1 図のように，弧ABCは点Oを中心とする半径rの円の一部で，水平な床と点Bで接して固定され∠AOB = ∠BOC = 60°であり，点Aで円の接線方向の上方に伸びた斜面とつながっている。ばね定数kの質量が無視できるばねがあり，その上端は斜面に固定されていて，下端は自然長のとき点Aの位置にあった。最初、そのばねの下端に質量mの小球を押しつけ，斜面に沿って自然長からx_0押し込んで静止させた。次に静かに小球から手を離したところ，小球はばねに押されて斜面を下がり，点Aでばねから離れ，弧ABCに沿って動いた後，点Cより飛び出した。点Aでばねから離れた直後の小球の速さはv_1であった。点Cから水平方向にx_1離れた場所に水平な台があり，台の端の点Dには質量Mの物体Pが静止している。小球は点Cから飛び出した後，物体Pと衝突して，台の左側の床に落ちた。衝突したときには，小球の速度の鉛直成分は0であった。物体Pは小球との衝突により動き出し，台上を滑って水平距離x_3の位置で停止した。小球と物体Pとの間の反発係数(はねかえり係数)はe($0 < e < 1$)，物体Pと台との間の動摩擦係数はμ，重力加速度の大きさはgとする。小球と物体Pの大きさは十分小さく，小球と斜面および弧ABCとの間の摩擦や空気抵抗は，無視できるものとする。また，物体Pと台との間の静止摩擦は考えなくてよいものとする。

以下の問1～問5では，v_1，m，M，e，μ，g，rのうち必要な記号を用いて答えなさい。

問 1　小球が点Bを通過する瞬間の速さv_Bを求めなさい。

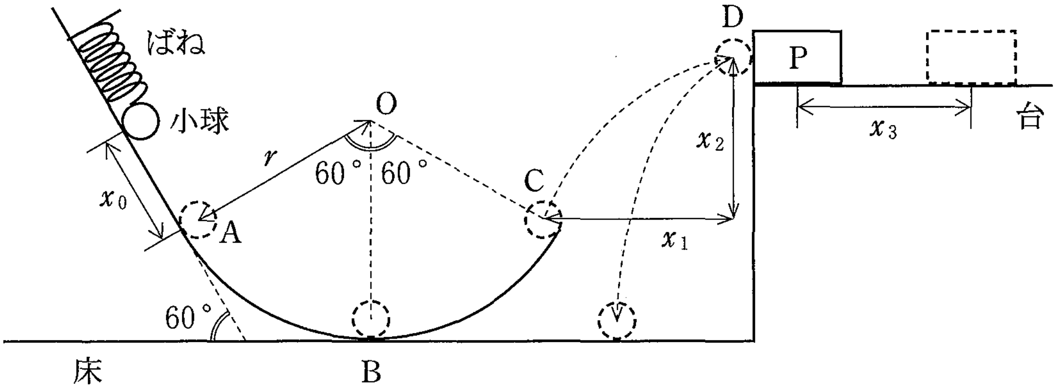
問 2　小球が点Cを飛び出した瞬間の速度$\vec{v_C}$の水平成分と鉛直成分の大きさを求めなさい。

問 3　点Cと点Dの間の水平距離x_1と高さの差x_2を求めなさい。

問 4　小球と衝突した直後の物体Pの速さVを求めなさい。

問 5　物体Pが小球と衝突した後，停止するまでの距離x_3を求めなさい。

問 6　v_1が$\sqrt{r\left(g+\dfrac{kr}{3m}\right)}$に等しいとき，最初に小球を押し込んだ距離$x_0$を，$k$，$m$，$g$，$r$のうち必要な記号を用いて答えなさい。



図

2 図のように，床の上に鉛直に取り付けられたばねの上に小球Aを付けて静止させた。その後に，天井から小球Bを糸で吊り下げ，徐々に糸の長さを伸ばして小球Aと丁度接触する長さにして静止させた。このとき，糸の長さはLになった。小球Aと小球Bの質量はともにmで，重力加速度の大きさはgである。ばねの自然の長さはL_0で，ばね定数はkである。以下の問いに答えなさい。ただし，ばねは鉛直方向にのみ運動し，糸の伸縮はないものとし，ばねの質量，糸の質量，空気抵抗，および小球の大きさは無視できるものとする。以下の問いに，m，g，L_0，kおよび問2で与えるdのうち，必要な記号を用いて答えなさい。

問 1　小球Aが静止しているときのばねの長さL_1を求めなさい。

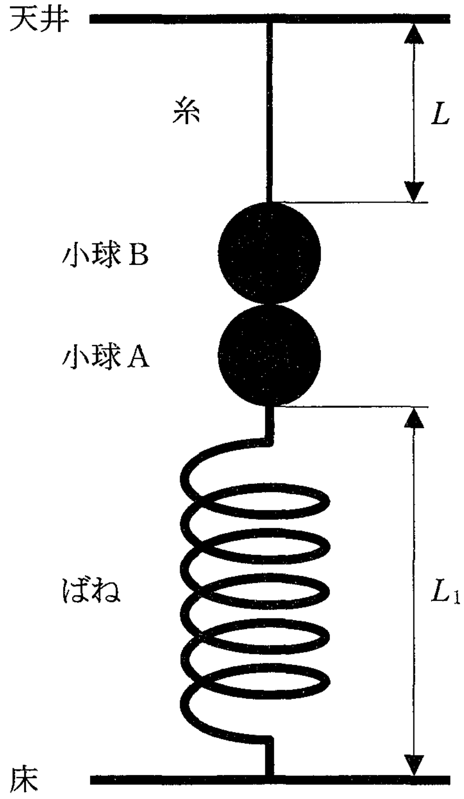
問 2　小球Aを，図の位置からd(ただし，$d < L$，$d < L_1$)だけ押し下げ静止させ，静かに手を離したところ，小球Aは上昇して小球Bと衝突した。衝突直前の小球Aの速さv_0を求めなさい。

問 3　小球Aと小球Bは完全非弾性衝突して，一体となって上昇した。小球Aと小球Bが一体となった直後の速さv_1を求めなさい。

問 4　小球Aと小球Bは一体となったまま，最も高い位置に達した。このときのばねの長さL_2を求めなさい。

問 5　最も高い位置に達した後，小球Aと小球Bは一体となったまま下降し，最初に衝突した位置で小球Aと小球Bは離れた。小球Aと小球Bが衝突してから離れるまでの時間Tを求めなさい。ただし，この問いにおいてのみ，$d = \sqrt{6}\,\dfrac{mg}{k}$が成り立つとして，$d$を用いずに答えなさい。

問 6　小球Bと離れた小球Aはさらに下降して，最も低い位置にきた。そのときのばねの長さL_3を求めなさい。



図

3 図1は，電圧Vの直流電源，抵抗値Rの抵抗，面積Sの極板A，Bからなる平行板コンデンサー，スイッチSwから構成される回路を示している。図1における平行板コンデンサーにおいて，極板間は真空で，極板間の距離をdとし，極板の端における電場(あるいは電界)の乱れは無視できるものとする。真空の誘電率をε_0とする。また，電位は，図1に示す点Gを基準に測るものとする。

はじめ，極板A，Bには電荷はないとする。次に，スイッチSwを閉じた。以下の問いに答えなさい。

問 1　スイッチSwを閉じた瞬間に抵抗を流れる電流Iを求めなさい。

問 2　スイッチSwを閉じてから十分に時間が経過した後，スイッチSwを開いた。平行板コンデンサーの極板間の電場の強さE_1と，コンデンサーの電気容量C_1を求めなさい。

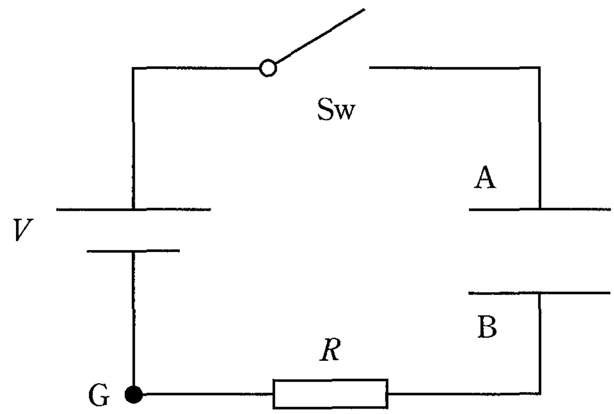


図1

その後，スイッチSwを開いたまま，図2に示すように，平行板コンデンサーの極板Bに完全に接するように，極板と同形で厚さ$\frac{d}{3}$の誘電体を挿入した。誘電体の比誘電率は2とする。以下の問いに答えなさい。

問 3　コンデンサー内部の真空中に生じる電場の強さE_2と，誘電体内部の電場の強さE_3を求めなさい。

問 4　極板Aに向かって極板Bからの距離 $\frac{d}{3}$ の位置のコンデンサー内部の電位 V_1 と，距離 d の位置の電位 V_2 を求めなさい。また，これらを用いて，横軸を極板Bからの距離，縦軸を電位とするグラフを描きなさい。グラフの縦軸には，電圧 V を用いて適切に目盛りを記入しなさい。特に，距離 $\frac{d}{3}$，距離 d の位置での電位を明確に記入しなさい。

問 5　図2に示すコンデンサーの電気容量 C_2 を求めなさい。

さらにその後，スイッチSwを開いたまま，図3に示すように，極板Aを極板B側に $\frac{d}{3}$ 移動させた。以下の問いに答えなさい。

問 6　この極板Aの移動によるコンデンサーの静電エネルギーの変化量 ΔU が，正か負か答えなさい。また，そのときの変化量の絶対値 $|\Delta U|$ を求めなさい。

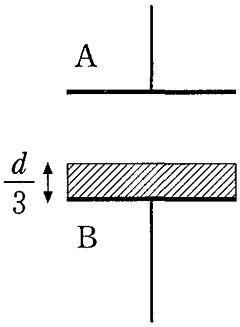


図2

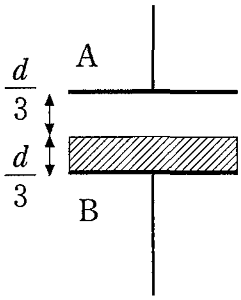


図3

4 次の文章を読み，以下の問い（問１および問２）に答えなさい。

図１のように＋z方向を向いた磁束密度の大きさがB_z〔T〕の一様な磁場の存在する空間がある。この中を電荷$-e$〔C〕，質量m〔kg〕の電子が磁場に垂直な平面内で等速円運動をしており，ある時刻で電子の速度$\vec{v}$は$(v_1,\ 0,\ 0)$〔m/s〕であった。但し，$B_z>0$，$e>0$，$v_1>0$である。この電子の等速円運動の半径は $\boxed{\text{ア}}$ 〔m〕，周期は $\boxed{\text{イ}}$ 〔s〕である。電子の円運動は＋z方向から見て［ウ：時計回り・反時計回り］となる。

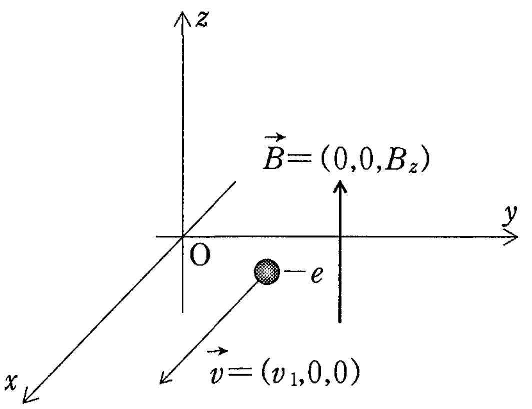


図１

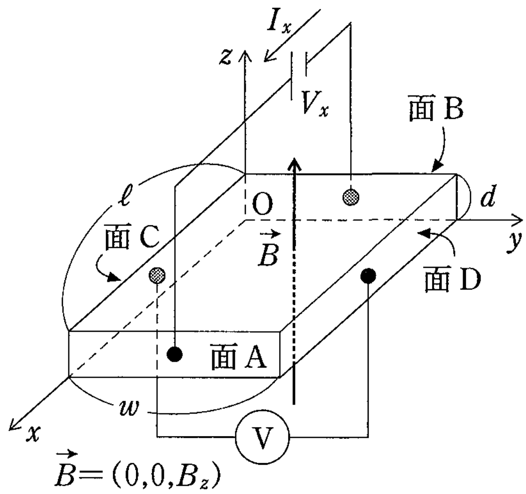


図２

次に図２のような幅w〔m〕，長さℓ〔m〕，厚さd〔m〕の直方体の導体をこの磁場の中に置いたときの，その導体内の自由電子の運動について考える。導体の長さℓは，幅wおよび厚さdに比べて十分長いとする。<u>この面Ａと面Ｂの間に図のような正の電圧V_x〔V〕をかけ，y方向の面Ｃと面Ｄの対向する点の電圧差Vを図のように電圧計で測定したところ，V_y〔V〕となった。</u>導体内を$-x$方向に流れる電流をI_x〔A〕とすると，I_xとV_yの関係は図３のように磁束密度の大きさに依存して変化した。

導体内を流れる電子の単位体積あたりの個数n〔個/m^3〕は一定として，各電子がx方向に一定の速さv_x〔m/s〕で移動すると仮定し，I_xをn，v_xを含んだ式で表

すと $I_x =$ $\boxed{\quad エ \quad}$ 〔A〕となる。V の大きさが一定値 V_y であるとき，v_x を用いて V_y を表すと $V_y =$ $\boxed{\quad オ \quad}$ 〔V〕となる。ここで，v_x を用いることなく I_x を用いて V_y を表すと $V_y =$ $\boxed{\quad カ \quad}$ 〔V〕となる。いま，$e = 1.6 \times 10^{-19}$〔C〕，$d = 1.0 \times 10^{-6}$〔m〕，$m = 9.1 \times 10^{-31}$〔kg〕として，図3のグラフを用いて n を有効数字2桁で求めると，$n =$ $\boxed{\quad キ \quad}$ 〔個/m^3〕となる。

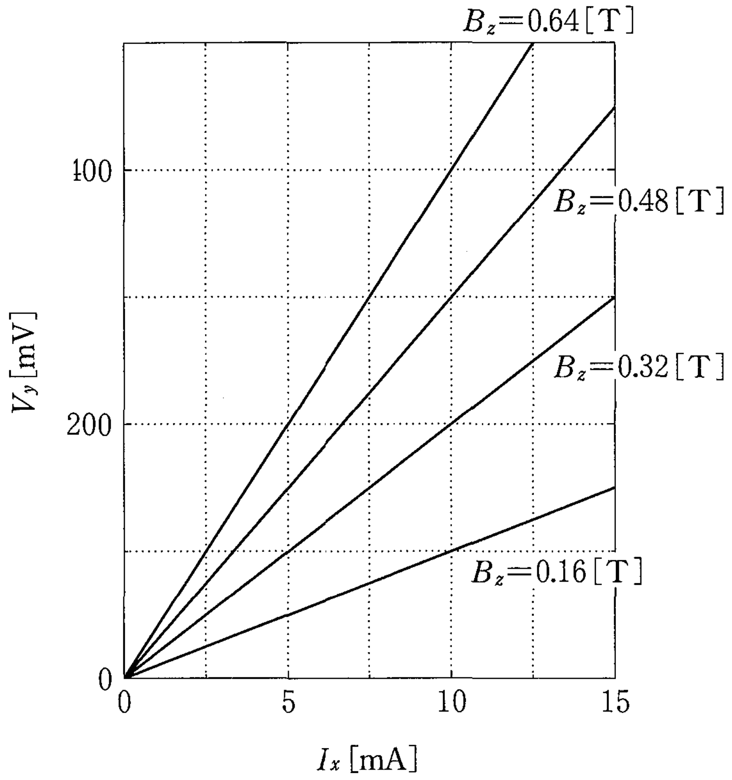


図3

現実の導体中には電子の運動を妨害する粒子が多く存在する。この様子を次のモデルで考える。$B_z = 0$〔T〕のとき電子は $\Delta\tau$〔s〕の時間間隔でこの妨害粒子に衝突し，運動量を完全に失って $v_x = 0$ となり，次いで電場により加速され，$\Delta\tau$〔s〕後に再び妨害粒子と衝突して $v_x = 0$ となる。この過程が導体中で繰り返されるとする。このとき，$v_x = 0$ となる時刻 $t = 0$ から微小時間 Δt〔s〕後(ただし，$0 \leqq \Delta t \leqq \Delta\tau$)の速さ v_x は $\boxed{\text{ク}}$ 〔m/s〕となる。x 方向の平均速度 v_{m} は，衝突と衝突の間に x 方向に動く距離を $\Delta\tau$ で割って求められ，$\boxed{\text{ケ}}$ 〔m/s〕となる。そして導体の抵抗率 ρ は $\boxed{\text{コ}}$ 〔Ωm〕となる。一般に温度が上昇すると衝突時間 $\Delta\tau$ は減少する。磁場が存在する場合にも上記のモデルが成り立つとすると，V_x を一定にして V_y を測定したとき，導体の温度上昇によって V_y の値は[サ：大きく・小さく]なることが予測される。ここで V_y の値が温度上昇前と変わらないようにするには，B_z の大きさを[シ：大きく・小さく]しなければならない。

問 1　$\boxed{\text{ア}}$，$\boxed{\text{イ}}$，$\boxed{\text{エ}}$ ～ $\boxed{\text{カ}}$ および $\boxed{\text{ク}}$ ～ $\boxed{\text{コ}}$ にあてはまる適切な文字式を，$\boxed{\text{キ}}$ にあてはまる適切な数値を答えなさい。また，[ウ：時計回り・反時計回り]，[サ：大きく・小さく]および[シ：大きく・小さく]では，2つの語のうち適切なものを選びなさい。

問 2　下線部の現象に関して，どのようにして V_y の値が決まるかを，電子にはたらく力のつり合いや面Cと面Dの電位の関係を含めて80～120字で述べなさい。

5 図1のように断面積 S の円筒状の容器を鉛直に立てて水平面上に置く。容器中には質量 m のピストンがあり，なめらかに動くことができるものとする。容器内には物質量 n モルの理想気体が封入されている。外圧は一定で p_0，重力加速度を g とする。容器内の気体と外部との熱のやりとりはないものとする。

問 1　ピストンは容器の底面からピストン下面までの高さが h の位置でつり合い，静止している。以下の問いに答えなさい。

(1)　容器内の圧力 p_1 を p_0，m，g，S を用いて表しなさい。

(2)　容器内の気体の温度 T_1 を p_1，S，h，n と気体定数 R を用いて表しなさい。

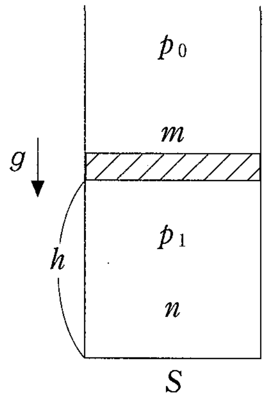


図1

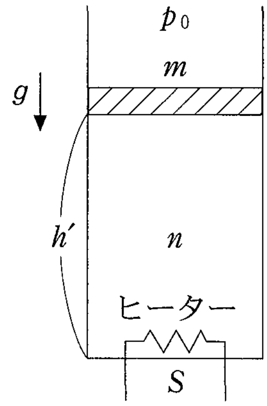


図2

問 2　図 2 のように前問の容器内にヒーターを入れて加熱したところ，ピストン下面までの高さが h' になった。気体の定積モル比熱を C_V とするとき，以下の問いに答えなさい。ヒーターの体積は無視できるものとする。

(1)　加熱後の容器内の温度 T_1' を p_1，S，h'，n，R を用いて表しなさい。

(2)　加熱前と加熱後の間の内部エネルギーの増分 ΔU を C_V，n，T_1'，T_1 を用いて表しなさい。

(3)　加熱前と加熱後の間に容器内の気体が外部にした仕事 W を p_1，S，h，h' を用いて表しなさい。

(4)　気体がした仕事 W と加えた熱量 Q の比の値 $\dfrac{W}{Q}$ を C_V，R を用いて表しなさい。

6 図1のように断面積 S の円筒状の容器を鉛直に立てて水平面上に置く。容器中には質量 m のピストンがあり，なめらかに動くことができるものとする。容器内には物質量 n モルの理想気体が封入されている。外圧は一定で p_0，重力加速度を g とする。容器内の気体と外部との熱のやりとりはないものとする。

問 1　ピストンは容器の底面からピストン下面までの高さが h の位置でつり合い，静止している。以下の問いに答えなさい。

(1)　容器内の圧力 p_1 を p_0，m，g，S を用いて表しなさい。

(2)　容器内の気体の温度 T_1 を p_1，S，h，n と気体定数 R を用いて表しなさい。

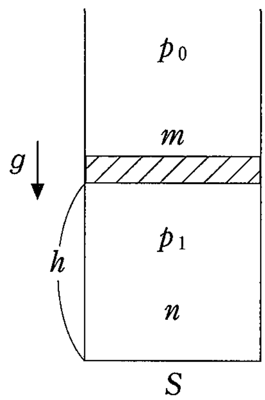


図1

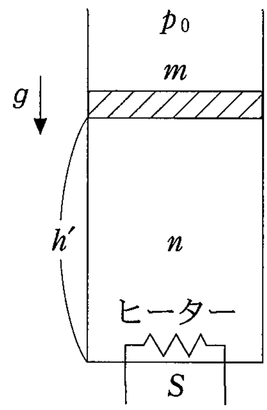


図2

問 2　図 2 のように前問の容器内にヒーターを入れて加熱したところ，ピストン下面までの高さが h' になった。気体の定積モル比熱を C_V とするとき，以下の問いに答えなさい。ヒーターの体積は無視できるものとする。

(1)　加熱後の容器内の温度 T_1' を p_1，S，h'，n，R を用いて表しなさい。

(2)　加熱前と加熱後の間の内部エネルギーの増分 ΔU を C_V，n，T_1'，T_1 を用いて表しなさい。

(3)　加熱前と加熱後の間に容器内の気体が外部にした仕事 W を p_1，S，h，h' を用いて表しなさい。

(4)　気体がした仕事 W と加えた熱量 Q の比の値 $\dfrac{W}{Q}$ を C_V，R を用いて表しなさい。

問 3　図3のように，断面積Sが一定で高さℓの容器内に圧力p_0，温度T_1のnモルの理想気体を封入し，バルブを閉じた状態で図1の容器に連結した。ふたつの容器内の気体は同一種類であるとする。また，連結部の体積は無視できるものとする。バルブを静かに開いたところ，ピストンはゆっくりと降下し，容器の底面からピストン下面までの高さがh_2となったところで静止した。このとき，ピストンは容器の底面には接触していないものとする。以下の問いに答えなさい。

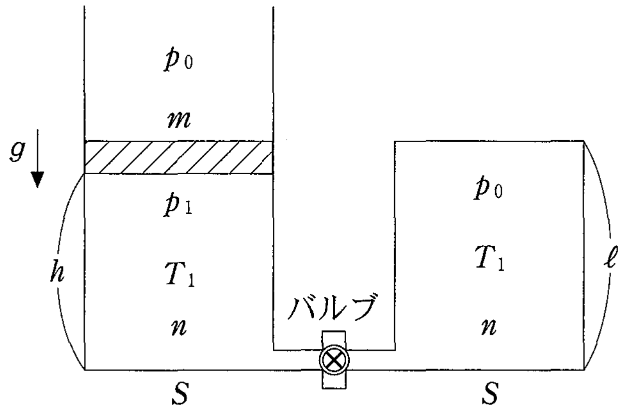


図3

(1)　ピストンが静止したときの容器内の温度T_2をp_1，S，h_2，ℓ，n，Rを用いて表しなさい。

(2)　h_2をh，ℓ，C_V，Rを用いて表しなさい。

問 4　前問でピストンが静止した後，バルブを閉じた。このときの左容器内の圧力を p_2，左容器内の物質量を n_2 モルとする。この状態でピストンに微小な変位 Δh を与え静かにはなしたところ，単振動した。ピストンを押し下げる場合，$\Delta h < 0$ である。以下の問いに答えなさい。

(1)　ピストンをつり合いの位置から微小量 Δh だけ変位させる間に左容器内の気体がした仕事を ΔW，この間の左容器内の気体の温度変化を ΔT_2 とする。ΔT_2 を n_2，C_V，ΔW を用いて表しなさい。

(2)　左容器内の圧力の変化 Δp を R，C_V，p_1，h_2，Δh を用いて表しなさい。$(p_2 + \Delta p)(h_2 + \Delta h) \fallingdotseq p_2 h_2 + h_2 \Delta p + p_2 \Delta h$ と近似できることを使ってよい。

(3)　単振動の周期 T を m，R，C_V，p_1，S，h_2 を用いて表しなさい。

7 大気中に，図1のようにx軸上に振動数f_0の音源Sと観測者Oが存在し，音源Sはx軸正方向に速さvで移動している。観測者Oは$x = x_0 (x_0 > 0)$の位置で静止している。大気中の音速はVで，音源Sの速さvは音速Vより小さいとする。以下の問いで音源Sは，時刻$t = 0$に$x = 0$の位置にあるとし，時間が経過しても観測者Oの位置にまだ到達していないものとする。

はじめは無風状態で，大気は静止している。

問1 以下の問いに答えなさい。解答は，f_0，v，Vおよびx_0のうち必要な記号を用いなさい。

(1) 時刻$t = 0$に音源Sが発した音が観測者Oに伝わる時刻t_1を求めなさい。

(2) 時刻$t = t_1$における，音源Sと観測者Oの間に存在する音波の波の数

(3) 時刻$t = t_1$において音源Sが発した音が，観測者Oに伝わる時刻t_2を

(4) 観測者Oが聞く音の振動数f_1を求めなさい。

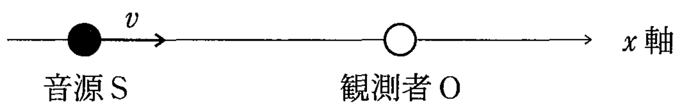


図1

次に，速度Uの風が一様に吹いている場合を考える。ただし，Uは音速Vより小さいとする。音波は大気中を速度Vで伝わる波である。そのために，媒質である大気が移動する場合，音波の伝わる速度は「媒質（大気）中を伝わる速度」と「媒質（大気）の移動する速度」の合成になる。以下の問いに答えなさい。解答は，f_0，v，V，x_0およびUのうち必要な記号を用いなさい。

問 2　図 2 のように，x 軸の正方向に速さ U の風が一様に吹いている場合を考える。

(1)　音源 S から観測者 O に音が伝わる速さを求めなさい。

(2)　時刻 $t = 0$ に音源 S が発した音が観測者 O に伝わる時刻 t_3 を求めなさい。

(3)　時刻 $t = t_3$ において音源 S が発した音が，観測者 O に伝わる時刻 t_4 を求めなさい。

(4)　観測者 O が聞く音の振動数 f_2 を求めなさい。

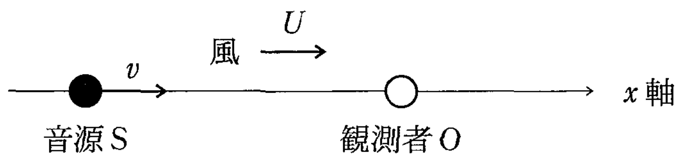


図 2

8 大気中に，図1のようにx軸上に振動数f_0の音源Sと観測者Oが存在し，音源Sはx軸正方向に速さvで移動している。観測者Oは$x = x_0(x_0 > 0)$の位置で静止している。大気中の音速はVで，音源Sの速さvは音速Vより小さいとする。以下の問いで音源Sは，時刻$t = 0$に$x = 0$の位置にあるとし，時間が経過しても観測者Oの位置にまだ到達していないものとする。

はじめは無風状態で，大気は静止している。

問1 以下の問いに答えなさい。解答は，f_0，v，Vおよびx_0のうち必要な記号を用いなさい。

(1) 時刻$t = 0$に音源Sが発した音が観測者Oに伝わる時刻t_1を求めなさい。

(2) 時刻$t = t_1$における，音源Sと観測者Oの間に存在する音波の波の数n(1波長分を1個とする)を求めなさい。

(3) 時刻$t = t_1$において音源Sが発した音が，観測者Oに伝わる時刻t_2を求めなさい。

(4) 観測者Oが聞く音の振動数f_1を求めなさい。

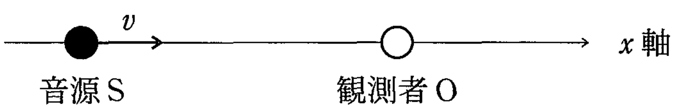


図1

次に，速度Uの風が一様に吹いている場合を考える。ただし，Uは音速Vより小さいとする。音波は大気中を速度Vで伝わる波である。そのために，媒質である大気が移動する場合，音波の伝わる速度は「媒質(大気)中を伝わる速度」と「媒質(大気)の移動する速度」の合成になる。以下の問いに答えなさい。解答は，特に指定がない問いでは，f_0，v，V，x_0およびUのうち必要な記号を用いなさい。

問 2　図 2 のように，x 軸の正方向に速さ U の風が一様に吹いている場合を考える。

(1)　音源 S から観測者 O に音が伝わる速さを求めなさい。

(2)　時刻 $t = 0$ に音源 S が発した音が観測者 O に伝わる時刻 t_3 を求めなさい。

(3)　時刻 $t = t_3$ において音源 S が発した音が，観測者 O に伝わる時刻 t_4 を求めなさい。

(4)　観測者 O が聞く音の振動数 f_2 を求めなさい。

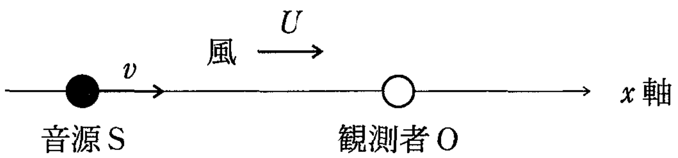


図 2

問 3　図 3 のように，x 軸と垂直方向に速さ U の風が一様に吹いている場合を考える。

(1)　時刻 $t = 0$ に音源が発した音波の波面が，時刻 t_f に x 軸を横切る場所の x 座標 x_f を求めなさい。ただし $x_f > 0$ とし，解答には，t_f も用いてよい。

(2)　音源 S から観測者 O に音が伝わる速さを求めなさい。

(3)　観測者 O が聞く音の振動数 f_3 を求めなさい。

(4)　風の速さ U と音源 S の速さ v が，それぞれ，音速 V の 25 %，10 % の速さであったとする。このときに観測される音の振動数は，f_0 から $\Delta f_3 = f_3 - f_0$ だけずれた。Δf_3 の値は，f_0 の何%になるか，有効数字 2 桁で答えなさい。必要ならば，x の絶対値が 1 より十分に小さい場合に成り立つ，$\sqrt{1+x} \fallingdotseq 1 + \frac{1}{2}x$ の近似を用いても良い。

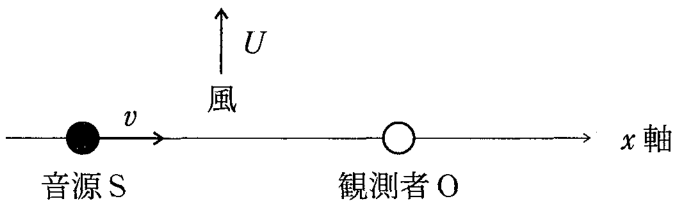


図 3