

明確な濃度表現

The definite expression of concentration

遠藤 忠利

Tadatoshi ENDO

1. はじめに

化学反応を行なうときは、化学物質を溶媒に溶かして、溶液という形の混合物として扱うことが多い。それは、反応の温度管理が楽であること、均一条件で反応が行なえること等により反応を制御し目的物を安全に得ることができるからである。また、溶液にしておくこと保管管理、使用方法が楽であること（塩酸、希硫酸、有機リチウム化合物等）、気体を溶媒に溶かせば量を確保しやすいこと（塩酸等）がある。これら混合物を扱う上でその中に注目している物質はどのくらい含まれているかを知る必要がある。混合物中の注目している物質の割合を表すのが濃度である。用いることが多いので、例として溶液について上げておいたが気体、固体でも濃度表現は行なえる。

濃度は混合物中の注目している物質の割合であるから、混合物の単位、注目している物質の単位、混合条件を明確にしておく必要があり、通常用いられる濃度は明確に規定されている。もちろん、自分で明確に規定すれば独自の濃度も表現は可能である。

明確な濃度表現を行なうときに問題となるのは、精度（実験誤差）を考慮している表現がその濃度の規定に外れる場合があることである。そのことを明記してあれば問題は無いが、学生ではどちらが正しい表現なのか混乱する場合がある。そこで、一般的な濃度についてまとめ、どのようなときに不明確になるかについて考えてみた。

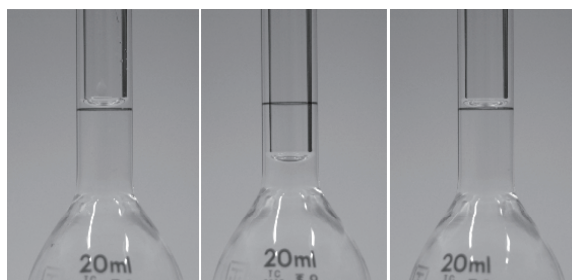
2. 濃度の種類

まず、溶液の濃度で用いる言葉の定義を明確にしておく。他の物質を溶かす液体を溶媒、溶媒に溶ける物質を溶質、溶解によって生じる均一な液体を溶液と呼ぶ。これも、溶質が液体の場合は溶媒と溶質が不明瞭になるが、注目しているものが溶質と考えればよい（酢酸のベンゼン溶液、ベンゼンの酢酸溶液）。

また、質量は加成性があるが、容量は加成性がない。これを間違えて不明確になることが多い。つまり、

水 10g + アルコール 10g = アルコール水 20g
 水 10mL + アルコール 10mL ≠ アルコール水 20mL
 となる（図1）。

図1 20mL メスフラスコに 10mL ホールピペットで 2 回エタノールを入れた場合（左）、エタノールと水を 1 回ずつ入れた場合（中）、2 回水を入れた場合（右）。同じメスフラスコ、ホールピペットを用いている。明らかにエタノールと水を混合すると容量が減る。



次に化学でよく用いられるいくつかの一般的な濃度と単位をまとめた。¹⁾

① 質量パーセント濃度

溶液の質量に対する溶質の質量の割合を百分率で表した濃度である。したがって、溶液 100g に含まれる溶質の質量を g で表したものになる。単位は%であるが、ディメンションは無い。質量に基づいているので溶液の質量は「溶質の質量 + 溶媒の質量」で表せる。

質量パーセント濃度は溶質、溶媒がどのような物質であるかわからなくても質量さえ測定すれば濃度を表すことができる。さらに、溶質が混合物であっても濃度を表すことができる。

② 容量パーセント濃度

2 種類以上の液体を混合するときに混合前の容量比を百分率で表す濃度。単位は%であるが v/v などの表記をして質量パーセント濃度と区別する。質量パーセント濃度と同様にディメンションは無い。

例 日本では酒類のアルコール度数として、エタノールの容量パーセント濃度を用いている。1 度 = 1%で、

明確な濃度表現

15°Cでの測定による。

容量には加成性が無いので混ぜたときの容量は不明になる。もともと、有機溶媒で使用する機会が多いので温度による体積変化が大きいこともあり、精密な濃度の表現より、簡便な混合溶媒の割合を表すことの方が多い。もちろん、溶質、溶媒がどのような物質であるかわからなくても表現できる。

③ モル濃度 (molarity)

溶液 1L 中に含まれる溶質の量を物質質量 (mol) で表した濃度。容量モル濃度とも呼ぶ。単位は mol/L (モル/L, M で表すこともある)。化学では、反応を行なったとき、体積中に何個の粒子が含まれているかが必要になるため個数を表す物質質量が含まれるこの濃度が重要になる。容量に基づくので、大きな温度変化が関わる場合は不正確になるが、常温では問題は無い。容量器を用いて正確にうすめることができるので扱いがしやすい。当然、溶質の分子量、式量 (モル質量) が解らないと濃度を定めることができない。溶質の分子量と溶液の密度がわかれば質量パーセント濃度との変換が行なえる。

式 1 分子量 (モル質量) M の物質の質量パーセント濃度 a% の溶液のモル濃度。密度は d (g/mL)。

$$\frac{1000(\text{mL}) \times d(\text{g/mL}) \times \frac{a}{100}}{1(\text{L}) \times M(\text{g/mol})} \quad (\text{mol/L})$$

④ 質量モル濃度 (molality)

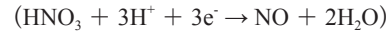
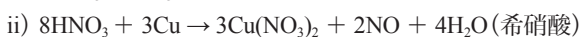
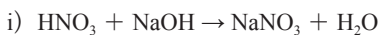
溶媒 1kg に溶けている溶質の量を物質質量 (mol) で表した濃度。単位は mol/kg。温度が変化すると溶媒の体積は変化するので、容量モル濃度は変化する。しかし溶媒の質量は温度によって変化しない。このため、沸点上昇、凝固点降下といった温度変化がある実験では質量モル濃度が用いられる。溶質の分子量がわかれば、質量パーセント濃度との変換が行える。

式 2 分子量 (モル質量) M の物質の質量パーセント濃度 a% の溶液の質量モル濃度

$$\frac{1000(\text{g}) \times \frac{a}{100}}{\frac{100-a}{100} \times 1(\text{kg}) \times M(\text{g/mol})} \quad (\text{mol/kg})$$

⑤ 規定度 (normality)

溶液 1L 中に含まれる溶質をグラム当量で表した濃度で、単位は N で表すが、ディメンションは mol/L である。グラム当量数は「酸として、塩基として」あるいは「酸化剤として、還元剤として」のように、溶質のはたらきを明確にした上でないと決められない。



たとえば、硝酸について i) の反応は酸塩基反応で硝酸 1mol は、水素イオン 1mol を電離するので「硝酸 1mol = 1 グラム当量」になり、ii) の反応は酸化還元反応で希硝酸 1mol は、電子 3mol を受け取るので「硝酸 1mol = 3 グラム当量」になる。したがって、「酸として硝酸は 1M=1N」、「酸化剤として希硝酸は 1M=3N」になる。酸塩基反応なら H⁺ や OH⁻、酸化還元反応なら半反応式の e⁻ に注目すれば、簡単に通常のモル濃度と関係づけられる。

規定度は中和滴定、酸化還元滴定において、同じ濃度なら、同体積で反応が完結するのでよく用いられる。

⑥ モル分率 (mole fraction)

溶液、気体の構成成分 A、B の物質質量を n_A、n_B としたとき、物質 A、B のモル分率 X_A、X_B を次のように表す。単位、ディメンションとも無し。

式 3 A、B それぞれのモル分率

$$X_a = \frac{n_a}{n_a + n_b}, \quad X_b = \frac{n_b}{n_a + n_b}$$

溶液の場合、通常、溶媒にあたる物質は大過剰になることが多いのでモル分率を用いる機会は少ない (1mol/L の水溶液で考えても、0.02 と 0.98 程度となる)。気体の場合は、常温、常圧では理想気体と考えられる。同温同圧では体積は物質質量と置き換えられるので、混合するそれぞれの気体の体積を測定すればよいのでモル分率はよく用いられる。

式 4 体積 V_a と V_b の気体を混合したときのモル分率 (同温、同圧)

$$X_a = \frac{V_a}{V_a + V_b}, \quad X_b = \frac{V_b}{V_a + V_b}$$

⑦ 希釈度 (dilution)

1mol の溶質を含む溶液の体積 (L) で表す方法。モル濃度の逆数となる。単位は L/mol。

⑧ 溶解度 (solubility)

主として飽和溶液を表すときのみ用いられる方法で、100g の溶媒に溶ける溶質の質量 (g) で表される。

⑨ ブンゼンの吸収係数

溶液中に溶けている気体の溶解度を表すのに用いる。標準状態に換算した気体の容積を液体容積で除した値。溶解度の少ない気体に用いられる。

⑩ その他

蒸気圧、絶対湿度、分配係数なども濃度表現といえる。また、プロミル (全体を 1000 として表示する分率、0/00)、ピーピーエム (全体を 100 万として表示する分率、ppm)、ピーピービー (全体を 10 億として表示する分率、ppb) など濃度表現に用いられる。

3. 精度を考慮した設問例

出題者が経験上精度を考えて作成した設問が、正確な表現にならない例をあげる。大学では実際の研究を進める上での器具等の精度²⁾に基づいて濃度表現を行なうことが多いが、高校までは教科書に基づく正確な濃度表現を行なっている。学生が今までに学んだことから出題者の意図を理解できるかが問題となる。実際に差があるか試した結果も示す。

① 0.1%の塩化ナトリウム水溶液のモル濃度を求めよ。

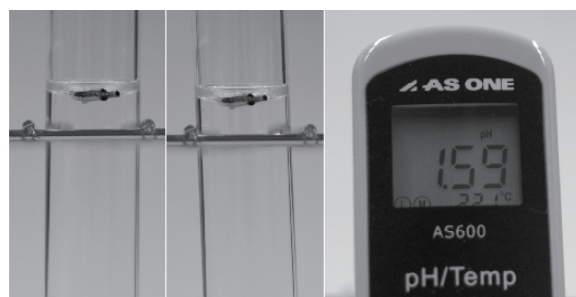
- 出題者が求めている解答：塩化ナトリウムの分子量は 58.5 である。1000g 中に 1g の塩化ナトリウムが入っている。よって、 $1/58.5 = 0.017\text{mol/L}$ である。
- 濃度表現の問題部分：0.1%塩化ナトリウム水溶液 1000g は 1L ではない。純水なら $1000\text{g} = 1\text{L}$ としてもかまわないが（正確には 4°C の純水とすべきである）、溶液では成り立たない。
- 出題者が意図している精度：実際に測定すると容量器の精度以内に収まる程度の希薄溶液である。
- 実際に試した結果：水 99.892g に塩化ナトリウム 0.101g 加えた溶液 (0.101%) を 10mL ホールピペットでとり質量を量ると 9.964g (2 回平均) であった。同じホールピペットで水をとる、質量を量ると 9.967g (2 回平均) であった。ホールピペットの精度は小数点以下 2 桁なので、二つの値は同じとしてよい。
- 正確な設問：0.1%の塩化ナトリウム水溶液のモル濃度を求めよ。ただし、この水溶液の密度は 1g/mL としてよい。

② 0.1mol/L-HCl 10.00mL に 0.1mol/L-NaOH を加えていったときの pH 滴定曲線をいくつかの点を計算によって求め結ぶことでグラフを書け。

- 出題者が求めている解答：強酸強塩基の滴定曲線である。加えた 0.1mol/L-NaOH の体積を $x\text{ mL}$ とすると、溶液の体積は $x+10.00\text{ mL}$ 、中和によって消費した 0.1mol/L-HCl の体積は $10.00-x\text{ mL}$ だから、滴下後の HCl の濃度 C は $C=0.1 \times (10.00-x)/(x+10.00)\text{ mol/L}$ になる。塩酸は強酸だから $[\text{H}^+] = C$ となり $\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$ より pH を求める (10.00mL 以上加えたときは $[\text{OH}^-] = 0.1 \times (x-10.00)/(x+10.00)$ とし、 $\text{pH} = 14 - \text{pOH}$ で求めればよい)。いくつかの点を計算しプロットしてグラフにする。
- 濃度表現の問題部分：体積の加成性が成り立たないことを考えれば 0.1mol/L-HCl 10.00mL に 0.1mol/L-NaOH $x\text{ mL}$ 加えた後の溶液の体積は $x+10.00\text{ mL}$ にならない。まして、中和反応を行なった後ではどのようなことになるかわからない。

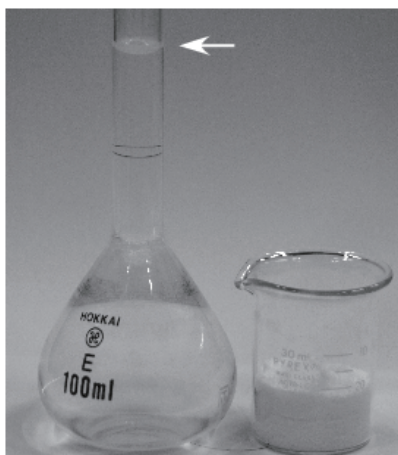
- 出題者が意図している精度：酸塩基共に希薄な溶液であるので、加えて中和反応が進んでも体積の加成性は成り立つと考えられる。また、pH は濃度の対数なので濃度変化に対して変化量が小さいので、グラフの形には影響は無いと考えられる。
- 実際に試した結果：0.1mol/L-HCl 10.00mL に 0.1mol/L-NaOH 5.00mL 加えると図 2 のようになり、全体積は 15.00mL としても問題は無い。その pH を計算すると $\text{pH} = 1.5$ となり、問題なくグラフを描くことができる。

図 2 水を 10mL と 5mL ホールピペットを 1 回ずつ用いて 15mL を試験管に入れた場合 (左)。0.1mol/L-HCl 10mL に 0.1mol/L-NaOH 5mL を加えた場合 (中) および、その pH (右)。



- 正確な設問：計算によって 0.1mol/L-HCl 10.00mL に 0.1mol/L-NaOH を加えていったときの pH 滴定曲線を書きたい。0.1mol/L-NaOH を加えたときの pH をいくつかの点で計算して滴定曲線を書け。ただし、体積の加成性は成り立つものとし、水の電離、中和後に生じた塩は水素イオン濃度に影響しないものとする。
- 1mol/L ブドウ糖水溶液と 1mol/kg ブドウ糖水溶液ではどちらが濃い溶液か。
 - 出題者が求めている解答：ブドウ糖は分子量 180 である。溶液 1L 中に 180g 溶けているのが 1mol/L。水 $1\text{kg} = 1\text{L}$ に 180g を加えたのが 1mol/kg。1mol/L 溶液 1L 中には水は 1L 入っていないから 1mol/L の方が濃い溶液である。
 - 濃度表現の問題部分：「1mol/L 溶液 1L 中に水は 1L 入っていない」という部分が問題となる。1L の水にブドウ糖を溶かせば体積 1L 以上になると思えるが、容量に関してはわからないとする立場であるから不正確な表現になる。
 - 出題者が意図している精度：常識的な感覚で 1L の水にブドウ糖を溶かせば体積 1L 以上になる。
 - 実際に試した結果：図 3 のように 100mL メスフラスコを水で満たしておき、そこにブドウ糖を 6g 加えただけで大きく体積は増加している。

図3 水を満たした 100mL メスフラスコに 6g のブドウ糖を入れた場合。残りのブドウ糖は 12g ある。



e. 正確な設問：1mol/L ブドウ糖水溶液と 1mol/kg ブドウ糖水溶液ではどちらが濃い溶液か。ただし、1mol のブドウ糖を 1L の水に溶かすと体積は 1L 以上になるものとする。

④ 物質 A の水溶液 (1mg/mL) が 10mL ある。この溶液に何 mL の水を加えると 0.5mg/mL の水溶液ができるか。

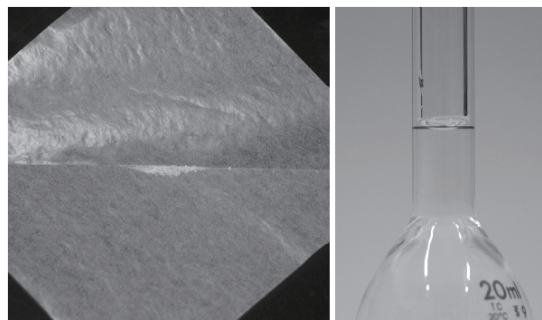
a. 出題者が求めている解答：濃度が半分になるのだから、体積を 2 倍にすれば良い。よって 10mL 水を加えればよい。

b. 濃度表現の問題部分：この設問には 2 ヶ所不明確な部分がある。まず、「1mg/mL」という濃度表現の部分である。水 1mL (溶媒) に物質 A を 1mg (溶質) 溶かしたのか、水溶液 (溶液) 1mL 中に 1mg の物質 A (溶質) が含まれるのかはつきりしないからである。また、前述の一般的な濃度の中にはこの表現は含まれていない。密度 (g/mL) と同様な単位となるので用いるときは明確にすべきであるという点も考えると一般的ではない。したがって、学生への設問中にはきちんと明記する必要がある。「質量 / 体積」で濃度表現をしている例として比旋光度における溶液の濃度があるが、「溶液 100mL 中に 1g の溶質が含まれる場合を c=1 と表現する」と明記されているのでこのような不明確な部分は生じない。もう一つの不明確な部分は、異なる溶液を加えたとき、正確には体積の加性が無いことである。物質 A の水溶液 10mL に水 10mL を加えても 20mL にならないと考えるべきである。

c. 出題者が意図している精度：水 10mL 中に 10mg 溶かした溶液でも、水溶液 10mL 中に溶けている量が 10mg でも多くの場合、実験誤差以内になる。同様に溶液 10mL に水 10mL 加えれば、実験誤差以内で 20mL になる。

d. 実際に試した結果：水で満たした 20mL メスフラスコに塩化ナトリウムを 20mg 加えると図 4 のようにほとんど体積は変化しない。

図 4 薬包紙 (1 辺 10cm) の中の 20mg の塩化ナトリウムとそれを加えた水で満たした 20mL メスフラスコ。



e. 正確な設問：水 10mL に物質 A を 10mg 溶かした水溶液がある。この水溶液に何 mL の水を加えると半分の濃度の水溶液ができるか。または、物質 A を 10mg 溶かした水溶液が 10mL ある。この水溶液に何 mL の水を加えると半分の濃度になるか。ただし、混合に関して体積の加性は成り立つものとする。

⑤ フッ化ナトリウムを 11% 含有の薬品 1g を水 200mL に溶かすと何 ppm のフッ化物イオンを含む溶液になるか。

a. 出題者が求めている解答：水 200mL は 200g と考え次式により 0.055% のフッ化ナトリウム水溶液になる。

$$\frac{11}{100} \times \frac{1}{200} \times 100 = 0.055\%$$

フッ化ナトリウムの分子量は 42.0 で、フッ素の原子量は 19.0 であるから、 $0.055 \times 19.0 / 42.0 = 0.0249\% = 249\text{ppm} \div 10 \approx 250\text{ppm}$

b. 濃度表現の問題部分：求めている解答のような計算であれば、水 199g に 1g とする。また、「フッ化物イオンが何 g ある、何% ある」という表現は高校ではほとんど用いられない。化学種の質量を用いて質量パーセント濃度を規定していないからである。また、フッ化水素は弱酸であり水溶液中では $\text{F}^- + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HF} + \text{OH}^-$ という平衡でフッ化物イオンを消費するので、フッ化物イオン量は電離定数を用いて計算する必要がある。

c. 出題者が意図している精度：これは、薬剤をうすめて洗口液を作る例である。したがって、必要な精度で溶液を作り、その濃度を把握できればよい。

d. 実際に試した結果：操作どおりの質量パーセント

濃度および電離平衡を考慮した計算を行なってみると次のようになる。

質量パーセント濃度は、次のようになりほぼ同じになる。

$$\frac{11}{100} \times 1 \times \frac{100}{201} \times 100 = 0.0547 \approx 0.055\%$$

電離平衡については、電離反応の反応式は、 $\text{NaF} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{F}^-$ 、および、 $\text{F}^- + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HF} + \text{OH}^-$ より、フッ化水素の電離定数を K 、仕込み濃度を C として、

$$K = \frac{[\text{H}^+][\text{F}^-]}{[\text{HF}]}$$

$$[\text{H}^+][\text{OH}^-] = k_w$$

$$[\text{HF}] = [\text{OH}^-]$$

$C = [\text{HF}] + [\text{F}^-]$ が成り立つから、

$$[\text{F}^-] = \frac{\left(\frac{K_w}{K} + 2C\right) \pm \sqrt{\left(\frac{K_w}{K} + 2C\right)^2 - 4C^2}}{2}$$

となつて、 $C = 1.3 \times 10^{-2} (\text{mol/L})$ (1L に 0.55g 溶けているとする)、 $K_w = 1.0 \times 10^{-14} (\text{mol/L})^2$ 、 $K = 3.5 \times 10^{-4} (\text{mol/L})$ を代入すると、結局、 $[\text{F}^-] = 1.3 \times 10^{-2} (\text{mol/L})$ となり、 $[\text{F}^-] = C$ になる ($K_w/K + 2C \approx 2C$ と近似したことと同じ)。したがって、質量パーセント濃度も同じになり、求める ppm も上記の解答と同じになる。

- e. 正確な設問：フッ化ナトリウムを 11% 含有の薬品 1g を水 200mL に溶かすと何 ppm のフッ化物イオンを含む溶液になるか。ただし、含有量から考えて、試薬を加えて得られた溶液は 200g として計算せよ。また、生じたフッ化物イオンの物質量は、もとのフッ化ナトリウムの物質量と同じとし、原子量の割合で質量を計算してよい。

4. まとめ

いくつかの例を見てきたが、いずれの設問も出題者が求めている解答が実際に試した結果とほぼ同じになることがわかる。つまり、実験精度上は全く問題がない。しかし、学生に設問として解答を求めるときは、学生が濃度の定義、実験の精度などを理解しないで解答をすることも考えなくてはならない。また、濃度の定義を高校できちんと学習し理解している学生には、解答できないという混乱をもたらす、知識があやふやになる恐れがある。したがって、教育をするときは、正確な表現を行ない、実際に実験等で行うときは、それぞれの実験の精度に基づく説明を行い、解答を求めるようにした方が良いと思われる。筆者は「質量の足し算はできるが、容量の足し算はできない」ということを授業中に何回も繰り返し話している。

引用文献

- 1) 遠藤忠利、岡淳子「化学 - 材料を扱うすべての人へ -」、開成出版 (2008 年)
- 2) 遠藤忠利、「鶴見大学紀要」第 49 号、第 4 部 pp99-102 (2012 年)

明確な濃度表現

The definite expression of concentration

歯学部学内教授 遠藤忠利