物　　　理

注　意　事　項

1. 「解答始め」の合図があるまでこの冊子は開かないこと。
2. この冊子は，表紙を除き，10ページである。
3. 「解答始め」の合図があったら，まず，掲示又は板書してある問題冊子ページ数・解答用紙枚数・下書き用紙枚数が，自分に配付された数と合っているか確認し，もし数が合わない場合は手を高く挙げ申し出ること。次に，解答用紙をミシン目に沿って落ち着いて丁寧に別々に切り離し，学部名・受験番号・氏名を必ずすべての解答用紙の指定された箇所に記入してから，解答を始めること。
4. 解答は，必ず解答用紙の指定された箇所に<u>横書き</u>で記入すること。

1 図1のように，水平面から角度θ $(0° < \theta < 90°)$だけ傾いた十分広い滑らかな斜面があり，斜面上の原点Oから斜面上に水平面と平行に右向きを正としてx軸を，斜面に沿って上向きを正としてy軸をとる。原点Oから斜面に沿って小球を打ち出す【実験1】および【実験2】に関する以下の文章を読み，(1)〜(6)の問いに答えなさい。小球の大きさと小球に働く空気抵抗は無視でき，重力加速度の大きさをgとする。

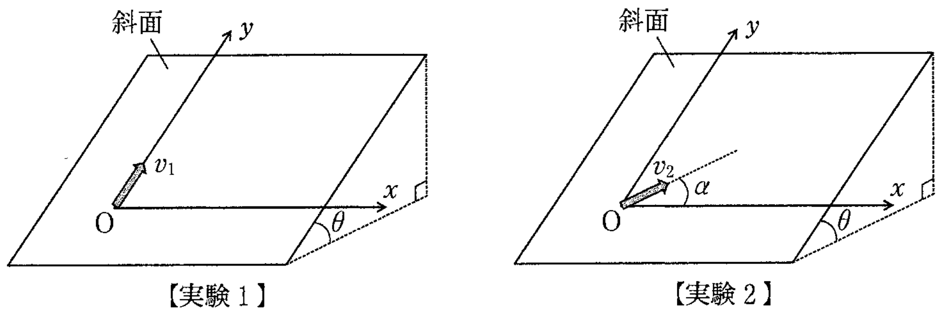


図1

【実験1】

初速v_1でy軸に沿って上向きに小球を打ち出したところ，ある時刻t_1で速度が0となり原点Oから最も離れ，その後，斜面を下っていった。このとき，小球が動き始めてからの小球の速度vと時間tの関係をグラフで描くと，図2のようになった。

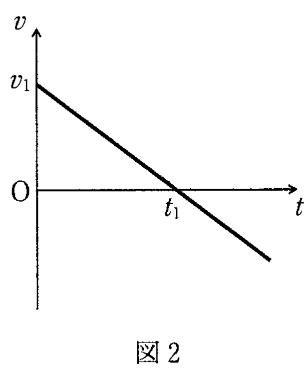
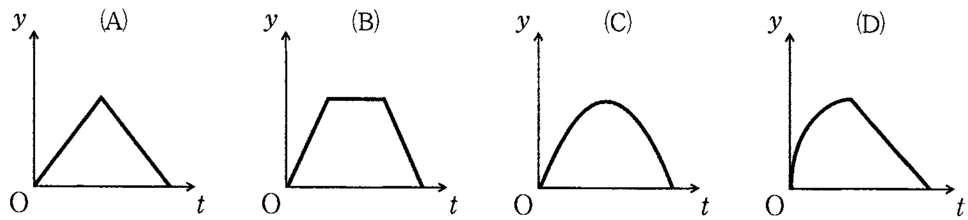


図2

(1) v_1をt_1を用いた式で表しなさい。

(2) 斜面上で小球が原点Oから最も離れた位置を点Pとするとき，原点Oから点Pまでの距離y_1 ($y_1>0$)は，図2中のどこの面積で表されるか，斜線で示しなさい。

(3) 小球のy軸上の位置y ($y>0$)と時間tの関係を表すグラフの概形で，最も適切なものを次の(A)〜(D)の中から1つ選び記号で答えなさい。なお，小球が動き始めた時刻を$t=0$とする。



【実験2】

x軸から左回りに角度α ($0^\circ<\alpha<90^\circ$)をなす向きに，初速v_2で小球を打ち出した。これにより，小球はある高さまで斜面を上った後，斜面を下っていった。

(4) 小球が斜面上で運動しているとき，小球の加速度のx成分a_xを答えなさい。

(5) 小球のy座標がある値L ($L>0$)を超えないようにするには，v_2を$v_2 \leqq \boxed{}$とする必要がある。$\boxed{}$に入る適切な数式を答えなさい。

(6) $\alpha=30^\circ$，$v_2=A$で打ち出した小球Ⅰと，$\alpha=60^\circ$，$v_2=B$で打ち出した小球Ⅱが，斜面上を運動してx軸を同じ位置で通過した。このときのAとBの比$\dfrac{A}{B}$は，$\dfrac{A}{B}=\boxed{}$で表される。$\boxed{}$に入る適切な数字を答えなさい。その際，答えの導出過程も記述しなさい。

2 気体の状態と分子運動についての以下の問いに答えなさい。

(1) 次の文章の(ア)〜(キ)に，適切な式，数値を入れなさい。(ク)は選択肢より適切なものを選び，記号で答えなさい。

図のように，一辺の長さ L の断熱された立方体(体積 $V_0 = L^3$)があり，(1)では壁はすべて固定されているとする。その一辺に平行に x 軸をとる。立方体の中に，絶対温度 T_0 の単原子分子 1 mol の理想気体がある。分子同士は衝突せず，壁では弾性衝突する。重力の影響は無視する。m は分子の質量，R は気体定数，N_A はアボガドロ定数である。

まず，1 個の分子が x 軸の正方向に速さ v_x で運動している場合を考える。壁での 1 回の衝突の運動量変化の大きさ I は $I =$ (ア)で，これは壁に与える力積の大きさに等しい。左右の壁で衝突を繰り返すと，1 秒間に右の壁にあたる回数 c は，$c =$ (イ)である。この衝突の間隔は短いので，この壁が 1 個の分子から受ける平均の力の大きさは，時間的な平均を考えて求まる。全分子が v_x でこの壁に衝突すると考えると，この壁が受ける気体の圧力は，I, c, N_A, L を用いて表すと(ウ)となる。

分子は，いろいろな速さで，あらゆる方向に均等に運動している。そこで，分子の速さについては，2 乗の平均値を用いて考える。分子の速度の x 成分 v_x の 2 乗の平均値 $\overline{v_x^2}$ と，分子の速さ v の 2 乗の平均値 $\overline{v^2}$ について，$\overline{v^2} =$ (エ) $\times \overline{v_x^2}$ が成り立つ。壁が受ける気体の圧力を p_0 とすると，$p_0 V_0$ を，N_A, m, $\overline{v^2}$ で表すと(オ)となる。また，1 分子の平均運動エネルギーは，(カ)なので，これを 1 mol の分子についてすべて足したものは，理想気体の状態方程式と(オ)を比較して R と T_0 で表すと(キ)となる。これはこの気体の内部エネルギーである。このことからも分かるように，単原子分子理想気体では絶対温度は，(ク)。

(ク)の選択肢

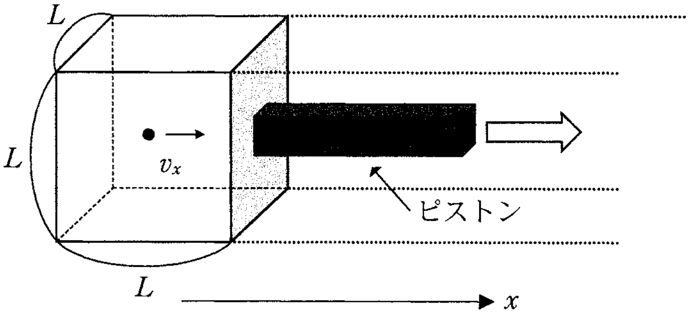
(A) 分子の 2 乗平均速度($\sqrt{\overline{v^2}}$)に比例するが，比例係数は分子の種類によって異なる

(B) 分子の 2 乗平均速度($\sqrt{\overline{v^2}}$)に比例し，比例係数は分子の種類によらない

(C) 分子の平均運動エネルギーに比例するが，比例係数は分子の種類によって異なる

(D) 分子の平均運動エネルギーに比例し，比例係数は分子の種類によらない

(E) 気体全体の熱に関する量であり，分子の運動と直接関係はない



図

(2) 右の壁が図の状態から x 軸方向にのびたシリンダー(点線)に沿って移動するピストンになっており(ピストンの断面積 L^2)，このピストンが，熱の出入りがなくゆっくりと熱平衡を保って x 軸の正方向へ移動する。

(i) ピストンがわずかな距離 d 動いたときの内部エネルギーの変化 ΔU を求め，その根拠も記述しなさい。その間の圧力の変化は小さいので，圧力は p_0 で一定としなさい。

(ii)　ピストンが最終的に元の位置から L 移動し，体積 $2V_0$，温度 T_f になった。この場合の，圧力 p の体積 V に対する変化を，グラフに示しなさい。また，最初と最後の温度 T_0 と T_f の大小関係を不等式で示しなさい。

さらに，比較として，同じ圧力 p_0，体積 V_0，温度 T_0 から，等温変化(この場合は熱の出入りがあってもよい)で体積 $2V_0$ にした場合の，圧力 p の体積 V に対する変化についても，同じグラフに示しなさい。概形でよいが，2つの場合の違いがわかるように描き，等温変化の場合は，最終的な圧力の値を明示しなさい。

(iii)　以下では(1)の前半で考えたように，単原子分子が x 軸の方向のみに運動し，すべての分子が最初は同じ速さ v_x で運動しているとする。ピストンが速さ w で，元の位置(左右の壁の距離が L の位置)から x 軸の正方向へ移動するものとする。この場合，分子が速さ v_x でピストンに弾性衝突したときの衝突後の速さ v_x' を求めなさい。ただし，分子との衝突の前後でピストンの速さは変わらないこととする。

(iv)　(iii)の過程で，短い時間 t の間の，ピストンとの衝突による1分子の運動エネルギーの変化は，$-\dfrac{m{v_x}^2wt}{L}$ と求まる(この問いに必要のない微小な量は無視してある)。全分子の運動エネルギーの変化の大きさが，t の間に気体がピストンにする仕事に等しいことを $-\dfrac{m{v_x}^2wt}{L}$ の式を用いて示しなさい(なお，その途中過程も記述すること)。ただし，解答するにあたり，t の間の圧力と分子の速さは一定と考えてよいものとする。

試験問題は次に続く。

3 屈折率 n，厚さ d の一様な薄膜に波長 λ の平行光が入射するとき，以下の問いに答えなさい。ただし，薄膜の外部は，上面側も下面側も空気とし，空気の屈折率は1とする。

(1) まず，薄膜の厚さ d が波長 λ に比べて十分小さく，薄膜の上面へ垂直に光が入射する場合を考える。上面での反射光と下面での反射光の経路長差は $2d$ であり，これは屈折率 n の薄膜中では光学距離(光路長) $2nd$ に相当するが，薄膜の厚さが波長に比べて十分小さい場合には，この光学距離は無視できる。このとき，薄膜からの反射光はほとんど生じない。その理由として正しいものを次の選択肢(A)〜(D)から選びなさい。

(A) 薄膜の上面では反射光の位相が π 変化するが，薄膜の下面では反射光の位相が変化しないので，2つの反射光が干渉して打ち消し合うため。
(B) 薄膜の上面でも下面でも反射光の位相が π 変化するので，2つの反射光が干渉して打ち消し合うため。
(C) 薄膜の上面でも下面でも反射光の位相は変化しないので，2つの反射光が干渉して打ち消し合うため。
(D) 薄膜の上面では反射光の位相は変化しないが，薄膜の下面では全反射が起こり，2つの反射光が干渉して打ち消し合うため。

(2) 次に，薄膜の厚さ d は大きく，その光学距離は無視できないとし，図のように，薄膜の上面へ斜めに光が入射する場合を考える。図中の点Oから出て薄膜の上面の点Aに入射角 θ で入射した光は，薄膜内へ屈折角 θ' で進み，薄膜の下面の点Bで反射した後，薄膜の上面の点A′で屈折して点C′へ進む。また，点O′から出て，点Oから出た光と平行に点A′へ入射した光は，点A′で反射して点C′へ進む。点AからO′A′へ下ろした垂線の交点をH′とし，点Aに入射する直前の光と点H′の光は位相が等しいとする。また，点A′からABへ下ろした垂線の交点をHとする。AA′の距離を a とするとき，次の(i)〜(vii)に答えなさい。

(i) 点H′から点A′までの光学距離を a，θ を用いて表しなさい。

(ii) 点Aから点Hまでの光学距離を a, θ', n を用いて表しなさい。

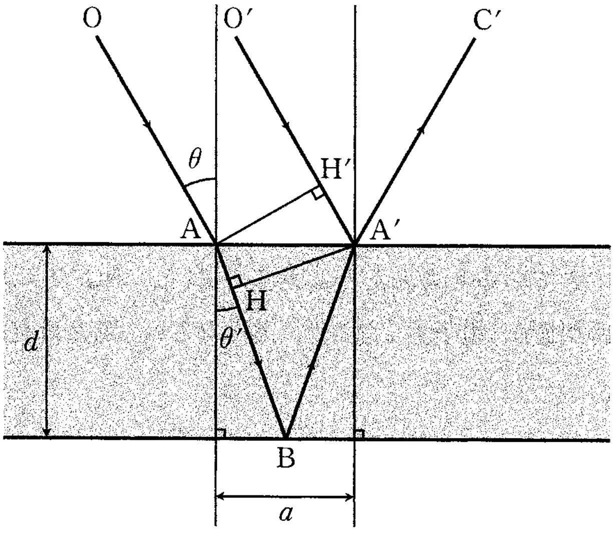
(iii) n, θ, θ' の間に成り立つ関係式を示しなさい。

(iv) AA′の距離 a を d, θ' を用いて表しなさい。

(v) A → B → A′の経路の距離を d, θ' を用いて表しなさい。

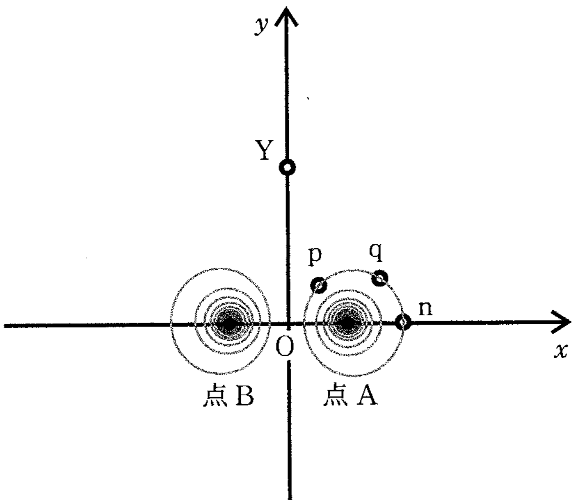
(vi) 負でない整数を m ($m = 0, 1, 2, \cdots$)とするとき，O → A → B → A′→ C′を進む反射光と O′→ A′→ C′を進む反射光が強め合う条件を n, d, θ', m, λ を用いて表しなさい。なお，導出過程も記述しなさい。

(vii) $\theta = 30^\circ$, $n = 1.5$, $\lambda = 6.0 \times 10^{-7}$ m で2つの反射光が強め合うための薄膜の最小の厚さを求めなさい。なお，計算過程も記述しなさい。



図

4 図のように，大きさが無視できる点電荷を，x-y 平面上に原点 O から a 離れた点 A$(a,\ 0)$と点 B$(-a,\ 0)$に固定した。ただし，$a>0$ とする。点 A，点 B に固定した電荷の電気量は，それぞれ，$+1$ C，-1 C である。図の灰色の曲線は等電位線を表す。静電気力に関するクーロンの法則の比例定数は $k_0 = 9.0 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2/C^2}$，陽子と電子の電気量はそれぞれ，$+1.6 \times 10^{-19}$ C，-1.6×10^{-19} C として，以下の問いに答えなさい。



図

(1) $+1$ C の電荷が陽子の集まりでできていると考え，-1 C の電荷が電子の集まりでできていると考えたとしたら，$+1$ C，および -1 C の電荷はそれぞれ，何個の陽子，電子からなるか，答えなさい。答えは有効数字 2 桁で表しなさい。

(2) $x>a$ の x 軸上の点と点 A との距離を d とする。このとき，点 A に置かれた $+1$ C の点電荷が x 軸上につくる電場の大きさ E を k_0，d で表した式を答えなさい。また，距離 d を横軸に，電場の大きさ E を縦軸にした時の E の変化を解答用紙のグラフ中に示しなさい。それぞれの軸には単位を添え，距離 $d = 0.5$ m の位置での電場の大きさ E を数値で求め，グラフ中に書き入れなさい。

(3) 図において，点Aと点Bの電荷を考慮し，点Aから点p，q，nそれぞれを通る電気力線を，$y \geqq 0$ の範囲で，向きも矢印で示し，図中に描きなさい。

(4) y 軸上に点 $\mathrm{Y}(0,\ y')$ をとる。このとき，$y'>0$ である。点Yの位置における電場の向きを図中に描き入れなさい。さらに，点Yの位置における電場の大きさ E_{Y} を k_0，y'，a を使って表し，その過程も記述しなさい。また，それを導出する際の考え方について，次の文章中の[　]に当てはまる語を，下の選択肢から選んで，完成させなさい。なお，選択肢は同じ選択肢を複数回使っても良く，使わない選択肢があっても良い。

点Yの電場 $\overrightarrow{E_{\mathrm{Y}}}$ は，点Aの $+1\,\mathrm{C}$ の電荷が点Yにつくる電場を $\overrightarrow{E_{\mathrm{A}}}$，点Bの $-1\,\mathrm{C}$ の電荷が点Yにつくる電場を $\overrightarrow{E_{\mathrm{B}}}$ とすると，$\overrightarrow{E_{\mathrm{Y}}} = \overrightarrow{E_{\mathrm{A}}} + \overrightarrow{E_{\mathrm{B}}}$ である。$\overrightarrow{E_{\mathrm{A}}}$ および $\overrightarrow{E_{\mathrm{B}}}$ の y 成分は，大きさが[　①　]，[　②　]なので，[　③　]。一方，$\overrightarrow{E_{\mathrm{A}}}$ および $\overrightarrow{E_{\mathrm{B}}}$ の x 成分は，大きさが[　④　]，[　⑤　]なので，[　⑥　]。今，y' は a に比べて十分に大きいとすると，E_{Y} は y' の[　⑦　]乗に比例することがわかる。

選択肢				
等しく	異なり	逆向き	同じ向き	打ち消しあう
2倍になる	−2	−3	+2	+3