

緒言 熱力学の意義

◎機械工学科で学ぶ熱力学

工業熱力学

熱を有用な仕事に変換するしくみ、変換の際の
法則・関係式を学ぶ

◎熱の利用と文明発展の関係

第1段階:

火という形態で利用(熱の直接利用)

- 肉・魚・穀物・野菜等を焼く、煮るのに利用→調理の始まり、食環境の改善
- 暖房に利用→住環境の改善
- その他、物の加熱に利用

◎熱の利用と文明発展の関係

第2段階:

熱を物を動かす力(動力)に変換して利用(熱機関)
従来(人力、家畜等を利用)に比べ、大きな力を好きな時に
継続して使える

最初の熱機関: 蒸気機関

- 1712年: ニューコメンの蒸気機関
- 1776年: ワットの汎用蒸気機関
→ 18世紀後半の産業革命に寄与

より高効率で大きな動力を発生する熱機関

- 1876年: オットーサイクル熱機関
- 1897年: ディーゼルサイクル機関

◎工業熱力学の必要性(環境問題との関係)

- 地球温暖化、大気汚染等の環境問題

原因は化石燃料の大量消費(図1.2参照)

- エネルギー問題

エネルギー消費量は年々増大(大部分は化石燃料に依存)

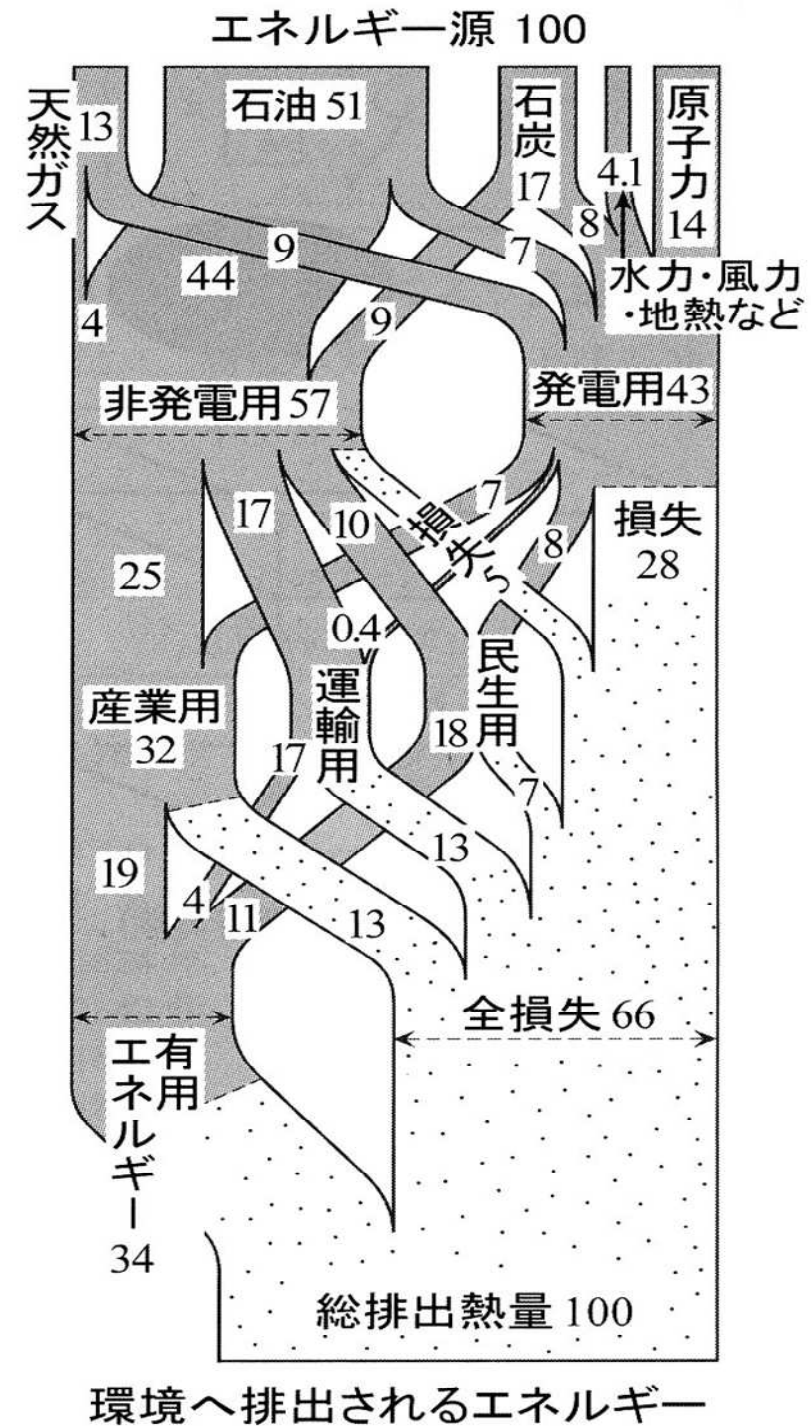
最近は化石燃料の枯渇よりもCO₂排出抑制の方が問題に



エネルギー消費量削減の必要性

- 消費者の立場: 使うエネルギーを少なくする(エコな生活、省エネを心がける)
- 技術的な立場: 各機器のエネルギー損失を小さくする(エネルギー効率を上げる)(図1.1参照)

エネルギー供給・消費



◎工業熱力学の必要性(環境問題との関係)

さらに熱の立場から見ると...

熱機関: 熱を動力に変換する装置

社会・生活基盤を支える最重要機器

熱源としては、従来は化石燃料が主

この**熱効率をいかに上げるか**が重要

◎各種熱機関の熱効率

- ニューコメンの蒸気機関(図1.6) 1%以下、ワットの蒸気機関数%程度
- 車のエンジン: ガソリン20~25%、ディーゼル25~35%程度
- ガスタービン・蒸気タービン複合サイクル: 最先端設備では50%を超える

◎熱力学A,Bで学ぶこと

熱力学A: 熱と仕事と気体の状態(温度、圧力、体積、内部エネルギー等)変化の関係

- 第2章: 熱力学の基本物理量と単位
- 第3章: 熱力学第1法則(熱力学的エネルギー保存則)

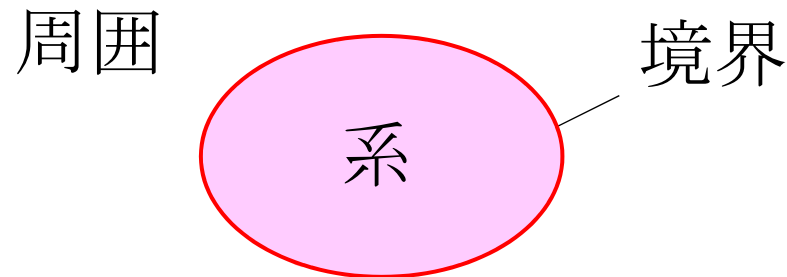
熱力学B: 各種熱機関の種類・しくみとその熱効率

- 第4章: 熱力学第2法則(熱を連続的に仕事に変換する際の制約)
- 第8章: ガスサイクル
- 第9章: 蒸気サイクル

第2章 基本概念

系

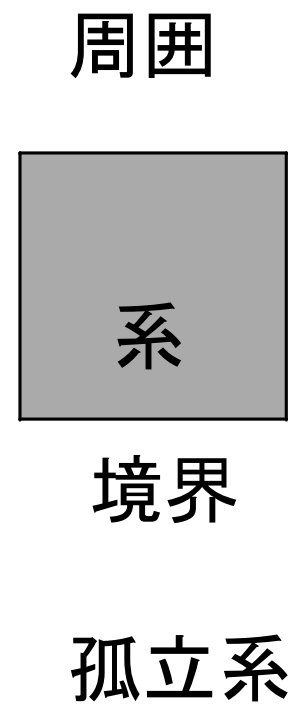
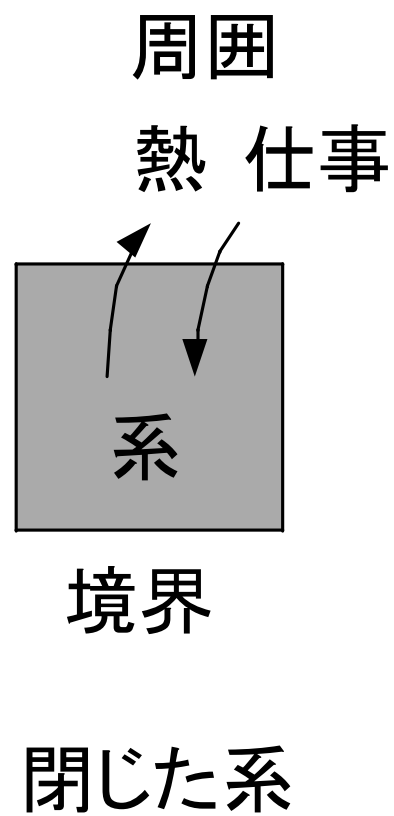
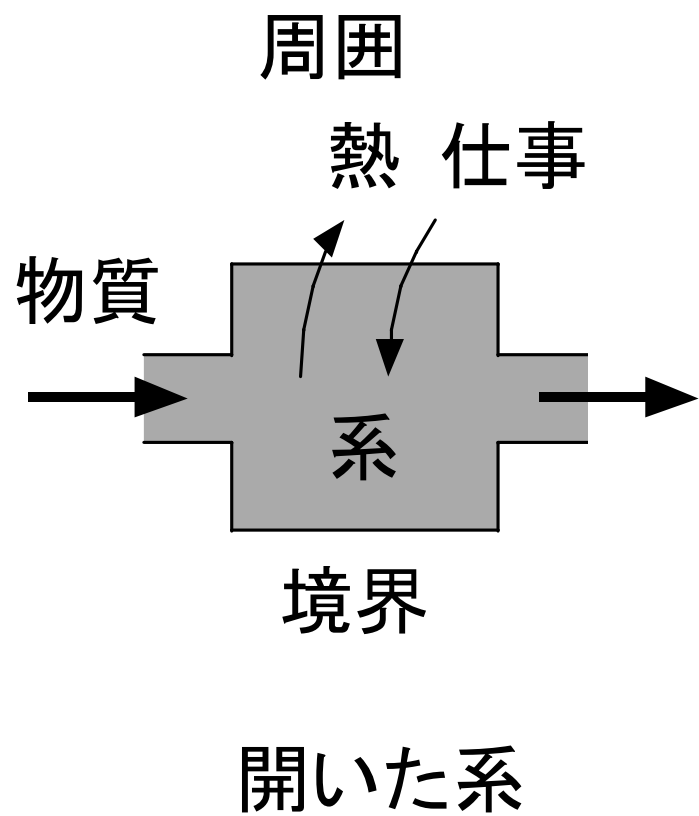
ある空間の特定部分を**周囲**から**境界**で隔てた**検査体積**内の領域



閉じた系: 境界を通した**物質の出入り**がない

開いた系: // ある

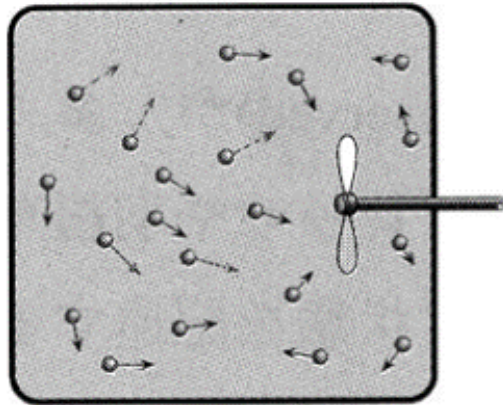
孤立系: 閉じた系で、さらに**エネルギーの出入り**もない



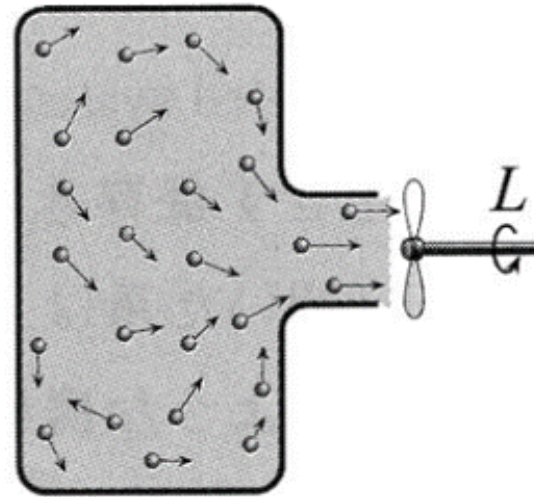
◎エネルギーの形態

- ・運動エネルギー
- ・ポテンシャルエネルギー
位置エネルギー、ばねの弾性エネルギー
- ・電磁気エネルギー、化学エネルギーなど

◎ 微視的エネルギーと巨視的エネルギー



(a) 微視的エネルギー
プロペラは回せない



(b) 巨視的エネルギー
プロペラを回せる

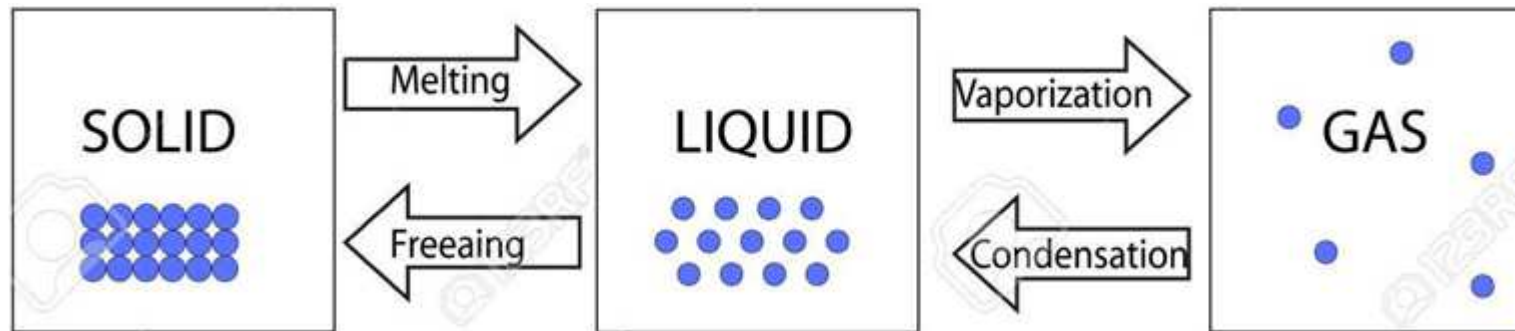
◎ 内部エネルギー

- 物質を構成する粒子の運動、ポテンシャルなどで蓄えられる微視的エネルギー（何らかの方法で巨視的エネルギーとして取り出し可能）
- 顕熱(sensible heat, 温度とともに上昇)と潜熱(latent heat, 相変化に必要な熱量)がある

◎相変化と潜熱について

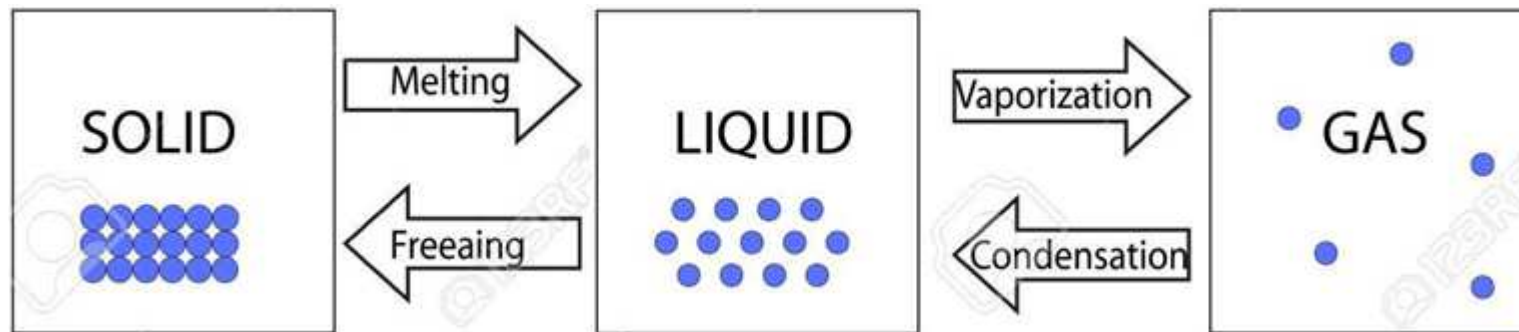
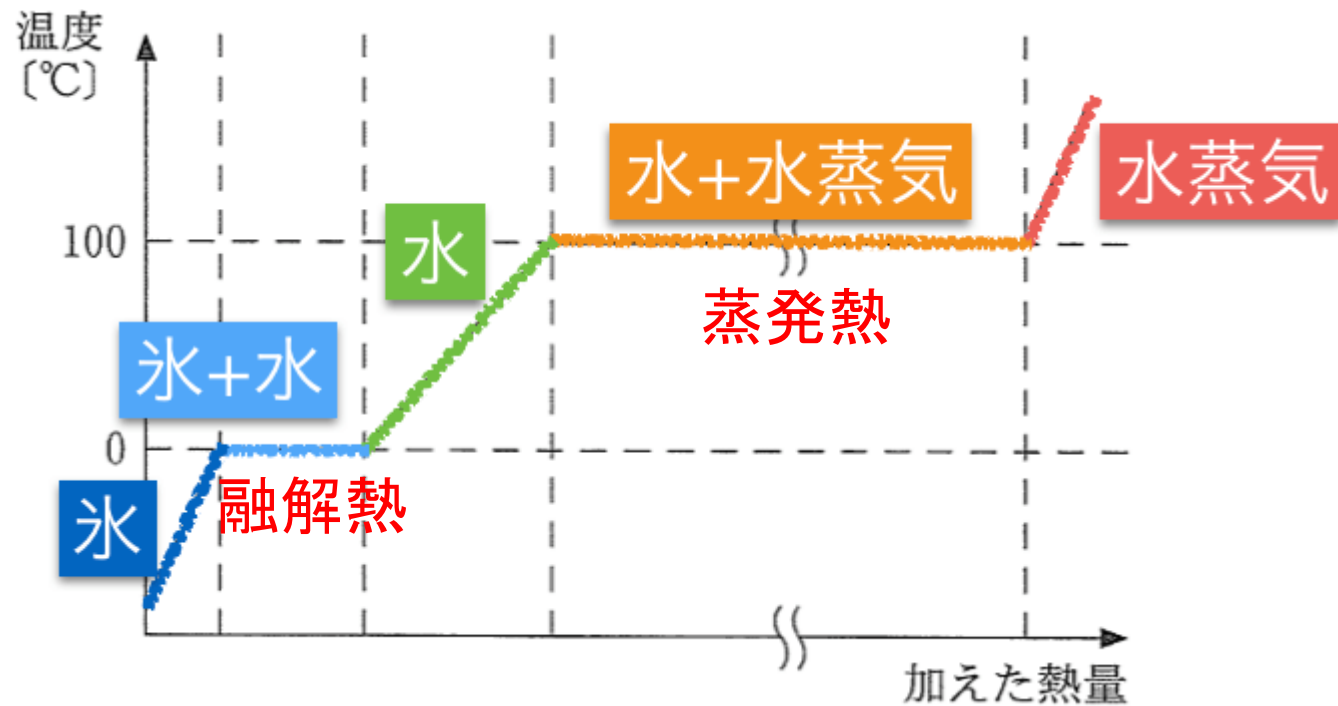
相変化：物体の物質的構造が変化

- **固体から液体**：分子の熱振動が大きくなり、規則正しい結晶構造が維持できなくなる
- **液体から気体**：分子間の相互作用（引力）が断ち切れ、自由に運動できるようになる



◎相変化と潜熱について

潜熱: 相変化に必要な熱



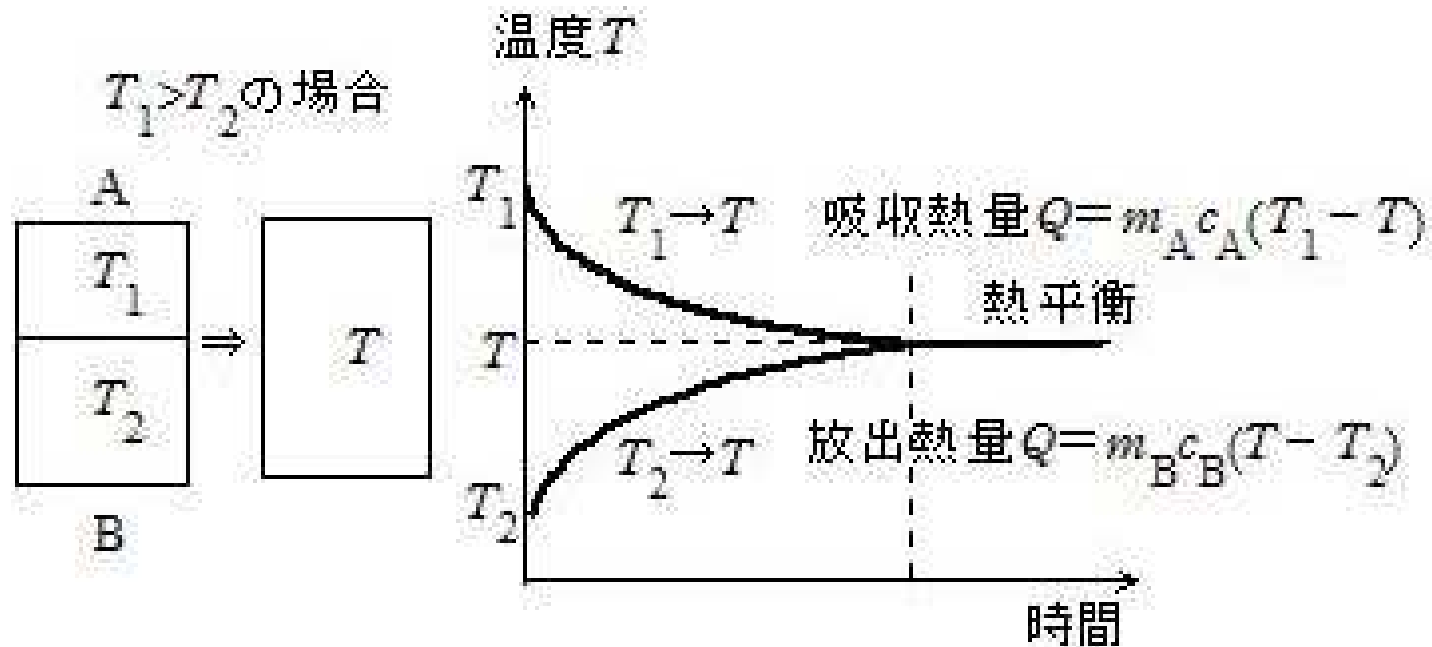
2.3 温度と熱平衡

・熱平衡

温度の異なる二つの物体を接触させると・・・

高温の物体から低温の物体に熱が移動

いずれ全体が同じ温度になり、それ以後温度が変化しなくなった状態を熱平衡(温度平衡)という



・温度目盛り

摂氏: スウェーデンのセルシウスが考案。水の氷点を0度、水の沸点を100度とした。中国でセルシウスを摂留修と書いたもので、明治政府が摂氏と書いて表記

熱力学で用いる温度目盛り

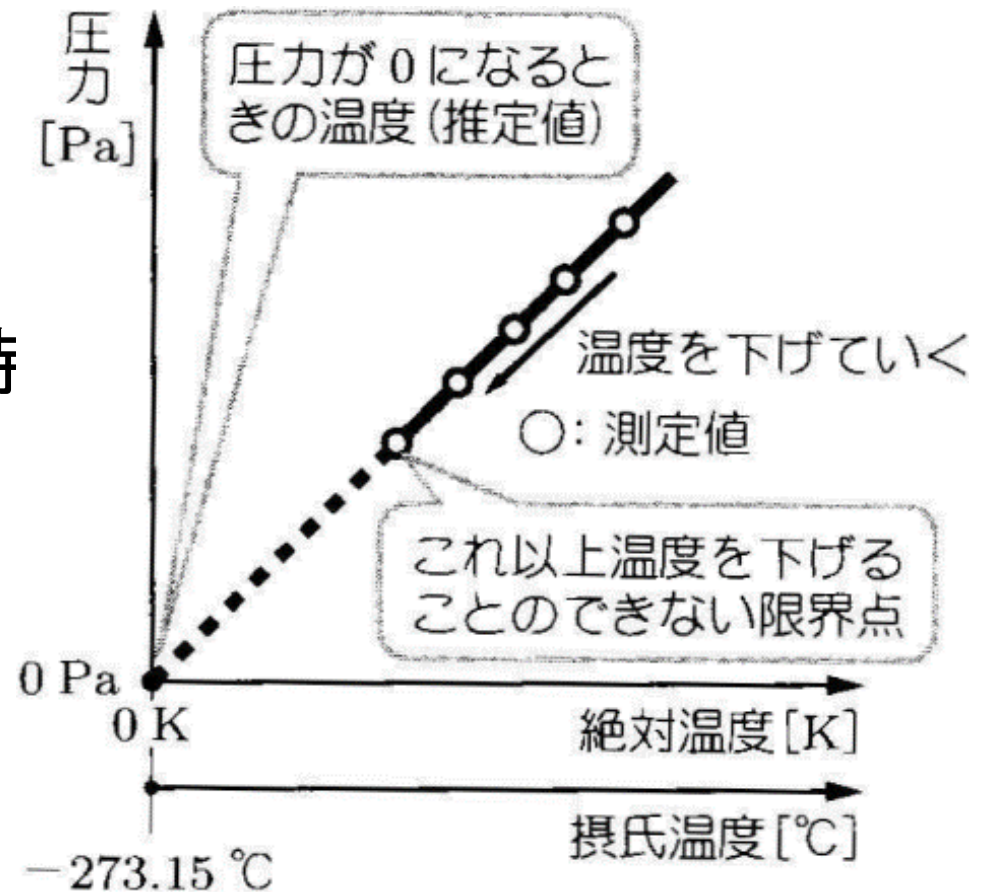
熱力学的温度

= 理想気体温度(絶対温度)

理想気体では体積一定の時
圧力と温度が比例



圧力0のときの温度を
 $0\text{[K]} = -273.15\text{[}^{\circ}\text{C]}$ と決定



2.4 熱量と比熱

熱：高温の系から低温の系に移動するエネルギー

高温の系の内部エネルギーの一部が熱という形態で低温の系に移動

加熱、放熱

熱容量：系の温度を1K上げるのに要する熱量

単位は[J/K]

比熱：単位質量の系の温度を1K上げるのに要する熱量

単位は[J/(kg·K)]

2.5 状態量

熱力学的平衡状態にある系の状態を表すための物理量

- 示量性状態量: 系の質量に比例する状態量
体積、内部エネルギー、...
- 示強性状態量: 系の質量に依存しない状態量
温度、圧力、密度、...

単位質量あたりの示量性状態量は「比(specific)」を付けて呼ぶ

例: 比体積、比内部エネルギー

2.6 単位系と単位

特に重要な単位: SIでの名称、記号、定義を確認

- ・力: N
- ・圧力: Pa
- ・エネルギー、仕事、熱量: J
- ・仕事率、動力: W

SI以外でよく使われる単位(これらの意味と単位換算も覚える)

- ・圧力: atm, hPa, bar, mmHg
- ・エネルギー、仕事、熱量: cal

第3章 熱力学第1法則

3.1 熱と仕事

再確認：熱とは？

・・・高温の系から低温の系に移動するエネルギー

仕事：力Fが位置xの関数で、 $x=x_1$ から x_2 まで動かした時の仕事Lは

$$L = \int_{x=x_1}^{x=x_2} F dx = \int_1^2 F dx$$

第3章 熱力学第1法則

- ・仕事とエネルギーの関係

系に仕事をすると系のエネルギーが変化する

例：加速仕事→運動エネルギー $mw^2/2$

重力仕事→位置エネルギー mgh

ばね仕事→ばねの弾性エネルギー $kx^2/2$

次に内部エネルギーに注目

系の内部エネルギーを変化させるためには

①系に熱を出入りさせる(加熱・放熱)

では、

②仕事でも内部エネルギーが変化するか？



それを確かめた実験: **ジュールの実験**

◎熱の仕事当量を測定したジュールの実験

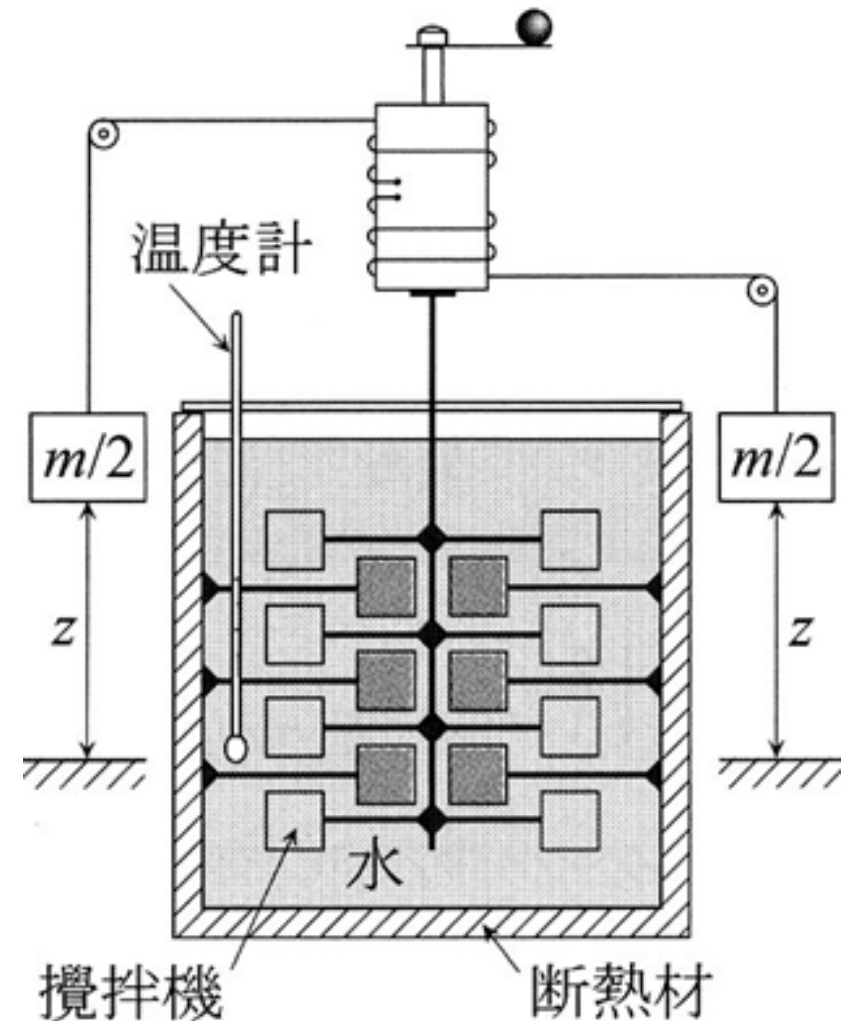
外から与えた重力仕事により、
系の温度が上昇
＝系の内部エネルギーが増加
つまり...

仕事も加熱同様に内部エネルギー
を増加させる効果あり

→仕事と熱の等価性



これを踏まえると...



3.2 閉じた系の熱力学第1法則

静的な閉じた系のエネルギー保存則(系の力学的エネルギーの変化は無視)

$$\Delta U = Q - L \quad (3.5)$$

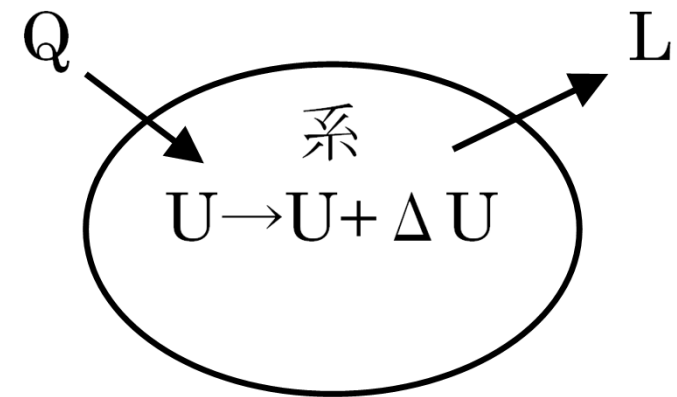
U : 系の内部エネルギー (Δ : 変化を表す)

Q : 系への加熱量: U を増やす効果

L : 系が周囲になす仕事: U を減らす効果

具体的に、状態1から2の変化に対して表すと

$$\Delta U = U_2 - U_1 = Q_{12} - L_{12}$$



微小変化に対する式(微分形)

$$dU = \delta Q - \delta L \quad (3.7)$$

dU : 系の微小内部エネルギー変化、

δQ : 系への微小加熱量、

δL : 系が周囲になす微小仕事

Δ が付くものと付かないものの違い、 d と δ の違い

- U は状態量→何らかの作用によって値が変化
→絶対量よりも変化量(ΔU , dU)が重要
- Q , L は非状態量→状態を変化させる作用
→変化する量ではない(δQ , δL は微小作用量)

系単位質量あたりの式

式(3.5), (3.7)の両辺を系の質量で除すと

$$\Delta U = Q - L \quad (3.5) \quad \rightarrow \quad \Delta u = q - l \quad (3.6)$$

$$dU = \delta Q - \delta L \quad (3.7) \quad \rightarrow \quad du = \delta q - \delta l \quad (3.8)$$

u : 系の比内部エネルギー

q, l : 系単位質量あたりの系への加熱量と系が周囲になす仕事

◎よくある間違い

$$dU = Q - L \quad \text{微分形と積分形の混同}$$

$$\Delta U = \delta Q - \delta L \quad // \quad //$$

$$\Delta u = Q - L \quad \text{小文字(単位質量あたり)と大文字の混同}$$

$$dU = dQ - dL \quad Q \text{と} L \text{の微小量を表す記号は} d \text{ではなく} \delta$$

$$U = Q - L \quad U \text{ではなく} \Delta U (U \text{は変化量として意味がある})$$

$$\Delta U = \Delta Q - \Delta L \quad Q \text{と} L \text{は変化量ではないので} \Delta \text{を付けない}$$

3.3熱力学的平衡と準静的過程

熱力学の理論を考える上での理想化・単純化

①熱力学的平衡

特に重要なのは次の2つ

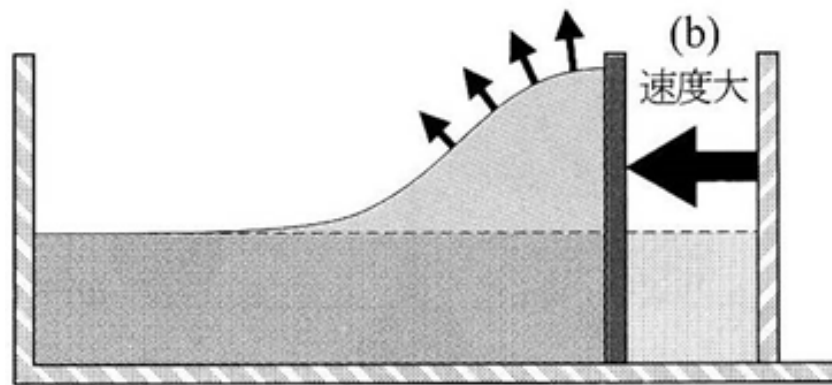
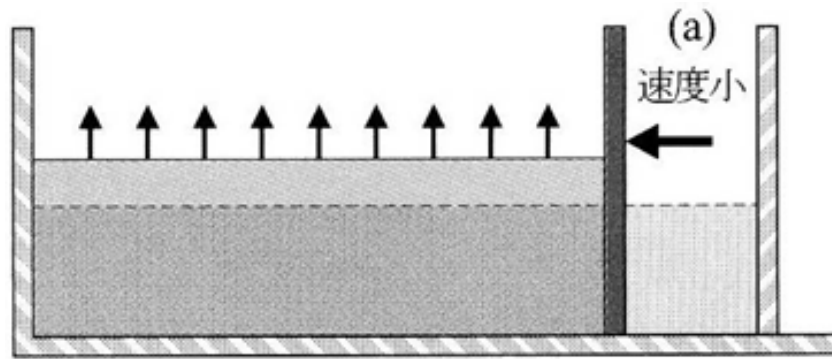
- **熱平衡**: 系内の温度は一樣で、系内の熱移動はない
- **力学的平衡**: 系内の圧力は一樣で、系内の流動はなく、周囲と力学的に釣り合っている

②準静的過程

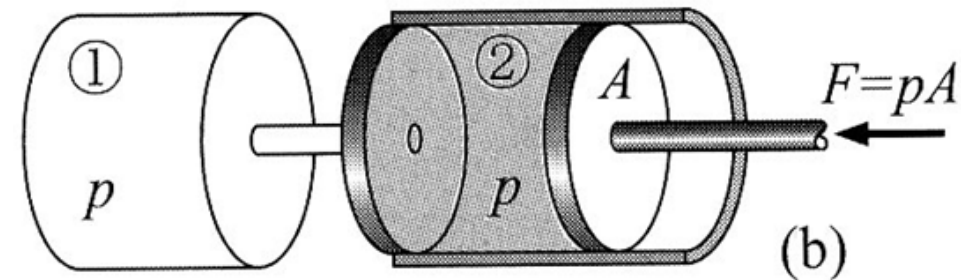
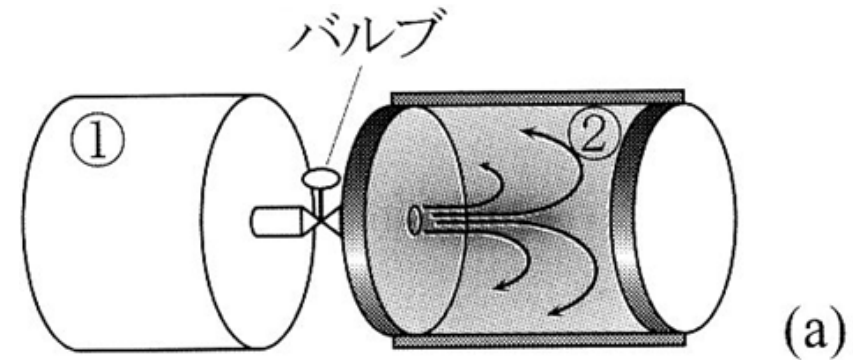
「熱力学的平衡状態を保ったまま、微小量ずつゆっくりと状態変化する仮想的過程」

熱力学的平衡を完全に保ったままでは一切状態が変化しないので、平衡状態を保てるくらいにゆっくりと変化するという意味合いで「準静的」という呼び方がされている

準静的過程と非準静的過程の例



(b)では系の圧力が不均一で流動が生じる



(a)ではピストン内外の力が釣り合っておらず、急激に膨張するため流動が生じている

熱力学は熱力学的平衡状態にある系を対象とする
したがって状態変化は準静的過程のもとで考える

話を単純にするための理想化

可逆過程と不可逆過程：詳細は後期の熱力学で学ぶ

3.4 準静的過程における閉じた系の第1法則

主な学ぶこと

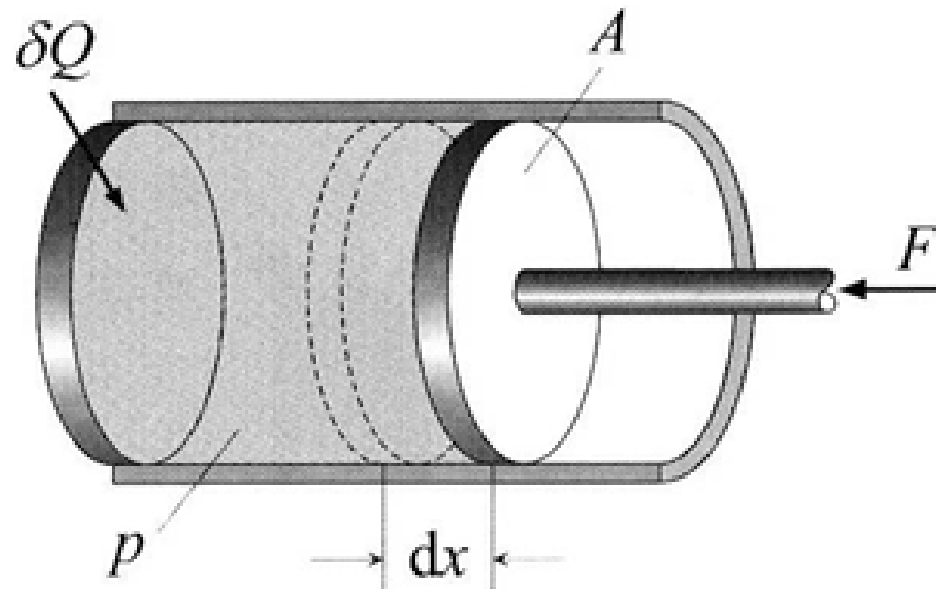
- (1) 準静的過程では非状態量の仕事 L が状態量 p と V を使って表せること
- (2) 第1法則の各種表現式
- (3) 定積比熱と定圧比熱の表現式

※この資料では(2)の途中までで、一旦終了

次の条件下で系がなす仕事がどのように表されるか考えよう

[条件]

- ・系：シリンダとピストンで密閉された気体
- ・過程は準静的→ピストンを押す力 F と気体の圧力 p がつり合っている。



[誘導]

仕事は力×移動距離で表されるので、ピストンが微小距離 dx 移動した時、気体がピストンになす微小仕事 δL は

$$\delta L = (1)$$

ピストンの面積を A とすると、力と圧力の関係から

$$F = (2)$$

これを(1)に代入すると

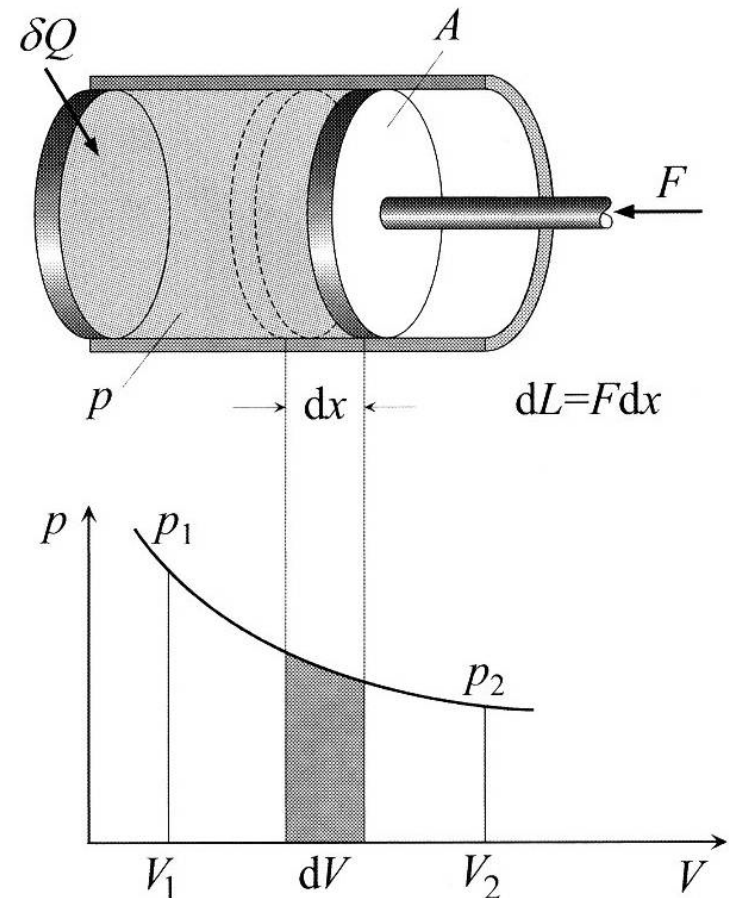
$$\delta L = (3)$$

ここで微小体積増加 dV は

$$dV = (4)$$

と表されるので、 δL は p と V を使って

$$\delta L = (5) \text{ となる。}$$



[誘導]

仕事は力×移動距離で表されるので、ピストンが微小距離 dx 移動した時、気体がピストンになす微小仕事 δL は

$$\delta L = (1) F dx$$

ピストンの面積を A とすると、力と圧力の関係から

$$F = (2) p A$$

これを(1)に代入すると

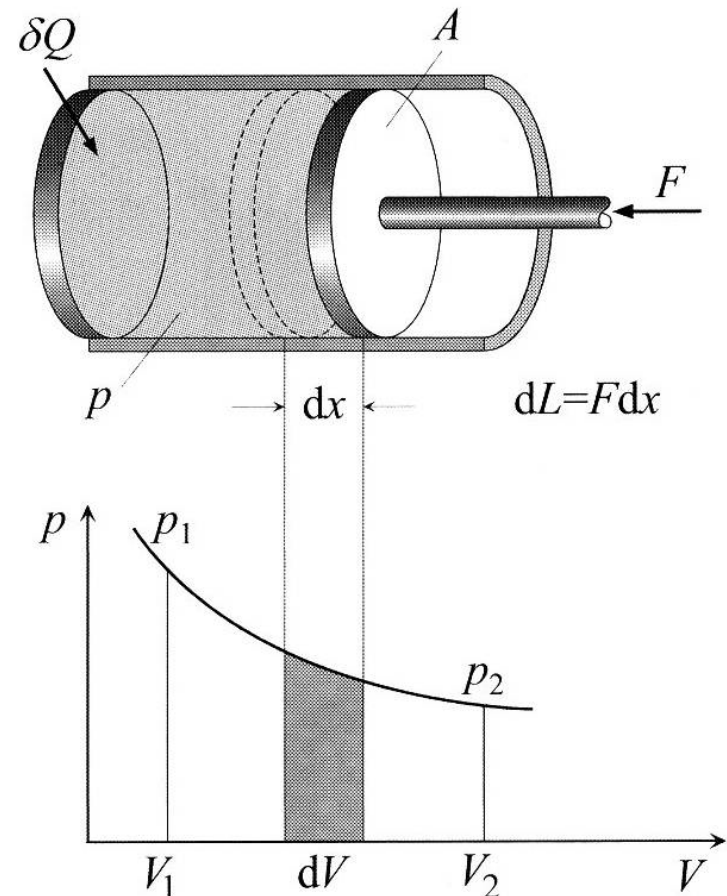
$$\delta L = (3) p A dx$$

ここで微小体積増加 dV は

$$dV = (4) A dx$$

と表されるので、 δL は p と V を使って

$$\delta L = (5) p dV \text{ となる。}$$



したがって、熱力学第1法則の式 $dU = \delta Q - \delta L$ は
準静的過程では

$$dU = \delta Q - pdV \cdots (3.12)$$

熱力学第1法則第1基礎式

(内部エネルギーを用いた表現)

微小変化に対する式(微分形)

状態1から状態2の変化では(積分形)

$$\Delta U = U_2 - U_1 = Q_{12} - \int_1^2 pdV \cdots (3.13)$$

熱力学第1法則 第1基礎式
(単位質量の系に対する式)

微小変化に対する式(微分形)

$$du = \delta q - p dv \cdots (3.15)$$

状態1から状態2の変化では(積分形)

$$\Delta u = u_2 - u_1 = q_{12} - \int_1^2 p dv$$