

# 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線図と状態変化](#)
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

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ない…

- 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

- 絶対温度  $T$  [K]
- 圧力  $P$  [Pa]
- 体積  $V$  [m<sup>3</sup>]

この3つを抑えたうえで  
グラフを描けば  
すべての問題が解ける！

01

# 分子の運動

---

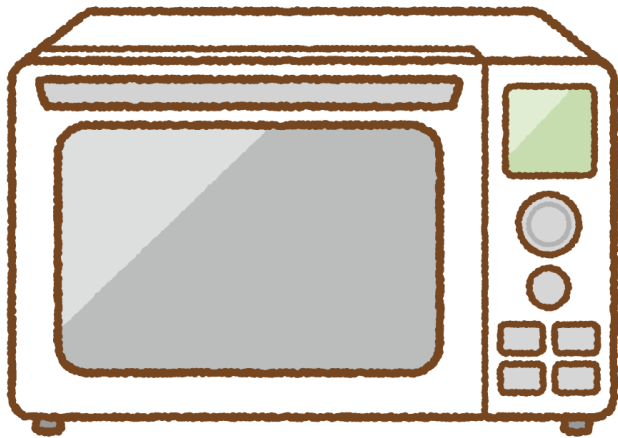
- 分子の運動と衝突
- 物質の三態
- 熱膨張

# 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.
- ▼
- 熱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  $0[\text{K}]$  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

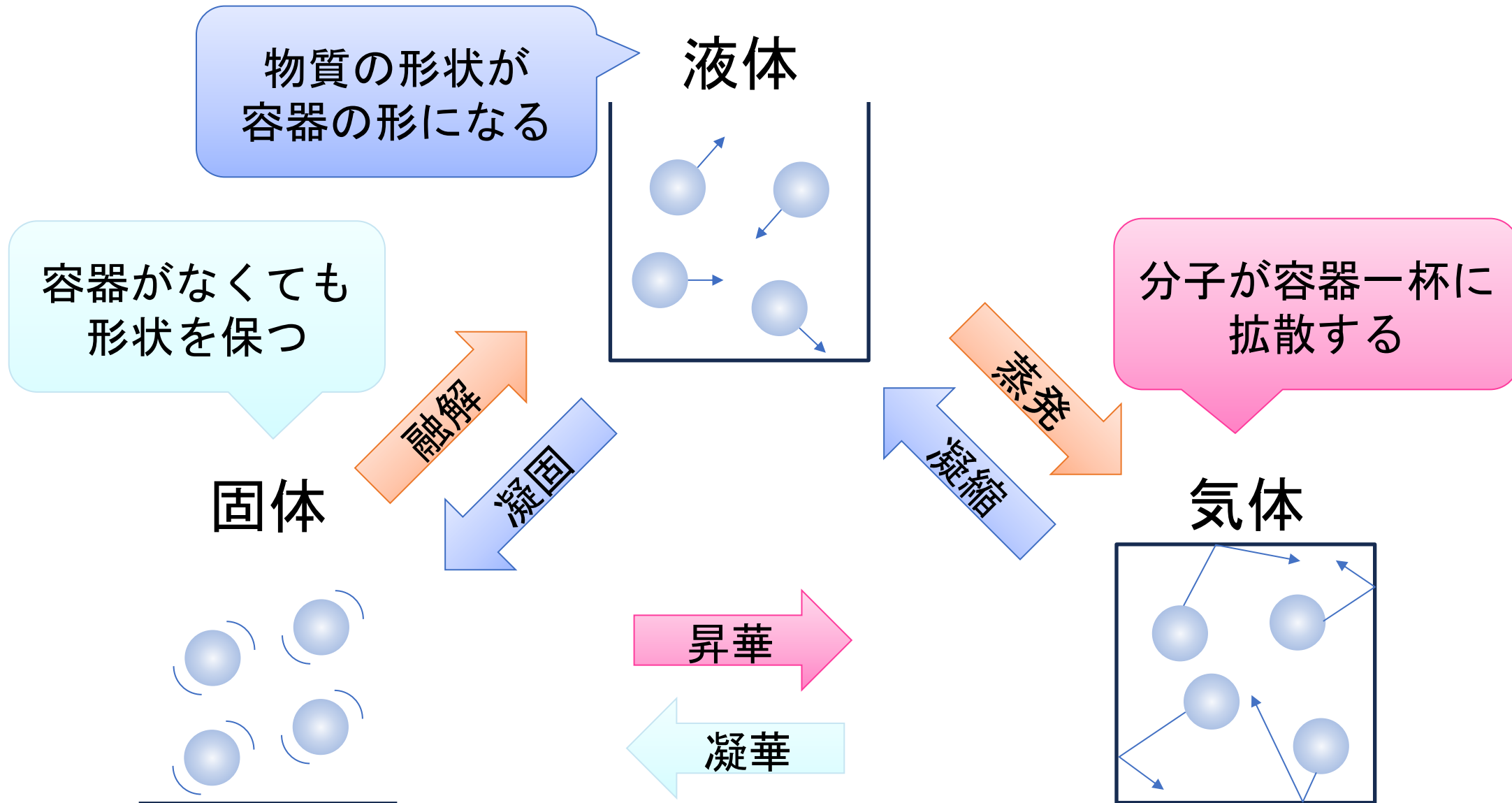
# セルシウス温度を絶対温度にせよ

セルシウス温度 $t$ [°C]	$+ 273$ $\Rightarrow$	絶対温度 $T$ [K]
-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





## 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.

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

ピンポン玉  
の大きさ程

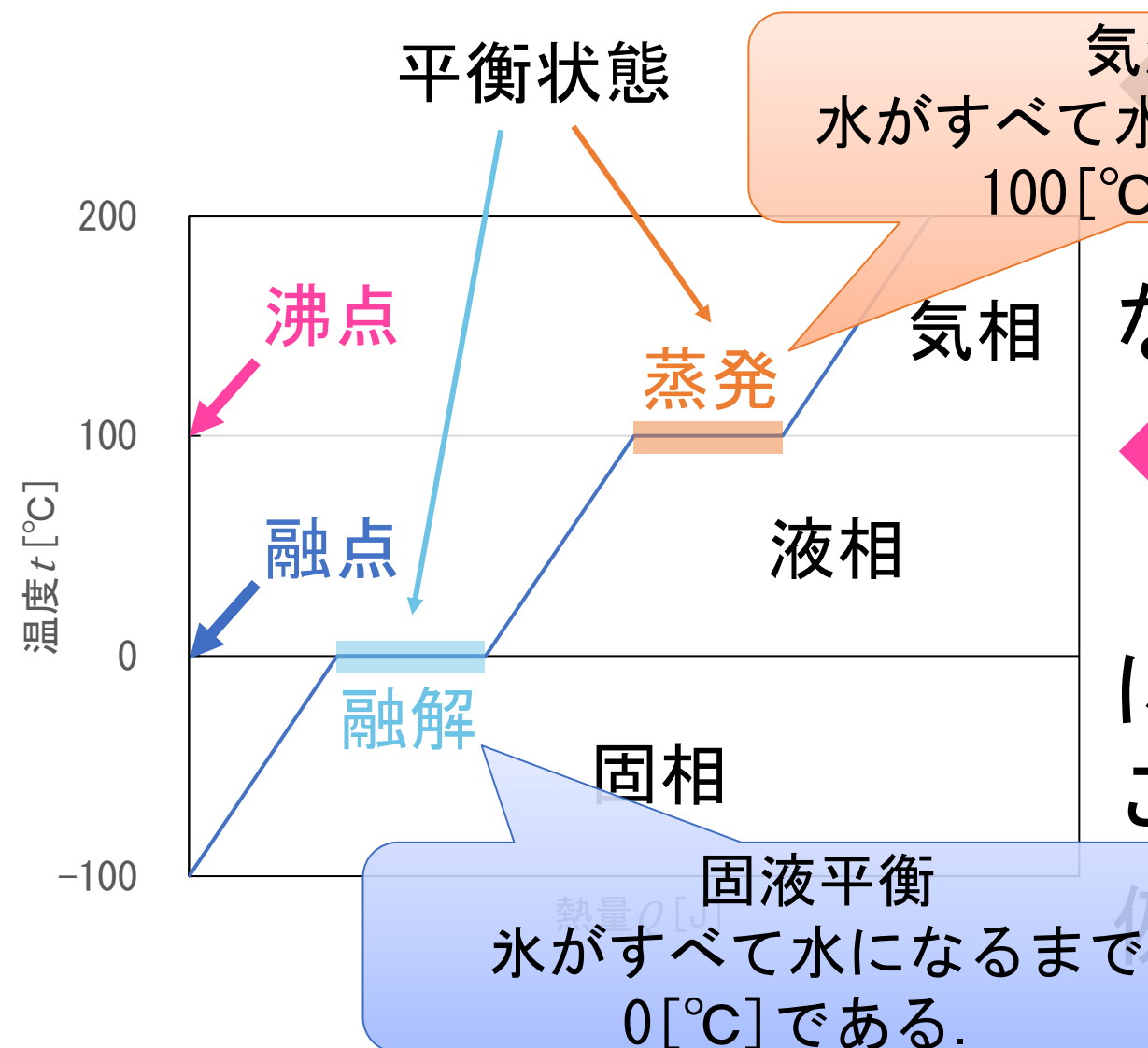
- これは分子半径とほぼ同じになる.
- 気体1[mol]は標準状態で22.4 × 10<sup>-3</sup> [m<sup>3</sup>]なので、その分子間距離は次である.

$$r_{\text{air}} = \sqrt[3]{\frac{22 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol}}{6.0 \times 10^{23} / \text{mol}}} \doteq 3 \times 10^{-9} [\text{m}] \cdots (2.3)$$

バスケットボール  
の大きさ程

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

# 水の相変化

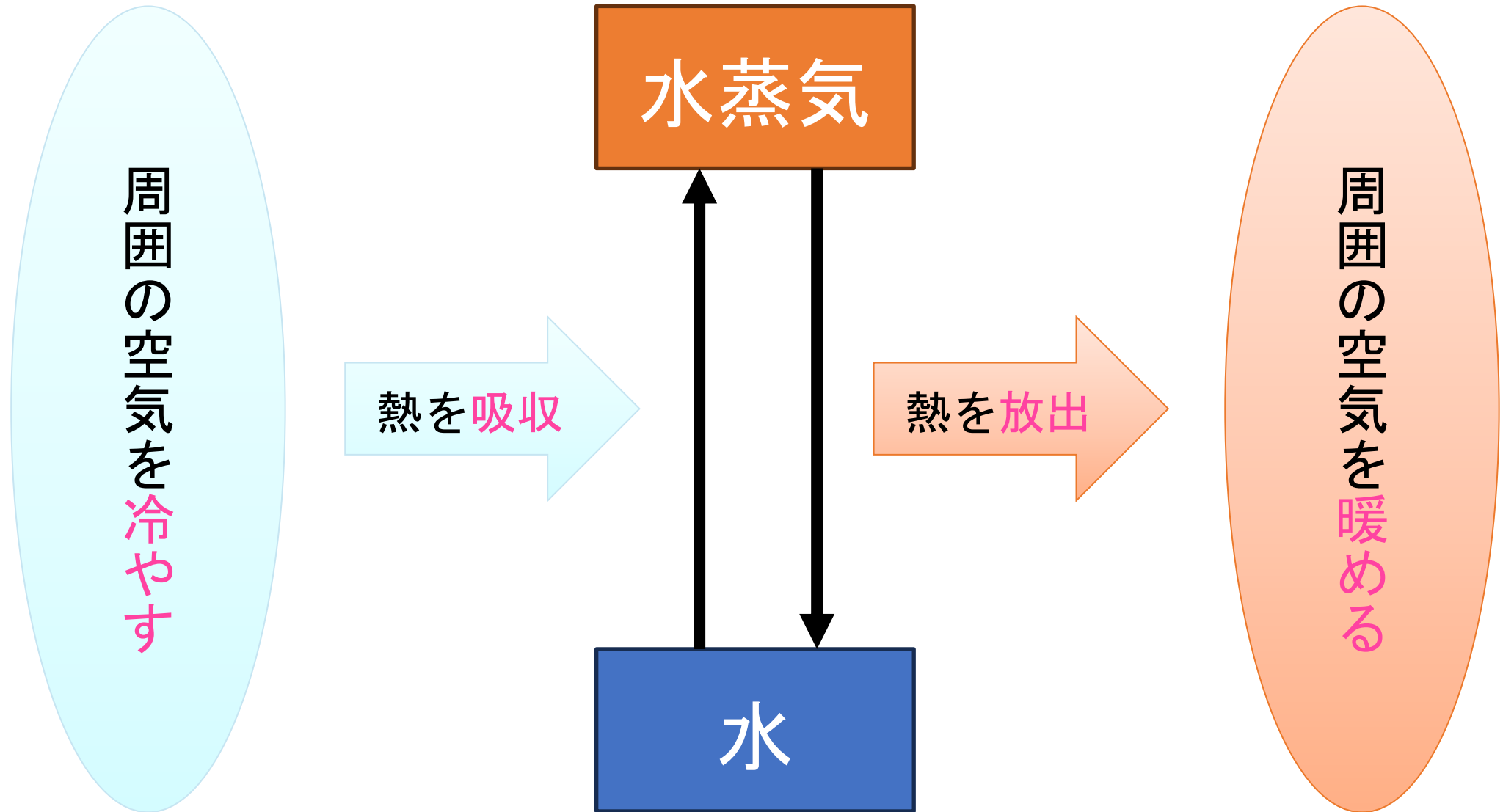


明確な境を持つ均一な物質の系のこと。

## ◆ 潜熱

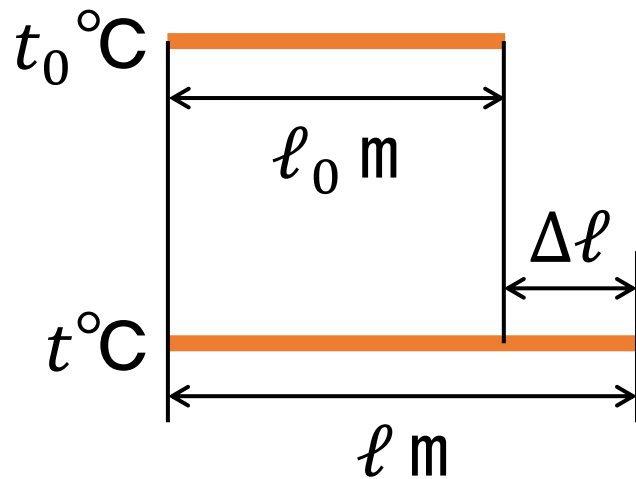
相が変化をするときに吸収・放出する熱のこと。

例) 融解熱, 蒸発熱など



# 熱膨張 -1

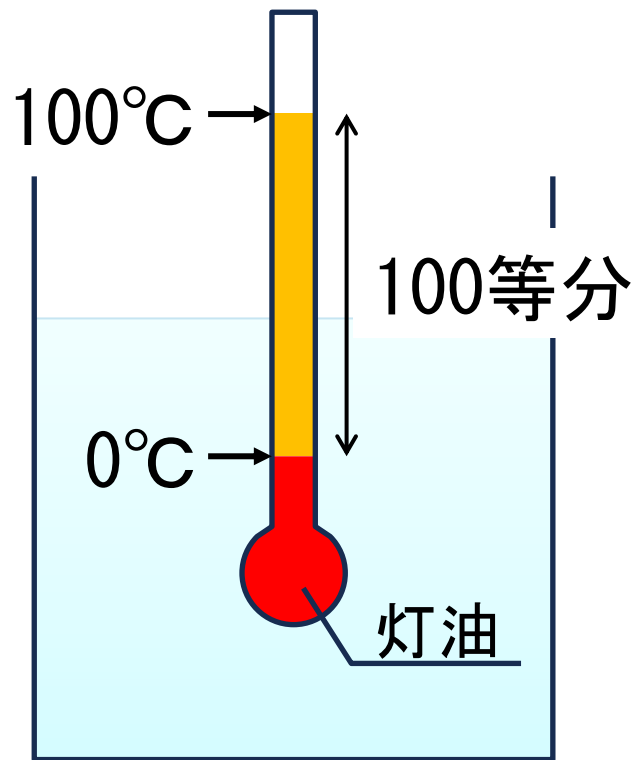
- ◆ 温度による固体の長さの変化を線膨張と呼ぶ.



- ◆  $t_0\text{ }[^{\circ}\text{C}]$ における長さを $l_0\text{ [m]}$ ,  $t\text{ }[^{\circ}\text{C}]$ における長さを $l\text{ [m]}$ , 線膨張率を $\alpha\text{ [/K]}$ とすると次である.

$$\frac{1}{l_0} (l - l_0) = \alpha (t - t_0) \cdots (2.4)$$

# 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.

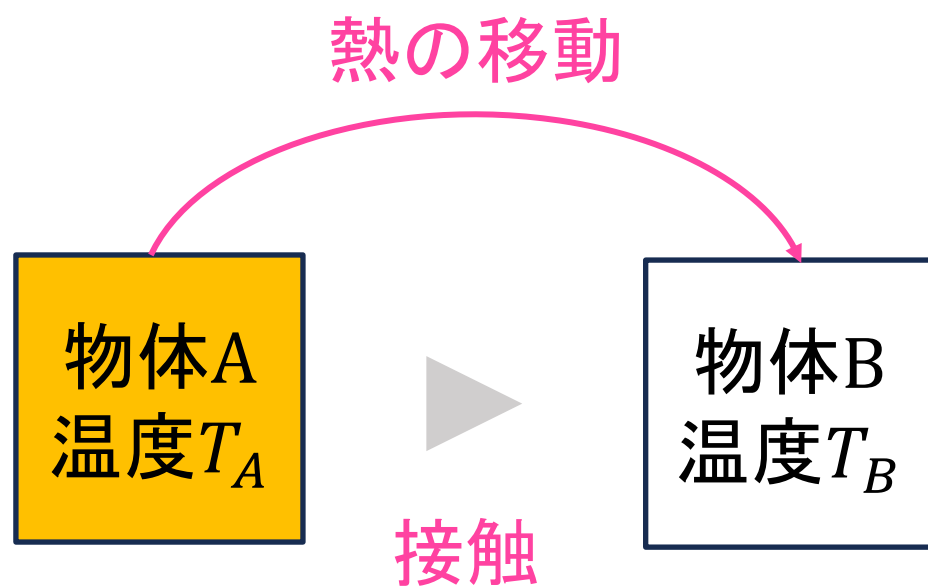
$$t = 100 \frac{V - V_{\text{bp}}}{V_{\text{bp}} - V_{\text{mp}}} \cdots (2.5)$$

02

# 熱量と蓄熱

---

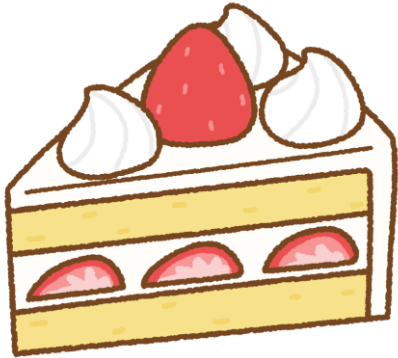
- 熱量
- 熱平衡
- 比熱と熱容量



$$T_A > T_B$$

- ◆ 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.
- ◆ 熱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って  
いる.
- ◆ 熱量の元々の単位は、  
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？

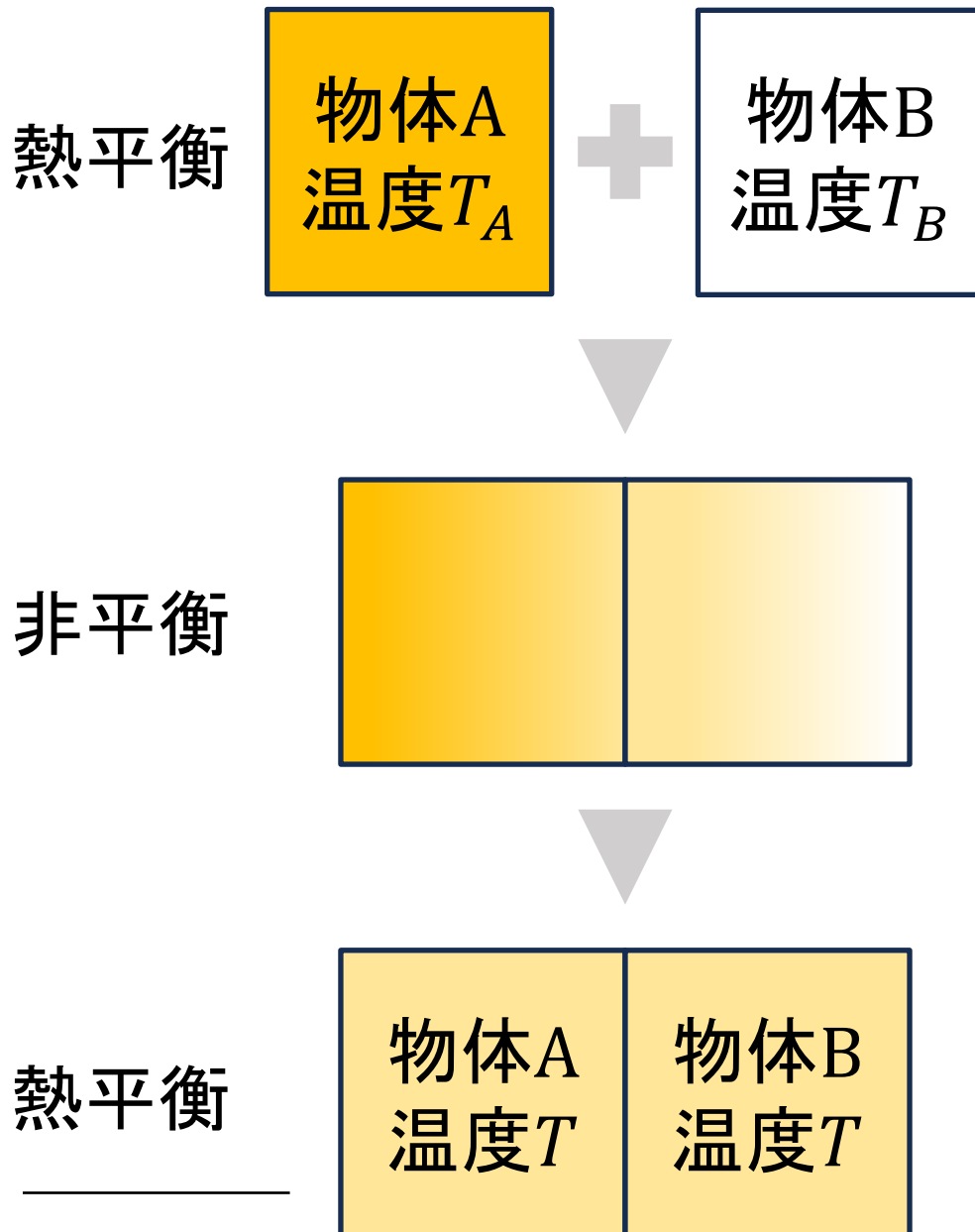


ウォーキング  
約60[min]

- ◆ 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]



# 熱平衡 -1

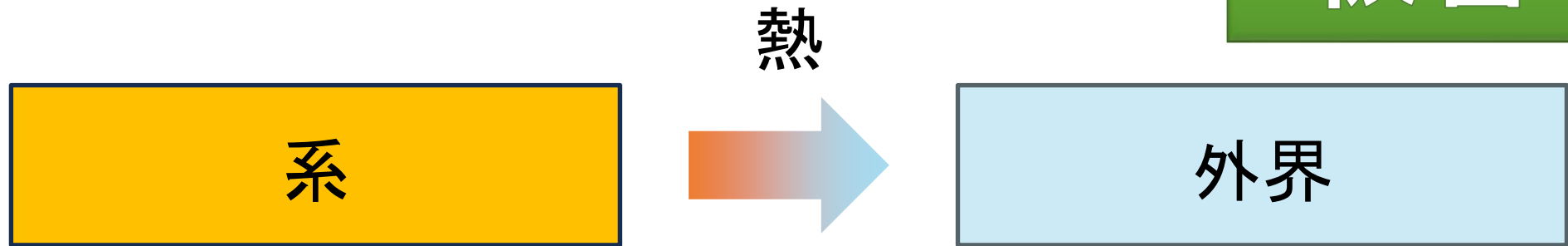


- ◆ 温度の違う物質を接触させて放置する.
- ◆ 経験則上, 二物体の温度は一樣になる.
- ◆ 最終的な温度 $T$ は, 最初の温度 $T_A$ ,  $T_B$ の中間の値になる.
- ◆  $T$ が $T_A$ ,  $T_B$ に自発変化しないことを不可逆変化と呼ぶ.

# 熱平衡 -2

板書

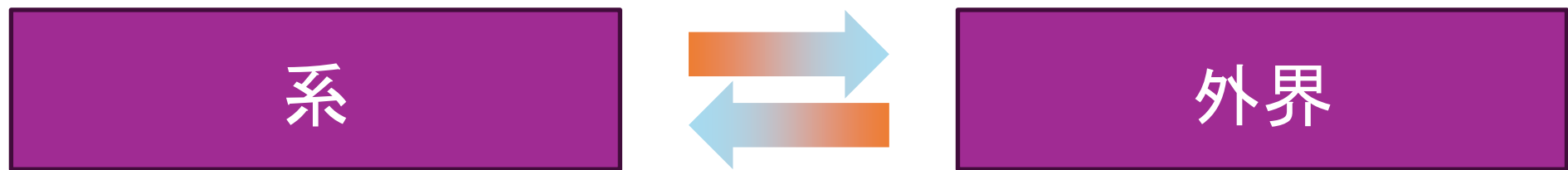
18



系の温度 > 外界の温度

熱は、一方的に流れる.

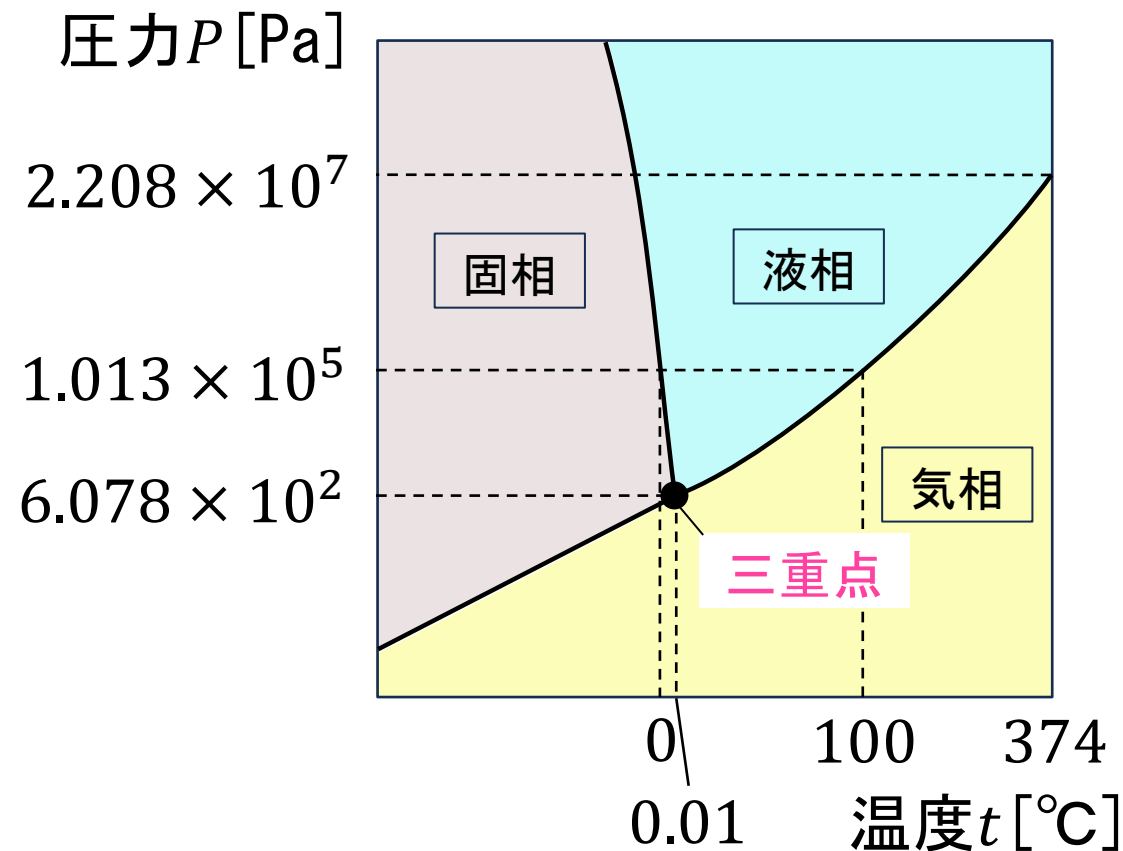
熱平衡



系の温度 = 外界の温度

熱は、見かけ上流れない.

## 水の平衡状態図



- ◆ 相の種類は圧力 $P$  [Pa], 温度 $t$  [ $^{\circ}\text{C}$ ], 組成によって決まる.
- ◆ これらの関係を線図で表したものを平衡状態図と呼ぶ.
- ◆ 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

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

状態A



可能な組み合わせは1通り

状態B



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。

$$= 0, \ln 10 \doteq 2.30$$

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

# 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.
- 熱容量  $C$  [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

余談

凝縮

位置エネルギー

水力発電

機械

運動エネルギー

新幹線

家庭

電気エネルギー

火力発電

太陽光発電

変電所

熱エネルギー

蒸発

風力発電

光エネルギー

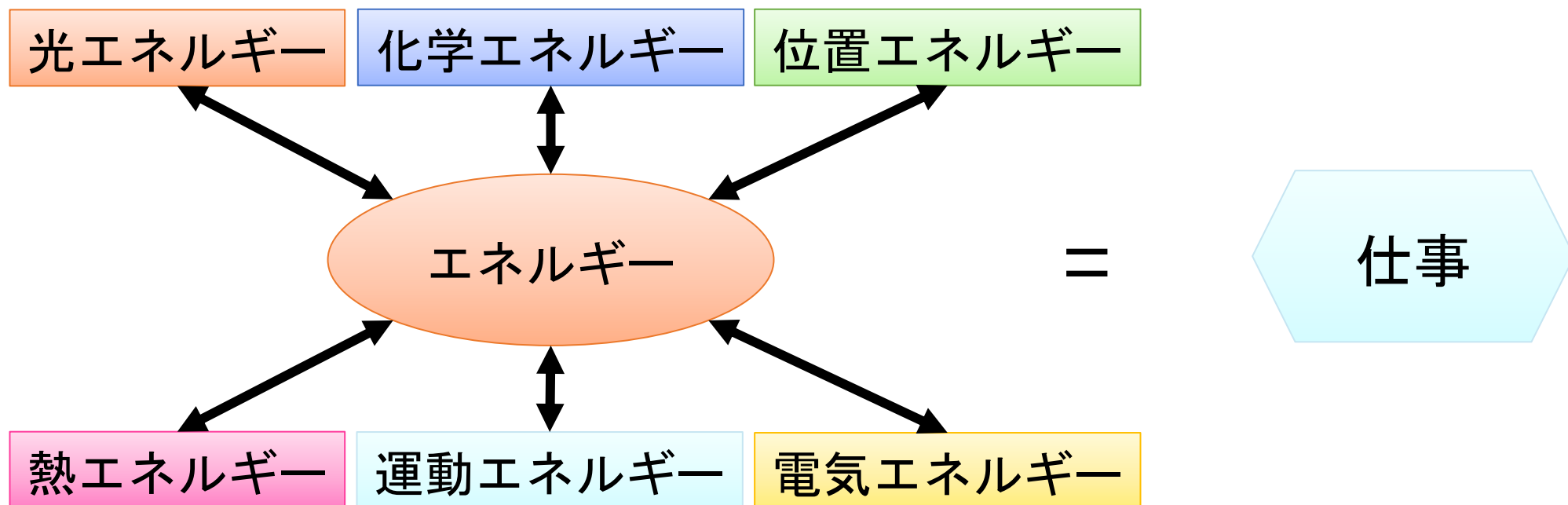
太陽

化学エネルギー

熱エネルギー

運動エネルギー

# エネルギー

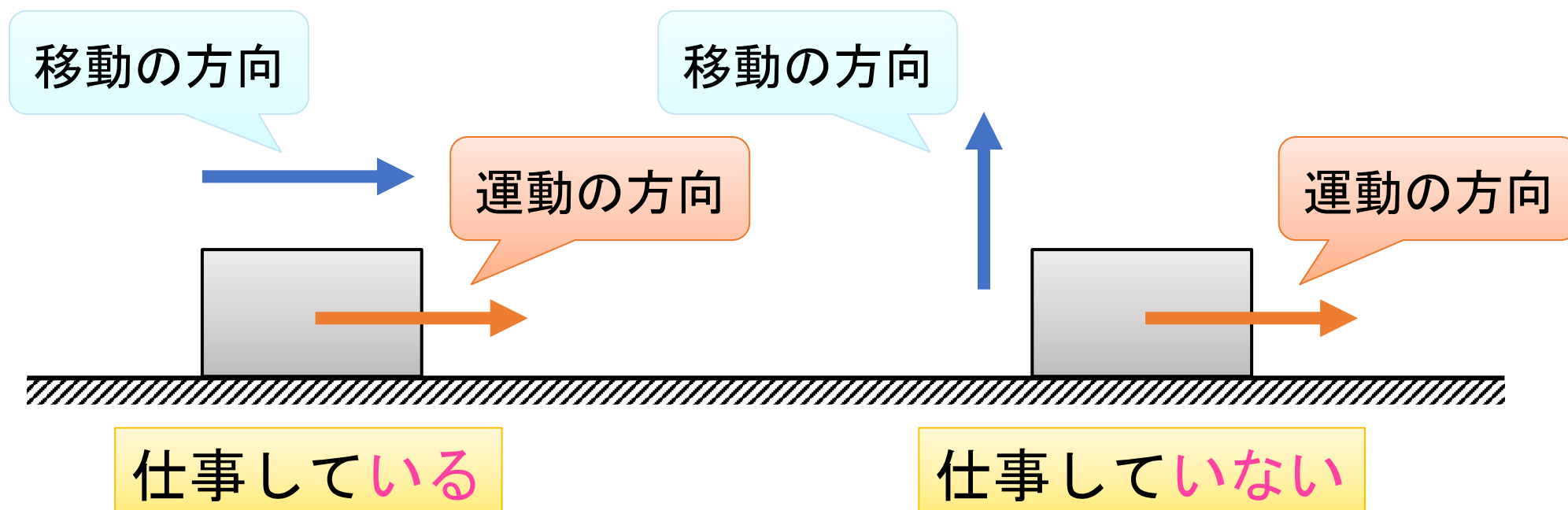


- ◆ 仕事をすることができる**潜在的な能力**のこと.
- ◆ エネルギーは**別のエネルギーに変換**できる.
- ◆ 仕事 $W$  [J], 力の大きさ $F$  [N], 移動距離 $x$  [m] とすると次である.

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



# 仕事



◆ 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．

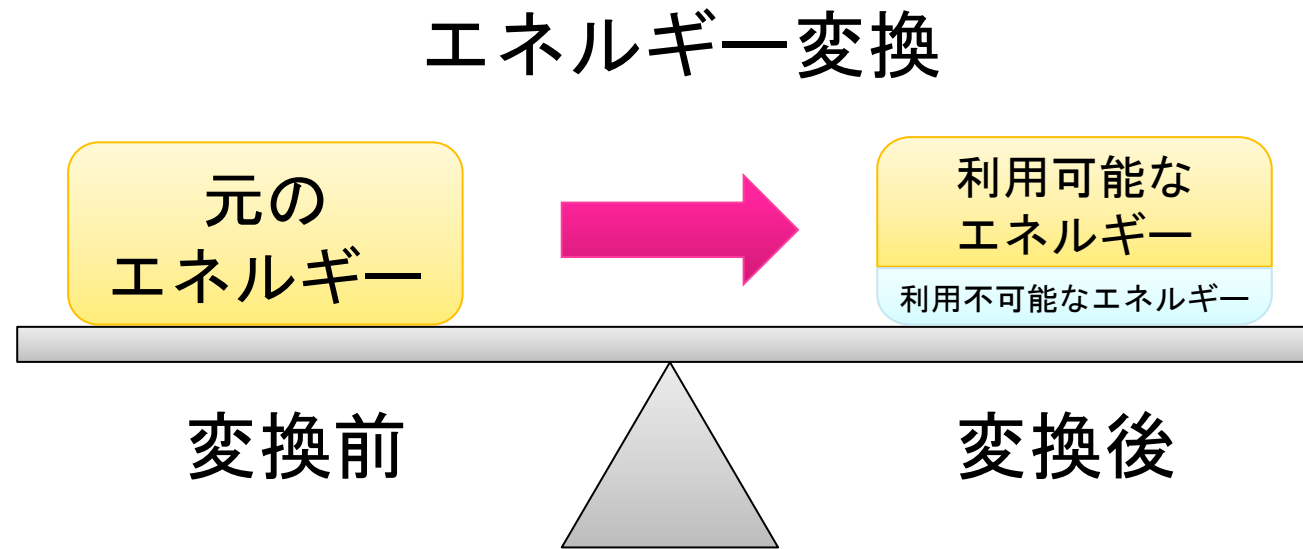
◆  $P$ — $V$ グラフの面積が気体の仕事である．

# 引っ越し業者は仕事してない？



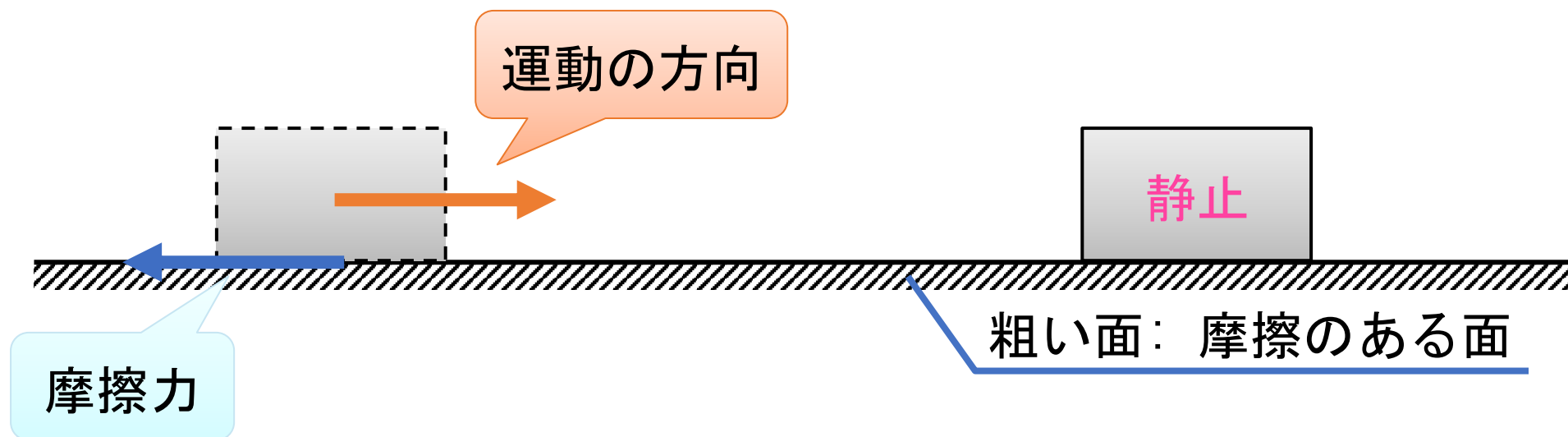
- ◆ 荷物を持ち上げる力は**上向き**である.
- ◆ 荷物を移動させる力は**横向き**である.
- ◆ そのため、物理学の定義では**仕事してない**と言える.
- ◆ ただ持ち上げる、階段を登る動作は**仕事した**と言える.

# エネルギーを変換する



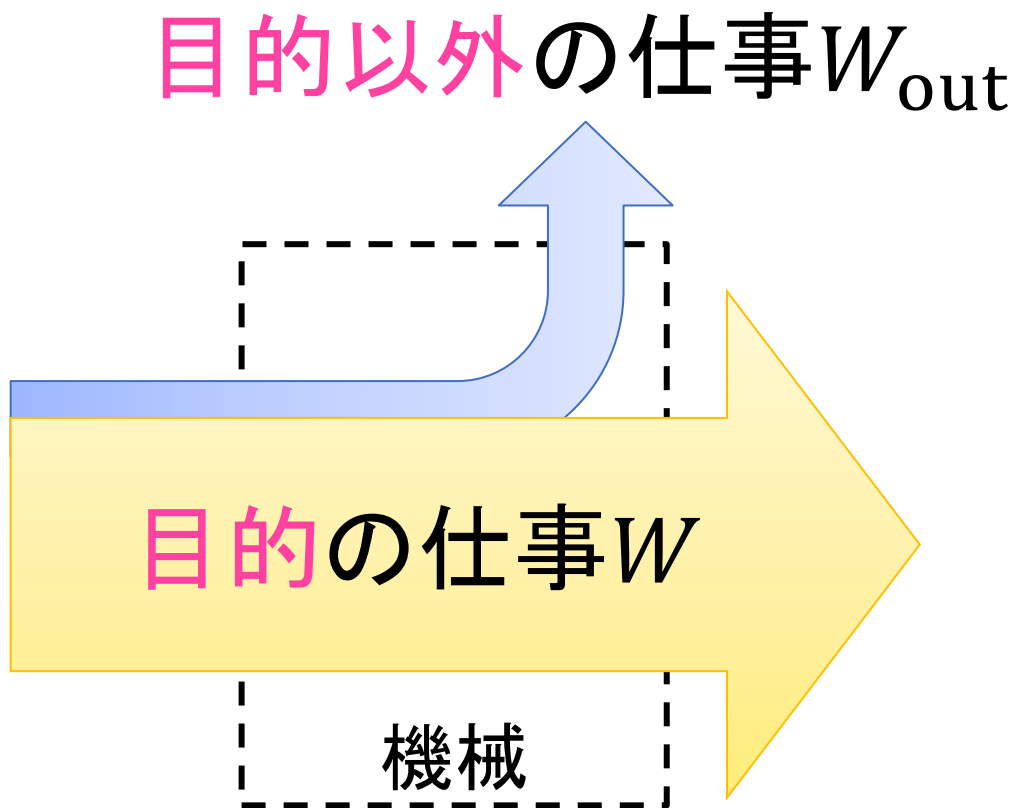
- ◆ 変換後では仕事で使えるエネルギー量が，変換前と比べて常に減少する。
- ◆ エネルギー変換前後で総量が変わらないことを，エネルギー保存則と呼ぶ。

# 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）．

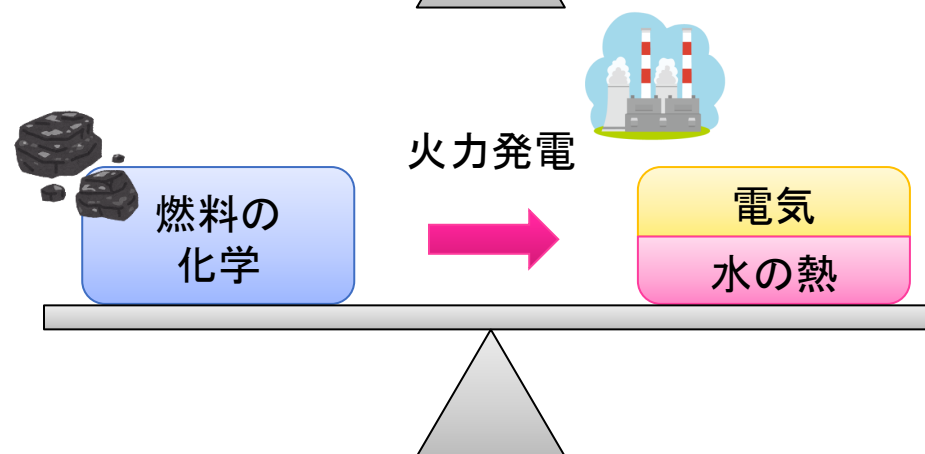
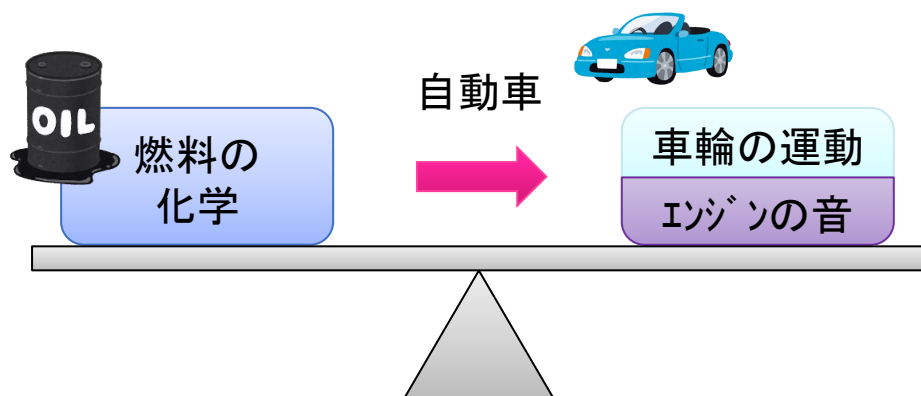
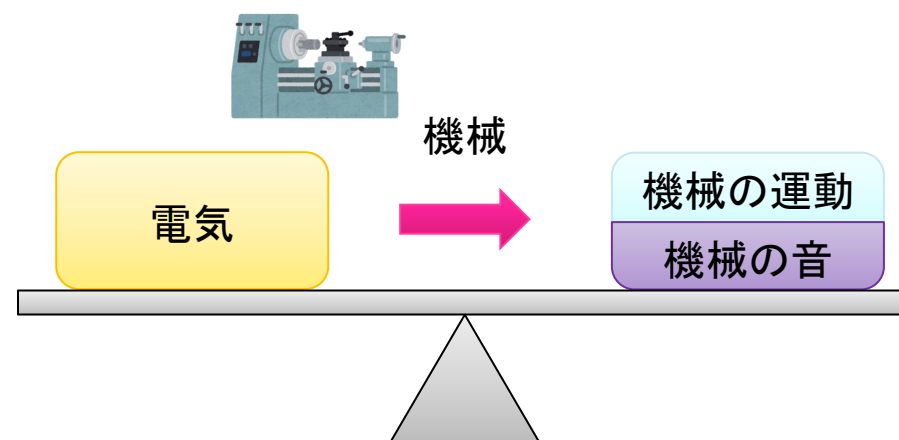
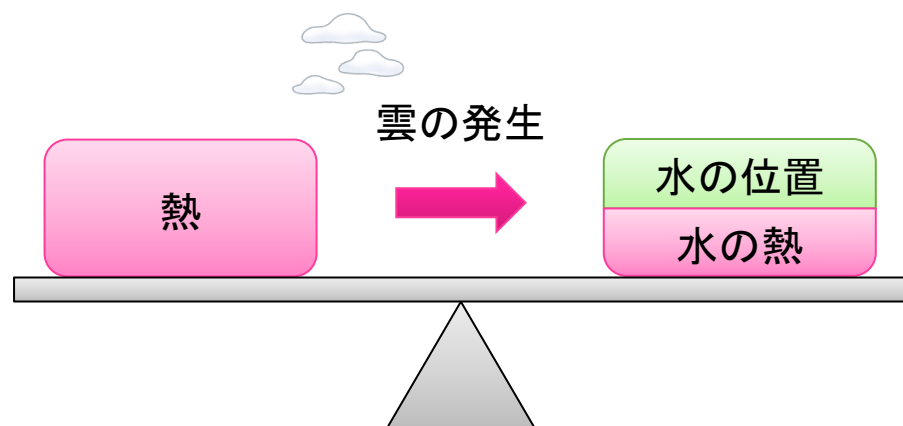
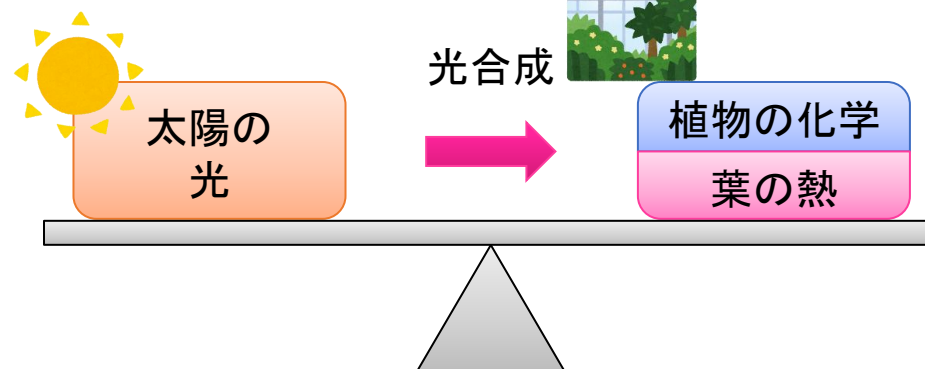
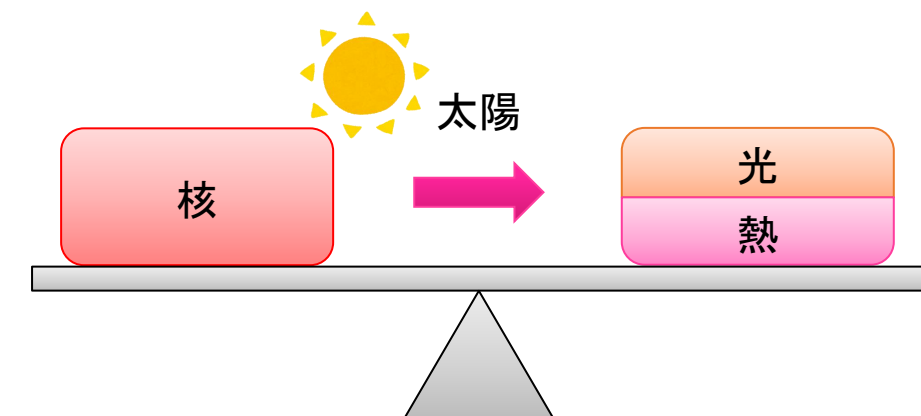
# エネルギー利用の効率



- ◆ 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.

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

## 板書



04

# 理想気体の状態方程式

---

- 物質質量と体積
- ボイル-シャルルの法則
- 理想気体の状態方程式

# 物質質量と体積

アボガドロ数

$$6.0 \times 10^{23} [\text{個}]$$

物質質量

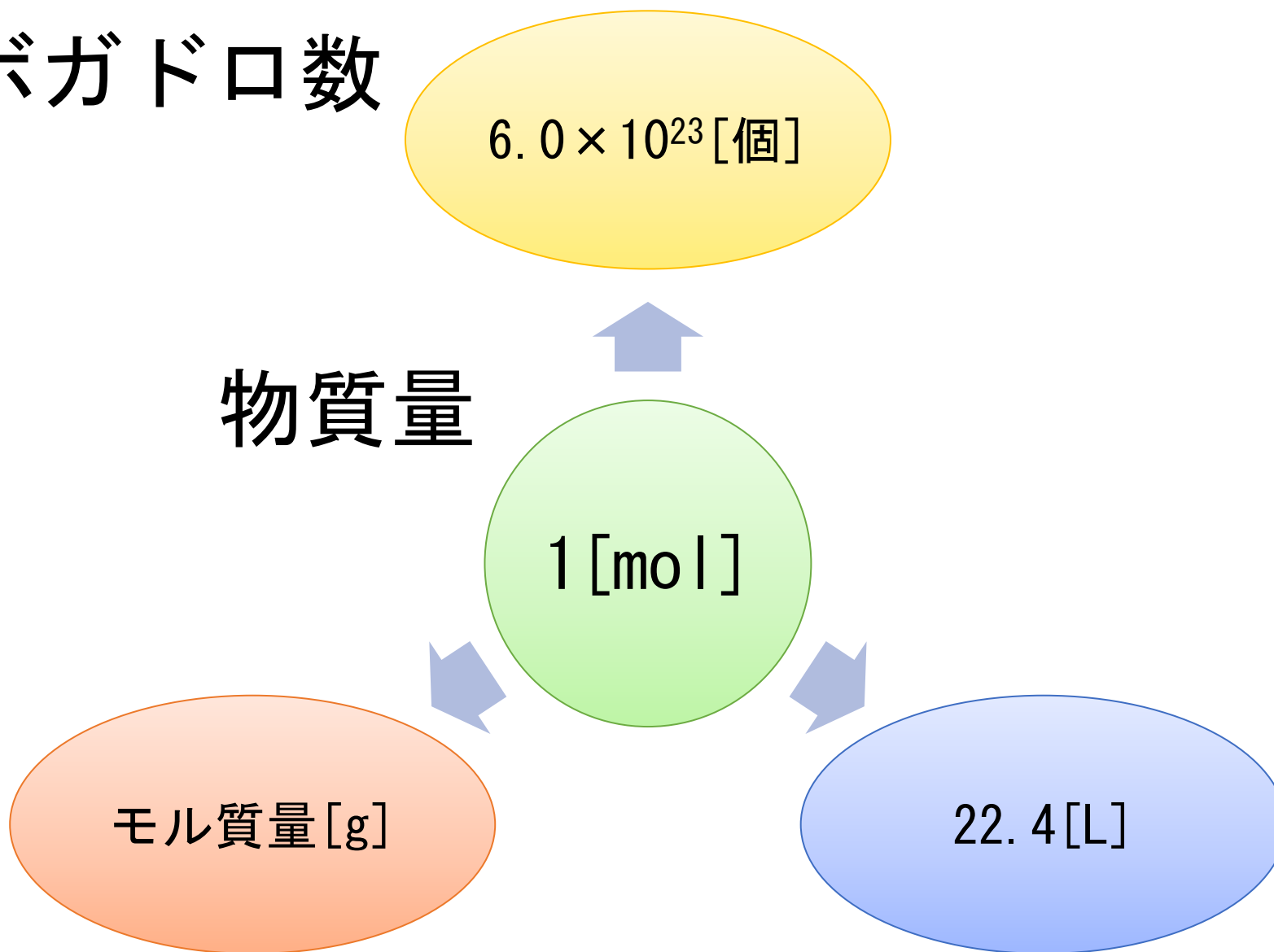
$$1 [\text{mol}]$$

質量

$$\text{モル質量} [\text{g}]$$

体積

$$22.4 [\text{L}]$$





DARSって12個入りだよね！

余談

33

1ダース

= 12個

MoI もDARSも概念は同じ

余談

34

1mol

= 6.0 × 10<sup>23</sup>個

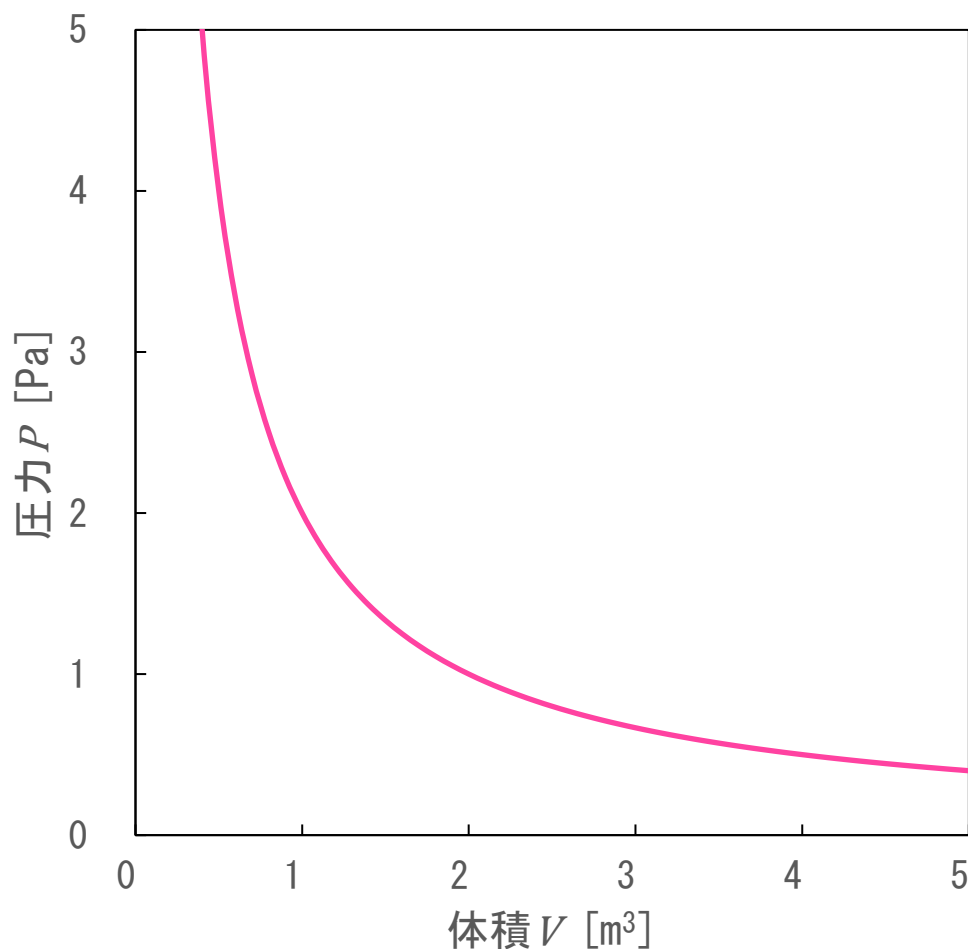
# 板書

## 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  
は不変である。  
(ボイルの法則)

# ボイルの法則



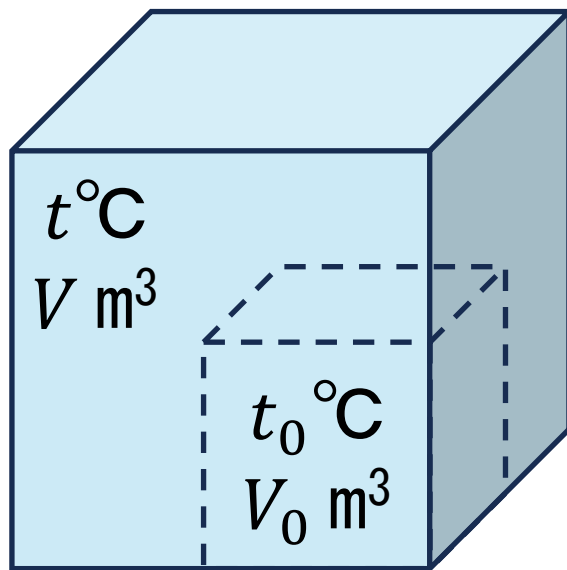
$P$ と $V$ は反比例の関係

- ◆ 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.

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

- ◆  $P - V$ 線図を左に示す.

# 熱膨張 -2



- ◆ 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.

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

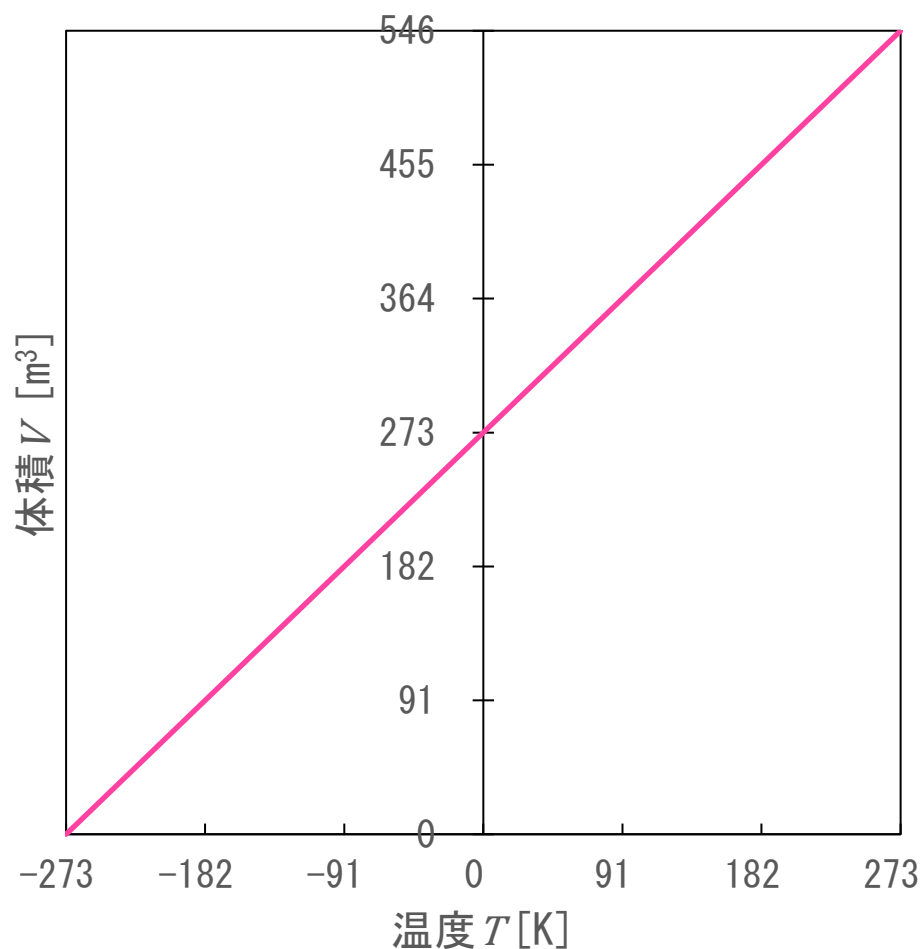
# 板書

ジャック・シャルル  
(A. D. 1746–1823年)

一定圧力で、気体の膨張率 $\alpha$ は不変である。  
(シャルルの法則)



## 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.

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

- ◆  $V - T$  線図を左に示す.

## 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.



# 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 [°C] かつ 1 [atm]) で 22.4 [L] を占める気体の量
- 気体定数  $R$  [J / (mol · K)] を気体 1 [mol] の状態方程式における比例定数
- $n$  [mol] を物質質量

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

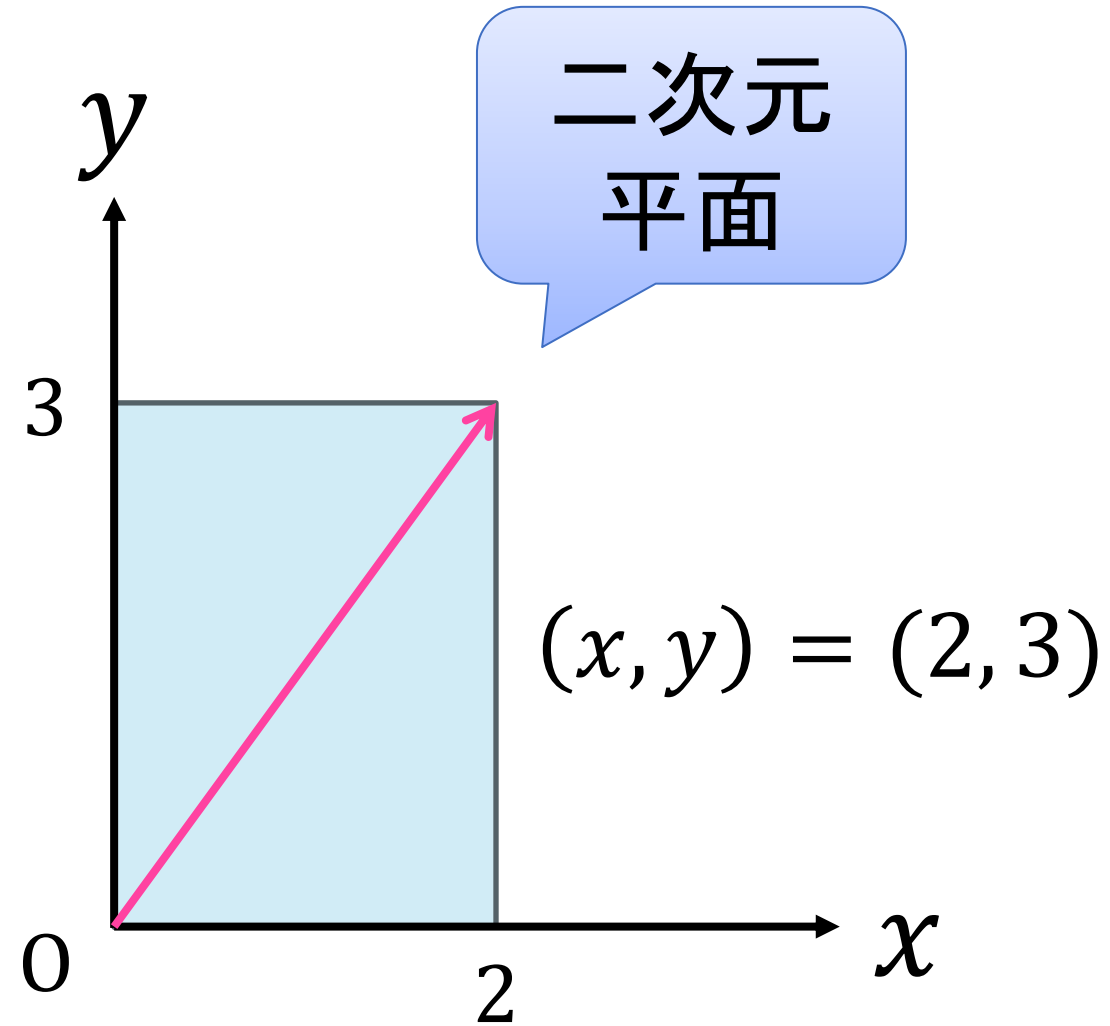
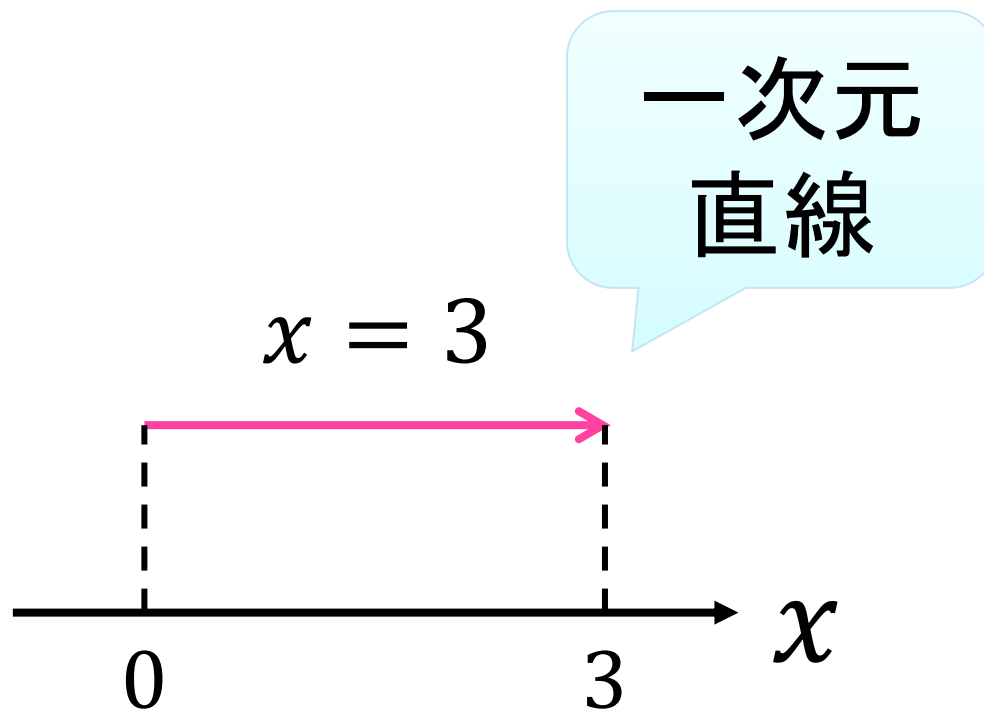
---

- 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

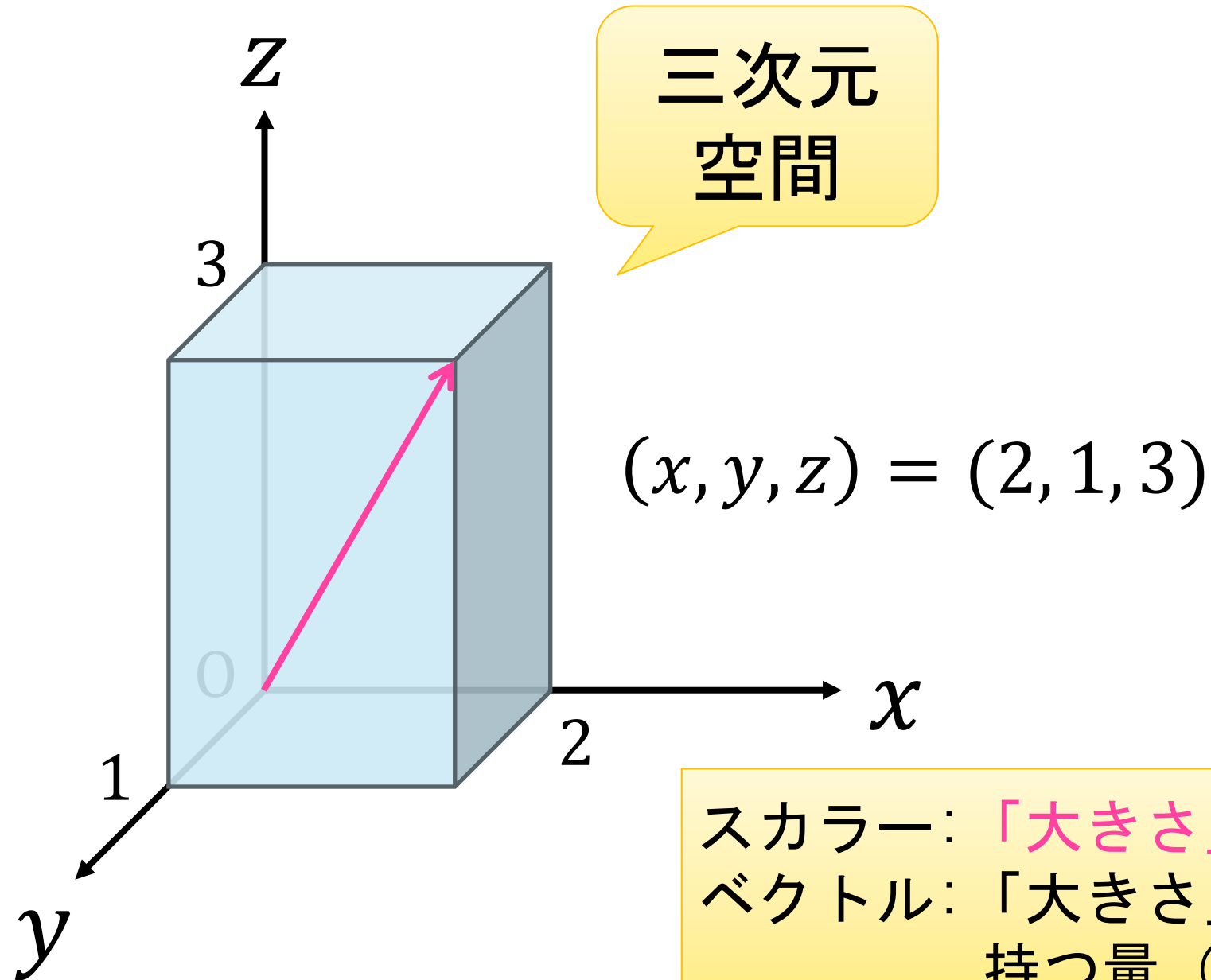


2軸目によって、  
向きが定まる！

# スカラーとベクトル -2

余談

44



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

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

 $\times t$ 
 $\times x$ 

$$m\vec{a}t = \vec{F}t$$

$$m\vec{a}x = \vec{F}x$$

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t$$

$$v^2 - v_0^2 = 2ax$$

$$\vec{v} - \vec{v}_0 = \vec{a}t$$

$$\frac{1}{2}(v^2 - v_0^2) = ax$$

$$m(\vec{v} - \vec{v}_0) = \vec{F}(t - t_0)$$

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

 $\cdots (1. \text{xx})$ 
 $\cdots (1. \text{xx})$ 

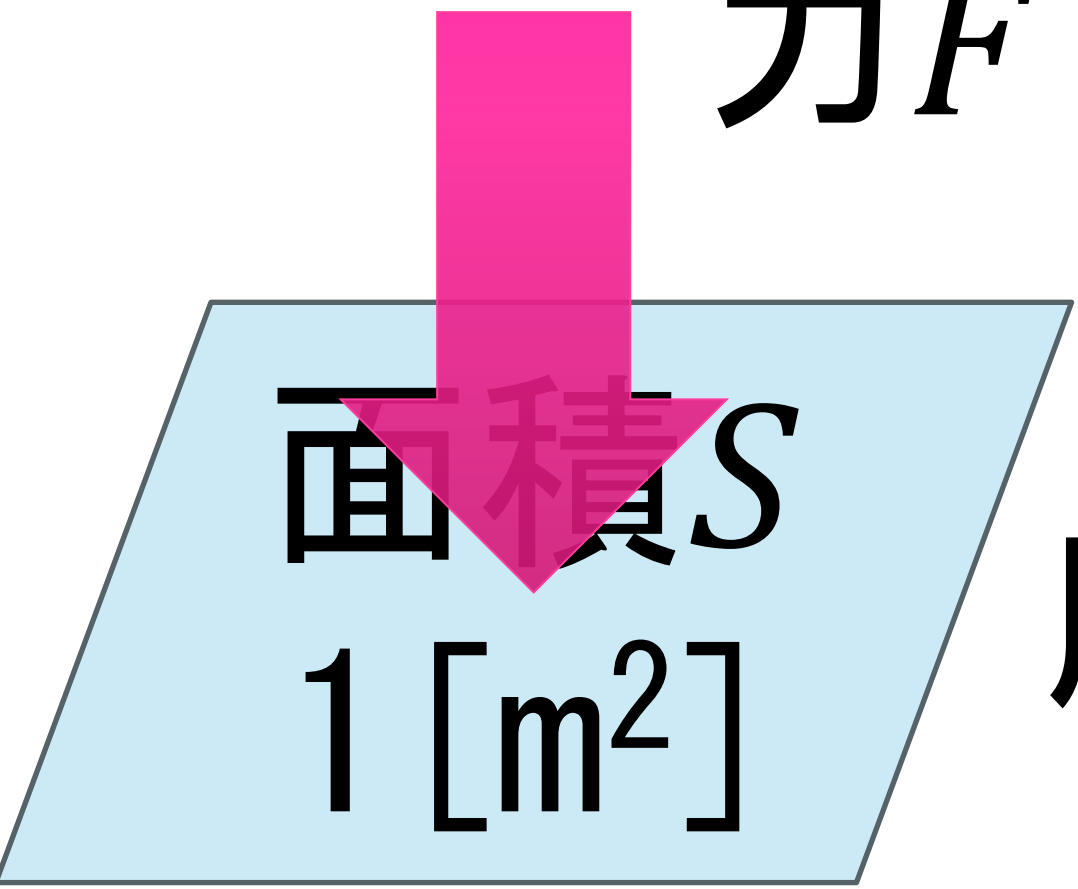
運動量

力積

運動エネルギー

仕事

力  $F$  1 [N]



面積  $S$   
1 [m<sup>2</sup>]

圧力  $p$  1 [Pa]

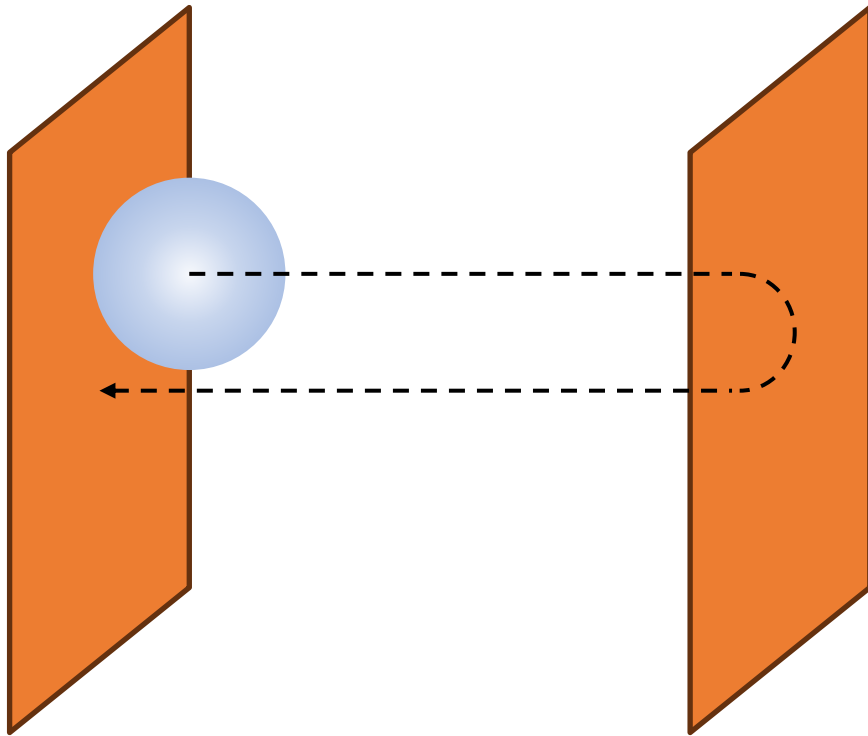
単位面積  $S$  あたりに垂直にかかる力  $F$

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

# 分子の運動 -1

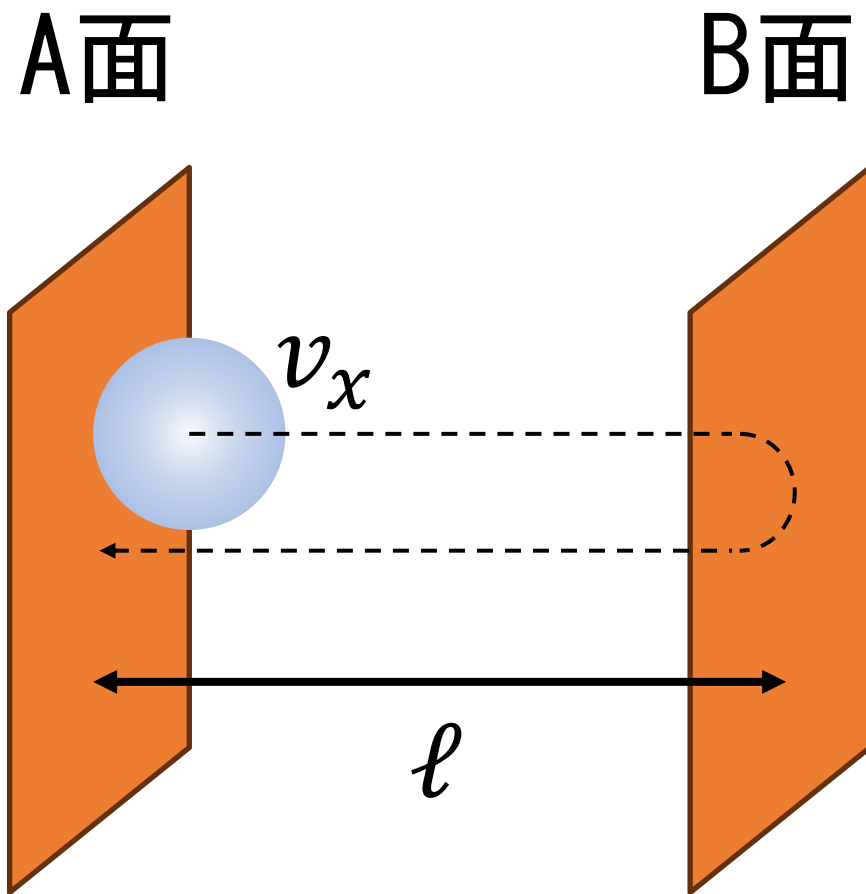
A面

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.

# 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.

$$m((-v_x) - v_x) = -2mv_x \quad \dots (2.15)$$

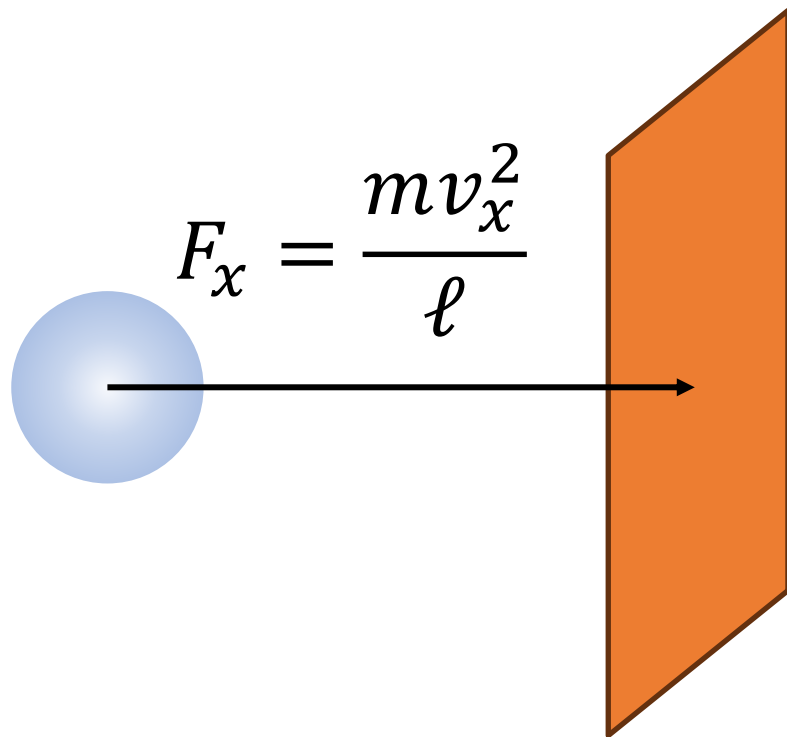
- ◆ 距離  $\ell$  [m] 離れたAB間を, 速さ  $v_x$  [m/s] で往復する時間  $t$  [s] は次である.

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



# 気体の圧力 -1

B面

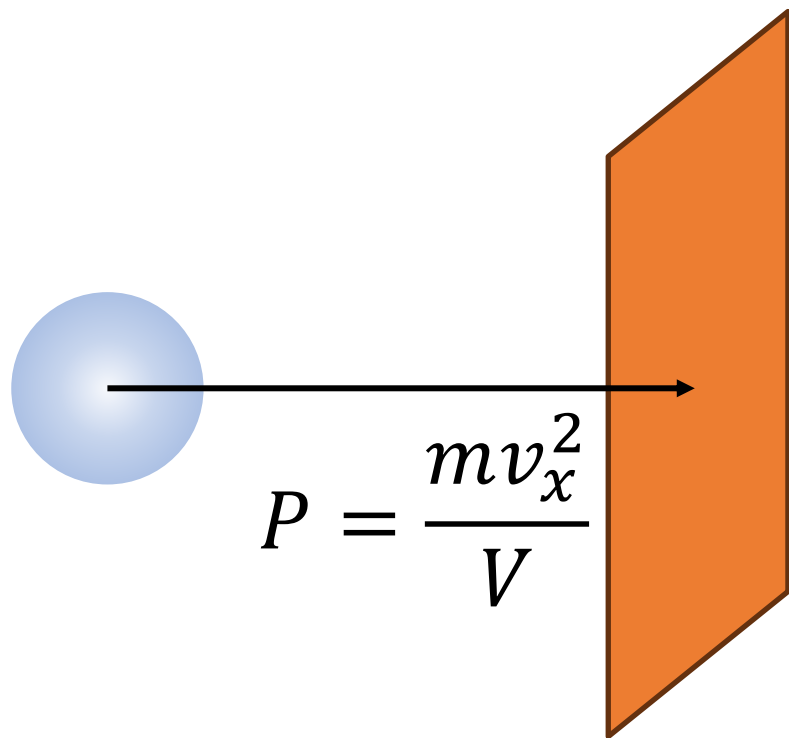


- ◆ 分子の力積 $J$ は(2.15)式より $-2mv_x$ である.
- ◆ そのため壁が分子から受ける力は, **作用-反作用の法則より  $2mv_x$  である.**
- ◆ 分子の力 $F$ は, 力積 $J$ , 時間 $t$ より次である.

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

# 気体の圧力 -2

B面



- ◆ 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.

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

- ◆  $\ell^3 = V$  より次である.

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

# 直線から空間へ拡張

- ◆ 3次元に拡張して考える.

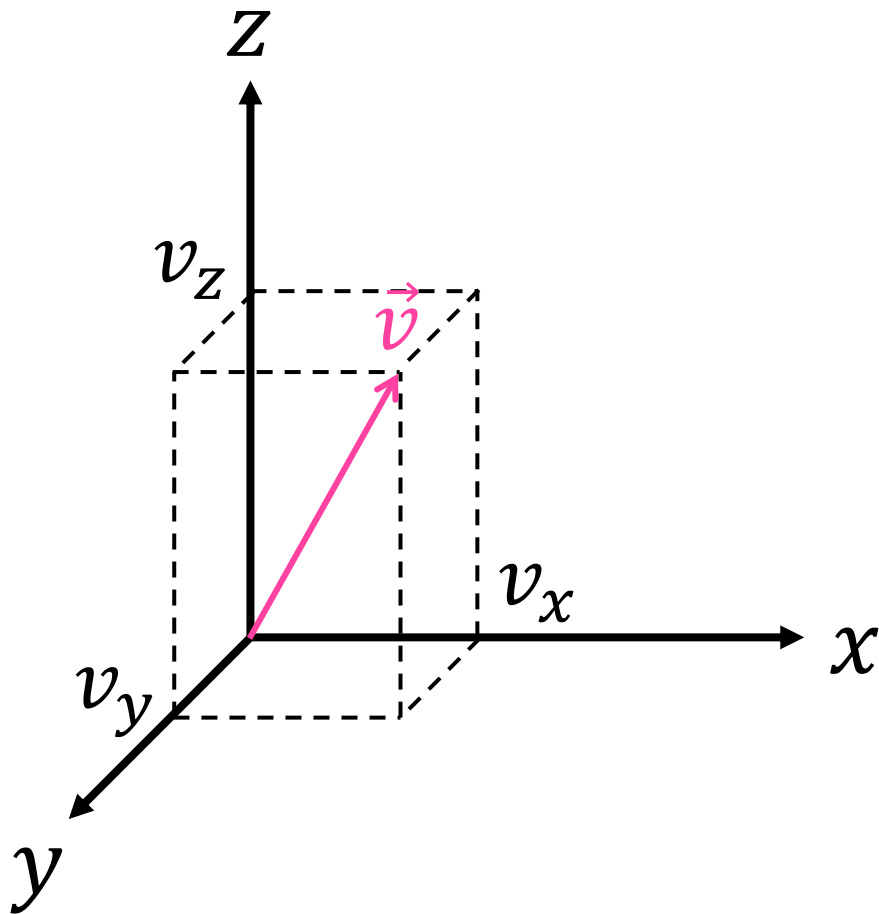
$$v_x = v_y = v_z \cdots (2.20)$$

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

- ◆ (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.



## 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.

$$P = N_0 \frac{mv^2}{3V} \Leftrightarrow PV = \frac{1}{3} N_0 mv^2 \cdots (2. 24)$$

■ 分子の運動エネルギーは  $\frac{1}{2}mv^2$ ,

■  $N_0$  [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.

$$PV = \frac{2}{3} n N_A \frac{1}{2} mv^2 \cdots (2. 25)$$

# 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.

$$nRT = \frac{2}{3} n N_A \frac{1}{2} m v^2 \quad \cdots (2.26)$$

- 分子の運動エネルギーについて整理すると、次である.

$$\frac{1}{2} m v^2 = \frac{3}{2} \frac{R}{N_A} T \quad \cdots (2.27)$$

- 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.

# 単原子分子理想気体

- 単原子分子理想気体の場合，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．

## 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.

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

# 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．

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

- 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．



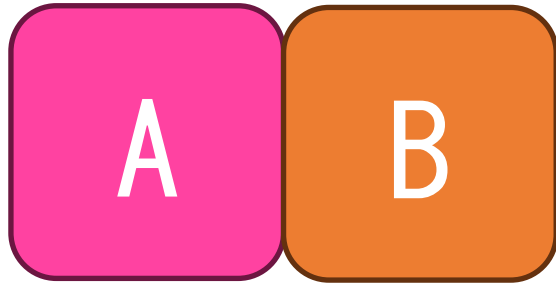
06

## 熱力学の4法則

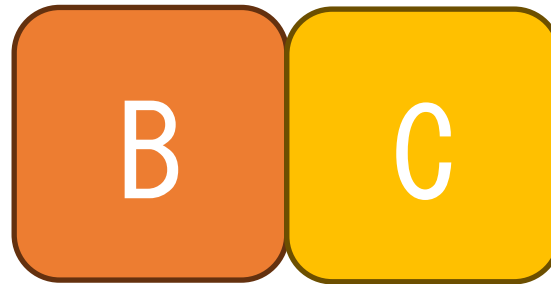
- 熱力学第0法則：熱平衡
- 熱力学第1法則：熱量保存則
- 熱力学第2法則：トムソンの原理 他
- 熱力学第3法則：ネルンストの熱定理

## 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「**不確かさ**」の**範囲**で検証される。
- そのため、**証明はされない**。



熱平衡



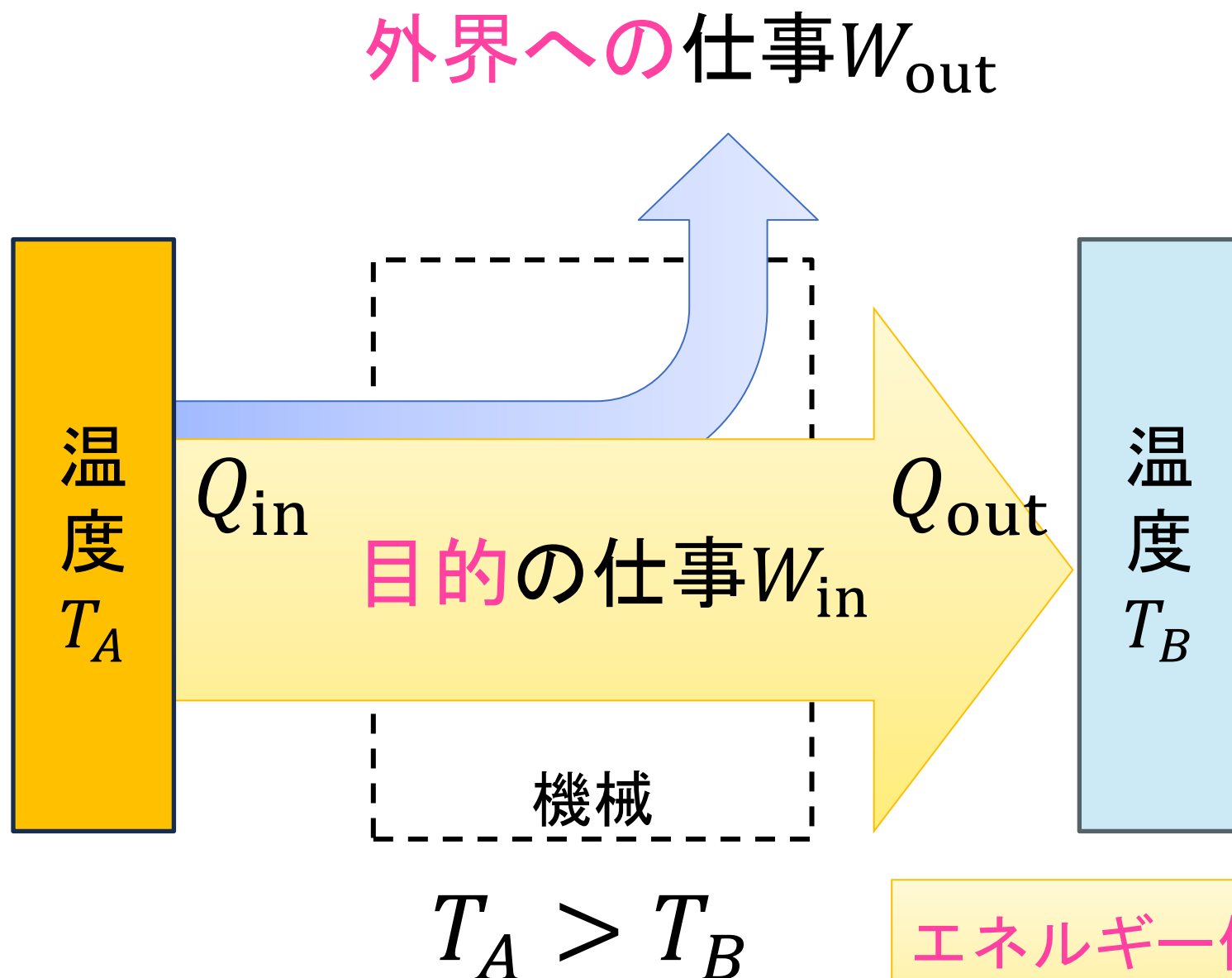
熱平衡



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.

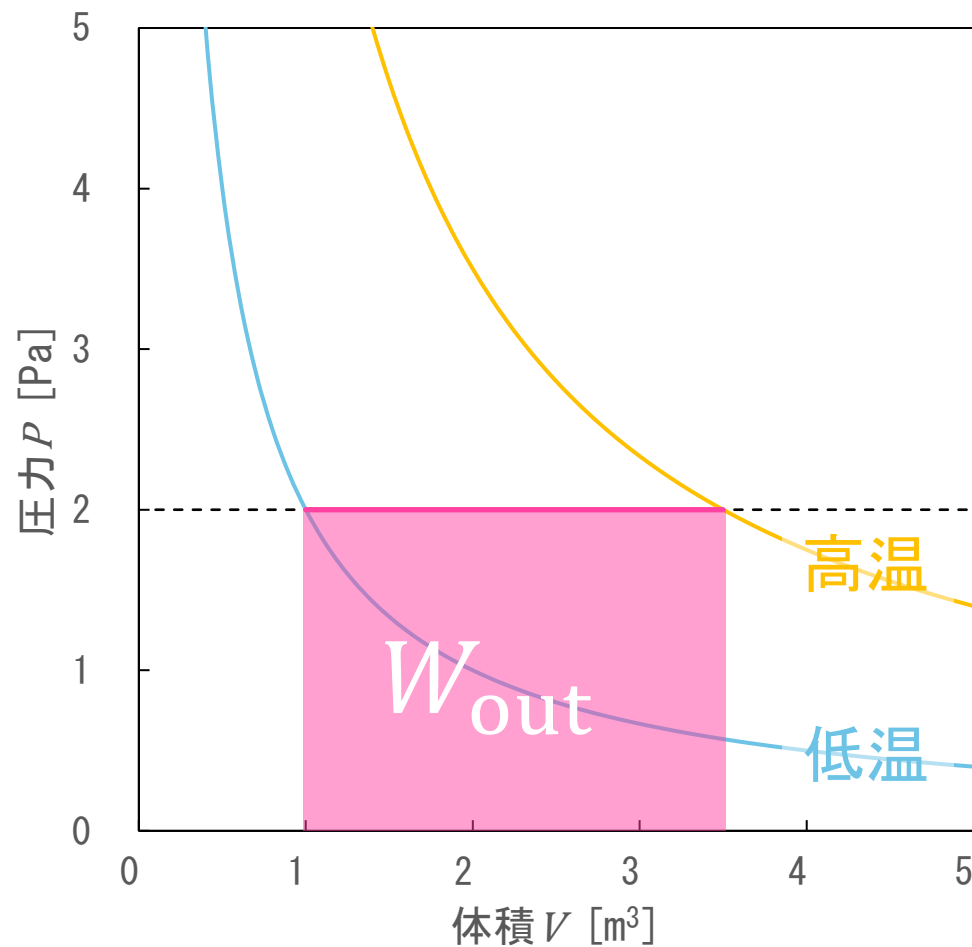
## 熱量保存則



エネルギー保存則

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

# 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

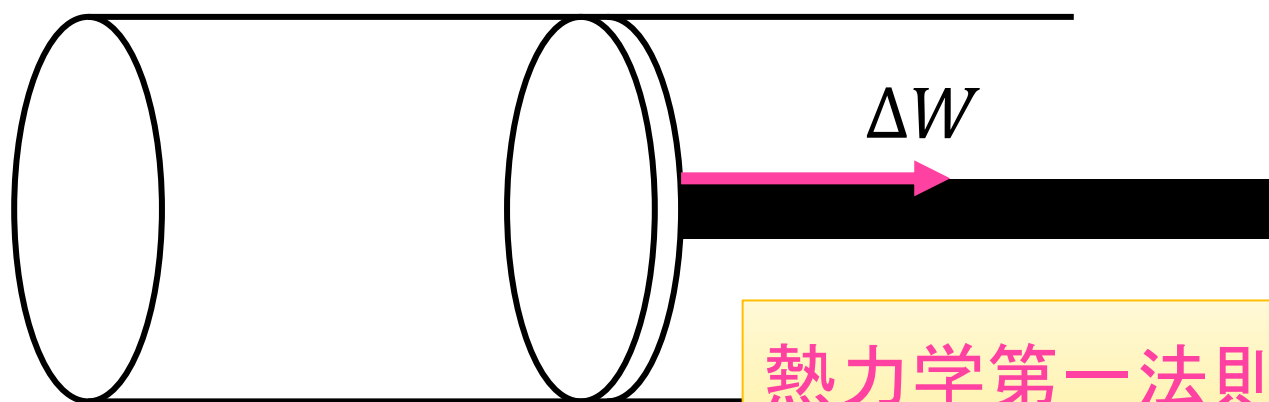
気体が外部にする仕事

$W_{out}$  [J]

◆  $W_{out} = (P - V \text{線図の面積})$

... (2.34)

# シリンダー内の気体に熱を加える

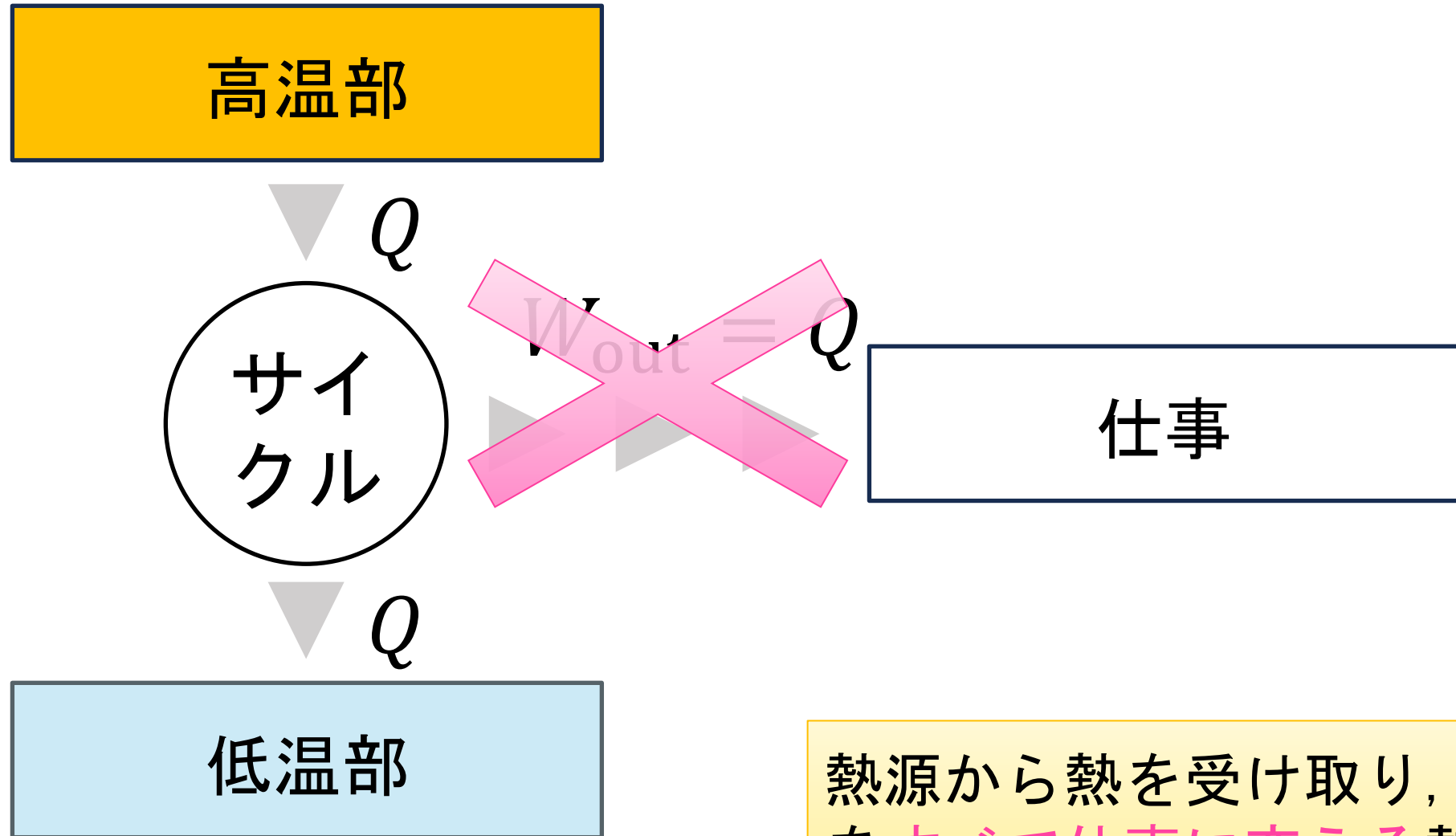


熱力学第一法則

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

- ◆ 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

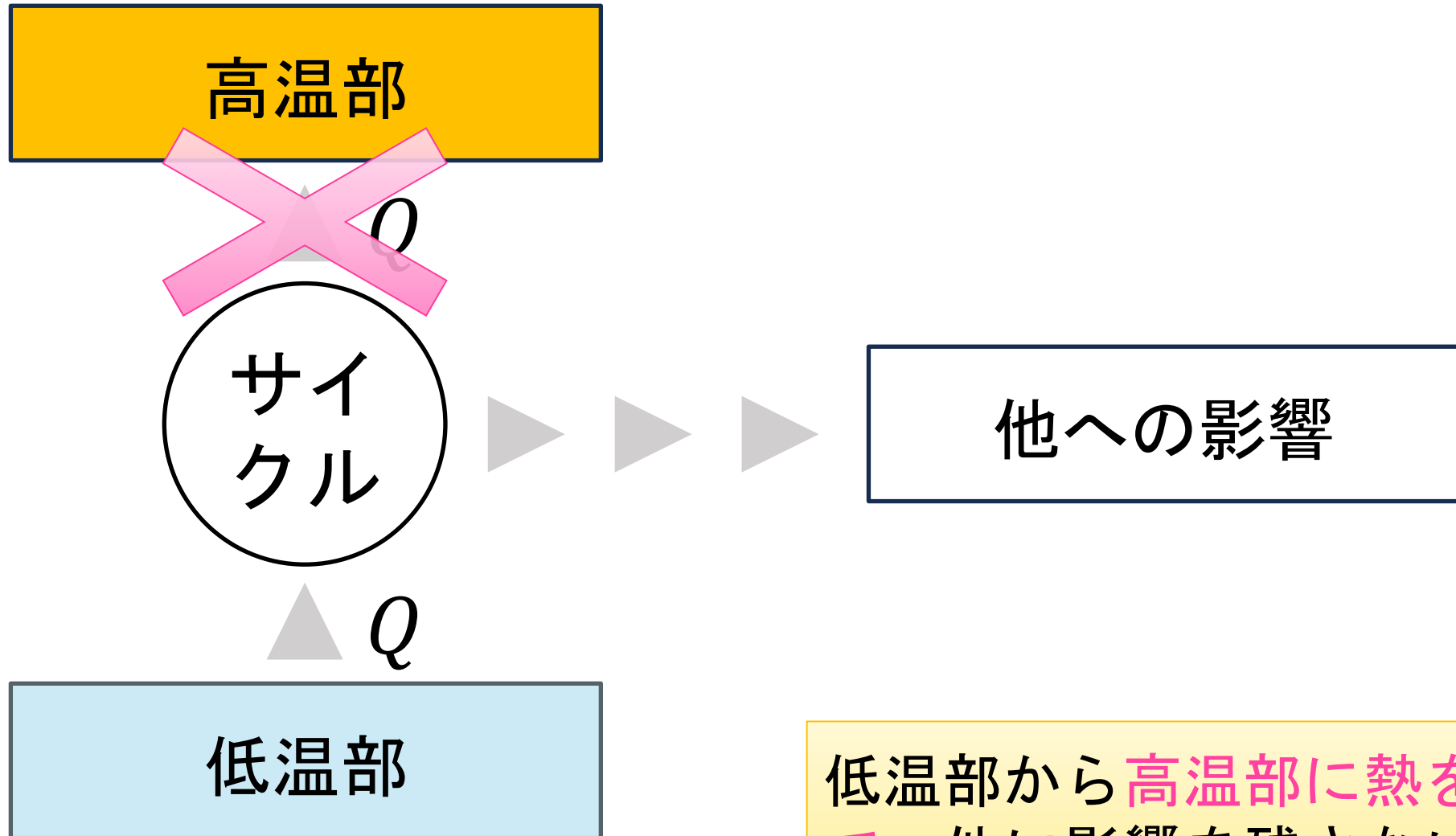


熱源から熱を受け取り，それをすべて仕事に変える熱サイクルは存在しない。

# クラウドジウスの原理

板書

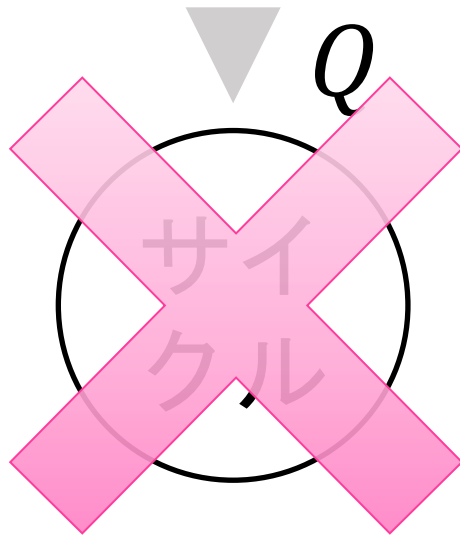
64



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。

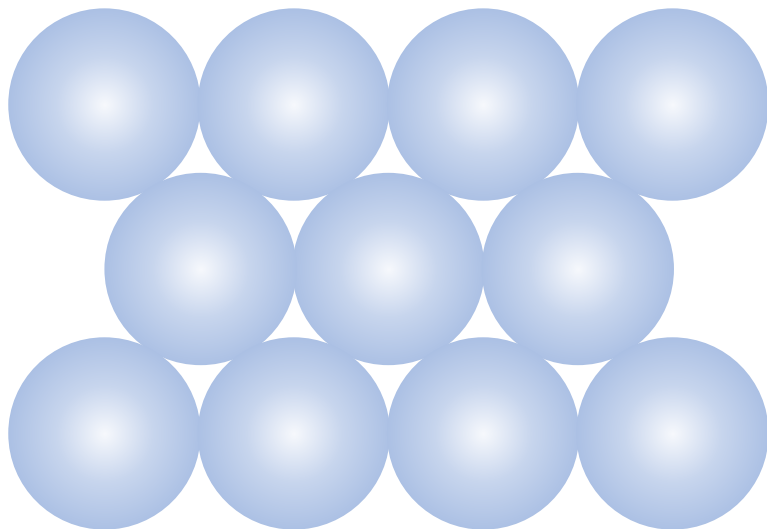


高温部



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。

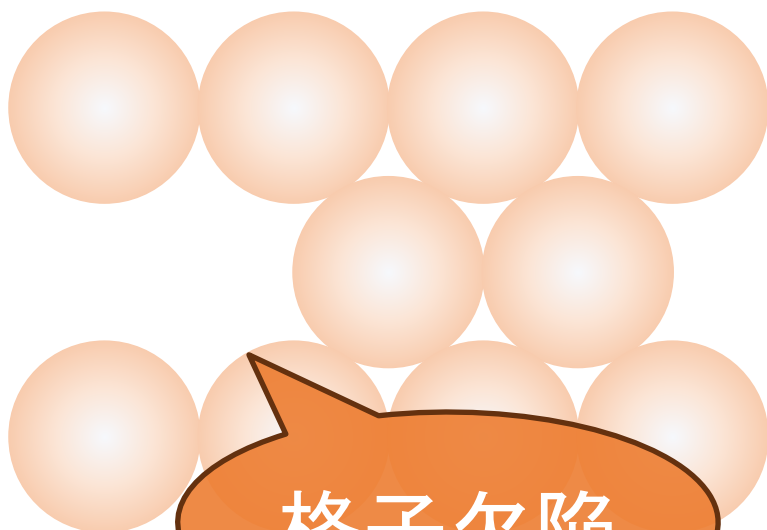
# ネルンストの熱定理



$$T = 0$$

完全結晶

分子が規則正しく配列した結晶



格子欠陥

$$T \neq 0$$

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

## $P - V$ 線図と状態変化

- 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  $J$

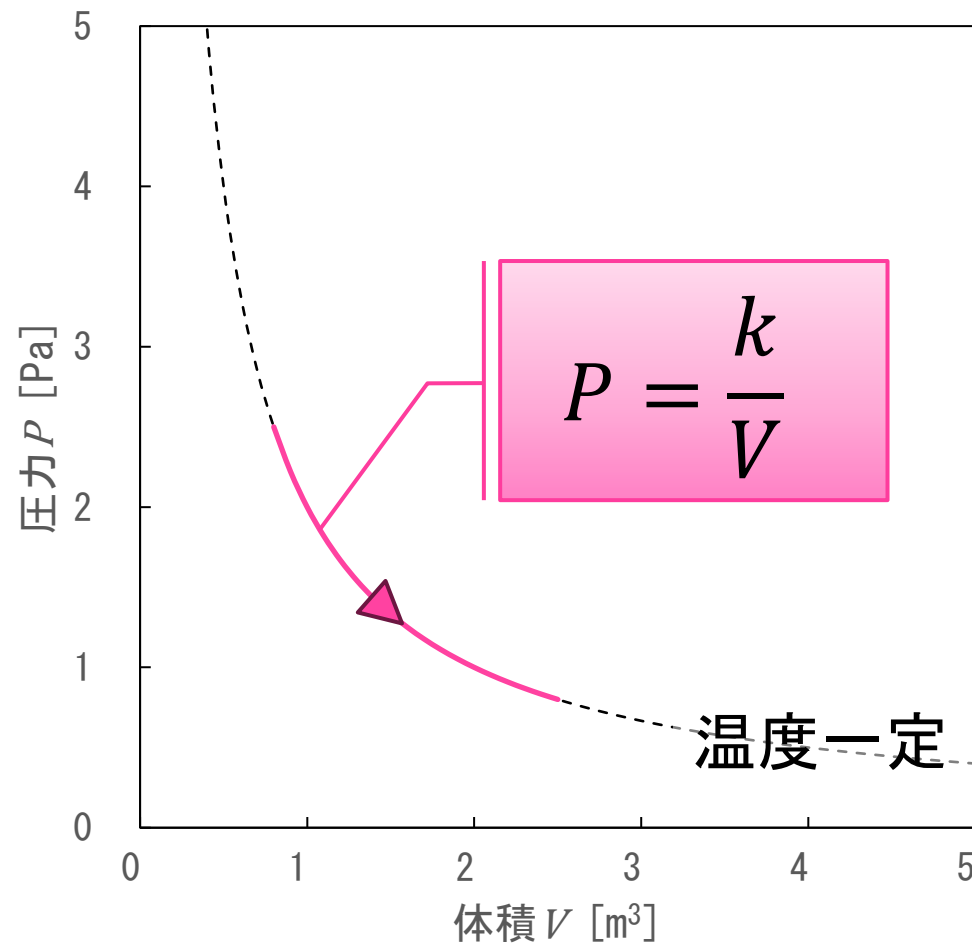
## 熱学

- 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  $e$

# 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.

# 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.

$$\Delta Q = nc_V \Delta T \cdots (2.39)$$

- そのため, 定積モル比熱  $c_V$  [J/(g · K)] は次である.

$$c_V = \frac{\Delta Q}{n\Delta T} \cdots (2.40)$$



# 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.

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

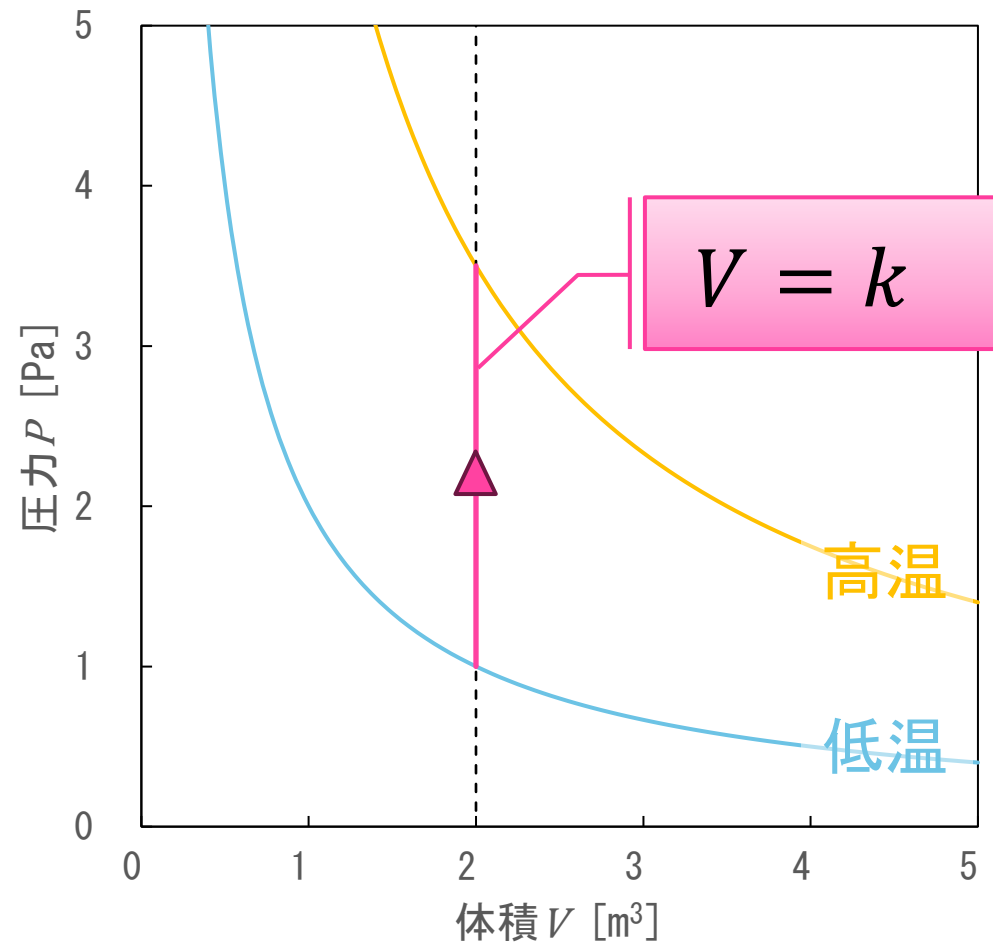
■ (2.41) 式を (2.40) 式に代入すると, 次である.

$$\Delta U = nc_V \Delta T \cdots (2.42)$$

■ (2.29) と (2.42) 式は恒等式なので, 単原子分子の定積モル比熱は次である.

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

## 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．

# 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)], 物質質量  $n$  [mol], 熱量  $Q$  [J] とすると, 次である.

$$\Delta Q = nc_p \Delta T \cdots (2.48)$$

■ 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.

$$nc_p \Delta T = nc_v \Delta T + nRT \cdots (2.51)$$

## 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.

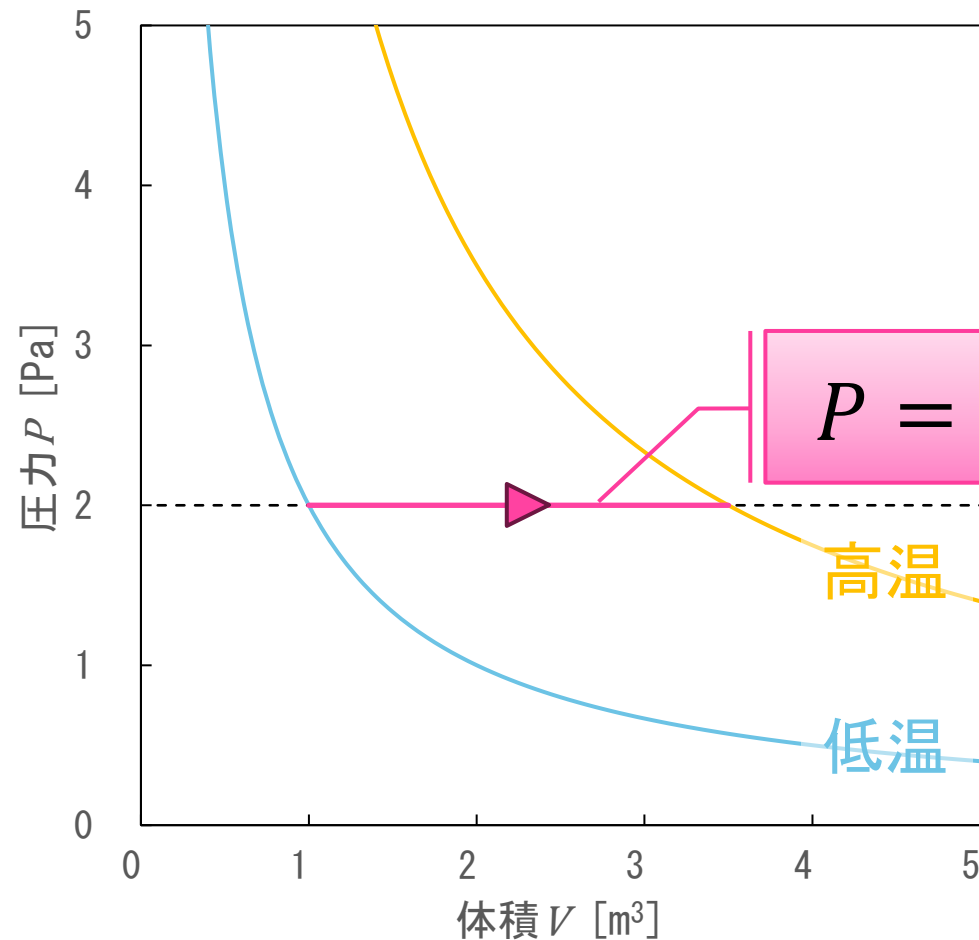
■ (2.52) 式に (2.43) 式を代入すると, 次である.

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

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

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

# 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.

$$0 = nc_V\Delta T + PV \cdots (2.57)$$

- (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.

$$0 = \frac{1}{T}\Delta T + \frac{R}{c_V}\frac{1}{V}\Delta V \cdots (2.58)$$

- (2.58) 式を辺々積分すると, 次である.

---

$$\text{Const.} = \log TV^{\frac{R}{c_V}} \cdots (2.59)$$

## 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.

$$TV^{\gamma-1} = \text{Const.} \cdots (2.61)$$

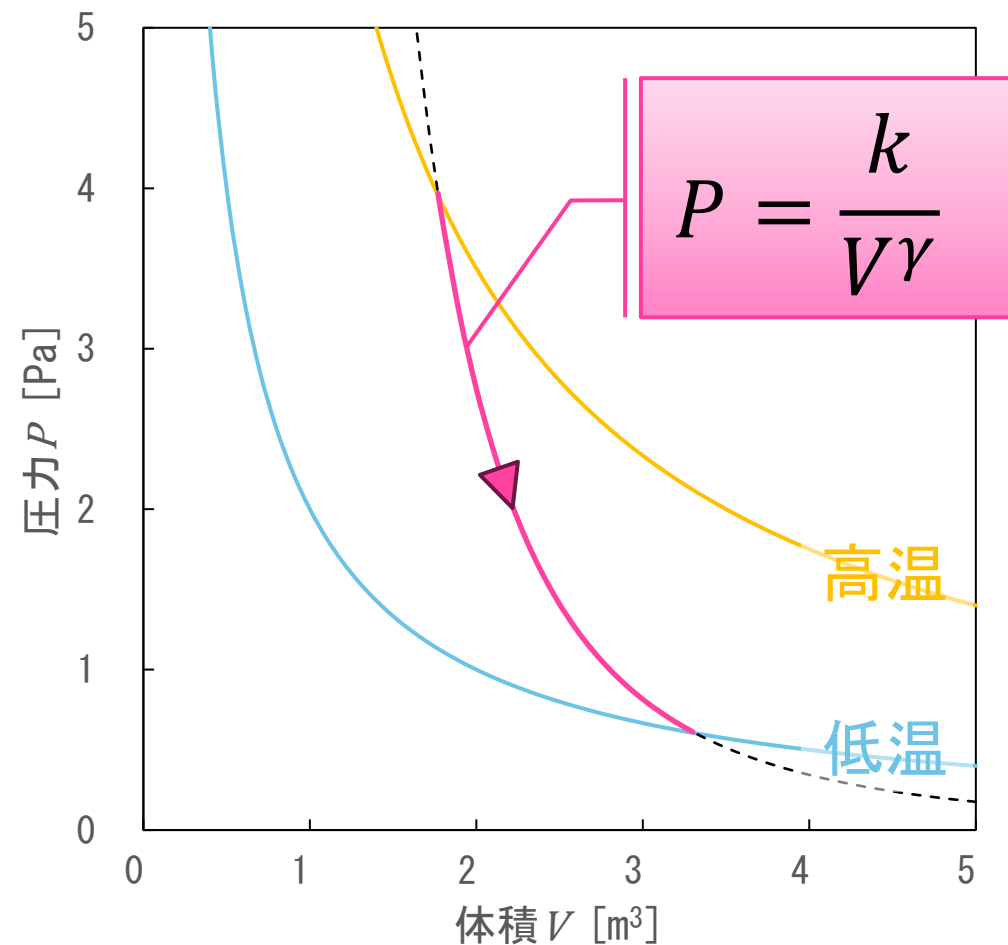
- (2.61) 式に状態方程式  $T = \frac{PV}{nR}$  を代入すると、次である.

$$PV^{\gamma} = \text{Const.} \cdots (2.62)$$

- (2.62) 式を**ポアソンの法則**と呼ぶ.



## 断熱変化



- ◆ 断熱変化なので,  

$$Q = 0 \quad \cdots (2.63)$$

である.
- ◆ ポアソンの法則より,  

$$PV^\gamma = \text{Const.} \quad \cdots (2.62)$$

である.
- ◆ 熱力学第一法則より,  

$$0 = \Delta U + W_{\text{out}} \quad \cdots (2.64)$$

である.

08

# カルノーサイクル

---

- 熱機関
- 熱効率
- グラフの組み合わせ

# 板書

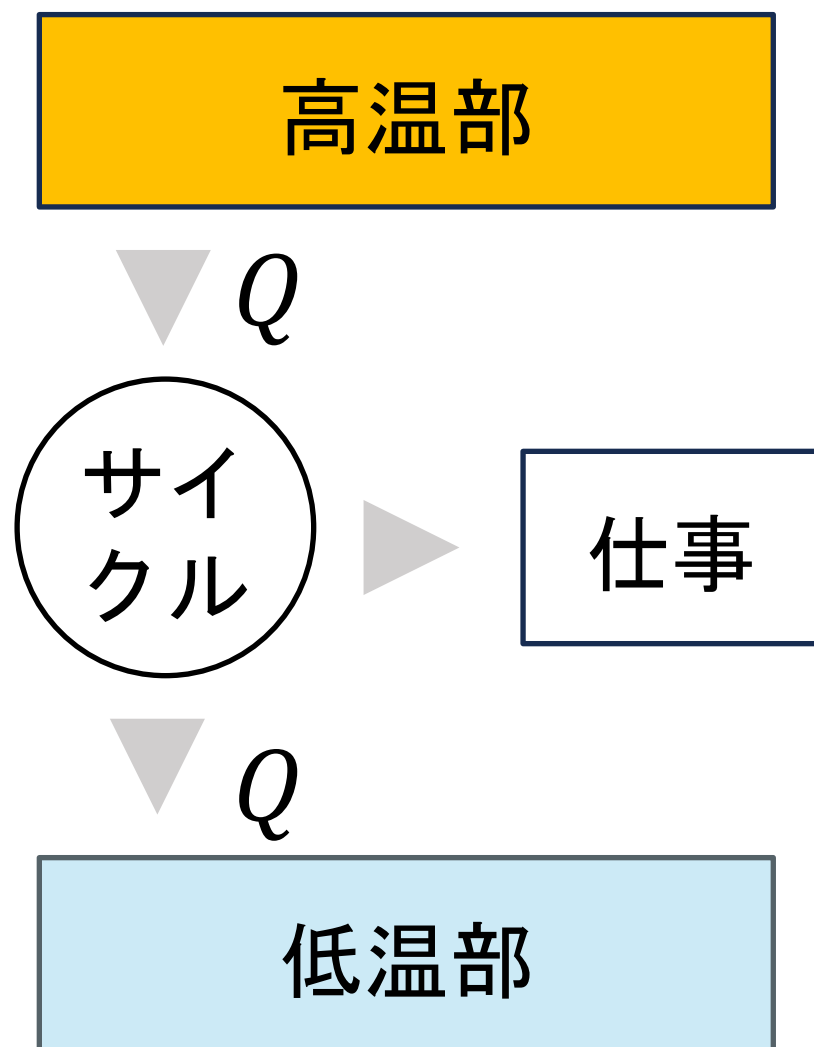
ニコラ・レオナル・サディ・カルノー  
(A. D. 1796–1832年)



2つの熱源で動作する  
系についての最大熱  
効率 $\eta$ 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)

# 熱機関



- ◆ 熱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.
- ◆ そのあと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.

日本の電気の約80%を  
火力発電で供給している！

## 余談

タービン

仕事する

断熱膨張

発電機

復水器

等圧変化

熱を捨てる

断熱圧縮

給水ポンプ

ボイラー

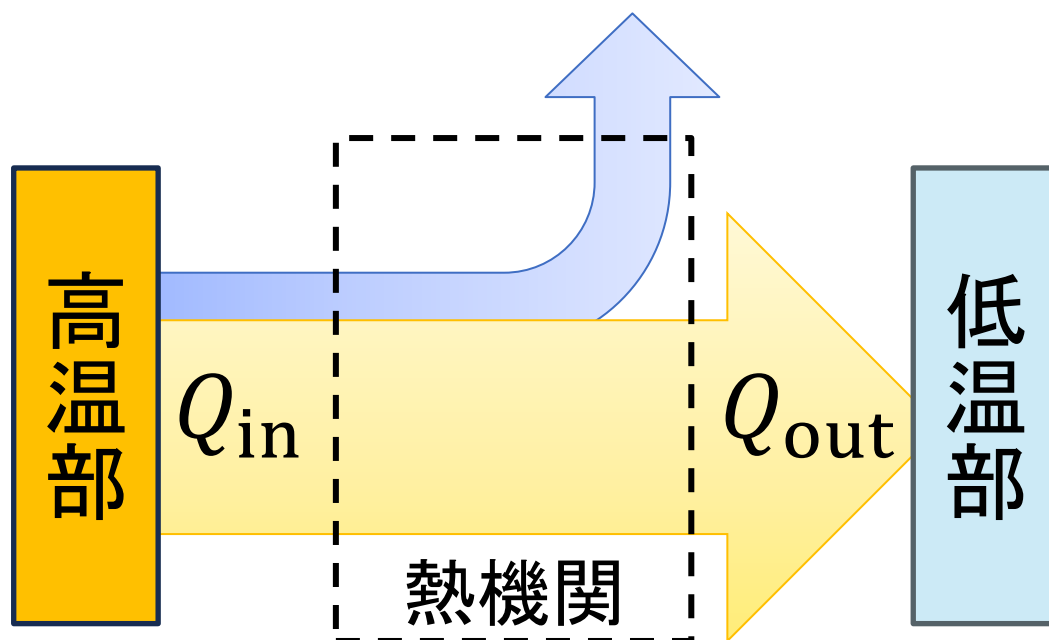
等圧変化

熱を受け取る

## 発電用タービン

# 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.

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

## 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.

$$e = \frac{W_{\text{out}}}{Q_{\text{in}}} = \frac{Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}}}{Q_{\text{in}}} \cdots (2.68)$$