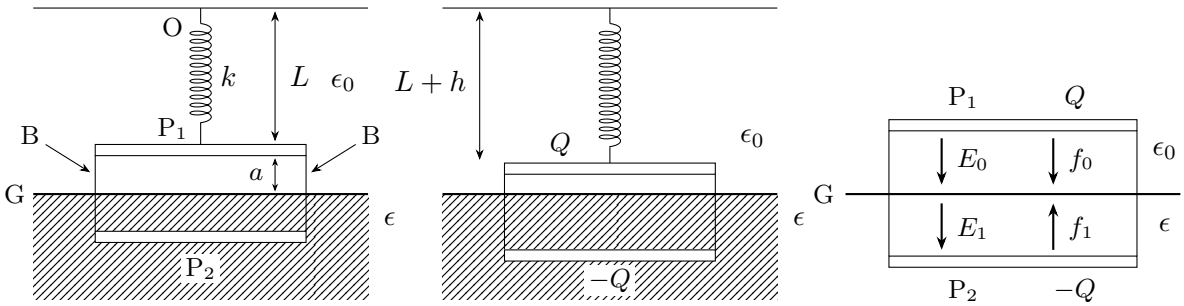
奈良県立医科大学

2025 年度　後期日程　物理

（2 科目　180 分）

1 以下の［　　］の中に適切な式または数を記入せよ．



(a) 極板に電荷がない場合　(b) 極板に電荷を与えた場合　(c) コンデンサー部分の拡大図

図 1

図 1 (a) のように，平行板コンデンサー（以下「コンデンサー」とする）が，その上側の極板 P_1 をバネ定数 k〔N/m〕のバネに連結されて，天井の固定点 O から鉛直下方に吊るされて静止している．2 枚の極板（P_1，P_2）は常に水平に保たれ，下の極板 P_2 は，誘電率 ϵ〔F/m〕の電気を通さない液体（以下「液体」とする）に浸されて，液面が 2 枚の極板から等距離になるようにしてある．空気の誘電率は ϵ_0〔F/m〕（$\epsilon_0 < \epsilon$）とする．

コンデンサーは面積 S〔m^2〕の 2 枚の正方形極板からなる．対面する極板の各々のかどは，細くて軽い絶縁体棒（図 1 (a) 中の B）で連結してあり，極板間の間隔は $2a$〔m〕（$2a \ll \sqrt{S}$）に保持されている．また，液体と空気の境界には厚さの無視できる曲がらないガラス（図 1 (a) 中の G）が張ってあり，境界面は固定されている．ガラスには上に述べた絶縁体棒を通すために，棒の断面と等しい大きさの穴が空けてある．絶縁体棒とガラスの穴との間に摩擦はなく，コンデンサーは鉛直方向に滑らかに動くことができる．極板 P_1 とバネの間は絶縁されており，バネの質量，コンデンサーの浮力は無視できる．

図 1 (a) は，上下の極板に電荷が無いときの状態を示しており，天井とコンデンサー上面との間隔は L〔m〕である．図 1 (b) は，上下の極板に Q〔C〕と $-Q$〔C〕（$Q > 0$）の電荷を与えた後の状態を示している．この時，コンデンサーは，水平を保ったまま鉛直下方にゆっくりと h〔m〕（$h < a$）

だけ変位して，天井とコンデンサー上面との間隔が $L+h$ となって静止した．液面は同じ高さで水平に保たれているものとする．

Ⅰ）電荷を与えた時，極板間の電場の向きは極板に垂直である（図 1 (c) 参照）．コンデンサーの上極板と下極板の表面付近での電場の大きさを，それぞれ E_0〔N/C〕，E_1〔N/C〕とすると，

$$E_0 = \boxed{\quad (1\cdot 1) \quad}$$

であり，

$$E_1 = \boxed{\quad (1\cdot 2) \quad}$$

である．

以下の問いに E_0，E_1 を用いずに答えよ．極板間の電位差は

$$\boxed{\quad (1\cdot 3) \quad}\ 〔\mathrm{V}〕$$

であり，コンデンサーの電気容量は

$$\boxed{\quad (1\cdot 4) \quad}\ 〔\mathrm{F}〕$$

である．（ガラスの厚さは無視でき，ガラスの存在は影響しないものとする．）

コンデンサーが蓄える静電エネルギーを h の関数として $U(h)$〔J〕と表すと，

$$U(h) = \boxed{\quad (1\cdot 5) \quad}$$

となる．

Ⅱ）図 1 (b) の場合のコンデンサーにはたらく力について考える．

極板表面上の電荷には，表面での電場の強さに比例する力がはたらく．図 1 (c) で示すように，上下の極板にはたらくこの力の大きさを f_0〔N〕，f_1〔N〕とし，それらは，

$$f_0 = \alpha Q E_0, \qquad f_1 = \alpha Q E_1 \tag{$*$}$$

と表されるものとする．ただし，比例定数を α（$\alpha > 0$）とおいた．

力の向きは鉛直下向きを正とする．上下の極板にはたらくこれらの力の合力の鉛直成分を f〔N〕とすると，$f = f_0 - f_1$ である．(1・1) と (1・2) を用いると，合力は鉛直下向きにはたらく力であることになる．

α を $U(h)$ から導出しよう．仮に，合力 f につり合う外力によって，コンデンサーが水平を保ったままゆっくりと動き，その上面と天井との間隔が $L+h$ から $L+h+\Delta h$ に変化したとする（間隔が増加したとき $\Delta h > 0$ とし，$|\Delta h| \ll a - h$ とする）．その間に外力のした仕事は $-f\Delta h$ である．これが静電エネルギーの変化分 $U(h+\Delta h) - U(h)$ に等しいとすると，f は，

$$f = \boxed{\quad (1\cdot 6) \quad}$$

となる（α を用いずに答えよ）．この結果より，式 $(*)$ の比例定数 α は，

$$\alpha = \boxed{\quad (1\cdot 7) \quad}$$

であることがわかる．

また，(1・6) を用いると，図 1 (b) の状態での変位 h は，

$$h = \boxed{\quad (1\cdot 8) \quad}$$

と表せることがわかる．

2 以下の□の中に適切な式，数または記号を記入せよ．

n〔mol〕の単原子分子理想気体の圧力 p〔Pa〕と体積 V〔m^3〕を図 2 のようにゆっくりと変化させる熱力学サイクルを考える．過程 A→B では気体を等圧膨張させ，過程 B→C では断熱膨張させる．さらに，過程 C→D では等積減圧，過程 D→A では断熱圧縮させる．状態 A での気体の体積を V_A〔m^3〕，状態 B での体積を V_B〔m^3〕，状態 C と状態 D での体積を V_1〔m^3〕とする．状態 A，B での気体の圧力を p_1〔Pa〕，状態 C，D での気体の圧力をそれぞれ，p_C〔Pa〕，p_D〔Pa〕とする．

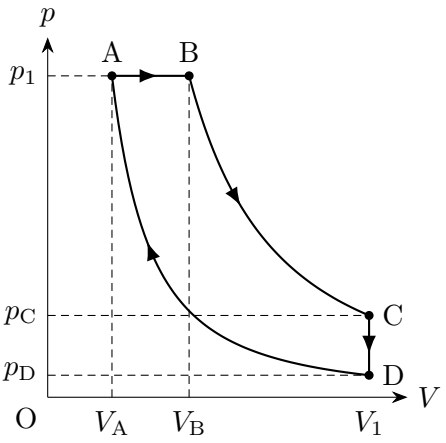


図 2

Ⅰ）過程 A→B での等圧膨張においては内部エネルギーは

$$\boxed{\quad (2\cdot 1) \quad}\ 〔\mathrm{J}〕$$

だけ変化する．気体が外部になす仕事は

$$\boxed{\quad (2\cdot 2) \quad}\ 〔\mathrm{J}〕$$

となる（外部になす仕事を正，外部からなされる仕事を負として答えよ）．A→B で吸収する熱は

(2・3) 〔J〕

である（吸収する熱を正，放出する熱を負として答えよ）．

Ⅱ）過程 B→C での断熱膨張においては，内部エネルギーは

(2・4) 〔J〕

だけ変化する．よって，外部になす仕事は

(2・5) 〔J〕

となる．

Ⅲ）過程 C→D での等積減圧においては，外部になす仕事は

(2・6) 〔J〕

なので，吸収する熱は

(2・7) 〔J〕

となる．

Ⅳ）過程 D→A での断熱圧縮においては，外部になす仕事は

(2・8) 〔J〕

となる．

この熱力学サイクル 1 回で外部になす仕事の総量は

(2・9) 〔J〕

である．正の熱を吸収する過程は

（ア）A→B　（イ）B→C　（ウ）C→D　（エ）D→A

(2・10)

である（正しい選択肢をすべて答えよ）．

この熱力学サイクルの効率は

(2・11)

となる．

断熱過程ではこの気体の圧力 p〔Pa〕と体積 V〔m^3〕の間に

$$pV^{\frac{5}{3}} = \text{一定}$$

の関係がある．この関係を用いて効率を $\epsilon_1 = \dfrac{V_\mathrm{A}}{V_1}$，$\epsilon_2 = \dfrac{V_\mathrm{B}}{V_1}$ の 2 つの体積比で表すと

(2・12)

となる（図 2 中に与えられた体積，圧力は用いずに答えよ）．

3 以下の［　　］の中に適当な式，数，語句または説明を記入せよ．

図 3 のように，長さが $\sqrt{2}$ m の軽い絶縁性の糸の一端を点 O に固定し，他端に質量 m〔kg〕の小球を取り付けて振り子を作った．小球が最下点にあるときを振れ角 $\theta = 0$〔rad〕とし，図中の矢印の向きを θ の正の向きとする．重力加速度の大きさを g〔m/s^2〕とする．

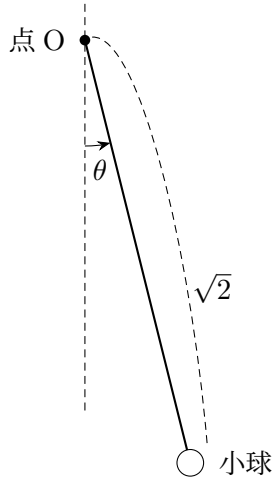


図 3

I）一様な水平方向右向きの電場をかけるとともに，小球に Q〔C〕（$Q > 0$）の電荷を帯びさせた．小球を $\theta = \pi/4$ で静かに離すと静止した．この時，糸にたるみはなかったとする．

加えた電場の大きさは

(3・1)

〔N/C〕

である．

時刻 $t = t_0$〔s〕に電場の大きさを変えずに向きを反転させ，水平方向左向きにした．小球は鉛直面内で円運動を始め，時刻 $t = t_1$〔s〕に一旦静止して運動の向きが反転した．

小球が向きを反転した位置は

$$\theta = \boxed{(3\cdot 2)}$$

の位置である．また，$t_0 < t < t_1$ における小球の速さの最大値は

$$\boxed{(3\cdot 3)} \quad 〔\mathrm{m/s}〕$$

であり，最大値を取る位置は

$$\theta = \boxed{(3\cdot 4)}$$

の位置である．

II）運動の向きが反転した小球の速さが再び最大となる地点を小球が通過した瞬間に，電場をゼロにした．

この後，小球が最下点を通過する時の運動エネルギーは

$$\boxed{(3\cdot 5)} \quad 〔\mathrm{J}〕$$

となる．最下点において，小球とともに運動する観測者から見たとき，小球にはたらく遠心力の大きさは

$$\boxed{(3\cdot 6)} \quad 〔\mathrm{N}〕$$

である．

III）最下点を通過した小球は鉛直面内の円運動を続けるが，$\theta = \theta_0$ の地点で糸がゆるみ，小球の運動は

$$\boxed{(3\cdot 7)} \quad \text{運動}$$

へと移行することになる（適切な語句を答えよ）．

この地点について

$$\cos\theta_0 = \boxed{(3\cdot 8)}$$

である．

しばらくの間，小球は糸の影響なしに運動するものとする．$(3\cdot 7)$ の運動について，小球の最高到達地点は，最下点からの高さが

$$\boxed{(3\cdot 9)} \quad 〔\mathrm{m}〕$$

の地点である（**導出過程も説明せよ**）．

4 以下の［　　］の中に適切な式，数または記号を記入せよ．

Ⅰ）宇宙空間に本体と燃料を合わせた質量が M〔kg〕の探査機がある．探査機に外力ははたらいておらず，探査機の運動の向きとは逆向きに燃料を放出し，その反動（反作用）で加速する．質量 m_0〔kg〕の燃料を N 回繰り返し放出する．N 回の放出のそれぞれについて，放出前の探査機に対する放出される燃料の速さは一定であり，これを u〔m/s〕とする．

1 回目の放出で（m_0 の燃料を除いた）探査機の速さは ΔV〔m/s〕増加したとすると，

$$\Delta V = \boxed{\quad (4\cdot 1) \quad}$$

である．探査機本体の質量に対して燃料の総質量は小さく，これ以降 $M - m_0 \fallingdotseq M$ としてよい．最初に探査機は静止していたとすると，最終の速さ V_0〔m/s〕は ΔV の N 倍であり，

$$V_0 = \boxed{\quad (4\cdot 2) \quad} \times \frac{m_0}{M}$$

となる．

1 回で放出する燃料の質量を小さく（軽く）し，m_1〔kg〕（$m_1 = 10^{-6} m_0$）とした場合を考える．1 回で放出する質量は小さいので，燃料の加速が容易である．放出する速さを $10u$〔m/s〕にしたとする．放出する燃料の総量は同じであるとすると，最終の速さ V〔m/s〕は

$$V = \boxed{\quad (4\cdot 3) \quad} \times V_0$$

となる．また，m_1 の燃料を繰り返し放出して，静止した状態から速さ V_0 まで加速する場合を考えると，必要な総量は質量 m_0 の場合の

$$\boxed{\quad (4\cdot 4) \quad} \text{ 倍}$$

であり，少ない燃料で同じ速さまで加速できることがわかる．ただし，放出する回数は質量 m_0 の場合の

$$\boxed{\quad (4\cdot 5) \quad} \text{ 倍}$$

必要である（(4・4)，(4・5) は整数 n を用いて 10^n のように答えよ）．

Ⅱ）探査機を打ち上げた後の宇宙空間において，軽い燃料を連続して放出して加速するエンジンに「はやぶさ」などで使用されているイオンエンジンがある．通常，電場で加速したキセノンイオン（Xe^+）を放出することで加速しているが，どのくらいの速さで放出されるか求めてみよう．ここでは，イオンの加速・放出のみを考え，イオン生成や中和化（陽イオン放出のため探査機が負に帯電し，陽イオンを引きつけ加速効果を弱めてしまうことへの対応）などは考えないことにする．

固定された 2 枚の平行金属板に E〔V〕の電圧をかけ，キセノンイオンを加速したとする（図 4 参照）．キセノンイオンは，質量が m〔kg〕，一価の陽イオンであり，e〔C〕（$e > 0$）の電荷をもっている．金属板間でキセノンイオンが得るエネルギーは

(4・6)	〔J〕

である．キセノンイオンは最初静止しており，(4・6) が放出後の運動エネルギーに等しいとすると，キセノンイオンが金属板から放出される速さ v〔m/s〕は

$$v = \boxed{\quad (4・7) \quad}$$

となる．

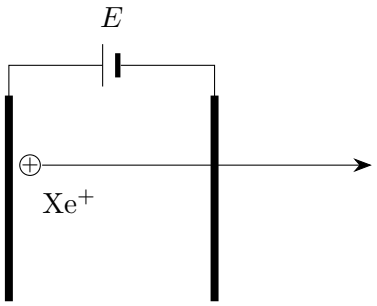


図 4

キセノンイオンの質量は 2.18×10^{-25} kg, 電荷 e は 1.60×10^{-19} C である．電圧を $E = 9.84\times10^{2}$ V とするとき，放出される速さ v は

（ア）4.5×10^{5}　（イ）4.5×10^{4}　（ウ）3.8×10^{4}　（エ）1.2×10^{3}

(4・8)	m/s

となる（有効数字 2 桁で計算して，適切な選択肢を答えよ）．

総質量 45.0 kg のキセノンイオンが探査機に対して一定の速さ v で放出されるとする．最初に探査機は静止しており，探査機の質量は $M = 5.0\times10^{2}$ kg である．探査機本体の質量に対し放出されるキセノンイオンの総質量は小さく，u を計算された v に置き換えて (4・2) を用いることができる．探査機の最終の速さは

(4・9)	m/s

と計算される（有効数字 2 桁で答えよ）．

図 4 と同じ装置を用いてより軽いイオンを加速して放出した場合，イオンの総量は小さくできるが，イオンを放出する回数が増え，探査機を同じ速さに加速するのに要する時間がより長くかかってしまう可能性がある．