

# 入門化学06

## 物質の状態

### 状態変化・融点・沸点

チゴユリ



オニグルミの雌花





# 第2章 物質の状態

## 1節 気体・液体・固体

### 1. 状態変化

2023.5.30 の竜巻

# 物理変化と化学変化

- 物理変化とは

物質が別の物質に変わらず、状態だけが変わる。

例：液体の水→氷、液体の水→水蒸気

- 化学変化とは

物質が、性質の異なる別の物質に変わる。

例： $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$ （電気分解）

# 粒子の拡散と熱運動 p. 94

- 粒子が自然に散らばって広がる現象を**拡散**という。
- 拡散は気体どうし、液体どうしを混合するときや、固体や液体、気体を液体に溶かすときにも起こる。



図1 臭素の拡散

# 熱運動 p.94 下

拡散は、物質を構成する粒子がつねに運動しているために起こる。

粒子の運動は高温ほど激しい。

このような粒子の運動を**熱運動**という。

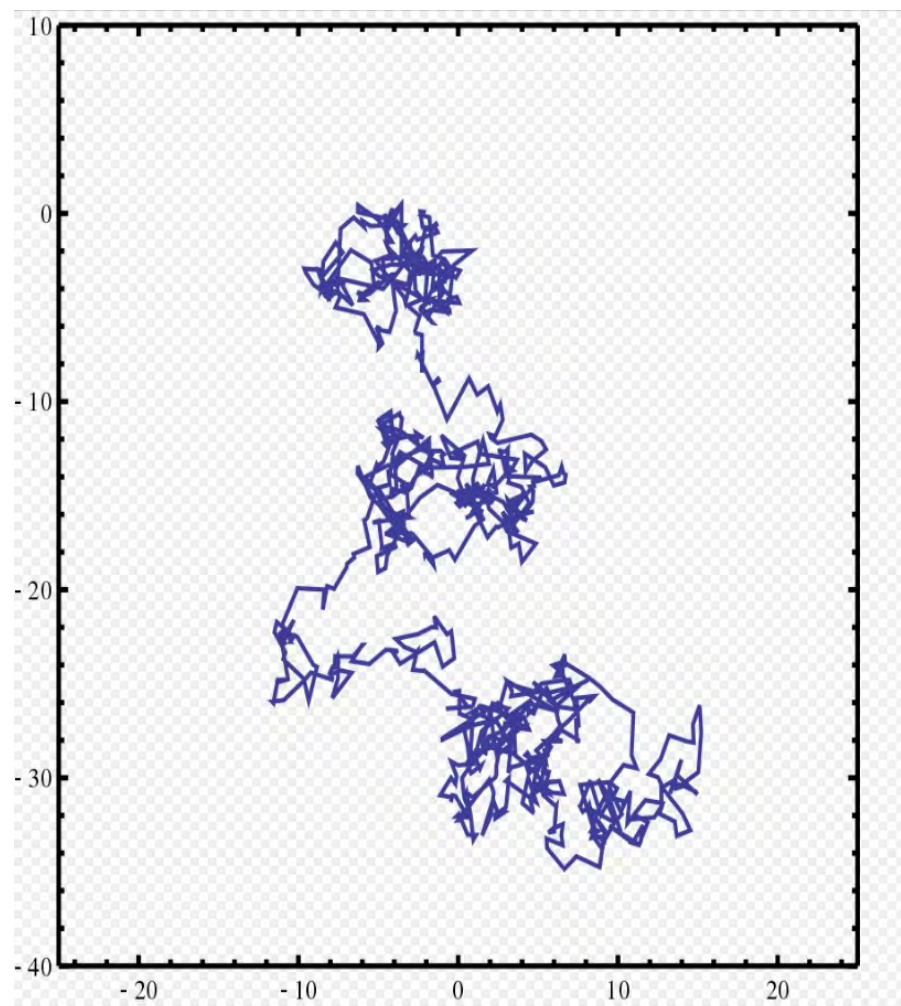
関連 **ブラウン運動** (ロバート・ブラウン 1827)

→ 溶媒中に浮遊する微粒子が  
不規則に運動する現象。

→ 溶媒中の分子の熱運動の可視化。 P.132



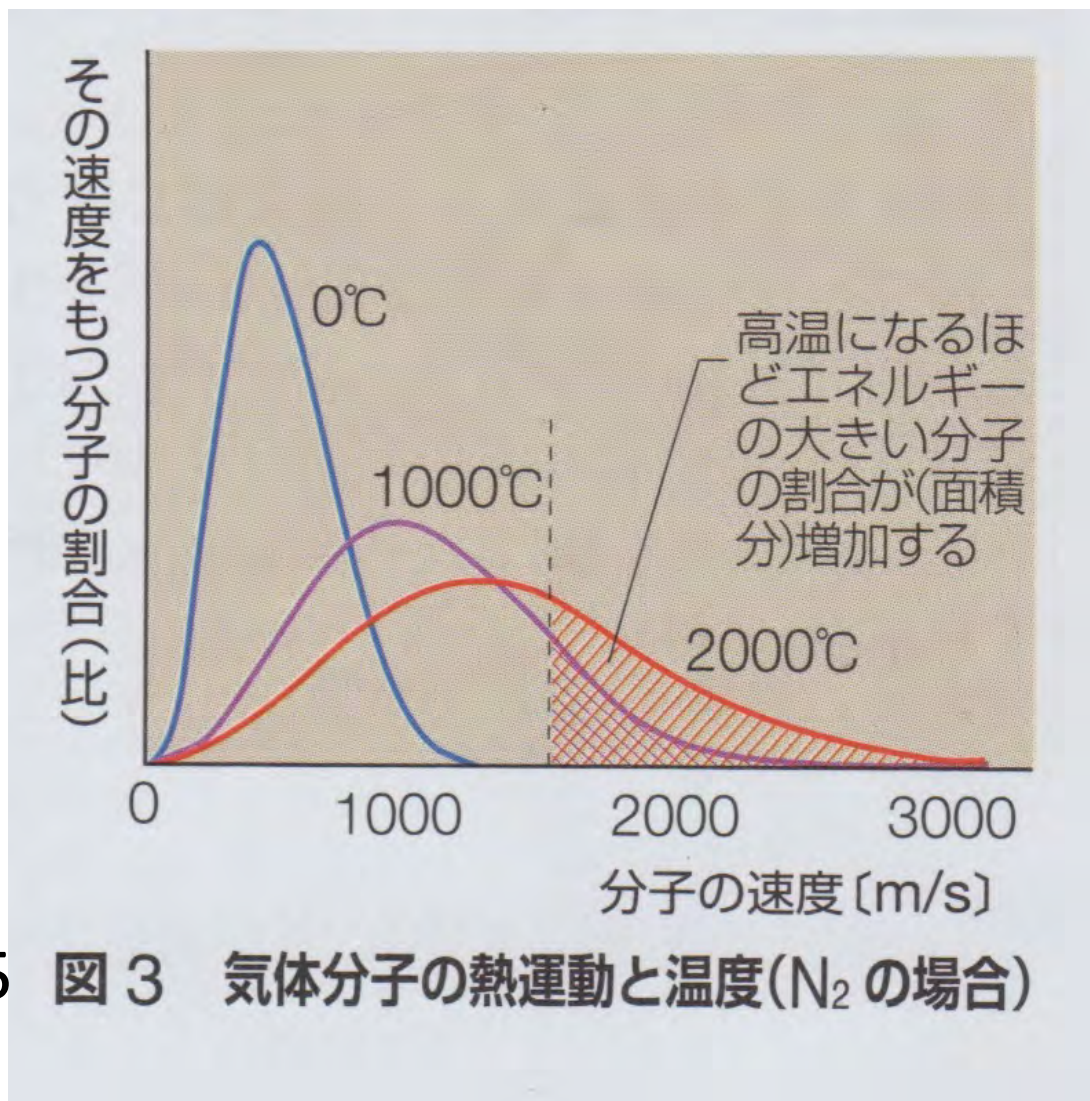
# ブラウン運動の軌跡 (シミュレーション)



# 気体分子の熱運動 p.95

- あるエネルギーやある速さをもつ分子の割合は、温度によって決まっている。
- 温度が高いほど、大きいエネルギーをもつ分子の割合が増加し、これにつれて、熱運動する分子の速さも大きくなる。

# 気体分子の熱運動と温度





# アンモニアと塩化水素の熱運動



HCl の分子量 36.45     $\text{NH}_3$  の分子量 17.0

# 熱運動と分子の質量

- 質量  $m$  [kg] の物体が速さ  $v$  [m/s] で運動している時、運動エネルギー  $E$  [J] は、

$$E \text{ [J]} = \frac{1}{2} m v^2$$

- 同じ温度では、分子の運動エネルギーの平均は気体の種類によらず同じである。したがって、分子量 ( $m$ ) が小さい分子ほど、運動する速さ ( $v$ ) は大きくなる。

表 1 気体分子の平均速度 (0°C, 0 Pa)

分子式	分子量 (g/mol)	平均速度 (m/s)	エネルギーE (Joule)
H <sub>2</sub>	2.0	$1.84 \times 10^3$	$3.39 \times 10^3$
NH <sub>3</sub>	17	$6.3 \times 10^2$	$3.37 \times 10^3$
O <sub>2</sub>	32	$4.6 \times 10^2$	$3.39 \times 10^3$
HCl	36.5	$4.3 \times 10^2$	$3.37 \times 10^3$

$E [J] = \frac{1}{2} m v^2$  の式によってエネルギーを計算してみた。

H<sub>2</sub> の場合、 $\frac{1}{2} \times (2.0 \times 10^{-3}) \times (1.84 \times 10^3)^2 = 3.39 \times 10^3$

参考：絶対温度とボルツマン定数から分子のエネルギーを計算すると、

分子1個の運動エネルギーの平均値  $\varepsilon$  は、絶対温度  $T$  と比例関係にある。

$$\varepsilon = \frac{3}{2} k T, \quad (k \text{ はボルツマン定数})$$

$$k = 1.380649 \times 10^{-23} \text{ (J/K)}$$

$$T = 273 \text{ (K) の時、 } \varepsilon = 565.4 \times 10^{-23} \text{ (J)}$$

1モルあたりのエネルギー ( $E$ ) は

$$\begin{aligned} E &= 6.02 \times 10^{23} \text{ (アボガドロ数)} \times \varepsilon \\ &= 3.404 \times 10^3 \text{ (J)} \end{aligned}$$

# 絶対温度

- -273 °C になると。すべての粒子が熱運動をしなくなる。この-273 °C を絶対零度という。
- 絶対零度を原点として、セルシウス温度と同じ目盛り間隔で表した温度を絶対温度という。
- 単位には、ケルビン (K) を用いる。
- 絶対温度とセルシウス温度の関係

$$T [K] = (t [^{\circ}\text{C}] + 273) K$$

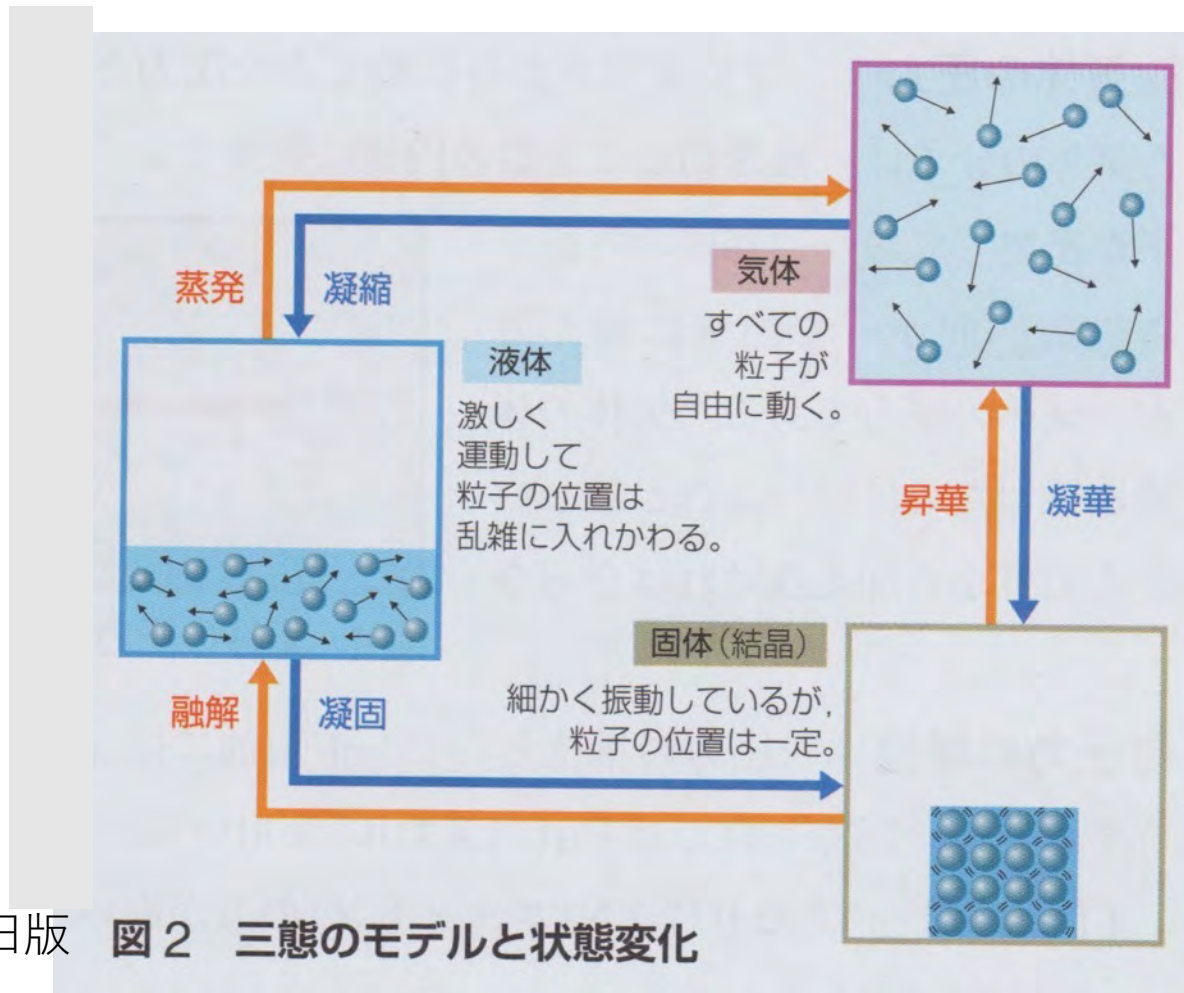


# 状態変化 三態と粒子の運動

p. 94 図1、 p. 96 図6

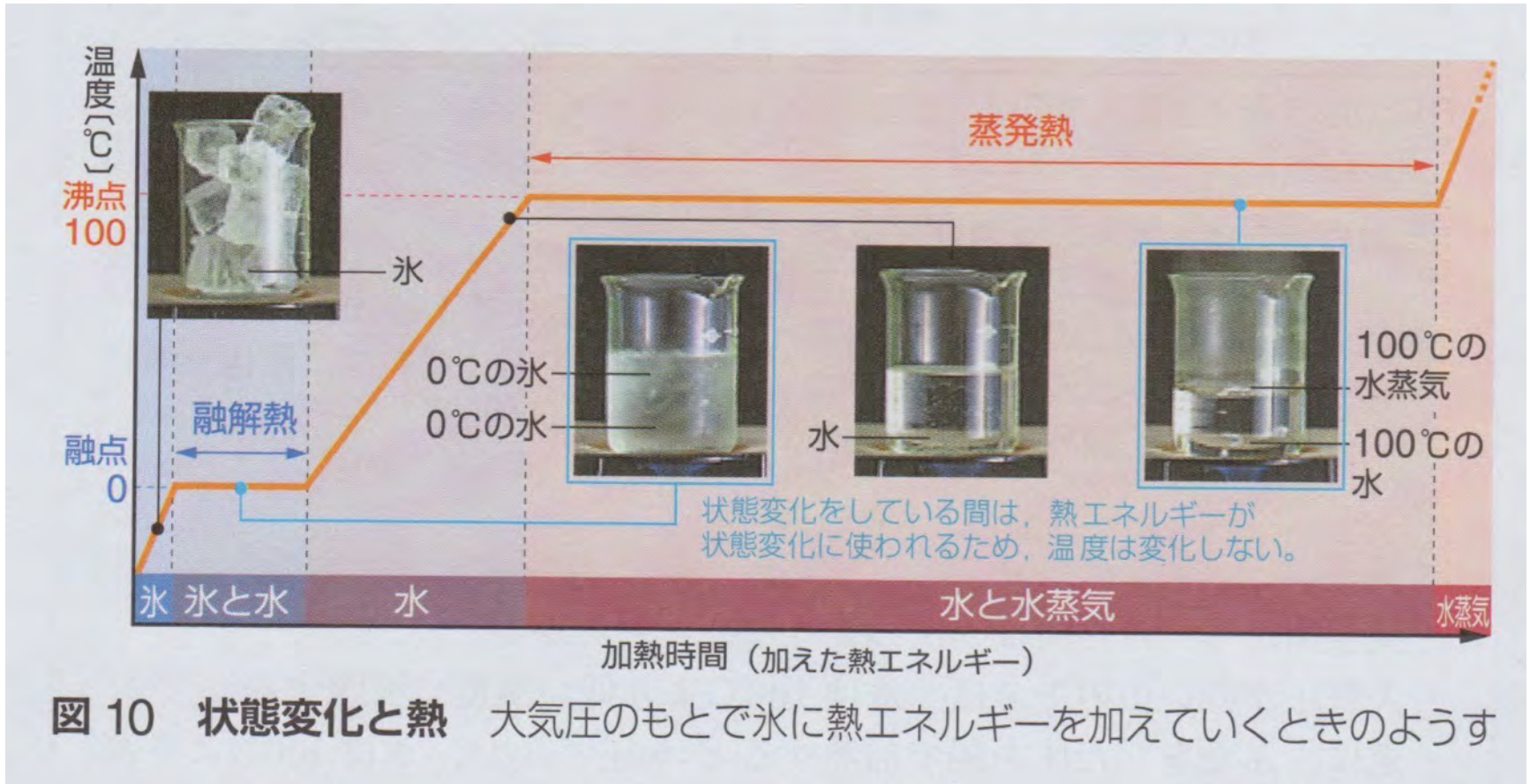
- 結晶中の粒子は、それぞれある定まった位置で運動している。→ 固体（結晶）
- 融点に達すると、粒子はもはやその定まった位置にとどまることができなくなって、結晶は融解して液体となる。
- 液体になると、粒子は互いに入れ替わって移動する。→ 液体
- 激しい運動をする一部の粒子は、液体から飛び出して気体になる。
- さらに温度が高くなると、すべての粒子が気体分子として飛びまわるようになる。→ 気体

# 三態のモデルと状態変化

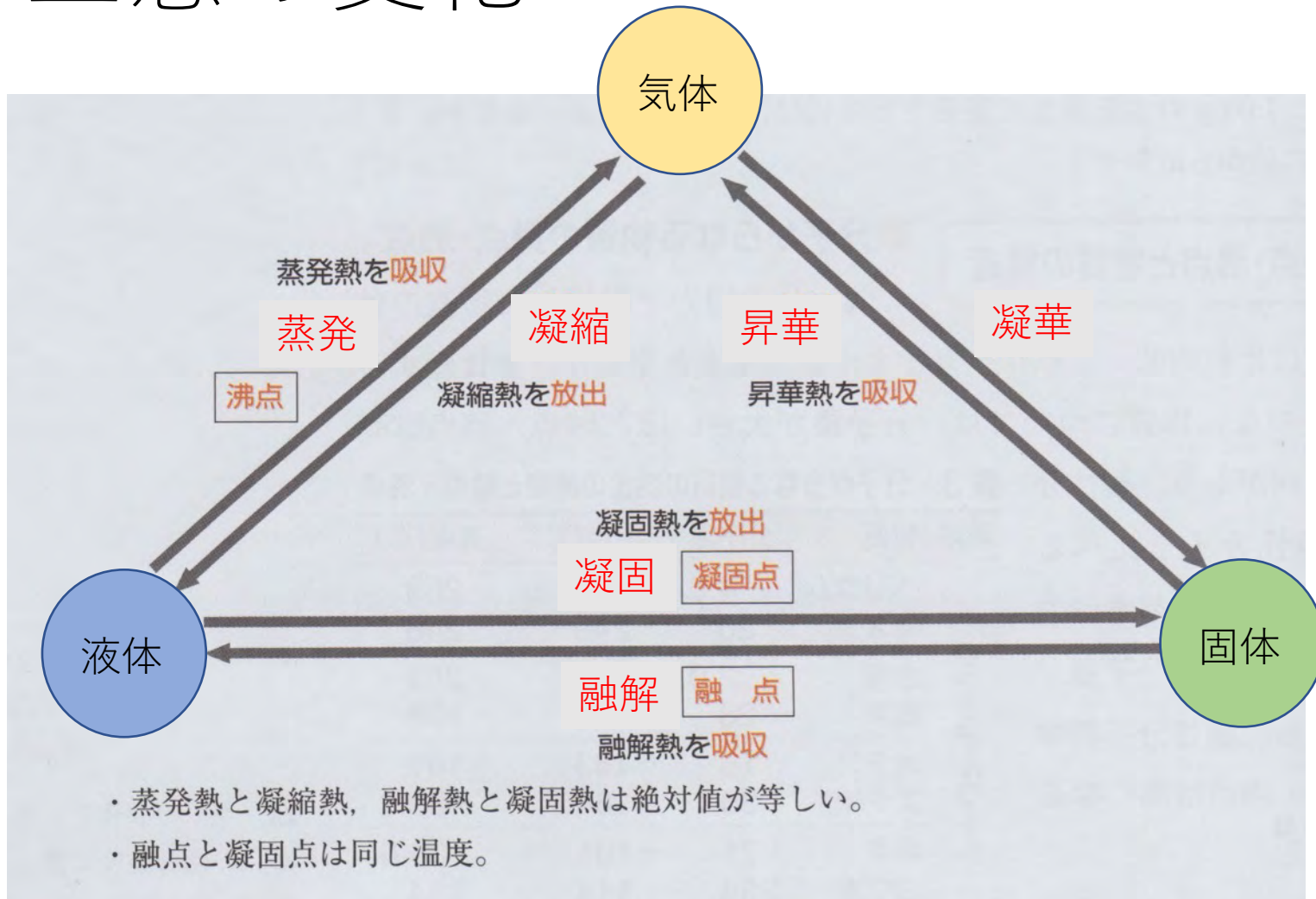


旧版 図2 三態のモデルと状態変化

# 状態変化と熱



# 三態の変化





# 物質の構造と融点・沸点

- 物質を構成する分子は常に熱運動をしている。
- 物質を加熱したときに物質が受け取るエネルギーを熱エネルギーという。
- 熱エネルギーを受け取ると熱運動がより活発になり、物質の温度が上昇したり、状態変化が起こったりする。
- 状態変化を起こしている間、熱運動は状態変化のみに使われるため、温度は一定に保たれる。



# 状態変化に伴うエネルギー

- 融点では固体と液体、沸点では液体と気体が共存している。
- この状態で物質が受け取ったエネルギーは、それぞれの状態変化のみに使われるので、熱エネルギーを加えていても温度が一定に保たれる。

# 融解熱と蒸発熱 p.97

- 融点で固体が融解して液体になるときに吸収する熱量を融解熱という。
- 沸点で液体が蒸発して気体になるときに吸収する熱量を蒸発熱という。
- 上記の逆の状態変化が起きるときには、同じ量の熱が放出される（凝固熱と凝縮熱）。

# 物質の種類と融解熱と蒸発熱

- 融解熱や蒸発熱は、物質の種類によって大きく異なる。
- これは、物質中の粒子どうしを結びつける力が違うためである。
- 一般に、粒子間に働く力が大きいほど融解熱、蒸発熱は大きくなる。
- 同じ物質では、一般に、蒸発熱は融解熱よりも大きい。
- p. 97 表 2 物質の融解熱と蒸発熱 参照

# 物質の融解熱と蒸発熱

表2 物質の融解熱と蒸発熱

物質	化学式	融点[°C]	融解熱(kJ/mol)	沸点[°C]	蒸発熱(kJ/mol)
アルゴン	Ar	-189	1.18*	-186	6.52
水	H <sub>2</sub> O	0.00	6.01	100	40.7
塩化ナトリウム	NaCl	801	28.2	1413	—
水銀	Hg	-38.9	2.30	357	58.1
鉄	Fe	1535	13.8	2570	354
タングステン	W	3410	52.3	5657	799

\*アルゴンの融解熱は  $6.9 \times 10^4$  Pa における値(他はすべて大気圧における値)である。

# 問題

1.00 g の水を沸点で蒸発させるには、何 kJ の熱が必要か。表 2 の値から計算せよ。

解き方：

表 2 から、水の蒸発熱は 40.7 kJ/mol である。

1.00 g の水は、 $1.00 / 18.0 = 0.0555$  mol だから、

$40.7 \times 0.0555 = 2.26$  kJ の熱が必要である。



# 融点・沸点と物質の構造 p.98

分子間力の強さ

極性の有無

水素結合の有無

などが、分子からなる物質の融点と沸点に大きく影響する。

旧版p. 79 表 3

分子からなる物質の結合の種類と融点と沸点

表3 分子からなる物質の結合の種類と融点・沸点

種類	物質	分子量	融点〔℃〕	沸点〔℃〕	
ファンデルワールス力	ヘリウム	4.0	-272*	-269	
	ネオン	20	-249	-246	
	水素	2.0	-259	-253	
	窒素	28	-210	-196	
	メタン	16	-183	-161	
	エタン	30	-184	-89.0	
	塩素	71	-101	-34.0	
	ヨウ素	254	114	184	
	水素結合	塩化水素	36.5	-114	-84.9
		硫化水素	34	-85.5	-60.7
水素結合	水	18	0.00	100	
	フッ化水素	20	-82.9	19.5	
	メタノール	32	-97.8	64.7	

分子量が大きいほど融点・沸点は高くなる。

極性が高い

水素結合により構造が似た化合物より融点・沸点が高くなる。

\*  $2.6 \times 10^6 \text{ Pa}$  における値

# 融点・沸点に対する分子量の影響

極性のない物質については、分子量が大きいほど融点・沸点は高くなる。

ヘリウムとネオン、水素と窒素、メタンとエタン、塩素とヨウ素を比較。

極性分子と無極性分子を比べると、極性分子間に静電的引力が働くため、分子量が小さくても、極性分子の物質の融点・沸点は高くなる。

塩化水素と硫化水素を比べると、硫化水素の方が極性が高いため、分子量は似ていても融点・沸点は高くなる。

# 水素結合が融点・沸点に及ぼす影響

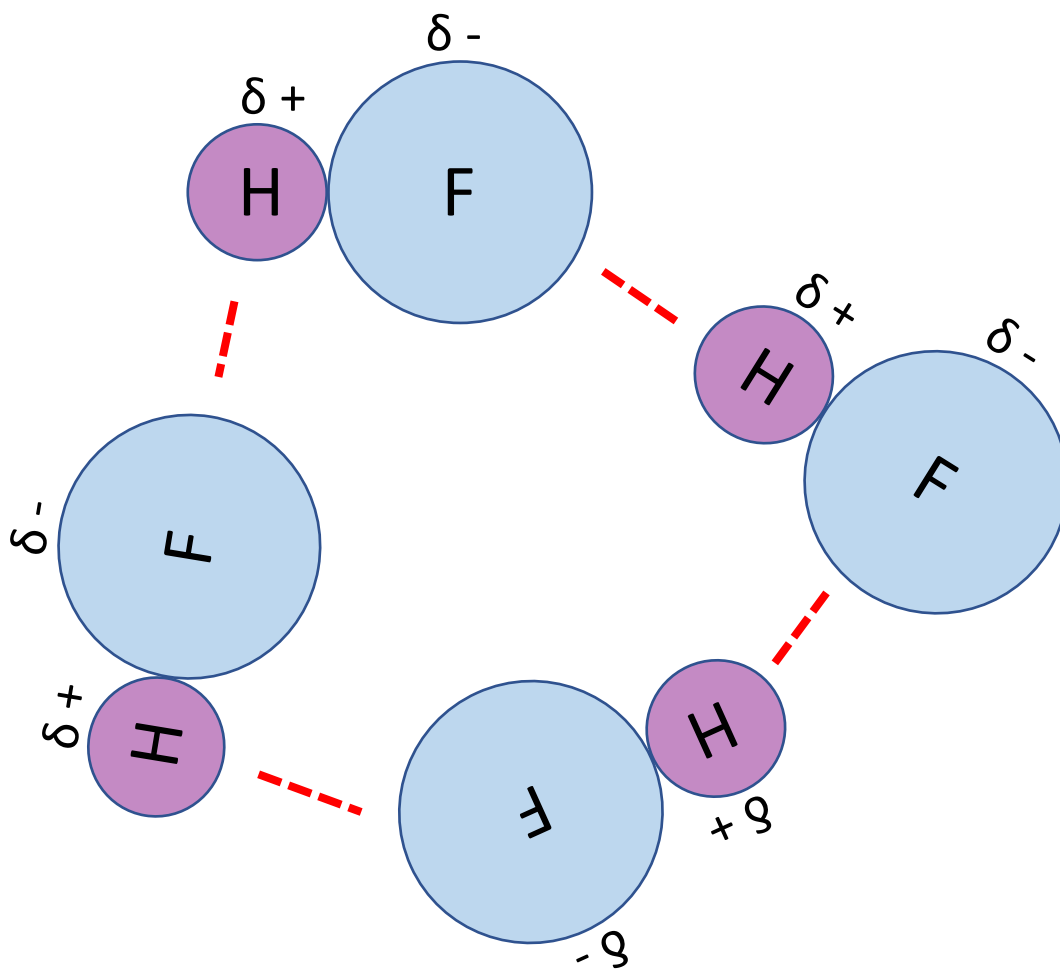
水、アルコールのように、分子間に水素結合を生じる物質では、分子量が小さくても融点・沸点が高いものが多い。

水素結合を生じる物質の例：

水、フッ化水素、メタノール

フッ素 (F) は、各種の元素の中で電気陰性度(4.0)が最も高い（裏表紙見返しの表を参照）。塩素の電気陰性度(3.2)よりもはるかに高い。したがって、HF分子内では、電子はF原子の上に偏っており、極性が高くなる。

# フッ化水素分子間の水素結合



# 化学結合と融点・沸点 p.98

共有結合、イオン結合、金属結合などの、  
粒子間が強い結合力で結ばれている物質は、  
非常に高い融点・沸点を示す。

p. 98 図 7 結合の種類と融点・沸点 参照  
例：

共有結合： ダイヤモンド、水晶、ケイ素

イオン結合： 酸化マグネシウム、

塩化ナトリウム、水酸化ナトリウム

金属結合： ナトリウム、銅、タングステン



# 結合の種類と 融点・沸点

旧版

## 表 4 結合の種類と融点・沸点

種類	物質	融点〔℃〕	沸点〔℃〕
共有結合	ダイヤモンド	約4700*	—
	水晶(石英)	1726	2230
	ケイ素	1410	2355
イオン結合	酸化マグネシウム	2826	3600
	塩化ナトリウム	801	1413
	水酸化ナトリウム	318	1390
金属結合	ナトリウム	97.8	883
	銅	1083	2567
	タングステン	3410	5657

\*  $1.2 \times 10^{10}$  Pa での値

# 気体の圧力: 気体の熱運動

p.99

温度が高くなるほど、大きいエネルギーをもつ分子の割合が増加し、これにつれて、熱運動する分子の速度も大きくなる。

# 気体の圧力: 気体の圧力

単位面積あたりに働く力を圧力という。

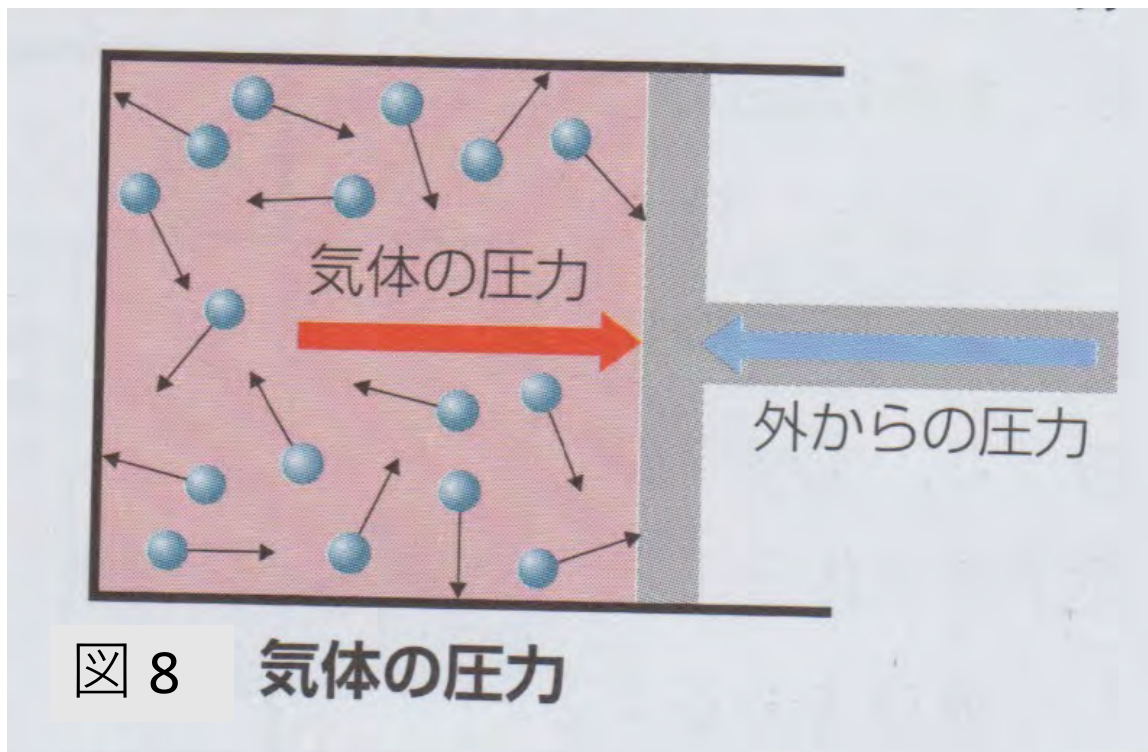
容器に入れた気体の分子は、熱運動して容器の内壁に衝突する。

内壁には多数の分子が衝突しており、容器の内側から外側に向かって内壁に働く力が、気体の圧力である。

気体の体積を保つためには、これと等しい圧力を外から加えなければならない。

p.99 図8 気体の圧力 参照

# 気体の圧力



# 圧力の単位

圧力の単位として、慣用的には atm (気圧) が用いられてきたが、

国際単位では Pa (パスカル) が用いられる。

1 Pa は、1 m<sup>2</sup> あたりに 1 N (ニュートン) の力が働いたときの圧力である。

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N} / \text{m}^2$$

1 N は、1 kg の質量をもつ物体に 1 m/s<sup>2</sup> の加速度を生じさせる力。  $1 \text{ N} = 1 \text{ kg m/s}^2$

1 気圧 = 1 atm とは p.99中

水銀柱の高さ 760 mm に相当する圧力  $p$

この値は以下のように求められる。

水銀の密度  $1.36 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$  (比重 13.6)

重力加速度  $9.81 \text{ m/s}^2$

水銀柱の高さ 0.760 m を用いて、

$$\begin{aligned} 1 \text{ atm} &= 0.760 \text{ m} \times 1.36 \times 10^4 \text{ kg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2 \\ &= 1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2 = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa} \end{aligned}$$



水銀柱の高さと気体の圧力  $p$  [Pa] の換算  
p.99中段

$$p [Pa] = 1.013 \times 10^5 Pa \times \frac{h [mm]}{760 [mm]}$$

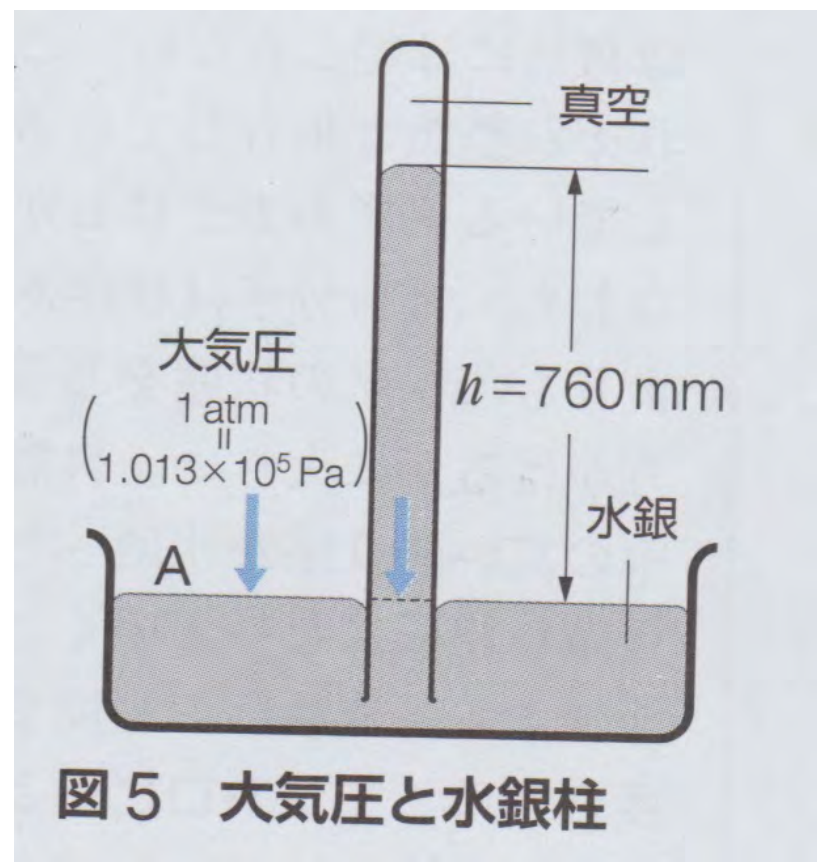


図5 大気圧と水銀柱

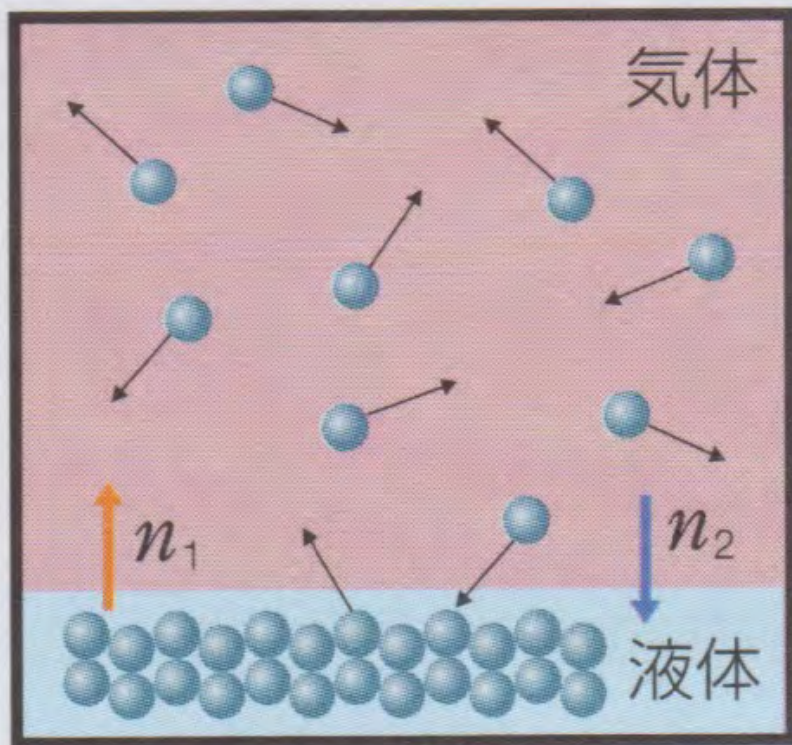
# 蒸気圧 p.99下段

気液平衡

密閉容器中で、  
単位時間に蒸発して気体になる分子数と、  
凝縮して液体になる分子数が等しくなった状態。

p.99 図9 気液平衡 参照

# 気液平衡



$n_1$ : 単位時間に  
蒸発する  
分子数

$n_2$ : 単位時間に  
凝縮する  
分子数

平衡状態のとき  
 $n_1 = n_2$

図 9 気液平衡

# 飽和蒸気圧 p.100 上段 図10

気液平衡のとき蒸気が示す圧力を、  
飽和蒸気圧または蒸気圧という。

純粋な液体の蒸気圧は、それぞれの物質について一定の温度ごとに決まっている。

温度が高くなると、蒸気圧も高くなる。

# 蒸気圧に関する説明

p. 100

図10 蒸気圧曲線

表 水とエタノールの蒸気圧

図11 気体の体積と蒸気圧

を参照してください。

液体中で熱運動している分子のなかで、大きいエネルギーを持つものは、分子間力を振り切って液面から外に飛び出しやすい。

分子間力の弱い分子も蒸発しやすいので蒸気圧が高くなる。

# 蒸気圧曲線

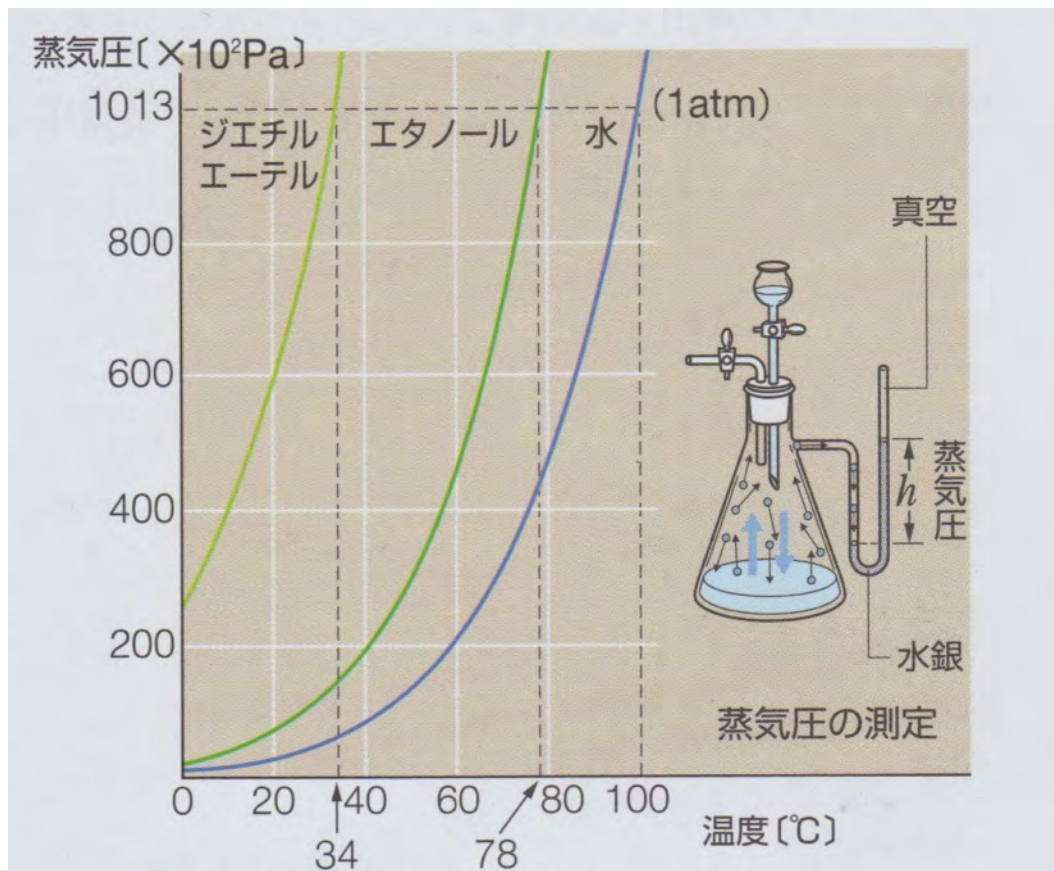


図 10 蒸気圧曲線

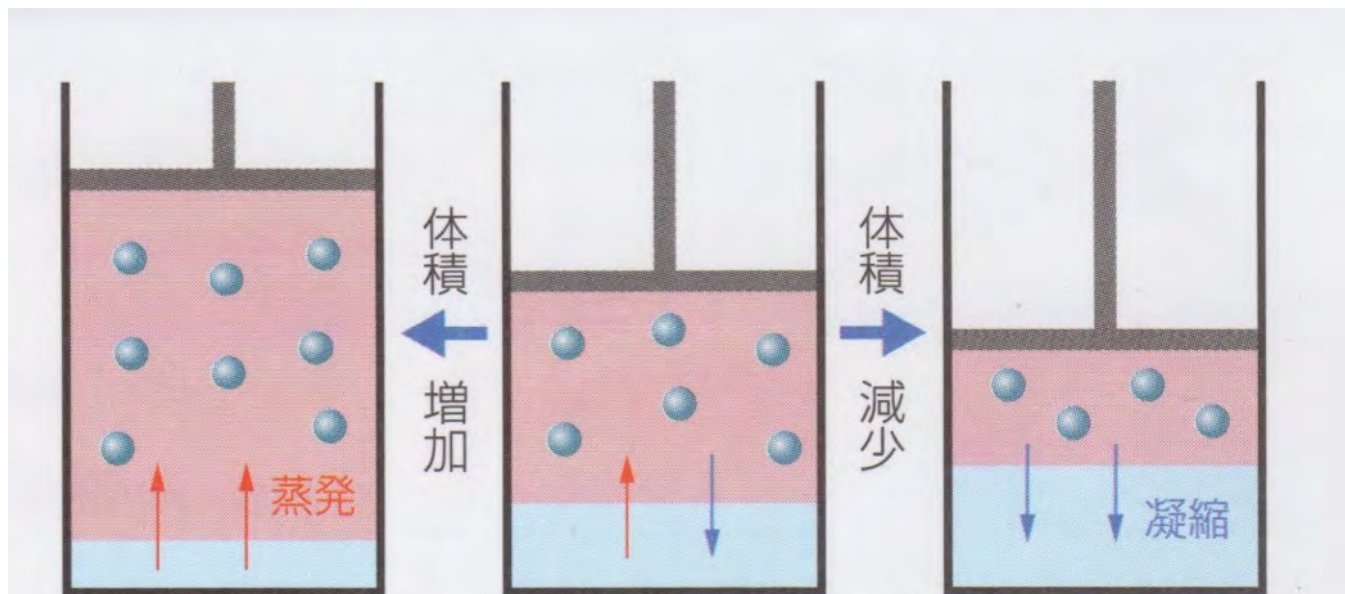
# 水とエタノールの蒸気圧

蒸気圧 ( $\times 10^2$  Pa)

温度 (°C)	水	エタノール
0	6.1	15.9
10	12.3	31.5
20	23.4	58.9
40	73.8	179
78	437	1013
100	1013	



# 気体の体積と蒸気圧



温度一定のとき，気体の体積を変化させても，液体がある限り蒸気圧の大きさは変わらない。

図 11 気体の体積と蒸気圧

# 沸騰 p. 100 下段

蒸気圧が大気圧に等しくなると、液面ばかりでなく、液体内部からも激しく蒸発が起こるようになる。

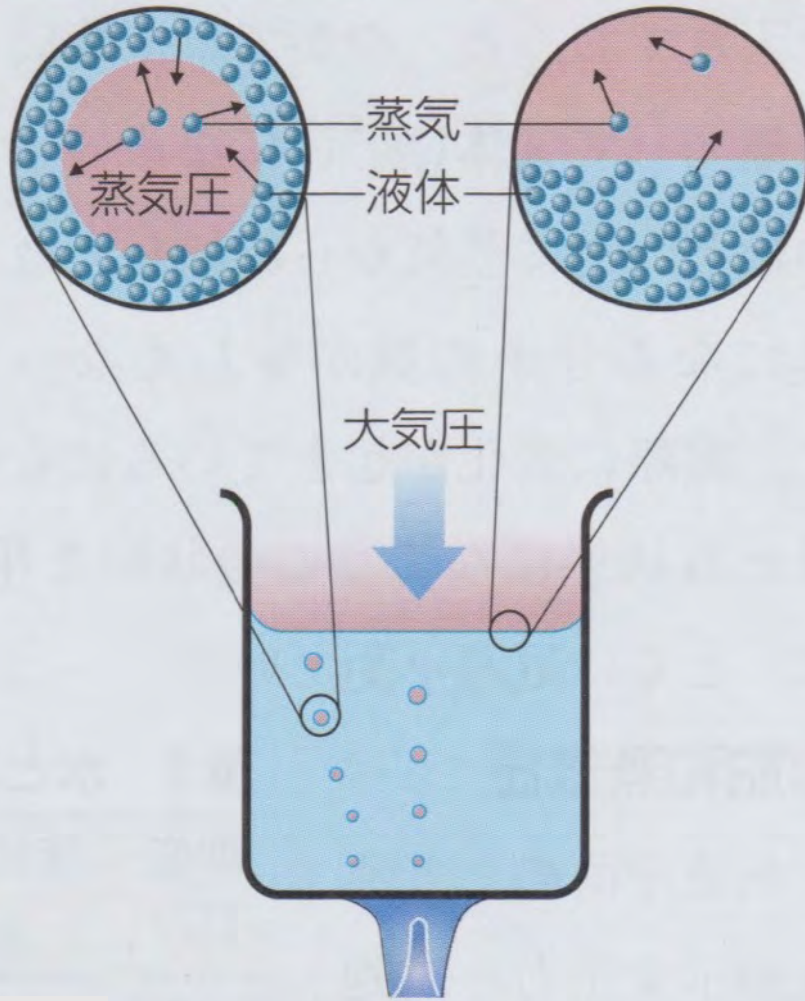
この現象が沸騰であり、そのときの温度が沸点である。

沸点は圧力に依存する。

p. 100 図12 液体の沸騰 参照

液体内部の蒸発

液面の蒸発



液体の  
沸騰

図 12 液体の沸騰

# 大気圧と沸点

- 大気圧が高くなると、蒸気圧が大気圧と等しくなるためには、温度がさらに高くなる必要が生じるため、沸点は上昇する。
- 大気圧が低くなると、蒸気圧はより低い温度で大気圧と等しくなるため、沸点は低くなる。
- 高い山で調理すると、物がよく煮えないわけ。

# 各種液体の沸点 p.100 図10から

1 atm =  $1.013 \times 10^5$  Pa (1気圧) の下で、

水 (H<sub>2</sub>O) : 100 °C

エタノール (CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OH) : 78 °C

ジエチルエーテル(CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OCH<sub>2</sub>CH<sub>3</sub>) : 34 °C

上から順に、分子間の水素結合が弱くなっている。

# 状態図 p.101

圧力と温度によって、物質がどのような状態にあるかを示した図を状態図という。

p. 101 図13 状態図を参照

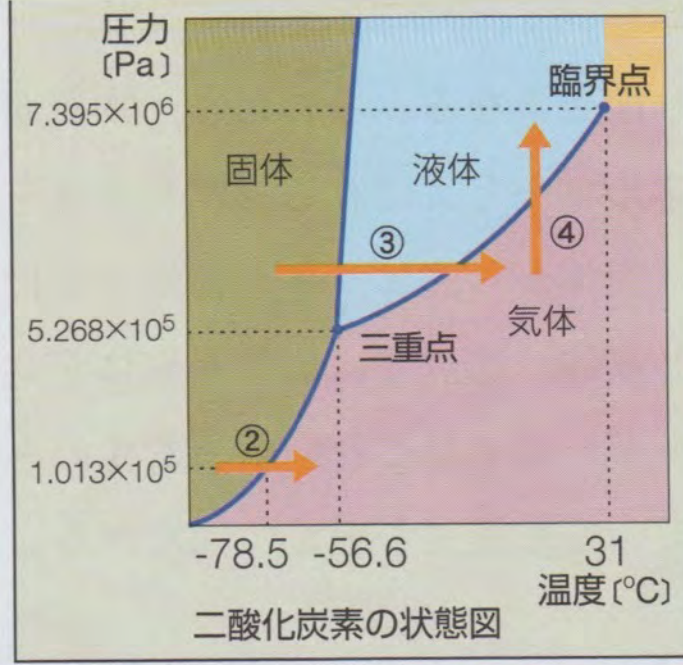
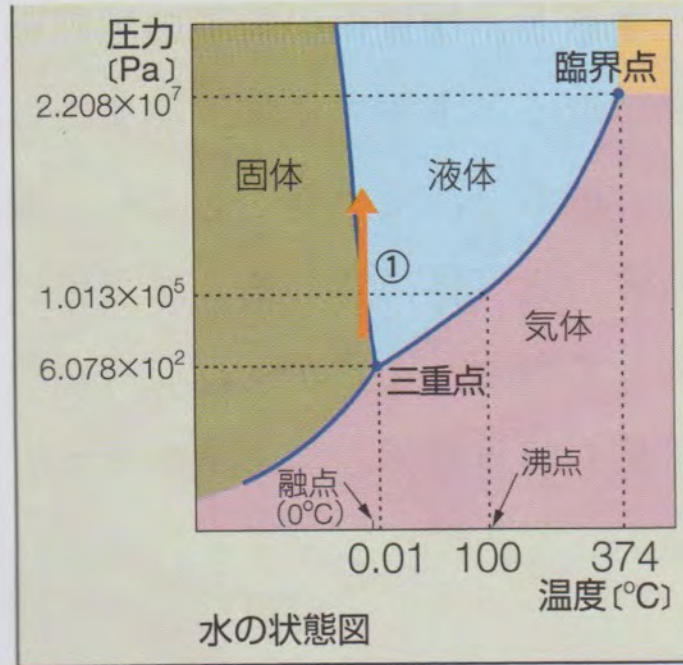
図13 左 水の状態図から次のようなことが説明できる。

大気圧が低い山の上では、水は $100^{\circ}\text{C}$ より低い温度で沸騰する。

圧力鍋中では、水は $100^{\circ}\text{C}$ より高い温度でなければ沸騰しない。



# 図13 状態図



$0^\circ\text{C}$ のまま圧力を高くすると、固体(氷) → 液体(水)と変化する(矢印①)

三重点: 固体・液体・気体が平衡状態で共存する点

臨界点: この点以上の温度・圧力では、気体と液体の区別がつかない超臨界流体の状態になる

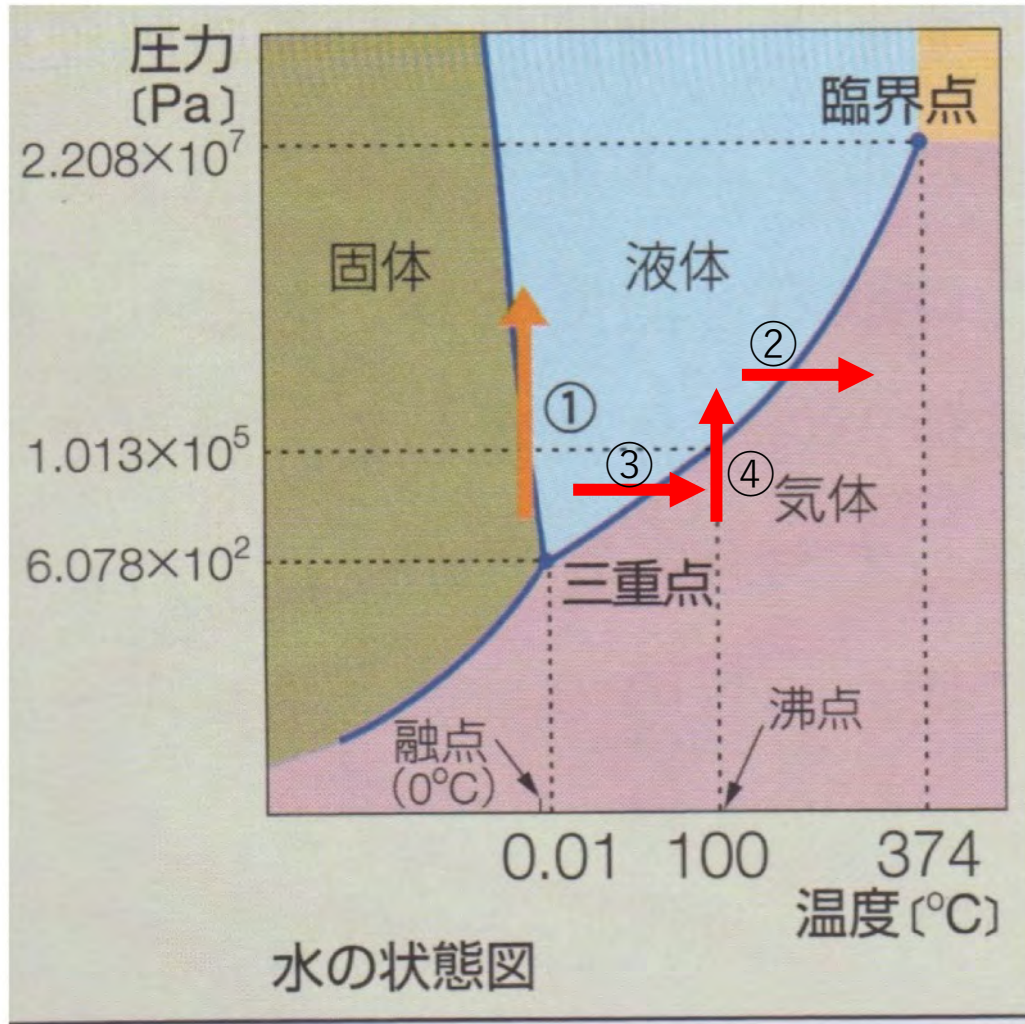
$1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ のまま温度を上げると、固体(ドライアイス) → 気体と変化する(矢印②)

高い圧力で温度を上げると、固体 → 液体 → 気体と変化する(矢印③)

常温でも圧力を上げれば、気体 → 液体と変化する(矢印④)



# 水の状態図



水の状態図

① 0°Cで氷に圧力をかけると液体になる。

② 1気圧以上の高圧下では水は100°C以上で沸騰する。

③ 1気圧以下の低圧下では水は100°C以下で沸騰する。

④ 100°Cでも1気圧以上ならば水は液体状態を維持する。

三重点は0.006気圧、0.01°Cに存在する。

臨界点は221気圧、374°Cに存在する。

# 状態図における三重点、臨界点とは

- **三重点**：固体、液体、気体が**平衡状態**で共存している。
- **臨界点**：この点以上の温度・圧力の下では、気体と液体の区別がつかない**超臨界流体**の状態になる。
- 水の場合、**220気圧**、**374 °C**、二酸化炭素の場合、**74気圧**、**31 °C**で臨界点に達する。
- 超臨界流体は気体と液体の中間の性質を示す。
- 二酸化炭素の超臨界流体はクロマトグラフィーの移動相として用いられている。

# 分子の運動エネルギーと絶対温度の関係 (補足)

分子1個の運動エネルギーの平均値  $\varepsilon$  は、絶対温度  $T$  と比例関係にある。

$$\varepsilon = \frac{3}{2} k T, \quad (k \text{ はボルツマン定数})$$

この値は物質の種類にかかわらず等しい。

他方、運動エネルギーは、粒子の質量  $m$  および速度  $v$  との間に次の関係がある。

$$\varepsilon = \frac{1}{2} m v^2, \quad v^2 = 2 \varepsilon / m$$

運動エネルギー  $\varepsilon$  が等しければ、質量  $m$  の大きな粒子ほど、速度は小さくなる。したがって、質量の大きな分子ほど拡散速度は遅い。

# ボルツマン定数とは（補足）

気体定数  $R$  をアボガドロ数  $N_A$  で割った値。

$$k = \frac{R}{N_A}$$

$PV = nRT$  （気体の状態方程式：来週説明）

$\varepsilon = \frac{3}{2} k T$  （分子1個の運動エネルギー）

$$\varepsilon = \frac{3}{2} \frac{R}{N_A} T \quad , \quad PV = n \times \frac{2}{3} N_A \varepsilon$$

気体の圧力と体積の積は、絶対温度および運動エネルギーに比例する。圧力が一定ならば、大きな分子ほど占める体積は小さくなる。

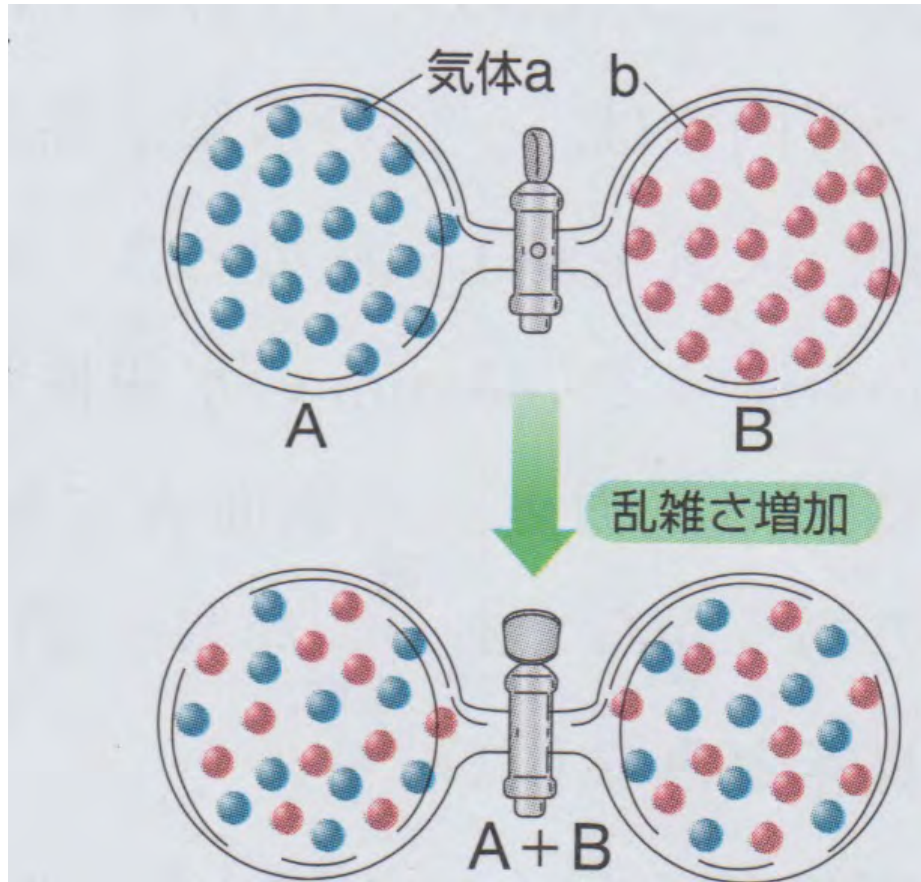
# 三態のモデルと状態変化

参考：乱雑さとエントロピー

自然の変化は、確率の高い無秩序な状態へと変化する。無秩序な状態になっていくとき、乱雑さは増加する。無秩序の程度または乱雑さの度合いは、エントロピーという量で表される。

混ぜり合った2種類の気体を、混合前の状態に自然に戻すことはできない。

# 乱雑さとエントロピー



混ぜり合った  
2種類の気体  
を、混合前の  
状態に自然に  
戻すことはで  
きない。  
エントロピー  
の増大。

# エントロピー増大の法則と 自然および人間社会の秩序

- エントロピーは、自然の状態では増大する方向（より乱雑な方向）に進み、戻すことはできない。
- しかし、自然界には秩序が存在し、人間社会もより秩序があり、高度に組織化された状態に進化しようとしている。
- この矛盾はどのように説明されるのか？
- またの機会に考えてみたい。



# 出席確認メールのお願い

出席確認のため、**授業終了後、当日中に**筒木宛にメールを送ってください。送り先は；

[kiyosi.tutuki@icloud.com](mailto:kiyosi.tutuki@icloud.com)

メールのタイトルは、「**入門化学出席確認、学籍番号、氏名**」としてください。

メールの本文には、簡単で良いので**授業の感想**などを書いてください。

別途、**課題**を出すことがあります。その際は、**別のメール**で送ってください。課題の締め切りは次の週の月曜日とします。

# 6月7日 課題

(1) 教科書p.95 図4 で両端の脱脂綿の間の距離を10cmとすると、塩化アンモニウムの白煙が生じるのは濃塩酸側から何cm、濃アンモニア水側から何cmのところか？

(2) スケートを履くと氷の上を滑ることができるのは何故か？水の状態図から考えなさい。

締め切り 6月12日（月）

# 最近見た珍しい植物 (5月21日)



ツマトリソウ

エゾタンポポ