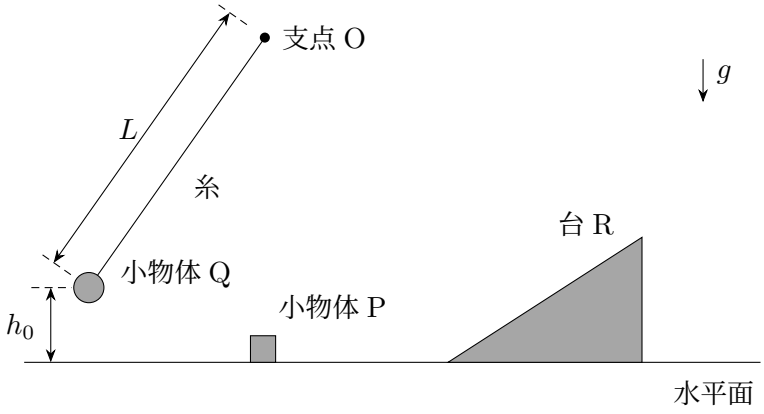
三重大学

2024 年度　前期日程　物理

（2 科目　150 分）

1 以下の文章中の (a) ～ (h) に当てはまる適切な数式を答えよ。ただし，解答には文中に与えられた記号だけを用いよ。重力加速度の大きさを g〔m/s^2〕とする。

なめらかな水平面上に，質量 m〔kg〕の小物体 P と質量 $a\,m$〔kg〕（a は定数）の台 R が静止している。小物体 P から鉛直上方に距離 L〔m〕だけ離れた支点 O から長さ L〔m〕の伸びない軽い糸で質量 $b\,m$〔kg〕（b は定数）の小物体 Q が吊るされている。なお，すべての物体は図に示される鉛直面内を運動し，台 R は底面全体が常に水平面と接しているものとする。また，速度は図の右向きを正とし，小物体 P，Q の大きさおよび空気抵抗は無視できるものとする。



図

図に示したように，小物体 Q を高さ h_0〔m〕の位置から静かに放して，最下点で小物体 P と衝突させるときの小物体 P と小物体 Q の運動を考える。小物体 Q は，速度 (a) 〔m/s〕で小物体 P と衝突する。反発係数を e とすると，衝突後の小物体 P の速度は，(b) 〔m/s〕となる。衝突直後の小物体 P と小物体 Q の速度が等しくなる場合には，この衝突によって小物体 P と小物体 Q の物体系の力学的エネルギーは，(c) 〔J〕だけ減少する。

次に，小物体 Q との衝突後の小物体 P の速度を u_0〔m/s〕とし，その後の小物体 P と台 R の運動を考える。台 R は水平面となめらかにつながる斜面を持ち，小物体 P が台 R に達すると，小物体 P は斜面を上り，台 R は右向きに動き出す。

小物体 P と台 R の斜面の間に摩擦がない場合，小物体 P が台 R の斜面を上り，台 R の斜面上で最高到達点に達したとき，台 R の速度は，(d)〔m/s〕，小物体 P の水平面からの高さ H_1〔m〕は，(e)〔m〕となる。その後，小物体 P が台 R を滑り降り，水平面に達した後の小物体 P の速度は，(f)〔m/s〕となる。

他方，小物体 P と台 R の斜面の間に摩擦があり，小物体 P が台 R の粗い斜面を上り，高さ H_2〔m〕の位置で台 R に対して停止したとき，台 R の速度は，(g)〔m/s〕となり，この摩擦によって小物体 P と台 R の物体系の力学的エネルギーは，(h)〔J〕だけ減少する。

2 次の文章を読み，**問 1**〜**問 3** に答えよ。

水槽内の液体に物体 A が入っている。この物体 A は一辺の長さが a〔m〕，密度が ρ_{A}〔kg/m^3〕の立方体である。重力加速度の大きさには g〔m/s^2〕を用いて，以下の問いに答えよ。

問 1　以下の(ア)，(イ)に当てはまる適切な数式を答えよ。

図 1 のように，密度の異なる 2 つの液体 1 および液体 2 が 2 層に分かれて水槽に入っている。液体 1 の密度は ρ_1〔kg/m^3〕，液体 2 の密度は ρ_2〔kg/m^3〕であり，両者の関係は $\rho_1 > \rho_2$ である。また，2 つの液体は混合しない。水槽内の物体 A の上面は液体 2 の液面と等しい位置で静止している。このとき，液体 1 の水槽底面からの高さが h_1〔m〕，液体 2 の厚さが h_2〔m〕（$a > h_2$）であった。大気圧が p_0〔Pa〕とすると，水槽の底面にある点 P における水圧は(ア)〔Pa〕となる。また，液体 2 の厚さは $h_2 =$(イ)〔m〕と表される。

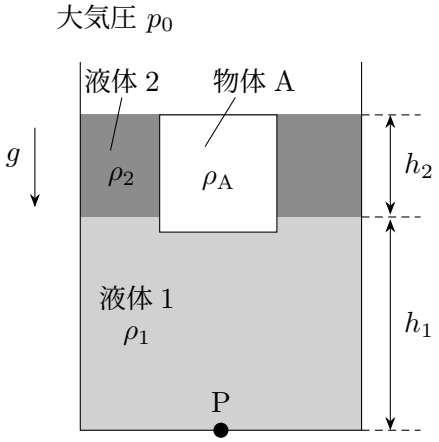


図 1

問 2　問 1 の状態から，液体 2 の厚さを $\dfrac{3}{4}a$〔m〕にすると物体 A が浮き上がったため，同じ長さの 2 本の糸を用いて図 2 のように物体 A の底面両端と水槽の底面をつなぎ，物体 A の上面が液体 2 の液面と等しい位置に固定して静止させた。このとき，1 本の糸の張力 T〔N〕を求めよ。ただし，図 2 のように糸と鉛直方向のなす角は θ〔rad〕であり，糸の浮力と質量は無視できるものとする。また，2 本の糸はどちらも緩んでおらず，水槽の底面と物体 A の底面は平行である。

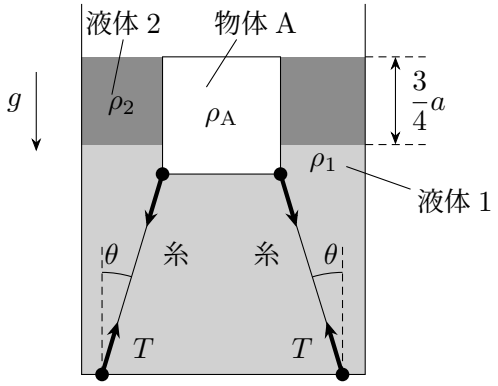


図 2

問 3　別の水槽に，密度が ρ_3〔kg/m^3〕（$\rho_A > \rho_3$）である液体 3 を入れた。図 3 のように，物体 A を液体 3 に入れ，その上面と液面を等しい位置に固定したとき，水槽底面から液面の高さは h_3〔m〕であった。次に，物体 A の固定を静かに外すと，物体 A は水槽の底面に到達した。このとき，物体 A の底面が水槽の底面に到達するまでの時間 t〔s〕を求めよ。ただし，液体による物体 A への抵抗は無視できるものとする。

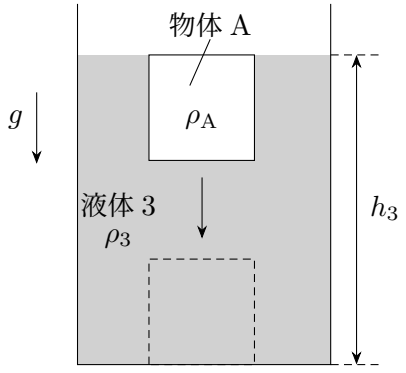


図 3

3 同じ形・大きさを持つ 2 つの剛体シリンダー a，b と，両端に同じ形・大きさの軽い剛体ピストン a，b が結合された軽い剛体棒がある。個々のピストンをそれぞれ対応するシリンダーに差し込み，横倒しの姿勢で，図 1 のように台に固定した。シリンダー，ピストンはともに断面積 A〔m^2〕である。加えて，シリンダー a には小さなヒーターが設置されている。

台は比熱比 γ，圧力 p_0〔Pa〕，温度が一定の理想気体で満たされた大きな部屋に設置され，各シリンダーの底面の栓を開けた状態で長時間放置された。このとき各シリンダーの底面とピストン端面の間の距離をともに x_0〔m〕で保った（手順 I）。この状態を「状態 1」とする（図 1）。

その後，栓を 2 つとも閉じて密閉状態とし，ヒーターでシリンダー a，ピストン a に囲まれた領域内の気体に熱量 Q〔J〕を加えた。その結果，ピストン，剛体棒はゆっくりとシリンダー b 側へ移動し，その後シリンダー b 内の体積が「状態 1」の半分になり静止した。この状態を「状態 2」とする（図 2）。

ここで，各々のシリンダー，ピストン，継手，閉鎖後の栓から熱は出入りしない。また，継手の内部とヒーターの体積，ならびにピストン–シリンダー間の摩擦，ヒーターの熱容量は無視できる。加えて手順 I より後は，シリンダーとピストンに囲まれた領域外の圧力 p_0 がピストンの移動とその後の状態に影響しないものとして，以下の問いに答えよ。ただし，解答用紙への記入にあたり，特記ない場合は図 1 内にある記号のみを用いよ。

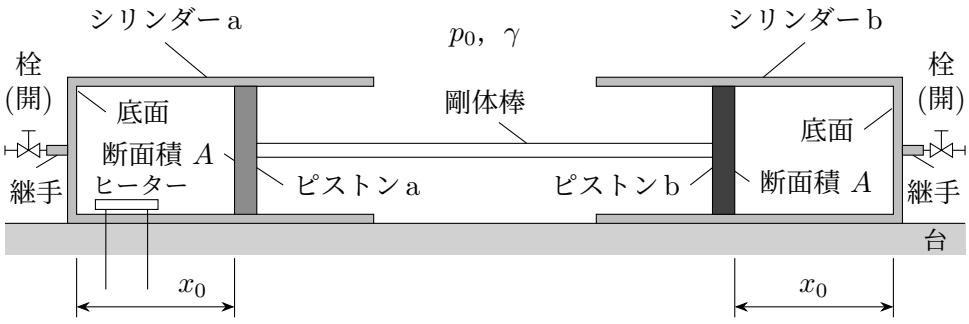


図 1（状態 1）

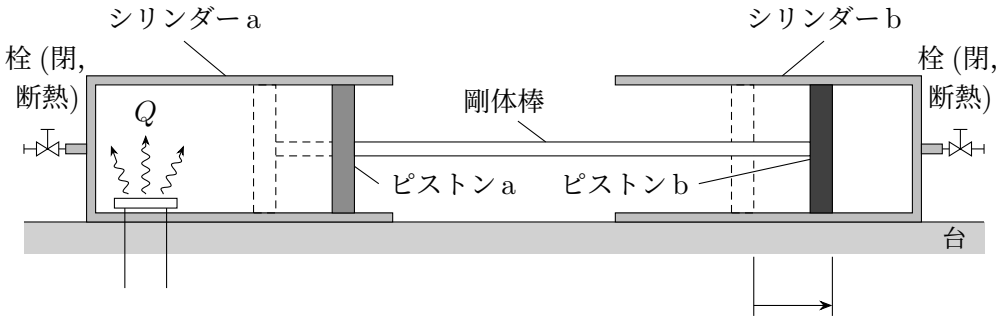


図 2（状態 2）

問 1　加熱終了後，シリンダー b 内に封入された気体がピストン b を押す力の大きさ〔N〕を求めよ。

問 2　ピストン b が，シリンダー b 内に封入された気体にした仕事 W〔J〕を求めよ。ただし，シリンダー b 内の気体の性質は図 3 の p-V グラフで表され，この図中の斜線の面積は，次の式で表される。

$$\begin{cases} \dfrac{p_{\mathrm{I}}V_{\mathrm{I}}}{n-1}\left[1-\left(\dfrac{V_{\mathrm{I}}}{V_{\mathrm{II}}}\right)^{n-1}\right] & (n \neq 1) \\ p_{\mathrm{I}}V_{\mathrm{I}}\log_e\left(\dfrac{V_{\mathrm{II}}}{V_{\mathrm{I}}}\right) & (n = 1) \end{cases}$$

ここで，V_{I}，V_{II} はともに体積，p_{I} は圧力，n は正の実数。

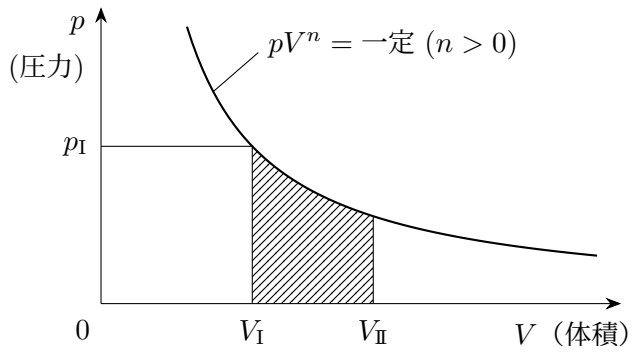


図 3

問 3　「状態 1」から「状態 2」の間の，シリンダー a 内に封入された気体の内部エネルギーの増分 ΔU〔J〕を，Q，W を用いて示せ。

剛体棒の代わりにばね定数 k〔N/m〕のばねを用い，手順 I を行った。この状態を「状態 3」とする（図

4)。ただし，このときのばねの長さは自然長である。その後，栓を閉鎖し，ヒーターでシリンダー a 内に熱量 Q'〔J〕を加えると，シリンダー b 内の体積は「状態 3」の半分になり，ピストンは静止した。この状態を「状態 4」とする（図 5)。

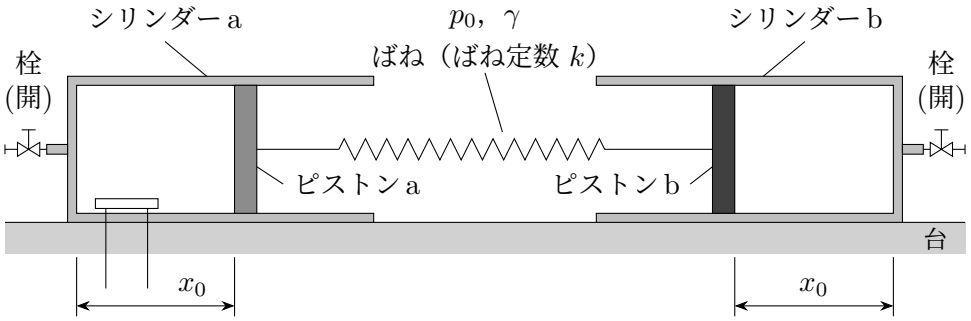


図 4（状態 3）

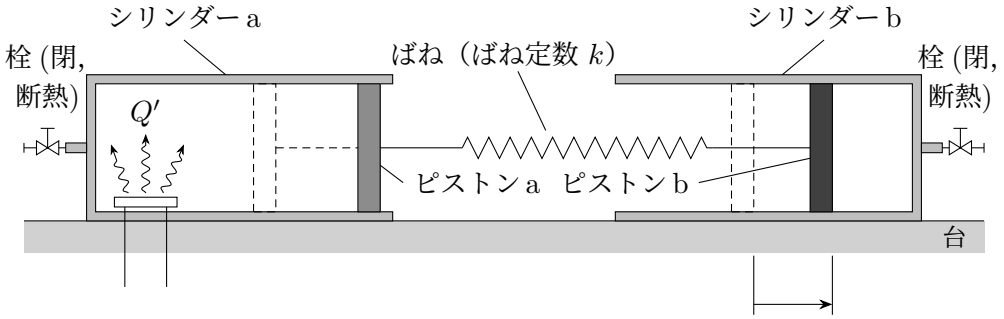


図 5（状態 4）

次の問いに答えよ。ただし，手順 I より後は，シリンダーとピストンに囲まれた領域外の圧力 p_0 がピストンの移動とその後の状態に影響しないものとする。また，解答用紙への記入にあたり，特記ない場合は図 1 内にある記号および k のみを用いよ。

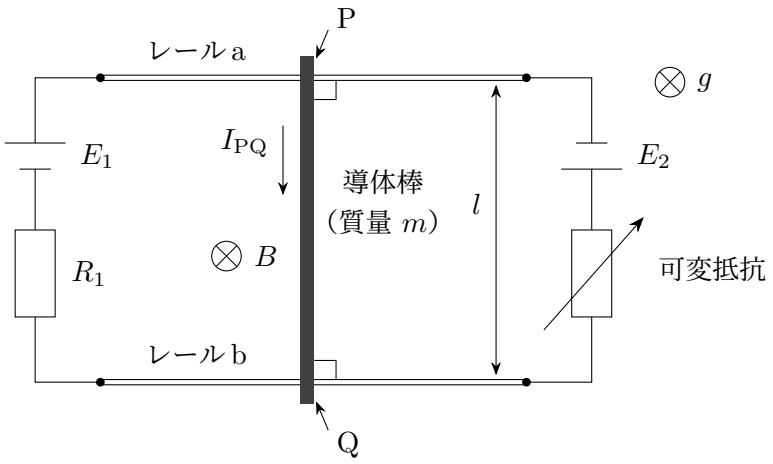
問 4　「状態 3」から「状態 4」の間の，ばねの収縮量〔m〕を求めよ。

問 5　ばねが 2 つのピストンからされた仕事 W_s〔J〕を求めよ。

問 6　「状態 3」から「状態 4」の間の，シリンダー a 内に封入された気体の内部エネルギーの増分 $\Delta U'$〔J〕を，W，W_s，Q' を用いて示せ。

問 7　$\dfrac{\Delta U'}{\Delta U}$ と $\dfrac{Q'}{Q}$ がともに 2 である場合，ばね定数 k〔N/m〕を求めよ。

4 図のように，鉛直下向きに一様な磁束密度 B〔T〕の磁場内に平行な導体のレール a，b を水平面に置き，その上に質量 m〔kg〕の導体棒をレールに対して直角にのせる。レール a，b と導体棒の接点をそれぞれ P，Q とする。レール a，b には電池（起電力 E_1，E_2〔V〕），抵抗（抵抗値 R_1〔Ω〕），可変抵抗器が接続されている。可変抵抗器は，はじめに抵抗値が最大になっており，導体棒は静止している。レール a，b 間の距離を l〔m〕，重力加速度の大きさを g〔m/s^2〕，導体棒とレール a，b の静止摩擦係数を μ_0，動摩擦係数を μ として次の問いに答えよ。ただし，レール a，b と導体棒は電気的に接触しており，導体棒はレール a，b と直角を保ちながら滑るものとする。また，電池の内部抵抗や回路の導線と導体棒，レールの電気抵抗は無視できるものとする。



図

問 1　可変抵抗器の抵抗値をゆっくりと減少させ，抵抗値が R_2〔Ω〕になったとき，導体棒がレール a，b 上を滑りはじめた。このときの可変抵抗器の抵抗値 R_2 を求めよ。また，滑り始めた向きを右向きか左向きか解答欄中の選択肢から選べ。ただし，R_2 は R_1，E_1，E_2，B，l，μ_0，m，g を用いて答え，このときの R_2 は $E_1R_2 < E_2R_1$ を満たすものとする。

しばらくして導体棒は一定の速さ v_0〔m/s〕となった。

問 2　導体棒に流れる電流 I_{PQ}〔A〕の大きさを求めよ。

問 3　導体棒に生じる誘導起電力の大きさ V_1〔V〕を答えよ。また，導体棒で電位が高い方の接点は P か Q か解答欄中の選択肢から選べ。

問 4　一定の速さ v_0 を求めよ。ただし，v_0 は R_1，R_2，E_1，E_2，μ，m，g，B，l を用いて答えるものとする。

5 以下の文章中の［①］～［⑩］に当てはまる適切な語句，数式，数値を答えよ。ただし，［①］～［②］，［⑦］～［⑧］には語群から語句を，［③］，［⑨］～［⑩］には数式を，［④］～［⑥］には数値をそれぞれ解答欄に記入せよ。プランク定数は h〔J·s〕，真空中の光速は c〔m/s〕，電気素量は e〔C〕，リュードベリ定数は R〔/m〕，クーロンの法則の比例定数は k_0〔$\mathrm{N\cdot m^2/C^2}$〕とする。

語群

質量	質量数	陽子	中性子	α 粒子	三重水素
励起	完全	不完全	非定常	基底	原子番号

問 1　太陽の内部では水素による核融合が起こっている。その例として，式 (1) に示すような二重水素からヘリウム 3 と［①］が生じる反応がある。

$$ {}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{3}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \qquad \cdots\cdots\text{式 (1)} $$

この核反応の前後において［②］の和はそれぞれ 4 と，保存されている。一方，核反応の前後で質量の和は変化しており，その減少した量に応じた原子核の結合エネルギーが放出される。${}^{2}_{1}\mathrm{H}$，${}^{3}_{2}\mathrm{He}$，${}^{1}_{0}\mathrm{n}$ の質量をそれぞれ m_{H}，m_{He}，m_{n}〔kg〕とすると，式 (1) の核反応で放出される原子核の結合エネルギーは［③］〔J〕である。

問 2　フラウンホーファーは太陽のスペクトルを観察し，いくつもの暗線（特定の波長が吸収され暗くなった箇所）があることを確認して記号をつけた。その中に次表のようなものがある。

記号	A	B	C	$\mathrm{D_1}$	$\mathrm{E_2}$	F
波長（$\times 10^{-7}\,\mathrm{m}$）	7.6	6.9	6.5	5.9	5.3	4.8

一般に水素原子の線スペクトルは波長 λ〔m〕について，R を用いて式 (2) であらわされる。

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2}\right) \left(\begin{array}{l} n' = 1,\ 2,\ 3,\ \cdots \\ n = n' + 1,\ n' + 2,\ n' + 3,\ \cdots \end{array} \right) \quad \cdots\cdots\text{式 (2)}$$

ここで，おおよそ可視光の波長 $3.6 \times 10^{-7}\,\mathrm{m}$〜$7.8 \times 10^{-7}\,\mathrm{m}$ の範囲に含まれるバルマー系列と呼ばれるスペクトルは，式 (2) で $n' =$ ④ のときである。

$R = 1.1 \times 10^7$〔/m〕と仮定して，そのバルマー系列で最も波長の長いスペクトルを有効数字 2 桁で求めると $\lambda =$ ⑤ 〔m〕であり，次に波長の長いスペクトルを有効数字 2 桁で求めると $\lambda =$ ⑥ 〔m〕である。前述の表でこれに対応した波長は，水素原子の存在を示すものといえる。

問 3 水素原子の電子の軌道とエネルギー準位をボーアの原子模型に基づいて考える。電子の質量は原子核の質量に比べて十分小さいものとする。質量 m〔kg〕，電気量 $-e$ の電子が，電気量 e の原子核の周りの軌道にあるとして，量子数 n（$n = 1,\ 2,\ 3,\ \cdots$）に対するエネルギー準位を E_n であらわすと，次の関係がある。

$$E_n = -\frac{2\pi^2 k_0^2 m e^4}{h^2} \cdot \frac{1}{n^2} \quad \cdots\cdots\text{式 (3)}$$

電子のエネルギー準位は $n = 1$ のときに最も低く安定な状態となる。これを ⑦ 状態という。n が 2 以上の場合は ⑧ 状態という。

水素原子内の電子がある振動数 ν〔Hz〕の光子を吸収して量子数 n' の状態からそれよりエネルギー準位が高い量子数 n の状態に移ったとすると，ボーアの振動数条件から，振動数 ν を用いて次の関係が成り立つ。

$$E_n - E_{n'} = \boxed{\text{⑨}}\ \text{〔J〕} \quad \cdots\cdots\text{式 (4)}$$

式 (2)，式 (3)，式 (4) より，量子数 n は消去して，リュードベリ定数 R は

$$R = \boxed{\text{⑩}}\ \text{〔/m〕} \quad \cdots\cdots\text{式 (5)}$$

となる。この式 (5) に各種定数を代入することで R の値を求められる。