

高校物理

熱学

-
- 1. [分子の運動](#)
 - 2. [熱量と蓄熱](#)
 - 3. [エネルギー変換と効率](#)
 - 4. [理想気体の状態方程式](#)
 - 5. [気体分子運動論](#)
 - 6. [熱力学の4法則](#)
 - 7. [P-V図と状態変化](#)
 - 8. [カルノーサイクル](#)

Y-teraya

CC BY-NC-SA 4.0

熱学のスタンス

余談

化学

空気は分子の集まりである！

- 温度：分子の運動
- 圧力：分子の衝突

物理学

原子や分子の存在は分からぬ…

- 温度：熱膨張からの経験温度
- 圧力：力を面積で割った量

- 絶対温度 T [K]
- 圧力 P [Pa]
- 体積 V [m^3]

この3つを抑えたうえで
グラフを描ければ
すべての問題が解ける！

01

分子の運動

- 分子の運動と衝突
- 物質の三態
- 熱膨張

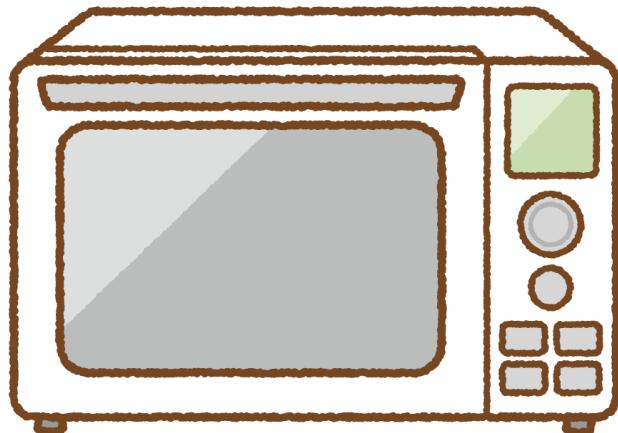
板書

分子の運動

- 物体を構成する原子や分子は**熱運動**している.
- 热運動する分子との衝突で生じる、ランダムな運動を**ブラウン運動**と呼ぶ.
- 原子の運動がすべて停止する温度は、実験的に $-273[^\circ\text{C}]$ と求められた。 (温度の下限)
- $-273[^\circ\text{C}]$ を**0[K]**とし、**絶対零度**と呼ぶ.

$$\text{絶対温度} T [\text{K}] = \text{セルシウス温度} t [^\circ\text{C}] + 273 \cdots (2.1)$$

電子レンジとIH



- ◆ 電子レンジは水分子を、 IHは金属原子を直接振動させる機械である。
- ◆ この振動が分子を運動させ、 温度を上げることができる。
- ◆ そのため、 食べ物を間接的に温めることができる。

演習

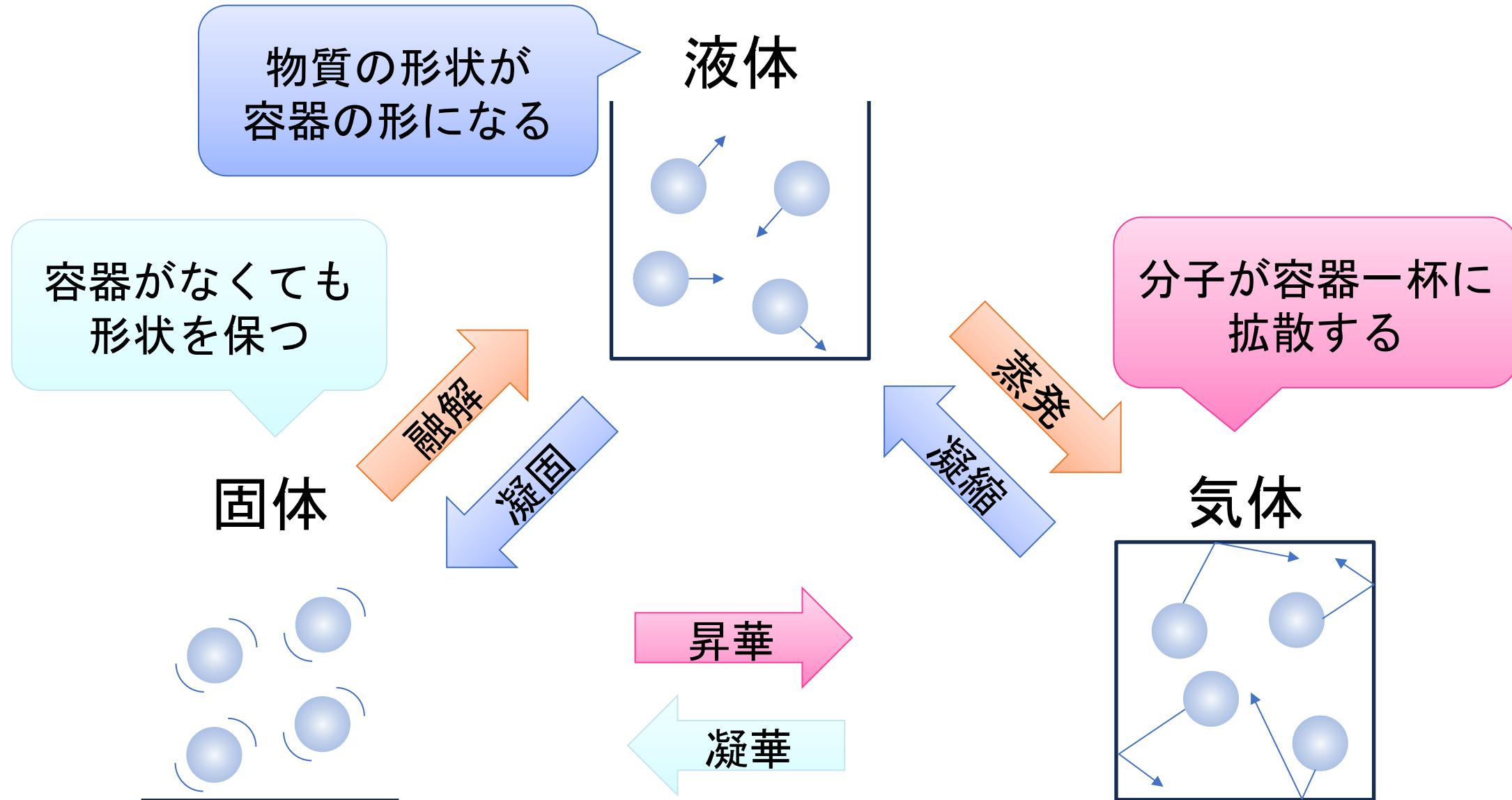
セルシウス温度を絶対温度にせよ

セルシウス温度 t [°C]	+ 273	絶対温度 T [K] 負にならない
-273	⇒	0
-196		77
0		273
27		300

温度変化は、セルシウス温度と絶対温度で同じになる

物質の三態

板書



余談

発展：分子間距離

- 水1[mol]は18[g]でその体積は18[m³]なので、その分子間距離は次である。

$$r_{\text{wat}} = \sqrt[3]{\frac{18 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{mol}}{6.0 \times 10^{23} / \text{mol}}} \doteq 3 \times 10^{-10} \text{ m} \dots (2.2)$$



- これは分子半径とほぼ同じになる。
- 気体1[mol]は標準状態で22.4 × 10⁻³[m³]なので、その分子間距離は次である。

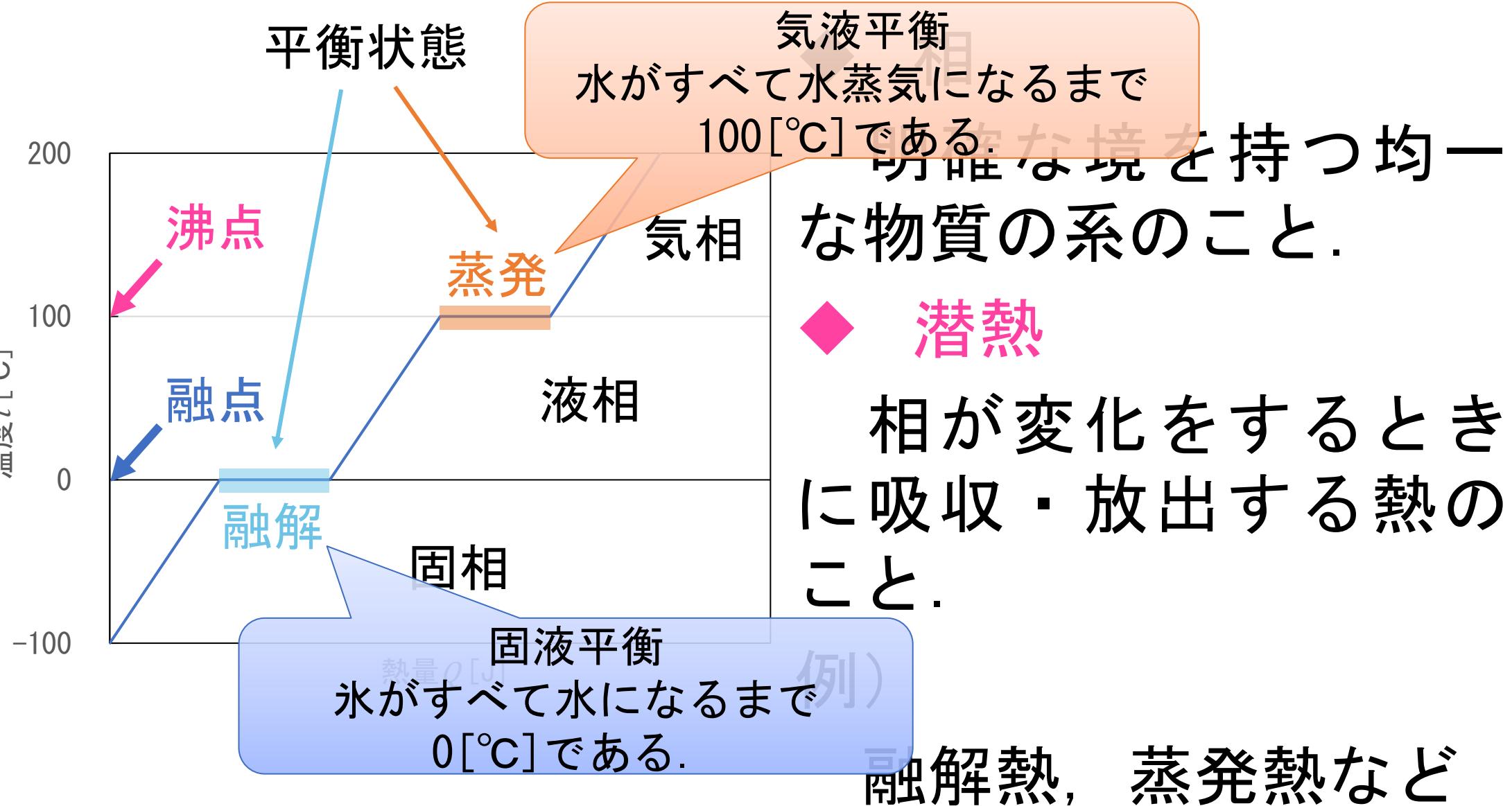
$$r_{\text{air}} = \sqrt[3]{\frac{22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol}}{6.0 \times 10^{23} / \text{mol}}} \doteq 3 \times 10^{-9} \text{ m} \dots (2.3)$$



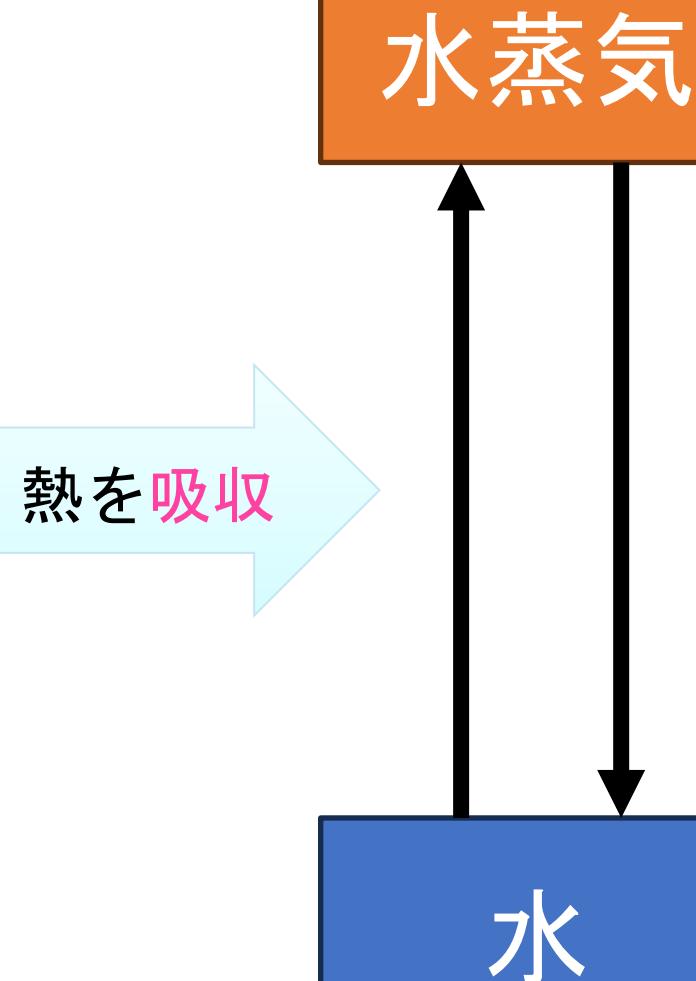
- よって $r_{\text{air}} \doteq 10 r_{\text{wat}}$ となる。

板書

水の相変化



周囲の空気を冷やす

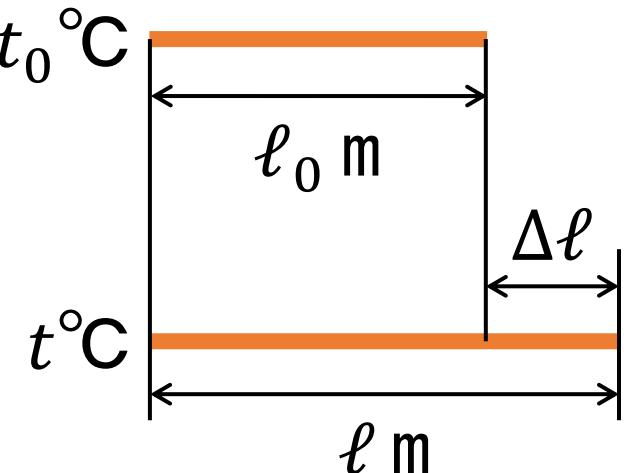


周囲の空気を暖める

熱膨張 -1

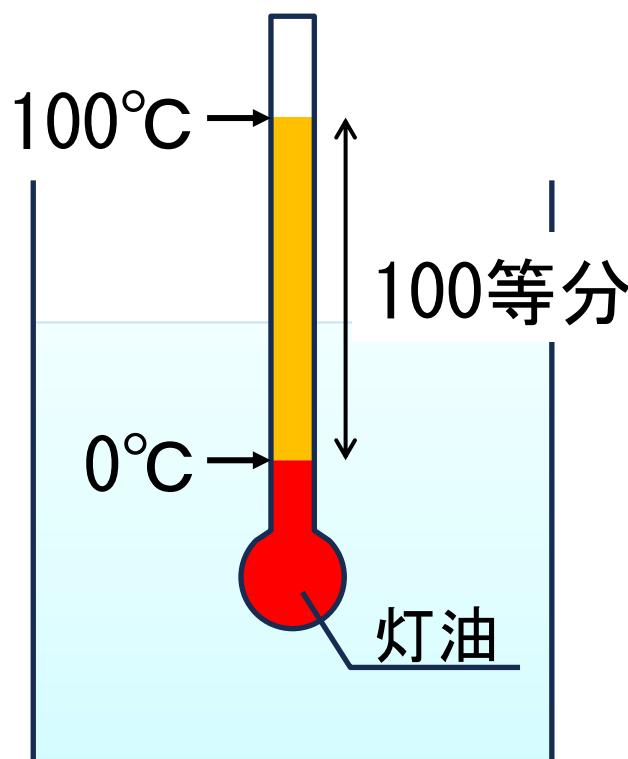
板書

- ◆ 温度による固体の長さの変化を線膨張と呼ぶ。
- ◆ $t_0 [{}^\circ\text{C}]$ における長さを $\ell_0 [\text{m}]$, $t [{}^\circ\text{C}]$ における長さを $\ell [\text{m}]$, 線膨張率を $\alpha [/\text{K}]$ とすると次である。



$$\frac{1}{\ell_0} (\ell - \ell_0) = \alpha(t - t_0) \cdots (2.4)$$

経験温度



- ◆ かつては水銀の**体膨張率**で温度を定義していた。
- ◆ 今でも、**アルコール温度計**として利用されている。
- ◆ 水の融点、沸点を $0[^\circ\text{C}]$, $100[^\circ\text{C}]$ とし、目盛をつける。
- ◆ その間を100等分し、1目盛りを $1[^\circ\text{C}]$ とした。
- ◆ よって、セルシウス温度 $t[^\circ\text{C}]$ は次で定義される。

$$t = 100 \frac{V - V_{\text{bp}}}{V_{\text{bp}} - V_{\text{mp}}} \cdots (2.5)$$

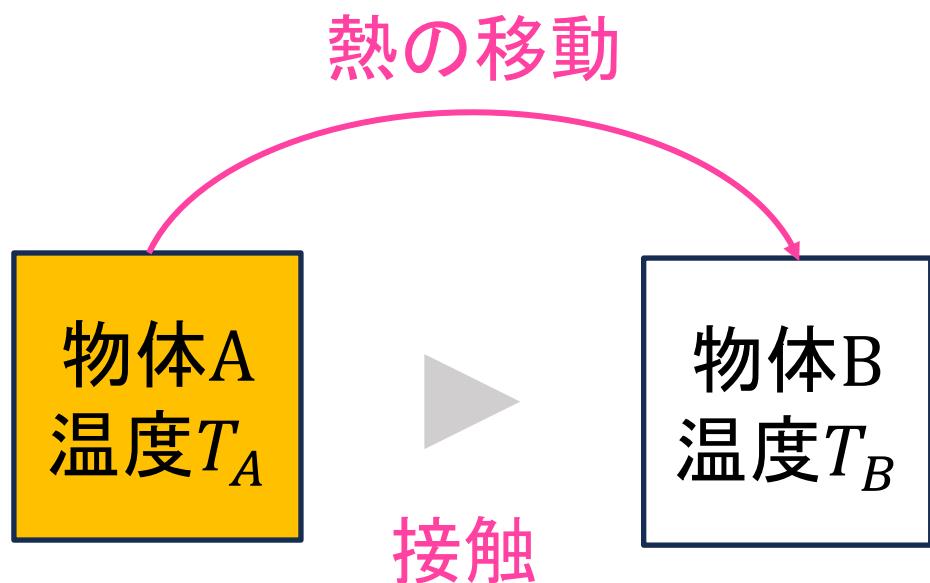
02

熱量と蓄熱

- 热量
- 热平衡
- 比热と热容量

熱量

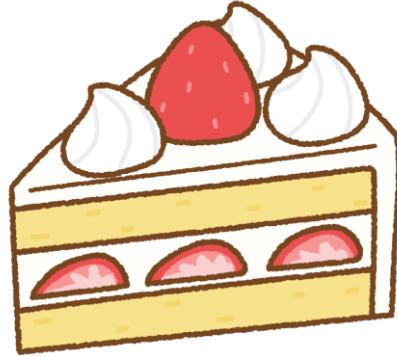
板書



$$T_A > T_B$$

- ◆ 高温部から低温部へ移動する何らかの実体があると見なし，それを熱と呼ぶ.
- ◆ 热エネルギーの大きさを熱量と呼ぶ.
- ◆ 現在では，分子の乱雑な運動であることがわかつている.
- ◆ 热量の元々の単位は，カロリーである.

食べ物のカロリー



ショートケーキ
約300 [kcal]

すべてのエネルギーを消費するには？



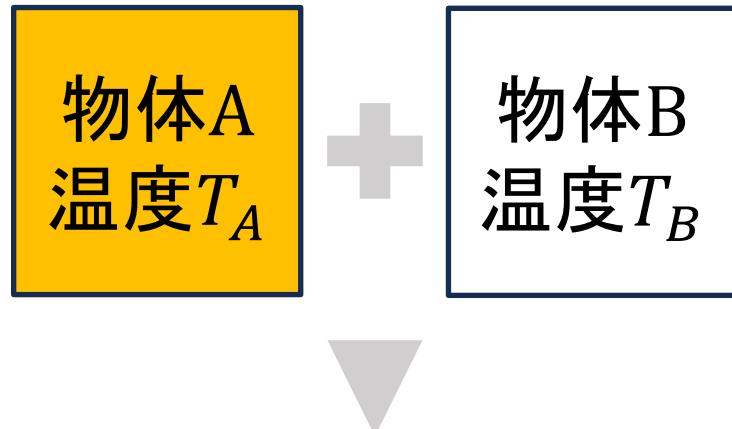
ウォーキング
約60 [min]

- ◆ 我々は食べ物から**化学エネルギー**を得て活動している。
- ◆ 糖質→脂質→タンパク質の順にエネルギーへ変換する。
- ◆ **糖質を制限すれば**, 脂質から分解してくれる。
- ◆ 糖質: 4 [kcal/g]
- ◆ 脂質: 9 [kcal/g]
- ◆ タンパク質: 4 [kcal/g]

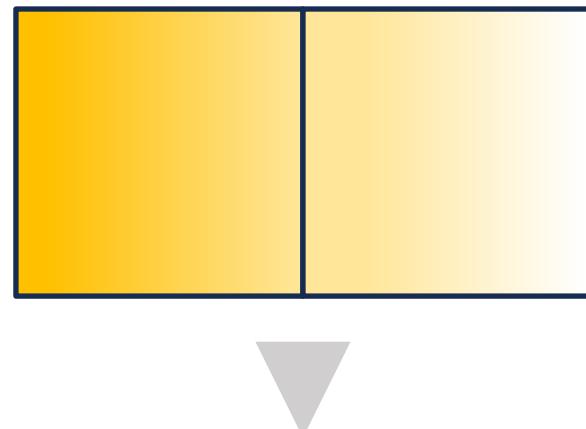
板書

熱平衡 -1

熱平衡



非平衡



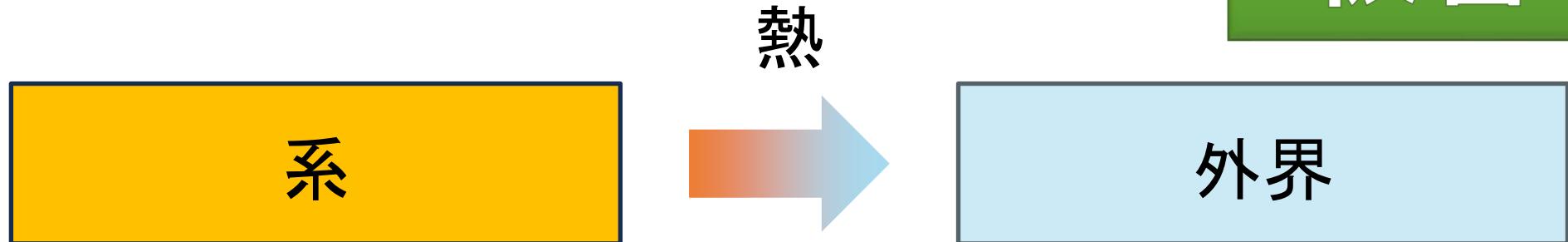
熱平衡



- ◆ 温度の違う物質を接触させて放置する.
- ◆ 経験則上, 二物体の温度は一樣になる.
- ◆ 最終的な温度 T は, 最初の温度 T_A, T_B の中間の値になる.
- ◆ T が T_A, T_B に自発変化しないことを不可逆変化と呼ぶ.

熱平衡 -2

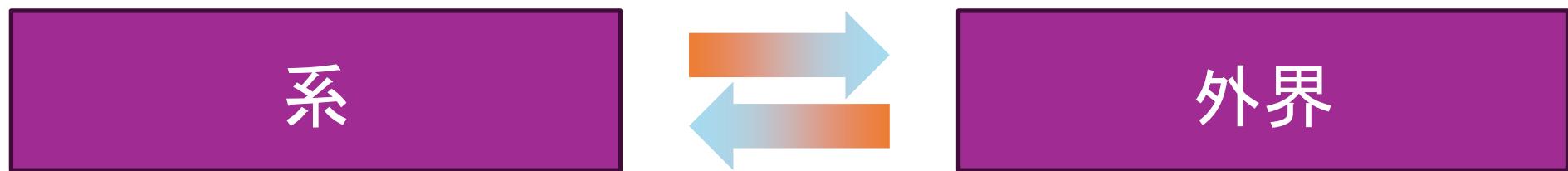
板書



系の温度 > 外界の温度

熱は、一方的に流れる。

熱平衡

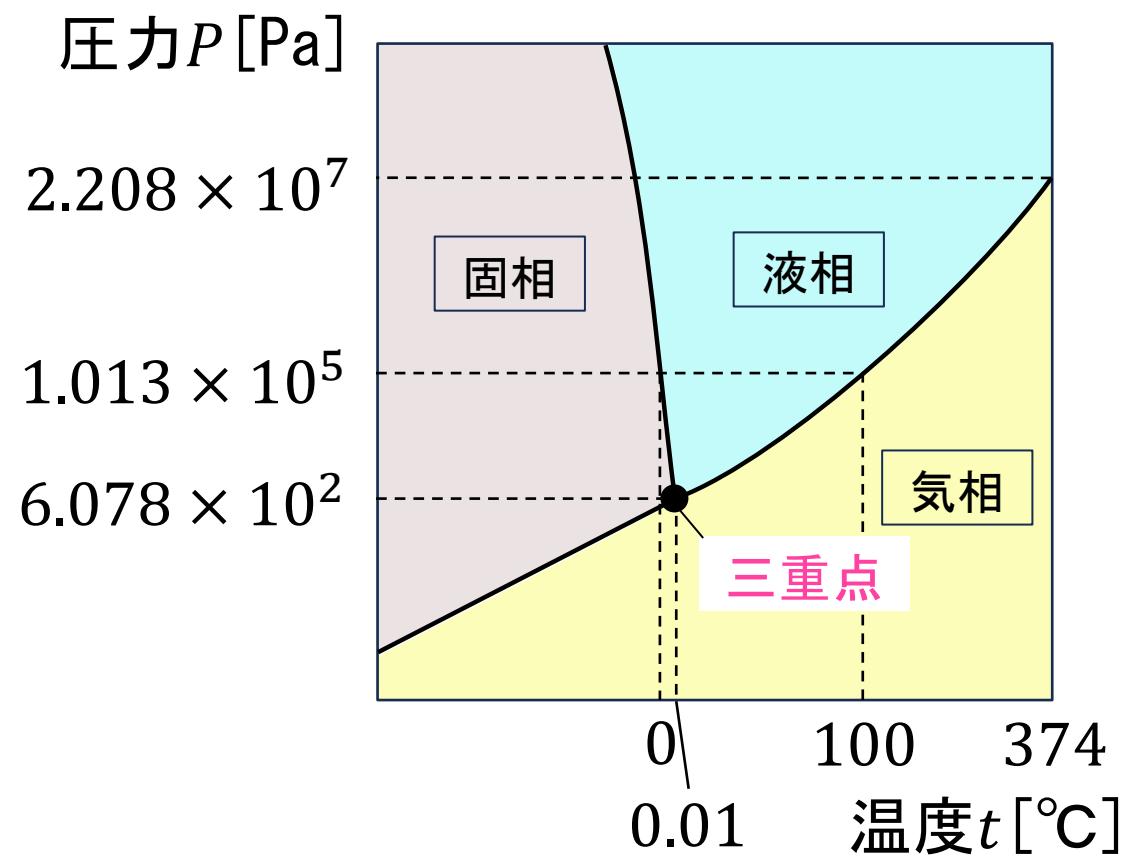


系の温度 = 外界の温度

熱は、見かけ上流れない。

板書

水の平衡状態図



- ◆ 相の種類は圧力 P [Pa], 温度 t [°C], 組成によって決まる。
- ◆ これらの関係を線図で表したものと呼ぶ。
- ◆ 固相, 液相, 気相が共存し平衡状態である点を三重点と呼ぶ。

部屋が散らかることは自然な

状態A

モノの置き場を決めていると、
可能な状態の総数が少なく
エントロピーが小さい



可能な組み合わせは1通り
状態B



可能な組み合わせは1通り
モノの置き場を決めていないと、
可能な状態の総数が大きく
エントロピーが大きい

「乱雑さ」の度合いを表す値のことをエントロピーと呼ぶ。

エントロピーは増大する方向へ不可逆変化する。

これを「エントロピー増大則」と呼ぶ。

エントロピーは可能な状態の総数の対数と定義。

$$\ln 1 = 0, \ln 10 \approx 2.30$$

$$\ln 1 < \ln 10 \dots (2.6)$$

板書

比熱と熱容量

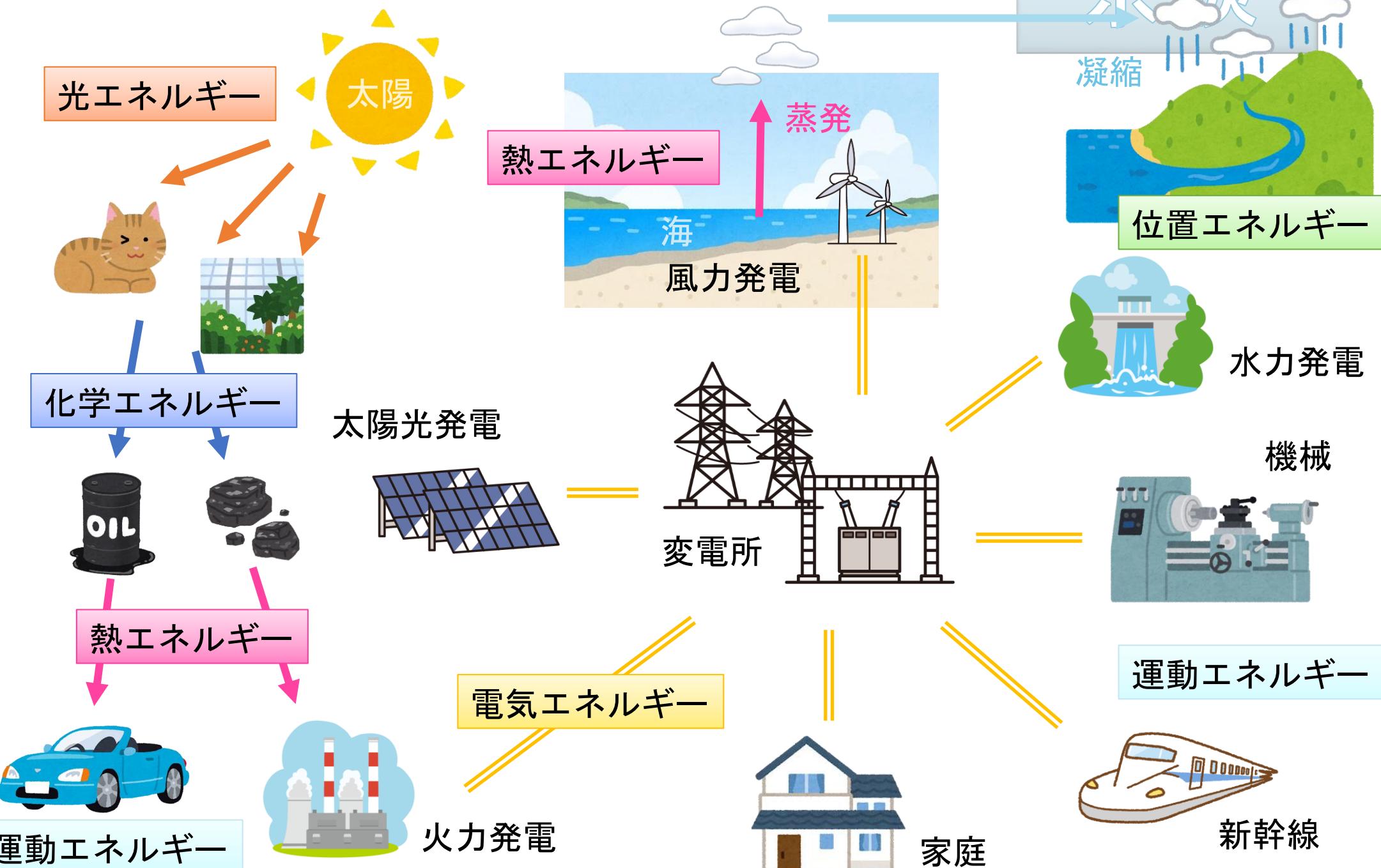
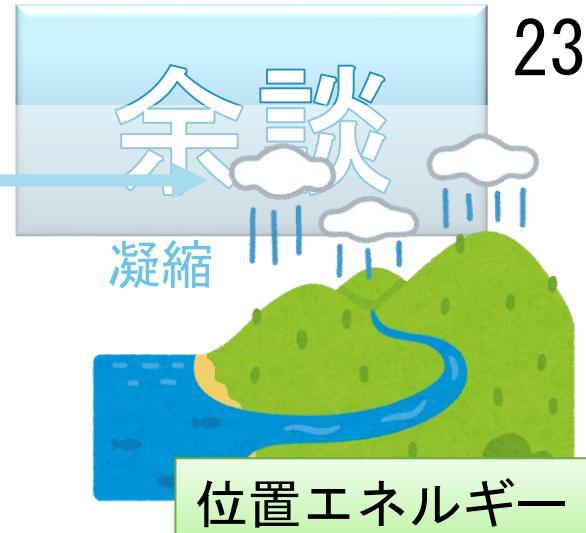
- 質量 m [g], 比熱 c [J/(g·K)], 上昇温度 ΔT [°C], 発熱量 Q [J] とすると次である.
$$Q = mc\Delta T = C\Delta T \cdots (2.7)$$
- 物質1[g]の温度を1[°C]上げるのに要する物質固有の熱量を, **比熱**と呼ぶ.
- 热容量 C [J/K]は, **質量と比熱の積**である.

03

エネルギー変換と効率

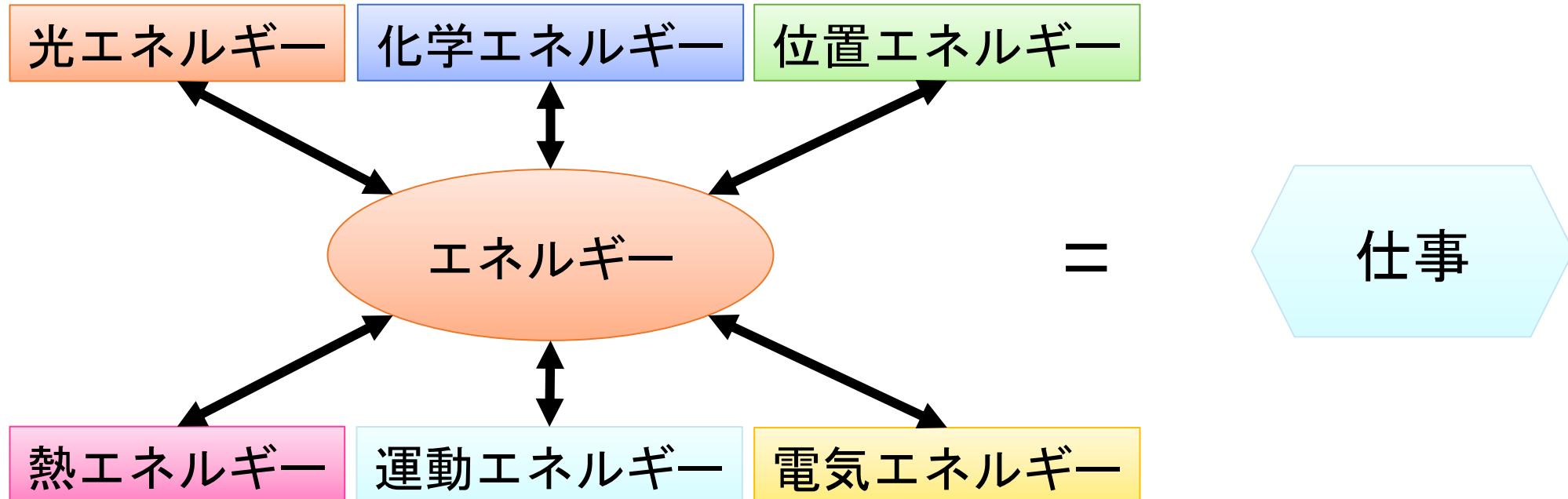
- エネルギー間の相関
- エネルギーの変換と効率と保存
- 仕事

身近なエネルギー相関



板書

エネルギー

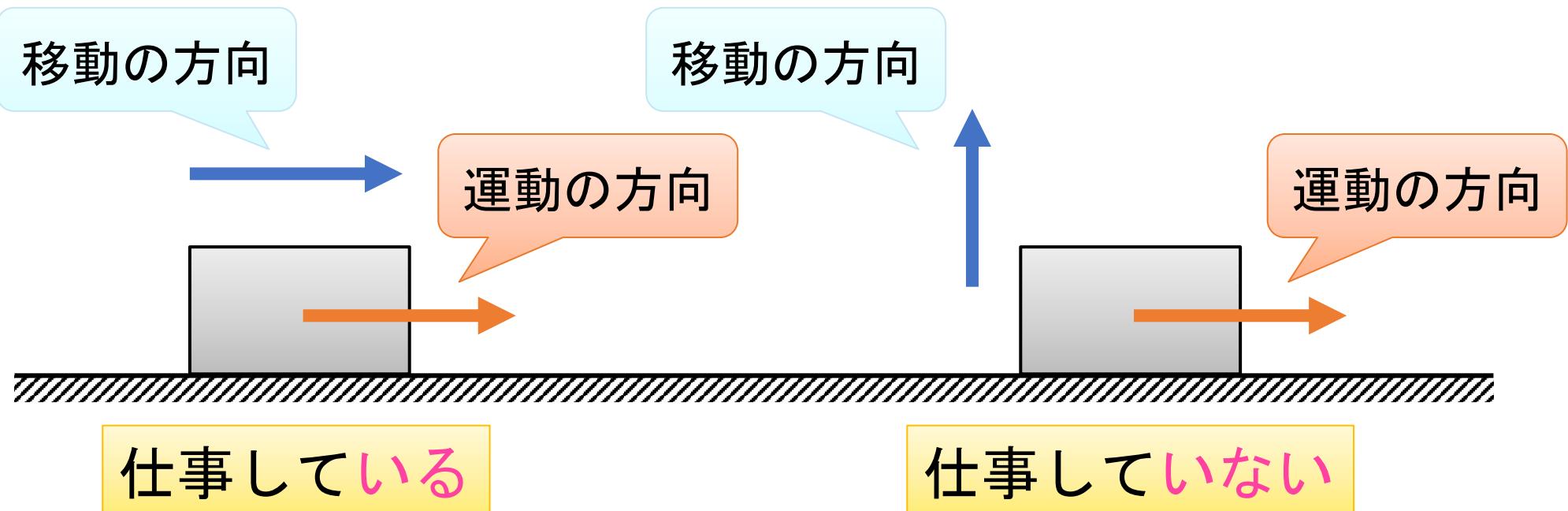


- ◆ 仕事をすることができる**潜在的能力**のこと。
- ◆ エネルギーは**別のエネルギーに変換**できる。
- ◆ 仕事 W [J], 力の大きさ F [N], 移動距離 x [m] とすると
次である。

$$W = Fx \cdots (1. xx)$$

仕事

板書



- ◆ 物体に力を加えた方向と、物体の移動した方向が一致したとき力が仕事をしたと言う。
- ◆ $P-V$ グラフの面積が気体の仕事をある。

引っ越し業者は仕事していない？

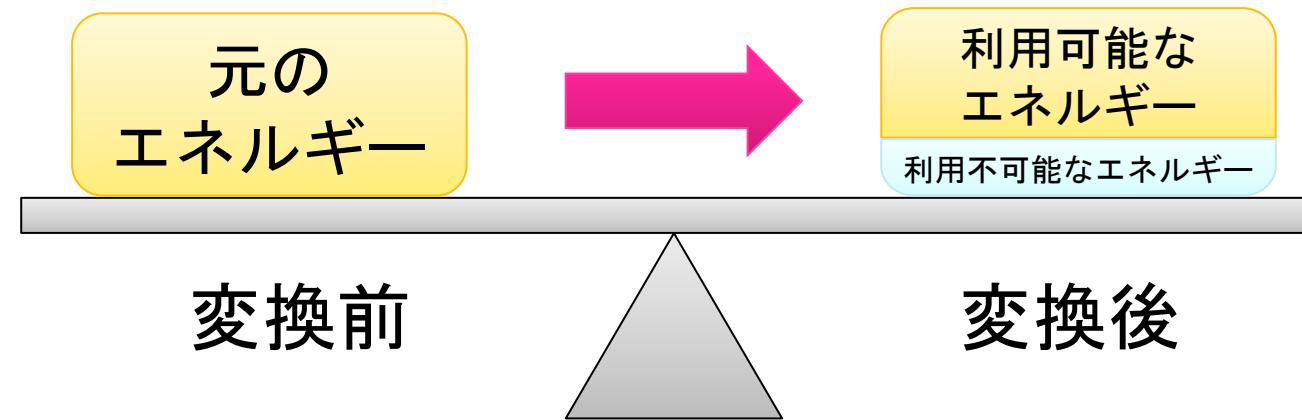


- ◆ 荷物を持ち上げる力は**上向き**である。
- ◆ 荷物を移動させる力は**横向き**である。
- ◆ そのため、物理学の定義では**仕事していない**と言える。
- ◆ ただ持ち上げる、階段を登る動作は**仕事した**と言える。

エネルギーを変換する

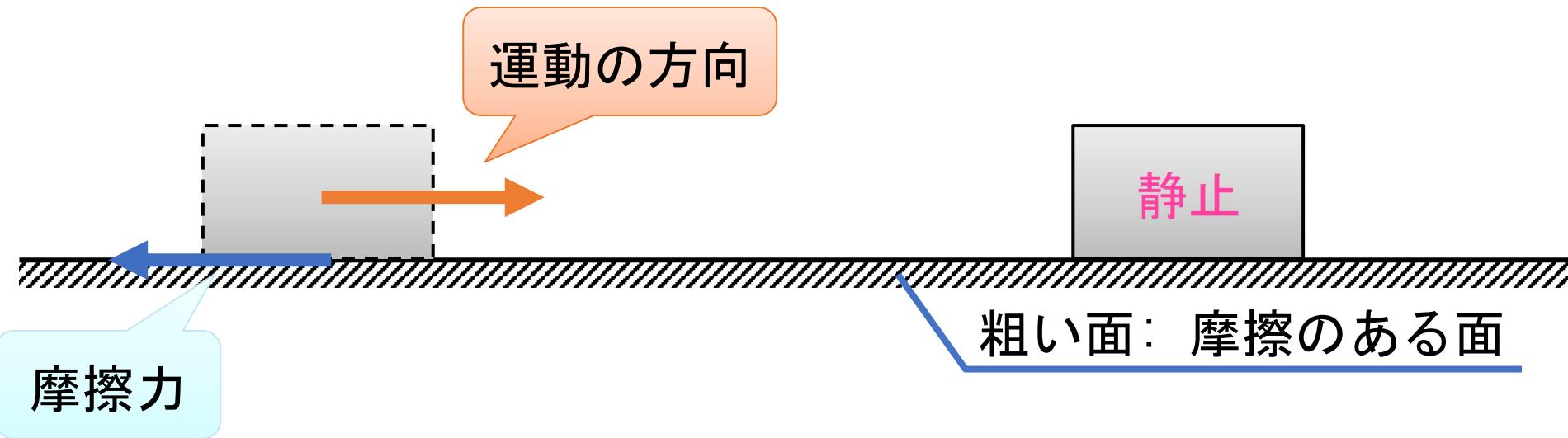
板書

エネルギー変換



- ◆ 変換後では仕事で使えるエネルギー量が、変換前と比べて常に減少する。
- ◆ エネルギー変換前後で総量が変わらないことを、エネルギー保存則と呼ぶ。

エネルギー保存則の例

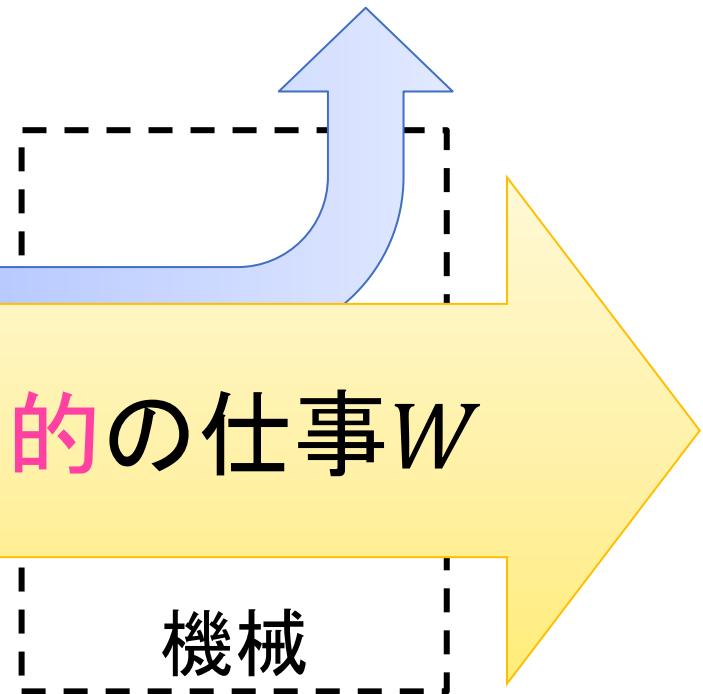


- ◆ 摩擦のある面では、滑っていく物体はやがて静止する。
- ◆ これは、運動エネルギーを失ったためである。
- ◆ 失った運動エネルギーは、面上を構成している分子へすべて伝わり激しく運動させる。
- ◆ だからモノの表面を擦ると温かくなる（摩擦熱）。

エネルギー利用の効率

板書

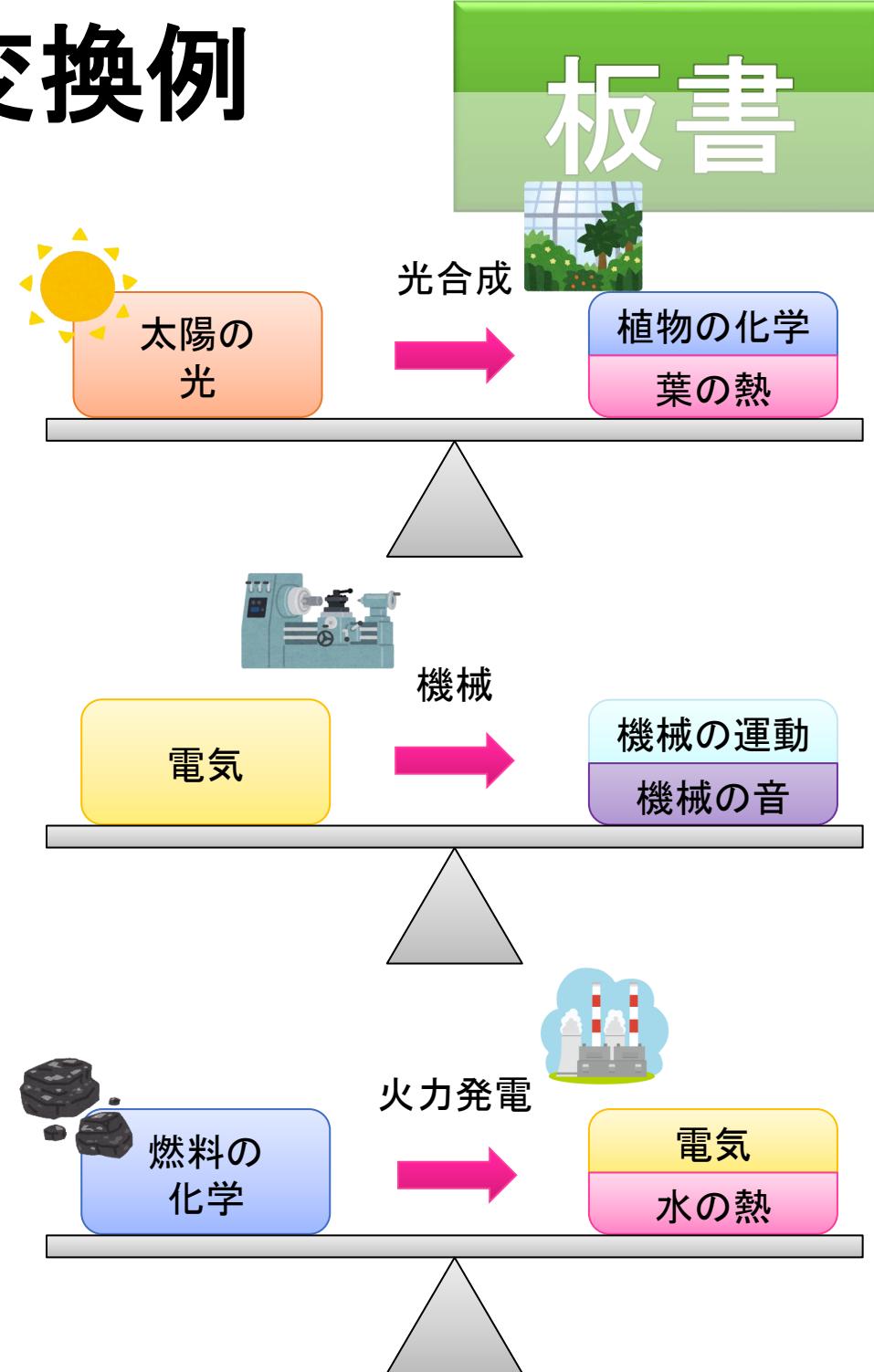
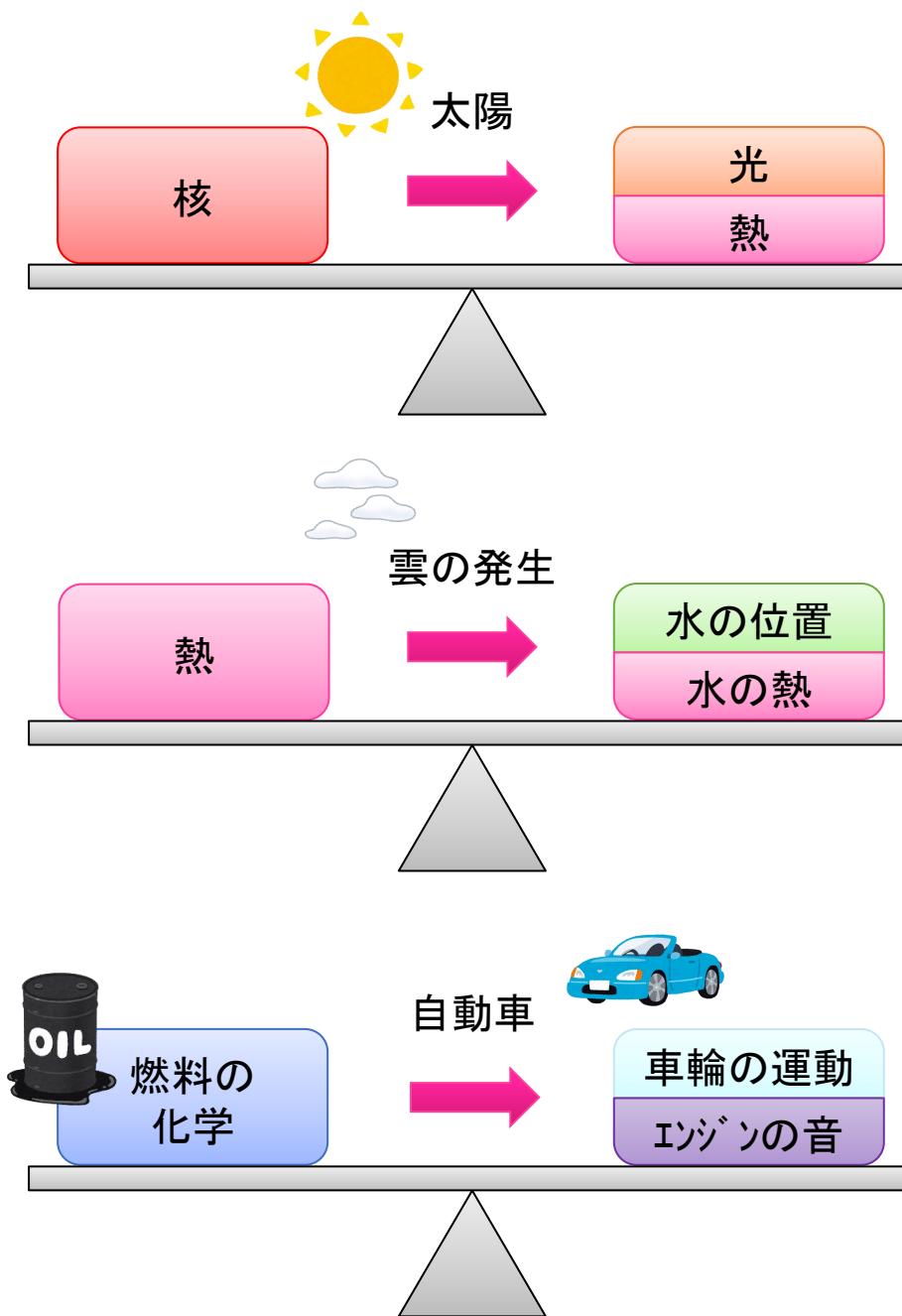
目的以外の仕事 W_{out}



- ◆ 元のエネルギーから目的のエネルギーに変換された割合を、**変換効率**と呼ぶ。
- ◆ 効率 e ，有効仕事 W [J]，損失仕事 W_{out} [J] とすると次である。

$$e = \frac{W}{W_{\text{out}}} \cdots (2.8)$$

身近なエネルギーの変換例



板書

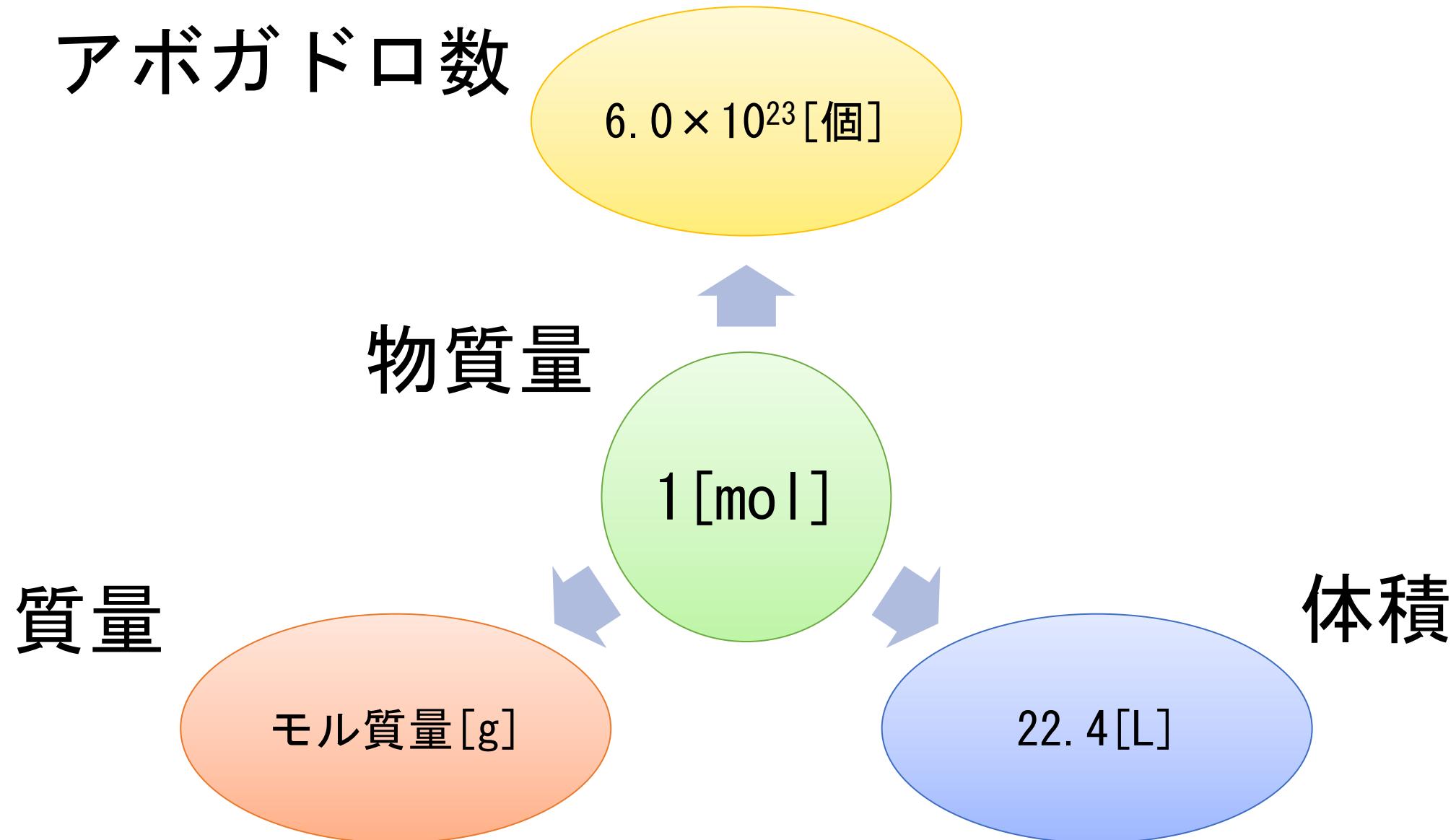
04

理想気体の状態方程式

- 物質量と体積
- ボイル-シャルルの法則
- 理想気体の状態方程式

物質量と体積

板書



DARSって12個入りだよね！

余談

33

1 ダース

= 12個

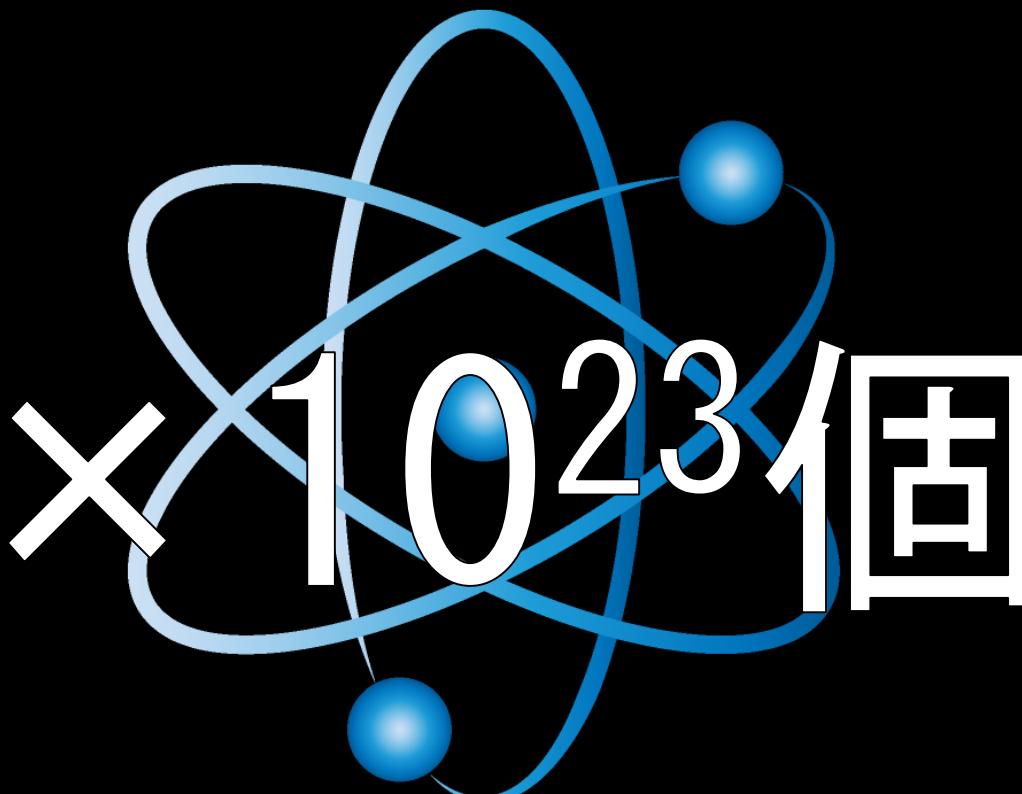
Mol も DARS も 概念は同じ

余談

34

1mol |

= 6.0×10^{23} 個



板書

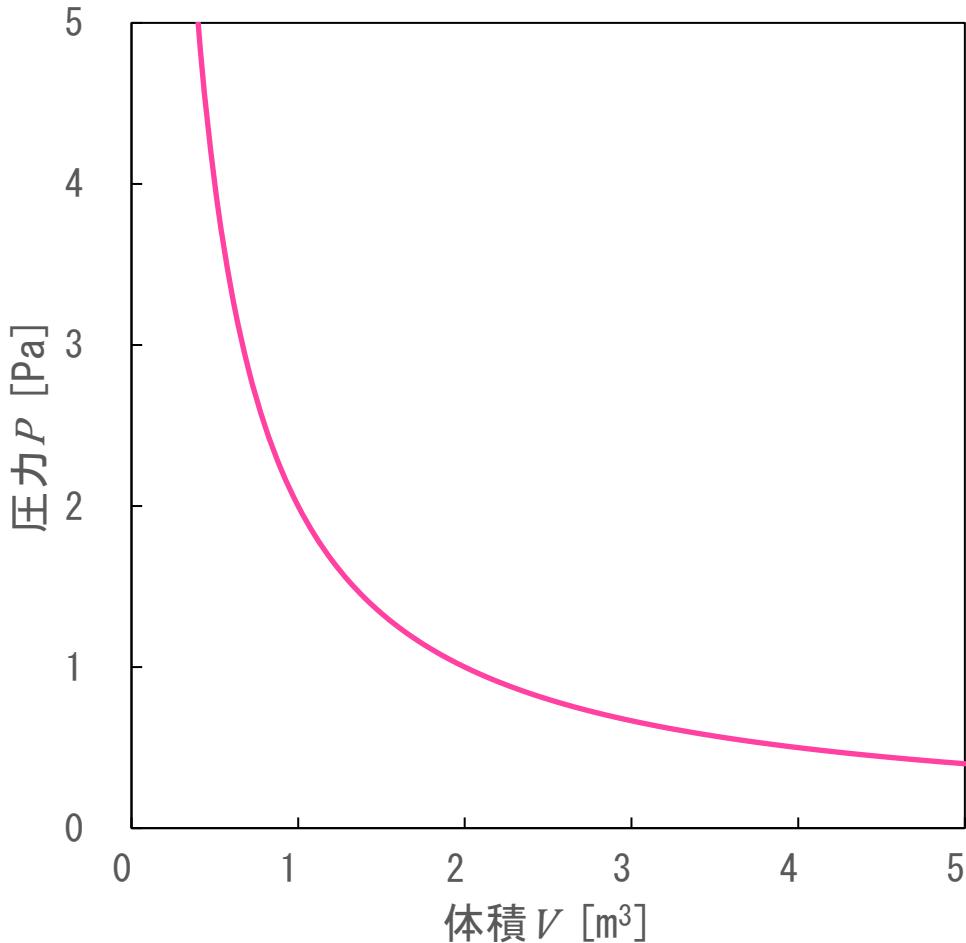
ロバート・ボイル (A. D. 1627-1691年)



一定温度下で、気体の圧力 P と体積 V の積は不变である。
(ボイルの法則)

板書

ボイルの法則



P と V は反比例の関係

- ◆ 一定質量の気体を注射器に閉じ込め,
- ◆ ピストンに力を加えていくと
- ◆ 体積は小さくなる.

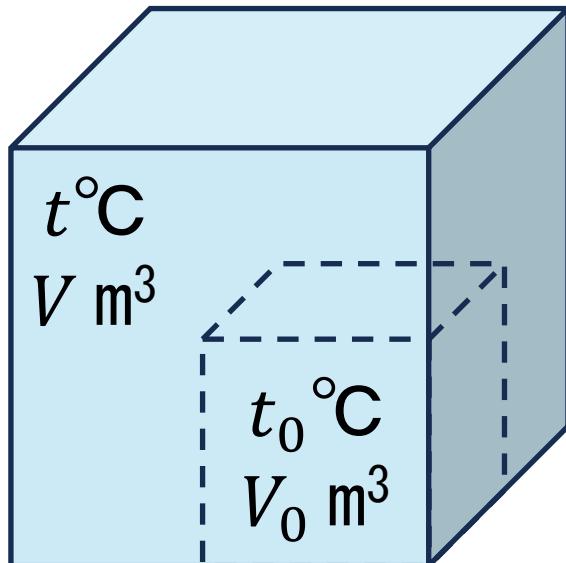
$$PV = P_0V_0 \cdots (2.9)$$

- ◆ $P - V$ 図は左に示す.

熱膨張 -2

板書

- ◆ 温度による**気体の体積の変化**を**体膨張**と呼ぶ.
- ◆ $t_0 [{}^\circ\text{C}]$ における体積を $V_0 [\text{m}^3]$,
 $t [{}^\circ\text{C}]$ における体積を $V [\text{m}^3]$,
体膨張率を $\alpha [/\text{K}]$ とすると次
 である.



$$\frac{1}{V_0} (V - V_0) = \alpha(t - t_0) \cdots (2.10)$$

板書

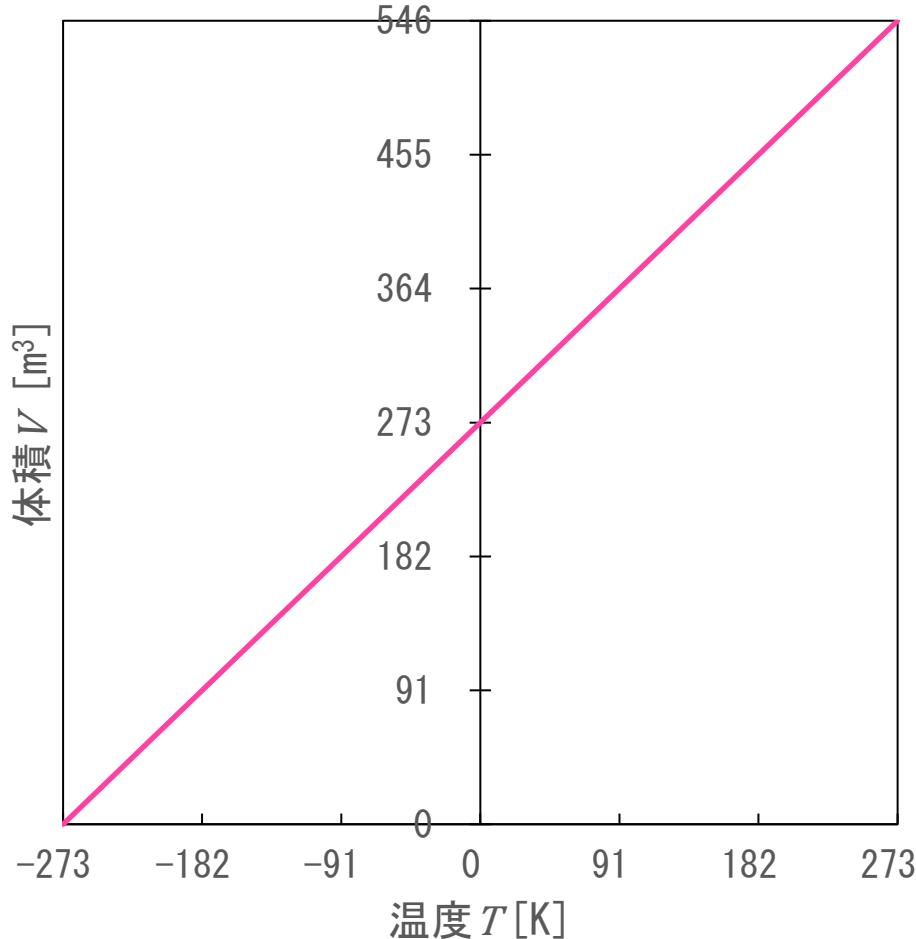
ジャック・シャルル
(A. D. 1746-1823年)



一定圧力下で、気体
の膨張率 α は不变で
ある。
(シャルルの法則)

板書

シャルルの法則



V と T は **比例** の関係

- ◆ 理想気体では、 $\alpha = \frac{1}{T_0}$ である。
- ◆ (2.10) 式に代入する
と次である。

$$\frac{V}{T} = \frac{V_0}{T_0} \cdots (2.11)$$

- ◆ $V - T$ 図は左に示す。

膨張率から絶対温度が決まる

- 実験で1[atm]のとき体膨張率 α は、

$$\alpha = \frac{1}{273} \cdots (2.12)$$

の値を持つ。

- ここで基準点の異なる温度 T [K]を、

$$T = t + \frac{1}{\alpha} = t + 273 \cdots (2.13)$$

と定義する。

板書

理想気体の状態方程式

- ボイル-シャルルの法則
- 1[mol] を標準状態 ($0[^\circ\text{C}]$ かつ $1[\text{atm}]$) で
22.4[L]を占める気体の量
- 気体定数 $R[\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})]$ を気体1[mol]の状態
方程式における比例定数
- $n[\text{mol}]$ を物質量

上記より、次のように立式できる。

$$PV = nRT \cdots (2.14)$$

05

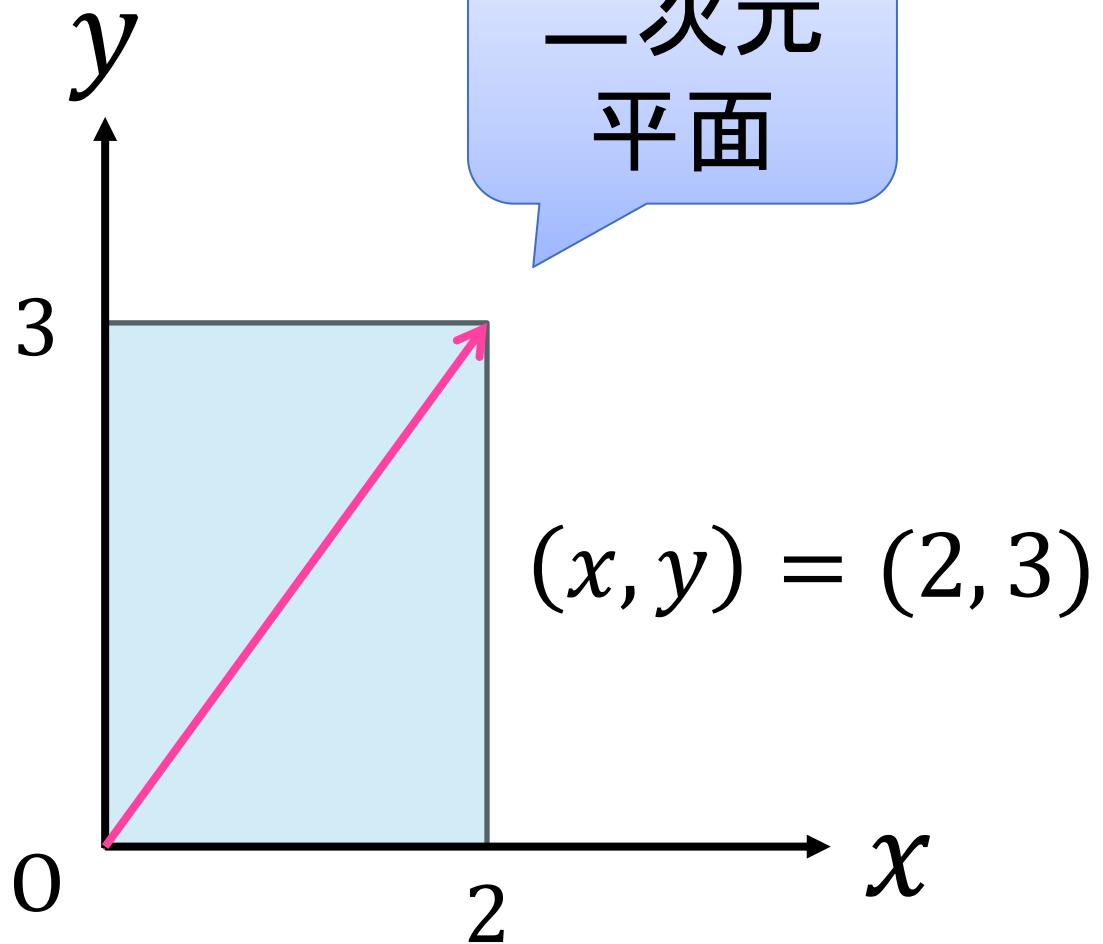
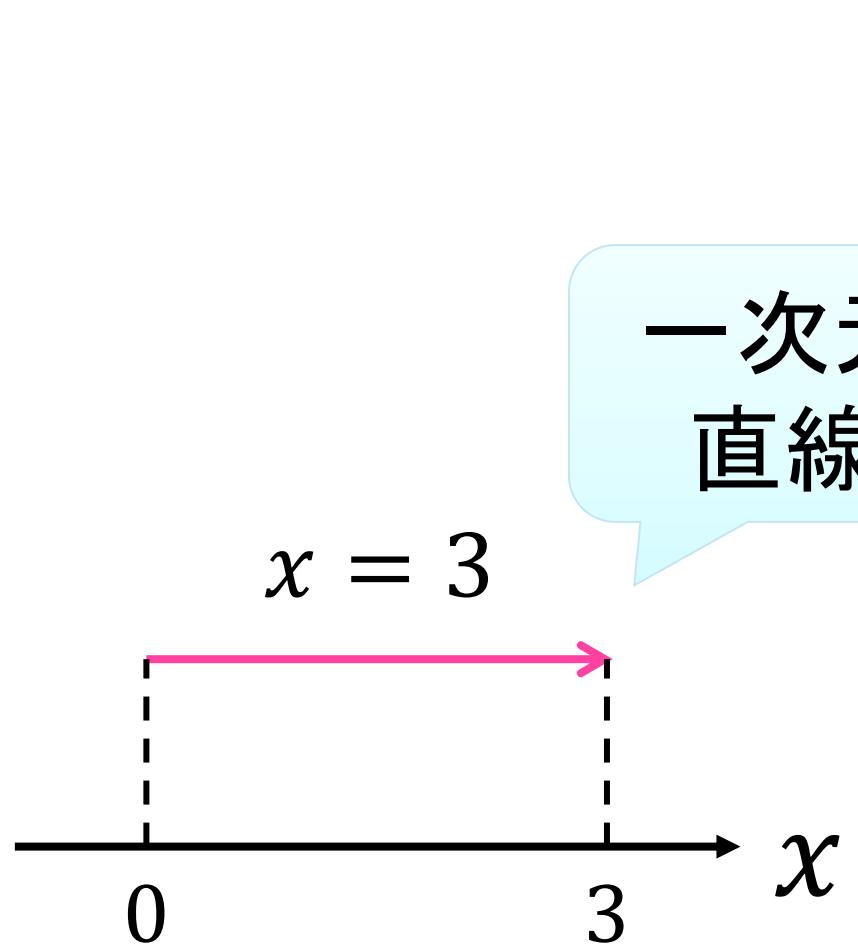
気体分子運動論

-
- 力学の復習
 - 分子の運動
 - 気体の圧力
 - 状態方程式と比較
 - 分子の並進運動

スカラーとベクトル -1

余談

43

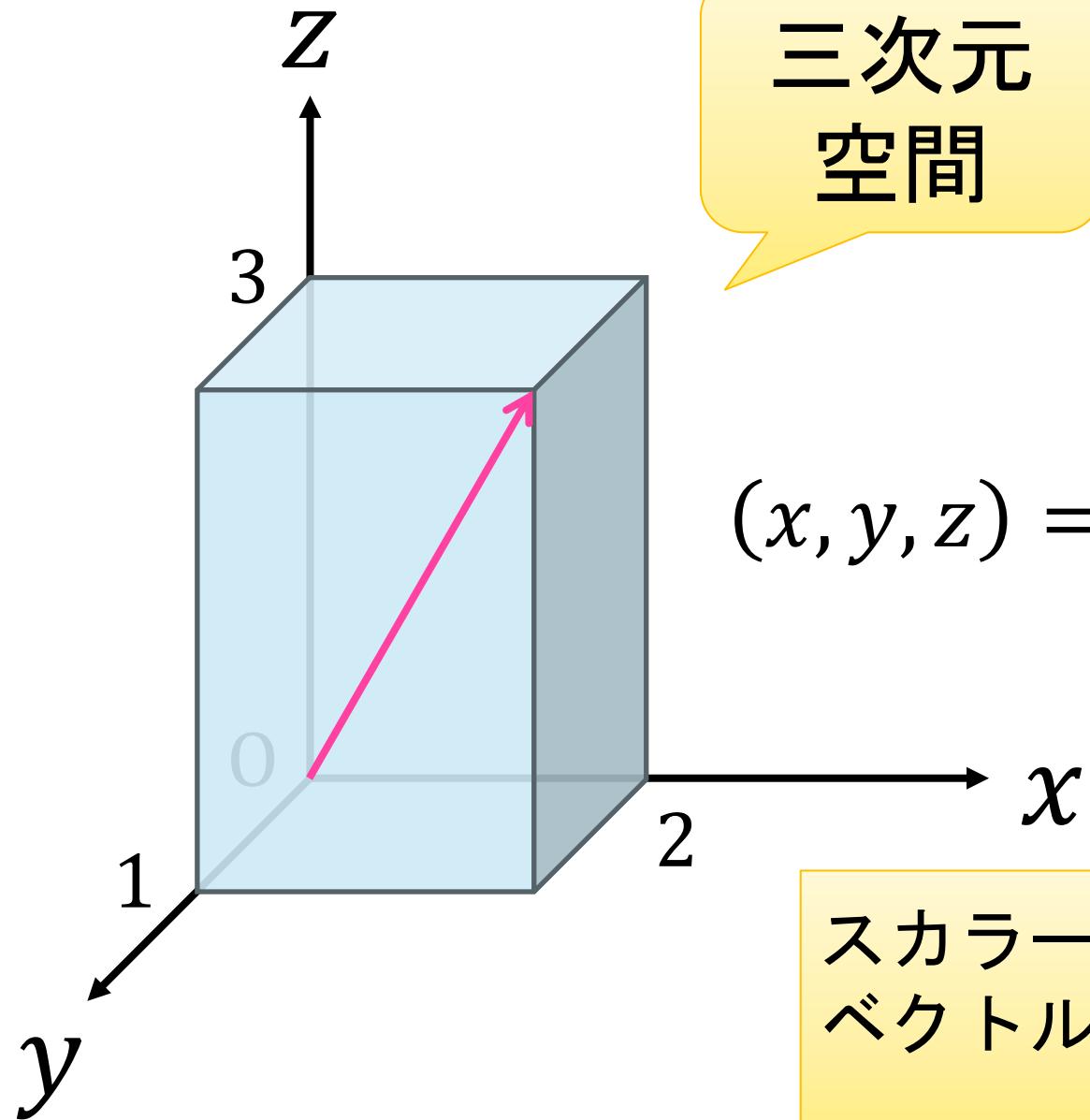


2軸目によって、
向きが定まる！

スカラーとベクトル -2

44

余談



スカラー: 「大きさ」のみ持つ量
ベクトル: 「大きさ」と「向き」を持つ量 (数と数の組)

運動量と力積

$$\vec{F} = m\vec{a} \cdots (1. xx)$$

$$\begin{aligned} m\vec{a}t &= \vec{F}t \\ \vec{v} &= \vec{v}_0 + \vec{a}t \\ \vec{v} - \vec{v}_0 &= \vec{a}t \end{aligned}$$

$$m(\vec{v} - \vec{v}_0) = \vec{F}(t - t_0) \cdots (1. xx)$$

運動量

力積

$$\begin{aligned} m\vec{a}x &= \vec{F}x \\ v^2 - v_0^2 &= 2ax \\ \frac{1}{2}(v^2 - v_0^2) &= ax \end{aligned}$$

$$\frac{1}{2}m(v^2 - v_0^2) = F(x - x_0) \cdots (1. xx)$$

運動エネルギー

仕事

圧力の定義

余談

力 F 1 [N]

面積 S

1 [m^2]

圧力 p 1 [Pa]

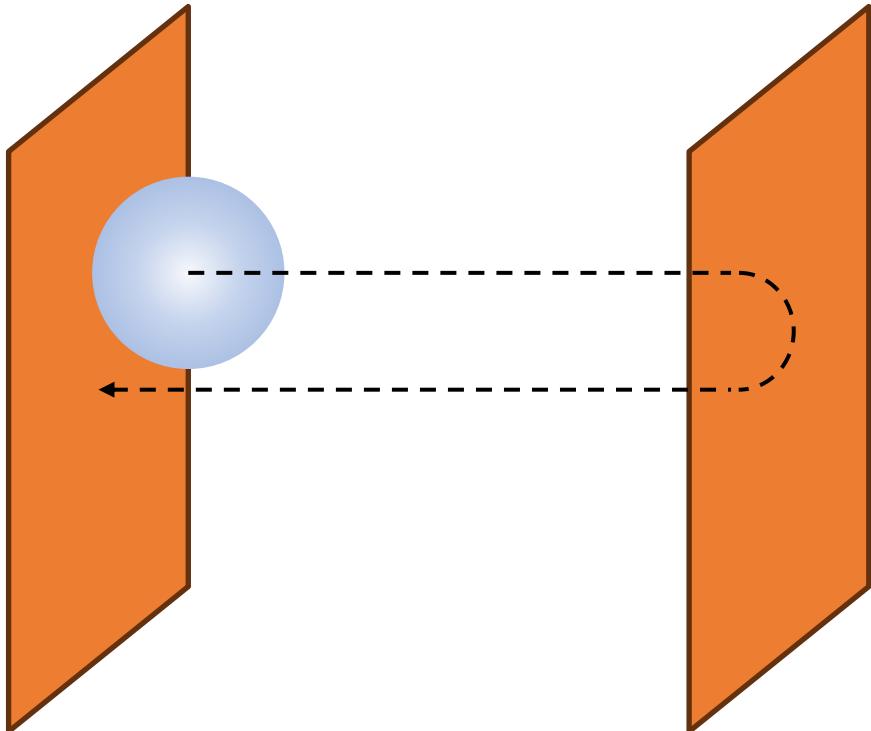
単位面積 S あたりに垂直にかかる力 F

$$p = \frac{F}{S} \cdots (1. xx)$$

分子の運動 -1

板書

A面

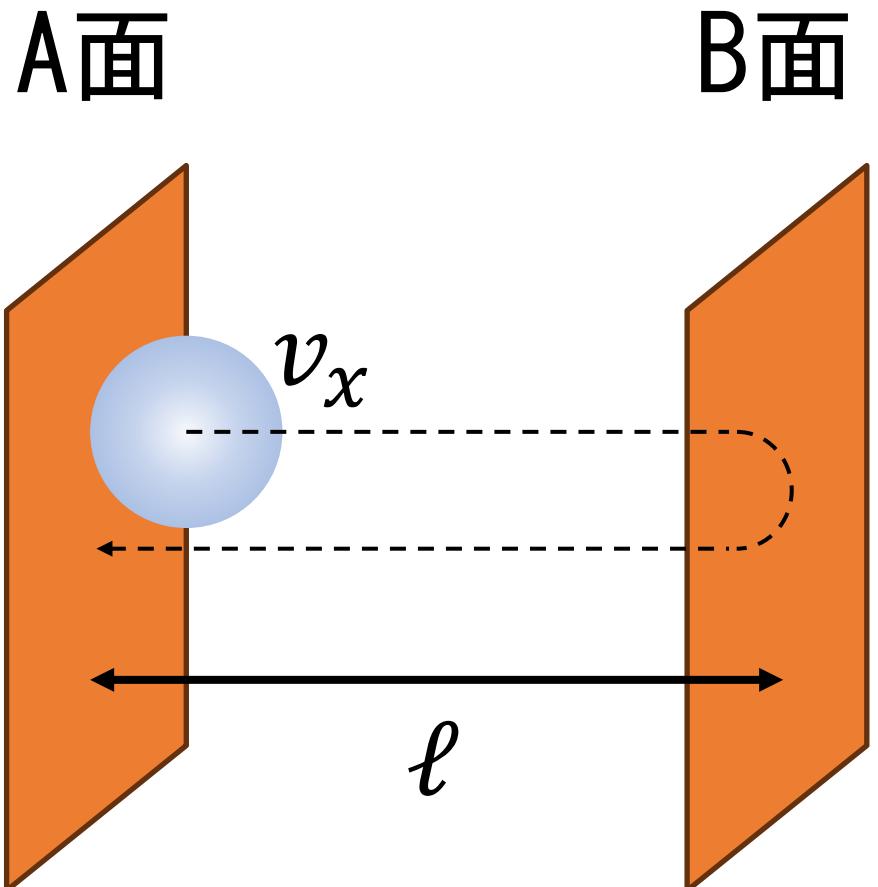


B面

- ◆ 分子の運動を簡単のため1次元で考える。
- ◆ 1[個]の分子がA面からB面に完全弾性衝突し、
- ◆ 再びA面に衝突する運動を仮定する。

板書

分子の運動 -2

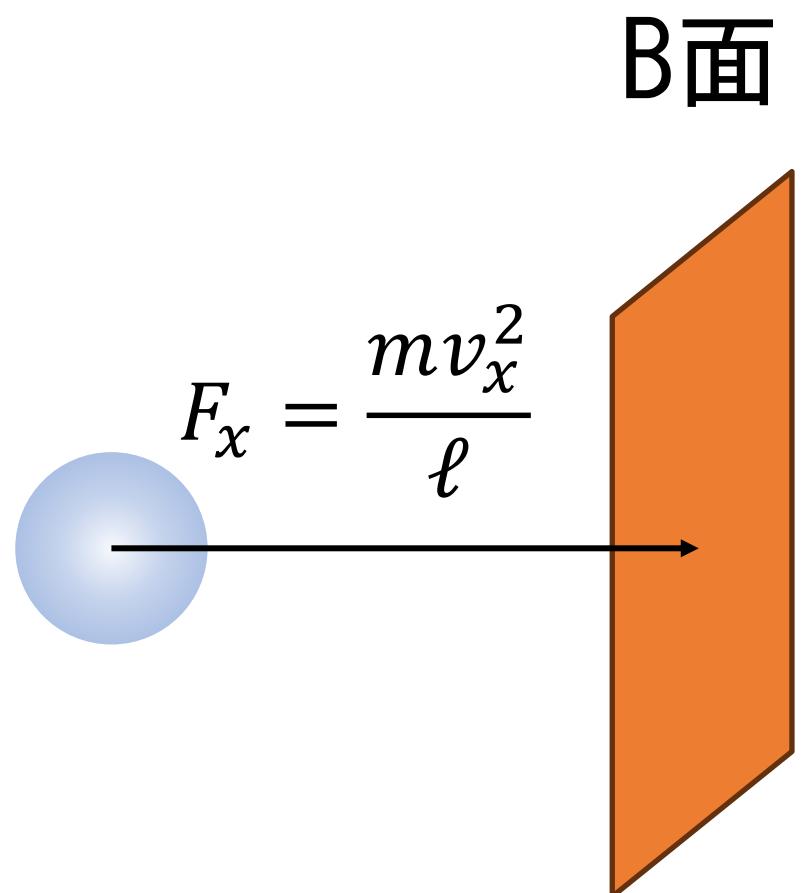


- ◆ x 軸方向における分子の運動 v_x [m/s],
 - ◆ 質量を m [kg] とすると運動量の変化は次である.
- $$m((-v_x) - v_x) = -2mv_x \quad \cdots (2.15)$$
- ◆ 距離 ℓ [m] 離れたAB間を, 速さ v_x [m/s] で往復する時間 t [s] は次である.

$$t = \frac{2\ell}{v_x} \quad \cdots (2.16)$$

気体の圧力 -1

板書

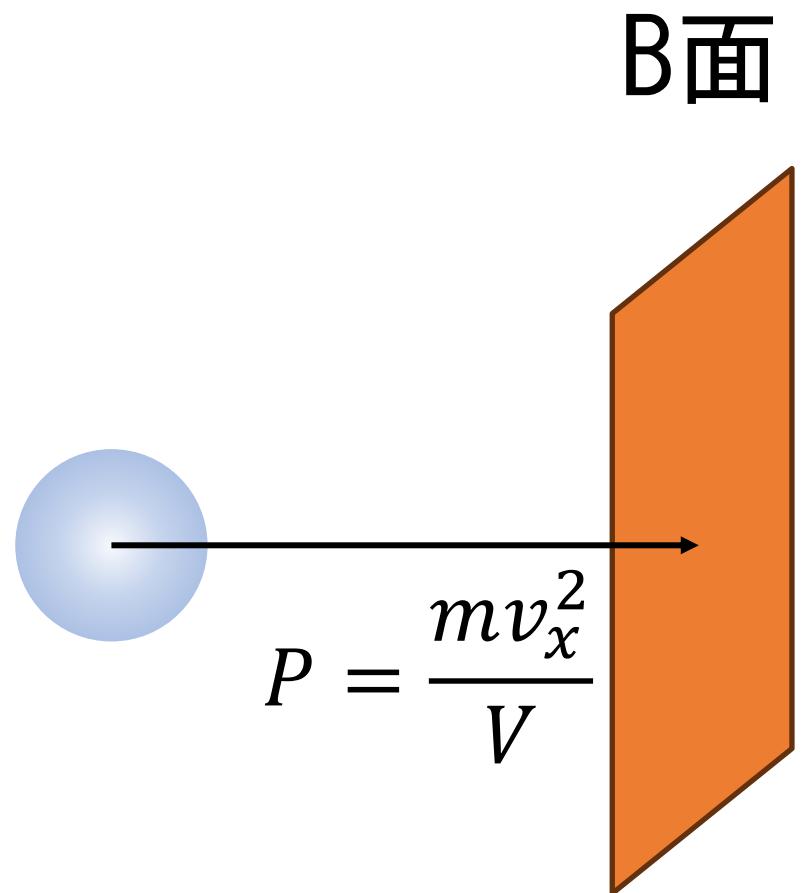


- ◆ 分子の力積 J は(2.15)式より $-2mv_x$ である。
- ◆ そのため壁が分子から受ける力は、**作用-反作用の法則**より $2mv_x$ である。
- ◆ 分子の力 F は、力積 J , 時間 t より次である。

$$F_x = \frac{|J|}{t} = \frac{mv_x^2}{l} \dots (2.17)$$

板書

気体の圧力 -2



- ◆ ここで分子が与える圧力
 P は、B面の面積を S_B とす
ると次である。

$$P = \frac{F}{S} = \frac{mv_x^2}{\ell^3} \dots (2.18)$$

- ◆ $\ell^3 = V$ より次である。

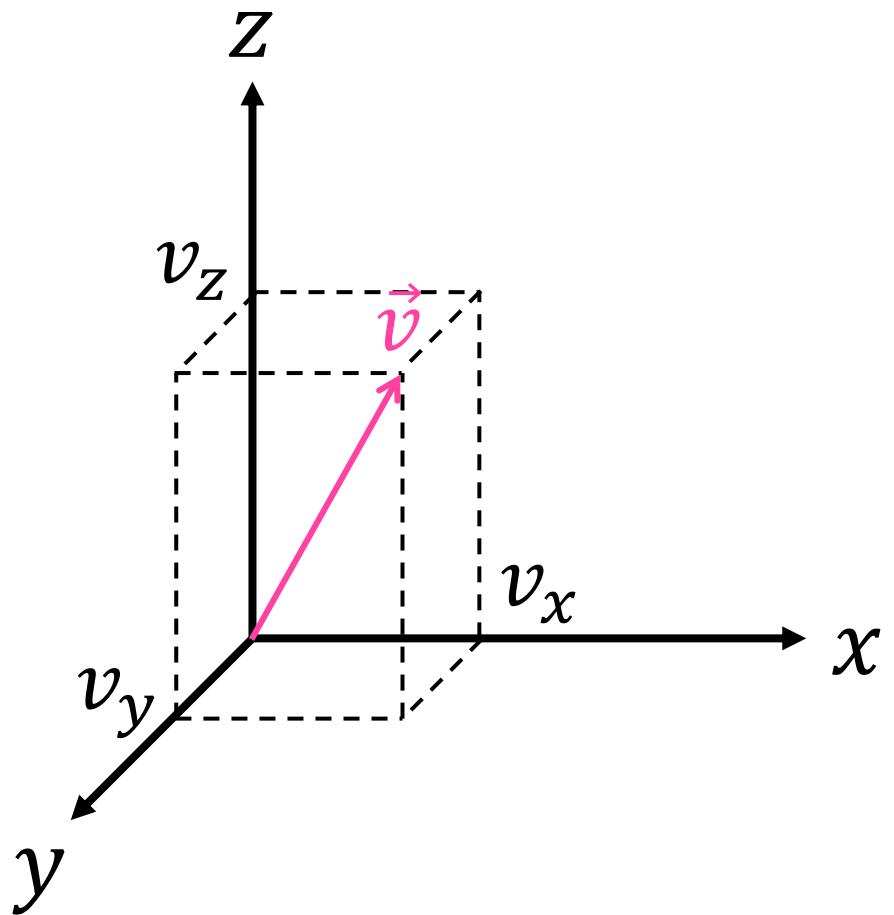
$$P = \frac{mv_x^2}{V} \dots (2.19)$$

直線から空間へ拡張

板書

◆ 3次元に拡張して考える。

$$v_x = v_y = v_z \cdots (2.20)$$



$$|\vec{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \cdots (2.21)$$

◆ (2.20) と (2.21) 式より次である。

$$v_x^2 = \frac{v^2}{3} \cdots (2.22)$$

◆ $\sqrt{v^2}$ を二乗平均速度と呼ぶ。

板書

気体の圧力 -3

- (2.19) 式を (2.22) 式に代入すると、次である。

$$P = \frac{mv^2/3}{V} = \frac{mv^2}{3V} \cdots (2.23)$$

- N_0 [個] の分子と仮定すると、次である。

$$P = N_0 \frac{mv^2}{3V} \Leftrightarrow PV = \frac{1}{3} N_0 m v^2 \cdots (2.24)$$

- 分子の運動エネルギーは $\frac{1}{2} m v^2$,
- N_0 [個] は物質量 n [mol] とアボガドロ定数 N_A [/mol] の積なので次である。

$$PV = \frac{2}{3} n N_A \frac{1}{2} m v^2 \cdots (2.25)$$

板書

状態方程式と比較 -1

- (2. 14) と (2. 25) 式は恒等式なので、次である。

$$nRT = \frac{2}{3} nN_A \frac{1}{2} mv^2 \cdots (2. 26)$$

- 分子の運動エネルギーについて整理すると、次である。

$$\frac{1}{2} mv^2 = \frac{3}{2} \frac{R}{N_A} T \cdots (2. 27)$$

- これらのことから、**理想気体のエネルギーは温度のみで決まる**ことが分かる。

板書

单原子分子理想氣体

- 单原子分子理想氣体の場合，粒子数 N は1なので，次である.

$$n = \frac{N}{N_A} = \frac{1}{N_A} \cdots (2.28)$$

- (2.27) 式に代入すると，次である.

$$U = \frac{3}{2} nRT \cdots (2.29)$$

- 二原子分子の場合， $N = 2$ として(2.27)式に代入すればよい.

板書

状態方程式と比較 -2

- (2.27) 式の $\frac{R}{N_A}$ を定数と見なし, ボルツマン定数と呼び k を用いる.
- 気体定数 R [J/(mol · K)], アボガドロ定数 N_A [/mol] とすると, ボルツマン定数 k [J/K] は, 次である.

$$k = \frac{R}{N_A} = \frac{8.31}{6.02 \times 10^{-23}} = 1.38 \times 10^{-23} \quad \cdots (2.30)$$

板書

分子の並進運動

- 最後に、分子の並進運動を考える。
- 二乗平均速度について整理すると、次である。

$$PV = \frac{2}{3} n N_A \frac{1}{2} m v^2 \Leftrightarrow \vec{v} = \sqrt{\frac{3PV}{nN_A m}} \cdots (2.31)$$

- 理想気体の状態方程式を考慮すると、次である。

$$\vec{v} = \sqrt{\frac{3k}{m} T} \cdots (2.32)$$

- よって、温度が上がると分子の平均速度が上昇することが示された。

まとめ回

06

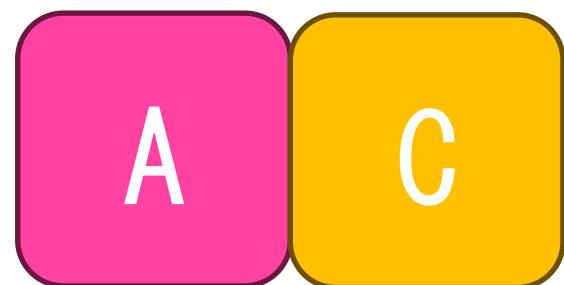
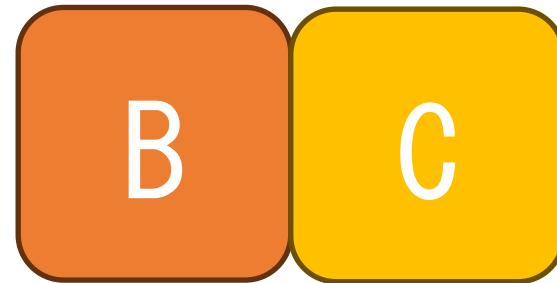
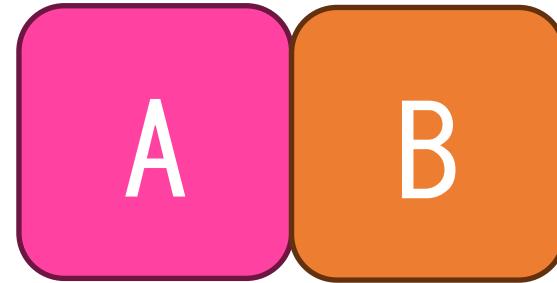
熱力学の4法則

- 热力学第0法則：热平衡
- 热力学第1法則：热量保存則
- 热力学第2法則：トムソンの原理 他
- 热力学第3法則：ネルンストの热定理

法則とは？

- 自然界に見られる現象の法則性を実験または観測で見出し、数学を用いて記述する。
- すなわち、経験則である。
- 法則性の正しさは、測定の「不確さ」の範囲で検証される。
- そのため、証明はされない。

板書



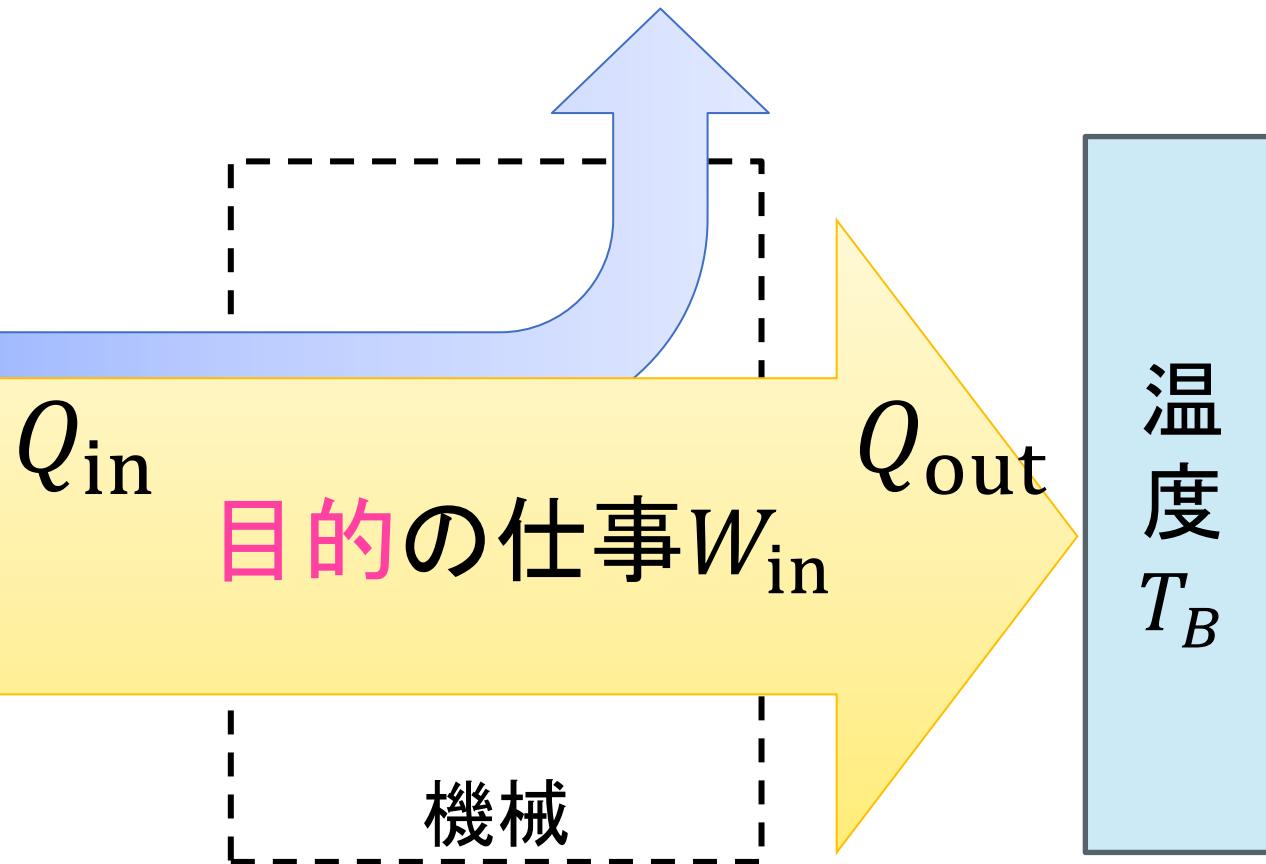
熱平衡

物体Aと物体B、物体Bと物体C
が熱平衡のとき、
物体Aと物体Cも熱平衡である。

熱量保存則

板書

外界への仕事 W_{out}



$$T_A > T_B$$

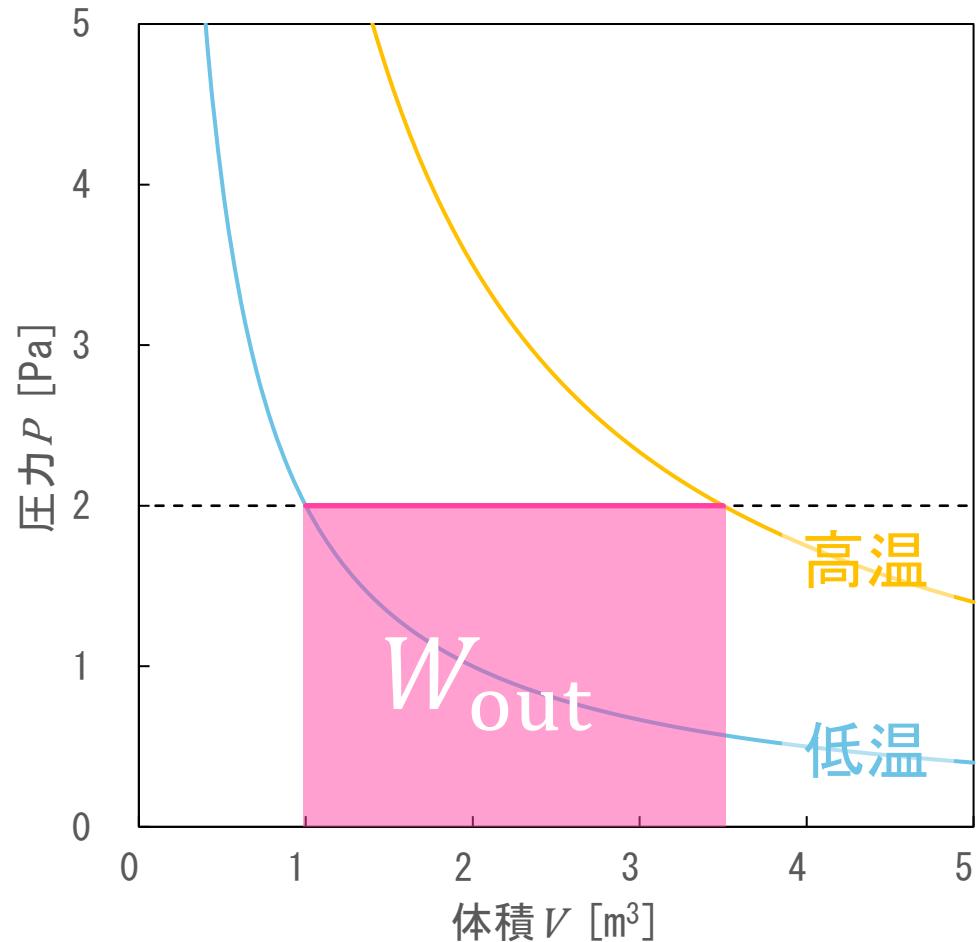
エネルギー保存則

$$Q_{\text{in}} = Q_{\text{out}} + W_{\text{out}} \quad \cdots (2.33)$$

板書

内部エネルギーと仕事

内部エネルギー $\Delta U [J]$

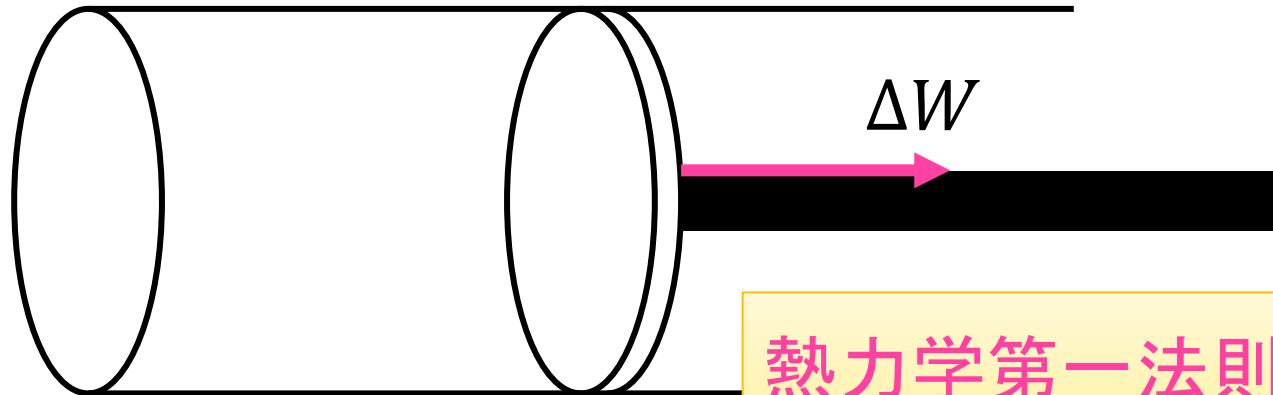


- ◆ 物質を構成する分子の運動エネルギーの総和
- ◆ 気体が外部にする仕事 $W_{out} [J]$
- ◆ $W_{out} = (P - V \text{ 図の面積})$

… (2. 34)

板書

シリンダー内の気体に熱を加える

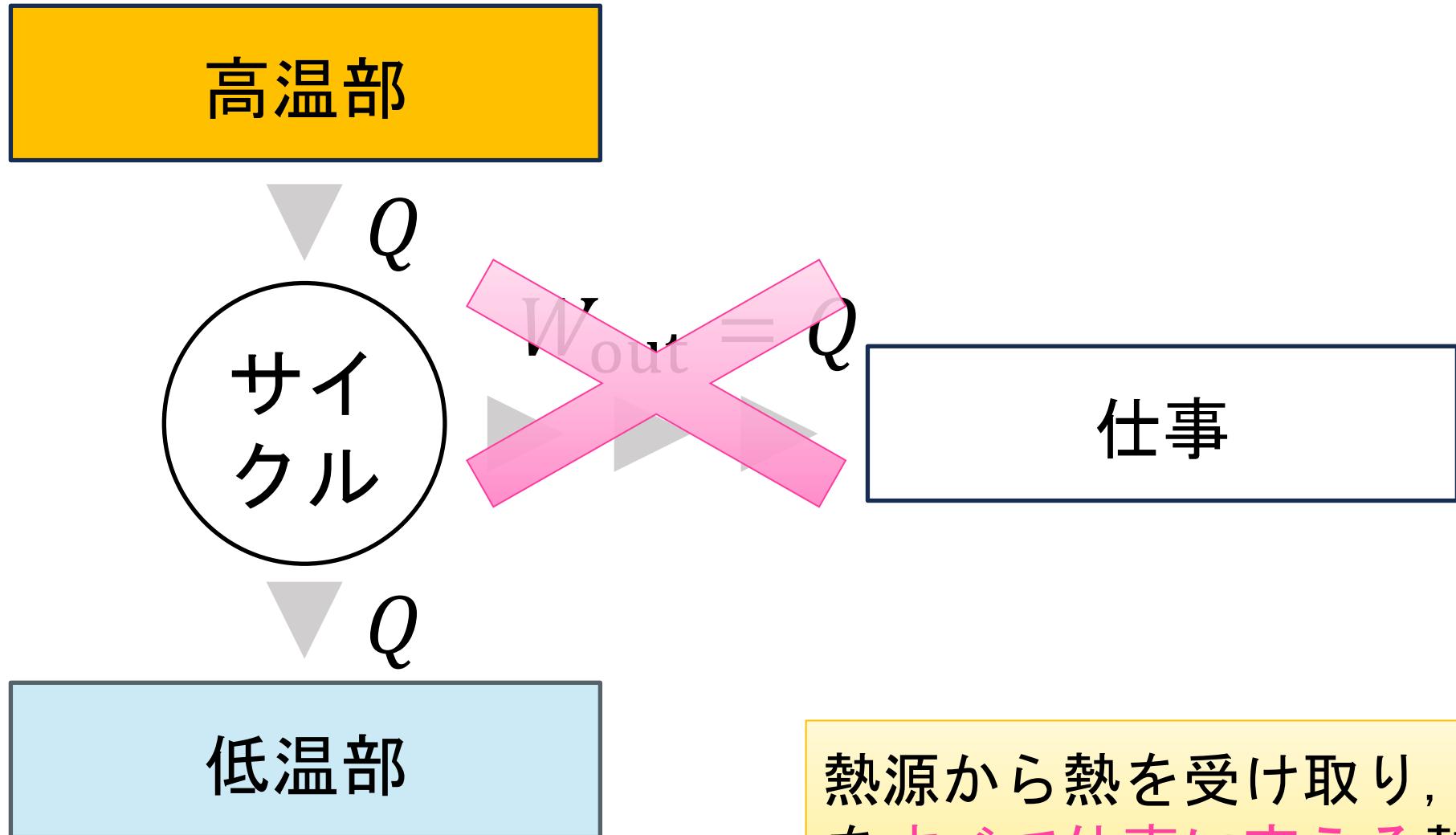


熱力学第一法則

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta W \cdots (2.35)$$

- ◆ 気体は膨張する \Rightarrow 外部に仕事する ΔW
- ◆ 内部エネルギーは増加する \Rightarrow 温度が上昇する ΔU

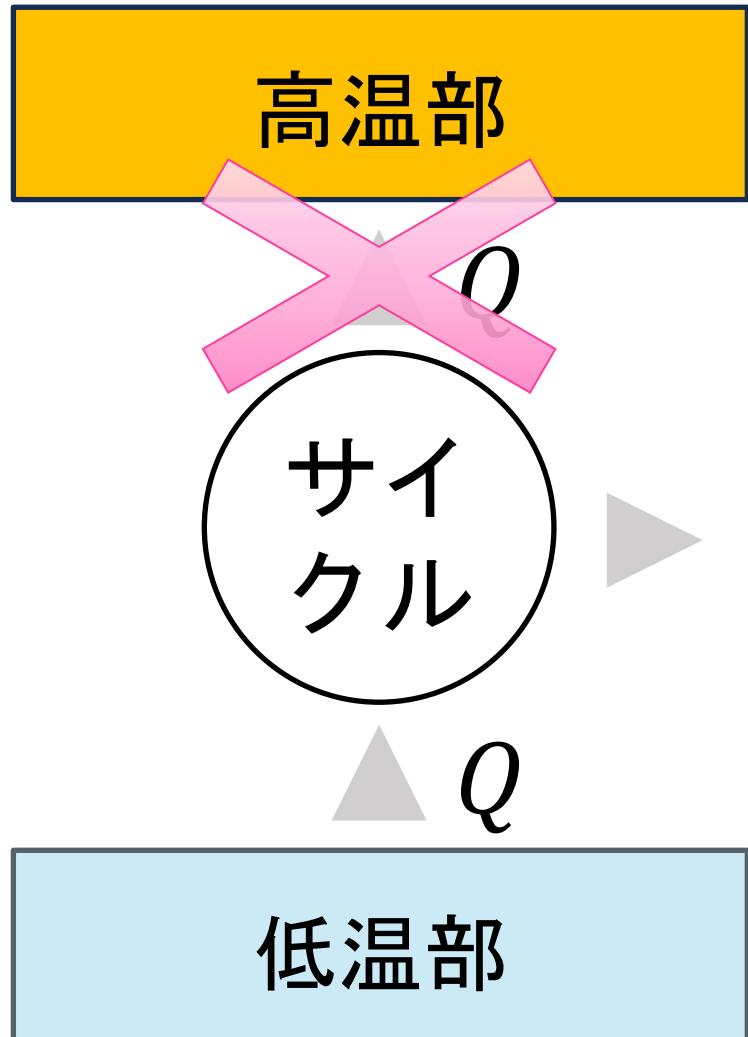
ΔQ : 加えた熱量, ΔW : 体積変化, ΔU : 温度変化



熱源から熱を受け取り、それをすべて仕事に変える熱サイクルは存在しない。

板書

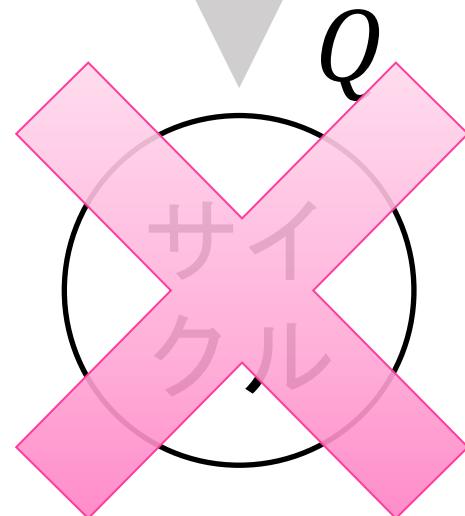
クラウジウスの原理



低温部から高温部に熱を移して、他に影響を残さない熱サイクルは存在しない。

オストワルトの原理

板書

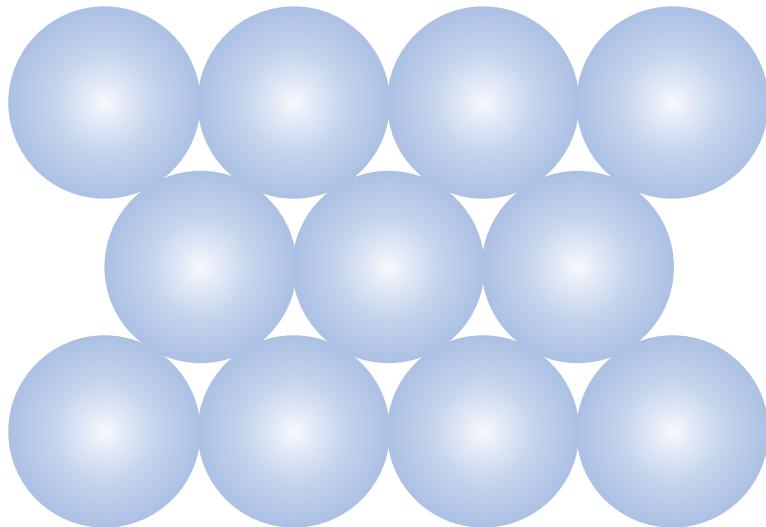


ただ1つの熱源から熱を吸収し,
ずっと動き続ける熱サイクル
第二種永久機関は存在しない。

板書

ネルンストの熱定理

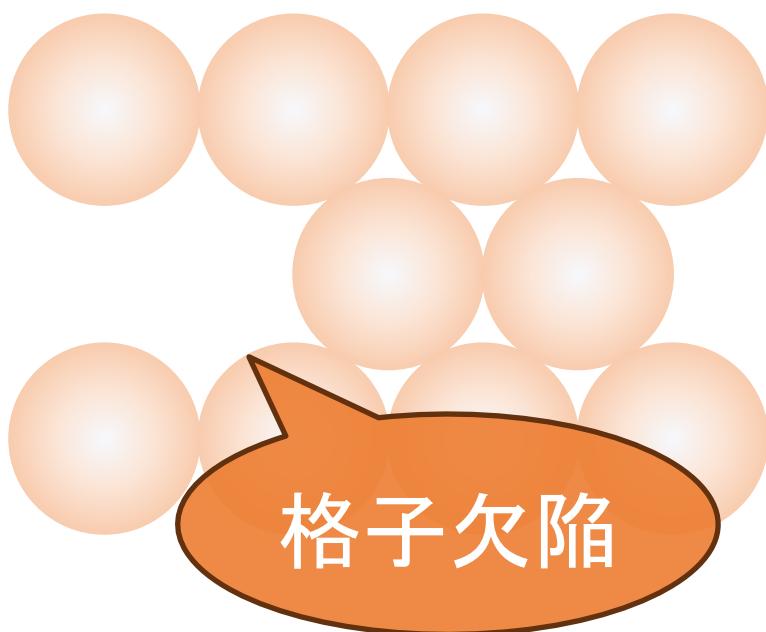
$$T = 0$$



完全結晶

分子が規則正しく配列した結晶

$$T \neq 0$$



完全結晶になるすべての物体の運動は、 $T = 0$ において0である。

07

$P - V$ 図と状態変化

- 定圧変化
- 定積変化
- 定温変化
- 断熱変化

比例・反比例 -1

- 比例

$$y = kx \cdots (1. xx)$$

- そのため, $\frac{y}{x} = \text{Const.}$ である.
- 反比例

$$y = \frac{k}{x} \cdots (1. xx)$$

- そのため, $xy = \text{Const.}$ である.

比例・反比例 -2

- 物理学の数式は、ほとんどが比例・反比例の関係である。
- 掛け算がConst. のとき比例の関係であるといい、 $x \propto y$ と表記する。
- 割り算がConst. のとき反比例の関係であるといい、 $x \propto^{-1} y$ と表記する。

物理学では $y - x$ と限らない

力学

- グラフ: 速さ v – 時間 t , 面積: 位置 x
- グラフ: 合力 F – 位置 x , 面積: 仕事 W
- グラフ: 合力 F – 時間 t , 面積: 力積 J

熱学

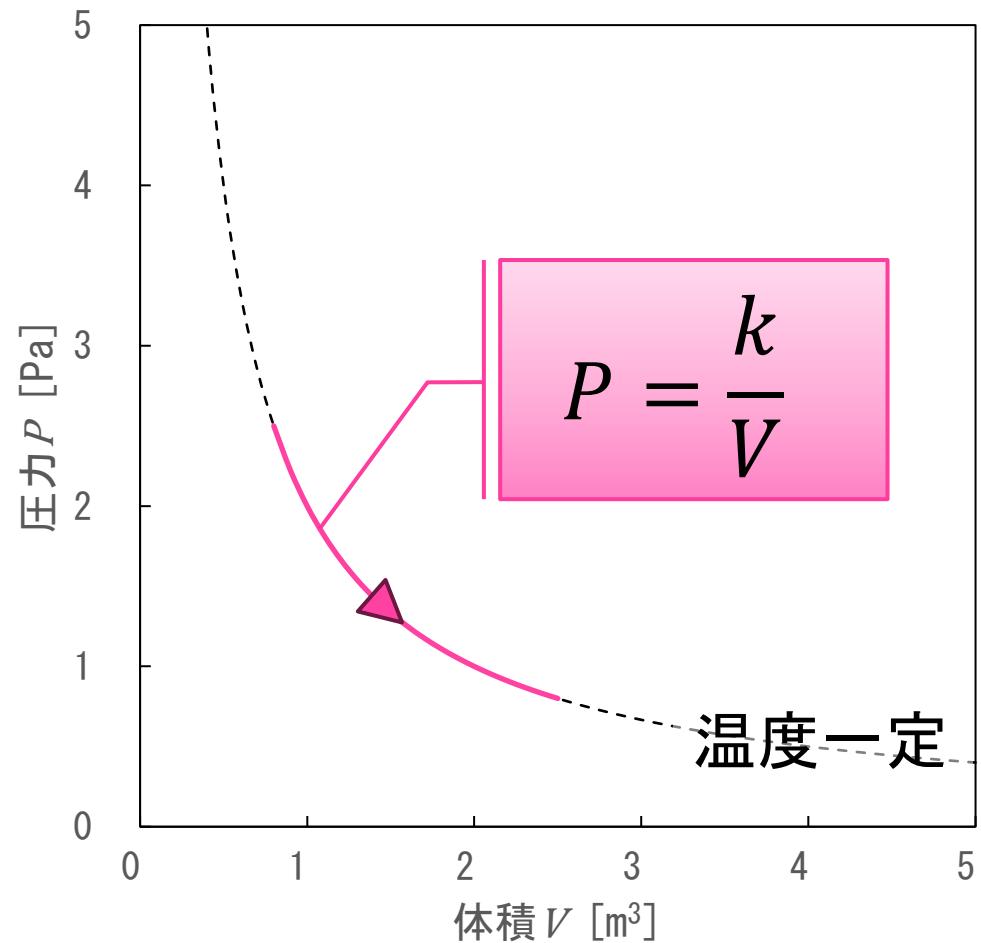
- グラフ: 圧力 P – 体積 V , 面積: 気体の仕事 W

電磁気学

- グラフ: 電場 E – 位置 x , 面積: 電位 V
- グラフ: 電流 I – 時間 t , 面積: 電気量 e

板書

定温変化



- ◆ 定温（等温）変化なので,
 $T = \text{Const.} \cdots (2.36)$
- $\Delta U = 0 (\Delta T = 0) \cdots (2.37)$
- である。
- ◆ ボイルの法則より,
 $PV = \text{Const.} \cdots (2.9)$
- である。
- ◆ 熱力学第一法則より,
 $Q_{\text{in}} = W_{\text{out}} \cdots (2.38)$
- である。

板書

定積モル比熱 -1

- 定積変化において物質1[mol]を1[K]上げるのに必要な熱量のこと。
 - 定積モル比熱を c_V [J/(mol·K)], 物質量 n [mol], 熱量 Q [J] とすると, 次である.
- $$\Delta Q = n c_V \Delta T \cdots (2. 39)$$
- そのため, 定積モル比熱 c_V [J/(g·K)] は次である.

$$c_V = \frac{\Delta Q}{n \Delta T} \cdots (2. 40)$$

板書

定積モル比熱 -2

- 定積変化では $W_{\text{out}} = 0$ より、(2.35)式に代入すると、次である。

$$\Delta Q = \Delta U \cdots (2.41)$$

- (2.41)式を(2.40)式に代入すると、次である。

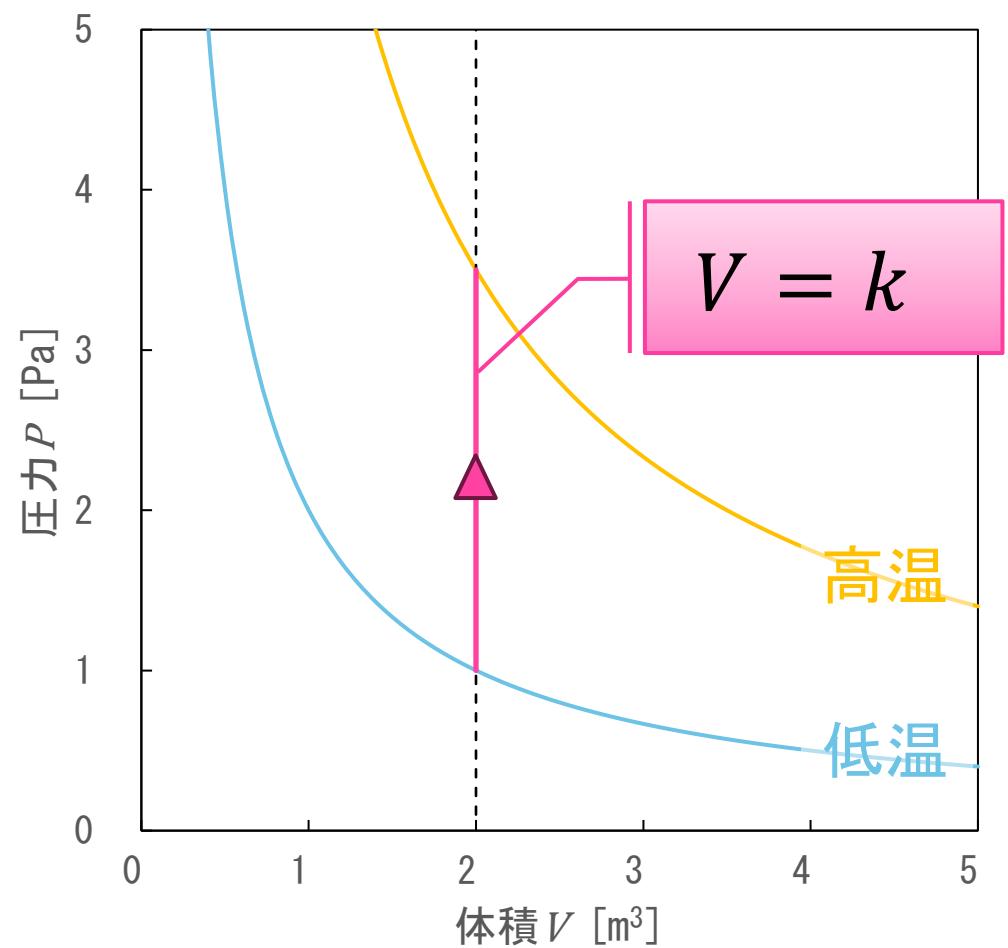
$$\Delta U = n c_V \Delta T \cdots (2.42)$$

- (2.29)と(2.42)式は恒等式なので、单原子分子の定積モル比熱は次である。

$$c_V = \frac{3}{2} R \cdots (2.43)$$

板書

定積変化



- ◆ 定積（定容）変化なので、
 $V = \text{Const.} \cdots (2.44)$
- $W_{\text{out}} = 0 (\Delta V = 0) \cdots (2.45)$ である。
- ◆ ボイル-シャルルの法則より、
 $\frac{P}{T} = \text{Const.} \cdots (2.46)$ である。
- ◆ 熱力学第一法則より、
 $Q_{\text{in}} = \Delta U \cdots (2.47)$ である。

板書

定圧モル比熱 -1

- 定圧変化において物質1[mol]を1[K]上げるのに必要な熱量のこと.
 - 定圧モル比熱を c_P [J/(mol·K)], 物質量 n [mol], 熱量 Q [J] とすると, 次である.
- $$\Delta Q = n c_P \Delta T \cdots (2.48)$$
- そのため, 定圧モル比熱 c_P [J/(g·K)] は次である.

$$c_P = \frac{Q}{n \Delta T} \cdots (2.49)$$

定圧モル比熱 -2

- 定圧変化では $w_{\text{out}} = nRT$ より、(2. 35) 式に代入すると、次である。

$$\Delta Q = \Delta U + nRT \cdots (2. 50)$$

- (2. 50) 式に (2. 48) と (2. 42) 式に代入すると、次である。

$$nc_P\Delta T = nc_V\Delta T + nRT \cdots (2. 51)$$

板書

定圧モル比熱 -3

- (2.51) を整理すると次である.

$$c_P = c_V + R \cdots (2.52)$$

- (2.52) 式を、マイヤーの関係式と呼ぶ.
- (2.52) 式に (2.43) 式を代入すると、次である.

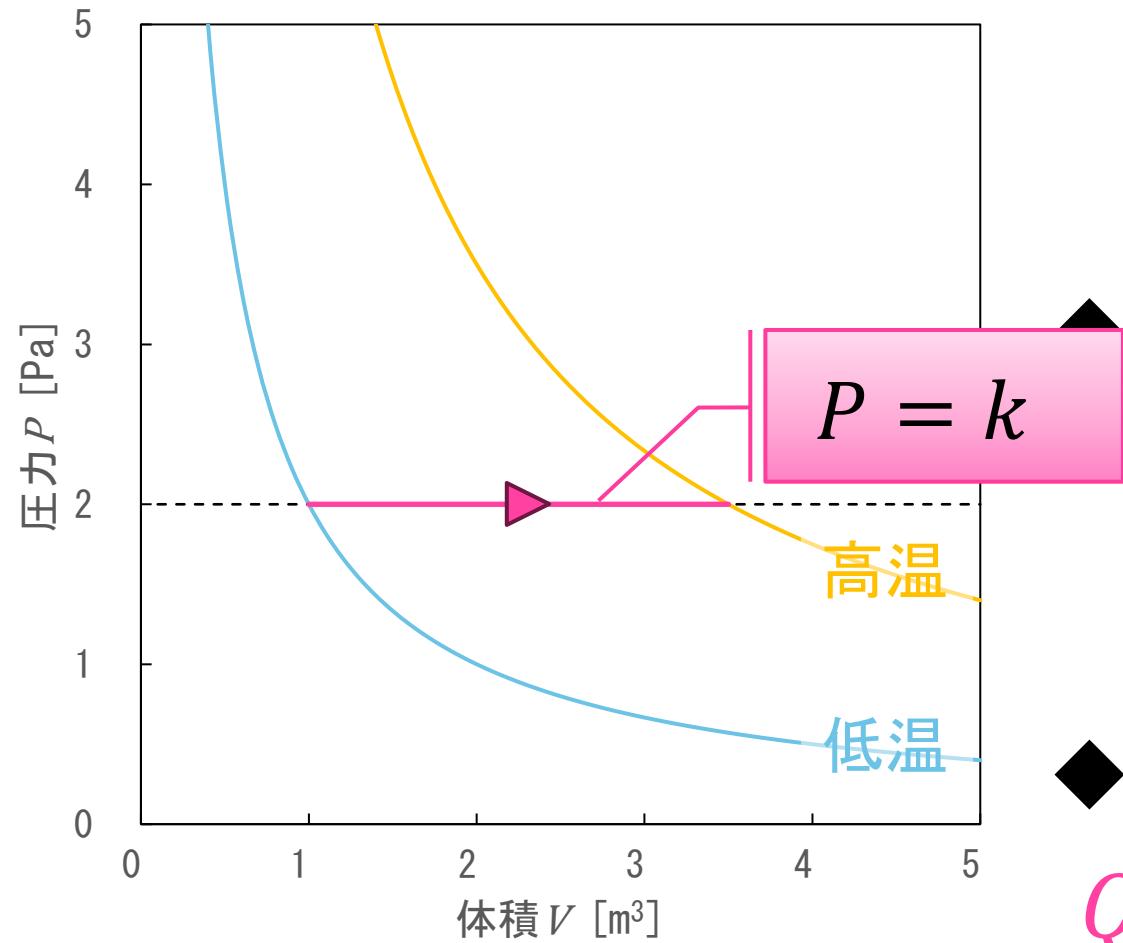
$$c_P = \frac{3}{2}R + R \cdots (2.53)$$

- (2.53) 式を計算し、单原子分子理想気体の定圧モル比熱は次である.

$$c_P = \frac{5}{2}R \cdots (2.54)$$

板書

定圧変化



- ◆ 定圧変化なので,
 $P = \text{Const.} \cdots (2.55)$
 である.
- シャルルの法則より,
 $\frac{V}{T} = \text{Const.} \cdots (2.11)$
 である.
- 熱力学第一法則より,
 $Q_{\text{in}} = \Delta U + P\Delta V \cdots (2.56)$
 である.

ポアソンの法則 -1

- 断熱変化では $Q = 0$, $U = nc_V\Delta T$, $W_{out} = PV$ なので, (2. 35) 式に代入すると次である.

$$0 = nc_V\Delta T + PV \quad \cdots (2. 57)$$

- (2. 57) 式に状態方程式 $P = \frac{nRT}{V}$ を代入し, 辺々 $nc_V\Delta T$ で割ると次である.

$$0 = \frac{1}{T}\Delta T + \frac{R}{c_V V}\Delta V \quad \cdots (2. 58)$$

- (2. 58) 式を辺々積分すると, 次である.

$$\text{Const.} = \log TV^{\frac{R}{c_V}} \quad \cdots (2. 59)$$

板書

ポアソンの法則 -2

- 定積モル比熱と定圧モル比熱の比のことを、**比熱比**と呼び γ を用いる。

$$\gamma = \frac{c_P}{c_V} \cdots (2. 60)$$

- (2. 59) 式に(2. 52)式を代入し、比熱比を用いて表すと次である。

$$TV^{\gamma-1} = \text{Const.} \cdots (2. 61)$$

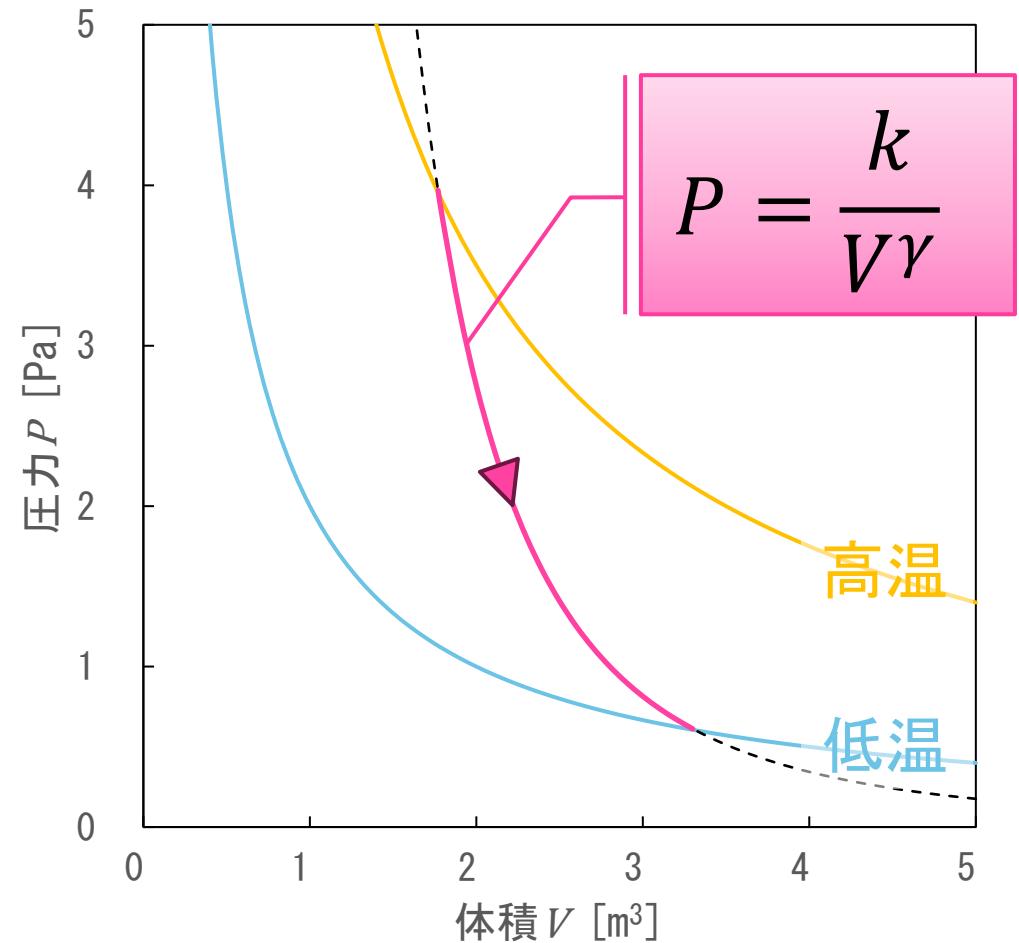
- (2. 61) 式に状態方程式 $T = \frac{PV}{nR}$ を代入すると、次である。

$$PV^\gamma = \text{Const.} \cdots (2. 62)$$

- (2. 62) 式を**ポアソンの法則**と呼ぶ。

板書

断熱変化



- ◆ 断熱変化なので,
 $Q = 0 \cdots (2. 63)$
である。
- ◆ ポアソンの法則より,
 $PV^\gamma = \text{Const.} \cdots (2. 62)$
である。
- ◆ 热力学第一法則より,
 $0 = \Delta U + W_{\text{out}} \cdots (2. 64)$
である。

08

カルノーサイクル

-
- 热机関
 - 热効率
 - グラフの組み合わせ

板書

ニコラ・レオナール・サディ・カルノー
(A.D. 1796–1832年)

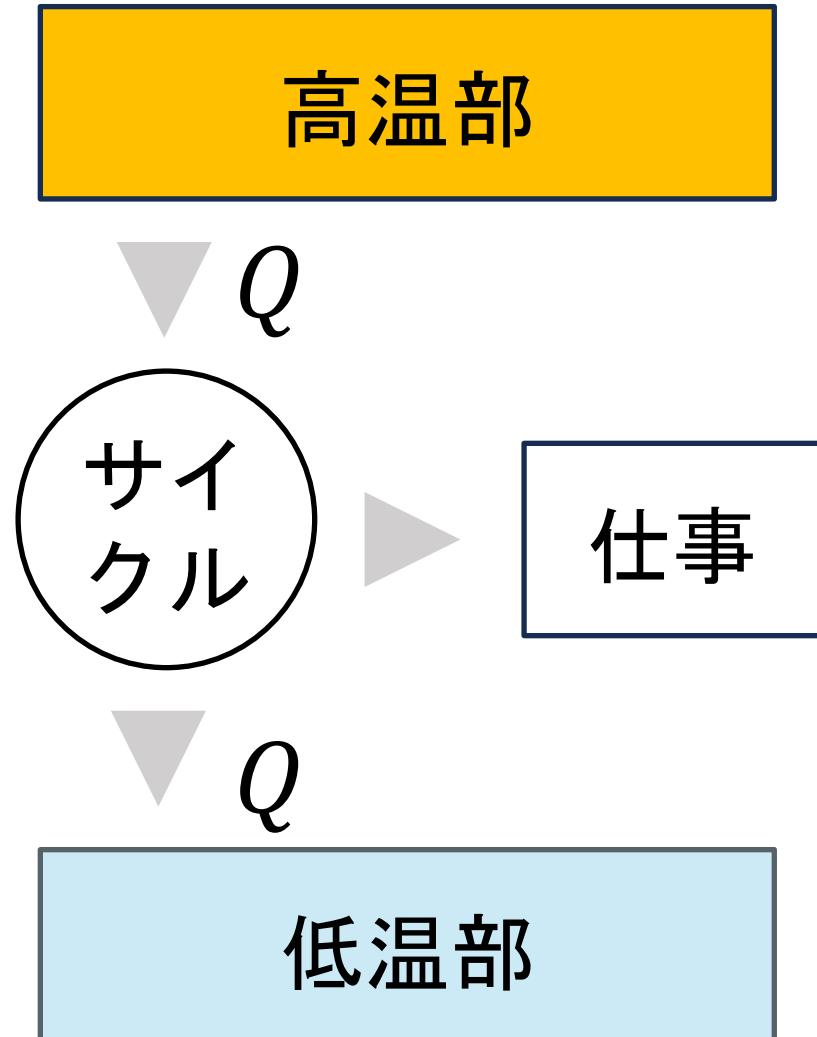


2つの熱源で動作する系についての最大熱効率は、物体によらず**2つの温度のみ**で決まる。

(カルノーの定理)

板書

熱機関



- ◆ 热から仕事に変換する機械を、熱機関と呼ぶ。
- ◆ 高温部から熱を受け取り外界に仕事する。
- ◆ その後元の状態に戻るために、低温部に熱を捨てる。
- ◆ このように元に戻る変化の過程を、熱サイクルと呼ぶ。

自動車エンジン

余談

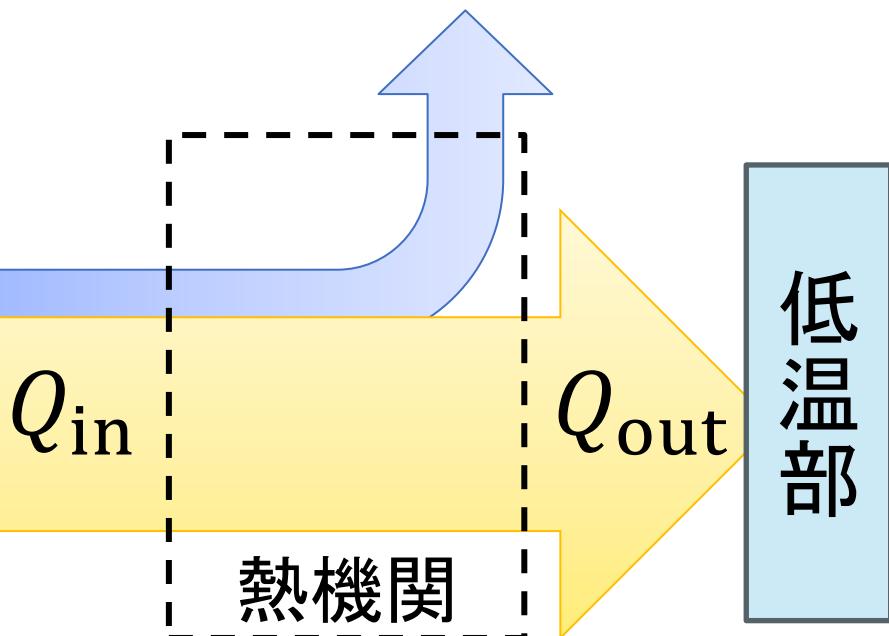
発電用タービン

余談

板書

熱効率 -1

外界への仕事 W_{out}



- ◆ 高温部から得た熱量に対し、外界へ仕事をした割合を熱効率と呼ぶ。
- ◆ 温度、圧力、体積でサイクルが作られる。
- ◆ 1サイクルで内部エネルギーの変化は、次である。

$$\Delta U = 0 \cdots (2.65)$$

板書

熱効率 -2

- 高温部から得た熱量を Q_{in} , 低温部に捨てた熱量を Q_{out} とすると気体が得た熱量の総和 ΔQ [J]は次である.

$$\Delta Q = Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}} \cdots (2. 66)$$

- 熱力学第一法則(2. 35)式に(2. 66)式を代入すると, 次である.

$$0 = (Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}}) - W_{\text{out}} \cdots (2. 67)$$

- 熱効率を e とすると, 次で表せる.

$$e = \frac{W_{\text{out}}}{Q_{\text{in}}} = \frac{Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}}}{Q_{\text{in}}} \cdots (2. 68)$$