

熱機関 (thermal engine)

熱機関とは、熱を仕事に変換するための装置のことである。熱から仕事への最大の変換効率（熱効率）を示す理想的な熱機関として、理想気体を作業物質として、2つの温度 T_H と T_L ($T_H > T_L$) の間で膨張・圧縮を繰り返す次の4つのプロセスから成る**カルノーサイクル**が知られている（図 5w.1）。

カルノーサイクルの各過程

Process 1. 温度 T_H において圧力 P_1 , 体積 V_1 から圧力 P_2 , 体積 V_2 に等温可逆膨張させる。温度を一定に保つためには外部から熱を加える必要があるため、このときに加える熱を q_2 , 熱機関が外界からなされる仕事を w_1 とすると $q_2 > 0, w_1 < 0$ である。

Process 2. 断熱可逆膨張により, $(P, V, T) = (P_2, V_2, T_H)$ から (P_3, V_3, T_L) まで変化させる。断熱過程であるため、熱機関に加えられた熱 $q = 0$ 。熱機関に外界からされる仕事を $w_2 (> 0)$ とする。

Process 3. 温度 T_L において圧力 P_3 , 体積 V_3 から圧力 P_4 , 体積 V_4 に等温可逆圧縮する。温度を一定に保つためには外部に熱を奪う必要がある。このときに加える熱を q_1 , 熱機関が外界からなされる仕事を w_3 とする ($q_1 < 0, w_3 > 0$)。

Process 4. 断熱可逆膨張により, $(P, V, T) = (P_4, V_4, T_L)$ から初期状態 (P_1, V_1, T_H) に戻す。断熱過程であるため、熱機関に加えられた熱 $q = 0$ 。熱機関に外界からされる仕事を $w_4 (< 0)$ とする。

4つの過程のトータルとして、機関に与えられた熱量は $Q = q_1 + q_2$ であり、外界から機関へなされた仕事量は $W = w_1 + w_2 + w_3 + w_4$ となる。ここで、熱機関内部の理想気体の内部エネルギー変化 ΔU を考える。初期状態と4つのプロセスを経た終状態は同じ状態になっているので、状態関数である内部エネルギーのトータルで

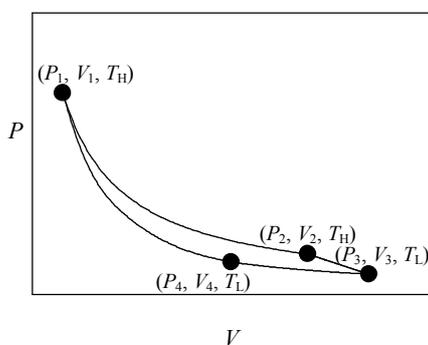


図 5w. 1 カルノーサイクル

で、状態関数である内部エネルギーのトータルでの変化はなく、 $\Delta U = 0$ である。一方、第一法則から $\Delta U = Q + W$ であるため、 $-W = Q$ が成り立つ。

ここで、 $-W$ は機関が外界からなされた仕事の逆符号、すなわち機関が外界になした仕事である。通常、熱機関と言うのは燃料の燃焼などにより機関に含まれる作業物質に熱 (q_2 に相当) を加えて膨張させ、空冷または水冷によって熱 (q_1 に相当) を奪って収縮させる。つまり、外界からエネルギーとして積極的に加えている熱は q_2 のみであり、

q_1 は外界に逃げていく熱に過ぎない。熱機関の性能は、熱機関に加えた熱のどの程度が仕事に変換できるかによって決まる。これを**熱効率**と呼び、

$$\eta = \frac{-W}{q_2} = \frac{q_2 + q_1}{q_2} \quad (5w-1)$$

で表される。

また、カルノーサイクルはすべて可逆過程からなる変化であるので、各過程における系のエントロピー変化は $dq = TdS$ の関係に従う (図 5w. 2)。 S もまた状態関数であるので、4つの過程を経て元の状態に戻ればトータルのエントロピー変化は、 $\Delta S = 0$ である。

各過程におけるエントロピー変化について見てみると、process 1 では、温度 T_H で q_2 の熱を受け取っているの、 $\Delta_{1 \rightarrow 2} S = S_2 - S_1 = \frac{q_2}{T_H}$ 。以下、

$$\text{process 2 : } \Delta_{2 \rightarrow 3} S = 0$$

$$\text{process 3 : } \Delta_{3 \rightarrow 4} S = S_1 - S_2 = \frac{q_1}{T_L}$$

$$\text{process 4 : } \Delta_{4 \rightarrow 1} S = 0$$

となる。従って、

$$\begin{aligned} \Delta_{\text{total}} S &= \Delta_{1 \rightarrow 2} S + \Delta_{2 \rightarrow 3} S + \Delta_{3 \rightarrow 4} S + \Delta_{4 \rightarrow 1} S \\ &= \frac{q_2}{T_H} + \frac{q_1}{T_L} = 0 \end{aligned} \quad (5w-2)$$

(5w-1), (5w-2) 式より

$$\eta = \frac{T_H - T_L}{T_H} \quad (5w-3)$$

が得られる。(5w-3) 式からわかることは、熱機関の理想的最大効率は系の最高温度と最低温度のみで決まり、 T_L を低く保つことが重要であるかということである。実際のエンジンでも、冷却機構がエンジンの出力を決める重要な要素となっており、いかに効率よくエンジンを冷却するかが大きなポイントの一つである。

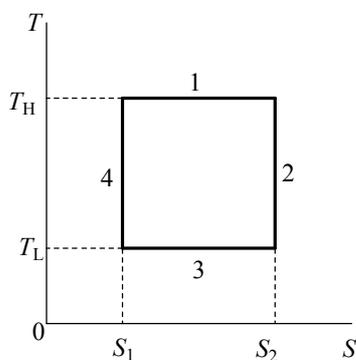


図 5w. 2 カルノーサイクルにおけるエントロピー変化