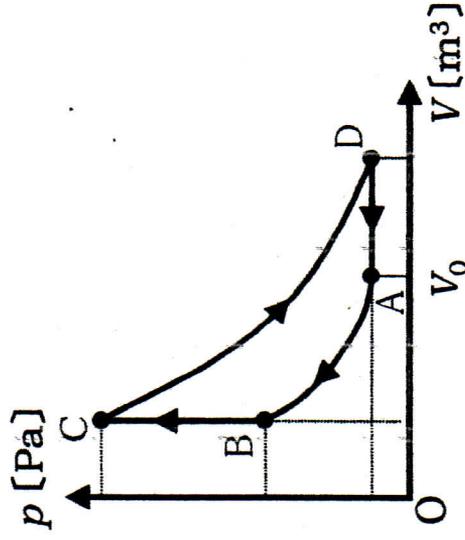


図3

### 第4問

音楽器の模型として、両端が開いた長さ  $L$  [m] の管の端から図4に示すようなピストンを入れて実験を行う。音源の振動数は変化させることができる。管中は温度一定の空気で満たされている。ピストンの位置を変え、閉管の長さ  $L'$  [m] を自由に變えることで、いろいろな音程で共鳴することができる。以下の各問に答えよ。また、整数は  $n$  を使用すること。

(補足説明：この問題の間1では開口端補正は必要ないものとする)

問1 音源の振動数を  $f$  [Hz] とし、管内の音速が  $V$  [m/s] であるとする。このとき、ピストンの位置  $L'$  が ( ア ) ( $L, L', f, V, n$ ) の条件をみたすときに管から大きな音が生じた。

問2 ピストンを音源側から動かして、図5(a)の位置にピストンを固定した。このとき管内には定常波が生じている。図5(a)の曲線Aは時刻0秒における空気の振動を、空気の右向きの変位を縦軸の正の値として横波で表示したものである。  $T$  を振動の周期とすると、図5(b)および図5(c)中の曲線B, Cに対応する時刻は  $T/$ ( ト ),  $T/$ ( ナ ) となる。ト, ナに当てはまる自然数を記入せよ。

問3 図5(a)で、時刻0秒での空気の密度(圧力)が高くなる場所を  $0 \sim t$  のうちから選び解答欄の(ニ)に記入せよ。(複数記入可)。

問4 つぎに二つの音さ1と2を用意する。これらは同時に鳴らすと、2秒間に10回のうなりが観測される。上記の音源をこの音さに代えピストンの位置を变化させた場合、表1のようになり、それぞれの音さで共鳴がおこるピストンの位置が、 $L'_1, L'_2, L'_3$  となった。

このとき、音さ1の振動数は( ア ) [Hz]、音さ2の振動数は( ネ ) [Hz] となる。



図4

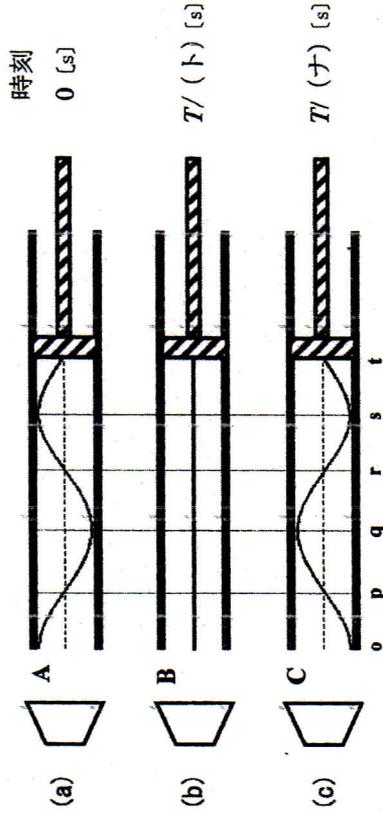


図5

表1

音さ	$L'_1$ [cm]	$L'_2$ [cm]	$L'_3$ [cm]
音さ1	26.0	78.5	131.0
音さ2	26.2	79.5	132.8