

1 | 溶液の濃度とその表し方

化学において、物質量を表す最も基本的な単位はモル (mol) である。物質 1 mol の質量をモル質量 (g/mol) という。物質量 (mol) は物質の質量 (g) をモル質量で割った値である。

$$\text{物質量 (mol)} = \frac{\text{物質の質量 (g)}}{\text{モル質量 (g/mol)}}$$

溶液の濃度は 1-1 ~ 1-3 に示すような様々な表し方がある。

1-1 | モル濃度

1) 容量モル濃度 (molarity)

溶液 1 L 中に溶けている溶質の物質量 (mol) で表した濃度である。単位は mol/L または mol/dm³ を用いる。単位記号として M (≡ mol/L) を用いることもある。体積は温度によって変化するので、濃度の表記に体積が含まれる場合、厳密には温度を記載する。

$$\text{モル濃度 (mol/L)} = \frac{\text{溶質の物質量 (mol)}}{\text{溶液の体積 (L)}}$$

$$\text{モル濃度 (mol/L)} = \frac{\text{溶質の質量 (g)}}{\text{溶質のモル質量 (g/mol)}} \times \frac{1000}{\text{溶液の体積 (mL)}}$$

2) 質量モル濃度 (molality)

溶媒 1 kg に a mol の溶質を溶かしたときの濃度を表す。

$$\text{質量モル濃度 } a \text{ (mol/kg)} = \frac{\text{溶質の物質量 (mol)}}{\text{溶媒の質量 (kg)}}$$

1-2 | 百分率濃度

1) 質量百分率濃度 (w/w)%

溶液の質量 (g) に対する溶質の質量 (g) をパーセントで表したものを。溶質の質量を W 、溶媒の質量を W_s とすると

$$(w/w)\% = \frac{W}{W_s + W} \times 100$$

2) 容量百分率濃度 (v/v)%

体積 V (mL) の溶液に含まれる溶質の体積 V_s (mL) をパーセントで表した濃度。

$$(v/v)\% = \frac{V_s}{V} \times 100$$

3) 質量対容量比濃度 (w/v)%

体積 V (mL) の溶液に含まれる溶質の質量 (g) をパーセントで表した濃度。

$$(w/v)\% = \frac{W \text{ (g)}}{V \text{ (mL)}} \times 100$$

例題 1 次の水溶液に含まれる各物質の物質質量 (mol) を計算しなさい。

- ① 0.20 mol/L の AgNO_3 溶液 250 mL
- ② 10(w/v)% ショ糖 ($\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$) 溶液 100 mL

解

溶液に含まれる溶質の物質質量 (mol) は容量モル濃度 (mol/L) \times 体積 (L) の関係から求まる。計算に際しては体積の単位をそろえることに注意する。

- ① 硝酸銀の物質質量 (mol) は、濃度 \times 体積の関係から

$$0.20 \text{ mol/L} \times 0.25 \text{ L} = 0.050 \text{ mol}$$

② ショ糖の分子量は 342.30 である。したがってモル質量は 342.30 g/mol。重量対容量比濃度で示されているので、10(w/v)% ショ糖溶液 100 mL に含まれる ショ糖の質量 (g) は

$$100 \text{ mL} \times \frac{10}{100} \text{ g/mL} = 10 \text{ g}$$

ショ糖の物質質量 (mol) は

$$\frac{10 \text{ g}}{342.30 \text{ g/mol}} = 2.9 \times 10^{-2} \text{ mol}$$

となる。

問 1 次の溶液を調製するのに必要な各物質の質量 (g) を求めなさい。

- ① 0.10 mol/L NaCl 溶液 500 mL
- ② 5.0(w/v)% KNO₃ 溶液 100 mL
- ③ 0.10 mol/L シュウ酸 (H₂C₂O₄) 溶液 500 mL (式量 90.0)

解

- ① NaCl のモル質量は 23.0+35.5 = 58.5 g/mol である。0.10 mol/L NaCl 溶液 500 mL を調製するためには

$$0.10 \text{ mol/L} \times 0.500 \text{ L} = 0.050 \text{ mol}$$

の NaCl が必要。したがって、必要な NaCl の質量は

$$0.050 \text{ mol} \times 58.5 \text{ g/mol} = 2.9 \text{ g}$$

- ② 5.0(w/v)% KNO₃ 溶液の 1 L には 50 g の KNO₃ が含まれる。したがって、100 mL では 5.0 g の KNO₃ が必要。

- ③ H₂C₂O₄ のモル質量は 90.0 g/mol である。0.10 mol/L シュウ酸溶液 500 mL に含まれるシュウ酸の物質質量 (mol) は

$$0.10 \text{ mol/L} \times 0.50 \text{ L} = 0.050 \text{ mol}$$

したがって必要なシュウ酸の質量 (g) は

$$0.050 \text{ mol} \times 90.0 \text{ g/mol} = 4.5 \text{ g}$$

例題 2 次の溶液のモル濃度を計算しなさい。

38.0% HCl, 密度 1.188 g/cm³

- ① 塩酸溶液 1 L の質量は $1.188 \text{ (g/cm}^3) \times 1000 \text{ cm}^3 = 1,188 \text{ g}$ で、その中に含まれる HCl の質量は

$$1,188 \text{ g} \times \frac{38.0}{100} = 451 \text{ g}$$

HCl (式量 36.46) の物質量は

$$\frac{451 \text{ g}}{36.46 \text{ g/mol}} = 12.37 \text{ mol}$$

この物質量の HCl が 1 L 中に含まれているので HCl の容量モル濃度は 12.37 mol/L。

コラム

市販の液体試薬のラベルに記載されている含量 (%) の表記は、原則として質量 % で記載することになっている。そのため質量あるいは容量 % などの記載がない。% のみが表示されている場合は質量 % として計算する。質量 % 以外の百分率濃度の場合は (v/v)% のように明記されている。

問 2 市販の酸及び塩基溶液の容量モル濃度を計算しなさい。

- ① 98.0% H₂SO₄, 密度 1.84 g/cm³
- ② 100% CH₃COOH, 密度 1.0498 g/cm³
- ③ 28.0% NH₃, 密度 0.898 g/cm³
- ④ 20% NaOH 水溶液, 密度 1.2 g/cm³

解

- ① H₂SO₄ 溶液 1 L の質量は 1,840 g で、その中に含まれる H₂SO₄ の質量は

$$1,840 \text{ g} \times \frac{98}{100} = 1,803 \text{ g}$$

硫酸 (98.08 g/mol) の物質量 (mol) としては

$$\frac{1,803 \text{ g}}{98.08 \text{ g/mol}} = 18.38 \text{ mol}$$

この物質量の H_2SO_4 が 1 L に含まれているので硫酸の容量モル濃度は 18.4 mol/L。

- ② 酢酸 1 L の重さは 1,050 g で、100% 酢酸中の酢酸の質量は

$$1,050 \text{ g} \times \frac{100}{100} = 1,050 \text{ g}$$

酢酸の物質量にすると

$$\frac{1,050 \text{ g}}{60.05 \text{ g/mol}} = 17.49 \text{ mol}$$

酢酸の容量モル濃度は 17.49 mol/L。

- ③ アンモニア溶液 1 L の質量は 898 g で、その中に含まれアンモニアの質量は

$$898 \text{ g} \times \frac{28}{100} = 251 \text{ g}$$

アンモニアの物質量は

$$\frac{251 \text{ g}}{17.03 \text{ g/mol}} = 14.7 \text{ mol}$$

アンモニアの容量モル濃度は 14.7 mol/L である。

- ④ 20%NaOH 水溶液 1 L の質量は 1,200 g で、その中に溶けている NaOH の質量は

$$1,200 \text{ g} \times \frac{20}{100} = 240 \text{ g}$$

NaOH の物質量は

$$\frac{240 \text{ g}}{40 \text{ g/mol}} = 6.0 \text{ mol}$$

容量モル濃度は 6.0 mol/L となる。

問 3 1.0 mol/L 硫酸溶液 100 mL を 98.0% H_2SO_4 (密度 1.84 g/cm³) から調製したい。何 mL の硫酸が必要か。

解

- ① 1.0 mol/L 硫酸溶液 100 mL を調製するのに必要な H_2SO_4 (98.08 g/mol) の質量は

$$1.0 \text{ mol/L} \times 0.1 \text{ L} \times 98.08 \text{ g/mol} = 9.81 \text{ g}$$

となる。98.0% H_2SO_4 の 1 L に含まれる H_2SO_4 の質量は

$$1,840 \text{ g} \times \frac{98}{100} = 1,803 \text{ g}$$

であるから、1 mL 中には 1.80 g の H_2SO_4 が含まれる。必要な 98.0% H_2SO_4 の体積は

$$\frac{9.81 \text{ g}}{1.80 \text{ g/mL}} = 5.45 \text{ mL}$$

1-3 | 分率濃度

百万分率濃度 (parts per million, ppm), 十億分率濃度 (parts per billion, ppb) 一兆分率濃度 (parts per trillion, ppt) の濃度の表しかたは環境分析, 水質分析などの分野でたびたび使用される。

$$\text{ppm} = \frac{\text{目的物質の質量} (\mu\text{g})}{\text{試料の質量} (\text{g})} \quad \text{または} \quad \text{ppm} = \frac{\text{目的物質の体積} (\mu\text{L})}{\text{試料の体積} (\text{L})}$$

$$\text{ppb} = \frac{\text{目的物質の質量} (\text{ng})}{\text{試料の質量} (\text{g})} \quad \text{または} \quad \text{ppb} = \frac{\text{目的物質の体積} (\text{nL})}{\text{試料の体積} (\text{L})}$$

$$\text{ppt} = \frac{\text{目的物質の質量} (\text{pg})}{\text{試料の質量} (\text{g})} \quad \text{または} \quad \text{ppt} = \frac{\text{目的物質の体積} (\text{pL})}{\text{試料の体積} (\text{L})}$$

質量 (w) 対質量 (w), 体積 (v) 対体積 (v) で表すのが原則である。溶液の密度が 1 とみなせる希薄溶液を対象としている場合は, 体積と質量は等しいので質量 (w) 対体積 (v) も使用される。

記号	w/w	w/v	v/v
ppm	$\mu\text{g/g}$	$\mu\text{g/mL}$	$\mu\text{L/L}$
ppb	ng/g	ng/mL	nL/L
ppt	pg/g	pg/mL	pL/L

グラムまたはリットルの前の接頭語はそれぞれ $\mu = 10^{-6}$, $\text{n} = 10^{-9}$,

$p = 10^{-12}$ を表す。

コラム

質量の基準

化学実験で目的物質の質量を測定する際には、質量をあらかじめ測定したガラス容器やプラスチック容器に物質を量りとり、天秤を用いて重さを測定する。物質をいれた容器の風袋 (tare) を差し引くと物質の重さがわかる。質量の SI 基本単位の大きさは国際 kg 原器の質量に等しいと定義されてきた。しかし、このような質量の基準が 2018 年 11 月に第 26 回国際度量衡総会において新しい定義に移行することが決議され、2019 年 5 月 20 日世界計量記念日から施行されることになった。

これまでの質量の基準は国際キログラム原器に基づいている。キログラム原器は白金 - イリジウム合金性の分銅であり、フランスパリ郊外にある国際度量衡局の一室に二重のガラスケースに入れられて厳重に保管されている。キログラム原器は多くの複製が各国配布されていて (日本ではつくばの産業技術総合研究所に保管)、測定機器の補正などに使われてきた。しかし、1989 年に国際キログラム原器と各国に配布されている複製を比べたところ、ほぼ指紋 1 個に相当する 100 万分の 50 グラムのずれが判明した。つまりキログラム原器の質量は時間とともに計時変化したと考えられる。そのため国際度量衡委員会は、基本単位としてのキログラムを見直すことを決めた。

新しい定義は

$$1 \text{ kg} = \frac{h}{6.626070040 \times 10^{-34} \text{ m}^{-2} \text{ s}}$$

であり、光に関係する Planck 定数 h を使用する。定義の決定の過程においては、プランク定数を正確に求める方法とアボガドロ定数を正確に求める方法とが検討された。プランク定数は電子の質量に関係しているので正確な値がわかれば計算から 1 kg が割り出される。また、後者は、純度の高いシリコン球体の体積、質量、格子定数、モル質量を正確に求めアボガドロ定数を決定する方法であるが、プランク定数 h とアボガドロ定数 N_A との間には厳密な関係式が存在するのでこちらで定義しても本質的な差異はない。

今回の改定では、“物質質量 (単位 mol) の定義も変わる。これまでは、“0.012 kg の ^{12}C の中に存在する原子の数に等しい数の要素粒子を含む系の物質質量”であったが、改定では

$$1 \text{ mol} = 6.022140857 \times 10^{23} / N_A$$

となる。

例題 3 次の濃度を計算しなさい。

- ① 乾燥土壌 1.02 g に Pb が 10.0 ng 含まれていた。何 ppb か。
- ② 1.00×10^{-5} mol/L CdCl₂ 溶液中の Cd²⁺ イオンの濃度は何 ppm か。
- ③ 1.0 ppm の Pb²⁺ を含む溶液のモル濃度はいくらか。

解

$$\textcircled{1} \quad \frac{\text{Pbの質量 (ng)}}{\text{試料の質量 (g)}} = \frac{10.0 \text{ ng}}{1.02 \text{ g}} = 9.80 \text{ ppb}$$

- ② 溶液 1 L 中に 1.00×10^{-5} mol の Cd²⁺ (原子量 112.4) を含む。Cd の質量は
 $1.00 \times 10^{-5} \text{ mol} \times 112.4 \text{ g/mol} = 1,124 \mu\text{g}$
 1 ppm = 1 $\mu\text{g/mL}$ なので、Cd²⁺ の百万分率濃度は

$$\frac{1124 \mu\text{g}}{1,000 \text{ mL}} = 1.12 \text{ ppm}$$

- ③ 1.0 ppm の Pb²⁺ 溶液の 1 mL 中に含まれる Pb (原子量 207.2) の質量は 1.0×10^{-6} g である。1 L 中には

$$\frac{1.0 \times 10^{-6} \text{ g}}{1 \text{ mL}} \times 1,000 \text{ mL} = 1.0 \times 10^{-3} \text{ g}$$

の Pb が含まれる。物質質量としては

$$\frac{1.0 \times 10^{-3} \text{ g}}{207.2 \text{ g/mol}} = 4.8 \times 10^{-6} \text{ mol}$$

したがって、Pb²⁺ の容量モル濃度は、 4.8×10^{-6} mol/L。

問 4 次の濃度を計算しなさい。

- ① 植物乾燥試料 1.40 g に 5.0 ng の Mn が含まれていた。Mn は何 ppb か。
- ② 250 mL 中に 6.0 μmol の Na₂SO₄ を含む溶液がある。何 ppm の Na を含むか。

解

$$\textcircled{1} \quad \frac{5.0 \text{ ng}}{1.40 \text{ g}} = 3.6 \text{ ppb}$$

② 6.0 μmol の Na_2SO_4 中の Na (原子量 23.0) の質量は

$$2 \times 6.0 \mu\text{mol} \times 23.0 \text{ g/mol} = 2.8 \times 10^2 \mu\text{g}$$

である。この質量の Na が 250 mL に含まれるので Na^+ イオンの百万分率濃度は

$$\frac{2.8 \times 10^2 \mu\text{g}}{250 \text{ mL}} = 1.1 \mu\text{g/mL} = 1.1 \text{ ppm}$$

問 5 次の計算をなさい。

10 ppm の Zn^{2+} を含む溶液 100 mL を塩化亜鉛 (II) から調製したい。必要な ZnCl_2 の質量 (g) はいくらか。

解

ZnCl_2 のモル質量は 136.3 g/mol である。10 ppm = 10 $\mu\text{g/mL}$ の Zn^{2+} を含む溶液 100 mL を調製するために必要な Zn の質量は

$$10 \mu\text{g/mL} \times 100 \text{ mL} = 1.0 \text{ mg Zn}$$

である。Zn の原子量は 65.4 であるから、必要な Zn の物質量は

$$\frac{1.0 \times 10^{-3} \text{ g}}{65.4 \text{ g/mol}} = 1.53 \times 10^{-5} \text{ mol}$$

これを ZnCl_2 から調製するためには

$$1.53 \times 10^{-5} \text{ mol} \times 136.3 \text{ g/mol} = 2.08 \times 10^{-3} \text{ g}$$

の ZnCl_2 を溶解して 100 mL の溶液とすればよい。