

# 高校物理

## 熱力学

- 
- 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

# 熱力学のスタンス

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

## 熱力学のキーワード

重要

- 絶対温度  $T$  [K]
- 圧力  $P$  [Pa]
- 体積  $V$  [ $\text{m}^3$ ]

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

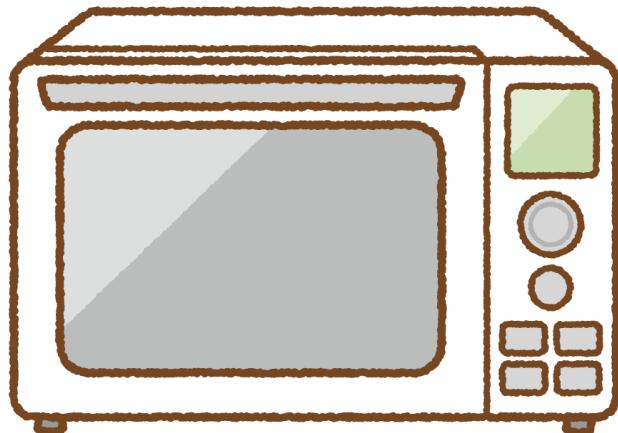
# 板書

## 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

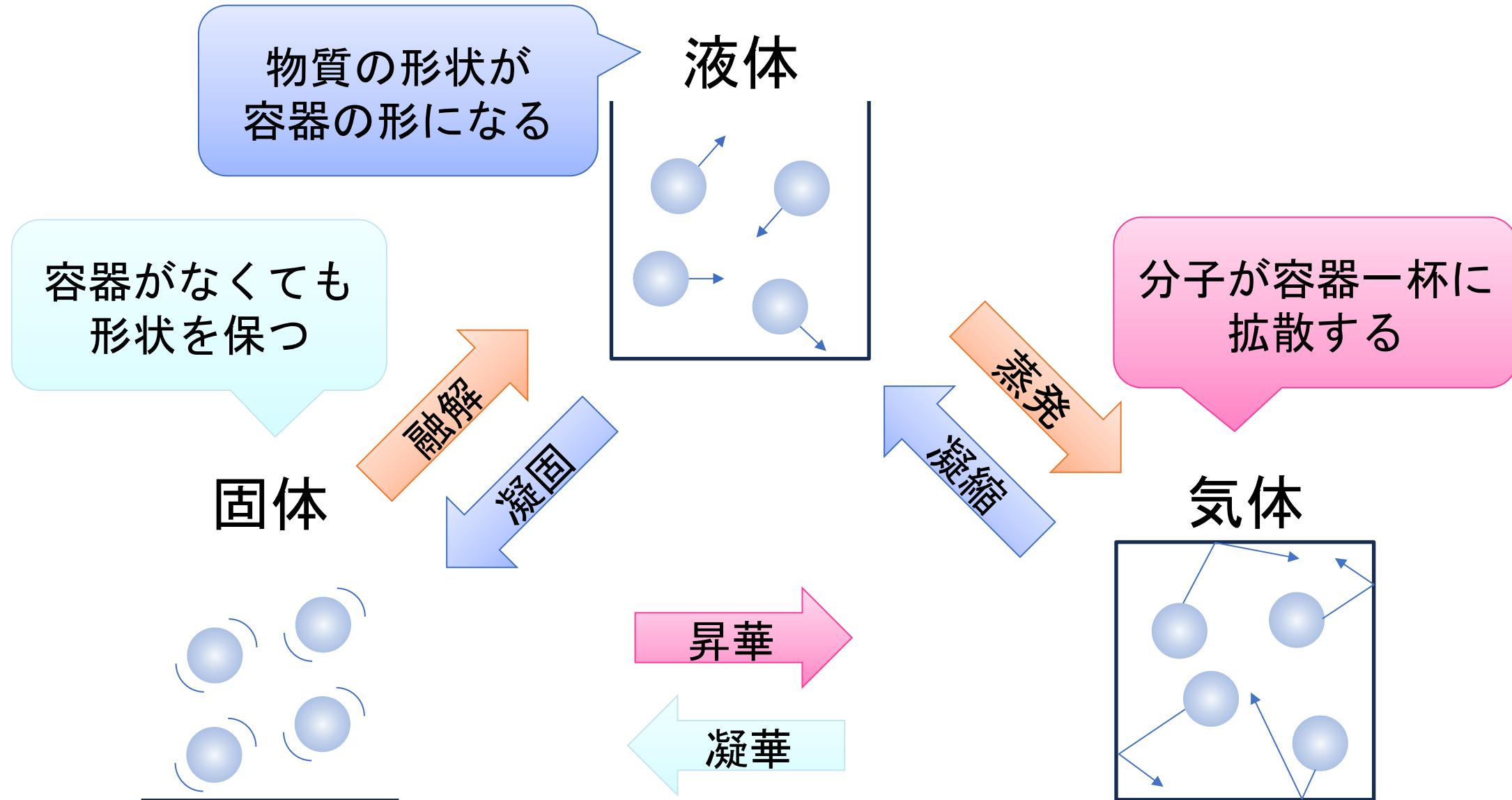
## セルシウス温度を絶対温度にせよ

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

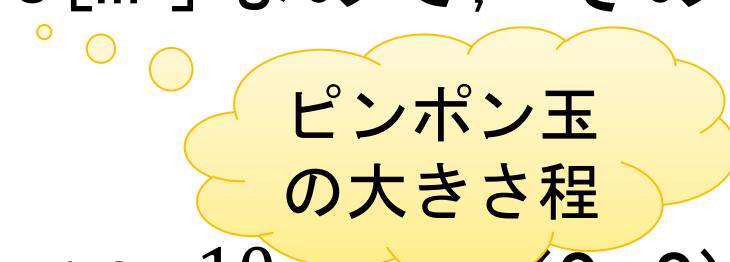


# 余談

## 発展：分子間距離

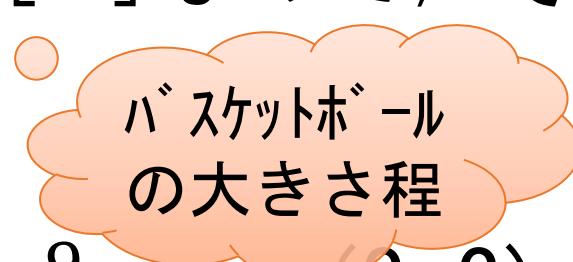
- 水1[mol]は18[g]でその体積は18[m<sup>3</sup>]なので、その分子間距離は次である。

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



- 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<sup>-3</sup>[m<sup>3</sup>]なので、その分子間距離は次である。

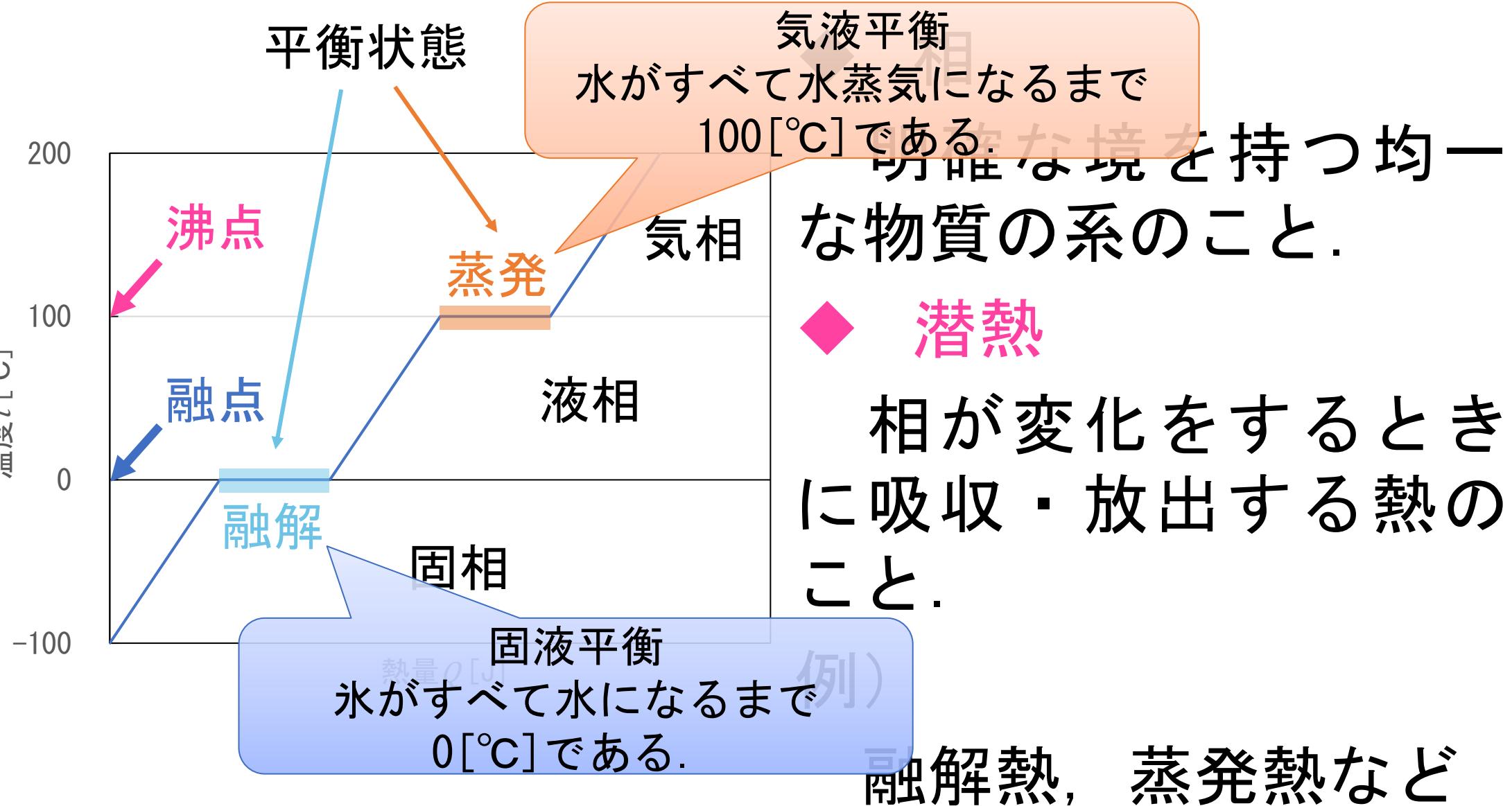
$$r_{\text{air}} = \sqrt[3]{\frac{22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol}}{6.0 \times 10^{23} / \text{mol}}} \doteq 3 \times 10^{-9} \text{ m} \dots (2.3)$$



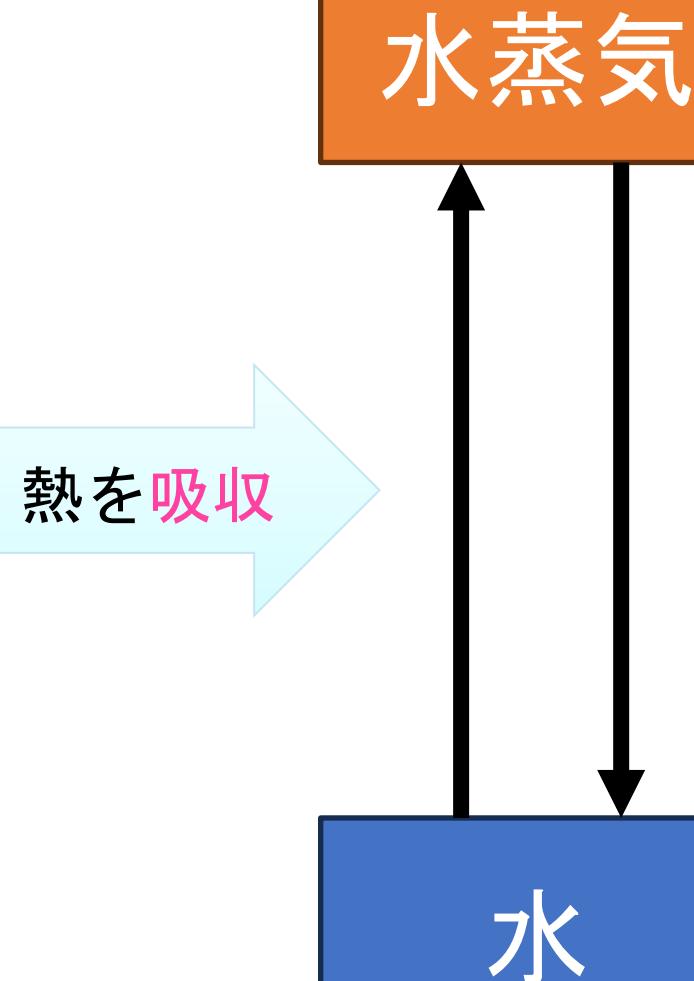
- よって  $r_{\text{air}} \doteq 10 r_{\text{wat}}$  となる。

# 板書

## 水の相変化



周囲の空気を冷やす

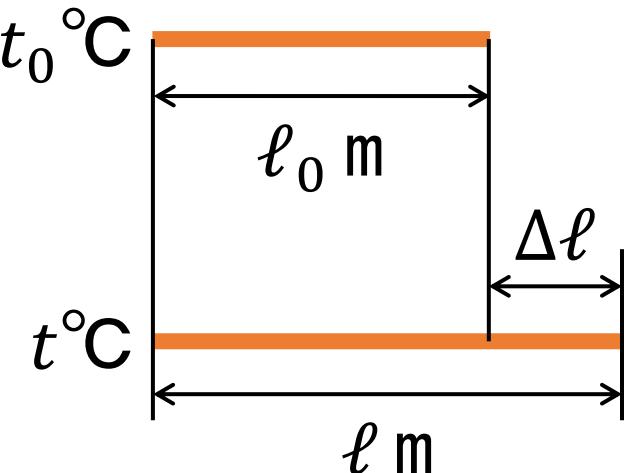


周囲の空気を暖める

# 熱膨張 -1

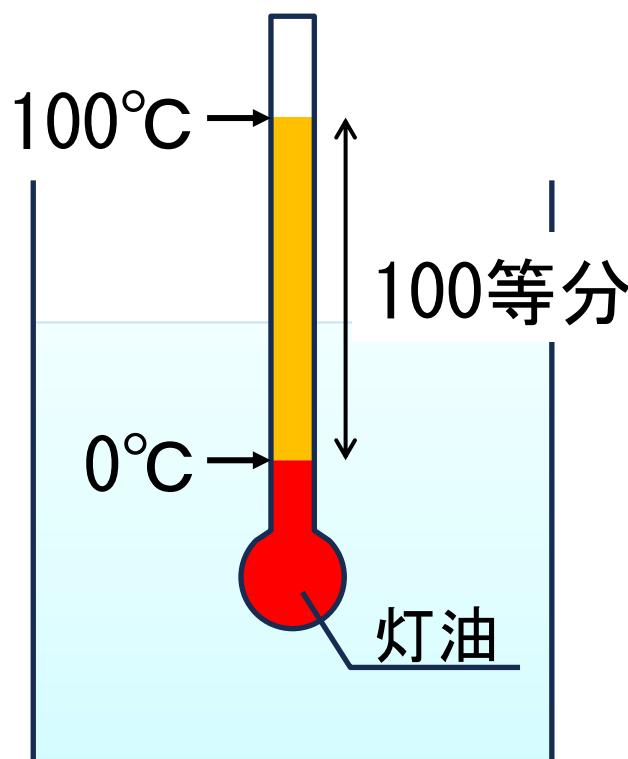
## 板書

- ◆ 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。

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

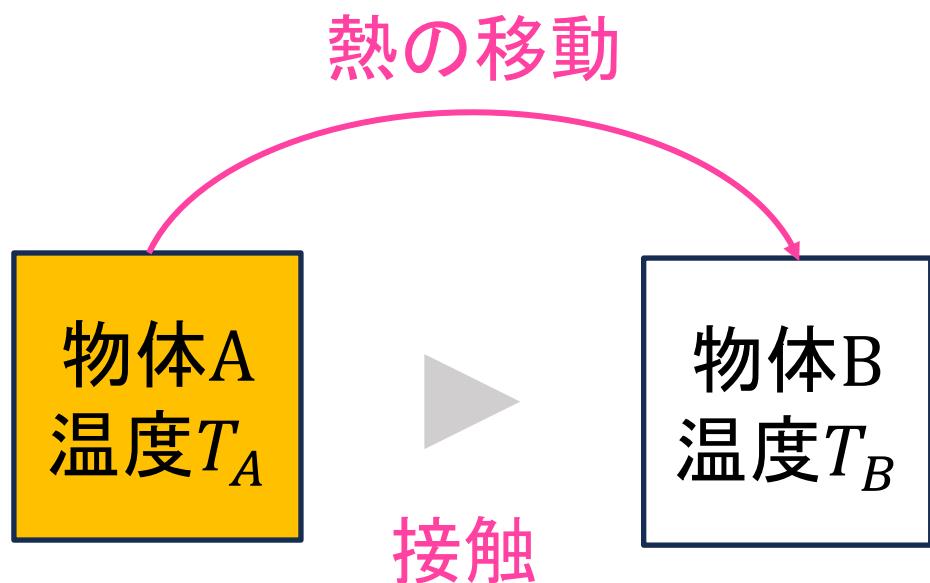
02

## 熱量と蓄熱

- 热量
- 热平衡
- 比热と热容量

# 熱量

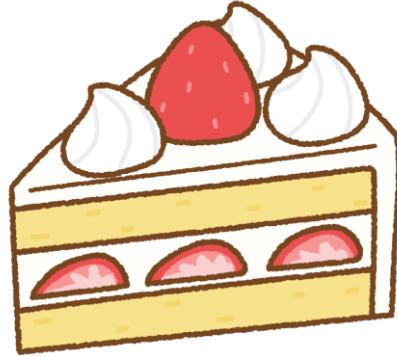
## 板書



$$T_A > T_B$$

- ◆ 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？



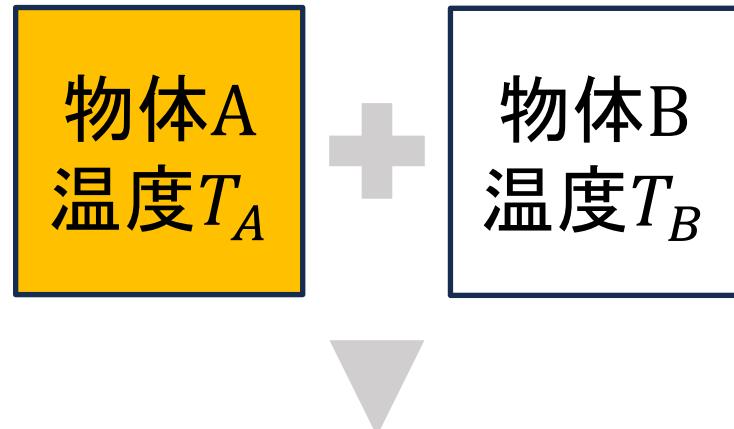
ウォーキング  
約60 [min]

- ◆ 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]

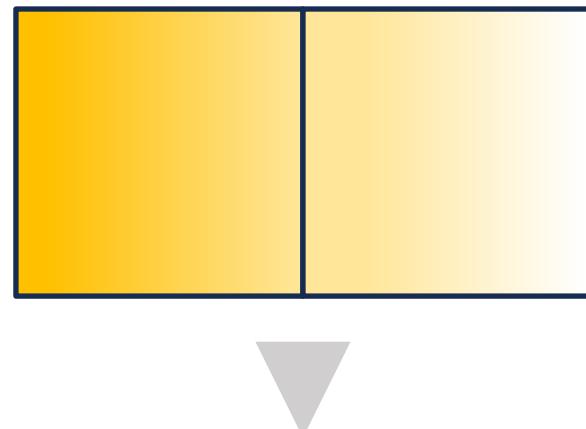
# 板書

## 熱平衡 -1

熱平衡



非平衡



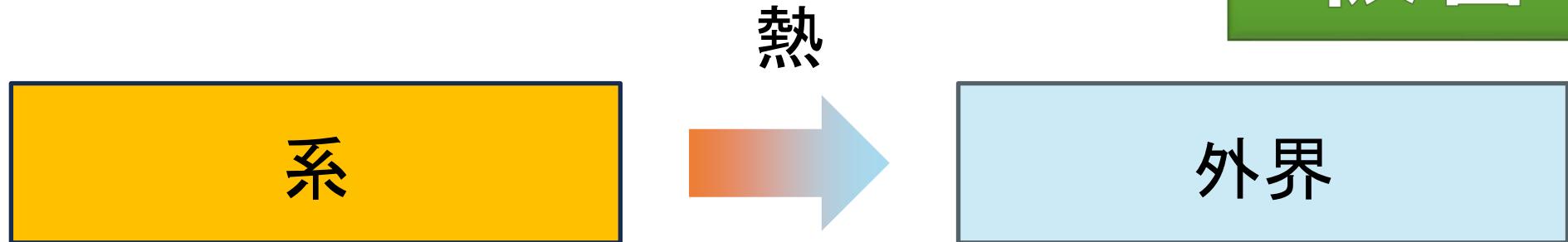
熱平衡



- ◆ 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

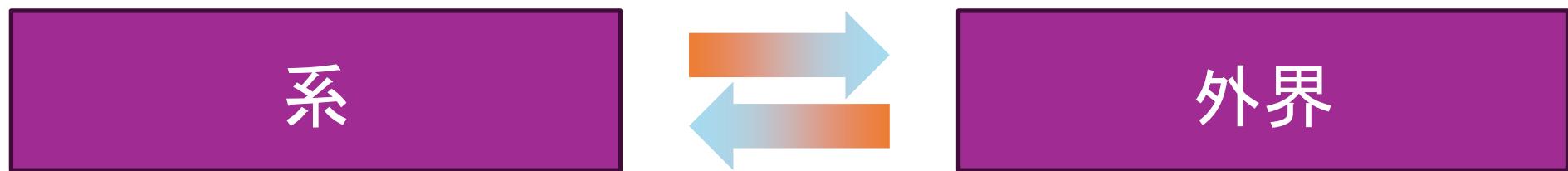
板書



系の温度 > 外界の温度

熱は、一方的に流れる。

熱平衡

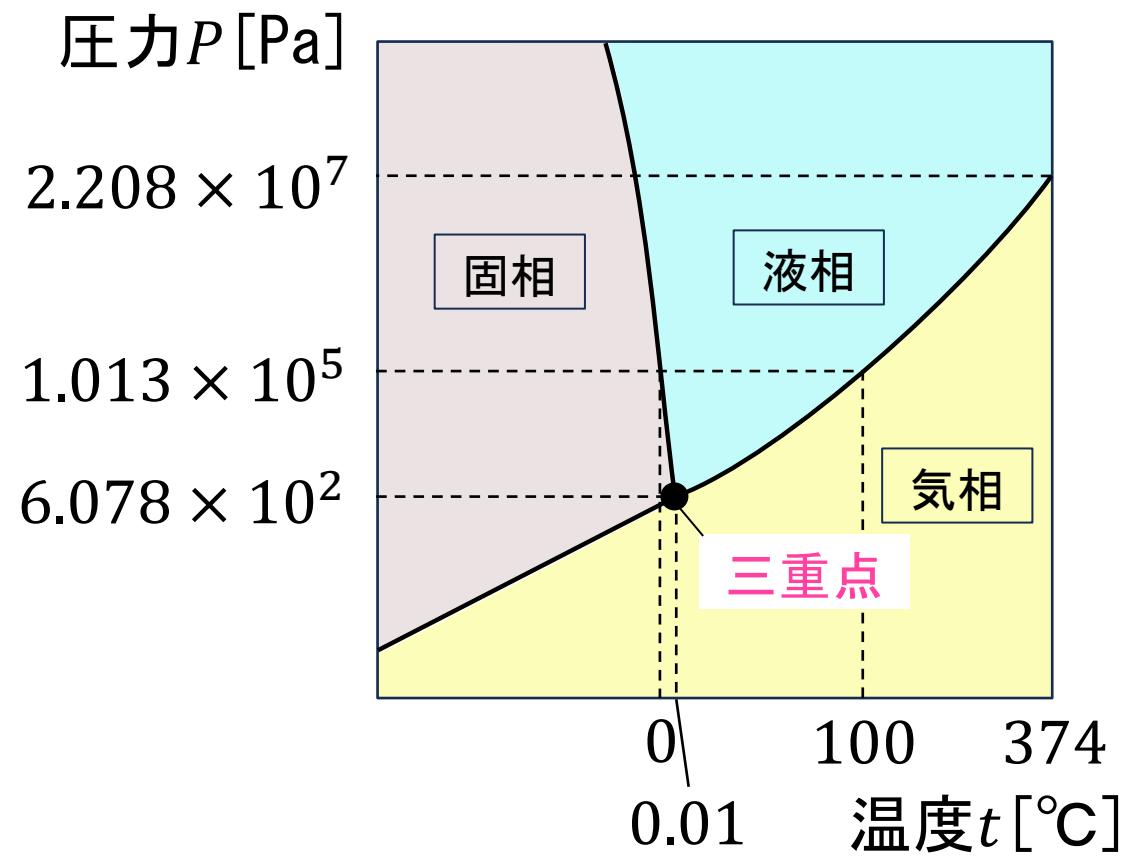


系の温度 = 外界の温度

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

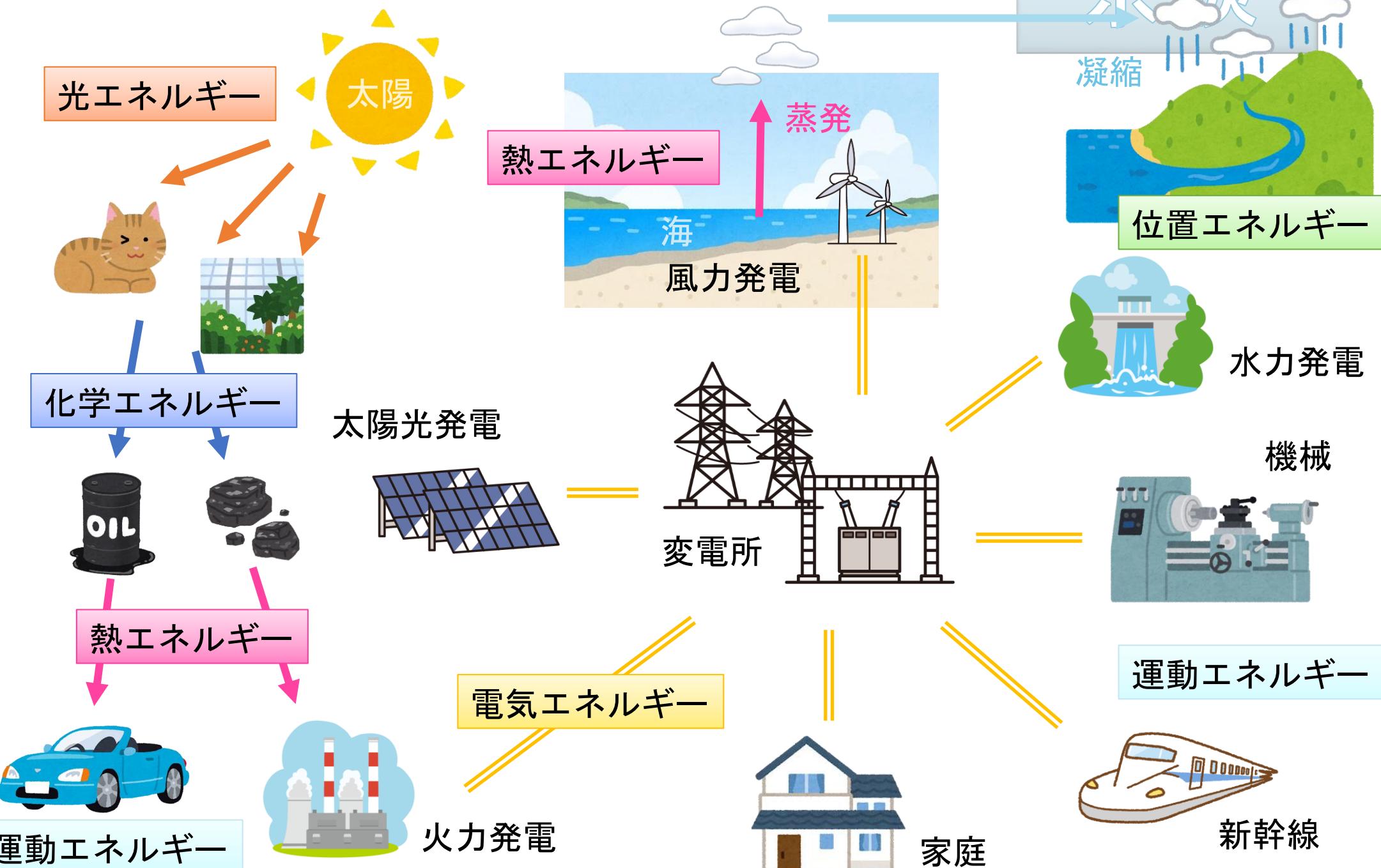
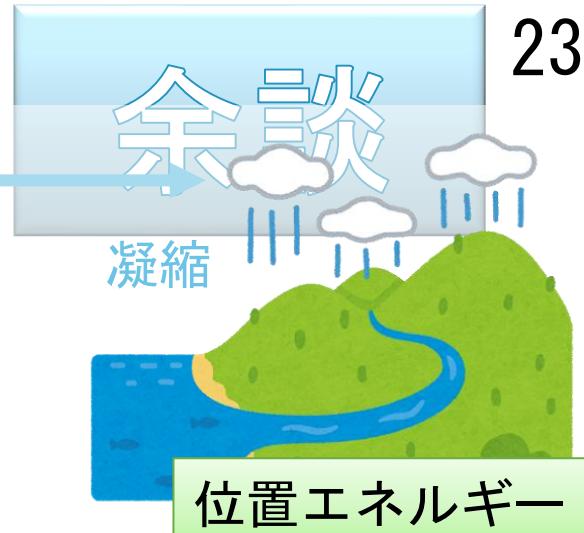
- 質量 $m$  [g], 比熱 $c$  [J/(g·K)], 上昇温度 $\Delta T$  [°C], 発熱量 $Q$  [J] とすると次である.  
$$Q = mc\Delta T = C\Delta T \cdots (2.7)$$
- 物質1[g]の温度を1[°C]上げるのに要する物質固有の熱量を, **比熱**と呼ぶ.
- 热容量 $C$  [J/K]は, **質量と比熱の積**である.

03

# エネルギー変換と効率

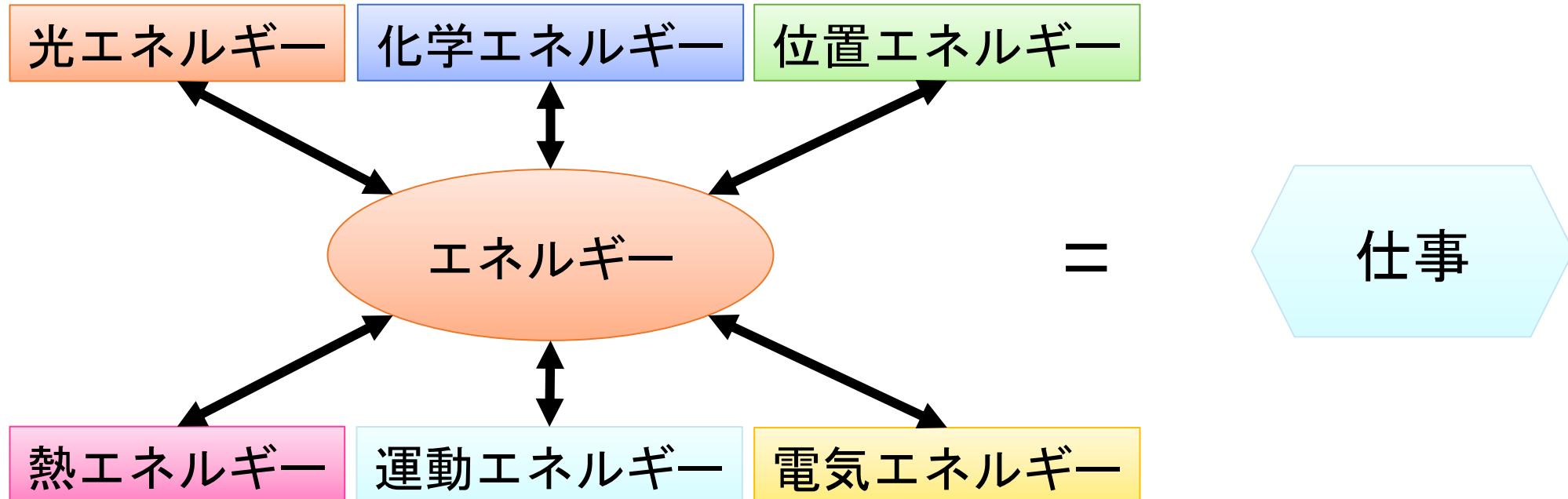
- エネルギー間の相関
- エネルギーの変換と効率と保存
- 仕事

# 身近なエネルギー相関



# 板書

## エネルギー

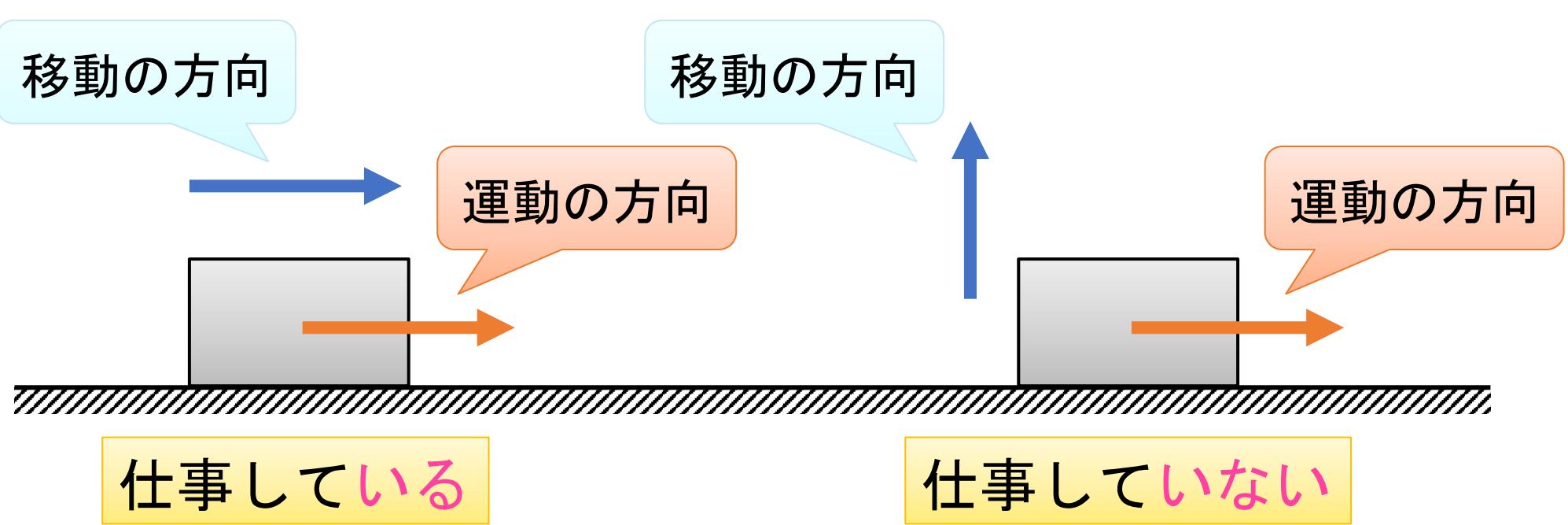


- ◆ 仕事をすることができる**潜在的能力**のこと。
- ◆ エネルギーは**別のエネルギーに変換**できる。
- ◆ 仕事  $W$  [J], 力の大きさ  $F$  [N], 移動距離  $x$  [m] とすると  
次である。

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

# 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である。

# 引っ越し業者は仕事していない？

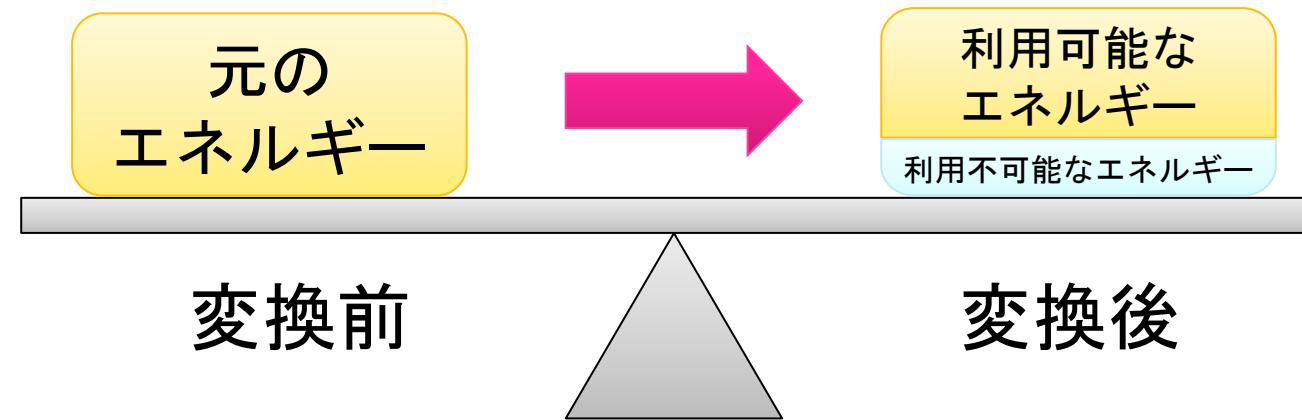


- ◆ 荷物を持ち上げる力は**上向き**である。
- ◆ 荷物を移動させる力は**横向き**である。
- ◆そのため、物理学の定義では**仕事していない**と言える。
- ◆ ただ持ち上げる、階段を登る動作は**仕事した**と言える。

# エネルギーを変換する

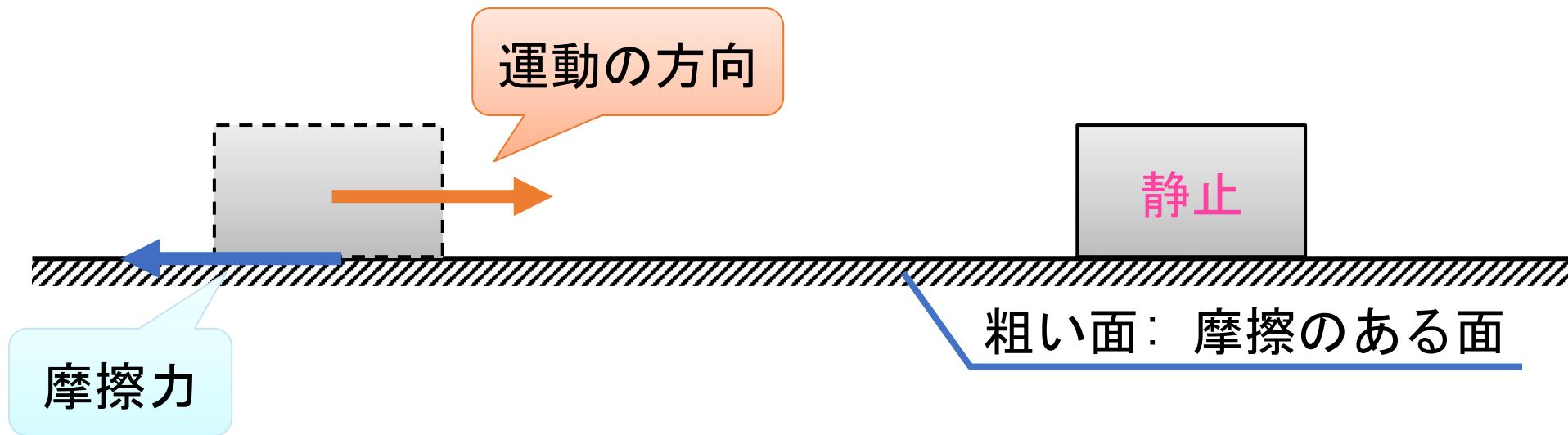
板書

## 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

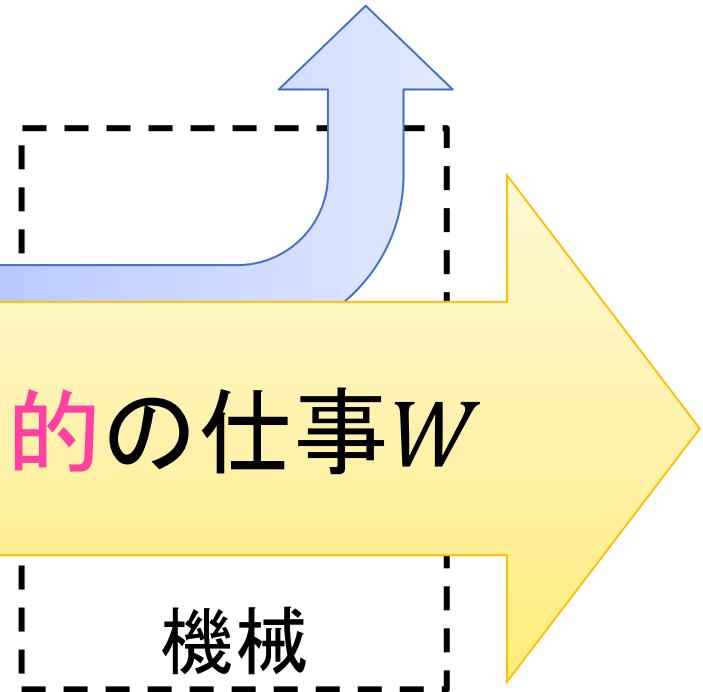


- ◆ 摩擦のある面では、滑っていく物体はやがて静止する。
- ◆ これは、運動エネルギーを失ったためである。
- ◆ 失った運動エネルギーは、面上を構成している分子へすべて伝わり激しく運動させる。
- ◆ だからモノの表面を擦ると温かくなる（摩擦熱）。

# エネルギー利用の効率

板書

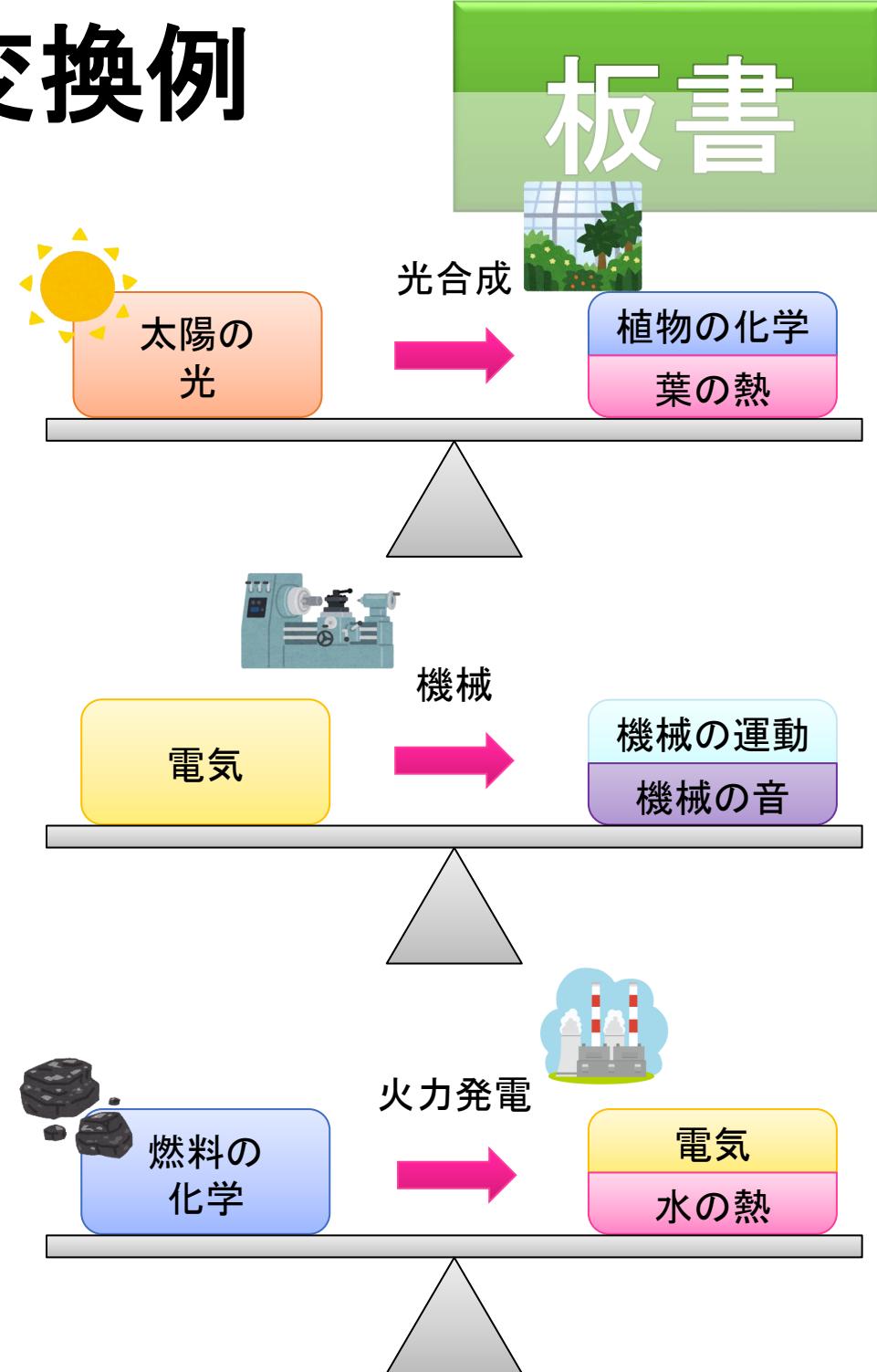
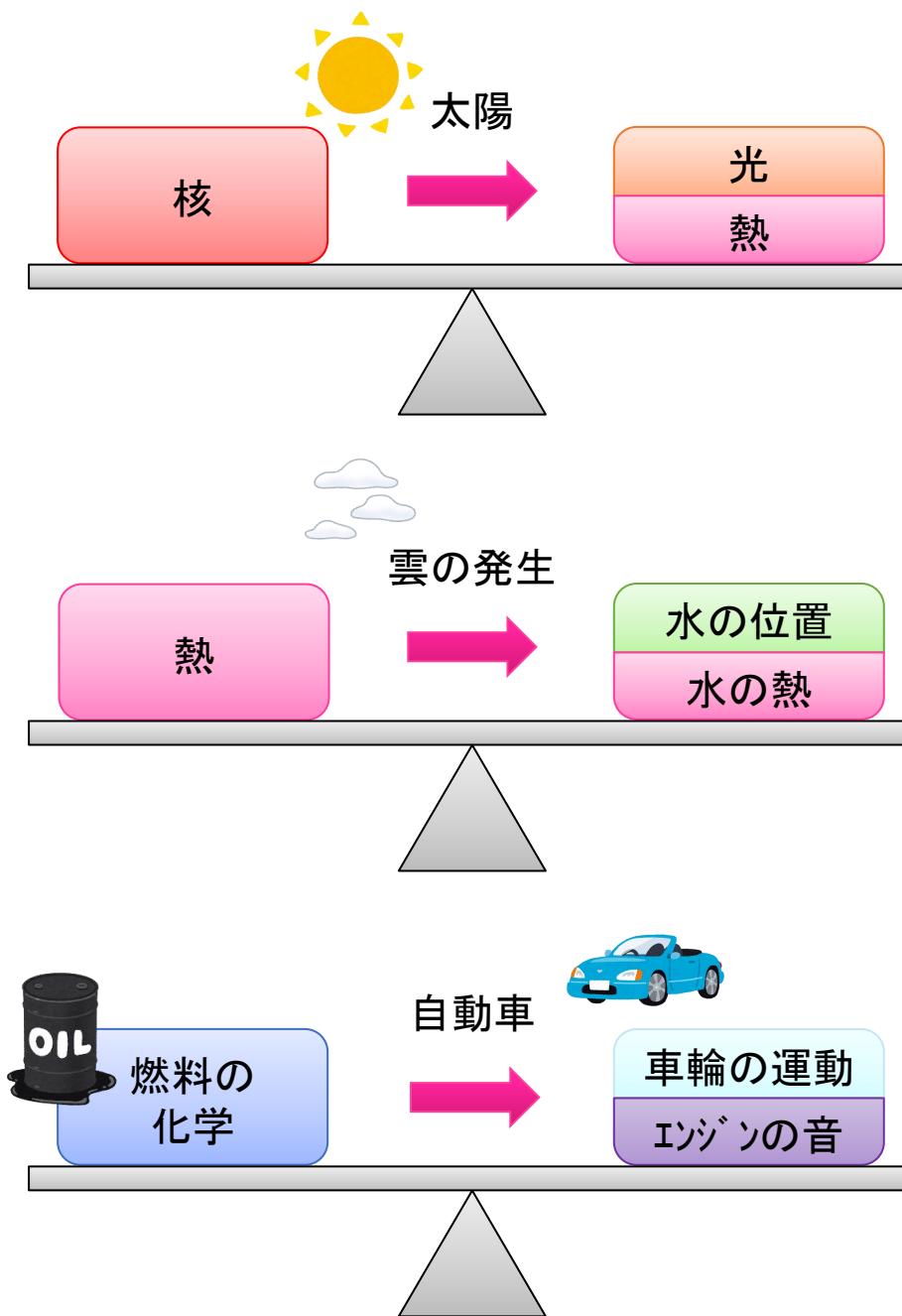
目的以外の仕事  $W_{\text{out}}$



- ◆ 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  $W_{\text{out}}$  [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

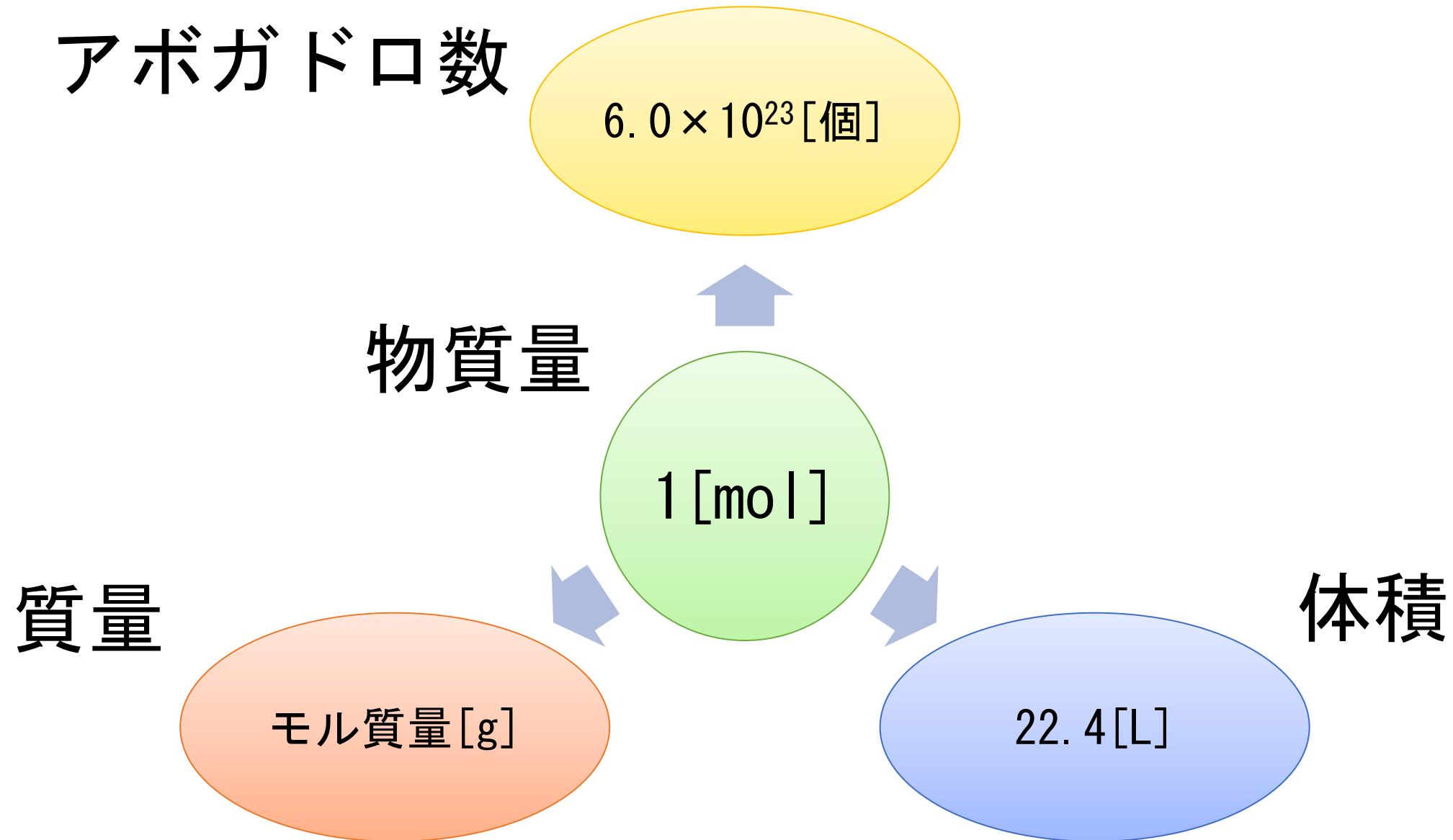
04

# 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

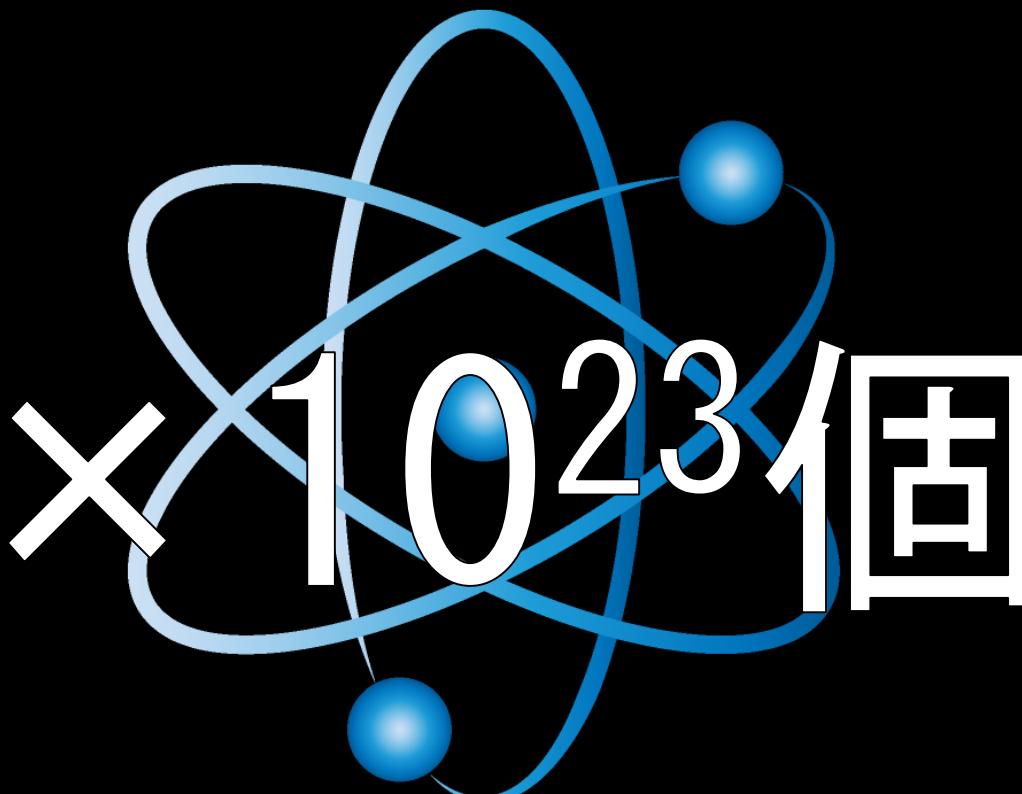
Mol も DARS も 概念は同じ

余談

34

1mol |

=  $6.0 \times 10^{23}$  個



# 板書

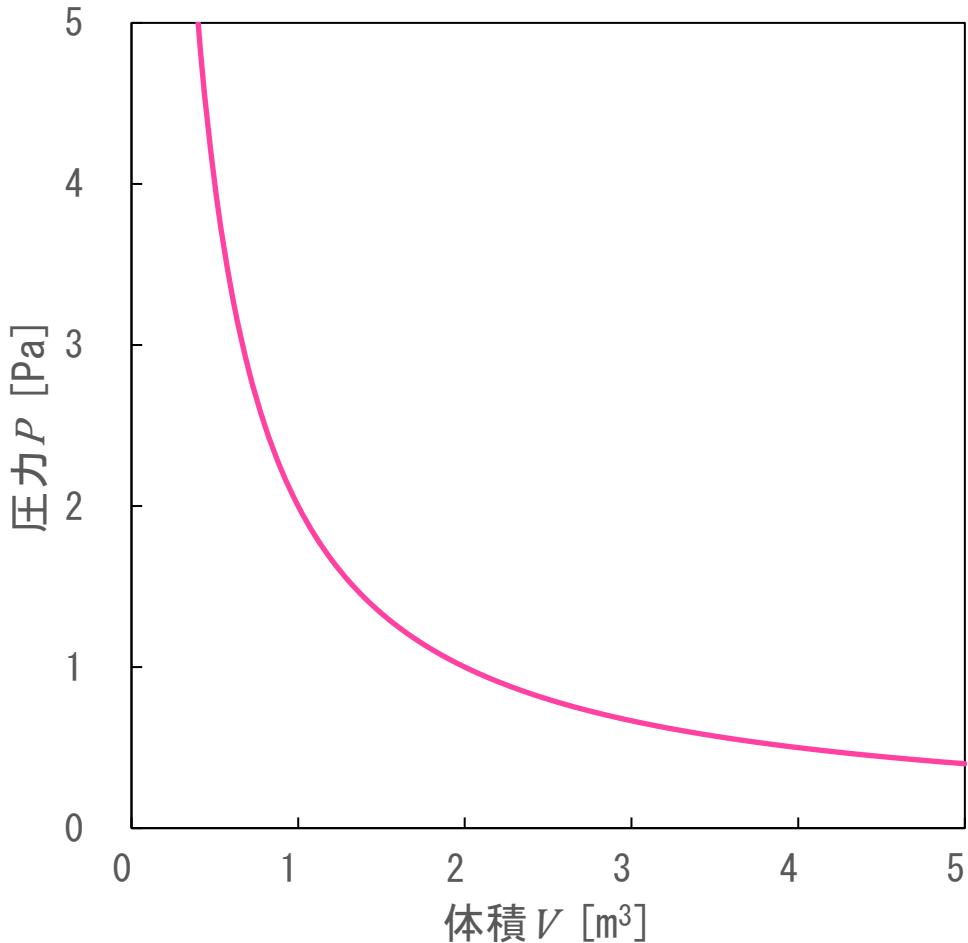
## ロバート・ボイル (A. D. 1627-1691年)



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.

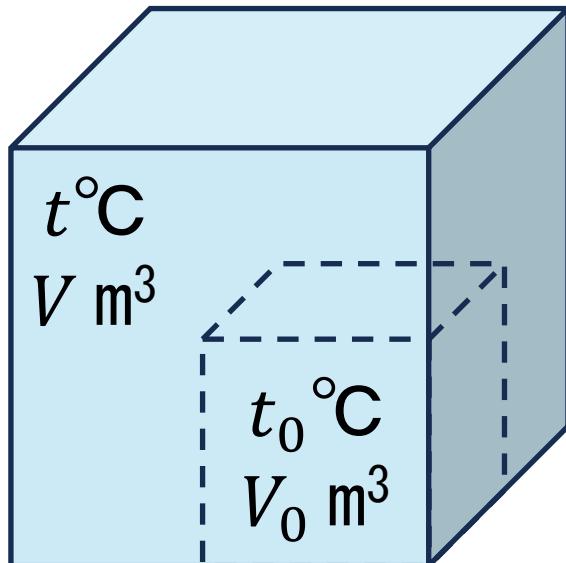
$$PV = P_0V_0 \cdots (2.9)$$

- ◆  $P - V$ 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

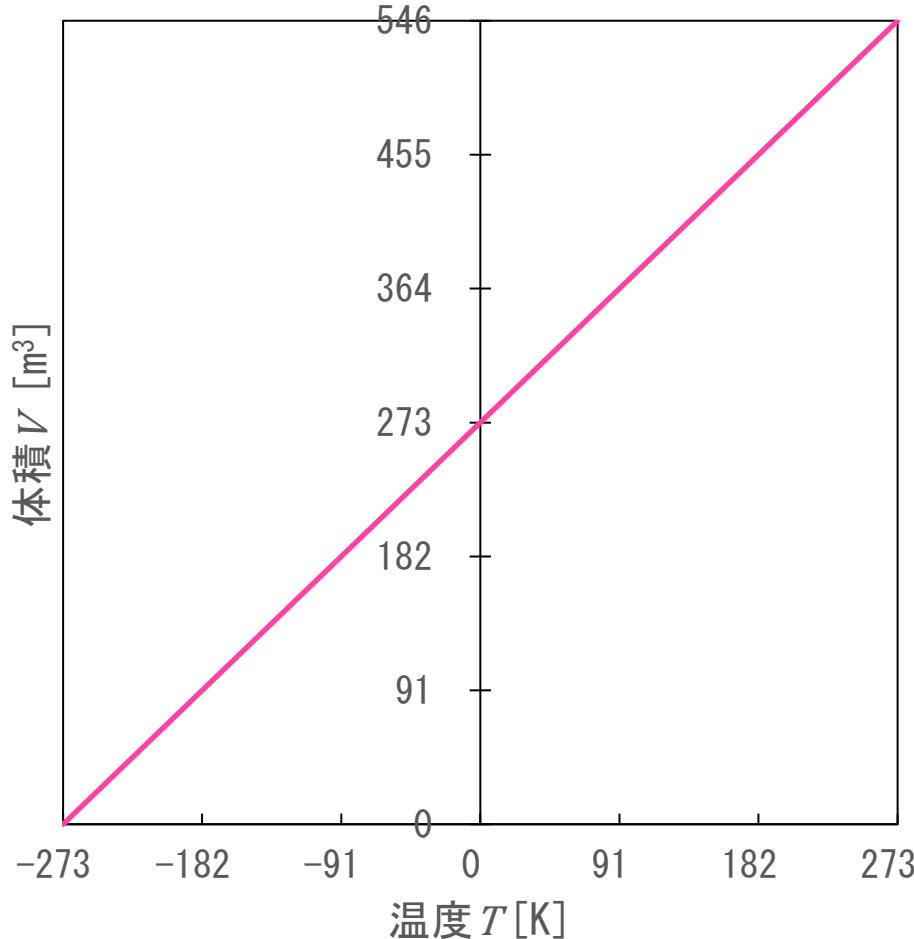
ジャック・シャルル  
(A. D. 1746-1823年)



一定圧力下で、気体の膨張率 $\alpha$ 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 $\alpha$ 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

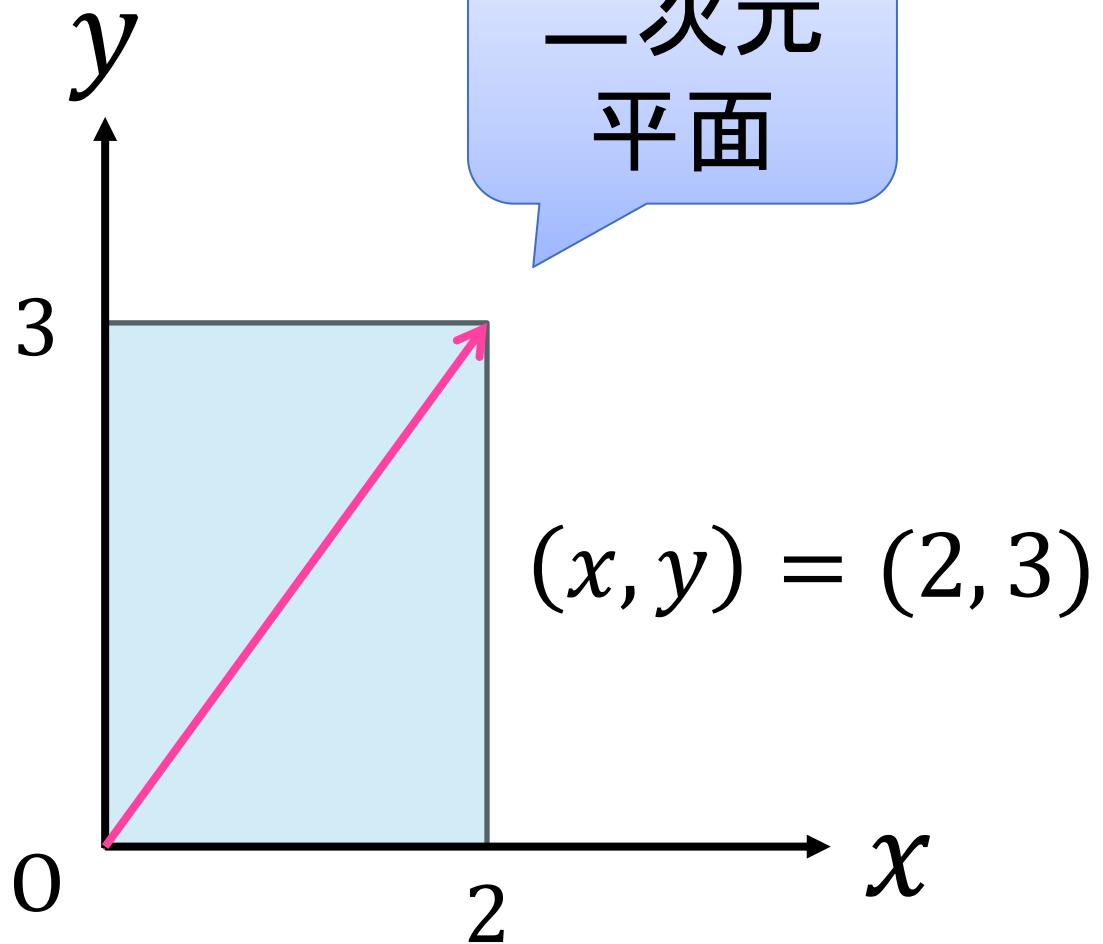
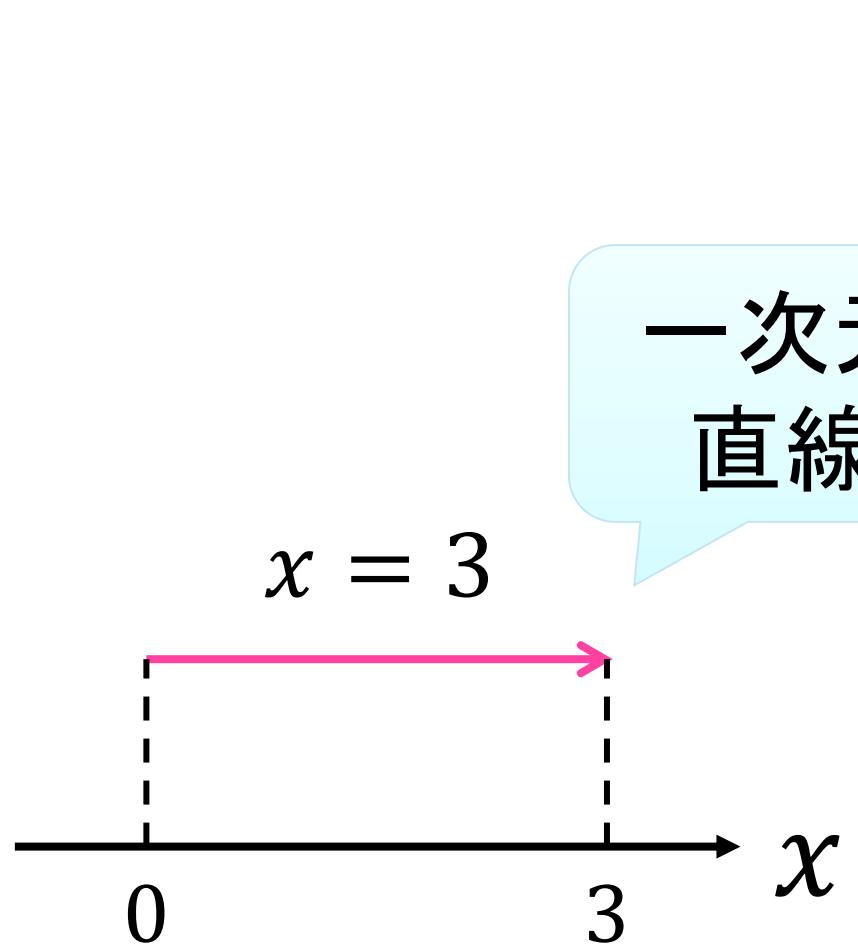
# 気体分子運動論

- 
- 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

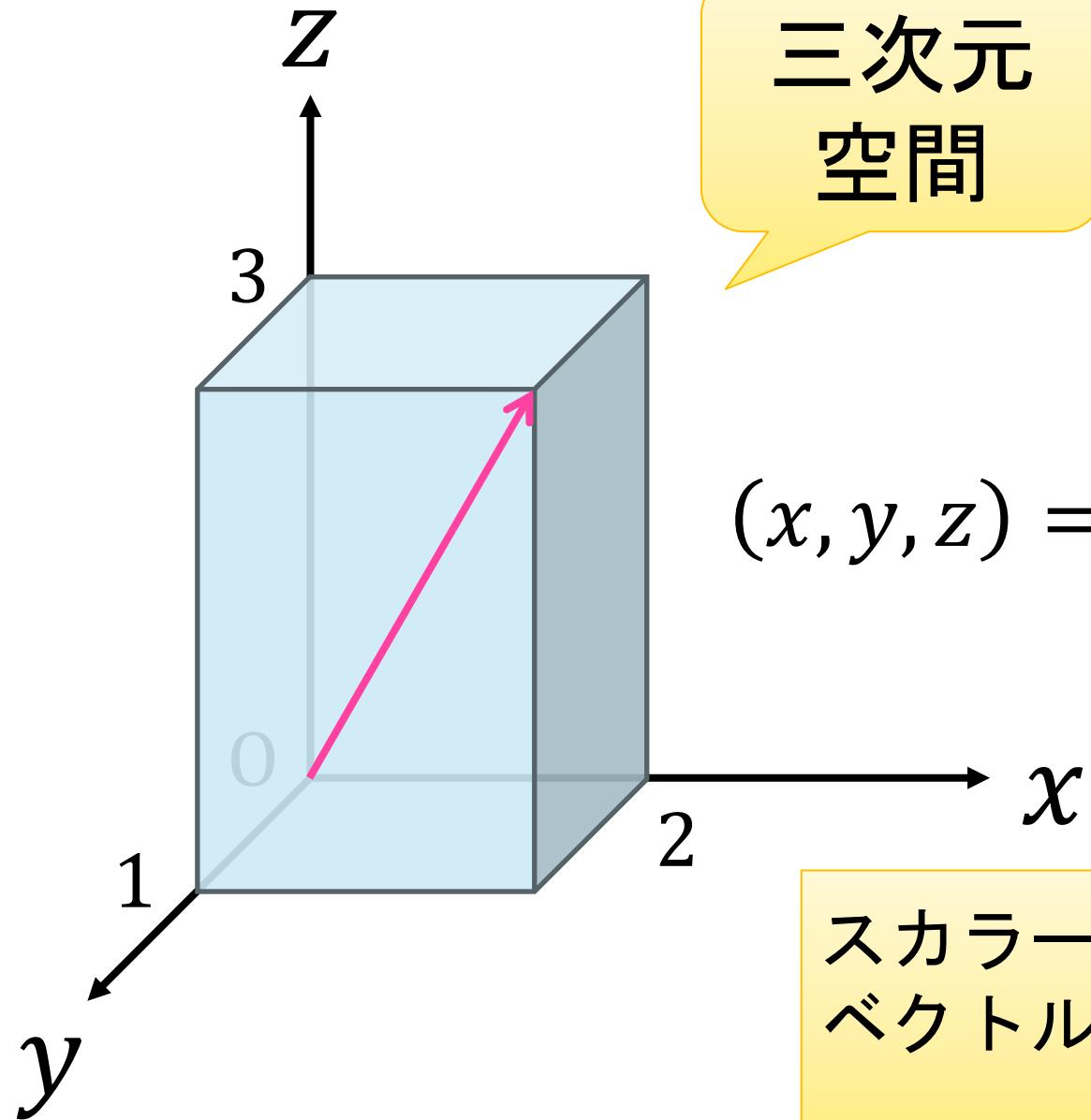


2軸目によって、  
向きが定まる！

# 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 [ $\text{m}^2$ ]

圧力  $p$  1 [Pa]

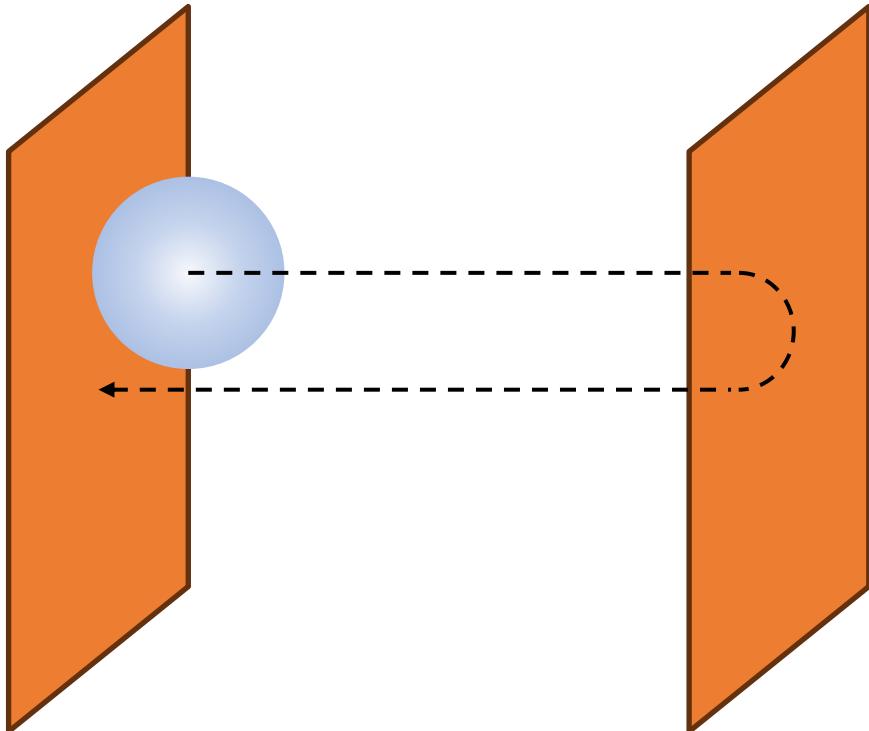
単位面積  $S$ あたりに垂直にかかる力  $F$

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

# 分子の運動 -1

## 板書

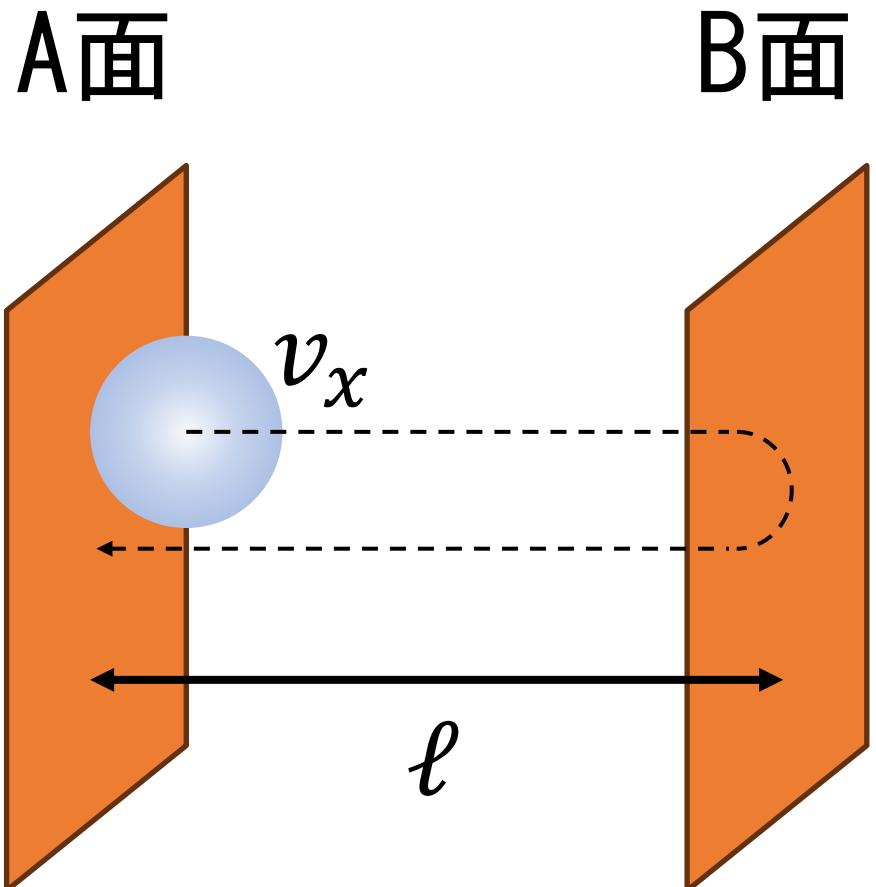
A面



- ◆ 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

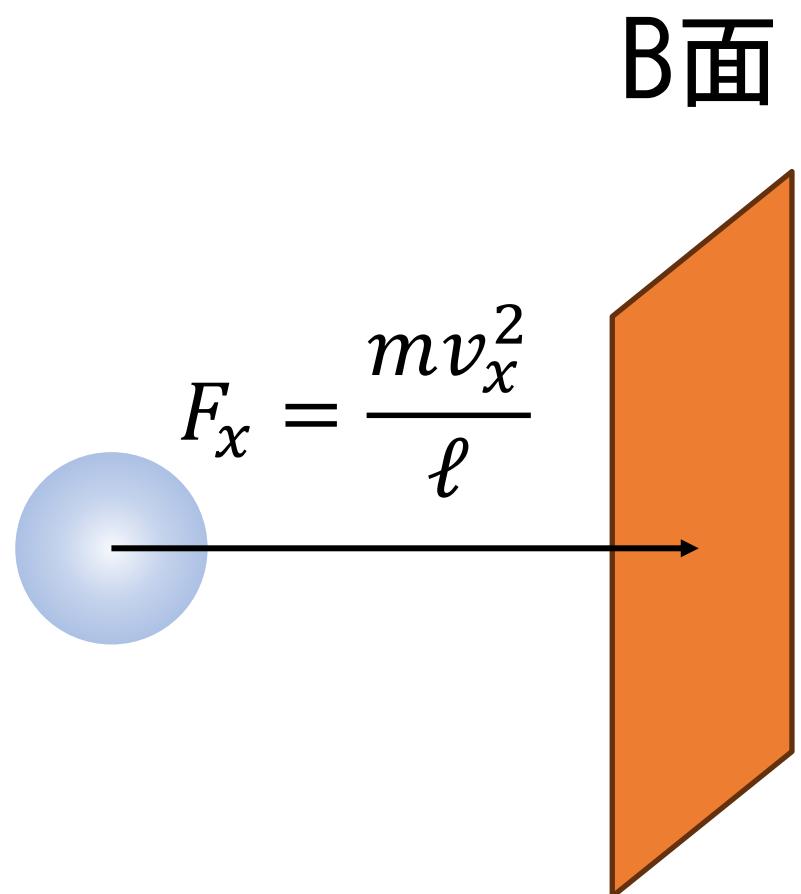


- ◆  $x$ 軸方向における分子の運動  $v_x$  [m/s],
  - ◆ 質量を  $m$  [kg] とすると運動量の変化は次である.
- $$m((-v_x) - v_x) = -2mv_x \quad \cdots (2.15)$$
- ◆ 距離  $\ell$  [m] 離れたAB間を, 速さ  $v_x$  [m/s] で往復する時間  $t$  [s] は次である.

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

# 気体の圧力 -1

## 板書

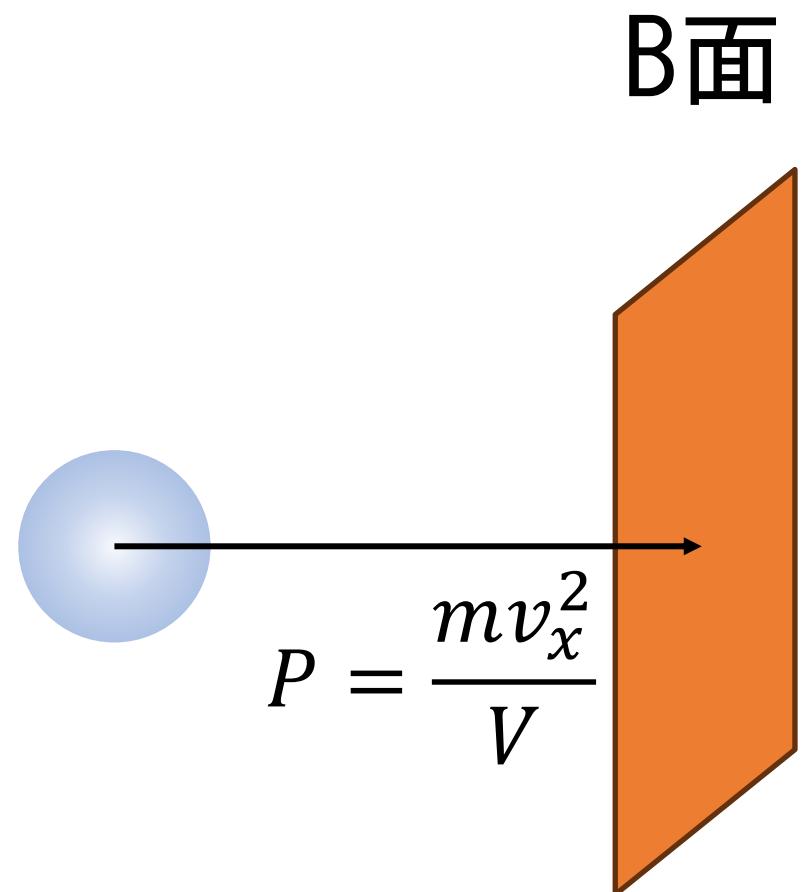


- ◆ 分子の力積 $J$ は(2.15)式より $-2mv_x$ である。
- ◆ そのため壁が分子から受ける力は、**作用-反作用の法則**より  $2mv_x$  である。
- ◆ 分子の力 $F$ は、力積 $J$ 、時間 $t$ より次である。

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

# 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。

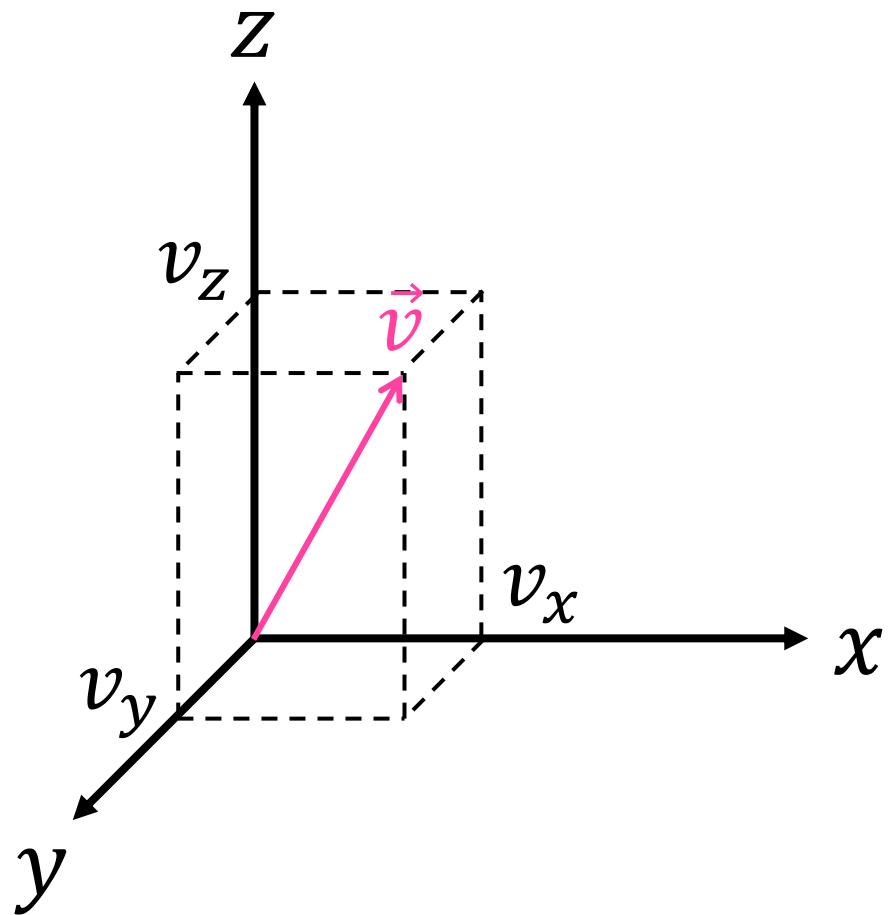
$$P = \frac{mv_x^2}{V} \dots (2.19)$$

# 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

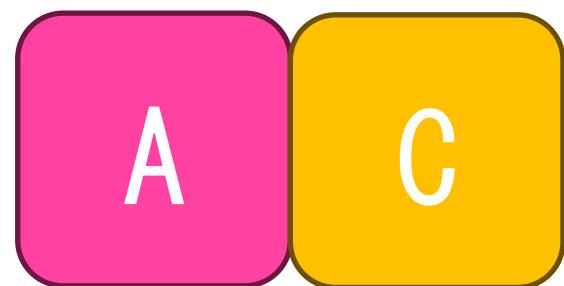
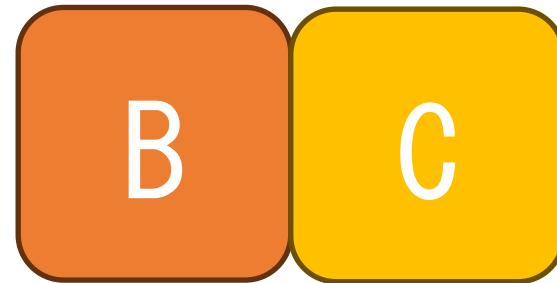
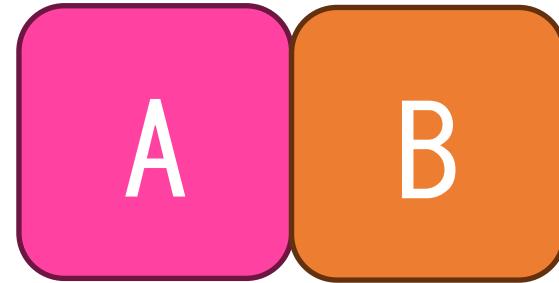
## 熱力学の4法則

- 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



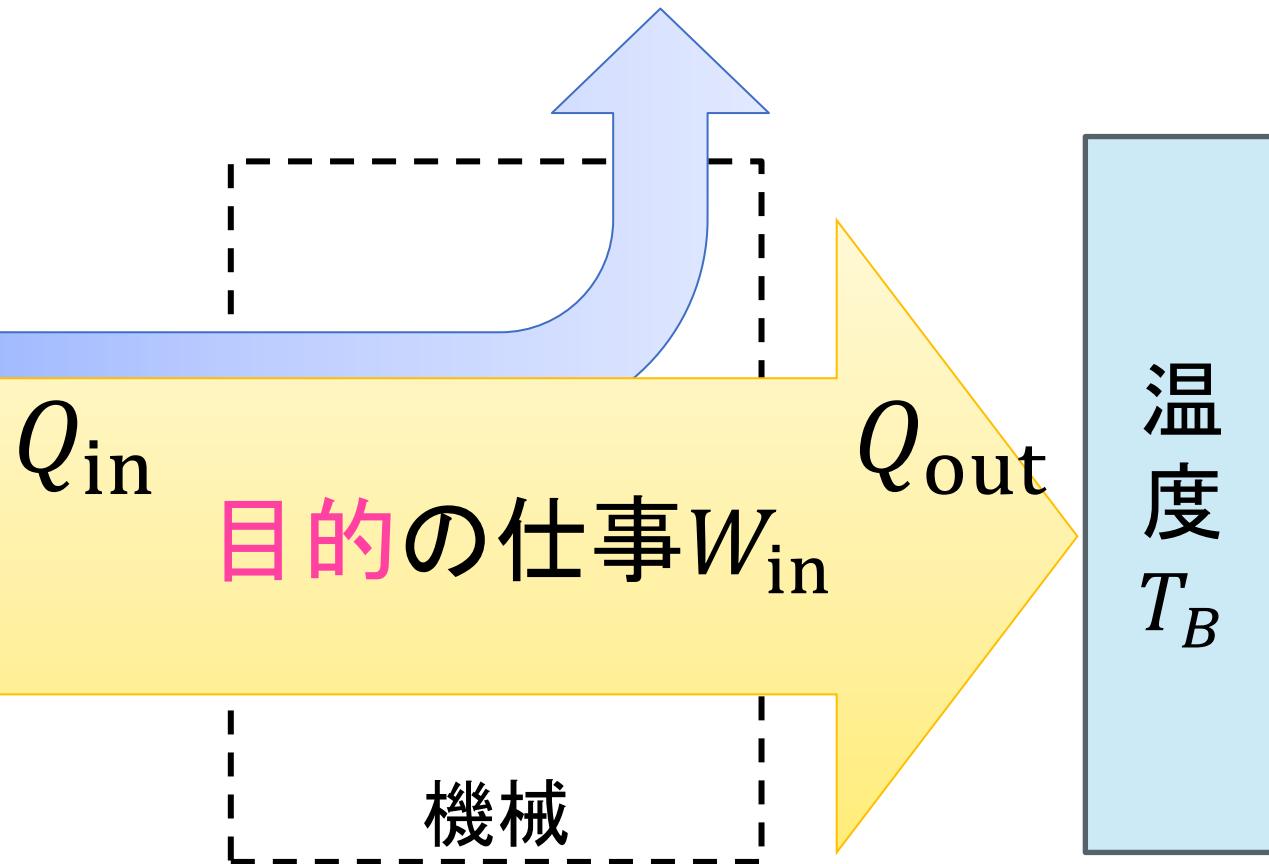
熱平衡

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  $W_{\text{out}}$



$$T_A > T_B$$

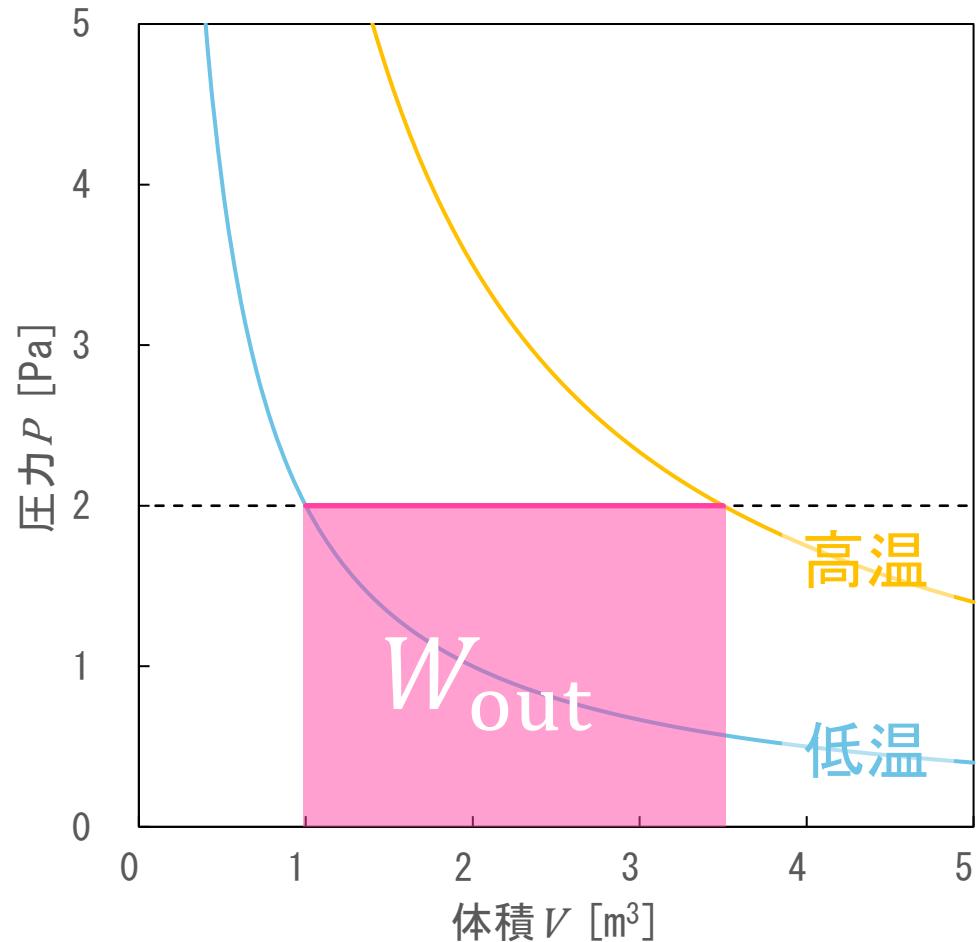
エネルギー保存則

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

# 板書

## 内部エネルギーと仕事

### 内部エネルギー $\Delta U [J]$

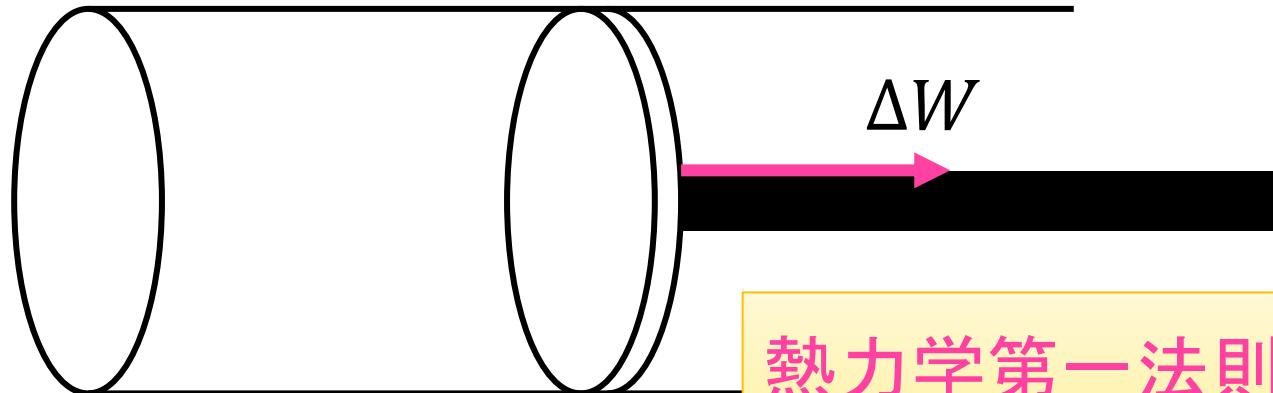


- ◆ 物質を構成する分子の運動エネルギーの総和
- ◆ 気体が外部にする仕事  $W_{out} [J]$
- ◆  $W_{out} = (P - V \text{ 図の面積})$

… (2. 34)

# 板書

## シリンダー内の気体に熱を加える

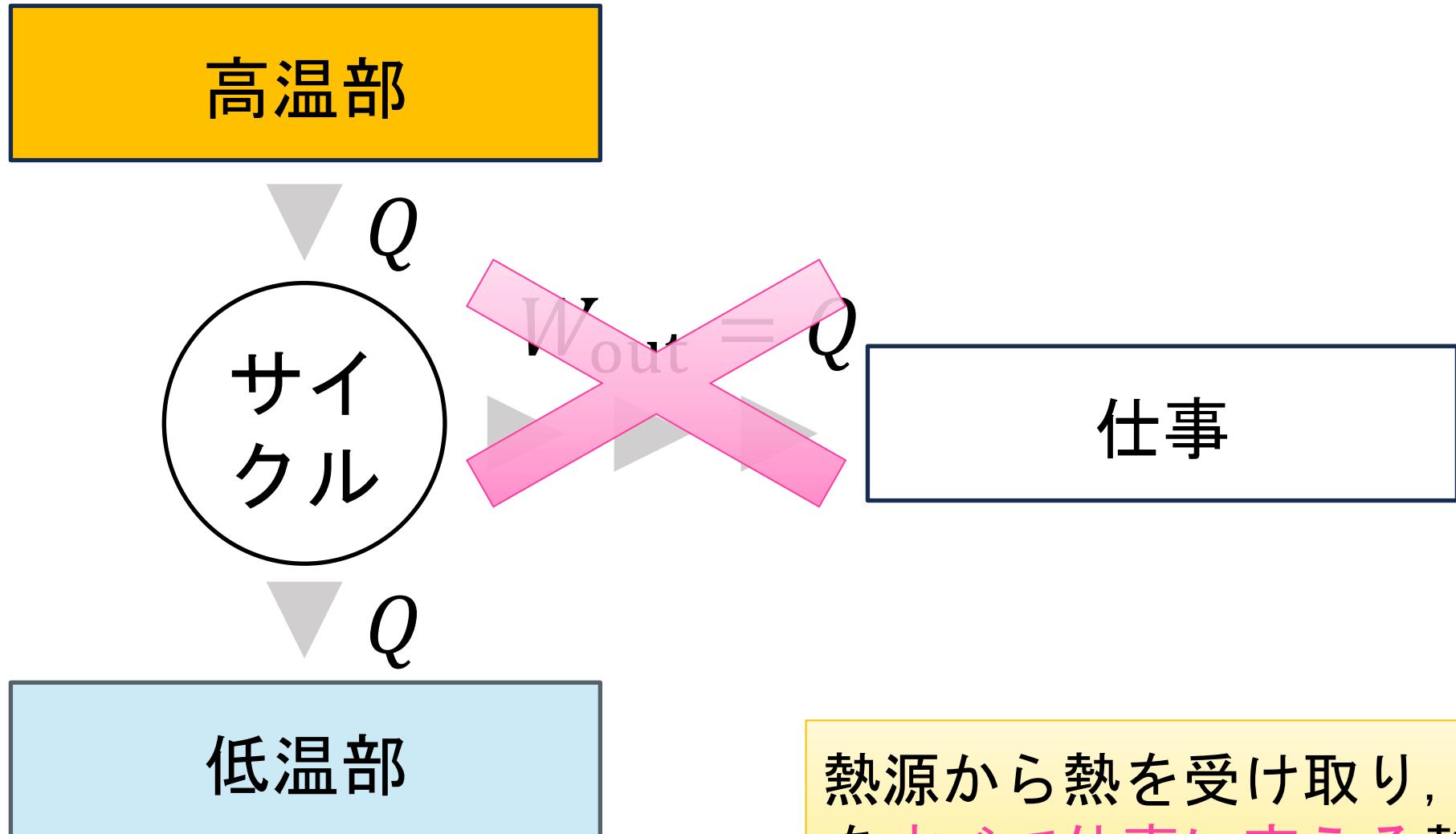


熱力学第一法則

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

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

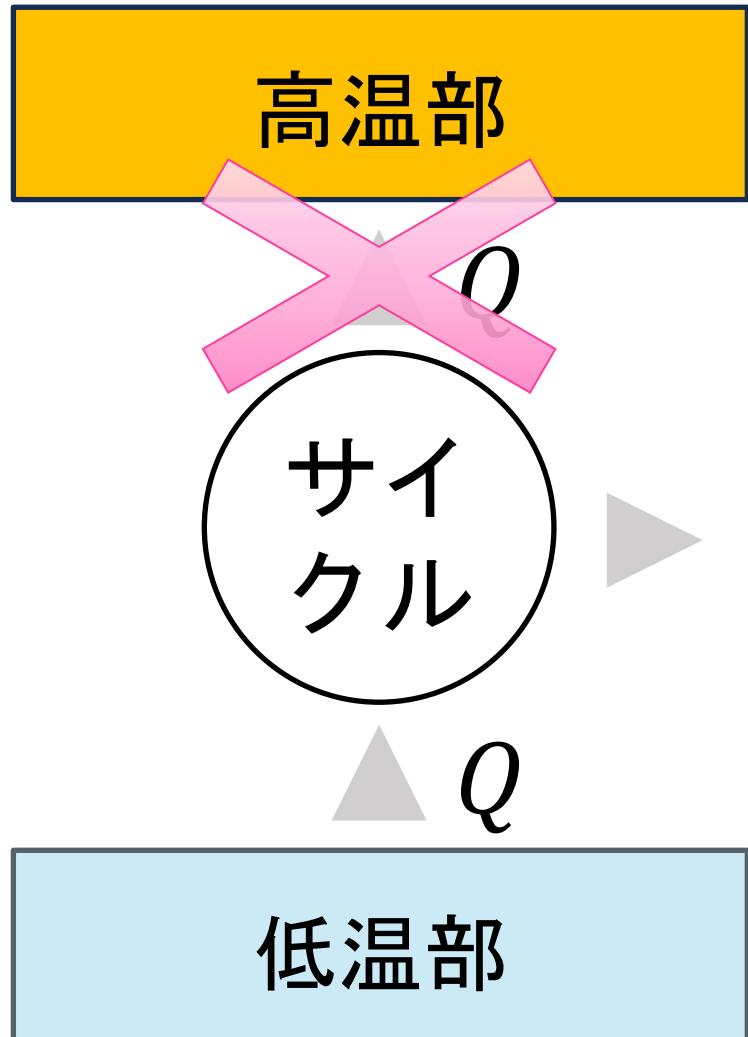
$\Delta Q$ : 加えた熱量,  $\Delta W$ : 体積変化,  $\Delta U$ : 温度変化



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

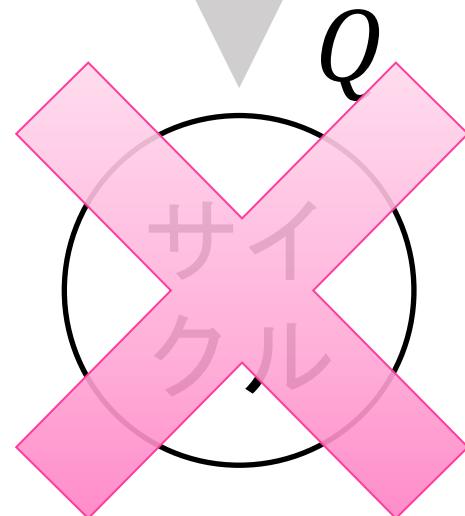
# クラウジウスの原理



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

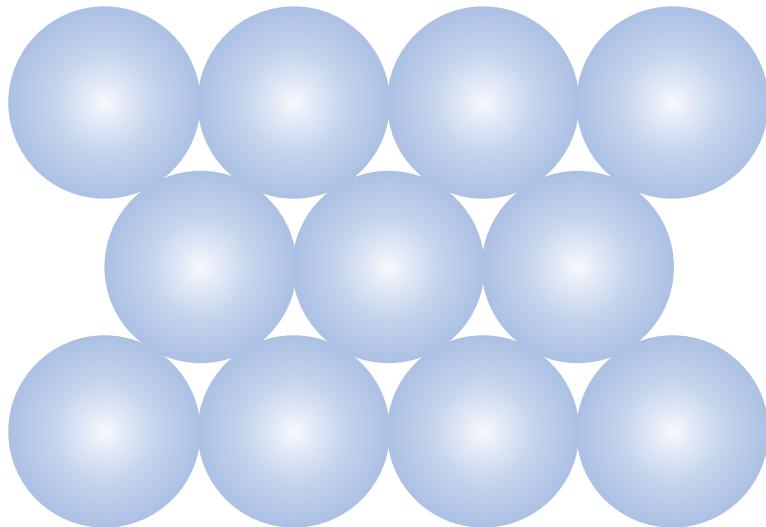


ただ1つの熱源から熱を吸収し,  
ずっと動き続ける熱サイクル  
**第二種永久機関**は存在しない。

# ネルンストの熱定理

板書

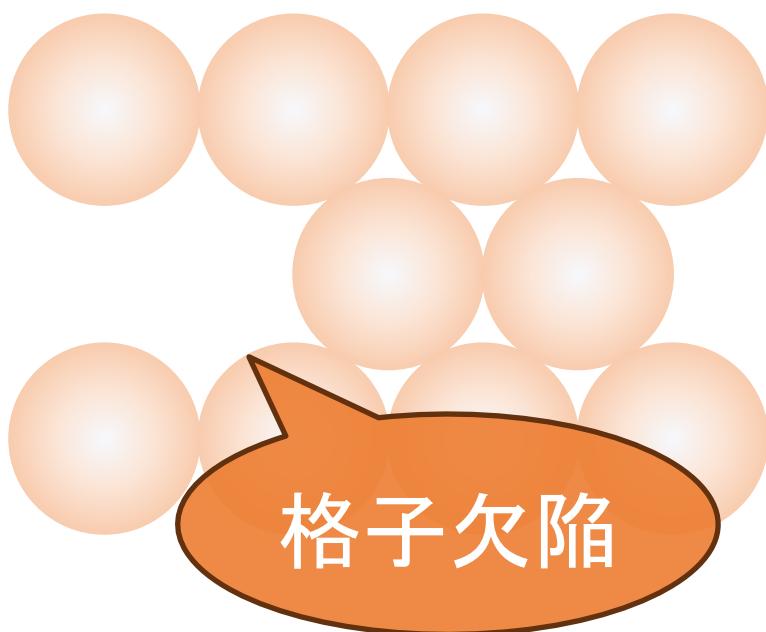
$$T = 0$$



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

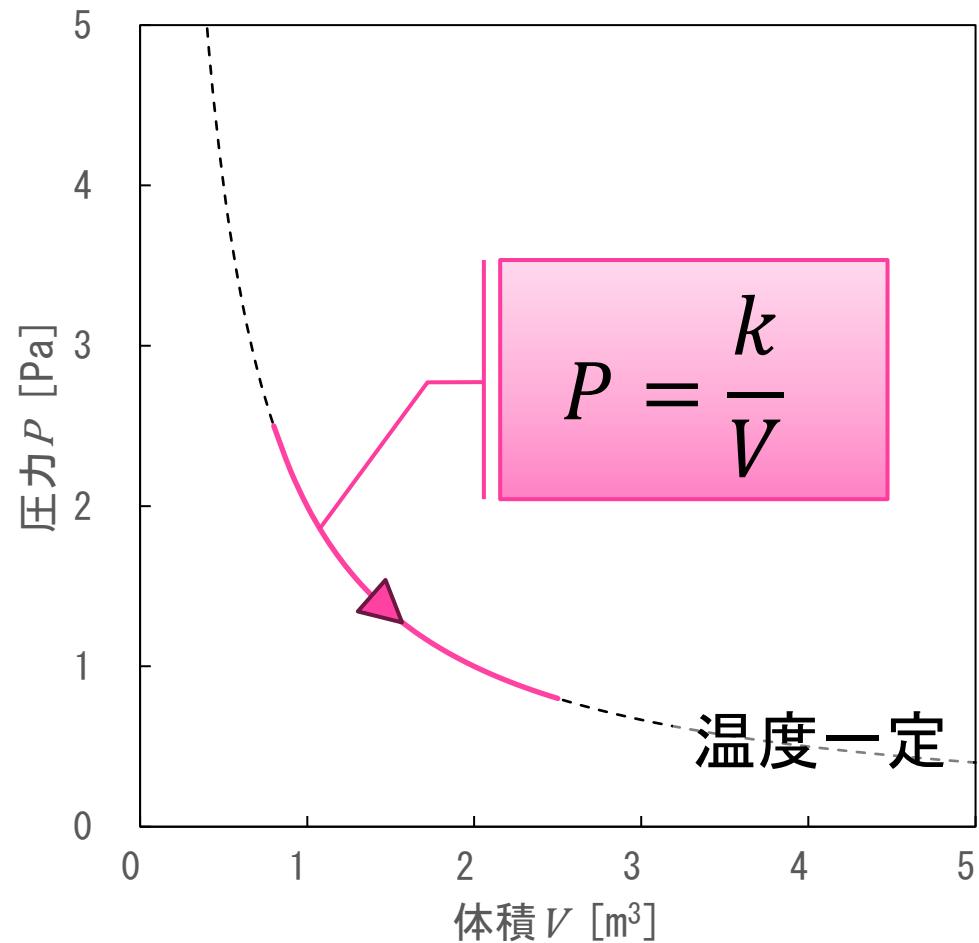
- グラフ: 圧力 $P$  – 体積 $V$ , 面積: 気体の仕事 $W$

## 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。

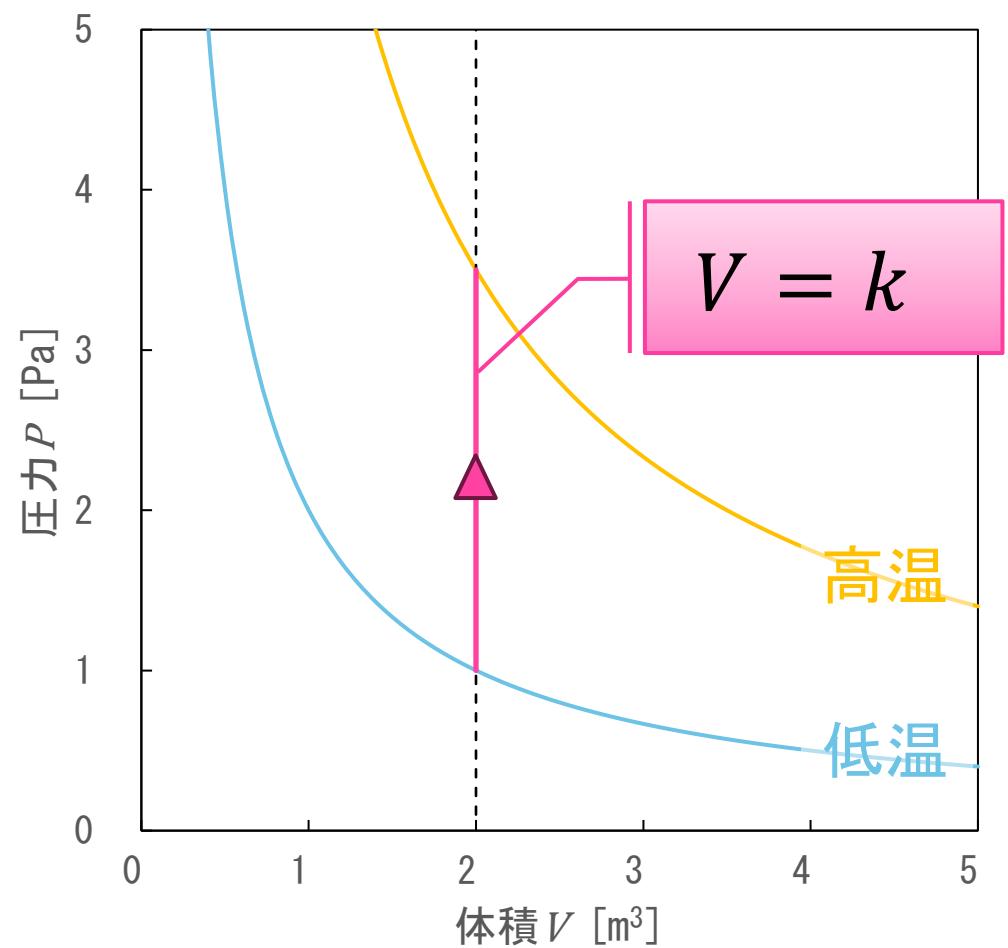
$$\Delta U = n c_V \Delta T \cdots (2.42)$$

- (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.

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

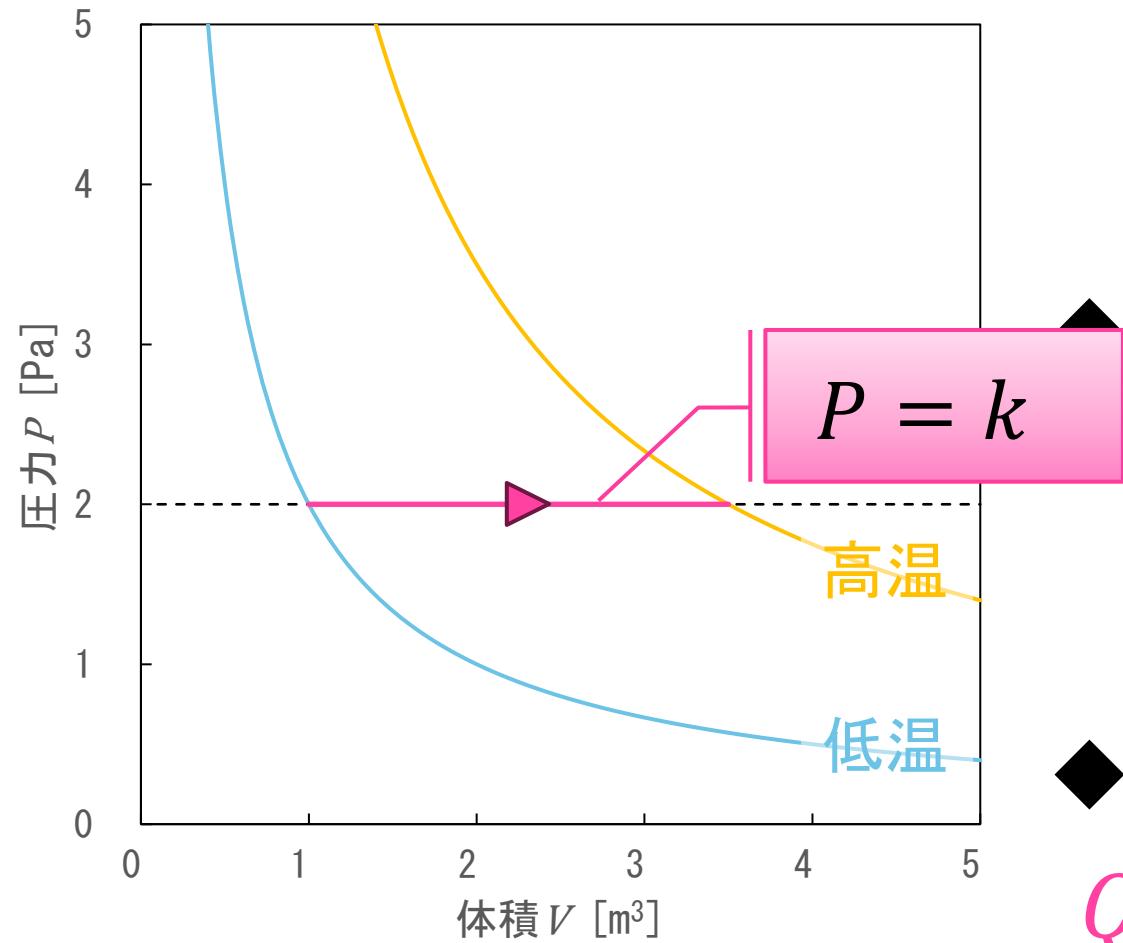
- (2.53) 式を計算し、单原子分子理想気体の定圧モル比熱は次である.

---


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

# 板書

## 定圧変化



- ◆ 定圧変化なので,  
 $P = \text{Const.}$  … (2. 55)  
 である。
- シャルルの法則より,  
 $\frac{V}{T} = \text{Const.}$  … (2. 11)  
 である。
- 熱力学第一法則より,  
 $Q_{\text{in}} = \Delta U + P\Delta V$  … (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 $\gamma$ 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。

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

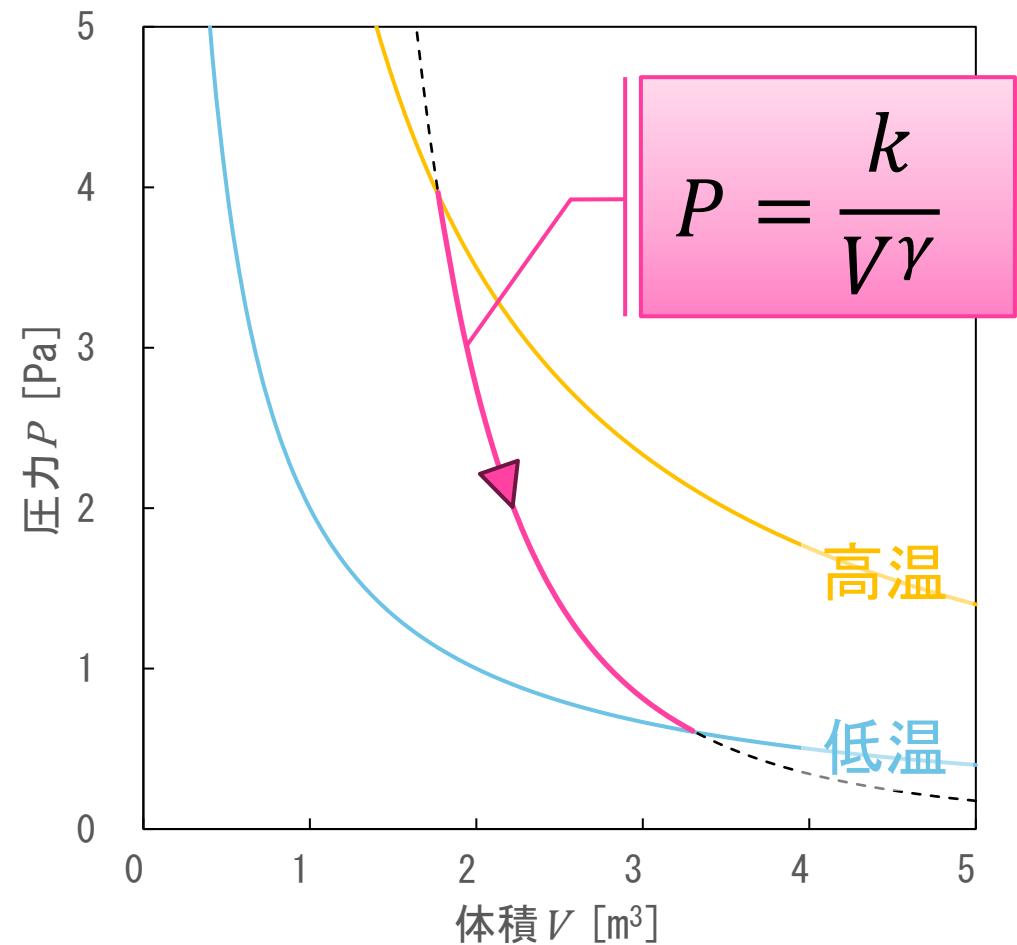
- (2. 61) 式に状態方程式  $T = \frac{PV}{nR}$  を代入すると、次である。

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

- (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)

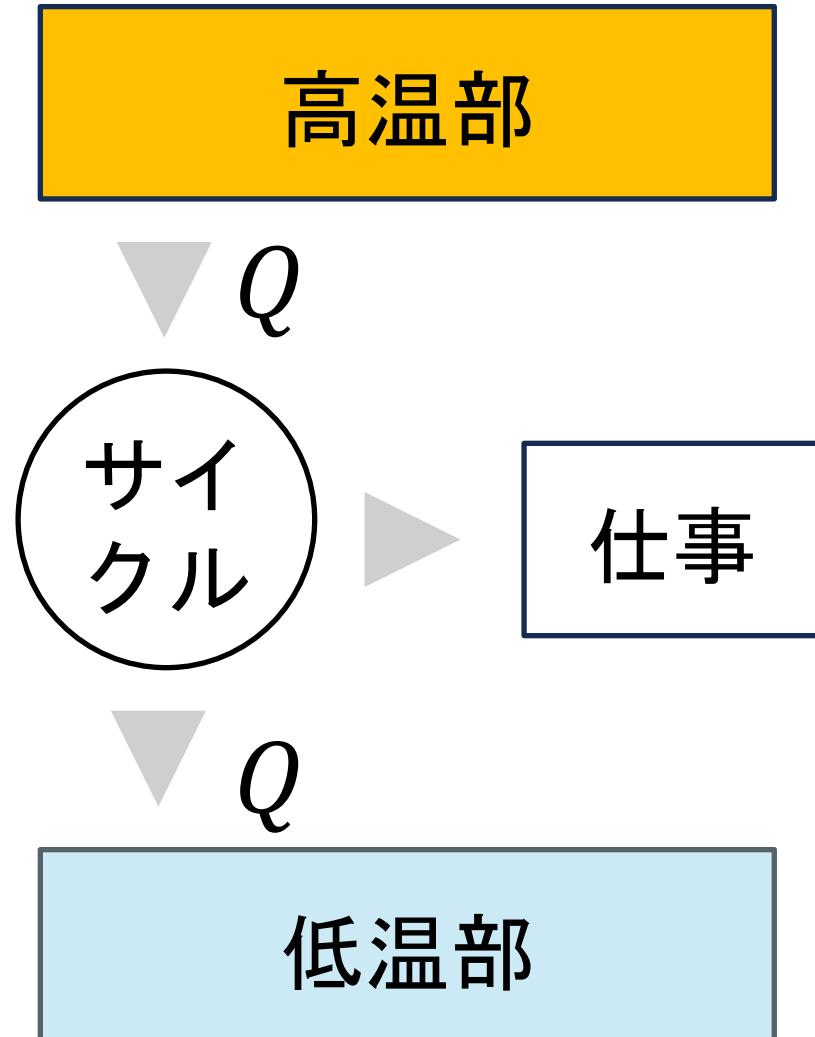


2つの熱源で動作する系についての最大熱効率は、物体によらず**2つの温度のみ**で決まる。

(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

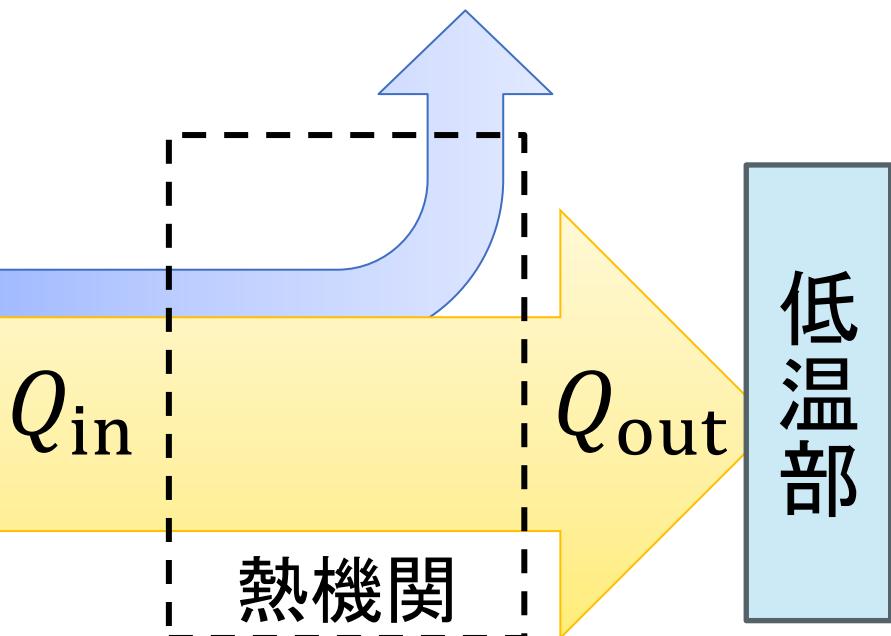
# 発電用タービン

余談

# 板書

## 熱効率 -1

外界への仕事  $W_{\text{out}}$



- ◆ 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 $Q_{\text{in}}$ , 低温部に捨てた熱量を $Q_{\text{out}}$ とすると気体が得た熱量の総和 $\Delta Q$  [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.

---


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