2年　　科　　番　氏名

**2024年度　第2学年　物理III　前期期末試験（担当：高橋幹弥）**
**実施日時：2024年8月1日(木) 9:00~10:00**
注意事項：回答・問題・計算用紙の<u>全てに記名</u>すること。特別な指示がない限り、<u>単位や符号・有効数字を適切に答える</u>こと。電卓等、<u>筆記用具以外は使用不可</u>とする。気体定数 $R$, ボルツマン定数 $k_B$, アボガドロ数 $N_A$, 数学記号(円周率 $\pi$ など)は断りなく用いてよい。

$\boxed{1}$ 次の(1)~(3)に答えよ。

(1) 質量 $m$, 平均速度 $\bar{v}$ で運動する単原子の気体分子を考える。
　(ア) この気体分子1個の運動エネルギーはいくらか。
　(イ) 物質量 $n$ の気体分子を個数にするといくらか。
　(ウ) 物質量 $n$ の気体分子の全運動エネルギーはいくらか。

(2) ピストン付きの容器に気体を入れる。このピストンを距離 $L$ だけ押し込んで、気体を圧縮した。ピストンに加わる力の大きさを $F$, ピストンの面積を $S$ とする。この問題では、気体がされる仕事を正の仕事と定める。
　(ア) 容器内部の気体の圧力を求めよ。
　(イ) 気体がピストンからされた仕事を求めよ。ただし気体の圧力は一定とする。
　(ウ) 気体がピストンにした仕事を求めよ。

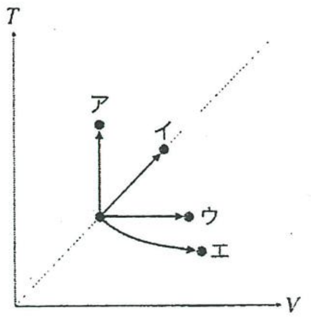
(3) ピストン付きの容器に気体（物質量 $n$, 圧力 $P$, 温度 $T_1$, 体積 $V_1$）を入れる。この容器に熱容量 $C$, 温度 $t$ $(>T_1)$の高温熱源を接触させる。十分時間が経過した後、気体の状態は圧力 $P$, 体積 $V_2$、熱源を含めた系全体の温度は $T_2$ となった。熱源と気体との間以外には熱量のやりとりはないものとする。単位物質量あたりの定圧比熱を $C_p$ とする。
　(ア) 気体が高温熱源とやりとりした熱量 $Q$ を求めよ。
　(イ) 気体の内部エネルギー変化 $\Delta U$ を、$C_p$ を用いて表せ。
　(ウ) 気体が外部にした仕事 $W$ を、$V_1, V_2$ を用いて表せ。
　(エ) $Q, \Delta U, W$ が満たすべき関係式を書け。

$\boxed{2}$ 次の(1)~(3)に答えよ。

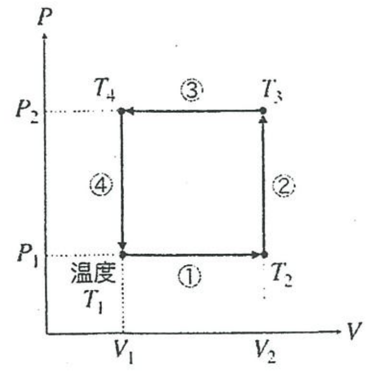
(1) 気体に加えた熱量を $Q$、気体が外部からされた仕事を $W$、気体の内部エネルギー変化を $\Delta U$ としたとき、熱力学第1法則を書け。

(2) (1)を変形することで、4つの熱力学過程（等温変化、定積変化、定圧変化、断熱変化）における熱力学第1法則を、$Q, W, \Delta U$ を用いてそれぞれ書け。

(3) T-V図（温度-体積の図）上での4つの熱力学過程（等温変化、定積変化、定圧変化、断熱変化）として、正しいものをそれぞれ右図のア～エから選べ。




$\boxed{3}$ 図のようなP-V図上での熱サイクルを考える。ただし物質量 $n$ の単原子分子理想気体を仮定する。




**[A]** 次の(1)~(6)に答えよ。ただし<u>(2), (4), (5), (6)の答えは $P_1, P_2, V_1, V_2$ のみで</u>表せ。

(1) 気体が過程①～④で外部にする仕事をそれぞれ $W_1$~$W_4$ とする。$W_1$~$W_4$ のうち、その値が0でない過程を①～④の中から2つ選べ。

(2) (1)で選んだ2つの仕事をそれぞれ求めよ。区別がつくように「$W_1$=...」のように答えること。

(3) 気体が過程①～④で吸収する熱量をそれぞれ $Q_1$~$Q_4$ とする。$Q_1$~$Q_4$ のうち、その値が正となる（気体が熱量を吸収する）過程を①～④の中からを2つ選べ。

(4) (3)で選んだ2つの過程で出入りする熱量をそれぞれ求めよ。区別がつくように「$Q_1$=...」のように答えること。

(5) (3)で選ばなかった2つの過程で出入りする熱量をそれぞれ求めよ。区別がつくように「$Q_1$=...」のように答えること。

(6) 熱サイクルの性能評価のため、成績係数なる指標 $\omega$ = (外部に放出した熱量) / (気体がされた仕事)を定義する。①～④の熱サイクルにおける成績係数 $\omega$ を求めよ。

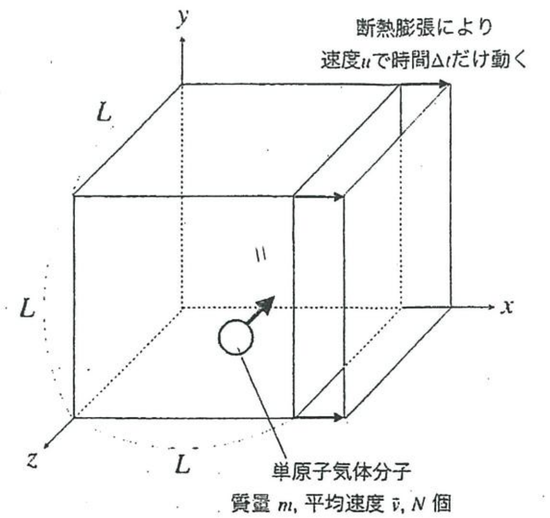
**[B]** 次の(7)~(9)に答えよ。

(7) 仕事や熱量の出入りを伴う①～④の一連の過程を経た結果、気体の温度は元に戻る。このことを利用して、①～④の熱サイクルにおいて $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, W_1, W_2, W_3, W_4$ が満たす関係式を書け。ただし、$Q$ や $W$ が0の場合も残して回答すること。

(8) 過程①+②で気体が外部にした仕事の総量を $W = W_1+W_2$、外部から吸収した熱量の総量を $Q = Q_1+Q_2$、および過程③+④で気体が外部からされた仕事の総量を $W' = -(W_3+W_4)$、外部に放出した熱量の総量を $Q' = -(Q_3+Q_4)$として、(7)で得た関係式を書き直す。すると、過程①+②と過程③+④で一定となる量の存在が見出せる。この量を $Q$ と $W$、または $Q'$ と $W'$ を用いて表せ。

(9) (8)で見出した量は、ある物理量の変化を表す。その物理量とはなにか。

4 図のように、質量 $m$, 平均速度 $\bar{v}$ で運動する単原子分子理想気体 $N$ 個を、一辺の長さが $L$ の自由に動く正方形のピストンで容器に閉じ込める。いま、気体分子運動論により、気体の圧力は $P = Nm\bar{v}^2/3L^3$ で与えられるものとする。次の(1)~(4)に答えよ。




(1) 気体分子運動論に基づいて気体の圧力 $P = Nm\bar{v}^2/3L^3$ を導く過程を、以下のア～キの中から5つ選び、正しく並び替えよ。

ア：気体分子1個の衝突前後での運動エネルギーの変化を求める。

イ：気体分子を $N$ 個、運動を3方向に拡張し、$N$ 個の分子が壁に与える力を求める。

ウ：気体分子1個の衝突前後での運動量の変化を求める。

エ：気体分子1個が壁に与える仕事を求める。

オ：$N$ 個の気体分子が壁に与える圧力を求める。

カ：気体分子1個が壁に与える（時間的な）平均の力を求める。

キ：気体分子1個が壁に与える力積を求める。

(2) 気体が断熱膨張し、速度 $u$ でピストンが $x$ 方向に時間 $\Delta t$ だけ動いた。このとき、容器の体積の変化 $\Delta V$ を求めよ。

(3) 体積が $\Delta V$ だけ変化したときの気体の温度変化 $\Delta T$ を、$m$, $\bar{v}$, $u$, $\Delta t$, $L$, $k_B$ で表せ。ただし、圧力 $P$ は断熱膨張の前後で一定とする。

(4) この断熱膨張によって、気体の温度はどうなるか。(3)の結果に基づいて、以下のア～エの中から正しい記述を1つ選べ。

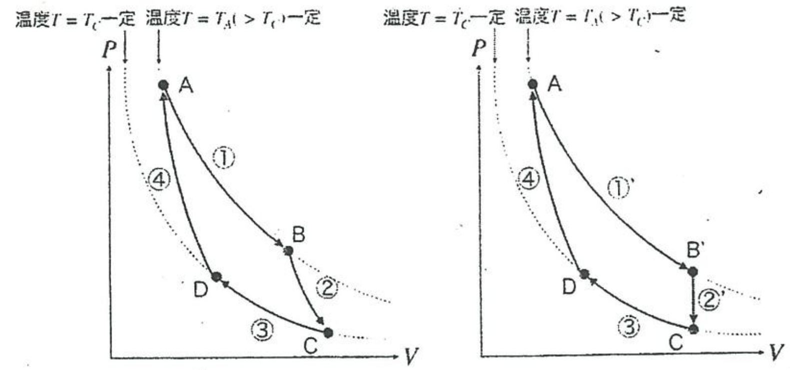
ア：(3)で $\Delta T<0$ となったので、気体の温度は上がる。

イ：(3)で $\Delta T>0$ となったので、気体の温度は上がる。

ウ：(3)で $\Delta T<0$ となったので、気体の温度は下がる。

エ：(3)で $\Delta T>0$ となったので、気体の温度は下がる。

5 次の文章を読んで、(1)~(7)に適切な式を入れよ。ただし、**(6)は物質量，温度，比熱比 $\gamma$ と各種物理定数のみで回答し、(7)は枠内の5つの記号の中から適切なものを選べ。**




まず、物質量 $n$ の気体に対して、左図のようなカルノーサイクルを考える。状態 A, B, C, D における(圧力，体積，温度)を、それぞれ$(P_A, V_A, T_A)$, $(P_B, V_B, T_A)$, $(P_C, V_C, T_C)$, $(P_D, V_D, T_C)$とする。気体が吸収する熱を $Q$, 気体が外部にする仕事を $W$ とし、各過程の $Q$, $W$ は下付きの数字 1, 2, 3, 4 をつけて表すことにすると、それぞれの過程における熱力学第1法則は以下のように書ける：

① (等温膨張)：$Q_1 = W_1 = nRT_A \log (V_B / V_A)$,

② (断熱膨張)：$T_A V_B^{\gamma-1} = T_C V_C^{\gamma-1}$ ($\gamma$ は比熱比),

③ (等温収縮)：$Q_3 = W_3 = nRT_C \log (V_D / V_C)$,

④ (断熱収縮)：$T_A V_A^{\gamma-1} = T_C V_D^{\gamma-1}$ ($\gamma$ は比熱比).

気体の状態が変化する間の全吸熱量と温度を用いて $S = Q / T$ という量を導入すると、過程①, ③における $S$ は、$S_1 =$ [ (1) ] , $S_3 =$ [ (2) ]. また、過程②と④の結果を用いると、$V_B / V_A =$ [ (3) ]. (1),(2),(3)の結果から、$S = S_1 + S_3 =$ [ (4) ].

次に、右図のように状態 B だけを状態 B'にわずかに変更した熱サイクルを考える。状態 B'における(圧力，体積，温度)を$(P_{B'}, V_C, T_A)$とする。A から B'を過程①', B'から C を過程②'とすると、熱力学第1法則は以下のように書ける（③, ④は同じ）：

①' (等温膨張)：$Q_1' = W_1' = nRT_A \log (V_C / V_A)$,

②' (定積変化)：$Q_2' = 3/2\, nR\, (T_C - T_A)$.

過程①', ②'の結果をそれぞれ用いて、$S_1' =$ [ (5) ] , $S_2' = 3/2\, nR \log (T_C / T_A)$ . 以上の結果から、$S = S_1' + S_2' + S_3 =$ [ (6) ]. さらに、右図の熱サイクルの熱効率 $\eta'$ は、カルノーの定理より、カルノーサイクルの熱効率 $\eta_c = 1 - T_C / T_A$ よりも小さくなる。つまり、$T_A$ と $T_C$ を固定した場合、カルノーサイクルから少しだけずれた熱サイクルでは、熱効率が低下するとともに $S$ の値も変化することがわかる。

以上より、(4)と(6)の結果を用いると、ここで考えた2つの熱サイクルについて、$S$ に関する不等式：$S$ [ (7) =, <, >, ≧, ≦ ] 0 が成立することがわかる。この不等式をクラウジウスの不等式といい、$S = Q / T$ をエントロピーという。

# 2024年度 第2学年 物理III 前期期末試験 回答用紙

2年＿＿科＿＿番　名前＿＿＿＿＿＿＿＿　　点

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1 | (1) (ア) | (1) (イ) | (1) (ウ) | |
| | (2) (ア) | (2) (イ) | (2) (ウ) | |
| | (3) (ア) | (3) (イ) | (3) (ウ) | (3) (エ) |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 2 | (1) | | | |
| | (2) 等温： | | (2) 定積： | |
| | (2) 定圧： | | (2) 断熱： | |
| | (3) 等温： | (3) 定積： | (3) 定圧： | (3) 断熱： |

| | | |
|---|---|---|
| 3 | (1) | |
| | (2) 1つ目： | (2) 2つ目： |
| | (3) | |
| | (4) 1つ目： | (4) 2つ目： |
| | (5) 1つ目： | (5) 2つ目： |
| | (6) | |
| | (7) | |
| | (8) | (9) |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 4 | (1) → → → → | | |
| | (2) | (3) | (4) |

| | | |
|---|---|---|
| 5 | (1) | (2) |
| | (3) | (4) |
| | (5) | (6) |
| | (7) | |