前期日程

令和５年度入学試験問題

物　理

注　意　事　項

1．　この問題冊子は，試験開始の合図があるまで開いてはいけません。

2．　解答用紙は問題冊子とは別になっています。解答用紙の指定されたところに解答のみ記入しなさい。それ以外の場所に記入された解答は，採点の対象となりません。解答用紙は４枚あります。

3．　本学の受験番号をすべての解答用紙の指定されたところへ正しく記入しなさい。氏名を書いてはいけません。

4．　この問題冊子は，表紙を含めて16ページあります。問題は４ページから11ページにあります。ページの落丁・乱丁及び解答用紙の汚れ等に気付いた場合は，監督者に申し出なさい。

5．　問題冊子の余白等は適宜利用しても構いませんが，どのページも切り離してはいけません。

6．　この問題冊子は持ち帰りなさい。

1 図のように，水平な床面とそれになめらかにつながっている斜面がある。斜面と床面のなす角度は θ[rad]で，斜面上のA点の床面からの高さは h[m]である。A点から斜面上のB点まではなめらかな面で距離が l_1[m]であり，B点から斜面上のC点まではあらい面で距離が l_2[m]である。あらい面と小物体Pの間の動摩擦係数は μ' である。C点から床面上のD点まではなめらかな面である。

A点に質量 m[kg]の小物体Pが，D点に質量 M[kg]の小物体Qがある。小物体Pが斜面に沿って滑り落ち，小物体Qと衝突する運動を考える。小物体Pと小物体Qの反発係数は e で，重力加速度の大きさは g[m/s^2]である。小物体Pと小物体Qの大きさ，および，空気抵抗は無視できるものとする。M，m，h，e，l_1，l_2，g，θ，μ' のうち必要な記号を用いて以下の問いに答えよ。

(a) 小物体PがA点からB点までのなめらかな斜面を滑り落ちる運動を考える。A点で小物体Pを静かにはなした。

(i) 小物体Pの加速度の大きさ a_1[m/s^2]を求めよ。

(ii) 小物体Pが動き出してからB点に到達するまでの時間 t_1[s]と，B点での速さ v_1[m/s]をそれぞれ求めよ。

(b) 小物体Pが，あらい斜面を通過しているときを考える。

(i) このときの垂直抗力の大きさ N[N]を求めよ。

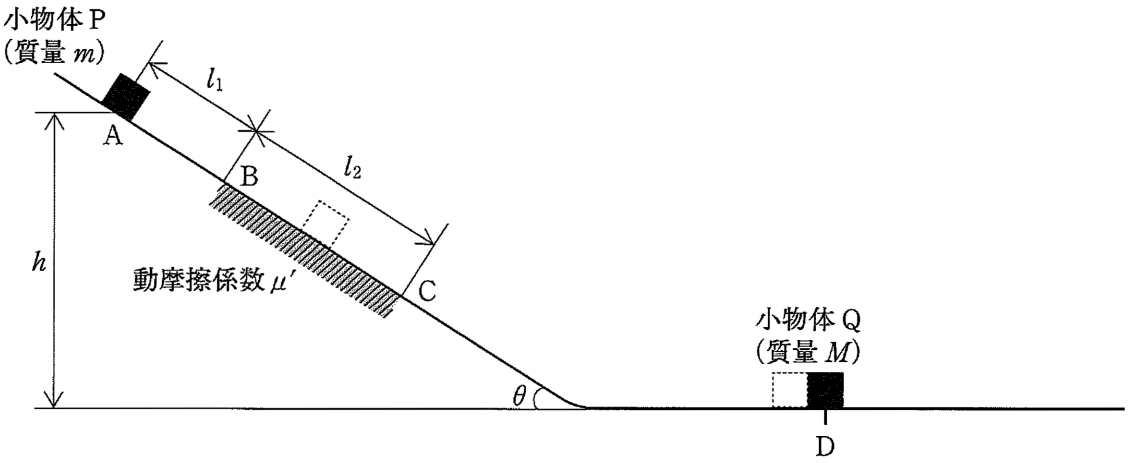
(ii) 小物体PがC点に到達するまでに摩擦力が小物体Pにした仕事 W[J]を求めよ。

(iii) C点での小物体Pの速さ v_2[m/s]と，あらい斜面で小物体Pが止まらないための動摩擦係数 μ' の条件を求めよ。

(c) 小物体Pが斜面を通過後，速さ v_3[m/s]でなめらかな床面を進み，その後，D点で静止している小物体Qと衝突したときを考える。衝突後の小物体Pおよび小物体Qの速度の水平方向成分をそれぞれ v_P，v_Q とする。ただし，v_P および v_Q は右向きを正とする。

(i) 小物体Pが小物体Qに衝突する直前の小物体Pの速さ v_3[m/s]を求めよ。

(ii) 衝突直後の小物体Pの速度 v_P[m/s]と小物体Qの速度 v_Q[m/s]を求めよ。本問に限り答えには v_3 も用いてよい。



図

2 空気中にある透明で一様な厚さの薄膜に，平行光が入射角 α[rad]で入射した場合の光の屈折と干渉を考える。図1のように，点Oから点Aに入射した光の一部は，点Aで屈折し，点Bで反射し，点Cで再び屈折し，点Dに到達する。この光は，点O′から入射し点Cで反射した光と干渉する。薄膜の屈折率を $n(n>1)$，厚さを d[m]，薄膜上面での屈折角を β[rad]，空気の屈折率を1，空気中の光速を c[m/s]として以下の問いに答えよ。

(a) まず，入射光の屈折を考える。点Aから線分O′Cに垂線を引き，線分O′Cとの交点を点A′とする。点Aに入射する光は，薄膜の上面の点Aで屈折する。一方で，点A′を通った光は，点Aに入射する光と平行に進み，点Cで屈折する。点Cから線分ABに垂線を引き，線分ABとの交点を点Hとすると，入射光の波面AA′は，屈折後に波面HCに進む。文章中の空欄 (ア) から (エ) を数式と c，d，n，β のうち必要な記号を用いて表し，空欄 (オ) は四角で囲まれた語句のうち適切なものを書け。

薄膜中での光速は (ア) [m/s]，線分ACの長さは (イ) [m]なので，点Aから点Hまでの光の達する時間は (ウ) [s]と表せる。この点Aから点Hまでの光の達する時間は，点A′から点Cまでの光の達する時間と一致する。よって，$\dfrac{\sin\alpha}{\sin\beta}=$ (エ) の関係がなりたつ。これを屈折の法則と呼ぶ。薄膜上面での屈折により，光の位相は (オ) 反転する，変化しない 。

(b) 次に，波長 λ[m]の単色光を入射した場合の，薄膜上面で反射した光と薄膜底面で反射した光の干渉を考える。文章中の空欄 (カ) から (シ) を適切な式，または語句で埋めよ。空欄 (ク) ，(ケ) ，(コ) は四角で囲まれた語句のうち適切なものを書け。それ以外の空欄は数字と λ，d，n，β ならびに文章中で定義される m のうち必要な記号を用いて表せ。

点Hを通る光は，薄膜の底面の点Bで反射し，薄膜の上面の点Cで屈折し，観測点である点Dに進む。この光の点Hから点Cまでの経路長は，線分HBと線分BCの長さの和で (カ) [m]となる。この薄膜中の経路を光が進む間に，空気中の光は (キ) [m]の距離だけ進む。よって，この距離 (キ) が，点Hから点Bと点Cを通り点Dに到達する光と，点Cで反射し点Dに到達する光に位相差をもたらす (ク) 経路差，光路差 となる。ここで，点Aを通り点Bで反射する光の位相は，点Bでの反射により (ケ) 反転する，変化しない 。点A′を通り点Cで反射する光の位相は，点Cでの反射により (コ) 反転する，変化しない 。したがって，薄膜の上面と底面で反射した光が干渉により強め合って明るくなるときの条件式は，0以上の任意の整数 m を用いると (サ) ，弱め合って暗くなるときの条件式は (シ) となる。

(c) 次に，図2のように入射角を $\alpha = 0$ [rad]とし，可視光領域の様々な波長を含んでいる白色光を薄膜の上面から入射させた場合の光の干渉を考える。薄膜の屈折率を $n = 1.5$，厚さを $d = 6.0 \times 10^{-7}$ m，可視光領域の波長は 3.8×10^{-7} m から 7.7×10^{-7} m までとする。薄膜を上から観察したときに，反射光が干渉により強め合って明るくなる可視光領域の波長をすべて数値で答えよ。強め合って明るくなる波長がない場合は「なし」と答えよ。

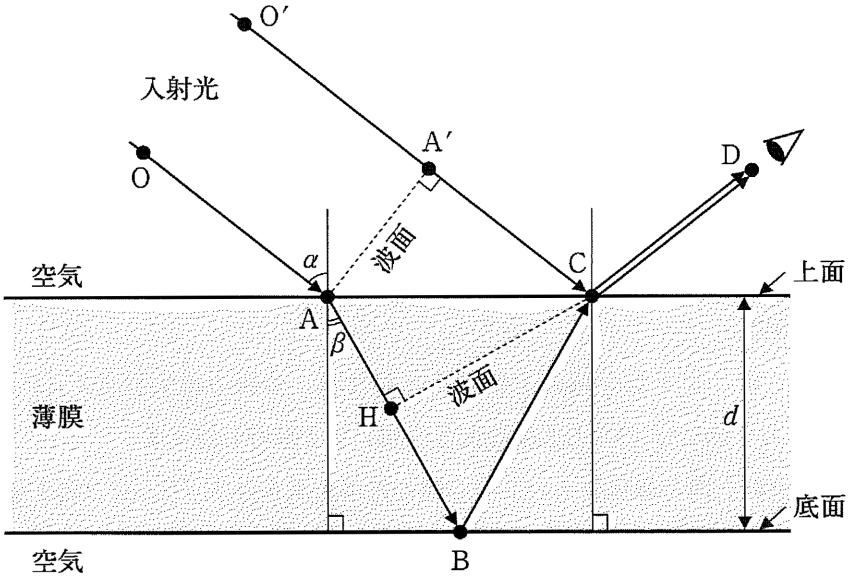


図1

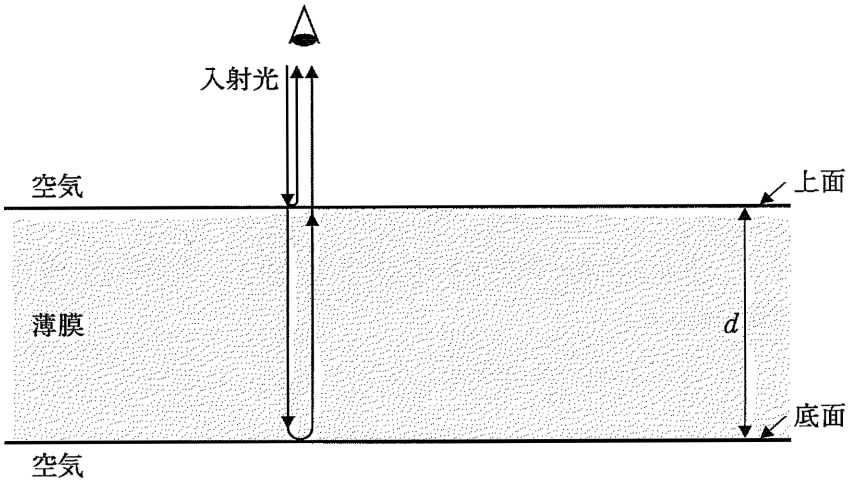


図2

3 次の文章を読み，以下の問いに答えよ。(b)では □ 枠内の選択肢から適切な語を選べ。

導体板と不導体(絶縁体)であるポリエチレン板をこすりあわせると導体板表面から一部の電子がポリエチレン板の表面に移動し，導体板が正，ポリエチレン板は負の電荷を帯びる。このような現象を帯電と呼び，摩擦によって物体が帯びた電気を静電気と呼ぶ。静電気は2つの物体を重ねただけではほとんど生じず，こすりあわせることで生じる。

(a) 導体板1とポリエチレン板の大きさを面積 A [m^2]，厚さ t [m]とし，最初はともに帯電していない。これら2つの板を重ねて空気中でこすりあわせたのち，図1のように導体板1とポリエチレン板を平行に保ったまま，すばやく距離 d [m]離したところ，ポリエチレン板の上側表面には負の電気量 $-Q_0$ [C]が残り，その後は移動しない。空気の誘電率を ε_1 [F/m]とする。板の厚さ t と距離 d は，板の幅に比べてじゅうぶん小さく，電場の端部効果は無視してよい。空気の抵抗はじゅうぶんに大きく，不導体とみなせる。

(i) 図1において，ポリエチレン板の上側表面と導体板1の間の電気容量 C_1 [F]，および電位差 V_a [V]を A，t，d，Q_0，ε_1 のうち必要な記号を用いてそれぞれ答えよ。

(ii) ポリエチレン板の上面と導体板1の下面の間の電場の大きさ E_1 [V/m]と向きを答えよ。大きさは，A，t，d，Q_0，ε_1 のうち必要な記号を用いて答えよ。

(b) 次に，図2のようにポリエチレン板の下面に帯電していない面積 A [m^2]，厚さ t [m]の導体板2をそっと重ね合わせた。その後，2つの導体板に，抵抗器Rと開いた状態のスイッチSをつないだ。ポリエチレン板の上側表面には電気量 $-Q_0$ の電荷が残っている。$-Q_0$ が作る電場により静電誘導が起き，導体板2の上面には [① 正，負] の電荷が現れ，導体板2の下面には [② 正，負] の電荷が現れる。このとき，導体板2を重ね合わせる前と比べて，導体板1の下面の電気量は [③ 大きくなる，小さくなる] が，スイッチSが開いたままなので導体板1が持つ電気量の大きさは [④ 大きくなる，変わらない，小さくなる] 。その結果，導体板1の上面には [⑤ 正，負] の電荷が現れる。

(c) 次に，問(b)の状態からスイッチSを閉じてじゅうぶん時間が経ったあとの状態を考える。導体板1の下面に誘導される電気量を Q_1[C]とすると，この Q_1 と問(a)(i)で求めた電気容量 C_1 から，導体板1とポリエチレン板上面の電位差を求めることができる。同様に，導体板2の上面に誘導される電気量 Q_2[C]と，導体板2とポリエチレン板上面の間の電気容量 C_2[F]から，導体板2とポリエチレン板上面の電位差が求まる。導体板1と導体板2が等電位となることから，この2つの電位差は一致する。また電気量 Q_1 と Q_2 は，その合計が Q_0 となるように分配される。

(i) ポリエチレン板の誘電率を ε_2[F/m]として，ポリエチレン板の上面と導体板2の間の電気容量 C_2 を A，t，d，Q_0，ε_1，ε_2 のうち必要な記号を用いて答えよ。

(ii) 導体板2を基準としたポリエチレン板の上側表面の電位 V_c[V]，および導体板2の上面の電気量 Q_2 を Q_0，C_1，C_2 のうち必要な記号を用いて答えよ。

(iii) ポリエチレン板上面と導体板1の間，およびポリエチレン板上面と導体板2の間に蓄えられる静電エネルギーの総和 U_c[J]を Q_0，C_1，C_2 のうち必要な記号を用いて答えよ。

(iv) スイッチSを閉じたままで，導体板1とポリエチレン板を平行に保ったまま，導体板1を図の下向きに移動した。移動前に比べて，静電エネルギーの総和 U_c と導体板2の上面の電気量 Q_2 が，増加するか，減少するか，または，変わらないかを答えよ。

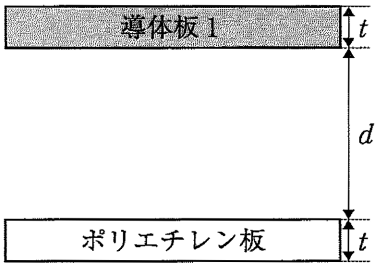


図1

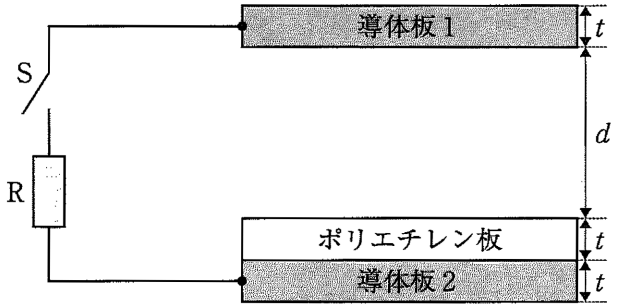


図2

4 図1のように，シリンダーとピストンからなる容器が，水平な床の上に床に対して垂直におかれている。シリンダーとピストンの断面積は S[m^2]である。容器の底から高さ H[m]の位置にストッパーがあり，ピストンはそこから上の範囲をなめらかに動く。容器内には n[mol]の単原子分子理想気体が密封されている。容器内の気体は周囲と断熱されており，気体の温度は温度調節器を使って調整することができる。大気圧は p_1[Pa]である。重力加速度の大きさを g[m/s^2]，気体定数を R[J/(mol·K)]とし，容器内の気体の状態変化について以下の問いに答えよ。ストッパーと温度調節器の大きさはいずれも無視できるものとする。

(a) はじめ，図1のようにピストンはストッパーに接して静止している。ピストンの質量は m[kg]であり，さらにピストンには質量 m[kg]のおもりがのっている。容器内の気体の圧力は p_1 である。この状態を状態1とする。(i)～(vii)の問いに，H，S，R，n，m，p_1，g のうち必要な記号を使って答えよ。

(i) 状態1における気体の温度 T_1[K]を求めよ。

(ii) 状態1から温度調節器で気体をゆっくりと加熱し，ピストンがストッパーから離れた瞬間を状態2とする。状態2における気体の温度 T_2[K]を求めよ。

(iii) 状態2からさらに気体をゆっくりと加熱し，図2のようにピストンが容器の底から $2H$ の高さに達した瞬間に加熱をやめる。この状態を状態3とする。状態3における気体の温度 T_3[K]を求めよ。

(iv) 状態1から状態3の変化における気体の内部エネルギーの変化 ΔU[J]を求めよ。

(v) 状態3から，温度調節器で気体の温度を一定に保ったまま，ピストンの上のおもりをゆっくりと引き上げてピストンから離す。おもりを取り除き，この状態を状態4とする。状態4における気体の圧力 p_4[Pa]を求めよ。

(vi) 状態4から温度調節器で気体をゆっくりと冷却し，図3のようにピストンがストッパーに接した瞬間に冷却をやめる。この状態を状態5とする。状態5における気体の温度 T_5[K]を求めよ。

(vii) 状態5からピストンに質量 m のおもりをのせ，温度調節器で気体の温度を調整して状態1に戻す。状態5から状態1の変化において，温度調節器により気体が加熱もしくは冷却される熱量 Q[J]を求めよ。Q は，気体が加熱される場合は正，冷却される場合は負とせよ。

(b) おもりとピストンの質量をどちらも m'[kg]に変えて，問(a)と同じ状態変化の操作を行う。問(a)と同じそれぞれの操作後の状態をここでも状態1から状態5とする。このときの状態2における気体の圧力は $2p_1$ である。状態1から状態2，3，4，5を経て，状態1に戻るサイクルをサイクルAとする。

(i) m' を求めよ。H，S，R，n，p_1，g のうち必要な記号を使って答えよ。

(ii) サイクルAの概形をグラフに描け。図には状態1～5の位置がわかるように番号1～5を示し，状態変化の経路を直線または曲線で結べ。

(c) 問(b)のサイクルＡと同じように状態１から気体を状態変化させ状態２を経て状態３にする。状態３から，温度調節器を使わずに気体を断熱した状態で，ピストンの上のおもりをゆっくりと引き上げてピストンから離す。おもりを取り除き，この状態を状態4′とする。そこから温度調節器で気体をゆっくりと冷却し，状態５を経て，状態１に戻す。状態１から状態２，３，4′，５を経て，状態１に戻るサイクルをサイクルＢとする。

サイクルＡとサイクルＢに関する以下の文章の(ア)～(エ)に入る正しい記号を，等号か不等号(＝，＞，＜)から選べ。

状態４の気体の温度 T_4[K]と状態4′の気体の温度 T_4'[K]を比べると，T_4 (ア) T_4' である。状態４の気体の体積 V_4[m^3]と状態4′の気体の体積 V_4'[m^3]を比べると，V_4 (イ) V_4' である。サイクルＡの１サイクルの間に，気体を加熱した熱量の大きさ Q_H[J]と，気体を冷却した熱量の大きさ Q_C[J]を比べると，Q_H (ウ) Q_C である。サイクルＡ，Ｂについて，１サイクルの間に気体がピストンにした仕事の総和をそれぞれ W_A[J]，W_B[J]とすると，W_A (エ) W_B である。

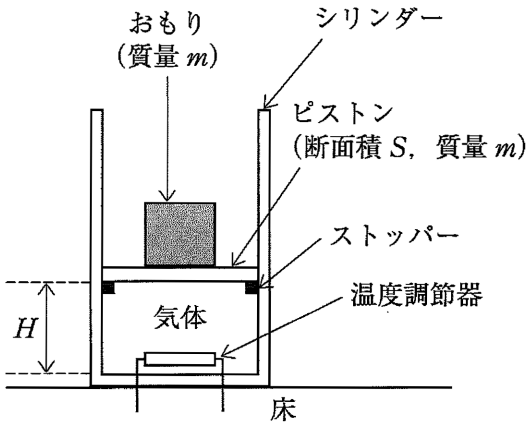


図１

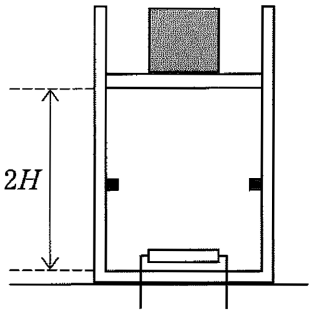


図２

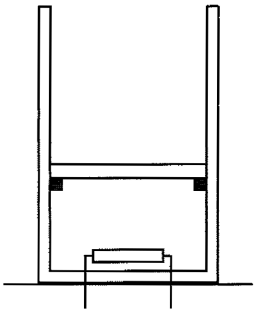


図３