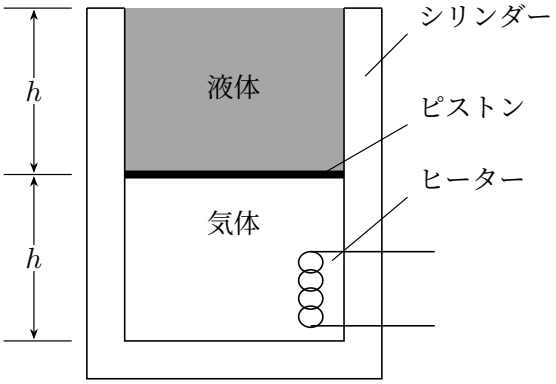
福岡大学

2021 年度　一般選抜　物理

（2 科目　120 分）

I 図のように，鉛直に置かれた深さ $2h$ のシリンダーに n モルの単原子分子理想気体を入れ，質量と厚みの無視できるピストンで閉じ込めた。シリンダーとピストンは断熱材で作られており，ピストンは水平を保ったままなめらかに動くことができる。シリンダー内には体積の無視できるヒーターが取り付けられており，気体を加熱することができる。シリンダー内のピストンより上の領域は液体で満たすことができ，気体の体積が増えると液体はシリンダーの外にこぼれ出ていく。大気圧を p_0，気体定数を R，重力加速度の大きさを g とし，液体の表面張力は無視できるものとして，以下の文中の［　　］内に入れるのに適当なものを対応する解答群の中から 1 つ選び，その番号を解答欄に記入せよ。



ピストンより上の領域を密度 ρ の液体でいっぱいに満たしたところ，ピストンはシリンダー内の底から高さ h の位置で静止した。このときのシリンダー内の気体の圧力は $\dfrac{5}{4}p_0$，体積は V_0，絶対温度は［(1)］である。これをはじめの状態とする。このとき，ピストンの上面が受ける圧力は，大気圧 p_0 と液体による圧力［(2)］$\times \rho$ との和として求められる。したがって，シリンダー内の気体の圧力は，ρ などを用いて表すと［(3)］であり，このことから，液体の密度は［(4)］$\times p_0$ であることがわかる。

次に，はじめの状態からシリンダー内の気体をゆっくりと加熱し，気体の膨張により液体がすべてこぼれ出るまでの過程を考える。ピストンがはじめの状態から $z\,(0 \leqq z \leqq h)$ だけ高い位置へ移動

したとき，気体の体積は $V =$ (5) $\times V_0$，圧力は $p =$ (6) $\times p_0$ と表される。これらの式より，この過程における気体の変化を表す p-V 図をかくと，(7) のようになることがわかる。この p-V 図から考えると，はじめの状態から液体がすべてシリンダーからこぼれ出る $(z = h)$ までの過程でピストンが外部にした仕事は (8) $\times p_0V_0$ と表されることがわかる。また，液体がすべてシリンダーからこぼれ出たとき，気体の絶対温度は (9) $\times p_0V_0$ であり，気体の内部エネルギーははじめの状態よりも (10) $\times p_0V_0$ だけ増加する。以上のことから，この過程でヒーターが気体に与えた熱量は (11) $\times p_0V_0$ であることがわかる。

解答群

(1) 〔1〕 $\dfrac{4p_0V_0}{5nR}$　〔2〕 $\dfrac{p_0V_0}{nR}$

〔3〕 $\dfrac{5p_0V_0}{4nR}$　〔4〕 $\dfrac{9p_0V_0}{4nR}$

(2) 〔1〕 h　〔2〕 gh　〔3〕 gV_0　〔4〕 $\dfrac{g}{V_0}$

(3) 〔1〕 $p_0 + \rho gh$　〔2〕 $\dfrac{5}{4}p_0 + \rho gh$

〔3〕 $p_0 + \rho gV_0$　〔4〕 $p_0 + \dfrac{\rho g}{V_0}$

(4) 〔1〕 $\dfrac{1}{4gh}$　〔2〕 $\dfrac{4}{5gh}$　〔3〕 $\dfrac{1}{gh}$　〔4〕 $\dfrac{5}{4gh}$

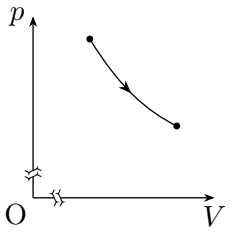
(5) 〔1〕 $1 + hz$　〔2〕 $1 + \dfrac{z}{h}$

〔3〕 $1 + \dfrac{h}{z}$　〔4〕 $1 + \dfrac{1}{hz}$

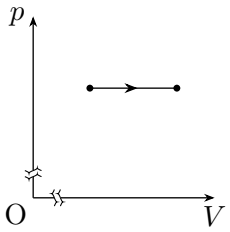
(6) 〔1〕 $\dfrac{1}{4}\left(3 - \dfrac{z}{h}\right)$　〔2〕 $\dfrac{1}{4}\left(3 + \dfrac{z}{h}\right)$

〔3〕 $\dfrac{1}{4}\left(5 - \dfrac{z}{h}\right)$　〔4〕 $\dfrac{1}{4}\left(5 + \dfrac{z}{h}\right)$

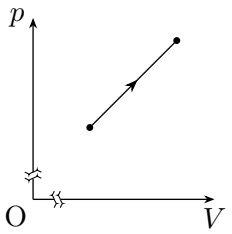
(7) 〔1〕



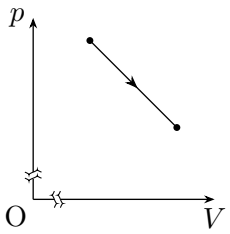
〔2〕



〔3〕



〔4〕



(8) 〔1〕 1　〔2〕 $\frac{9}{8}$　〔3〕 $\frac{13}{8}$　〔4〕 $\frac{9}{4}$

(9) 〔1〕 $\frac{1}{2nR}$　〔2〕 $\frac{1}{nR}$　〔3〕 $\frac{3}{2nR}$　〔4〕 $\frac{2}{nR}$

(10) 〔1〕 $\frac{2}{5}$　〔2〕 $\frac{9}{8}$　〔3〕 $\frac{8}{5}$　〔4〕 $\frac{13}{5}$

(11) 〔1〕 1　〔2〕 2　〔3〕 $\frac{9}{4}$　〔4〕 $\frac{9}{2}$

II 以下の文中の［　　］内に入れるのに適当なものを対応する解答群の中から 1 つ選び，その番号を解答欄に記入せよ。

極板の面積 S，極板間の間隔 d の平行板コンデンサーが真空中に置かれている。真空の誘電率を ε_0 とし，はじめ平行板コンデンサーに電荷は蓄えられていないとする。また，極板の面積は十分に広く，極板間の間隔は十分に小さいとする。

図 1 のように，平行板コンデンサーに起電力 V の電池を接続し，十分に時間が経過した。コンデンサーに蓄えられる電気量は［ (1) ］，静電エネルギーは［ (2) ］，極板間の電場の大きさは［ (3) ］である。

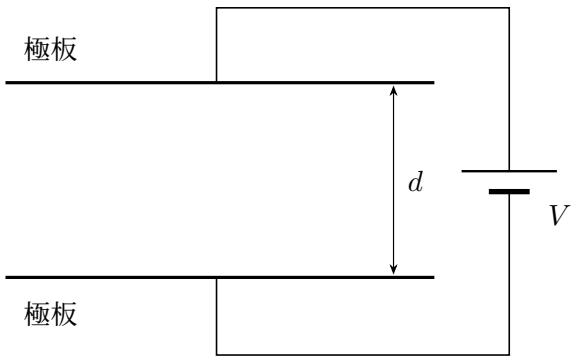


図 1

極板上の電荷が逃げないようにして，平行板コンデンサーに接続していた電池を取り外し，図 2 のように厚さ $\frac{d}{4}$ の金属板を，極板と平行にしてゆっくりと挿入した。金属板の内部の電場の大きさは (4) となる。図 2 の平行板コンデンサーは，極板間隔 (5) の 2 つのコンデンサーを直列に接続したコンデンサーであると考えることができ，全体の電気容量は (6) となるから，極板間の電圧は (7) となる。

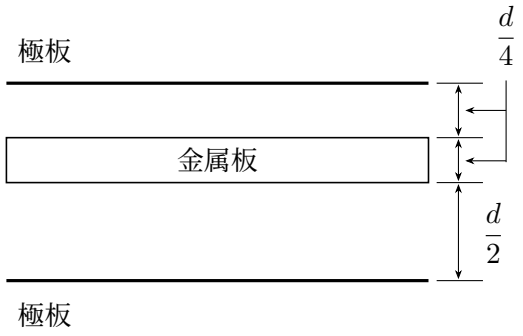


図 2

次に，極板上の電荷が逃げないようにして，図 3 のように，図 2 のコンデンサーに誘電率 ε，厚さ $\frac{d}{4}$ の誘電体 I および誘電率 2ε，厚さ $\frac{d}{2}$ の誘電体 II をゆっくりと挿入し，それぞれ金属板と上側の極板の間の半分および金属板と下側の極板の間のすべてをこれらの誘電体で満たした。金属板と上側の極板の間の部分のうち，誘電体 I を挿入した部分は電気容量 (8) のコンデンサーに相当し，真空の部分は電気容量 (9) のコンデンサーに相当する。誘電体 II を挿入した部分は，電気容量 (10) のコンデンサーに相当する。平行板コンデンサー全体の電気容量は，これら 3 つのコンデンサーの合成容量として (11) となるから，極板間の電圧は (12) となる。

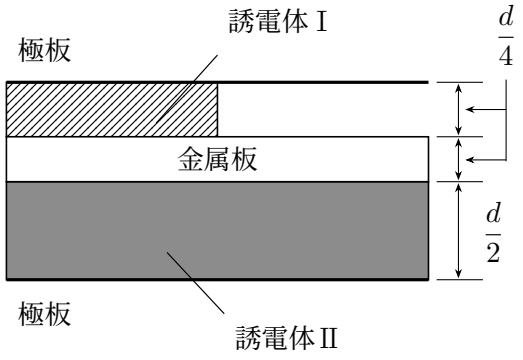


図 3

解答群

(1) 〔1〕 $\dfrac{\varepsilon_0 SV}{d}$　〔2〕 $\dfrac{\varepsilon_0 dV}{S}$　〔3〕 $\dfrac{dV}{\varepsilon_0 S}$　〔4〕 $\dfrac{\varepsilon_0 V}{dS}$

(2) 〔1〕 $\dfrac{\varepsilon_0 SV}{2d}$　〔2〕 $\dfrac{\varepsilon_0 SV^2}{2d}$
〔3〕 $\dfrac{\varepsilon_0 SV^2}{d}$　〔4〕 $\dfrac{\varepsilon_0 dV^2}{2S}$

(3) 〔1〕 dV　〔2〕 $\dfrac{V}{d}$　〔3〕 $\dfrac{V^2}{d}$　〔4〕 $\dfrac{d}{V}$

(4) 〔1〕 0　〔2〕 $\dfrac{V}{d}$　〔3〕 $\dfrac{2V}{d}$　〔4〕 $\dfrac{4V}{d}$

(5) 〔1〕 $\dfrac{d}{4}$ と $\dfrac{d}{2}$　〔2〕 $\dfrac{d}{4}$ と $\dfrac{3d}{4}$
〔3〕 $\dfrac{d}{3}$ と $\dfrac{2d}{3}$　〔4〕 $\dfrac{d}{2}$ と $\dfrac{d}{2}$

(6) 〔1〕 $\dfrac{\varepsilon_0 S}{2d}$　〔2〕 $\dfrac{3\varepsilon_0 S}{4d}$　〔3〕 $\dfrac{\varepsilon_0 S}{d}$　〔4〕 $\dfrac{4\varepsilon_0 S}{3d}$

(7) 〔1〕 $\dfrac{V}{2}$　〔2〕 $\dfrac{3V}{4}$　〔3〕 V　〔4〕 $\dfrac{4V}{3}$

(8) 〔1〕 $\dfrac{2S}{\varepsilon d}$　〔2〕 $\dfrac{2\varepsilon d}{S}$　〔3〕 $\dfrac{2\varepsilon S}{d}$　〔4〕 $\dfrac{4\varepsilon S}{d}$

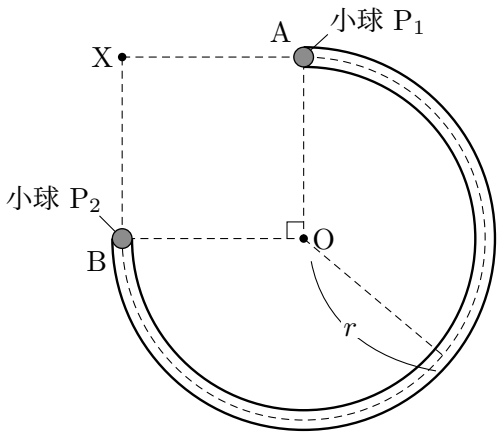
(9) 〔1〕 $\dfrac{S}{\varepsilon_0 d}$　〔2〕 $\dfrac{2\varepsilon_0 d}{S}$　〔3〕 $\dfrac{2\varepsilon_0 S}{d}$　〔4〕 $\dfrac{4\varepsilon_0 S}{d}$

(10) 〔1〕 $\dfrac{S}{\varepsilon d}$　〔2〕 $\dfrac{4\varepsilon d}{S}$　〔3〕 $\dfrac{2\varepsilon S}{d}$　〔4〕 $\dfrac{4\varepsilon S}{d}$

(11) 〔1〕 $\dfrac{(3\varepsilon+\varepsilon_0)S}{4\varepsilon(\varepsilon+\varepsilon_0)d}$　〔2〕 $\dfrac{(\varepsilon+\varepsilon_0)S}{4\varepsilon(3\varepsilon+\varepsilon_0)d}$
〔3〕 $\dfrac{4\varepsilon(3\varepsilon+\varepsilon_0)S}{(\varepsilon+\varepsilon_0)d}$　〔4〕 $\dfrac{4\varepsilon(\varepsilon+\varepsilon_0)S}{(3\varepsilon+\varepsilon_0)d}$

(12) 〔1〕 $\dfrac{4\varepsilon(\varepsilon+\varepsilon_0)V}{\varepsilon_0(3\varepsilon+\varepsilon_0)}$　〔2〕 $\dfrac{4\varepsilon(3\varepsilon+\varepsilon_0)V}{\varepsilon_0(\varepsilon+\varepsilon_0)}$
〔3〕 $\dfrac{\varepsilon_0(3\varepsilon+\varepsilon_0)V}{4\varepsilon(\varepsilon+\varepsilon_0)}$　〔4〕 $\dfrac{\varepsilon_0(\varepsilon+\varepsilon_0)V}{4\varepsilon(3\varepsilon+\varepsilon_0)}$

III 図のように，円弧状の細い管 AB が真空中でなめらかな水平面上に固定されている。O を円弧の中心として，$\angle\mathrm{AOB} = 90^\circ$ である。質量 m の小球 P_1 を管の一端 A から速さ V で管内に打ち出し，同時に P_1 と同じ質量 m をもつ小球 P_2 を他端 B から速さ kV で管内に打ち出した（P_2 の速さは P_1 の速さの k 倍）。P_1 と P_2 は衝突した後，互いに逆向きに運動し，やがて管から飛び出して点 X に向かって直線運動した（X は O，A，B と同じ平面内にある）。小球と管との間には摩擦はないものとし，以下の問いに答えよ。ただし，P_1 と P_2 は管に沿って半径 r の円周上を等速運動し，P_1 と P_2 との衝突は円運動の接線方向で起こると考え，その反発係数（はね返り係数）を e $(0 < e \leqq 1)$ とする。



(1) P_1 と P_2 を打ち出してからはじめて衝突するまでの間，P_1 の向心加速度の大きさはいくらか。

(2) P_1 と P_2 を打ち出してからはじめて衝突するまでにかかる時間はいくらか。

(3) P_1 と P_2 がはじめて衝突した直後の P_1 と P_2 の速度はそれぞれいくらか。V，e，k を用いて表せ。ただし，衝突前の P_1 の運動の向きを正とする。

(4) P_1 と P_2 の衝突が弾性衝突の場合，P_1 と P_2 が再び X で衝突するための k の条件を求めよ。

(5) 問 (4) の条件を満たして運動しているとき，P_1 と P_2 が X で衝突する直前にもっている運動エネルギーの総和はいくらか。

(6) $e = \dfrac{1}{2}$ の場合，P_1 と P_2 がはじめて衝突した後，互いに逆向きに運動するための k の条件を求めよ。

(7) $e = \dfrac{1}{2}$ かつ $k = 2$ の場合，P_1 と P_2 がはじめて衝突してから P_1 が X に到達するまでの時間はいくらか。V と r を用いて表せ。

(8) $e = \dfrac{1}{2}$ かつ $k = 2$ の場合，P_1 と P_2 が X に到達する時間の差はいくらか。V と r を用いて表せ。