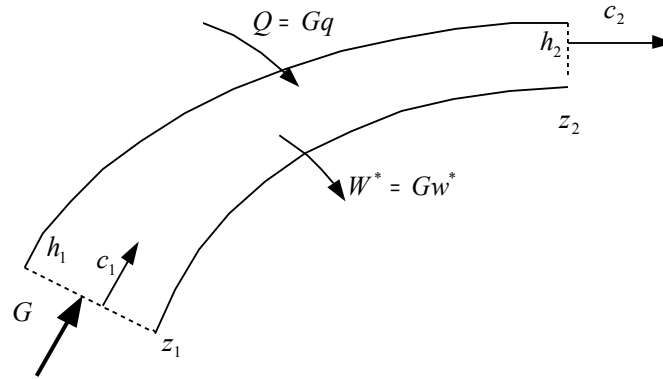


第23回 水・蒸気の状態変化

(次回以降のランキンサイクル, 冷凍機等で使えるように)

1. 開いた系(定常な流れ系)の基礎式



定常流れ系

開いた系とは, 物質の出入を伴う系のことである。

水力学・流体力学とのつながりを考えて, 「流れ系」ともよばれるが非定常流れは考えないので, 「定常流れ系」とよぶ場合もある。

実用上の機器のほとんどは, 開いた系である。

開いた系の熱力学第一法則(エネルギー保存則)は, 次式で表される。

$$Q = G(h_2 - h_1) + W^* \quad (1)$$

ただし, G は質量流量(kg/s)であり, Q , W^* は単位時間あたりの加熱量と工業仕事(kJ/s = kW)。

熱力学で扱う多くの問題では, 速度や位置のエネルギーは他のエネルギーに比べて微小であり, 無視される。これら速度または位置エネルギーが無視できないときは, 第一法則は次式となる。

$$Q - W^* = G(h_2 - h_1) + G \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) + Gg(z_2 - z_1) \quad (2)$$

単位質量あたりの式に書き直すと

$$q - w^* = (h_2 - h_1) + \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) + g(z_2 - z_1) \quad (2)$$

ただし, c は速度, z は適当な水平面からの高さである。

$h = u + pv = u + p/\rho$ であることを考えると, 上式はベルヌーイ式

$$\frac{p}{\rho} + \frac{1}{2}c^2 + gz = \text{const.}$$

を拡張したものと考えてもよい。

ただし, ベルヌーイ式には非粘性, 非圧縮性の条件がつくが, 上式ではこれらの条件はつかない。粘性による機械的エネルギーの消失は, 熱エネルギーとしての内部エネルギー u (従ってエンタルピー h) の増加となる。膨張による外部への仕事は同じく u (従って h) の減少として考慮されている。

通常は位置のエネルギーは無視でき, 速度エネルギーもノズル等以外では無視できる。

2. 単純な加熱・冷却

管内を流れている蒸気(その他の流体)を単純に加熱または冷却する場合,

$$W^*=0$$

となることより,

$$Q=G(h_2-h_1) \quad (3)$$

の関係が得られる。

等圧でない場合も含めて, 加熱量はエンタルピーの増加量となる。

3. 流れの混合

管内を流れている2種類の蒸気(またはその他の流体)が混合する場合を考える。

熱量および仕事の出入りはないものとする。

$$Q=W^*=0 \text{ より, } Gh=\text{const.} \text{ が成立する。}$$

比エンタルピー h_1 の蒸気 G_1 (kg/s) と, 比エンタルピー h_2 の蒸気 G_2 (kg/s) が混合して

比エンタルピー h_3 の蒸気 G_3 (kg/s) となる場合,

$$\text{質量保存則より, } G_1+G_2=G_3$$

$$\text{エネルギー保存則より, } G_1h_1+G_2h_2=G_3h_3$$

これより,

$$(G_1+G_2)h_3=G_1h_1+G_2h_2 \quad (4)$$

4. 断熱絞り, 管路抵抗

断熱された管内を蒸気が流れて, 管まさつやその他の抵抗により圧力が降下する場合。

$$Q=W^*=0 \text{ より,}$$

$$h=\text{const.} \quad (5)$$

圧力は低下し, (非可逆変化であるから) エントロピーが増加する。

応用例: 絞り熱量計(教科書 p.80)。

6. ノズルとディフューザ

タービンはノズルと回転羽根車(反動タービンではノズル)で構成されている。

ノズル内では蒸気は断熱膨張($Q=0$)を行い, 速度エネルギーが増加する。

$$h_2-h_1+\frac{1}{2}(c_2^2-c_1^2)=0 \text{ より,}$$

$$c_2=\sqrt{2(h_1-h_2)+c_1^2}\approx\sqrt{2(h_1-h_2)} \quad (8)$$

が成立する。単位に注意すること。

可逆変化では, エントロピーが一定となる。

不可逆変化では, 生じるとエントロピーが増加して, 出口速度が低下する。

ディフューザでは, ノズルと逆の変化が生じて

$$h_2 = h_1 + \frac{1}{2}(c_1^2 - c_2^2) \approx h_1 + \frac{1}{2}c_1^2 \quad (9)$$

この場合、不可逆変化が生じるとエントロピーが増加し、同じ速度差(同じエンタルピー増加)でも、圧力の上昇が少なくなる。

5. タービン, 圧縮機

タービン内では断熱膨張を行うので、 $Q=0$ より

$$w^* = h_1 - h_2 \quad (6)$$

$h-s$ 線図の縦軸の差が仕事量となる。

摩擦がなく可逆変化を行った場合は、等エントロピー変化 $1 \rightarrow 2$ $s_1 = s_2$,
仕事 $h_1 - h_2$

となる。

非可逆変化では、エントロピーが増加してする方向へずれて、 $1 \rightarrow 2'$

仕事量 $h_1 - h_{2'}$ が減少する。

$$\eta = \frac{h_1 - h_{2'}}{h_1 - h_2}$$

(7)

をタービン内部効率、 $h_1 - h_2$ を断熱熱落差という。

圧縮機では、外部から仕事加わり、圧力とエンタルピーが上昇する。タービンと逆の変化。この場合、不可逆変化が生じるとエントロピーが増加して、必要な仕事量が増加する。蒸気の圧縮機は冷凍機等で用いられている。

