

熱力学

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

$$W = Q_H - Q_L$$

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

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

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

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

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 増加

(2) 等容放熱

体積 一定, 圧力 減少, 温度 減少, エントロピ 減少

(3) 等圧加熱

体積 増加, 圧力 一定, 温度 増加, エントロピ 増加

(4) 等圧放熱

体積 減少, 圧力 一定, 温度 減少, エントロピ 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 (未完成)

9 乾き度 (未完成)

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.