

熱力学

目次

1	熱力学第一法則	2
1.1	閉じた系	2
1.2	内部エネルギー	2
1.3	開いた系	2
1.4	エンタルピー	2
2	理想気体	3
3	熱力学第二法則	3
3.1	仕事	3
3.2	熱効率	4
4	エントロピー	4
5	加熱・放熱	4
5.1	等容過程	5
5.2	等圧過程	5
6	膨張・圧縮	5
6.1	等温過程	6
6.2	断熱 (等エントロピー) 過程	6
6.3	ポアソンの式とその導出	6
7	サイクル	7
7.1	カルノーサイクル	7
7.2	オットーサイクル	7
7.3	ディーゼルサイクル	8
7.4	サバテサイクル	8
7.5	ブレイトンサイクル	8
8	再生ブレイトンサイクル	9
9	乾き度	9
9.1	湿り蒸気	9

1 熱力学第一法則

熱と仕事は本質的に同種のエネルギーであり、それらは互いに**変換可能**である

1.1 閉じた系

物質の出入りのない系のことを**閉じた系**という。例) ピストン-シリンダ系

閉じた系の熱力学第一法則

$$Q = \Delta U + W$$

Q : 受熱量

ΔU : 内部エネルギーの変化量

W : 絶対仕事 (気体のした仕事)

1.2 内部エネルギー

個々の分子は力学的エネルギー (位置エネルギー + 運動エネルギー) を持っている。

それを巨視的に見たときに分子の持つ**内部エネルギー**と呼ぶ。

内部エネルギーの変化量

$$\Delta U = mC_v\Delta T$$

初期状態を (P, v, T) とする。

※ v は比容積

1.3 開いた系

物質の出入りがある系のことを**開いた系**という。例) タービン

また、このとき取り出される仕事を**工業仕事**という。

開いた系の熱力学第一法則

$$Q = \Delta H + W_t$$

Q : 受熱量

ΔH : エンタルピーの変化量

W_t : 工業仕事 (気体のした仕事)

1.4 エンタルピー

内部エネルギーと流動エネルギーを合わせたものをエンタルピーと定義される。

Point

閉じた系における等圧過程での受熱量 (放熱量) のこと!!

エンタルピー

$$H = U + W$$

エンタルピーの変化量

$$\Delta H = mC_p\Delta T$$

2 理想気体

状態方程式

$$PV = mRT$$

$$Pv = RT \quad (\text{単位質量基準の場合})$$

※ v : 比容積

マイヤーの法則

$$C_p = C_v + R$$

C_p : 定圧比熱

C_v : 定容比熱

3 熱力学第二法則

熱は高いほうから低いほうへと移動するという**不可逆現象**のことを指す.

3.1 仕事

仕事

$$W = Q_H - Q_L$$

$$W = \int PdV \quad (\text{閉じた系の絶対仕事})$$

$$W_t = \int VdP \quad (\text{開いた系の工業仕事})$$

正味の仕事

$$\begin{aligned} W_{net} &= (\text{膨張過程で した仕事}) - (\text{圧縮過程で された仕事}) \\ &= (\text{膨張過程で した仕事}) + (\text{圧縮過程で した仕事}) \\ &= (\text{膨張過程で された仕事}) + (\text{圧縮過程で された仕事}) \end{aligned}$$

3.2 熱効率

Point

基本は, 受熱量 Q_{in} と放熱量 Q_{out} で考える

※ 等圧変化を含むサイクルの場合、正味の仕事 W_{net} は加熱過程にも含まれるため、計算が複雑になる

熱効率

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

4 エントロピー

2つの状態間を不可逆的に変化させたとき、その変化の経路に無関係に一定となる値 (状態量) のこと。
また、その変化の不可逆性の大きさを示す。可逆断熱過程では、エントロピーの変化はゼロになる。

エントロピー

$$\int \frac{dQ}{T} = const$$

5 加熱・放熱

Point

T-S 線図をすぐにイメージできるかがカギ

右肩上がりの線 (比例) が描ける

$C_p > C_v$ より、傾きは 定積変化 > 定容変化

加熱・放熱

(1) 等容加熱

体積 → 一定, 圧力 → 増加, 温度 → 増加, エントロピー → 増加

(2) 等容放熱

体積 → 一定, 圧力 → 減少, 温度 → 減少, エントロピー → 減少

(3) 等圧加熱

体積 → 増加, 圧力 → 一定, 温度 → 増加, エントロピー → 増加

(4) 等圧放熱

体積 → 減少, 圧力 → 一定, 温度 → 減少, エントロピー → 減少

5.1 等容過程

Point

$$\frac{P}{T} = \text{const}$$
$$Q = \Delta U = mC_v \Delta T$$

$$\Delta s = \int \frac{dQ}{T} = \int \frac{dU}{T} = C_v \int \frac{1}{T} dT$$

5.2 等圧過程

Point

$$\frac{V}{T} = \text{const}$$
$$Q = \Delta U + W = mC_p \Delta T (= \Delta H)$$

$$\Delta s = \int \frac{dQ}{T} = \int \frac{dH}{T} = C_p \int \frac{1}{T} dT$$

6 膨張・圧縮

Point

P-V 線図をすぐにイメージできるかがカギ

右肩下がりの線 (反比例) が描ける

体積の変化量が等しいとき, $C_p > C_v$ より, 傾きは 断熱変化 > 等温変化

膨張・圧縮

(1) 等温膨張

体積 → 増加, 圧力 → 減少, 温度 → 一定, エントロピー → 増加

(2) 等温圧縮

体積 → 減少, 圧力 → 増加, 温度 → 一定, エントロピー → 減少

(3) 断熱膨張

体積 → 増加, 圧力 → 減少, 温度 → 減少, エントロピー → 一定

(4) 断熱圧縮

体積 → 減少, 圧力 → 増加, 温度 → 増加, エントロピー → 一定

6.1 等温過程

Point

$$PV = \text{const}$$

$$Q = W$$

$$\Delta S = \int \frac{dQ}{T}$$

$$= \frac{1}{T} \int P dv \text{ (閉じた系)}$$

$$= \frac{1}{T} \int V dp \text{ (開いた系)}$$

6.2 断熱 (等エントロピー) 過程

Point

$$PV^\kappa = \text{const}$$

$$\Delta U = -W$$

$$\Delta s = 0$$

6.3 ポアソンの式とその導出

ポアソンの式

$$PV^\kappa = \text{const}$$

熱力学第一法則より, 断熱過程では

$$\begin{aligned} 0 &= du + Pdv \\ &= C_v dT + Pdv \end{aligned}$$

両辺に気体定数 R をかけて,

$$0 = C_v R dT + R P dv$$

理想気体の式 $Pv = RT$ と比熱の関係式, マイヤーの式 $C_v + R = C_p$ より

$$\begin{aligned} 0 &= C_v d(Pv) + (C_p - C_v) P dv \\ &= C_v (P dv + v dP) + (C_p - C_v) P dv \\ &= C_v v dP + C_p P dv \end{aligned}$$

両辺を $C_v Pv$ で割って

$$0 = \frac{dP}{P} + \kappa \frac{dv}{v}$$

両辺を積分すると,

$$\begin{aligned} const &= \ln P + \kappa \ln v \\ &= P v^\kappa \end{aligned}$$

7 サイクル

あくまで, 理論上のサイクルでありすべて閉じた系と仮定している.

7.1 カルノーサイクル

過程

(1) 断熱圧縮 → (2) 等温膨張 → (3) 断熱膨張 → (4) 等温圧縮

受熱量をすべて仕事に変換できる等温変化を用いるため, サイクルの中で最も高い熱効率となる.

熱効率

$$\eta_{thc} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

7.2 オットーサイクル

過程

(1) 断熱圧縮 → (2) 等容加熱 → (3) 断熱膨張 → (4) 等容放熱

圧縮率

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_3}{V_4} > 1$$

熱効率

$$\eta_{tho} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}}$$

ガソリンエンジンの基本サイクル.

7.3 ディーゼルサイクル

過程

(1) 断熱圧縮 → (2) 等圧加熱 → (3) 断熱膨張 → (4) 等容放熱

縮切比 (等圧膨張比)

$$\sigma = \frac{V_3}{V_2} > 1$$

ディーゼルエンジンのサイクル.

7.4 サバテサイクル

過程

(1) 断熱圧縮 → (2) 等容加熱 → (3) 等圧加熱 → (3') 断熱膨張 → (4) 等容放熱

圧力比

$$\alpha = \frac{P_3}{P_2} > 1$$

高速ディーゼルサイクル. 受熱過程が等容変化と等圧変化の組み合わせになっている.

7.5 ブレイトンサイクル

過程

(1) 断熱圧縮 → (2) 等圧加熱 → (3) 断熱膨張 → (4) 等圧放熱

ガスタービンやジェットエンジンの基本サイクル.

※ 閉じた系と仮定している

断熱効率

$$\eta = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1} < 1 \quad (\text{圧縮機})$$
$$\eta = \frac{h_3 - h_{4a}}{h_3 - h_{4s}} < 1 \quad (\text{タービン})$$

逆仕事比

$$r_b w = \frac{w_c}{w_t}$$

w_c : 圧縮機からされた仕事

w_t : タービンに下仕事

8 再生ブレイトンサイクル

9 乾き度

Point

単位質量あたりに含まれている蒸気の質量 → **乾き度**

蒸気中の気相部分と液相部分の重量割合のことを**乾き度**という.

1kg の湿り蒸気が x kg の蒸気と $(1 - x)$ kg の液体から成るとき, x を**乾き度**, $(1 - x)$ を**湿り度**という.

9.1 湿り蒸気

飽和蒸気と飽和水が共存している状態のこと.