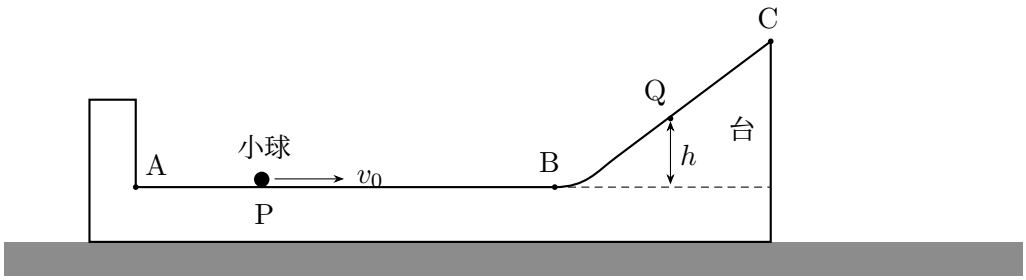
岐阜大学

2021 年度　前期日程　物理

1 次の文を読み，以下の問いに答えよ。（配点比率　医：$\frac{1}{3}$，教・工・応生：$\frac{1}{4}$）

図のように，質量 M〔kg〕の斜面と壁を有している台が水平な床の上に置かれている。台が床に対して静止した状態で，質量 m〔kg〕の小球を台の上面における点 P に置いた後，小球に右向きの初速度 v_0〔m/s〕を与えた。小球の大きさは無視できるものとする。重力加速度の大きさを g〔m/s^2〕とする。水平方向の速度の向きは，図において右向きを正とする。台の上面における水平面 AB と斜面 BC はなめらかにつながっているとする。また，台の下面と床の間，および台の上面と小球の間には摩擦がはたらかないとする。



問 1　小球は台の上面に沿ってすべり，斜面上をのぼって点 Q で折り返した。小球が点 Q に到達した瞬間における台の速度 w_1〔m/s〕を，M，m，v_0 を用いて表せ。

問 2　問 1 において，台の上面 AB から点 Q までの高さ h〔m〕を，g，M，m，v_0 を用いて表せ。

問 3　その後，小球は斜面をおりて，点 A において垂直な壁と衝突した。小球が壁と衝突する直前の小球の速度 v_2〔m/s〕と台の速度 w_2〔m/s〕を，M，m，v_0 を用いて表せ。

問 4　小球と壁のはねかえり係数を e（ただし $0 < e < 1$）とする。問 3 において小球が壁と衝突した直後の小球の速度 v_3〔m/s〕と台の速度 w_3〔m/s〕を，e，M，m，v_2，w_2 を用いて表せ。

問 5　問 4 における小球の速度 v_3 と台の速度 w_3 を，e，M，m，v_0 を用いて表せ。

2 次の文を読み，以下の問いに答えよ。(配点比率　医：$\frac{1}{3}$，教・工・応生：$\frac{1}{4}$)

理想気体の圧力について分子運動の考え方を用いて考察しよう。気体は壁面で囲まれた図 1 のような一辺 L〔m〕の立方体の空間をもつ容器に入っている。x 軸と y 軸は水平面内に，z 軸は鉛直方向上向きにとる。気体は質量 m〔kg〕の分子 N 個からなる。分子と壁との衝突は弾性衝突とし，衝突の前後で分子の速度の壁面に平行な成分は変化しないものとする。分子どうしの衝突は考えない。また，気体の絶対温度 T〔K〕は場所によらず一定であるものとする。

最初に，重力を無視した場合について考察する。分子の運動は x，y，z の各方向で同等で独立なので，x 方向の運動を考えよう。正の速度成分 v_x〔m/s〕をもつ 1 つの分子が x 軸に垂直な壁に衝突してはね返ると，壁は分子から [　①　]〔N·s〕の力積を受ける。分子が向かい合う壁との間を往復する周期は [　②　]〔s〕であるから，1 個の分子が単位時間に壁に与える力積，すなわち平均の力は，[　③　]〔N〕である。N 個の分子にわたって [　③　] の総和をとり，${v_x}^2$ の総和を $N\overline{{v_x}^2}$ と書けば，壁が気体から受ける圧力 P〔Pa〕は，L，m，N，$\overline{{v_x}^2}$ を用いて，P =[　④　] と表すことができる。気体分子は特定の方向に偏らずに不規則な運動をしているので，$\overline{{v_x}^2} = \frac{1}{3}\overline{v^2}$ としてよい。ここで，$\overline{v^2}$ は速度の二乗平均 $\left(\overline{{v_x}^2 + {v_y}^2 + {v_z}^2}\right)$ である。また，気体の密度を ρ〔kg/m^3〕とすると，ρ と $\overline{v^2}$ を用いて，P =[　⑤　] と表すことができる。

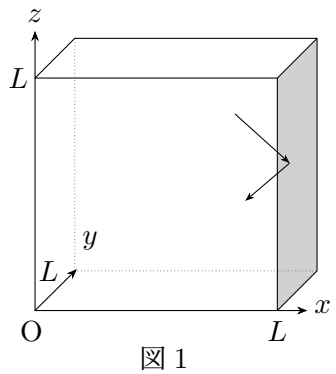


図 1

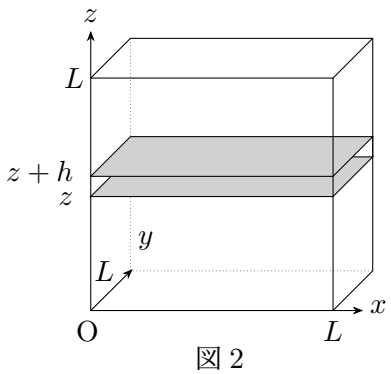


図 2

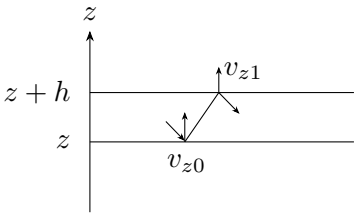


図 3

次に，重力加速度の大きさが g〔m/s^2〕の一様な重力がはたらく場合について，z 方向の運動を考察する。この場合，重力がない場合のように一定の速度をもつ分子を追うことができない。そこで，図 2 のように z〔m〕と $z + h$〔m〕の位置に 2 枚の水平な壁を入れ，壁で仕切られた微小な高さ h〔m〕と底面積 L^2 をもつ直方体の空間内の気体について考える。

図 3 のように，1 つの分子が下の壁に衝突し，速度の z 成分 $v_{z0}\,(>0)$〔m/s〕ではね返った後，t_1〔s〕後に速度成分 $v_{z1}\,(>0)$〔m/s〕で上の壁に衝突したとする。この分子はその後，上下の壁の間で

往復を繰り返す。h が十分に微小であれば，上の壁まで到達できない分子の存在は無視できる。この分子の速度成分の大きさの平均値 v_z〔m/s〕は，$v_z = \dfrac{1}{2}(v_{z0} + v_{z1})$ である。v_z を用いれば $t_1 =$[　⑥　] と表される。また，v_{z0}，v_{z1} は，v_z，g，h を用いて，$v_{z0} =$[　⑦　]，$v_{z1} =$[　⑧　] と表される。そうすると，この分子から壁が受ける平均の力の大きさは，m，v_z，g，h を用いて，下の壁において $f_0 =$[　⑨　]〔N〕，上の壁において $f_1 =$[　⑩　]〔N〕と表される。この空間における気体の密度を ρ〔kg/m^3〕と書けば，この空間に含まれる分子数は [　⑪　] 個である。これらの分子についての ${v_z}^2$ の平均を $\overline{{v_z}^2}$ とする。気体分子の速度分布はどの場所でも特定の方向に偏らないとすれば，速度の二乗平均 $\overline{v^2}$ を使って，$\overline{{v_z}^2} = \dfrac{1}{3}\overline{v^2}$ としてもよい。以上から，下の壁における圧力 P_0〔Pa〕と上の壁における圧力 P_1〔Pa〕を，m，ρ，g，h，$\overline{v^2}$ を用いて表すことができる。結果として，この空間における平均の圧力 $\overline{P} = \dfrac{1}{2}(P_0 + P_1)$ は，$\overline{P} =$[　⑫　] と表される。また，P_0 と P_1 の差から，重力を考慮した場合の気体の圧力は鉛直方向の位置に依存することがわかる。

問 1　空欄 [　①　] から [　⑤　] に適する式を答えよ。

問 2　空欄 [　⑥　] から [　⑫　] に適する式を答えよ。

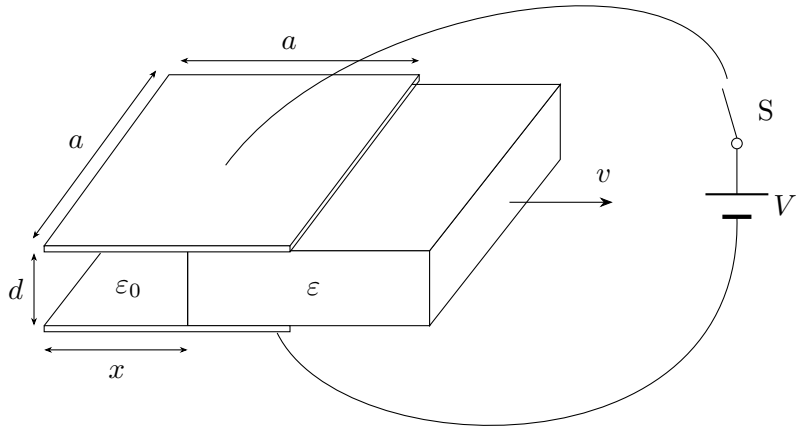
問 3　重力がある場合について，鉛直方向の位置に対する圧力の変化率 $\dfrac{P_1 - P_0}{h}$ を答えよ。

重力がある場合でも，理想気体の状態方程式が容器内の各場所で成り立つと考えてよいので，鉛直方向の位置 z での圧力 $P(z)$〔Pa〕は，$P(z) = n(z)kT$ と表すことができる。ここで，$n(z)$〔個 /m^3〕は位置 z での分子数密度（単位体積あたりの分子数），k〔J/K〕はボルツマン定数である。

問 4　重力がある場合について，鉛直方向の位置の微小変化 Δz〔m〕に対する気体の分子数密度 $n(z)$ の変化を $\Delta n = n(z + \Delta z) - n(z)$ としたとき，その変化率 $\dfrac{\Delta n}{\Delta z}$ を，m，g，k，$n(z)$，T を用いた式で答えよ。

3 次の文を読み，以下の問いに答えよ。（配点比率　医：$\dfrac{1}{3}$，教・工・応生：$\dfrac{1}{4}$）

図に示すように，一辺 a〔m〕の正方形の金属板を極板とする平行板コンデンサーが起電力 V〔V〕の充電可能な電池に，スイッチ S を介して接続されている。極板間の距離は d〔m〕である。このコンデンサーに，厚さ d，上下面が極板と同形である，誘電率 ε〔F/m〕の誘電体の板が，極板の辺に沿うように挿入されている。コンデンサーを充電した後，誘電体をコンデンサーから引き出すとき，どのような力がはたらくかを調べたい。



以下では，誘電体の位置を，極板の左端から誘電体の左端までの距離 x〔m〕で表すことにする。以下の問いに解答するとき，極板の端の効果，電池の内部抵抗，導線の抵抗，摩擦力は無視できるものとする。なお，コンデンサーは大気中におかれており，空気の誘電率は，真空の誘電率 ε_0〔F/m〕に等しいとしてよい。

問 1　誘電体が $x = 0$ の位置にあるとき，スイッチ S を閉じ，回路が安定するまで十分に充電してから，スイッチ S を開いた。このとき，極板に帯電している電荷 Q_0〔C〕はいくらか。

問 2　問 1 の操作の後，スイッチ S を開いたまま，誘電体を極板から距離 x 引き出した。このときの，コンデンサーの電気容量 C〔F〕と，蓄えられた静電エネルギー U〔J〕を求めよ。なお，答えは a，d，ε，ε_0，x，V の中から適するものを用いて表すこと。

問 3　一般に，物体には位置エネルギーが小さくなる向きに力がはたらく。この考えを用いて，位置 x において誘電体にはたらく力の向きはどうなるか，答えよ。どのように推論を進めたか簡潔に述べよ。

上記と同様のことを，スイッチ S を閉じたままで行うと，誘電体にはたらく力はどうなるであろうか。位置 $x = 0$ で十分に充電した後に，誘電体を一定の速さ v〔m/s〕で極板に沿って移動させた。

問 4　誘電体がある位置 x_1〔m〕から，微小時間 Δt〔s〕の間に移動したとき，コンデンサーの電気容量の変化 ΔC〔F〕はいくらか。なお，答えは a，d，ε，ε_0，v，V，Δt の中から適するものを用いて表すこと。

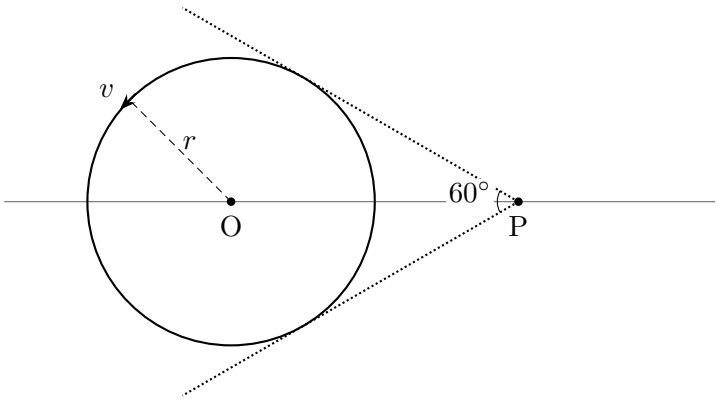
問 5　このとき，スイッチ S を流れる電流の大きさ I〔A〕と，その向きを答えよ。なお，電流 I は a，d，ε，ε_0，v，V，Δt の中から適するものを用いて表すこと。

問 6　位置 x_1 における，外部から誘電体に加えている力の大きさを F〔N〕とする。時間 Δt の間のコンデンサーの静電エネルギーの変化量 ΔU_{C}〔J〕と，その間の電池の内部エネルギーの変化量 ΔU_{B}〔J〕と，力 F が誘電体にする仕事 ΔW〔J〕とを，I，v，V，F，Δt の中から適するものを用いて表せ。また，エネルギー保存則を用いて，力の大きさ F を求め，a，d，ε，ε_0，v，V，Δt の中から適するものを用いて表せ。その向きも合わせて答えよ。

問 7　位置 x_1 における，誘電体にはたらく，極板からの力の大きさ f〔N〕と向きを答えよ。なお，力の大きさ f は a，d，ε，ε_0，v，V，Δt の中から適するものを用いて表すこと。

4 次の文を読み，以下の問いに答えよ。（配点比率　教・工・応生：$\frac{1}{4}$）

図のように，模型飛行機に音源装置を付け，振動数 f_0〔Hz〕の音を鳴らしながら，一定の高度で円運動させた。図はこの実験の様子を上空から描いた模式図であり，模型飛行機は中心を O とし，軌道半径が r〔m〕となるように反時計回りに等速円運動をしている。このときの模型飛行機の速さは v〔m/s〕とする。観測者は模型飛行機と同じ高度の点 P で模型飛行機から発せられる音を聞いている。観測者が模型飛行機の円軌道を見込む角度は 60° であった。音速は V〔m/s〕とし，風はないものとする。



問 1　観測者は音源装置の音が高くなったり低くなったりするのを聞いた。これはなぜか。音源の速度に言及して 30 文字程度で説明せよ。

観測者が聞いた音の，最大振動数は f_1〔Hz〕，最小振動数は f_2〔Hz〕であった。

問 2　上の図に，観測者が聞いた振動数 f_1，f_2，f_0 の音が発せられたときの，音源装置の位置すべてを●（黒い点）で示し，それぞれに振動数の記号 f_1，f_2，f_0 を付けよ。

問 3　模型飛行機の速さ v と，音源の振動数 f_0 を f_1，f_2，V を用いて表せ。

$f_1 = 5.4 \times 10^2$ Hz，$f_2 = 4.8 \times 10^2$ Hz，$V = 3.4 \times 10^2$ m/s であった。

問 4　このとき，模型飛行機の速さ v はいくらか。

問 5　最も高い音が聞こえてから最初に最も低い音が聞こえるまでの時間は 5.2 秒であった。模型飛行機の軌道半径 r はいくらか。有効数字 2 桁まで答えよ。

問 6　観測者が振動数 f_1 の音を聞く時刻を 0 とする。この後，2 回目の f_0 の音が聞こえる時刻はいくらか。小数点以下第 1 位まで求めよ。