

'24

前期日程

物 理

(理 工 学 部)

注 意 事 項

1. 試験開始の合図があるまで、この問題冊子を開いてはいけません。
2. 問題冊子は1冊(15頁)、解答用紙は3枚、下書用紙は1枚です。落丁、乱丁、印刷不鮮明の箇所等があった場合には申し出てください。
3. 氏名と受験番号は解答用紙の所定の欄に記入してください。
4. 解答は指定の解答用紙に記入してください。
5. 解答用紙は持ち帰ってはいけません。
6. 問題冊子と下書用紙は持ち帰ってください。

1

図1のように、壁のある床の上に質量 M の台を置いて実験を行った。床面と壁面は平らで、床面は水平、壁面は床面と垂直である。台の下面は平らで、台の上面は水平面部分、一定の傾きの斜面部分、それらをなめらかにつなぐ曲面部分からなる。水平面部分は水平であり、斜面部分は水平面部分から角度 θ だけ傾いており、台の左端は下面に対し垂直な平面になっている。台と床面との間、および、台と壁面との間には摩擦はなく、台は床面の上をすべることができる。空気抵抗は無視でき、床と壁は動かないとする。重力加速度の大きさを g とし、観測者は床に対して静止しているとして、以下の設問に答えよ。

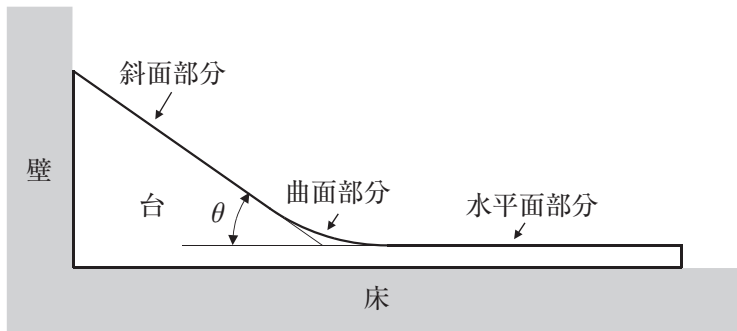


図1

【I】 図2のように、台をその左端が壁面に接するようにして床面の上に置いた。軽い糸の一端を質量 m の小物体にとりつけ、他端を壁面に固定して、小物体を斜面部分上につるしたところ、小物体は斜面部分の上で静止し、糸は斜面部分と平行になった。小物体と斜面部分の間には摩擦はないものとして、問(1)~(4)に答えよ。

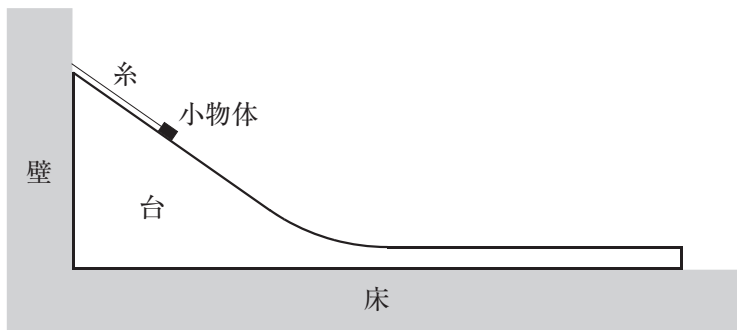


図2

- (1) 小物体が糸から受ける張力の大きさを求めよ。
- (2) 小物体が斜面部分から受ける垂直抗力の大きさを求めよ。

台には、小物体から受ける力、床面から受ける垂直抗力、壁面から受ける垂直抗力、および、重力がはたらいている。

- (3) 台が床面から受ける垂直抗力の大きさを求めよ。
- (4) 台が壁面から受ける垂直抗力の大きさを求めよ。

【II】 図3のように、ばね定数 k で質量の無視できるばねを、台の右端に取り付けた。ばねは右端が固定されており、自由に伸縮できる。この台を、台の左端が壁面に触れるようにして床面の上に置き、斜面部分上の、水平面部分から高さ H の位置で、質量 m の小物体を静かにはなした。 $m < M$ とし、小物体と斜面部分、曲面部分、水平面部分との間の摩擦はないものとして、問(5)~(14)に答えよ。

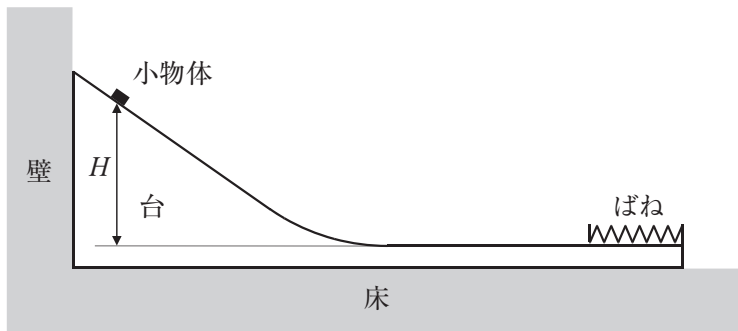


図3

小物体を静かにはなすと、小物体は斜面部分の上をすべりおり、曲面部分の上をなめらかに通過し、水平面部分の上をすべった。水平面部分の上で小物体が最初にばねに接触するまでは、ばねは自然の長さであり、台は観測者に対して静止していた。

- (5) 小物体が斜面部分の上をすべっているときの、台が床面から受ける垂直抗力の大きさを求めよ。
- (6) 小物体が斜面部分の上をすべっているときの、台が壁面から受ける垂直抗力の大きさを求めよ。

- (7) 小物体が斜面部分の上をすべっているときの、観測者から見た小物体の加速度の大きさを求めよ。
- (8) 小物体が水平面部分の上をすべっているときの、観測者から見た小物体の速度の大きさを求めよ。

小物体がばねに接触すると、ばねは小物体と接したまま縮み、台は観測者に対して動きはじめた。ばねが最も縮んだ後、ばねは小物体と接したまま伸び、ばねが自然の長さにもどったところで、小物体はばねから離れた。小物体はばねから離れた後、水平面部分の上を斜面部分へ向かってすべり、曲面部分の上をなめらかに通過し、斜面部分の上を途中まですべってのぼり、その後、すべっておりてきた。ばねの縮みの大きさはばねの自然の長さに比べて十分に小さかった。

- (9) 小物体がばねに接触した後、ばねの自然の長さからの縮みが d になったときの、観測者から見た、小物体の加速度の大きさ、および、台の加速度の大きさを、 d, k, M, m から必要なものを用いて表せ。
- (10) 小物体がばねに接触した後、ばねが最も縮んだときの、観測者から見た小物体と台の運動量の和の大きさを、 g, H, M, m から必要なものを用いて表せ。
- (11) 小物体がばねに接触した後、ばねが最も縮んだときの、観測者から見た小物体と台の運動エネルギーの和を、 g, H, M, m から必要なものを用いて表せ。
- (12) 小物体がばねに接触した後、ばねが最も縮んだときの、ばねに蓄えられている弾性エネルギーを、 g, H, M, m を用いて表せ。
- (13) 台の斜面部分の上で、小物体が台に対して静止した瞬間の、観測者から見た小物体の速度の大きさを求めよ。
- (14) 台の斜面部分の上で、小物体が台に対して静止した瞬間の、台の水平面部分から測った小物体の高さを求めよ。

- 【Ⅲ】 図4のように、台からばねを取り去り、台の水平面部分の上に点 a をとり、点 a から右の水平面部分を粗くし、この台をその左端が壁面に触れるようにして床面上に置いた。斜面部分上の、水平面部分から高さ H の位置で、質量 m の小物体を静かにはなした。粗い水平面部分と小物体との間の動摩擦係数を μ' とし、粗い水平面部分以外の台の上面と小物体との間の摩擦はないものとする。また、面を粗くすることによる台の質量の変化は無視できるとする。問(15)~(17)に答えよ。

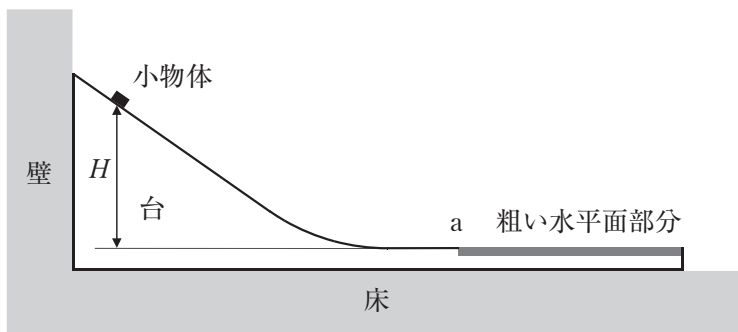


図 4

小物体を静かにはなすと、小物体は斜面部分の上をすべりおり、曲面部分の上をなめらかに通過し、なめらかな水平面部分の上をすべった。そして、小物体は点 a を通過した後、粗い水平面部分の上をすべり、粗い水平面部分の途中で台に対して静止した。

- (15) 小物体が粗い水平面部分の上をすべっているときの、観測者から見た小物体の加速度の大きさ、および、台の加速度の大きさを求めよ。
- (16) 小物体が点 a を通過し、粗い水平面部分に侵入してから、小物体が台に対して静止するまでの時間を、 g 、 H 、 M 、 m 、 μ' を用いて表せ。
- (17) 小物体が台に対して静止したときの、観測者から見た台の速度の大きさを求めよ。

2

【I】 真空中に、面積が $S[\text{m}^2]$ の正方形の形をした厚さの無視できる極板 2 枚を距離 $d[\text{m}]$ だけ離して並べた平行板コンデンサーがある。極板の一辺の長さは極板間の距離に比べて十分大きく、極板の端における電場の乱れは無視できる。真空中の誘電率を $\epsilon_0[\text{F/m}]$ とする。以下の問(1)に答えよ。

- (1) 以下の文章の ～ に入る適切な式を、 S 、 d 、 ϵ_0 、および、文章中で示される Q 、 ϵ_r のうち必要なものを用いて表せ。

平行板コンデンサーの片側の極板を電気量 $Q[\text{C}]$ ($Q > 0$)、もう片方の極板を電気量 $-Q[\text{C}]$ に帯電させたところ、極板間に強さが $\frac{Q}{\epsilon_0 S}$ の一様な電場ができた。このとき、極板間の電位差の大きさは となっている。このことから、この平行板コンデンサーの電気容量は であることがわかる。次に、底面が面積 S の正方形で厚さが d の直方体の形をした、比誘電率が ϵ_r の誘電体を極板間に挿入し、極板間の空間を隙間なく満たした。誘電体の挿入後、極板間の電場の強さは、誘電体を挿入する前の 倍になっており、平行板コンデンサーの電気容量は、誘電体を挿入する前の 倍になっている。

【Ⅱ】 図1のように、真空中に並べて置かれた、面積が等しく、形が正方形で、厚さの無視できる極板 A、B からなる平行板コンデンサーが、抵抗 R 、 R_1 、スイッチ S_1 、 S_2 、直流電源と、導線につながれている。抵抗 R の抵抗値は $R[\Omega]$ 、抵抗 R_1 の抵抗値は $R_1[\Omega]$ 、直流電源の端子電圧は $V[V]$ である。極板 A、B は、空間中にとられた x 軸に垂直に置かれており、極板 A は $x = 0$ の位置に固定されている。また、極板 B は、最初、 $x = L[m]$ の位置に固定されている。極板 B が $x = L$ の位置にあるときの、平行板コンデンサーの電気容量を $C_0[F]$ とする。極板の一辺の長さは極板間の距離に比べて十分大きく、極板の端における電場の乱れは無視できる。また、導線の電気抵抗、回路で発生する磁場の効果、および、重力の効果は無視できる。以下の問(2)～(4)に答えよ。

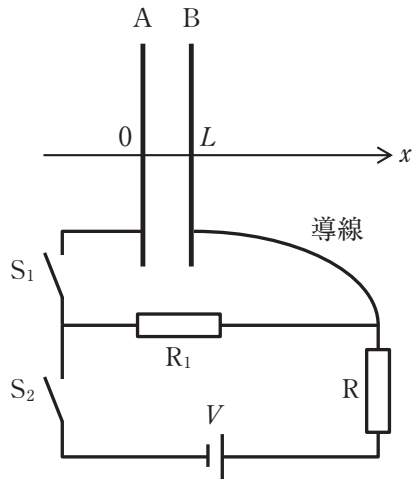


図 1

最初、極板 A, B は帯電しておらず、スイッチ S_1 , S_2 は開いていた。この状態から、スイッチ S_1 , S_2 を閉じ、十分な時間が経過した。この十分な時間が経過した後の、極板 A, B 間の電位差の大きさを $V_1[V]$ とする。

- (2) 十分な時間が経過した後の、抵抗 R_1 に流れる電流の大きさを、 R , R_1 , V のうち必要なものを用いて表せ。
- (3) V_1 を、 R , R_1 , V のうち必要なものを用いて表せ。
- (4) 十分な時間が経過した後の、極板 B に蓄えられた電気量を、 V_1 , C_0 のうち必要なものを用いて表せ。
- (5) 十分な時間が経過した後の、平行板コンデンサーに蓄えられた静電エネルギーを、 V_1 , C_0 のうち必要なものを用いて表せ。

次に、スイッチ S_1 を開いた後、スイッチ S_2 を開いた。その後、極板 B に外力をはたらかせ、極板 B が x 軸に垂直な状態を保ったまま、極板 B を x 軸正の向きにゆっくりと平行移動させた後、 $x = 3L$ の位置に固定した。

- (6) 極板 B を $x = 3L$ の位置まで移動させた後の、平行板コンデンサーの電気容量を、 C_0 を用いて表せ。
- (7) 極板 B を $x = 3L$ の位置まで移動させた後の、極板 A, B 間の電位差の大きさを、 V_1 を用いて表せ。
- (8) 極板 B を $x = 3L$ の位置まで移動させた後の、平行板コンデンサーに蓄えられた静電エネルギーを、 V_1 , C_0 のうち必要なものを用いて表せ。
- (9) 極板 B を $x = L$ から $x = 3L$ の位置まで移動させる間、極板 B には、極板 A からの一定の大きさの引力がはたらいている。この引力に逆らって極板 B を移動させるために外力がした仕事が、静電エネルギーの増加分と等しいことを利用して、極板 B が極板 A から受ける引力の大きさを、 V_1 , C_0 , L のうち必要なものを用いて表せ。

次に、底面が極板と同じ面積の正方形で、厚さが L の直方体の形をした、比誘電率が 2 の誘電体を、誘電体に外力をはたらかせながら、 x 軸に垂直で一定の向きにゆっくりと平行移動させ、図 2 のように、 $L < x < 2L$ の領域に、底面が極板と平行でコンデンサー内部からはみ出さないように挿入した。

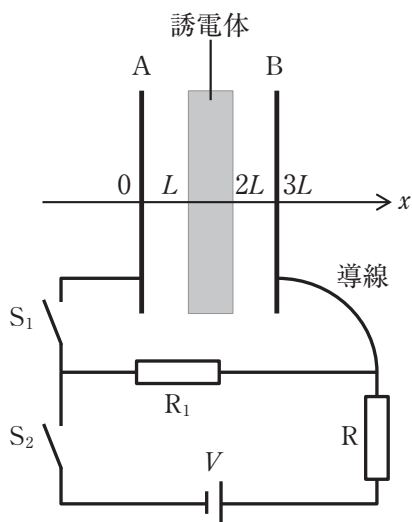


図 2

- (10) 誘電体を挿入した後の極板 A, B 間の電位差の大きさを、 V_1 , C_0 , L のうち必要なものを用いて表せ。
- (11) 極板 A の電位を 0 としたときの、極板 A, B の間の領域の各点における電位のグラフを、 $0 < x < 3L$ の範囲について、横軸を x , 縦軸を電位として、解答欄に図示せよ。ただし、解答欄のグラフの縦軸の (10) には、問(10)で求めた電位差の大きさが入るものとする。
- (12) 誘電体を挿入した後の、平行板コンデンサーに蓄えられた静電エネルギーを、 V_1 , C_0 , L のうち必要なものを用いて表せ。

- (13) 極板間に誘電体を挿入する過程に関する以下の文章の ～
 に入る最も適切な語句を選択肢から選び、記号で答えよ。

誘電体の挿入後に平行板コンデンサーに蓄えられている静電エネルギーは、誘電体の挿入前に比べて している。これは、誘電体をゆっくり挿入するときに、誘電体に加えられていた外力が、誘電体に対して の仕事をしたことを示している。

の選択肢：

- ① 増加 ② 減少

の選択肢：

- ③ 正 ④ 負

次に、スイッチ S_1 を閉じ、その後、十分長い時間 T [s] がたったところ、コンデンサーに蓄えられた電気量が 0 とみなせるようになった。

- (14) スイッチ S_1 を閉じた時刻を $t = 0$ とし、抵抗 R_1 に流れる電流の大きさと時刻 t の関係を表したグラフとして最も適切なものを、図 3 の選択肢(あ)～(か)から選び、記号で答えよ。

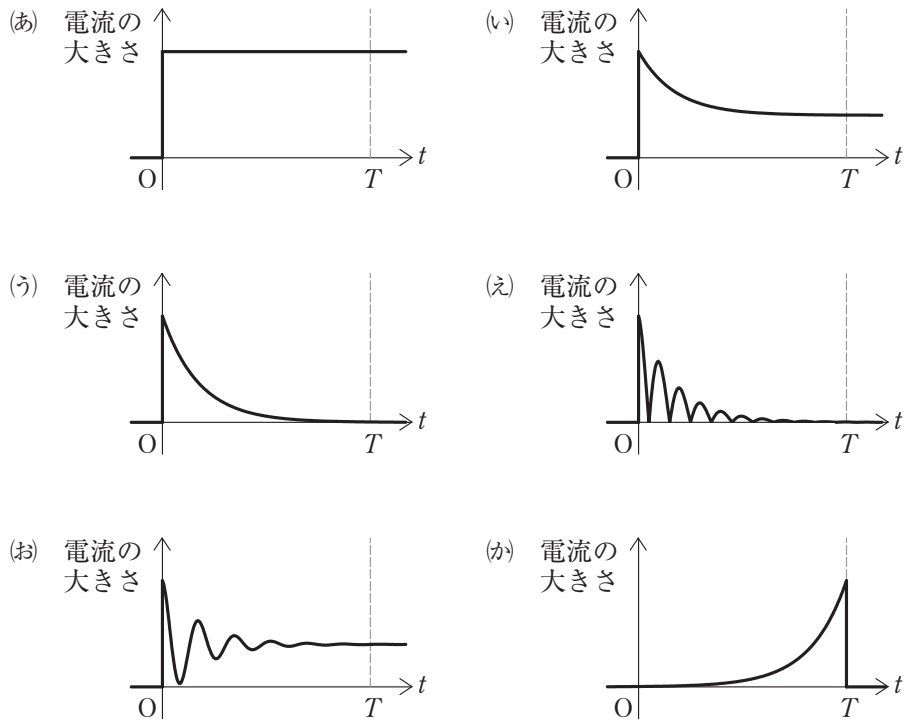


図 3

3

図1のように、大気中にシリンダーを底が左側に位置するように水平に置き、その中に断面積 S [m²] のピストン X と、任意の位置に固定できるストッパーを配置する。シリンダーとピストン X は熱容量を無視できる断熱材でできており、ピストン X はなめらかにうごくものとする。シリンダー内の気体はシリンダーの底に装着したヒーターによって加熱でき、ヒーターの体積や熱容量は無視できるものとする。また、大気圧を p_0 [Pa]、気体定数を R [J/(mol·K)] とする。



図1

【I】 図2のようにシリンダー内の底面とピストン X の間に単原子分子であるヘリウムガス n [mol] を閉じ込めた。最初、ヘリウムガスの圧力は大気圧より高く、ピストン X はストッパーにより静止していた。このときのヘリウムガスの温度は T_a [K] であり、シリンダー内の底面からピストン X の内面までの距離は L [m] であった。

この状態から、ヒーターからヘリウムガスに熱量 Q [J] ($Q > 0$) をゆっくり加えた。ヘリウムガスは理想気体としてふるまうものとし、その定積モル比熱を $\frac{3}{2}R$ 、定圧モル比熱を $\frac{5}{2}R$ とする。以下の問(1)、(2)に答えよ。

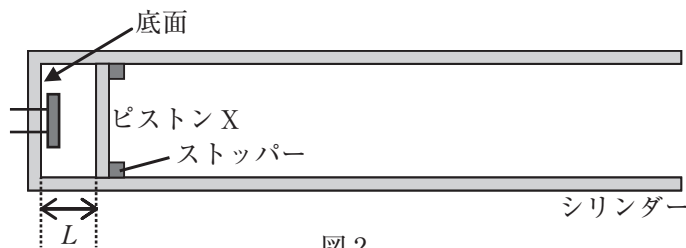


図2

- (1) 熱量 Q を加えた前後における、ヘリウムガスの温度の変化を求めよ。
- (2) 熱量 Q を加えた後のヘリウムガスの圧力を、 n 、 L 、 R 、 Q 、 S 、 T_a を用いて表せ。

【Ⅱ】 図3のように、シリンダーの右端にストッパーを固定し、シリンダーの底面とピストンXの間に n [mol] のヘリウムガスを閉じ込めた。最初、ヘリウムガスの圧力は大気圧と等しく、ピストンXはストッパーに触れない位置で静止していた。このときのヘリウムガスの温度は T_b [K] であった。

次に、ヘリウムガスをヒーターによりゆっくり加熱したところ、ピストンXがゆっくり移動した。その後、加熱を止めたところ、ピストンXはストッパーと接触する前に止まった。このときのヘリウムガスの温度は T_c [K] ($T_c > T_b$) であった。なお、ピストンXが移動している間、ヘリウムガスの圧力は大気圧と等しかったとみなせるものとする。また、ヘリウムガスは理想気体としてふるまうものとし、その定積モル比熱を $\frac{3}{2}R$ 、定圧モル比熱を $\frac{5}{2}R$ とする。以下の問(3)~(6)に答えよ。

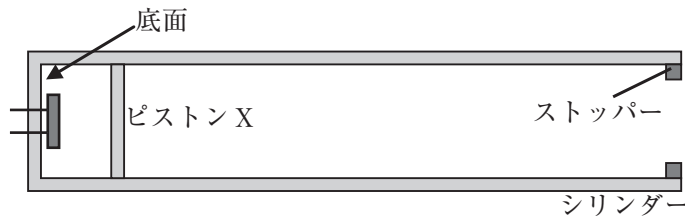


図3

- (3) 温度が T_b から T_c へ変化した間に、ヘリウムガスが得た熱量を求めよ。
- (4) 温度が T_b から T_c へ変化した間の、ヘリウムガスの内部エネルギーの変化を求めよ。
- (5) 温度が T_b から T_c へ変化した間に、ヘリウムガスがされた仕事を求めよ。
- (6) 温度が T_b から T_c へ変化した間の、ヘリウムガスの体積の変化を求めよ。

【Ⅲ】 図4のようにシリンダーの底面とピストンXの間に断面積 S [m²]のピストンYを追加し、シリンダーの底面とピストンYの間に n [mol]のヘリウムガスを、ピストンYとピストンXの間に $3n$ [mol]の窒素ガスを閉じ込めた。ピストンYは熱を伝える材料でできており、ピストンYの厚みと熱容量は無視できるものとする。さらに、ピストンYはなめらかに動くものとする。また、ストッパーはシリンダーの右端に固定した。なお、ヘリウムガスと窒素ガスは理想気体としてふるまうものとする。

最初、ヘリウムガスと窒素ガスの温度は T_A で等しく、さらにヘリウムガスと窒素ガスの圧力は共に大気圧と等しく、ピストンXとピストンYは静止していた。このときのシリンダー内の底面からピストンXの内面までの距離は L' [m]であった。この状態を状態Aとする。以下の問(7)に答えよ。

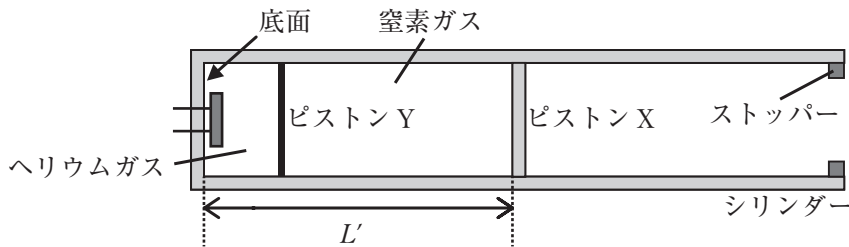


図4

- (7) 状態Aにおける窒素ガスの温度 T_A を、 L' 、 n 、 p_0 、 R 、 S を用いて表せ。

次に状態 A から、シリンダー内の気体をヒーターによりゆっくり加熱したところ、ピストン X とピストン Y がゆっくり移動した。その後、ピストン X がストッパーに接触した瞬間に加熱を止めた。このとき、シリンダー内の底面からピストン X の内面までの距離は $2L'$ であった。この状態を状態 B とする。なお、状態 A から状態 B への状態変化の間中、ヘリウムガスと窒素ガスの温度は等しかったとみなせ、さらに、ヘリウムガスと窒素ガスの圧力は共に大気圧と等しかったとみなせるものとする。状態 A から状態 B への状態変化におけるモル比熱の変化は無視できるものとし、ヘリウムガスの定積モル比熱を $\frac{3}{2}R$ 、定圧モル比熱を $\frac{5}{2}R$ 、窒素ガスの定積モル比熱を $\frac{5}{2}R$ 、定圧モル比熱を $\frac{7}{2}R$ とする。以下の問(8)~(11)に答えよ。

- (8) 状態 A から状態 B への状態変化における、窒素ガスの温度の変化を、 T_A を用いて表せ。
- (9) 状態 A から状態 B への状態変化において、窒素ガスが得た熱量を、 n 、 R 、 T_A を用いて表せ。
- (10) 状態 A から状態 B への状態変化において、窒素ガスがされた仕事を、 n 、 R 、 T_A を用いて表せ。
- (11) 状態 A から状態 B への状態変化における、窒素ガスの内部エネルギーの変化を、 n 、 R 、 T_A を用いて表せ。

次に状態 B から、シリンダー内の気体にヒーターにより熱量 Q' [J] ($Q' > 0$) をゆっくり加えた。この加熱後の状態を状態 C とする。なお、状態 B から状態 C への状態変化の間中、ピストン Y は静止していた。また、状態 B から状態 C への状態変化におけるモル比熱の変化は無視できるものとし、ヘリウムガスの定積モル比熱を $\frac{3}{2}R$ 、定圧モル比熱を $\frac{5}{2}R$ 、窒素ガスの定積モル比熱を $\frac{5}{2}R$ 、定圧モル比熱を $\frac{7}{2}R$ とする。以下の問(12)~(14)に答えよ。

- (12) 状態 C における窒素ガスの温度を、 n 、 R 、 Q' 、 T_A を用いて表せ。
- (13) 状態 A から状態 C への状態変化において、窒素ガスが得た熱量を、 n 、 R 、 Q' 、 T_A を用いて表せ。
- (14) 状態 A から状態 C への状態変化における、窒素ガスの内部エネルギーの変化を、 n 、 R 、 Q' 、 T_A を用いて表せ。