入門化学07

気体の性質

気体分子の熱運動と圧力・気体の状態方程式

筒木　潔

スズラン

ササバギンラン

5月22日の課題解説 課題1

塩酸とアンモニアが出会うのは**10cm**のガラス管の両端からそれぞれ何**cm**のところか？

- P.95、表1に各分子の平均速度が出ているのでその値を使えば簡単に計算できます。

塩酸分子の平均速度 $V_{HCl} = 4.3 \times 10^2$ (m/s)

アンモニア分子の平均速度 $V_{NH3} = 6.3 \times 10^2$ (m/s)

塩酸分子の移動距離 x (cm)

アンモニア分子の移動距離 y (cm)　$x + y = 10$ (cm)

$y = (6.3/4.3) \times x$ なので、

$x + (6.3/4.3) \times x = 10$ (cm)　両辺に4.3をかけると

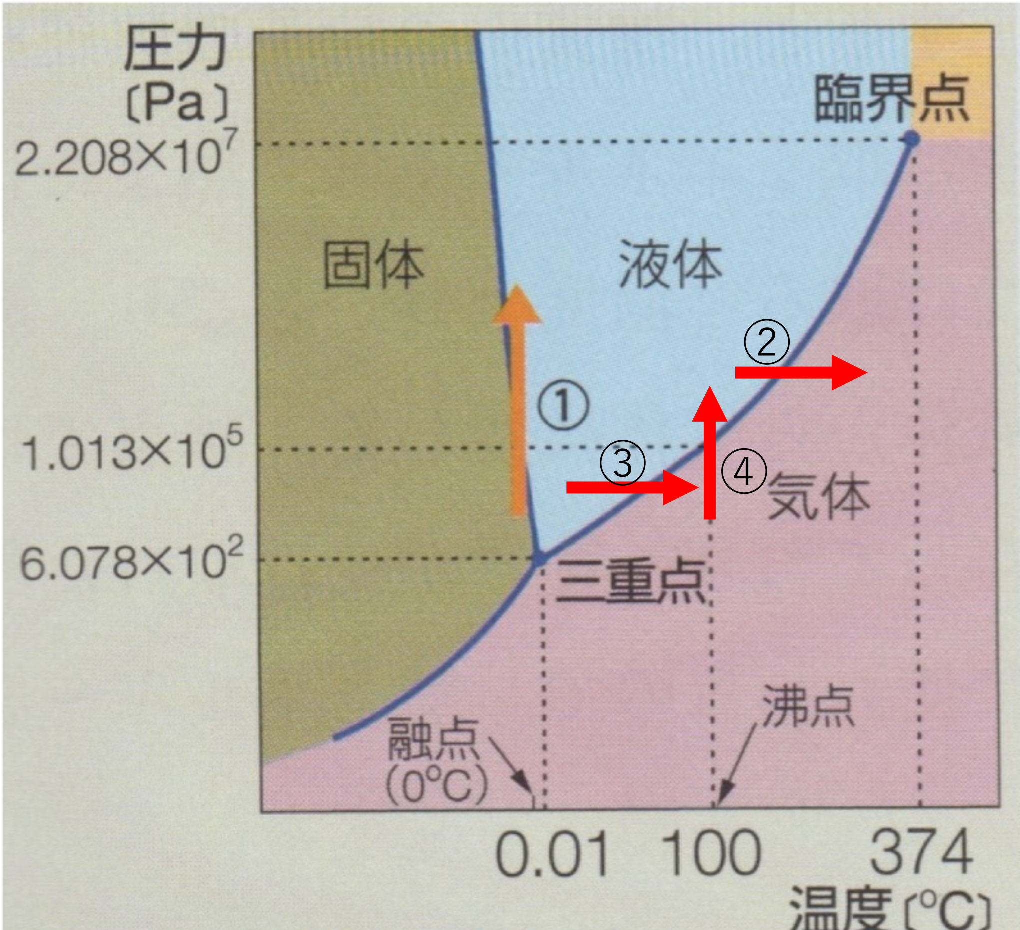
$(4.3+6.3) \times x = 43$　塩酸分子の移動距離 $x = 4.06$ (cm)

アンモニア分子の移動距離 $y = 10 - 4.06 = 5.94$ (cm)

課題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（縦向きの矢印①）からわかるように、0℃、1気圧の氷にさらに圧力をかけると、固体状態から液体状態に変化する。そのためスケートの刃と氷の間の摩擦が減って滑りやすくなる。
- 氷を冷やしすぎて0℃以下になると、氷に圧力をかけても液体にならない。
- したがってスケートリンクでは温度管理が重要である。

水の状態図に関する復習



水の状態図

① 0 ℃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℃**以上で沸騰する。

③ 1気圧以下の低圧下では水は**100℃**以下で沸騰する。

④ **100℃**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℃**に存在する。

臨界点は**221**気圧、**374℃**に存在する。

第２章　物質の状態
２節　気体の性質

1. ボイル・シャルルの法則
2. 気体の状態方程式

２節　気体の性質

- 気体はとくに熱運動が激しく、粒子間の距離が大きい。
- 温まった空気は天井のほうに移動し、注射器に入れた気体は圧力をかけると体積が小さくなる。
- バーナーで空気を加熱することにより熱気球が浮かぶ。
- 飛行機の中で飲んだペットボトルのお茶の容器にかたくフタをしてから着陸すると、ペットボトルがへこんでいる。
- 気体の体積変化と、温度、圧力との間にある関係を学習する。

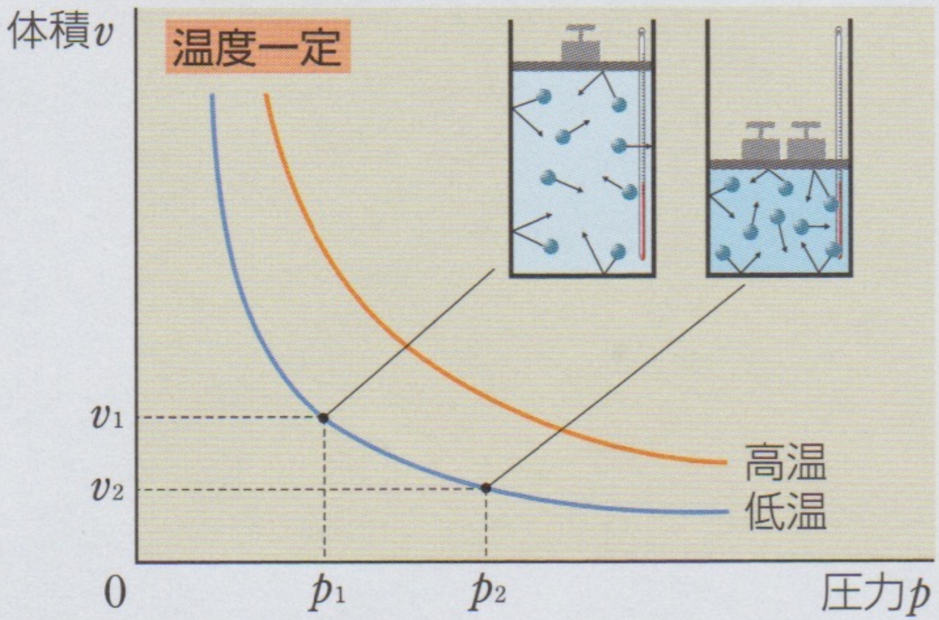
ボイルの法則 (イギリス、1662) p.104

温度一定のとき、一定量の気体の体積 v は、圧力 p に反比例する。

$\mathbf{v} = \dfrac{a}{p}$ または $\mathbf{pv = a}$

（a は温度と物質量によって決まる定数）

ボイルの法則



温度一定のとき、一定量の気体の体積 v は、圧力 p に反比例する。

pv = a　　(1)

温度一定のとき，
圧力 $\boldsymbol{p_1}$ で体積 $\boldsymbol{v_1}$ の気体を，
圧力 $\boldsymbol{p_2}$ にして体積 $\boldsymbol{v_2}$ に
なったとき，次の関係がある。

$$\boldsymbol{p_1 v_1 = p_2 v_2 = a} \ （一定） \quad 〈2〉$$

参考図　**ボイルの法則**

ロバート・ボイル　(1627-1691)

- アイルランド生まれ
- 1641 年にイタリア・フィレンツェを訪れ、ガリレオ・ガリレイに師事。
- 多くの錬金術的な研究をおこなったが、空気ポンプの研究から、気体の体積と圧力に関する基本法則を発見した。

ボイルの法則の説明

- 気体の圧力は、容器の壁に衝突する分子の数と分子の持つエネルギーが増すほど大きくなる。
- 容器の体積が２分の１になれば、一定体積あたりの分子の数は２倍になるので、圧力も２倍になる。
- 一定温度では、分子の持つエネルギーは一定である。
- 従って、気体の圧力と体積は反比例する。

気体の体積と圧力の関係

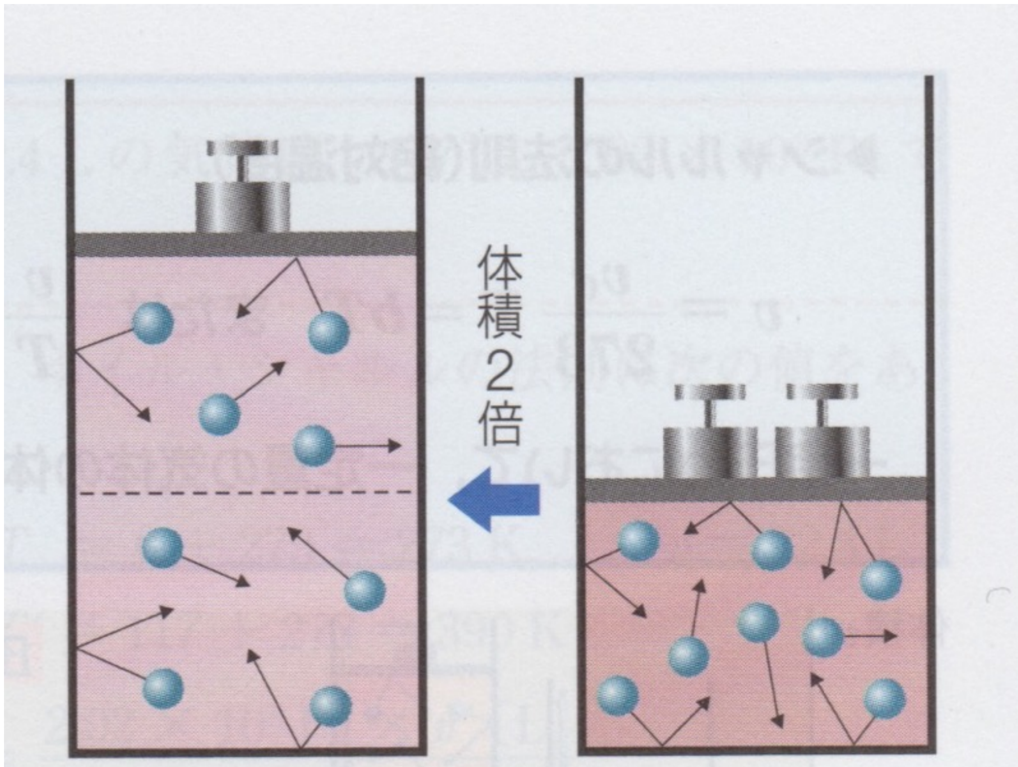


図１　**気体の体積と圧力**

シャルルの法則（フランス、1787）
ボイルの法則の125年後　　p. 105

- 圧力一定のとき、一定量の気体の体積**v** は、温度 t [℃] が 1 ℃上下するごとに、**0 ℃**のときの体積 v_0 の **1/273** ずつ増減する。

- 温度が高いほど気体分子の熱運動は激しく、器壁に衝突する分子の平均の速さは大きい。
- このため、温度が高くなったときに圧力を一定にするには、体積を大きくしなくてはならない。

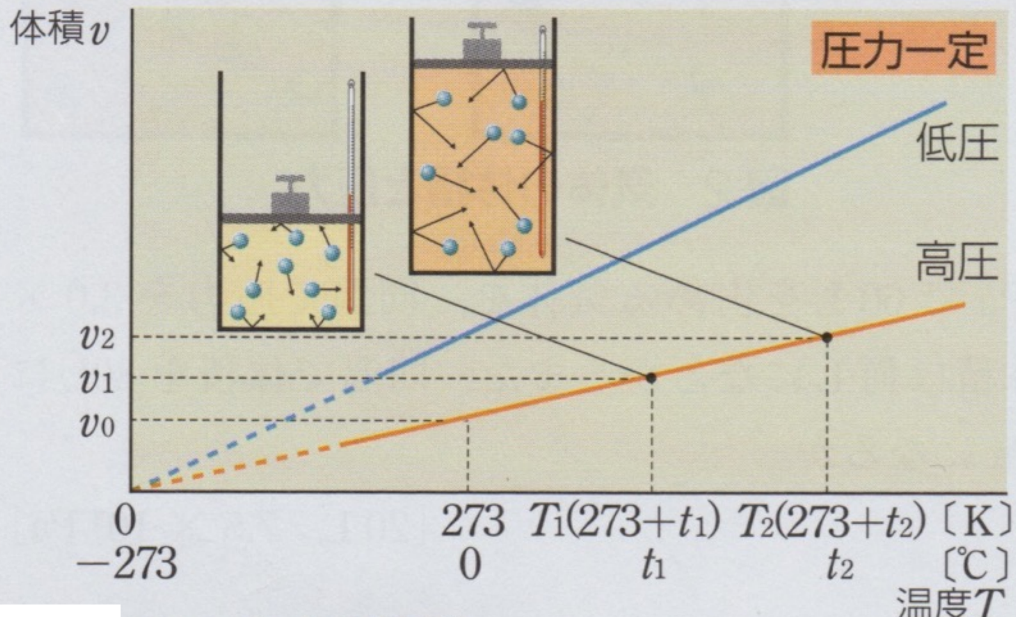
シャルルの実験 1787

- ５つの風船にそれぞれ異なる気体を詰め、風船の温度を80℃まで上げたところ、どの風船も同じ大きさまで膨張した。
- ゲイ・リュサックにより、「シャルルの法則」として定式化された。(1802)

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

V : 気体の体積、T : 絶対温度

シャルルの法則



絶対温度 $\boldsymbol{T_1}$ で体積 $\boldsymbol{v_1}$ の気体を，圧力を変化させずに絶対温度 $\boldsymbol{T_2}$ にして体積 $\boldsymbol{v_2}$ になったとき，次の関係がある。

$$\frac{v_1}{T_1} = \frac{v_2}{T_2} = b \text{（一定）} \qquad \langle 7 \rangle$$

参考図　**シャルルの法則**

ジャック・シャルル
1746 – 1823 フランス

- シャルルの法則：気体を熱したときの膨張の程度を説明した法則。圧力が一定のとき、気体の体積はその絶対温度に比例して増大する。
- 水素気球を発明。 1783
- 世界初の有人水素気球飛行。1783

シャルルの法則の式

p. 105 (3), (4), (5), (6)

$v = v_0 \times \frac{273+t}{273}$　（温度は摂氏　t ℃）

絶対温度　$T = t + 273$ を用いると、

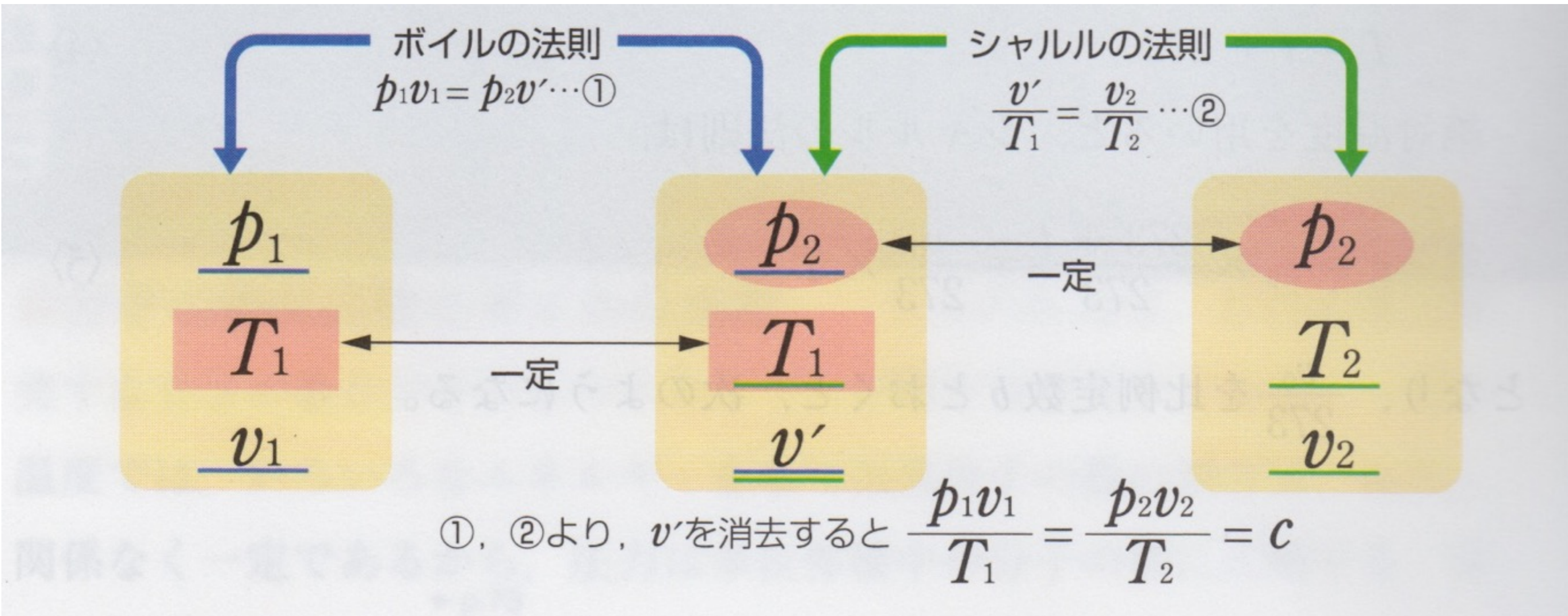
$v = \frac{v_0}{273} \times T$

$\frac{v_0}{273}$ を　定数 b とおくと、

$v = \frac{v_0}{273} \times T = b \times T$ または $\frac{v}{T} = b$

一定圧力において、一定量の気体の体積vは、
絶対温度T に比例する。

ボイル・シャルルの法則


ボイルの法則
$p_1v_1 = p_2v' \cdots ①$
シャルルの法則
$\frac{v'}{T_1} = \frac{v_2}{T_2} \cdots ②$
p_1
T_1
v_1
p_2
T_1
v'
p_2
T_2
v_2
一定
一定
①，②より，v'を消去すると $\frac{p_1v_1}{T_1} = \frac{p_2v_2}{T_2} = c$

ボイル・シャルルの法則

ボイルの法則とシャルルの法則は一つにまとめられる。 P. 106

一定量の気体の体積 v は、 圧力 p
に反比例し、絶対温度 T に比例する。

$v = c\dfrac{T}{p}$ または　$\dfrac{pv}{T} = c$

（c は物質量によって決まる定数）

1 mol, 0℃, 1 atm の条件下で c を求めると、次→

気体定数 R の求め方 p.107

0℃, 1 atmにおける1 molの気体の体積は 22.4 L、
1 atm = 1.013 × 10 ^{5} Pa 、 0℃ = 273 K だから、

定数 c は、

$$c = \frac{pV}{T} = \frac{1.013 \times 10^5\ \mathrm{Pa} \times 22.4\ \mathrm{L}/mol}{273\ \mathrm{K}}$$

$$= \frac{8.31 \times 10^3\ \mathrm{Pa \cdot L}}{\mathrm{K} \cdot mol}$$

$$= \frac{8.31\ \mathrm{Pa} \cdot m^3}{\mathrm{K} \cdot mol}$$: 1 L = 10^{-3} m^3 だから

$$= \frac{8.31\ J}{\mathrm{K} \cdot mol}$$: 1 J = 1 Pa × m^3 だから

気体定数 R の求め方　（続き）

前スライドで求めた、 1 mol, 0℃, 1 atmにおける c の値は、気体の種類、圧力、体積および温度に関係なく一定であるので、

これを気体定数といい、記号 R で表す。

$$R = \frac{8.31\ J}{\mathrm{K}\cdot mol}$$

1 J は、1 N の力がその力の方向に物体を1 m 動かすときの仕事。

単位： N ・mまたは kg m^2 s^{-2} = 1 Pa × m^3

気体の状態方程式 p.85

これを用いると、 $1\,mol$の気体の圧力、体積、絶対温度の間には、常に次式が成立する。

$$pV = RT$$

$n\,mol$ の気体に対しては、 $v = n\,V$だから

$$pv = n\,RT$$

この式を気体の状態方程式という。

気体定数 R の単位 p.107 参考

圧力の単位に Pa、体積の単位に m³ を用いた場合

$$R = \frac{8.31\ \mathrm{Pa} \cdot m^3}{\mathrm{K} \cdot mol} = \frac{8.31\ J}{\mathrm{K} \cdot mol}$$

圧力の単位に 気圧 (atm)、体積の単位に L を用いた場合、1 Pa = 0.987 ×10^{-5} atm、1 m^3 = 1000 L

$$R = \frac{8.21 \times 10^{-5}\,\mathrm{atm} \cdot 1000\ \mathrm{L}}{\mathrm{K} \cdot mol} = \frac{0.0821\ \mathrm{atm} \cdot \mathrm{L}}{\mathrm{K} \cdot mol}$$

気体の分子量　p.107 下段

モル質量 M [g/mol] の気体が w [g] あるとき、
その物質量 n は $n = \frac{w}{M}$ であるから、
気体の状態方程式にあてはめると、

$$pv = n\,RT = \frac{w}{M}\,\mathrm{RT}$$

$$M = \frac{w}{pv}\,\mathrm{RT} \qquad (13)$$

気体の分子量（続き） p.107 下段

単位体積あたりの質量、密度 d [g/L] を用いると、
体積 v [L] のときの質量 w は $w = dv$ $[g]$
となるから、 圧力、温度、密度の値から分子量が
求められる。

$$M = \frac{w}{pv} RT = \frac{dv}{pv} RT = \frac{dRT}{p}$$

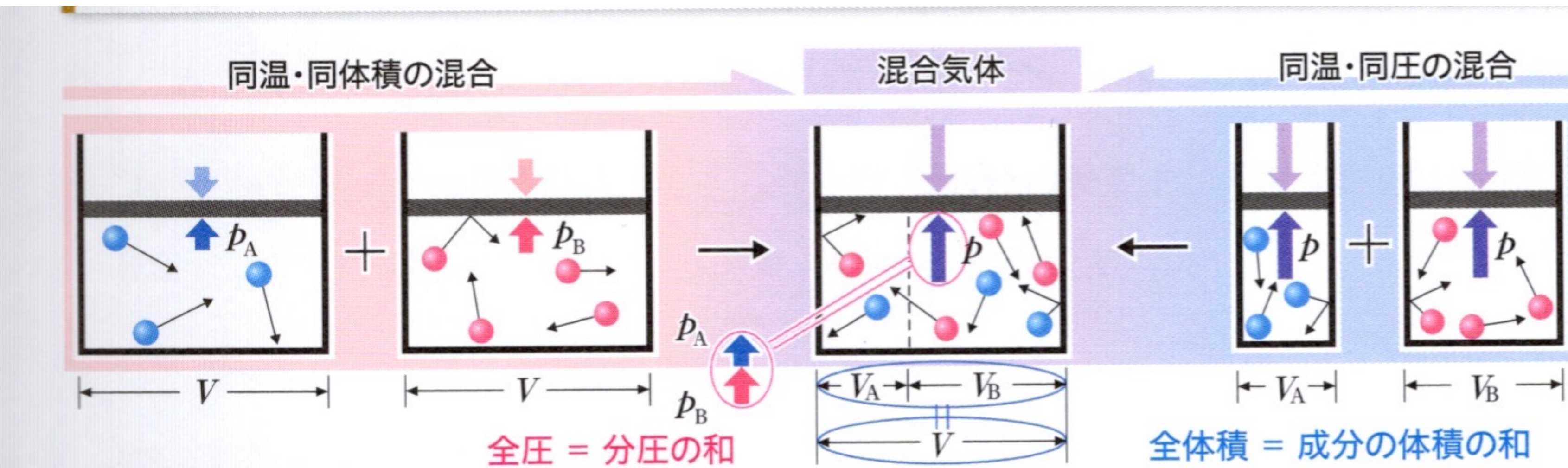
$$d = \frac{pM}{RT} \qquad (14)$$

混合気体　p.108

- 混合気体の体積は、同温・同圧の各成分気体の体積の和に等しい。
- ただし、成分気体が反応して、物質の総和が変わる場合には、この法則は成立しない。

$$v = v_A + v_B$$

混合気体の圧力



▲図 3　気体の混合

ドルトンの分圧の法則 (1801)
p. 108 上中段

温度 T において、容積 v の容器に気体 A だけを入れたとき、 p_A の圧力を示し、同じ容積 v の容器に気体 B だけを入れたとき、 p_B の圧力を示したとする。

気体 A と気体 B を容積 v の容器に入れて混合したときに、混合気体が示す圧力を p とすると、

$$p = p_A + p_B$$

分圧の法則

同温・同容積の容器内の混合気体について、混合気体の全圧は分圧の和に等しい。

$$p = p_A + p_B$$

全圧 = 気体 A の分圧 + 気体 B の分圧

分圧と状態方程式

各成分気体について

$p_A v = n_A RT \quad \rightarrow \quad \frac{RT}{v} = \frac{p_A}{n_A}$

$p_B v = n_B RT \quad \rightarrow \quad \frac{RT}{v} = \frac{p_B}{n_B}$

混合気体について

$pv = n_A RT + n_B RT = (n_A + n_B)RT$

$\frac{RT}{v} = \frac{p}{n_A + n_B}$

成分気体の物質量 (mol) の比
= 成分気体の分圧の比　を導く。P.108 下

$$pv = n_A RT + n_B RT = p_A v + p_B v = v(p_A + p_B)$$

$$p = p_A + p_B$$

$$\frac{RT}{v}\ （一定）= \frac{p_A}{n_A} = \frac{p_B}{n_B} = \frac{p}{n_A + n_B}$$

$$p_A = \frac{n_A \quad p}{n_A + n_B} \quad , \quad p_B = \frac{n_B \quad p}{n_A + n_B}$$

混合気体の組成と分圧

- 同温・同圧で気体を混合したとき、

  混合前の成分気体の体積の比　=　物質量の比

  = 混合後の分圧の比

  $V_A : V_B = M_A : M_B = P_A : P_B$

空気の例

- 体積比で窒素80％、酸素20%からなる。

  物質比（モル比）では N_2：O_2 = 4:1。

全圧を1.0 ×10 ^{5} Pa とすると、

窒素の分圧は　1.0 ×10 ^{5} Pa ×4/(4+1)

= 8.0 ×10 ^{4} Pa

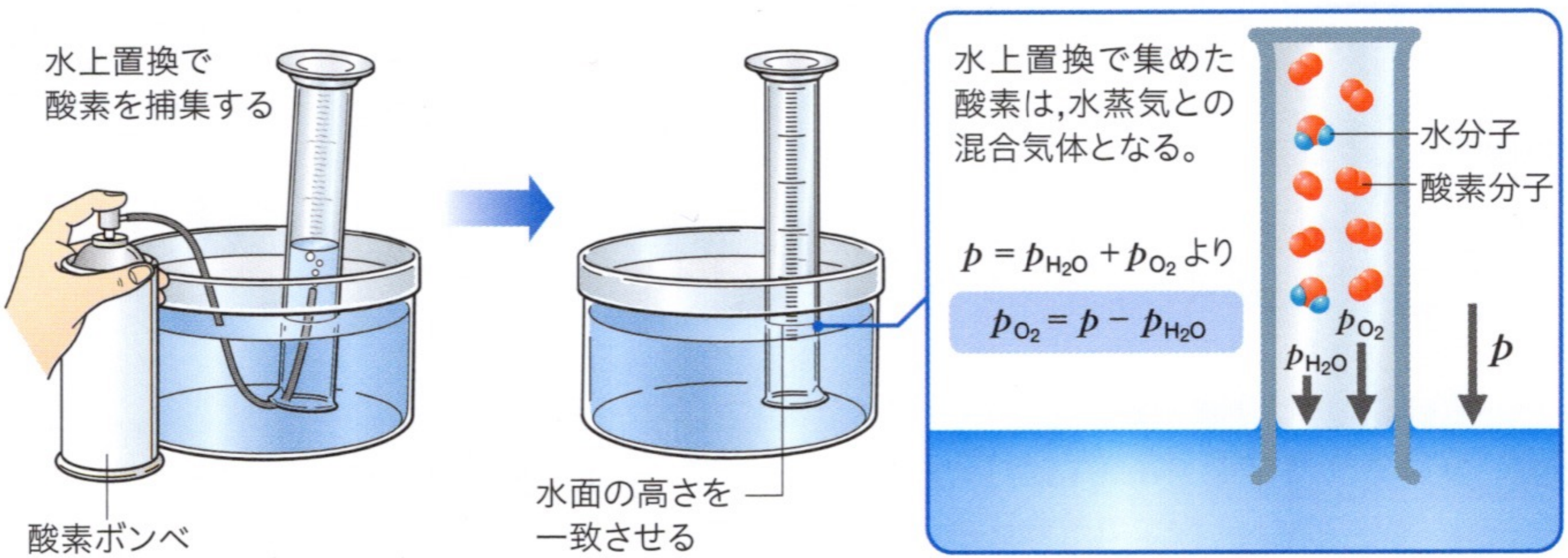
酸素の分圧は　1.0 ×10 ^{5} Pa ×1/(4+1)

= 2.0 ×10 ^{4} Pa

水上置換による酸素の分子量測定

●水上置換で捕集した気体の分圧

$p_{O_2} = p - p_{H_2O}$　　p_{O_2}：酸素の分圧　　p：大気圧　　p_{H_2O}：水蒸気圧　　〈23〉



▲図 4　水上置換による気体の捕集

理想気体と実在気体　p. 111

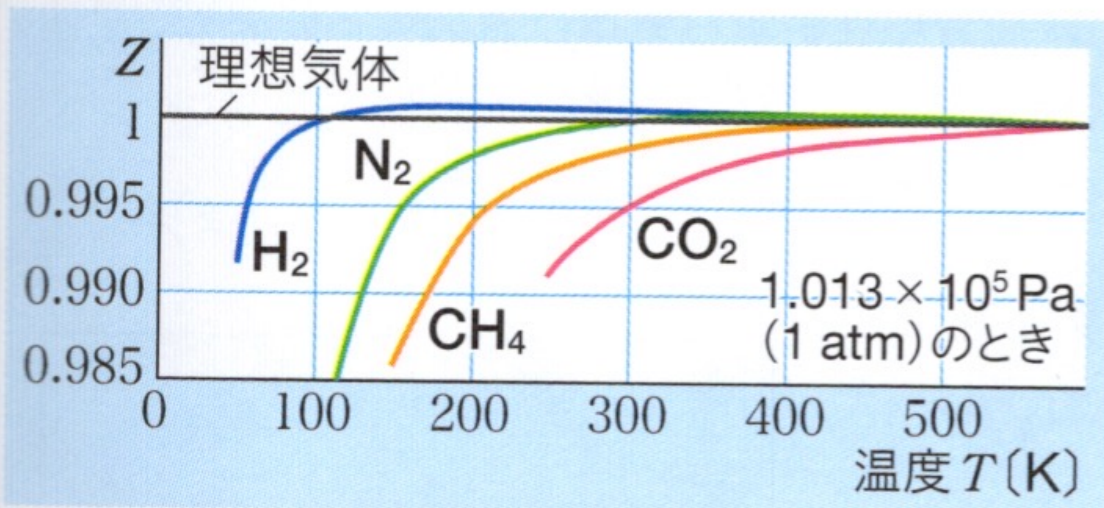
実在の気体は、 $pv = n\,RT$ 　の状態方程式には厳密には従わない。特に、低温にした場合や高圧にした場合には状態方程式からはずれる。

分子間力がなく、分子自身の体積を0と想定して状態方程式に厳密に従う気体を、理想気体という。

$\frac{pv}{nRT}$ = Z　（理想気体では、Z = 1）

理想気体と実在気体の違い

Thinking Point 2 H_2 が CO_2 よりも理想気体からのずれが小さい理由を答えよ。



▲図 5　Z の値と温度の関係

Z: 圧縮率因子

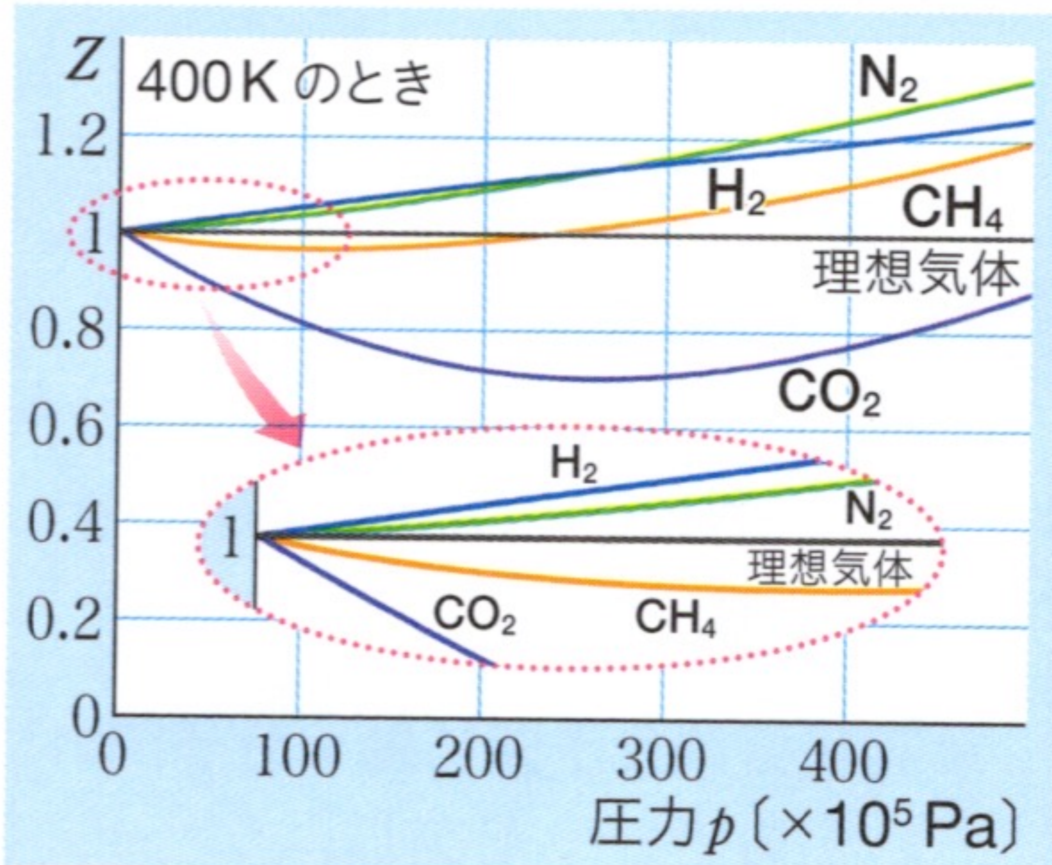
状態方程式の適用

実在気体は、一般に低温、高圧になるほど、
分子自体の体積や分子間力が影響し、理想気体からのずれが大きくなる。

しかし、高温、低圧では、理想気体とみなしてよい。常温、常圧はこの範囲にはいる。

状態方程式への圧力の影響

Z: 圧縮率因子



▲図 6 Zの値と圧力の関係

（図 5，6 の出典：化学便覧 改訂 5 版）

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）

$\varepsilon = \frac{3}{2} kT$　（比例定数はボルツマン定数）

分子の運動エネルギーは絶対温度に比例する。

$\varepsilon = \frac{3}{2} \frac{R}{N_A} T \quad \rightarrow \quad RT = \frac{2}{3} N_A \varepsilon$

$PV = n \times \frac{2}{3} N_A \varepsilon$

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 ε は、絶対温度 T と比例関係にある。

$\varepsilon = \frac{3}{2}kT,$　（k 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。

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

運動エネルギー ε 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。

質量の大きな分子ほど占める体積は小さい。

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

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が、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月曜日とします。

5月29日課題

ある気体を容積1リットルの容器に入れて100℃に保ち、圧力を測ると２気圧　(2.0 × 10^5 Pa) であった。以下の問いに文章と計算式を添えて答えなさい。

(1) この容器に入っている気体分子のmol数。

(2) 温度を200℃に上げると気体の圧力は何気圧(何Pa)になるか?

ヒント：$PV = n\ RT$ に既知の値を代入。

kiyosi.tutuki@icloud.com に送ってください。

締め切り 6月3日（金）

5月下旬の花

ベニバナイ
チヤクソウ

ツマトリソウ

エゾカンゾウ

トチノキの
花