高校化学 L01 第 72 講 気体の密度と分子量

対象：高 2 相当

この講でできるようになること

- 気体の質量と体積から密度を求められる。
- 気体の状態方程式から、密度・モル質量・圧力・絶対温度の関係を説明できる。
- 純粋な気体の密度と状態条件からモル質量を求められる。
- 分子量とモル質量の違いを区別し、気体の条件変化による密度の変化を説明できる。

1. 気体の密度

密度

気体の質量を m、体積を V とすると、密度 ρ は次の式で表される。

$$\rho = \frac{m}{V}$$

この講では、質量を g、体積を L で扱うとき、密度の単位を $\mathrm{g\,L^{-1}}$ とする。

気体の密度は条件によって変わる

気体は圧力や温度によって体積が変化するため、同じ物質でも密度は一定ではない。したがって、気体の密度を比較するときは圧力と温度の条件を確認する必要がある。

一方、同じ純物質であれば、状態条件を変えてもその物質のモル質量そのものは変わらない。

2. 状態方程式と密度の関係

密度を状態方程式へ結び付ける

理想気体の状態方程式は $PV = nRT$ である。気体の質量を m、モル質量を M とすると、物質量は $n = \frac{m}{M}$ で表せる。

これを状態方程式へ代入すると、次の関係が得られる。

$$PV = \frac{m}{M}RT$$

さらに $\rho = \frac{m}{V}$ を用いると、気体の密度は次の式で表される。

$$\rho = \frac{PM}{RT}$$

©ミライコーチング

モル質量を求める式

$\rho = P\frac{M}{RT}$ をモル質量 M について整理すると、次の式になる。

$$M = \frac{\rho RT}{P}$$

密度ではなく質量 m と体積 V が直接与えられている場合は、$\rho = \frac{m}{V}$ を代入して次の形で計算してもよい。

$$M = \frac{mRT}{PV}$$

この講では P を絶対圧力、T を絶対温度として扱い、$R = 8.30\,\mathrm{kPa\,L\,mol^{-1}\,K^{-1}}$ を用いる。セルシウス温度 t は $T = t + 273$ として K へ直す。

3. 同じ条件なら密度はモル質量に比例する

同じ圧力・温度で異なる気体を比べる

$\rho = P\frac{M}{RT}$ から、圧力 P と絶対温度 T が同じなら、気体の密度 ρ はモル質量 M に比例する。

したがって、同じ圧力・温度にある二種類の理想気体では、モル質量の大きい気体ほど密度も大きくなる。

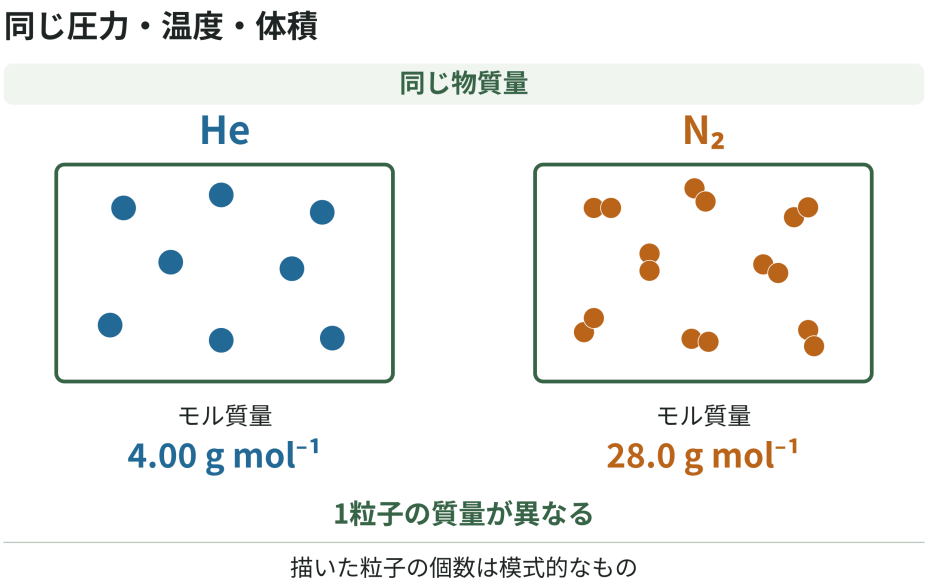


図 1　同じ圧力・温度・体積で比較する二種類の気体。

この図では He と N_2 を同じ圧力・温度・体積、すなわち同じ物質量として比較している。He は単原子気体であり、N_2 のような分子性気体と粒子の種類は異なるが、モル質量を用いれば同じ考え方で密度を比較できる。

同じ気体なら圧力と温度で密度が変わる

同じ純粋な気体ではモル質量 M は一定である。そのため $\rho = P\frac{M}{RT}$ から、温度一定なら密度は圧力に比例し、圧力一定なら密度は絶対温度に反比例する。

例えば、同じ気体を同じ温度で圧力だけ 2 倍にすれば、理想気体近似では密度も 2 倍になる。

©ミライコーチング

4. 分子量とモル質量

分子量とモル質量の違い

分子量は、分子の質量を基準に対する相対値として表したものであり、単位をもたない。

一方、**モル質量**は 1 mol あたりの質量であり、単位を $\mathrm{g\,mol^{-1}}$ などで表す。分子性物質では、$\mathrm{g\,mol^{-1}}$ で表したモル質量の数値と分子量の数値が対応する。

分子として存在しない気体

He のような単原子気体では、気体粒子は分子ではなく原子である。この講では、このような気体もモル質量を使って扱い、「分子量」という語を無理に当てはめない。

密度だけで物質名は決められない

純粋な分子性気体について密度と状態条件からモル質量を求め、そこから分子量の数値を得ることはできる。しかし、同じ分子量をもつ異なる物質が存在する可能性があるため、分子量だけから物質名を一意に決めることはできない。

例題

例題 1

純粋な窒素 $\mathrm{N_2}$ を理想気体として扱う。モル質量は $28.0\,\mathrm{g\,mol^{-1}}$、温度は 27 ℃、絶対圧力は 100 kPa とし、$R = 8.30\,\mathrm{kPa\,L\,mol^{-1}\,K^{-1}}$ を用いる。

1. この条件での窒素の密度を求めよ。
2. 温度を 27 ℃のまま保ち、絶対圧力だけを 200 kPa にしたときの密度を求めよ。また、モル質量がどうなるか答えよ。

解答・解説

1.
27 ℃は 300 K である。密度は $\rho = P\frac{M}{RT}$ で求められる。 $\rho = \frac{100\times28.0}{8.30\times300} = 1.124\ldots\,\mathrm{g\,L^{-1}}$ なので、3 桁で$\mathbf{1.12\,g\,L^{-1}}$である。

2.
温度と気体の種類は同じなので、密度は圧力に比例する。途中で丸めずに計算すると、$\rho = \frac{200\times28.0}{8.30\times300} = 2.248\ldots\,\mathrm{g\,L^{-1}}$ となる。

したがって、密度は$\mathbf{2.25\,g\,L^{-1}}$である。圧力が変化しても窒素そのものは変わらないため、モル質量は**$\mathbf{28.0\,g\,mol^{-1}}$ のまま**である。

例題 2

同じ栓を付けた同じ剛体容器を、同じ天秤で二回秤量した。容器内部を真空にした状態では 50.000 g、未知の純粋な分子性気体 X を満たして密閉した状態では 50.320 g であった。

X の体積は 249 mL、絶対圧力は 100 kPa、温度は 27 ℃である。気体は理想気体として扱い、漏れ・吸着・器具体積の変化・浮力補正の影響は無視する。栓はどちらの秤量にも含まれている。

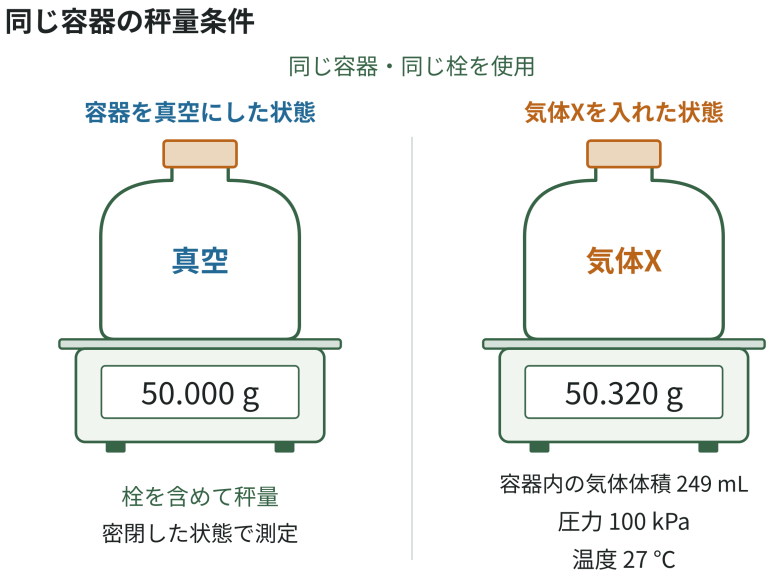


図 2　真空にした容器と気体を満たした容器の秤量条件。

1. X の質量と密度を求めよ。
2. X のモル質量と分子量を求めよ。ただし、分子量から物質名を決定する必要はない。

解答・解説

1.

気体の質量は、気体を入れた状態と真空状態の質量差から求める。$m = 50.320 - 50.000 = 0.320\,\mathrm{g}$ である。

また、249 mL は 0.249 L なので、密度は $\rho = \frac{0.320}{0.249} = 1.285\ldots\,\mathrm{g\,L^{-1}}$ となる。答えは**質量 0.320 g、密度 $1.29\,\mathrm{g\,L^{-1}}$**である。

2.

27 ℃は 300 K である。丸めた密度 1.29 を使わず、$M = mR\frac{T}{PV}$ を用いて計算する。 $M = \frac{0.320 \times 8.30 \times 300}{100 \times 0.249} = 32.0\,\mathrm{g\,mol^{-1}}$ となる。

X は純粋な分子性気体なので、モル質量の数値に対応する分子量は **32.0** である。したがって、答えは**モル質量 $32.0\,\mathrm{g\,mol^{-1}}$、分子量 32.0** である。

例題 3

理想気体 A と B を同じ絶対圧力、同じ絶対温度で比較する。A の密度は $1.20\,\mathrm{g\,L^{-1}}$、B の密度は $1.80\,\mathrm{g\,L^{-1}}$ であり、A のモル質量は $28.0\,\mathrm{g\,mol^{-1}}$ である。

また、A については純粋な気体の状態を保ち、理想気体近似が成立するものとする。

1. B のモル質量を求めよ。
2. A を同じ絶対圧力のまま、絶対温度がもとの 2 倍になるまで加熱したときの密度を求めよ。また、A のモル質量がどうなるか答えよ。

解答・解説

1.
同じ圧力・同じ絶対温度では、$\rho = P\frac{M}{RT}$ より密度はモル質量に比例する。 したがって、$\frac{M_B}{M_A} = \frac{\rho_B}{\rho_A} = \frac{1.80}{1.20} = 1.50$ である。$M_B = 28.0 \times 1.50 = 42.0\,\mathrm{g\,mol^{-1}}$ となるので、答えは**$42.0\,\mathrm{g\,mol^{-1}}$**である。

圧力と温度の条件が確認できなければ、密度比だけからモル質量比を求めることはできない。

2.
同じ気体で圧力一定なら、$\rho = P\frac{M}{RT}$ より密度は絶対温度に反比例する。 絶対温度が 2 倍になると密度は 1/2 倍になるので、$\rho = \frac{1.20}{2} = 0.600\,\mathrm{g\,L^{-1}}$ である。

気体の種類は変わっていないため、モル質量は**$28.0\,\mathrm{g\,mol^{-1}}$ のまま**である。

演習問題

演習 1

気体の質量・体積・温度について答えよ。

1. ある純粋な気体の質量が 0.450 g、体積が 300 mL である。この気体の密度を $\mathrm{g\,L^{-1}}$ で求めよ。
2. 47 ℃を絶対温度に直せ。また、気体の密度を状態方程式と結び付けて扱うとき、セルシウス温度をそのまま使ってはいけない理由を説明せよ。

演習 2

モル質量 $44.0\,\mathrm{g\,mol^{-1}}$ の純粋な理想気体について考える。$R = 8.30\,\mathrm{kPa\,L\,mol^{-1}\,K^{-1}}$ とする。

1. 絶対圧力 83.0 kPa、温度 127 ℃での密度を求めよ。
2. 温度を 127 ℃のまま保ち、絶対圧力を 166 kPa にしたときの密度を求めよ。

演習 3

純粋な分子性理想気体 X の密度が $1.50\,\mathrm{g\,L^{-1}}$ である。絶対圧力は 100 kPa、温度は 127 ℃とし、$R = 8.30\,\mathrm{kPa\,L\,mol^{-1}\,K^{-1}}$ を用いる。

1. X のモル質量を求めよ。
2. X の分子量を求めよ。また、この値だけから X の物質名を一意に決められるか答えよ。

©ミライコーチング

演習 4

純粋な理想気体 A と B について考える。

1. 同じ絶対圧力、同じ絶対温度で、A の密度が $0.800\,\mathrm{g\,L^{-1}}$、B の密度が $2.00\,\mathrm{g\,L^{-1}}$ である。A のモル質量が $16.0\,\mathrm{g\,mol^{-1}}$ のとき、B のモル質量を求めよ。
2. A と B の圧力や温度が異なる場合にも、密度比をそのままモル質量比として使えるか説明せよ。

演習 5

ある純粋な理想気体を、絶対圧力一定のまま加熱したところ、密度がもとの半分になった。

1.「密度が半分になったので、この気体の分子量も半分になった」という説明が誤りである理由を説明せよ。

演習問題の解答・解説

解答 1

1.

300 mL は 0.300 L である。密度は $\rho = \frac{m}{V}$ なので、$\rho = \frac{0.450}{0.300} = 1.50\,\mathrm{g\,L^{-1}}$ となる。

答えは**$\mathbf{1.50\,g\,L^{-1}}$**である。

2.

この講では $T = t + 273$ とするので、47 ℃は $47 + 273 = 320\,\mathrm{K}$ である。

状態方程式の温度 T は絶対温度で定義されているため、セルシウス温度の 47 をそのまま代入してはいけない。答えは **320 K** である。

解答 2

1.

127 ℃は 400 K である。密度は $\rho = P\frac{M}{RT}$ で求める。 $\rho = \frac{83.0\times44.0}{8.30\times400} = 1.10\,\mathrm{g\,L^{-1}}$ となるので、答えは**$\mathbf{1.10\,g\,L^{-1}}$**である。

2.

温度と気体の種類が同じなので、密度は絶対圧力に比例する。圧力は 83.0 kPa から 166 kPa へ 2 倍になっているため、密度も 2 倍になる。

したがって、密度は $1.10 \times 2 = 2.20\,\mathrm{g\,L^{-1}}$ であり、答えは**$\mathbf{2.20\,g\,L^{-1}}$**である。

解答 3

1.

127 ℃は 400 K である。モル質量は $M = \rho R\frac{T}{P}$ で求める。 $M = \frac{1.50\times8.30\times400}{100} = 49.8\,\mathrm{g\,mol^{-1}}$ となるので、答えは**$49.8\,\mathrm{g\,mol^{-1}}$**である。

2.

X は純粋な分子性気体なので、$\mathrm{g\,mol^{-1}}$ で表したモル質量の数値と分子量の数値が対応する。したがって、分子量は **49.8** である。

ただし、分子量が同じ異なる物質が存在する可能性があるため、この値だけから X の物質名を一意に決めることはできない。

解答 4

1.

同じ絶対圧力、同じ絶対温度では、密度はモル質量に比例する。したがって、$\frac{M_B}{M_A} = \frac{\rho_B}{\rho_A}$ を用いる。$M_B = 16.0 \times \left(\frac{2.00}{0.800}\right) = 40.0\,\mathrm{g\,mol^{-1}}$ となるので、答えは**$40.0\,\mathrm{g\,mol^{-1}}$**である。

2.

圧力や温度が異なる場合、密度比をそのままモル質量比として使えるとは限らない。

$\rho = P\frac{M}{RT}$ から、密度はモル質量だけでなく圧力と絶対温度にも依存するためである。この講では、比較する気体の圧力と絶対温度をそろえてから密度比を用いる。

解答 5

1.

密度が変化しても、同じ純物質である限りモル質量や分子量そのものは変化しない。

圧力一定では $\rho = P\frac{M}{RT}$ より密度は絶対温度に反比例するため、加熱によって絶対温度が 2 倍になれば密度は半分になり得る。したがって、密度が半分になったことを理由に分子量も半分になったと考えるのは誤りである。