

二成分系水溶液の希釈に伴う体積変化に関する考察 (4)

— 炭酸ナトリウム水溶液および炭酸カリウム水溶液 —

中 川 徹 夫

Consideration on Volume Change in Diluting Binary Aqueous Solutions, Part 4

— Aqueous Sodium Carbonate and Potassium Carbonate Solutions —

NAKAGAWA Tetsuo

要 旨

著者はこれまでに二成分系溶液の希釈後の体積 (V_M) の推算式を誘導し、種々の水溶液に応用した。本研究では、この式を用いて、20℃で炭酸ナトリウム (Na_2CO_3) および炭酸カリウム (K_2CO_3) 水溶液を水で希釈した場合の V_M を算出した。希釈前の Na_2CO_3 および K_2CO_3 水溶液の濃度は、溶質の質量分率でそれぞれ0-0.1500、0-0.5000とした。希釈前の水溶液と加えた水の体積比は、1.000 mL : 9.000 mL、3.000 mL : 7.000 mL、5.000 mL : 5.000 mL、7.000 mL : 3.000 mL、9.000 mL : 1.000 mL とした。いずれの水溶液も、希釈前の溶液の濃度の増加とともに体積は減少した。混合の体積比が 5.000 mL : 5.000 mL の場合に体積は最小値を示し、 Na_2CO_3 水溶液では9.959 mL、 K_2CO_3 水溶液では9.753 mLであった。このように、希釈後に有意な体積変化が認められた。本手法を用いれば、実験を行うことなく容易に V_M を推算できるので、高校理科の教材として有用である。

キーワード：二成分系水溶液、希釈、体積変化、マイクロスケール実験、炭酸ナトリウム、炭酸カリウム

Summary

The author has already derived the method of estimating the volume of a diluted binary solution (V_M), and applied it to various aqueous solutions. In this paper, the method is applied to sodium carbonate (Na_2CO_3) and potassium carbonate (K_2CO_3) aqueous solutions in order to examine volume changes in diluting these solutions with water at 20°C using their density data. The concentration ranges of original Na_2CO_3 and K_2CO_3 aqueous solutions are 0-0.1500 and 0-0.5000 mass fractions of solutes respectively. The volume ratios of the original aqueous solution to the added water are 1.000 mL : 9.000 mL, 3.000 mL : 7.000 mL, 5.000 mL : 5.000 mL, 7.000 mL : 3.000 mL, and 9.000 mL : 1.000 mL. For both solutions, as the concentrations of the original solution are increasing, the values are decreasing, and their minimums are 9.959 mL for the Na_2CO_3 aqueous solution and 9.753 mL for the K_2CO_3 aqueous one at the ratio 5.000 mL : 5.000 mL. The obvious volume decreases are recognized after diluting original solutions. Using this method, the V_M values can be simply estimated without performing experiments, and therefore it is useful as teaching material for high school science.

Keywords: binary aqueous solution, dilution, volume change, microscale experiment, sodium carbonate, potassium carbonate

1 はじめに

液体や溶液は混合に伴い、体積の加成性が破綻する。とりわけ、混合に伴い体積が減少する場合が多い。これまでに、マイクロスケール実験と理論計算を組み合わせた手法を用いて、アルコールと水の混合に伴う体積変化に関して定量的に検討し、教材化を試みた¹⁻⁵⁾。さらに、溶質と溶媒からなる二成分系溶液に溶媒を加え、希釈後の体積を算出する方法を理論的に誘導した。そして、D-グルコース（ブドウ糖）とスクロース（ショ糖）の水溶液⁶⁾や、塩化ナトリウムと塩化カリウムの水溶液⁷⁾、水酸化ナトリウムと水酸化カリウムの水溶液⁸⁾を水で希釈した場合の体積変化に関する教材化についても試みた。

本研究では、前報⁶⁻⁸⁾で誘導した結果を用いて、アルカリ金属の炭酸塩である炭酸ナトリウム Na_2CO_3 と炭酸カリウム K_2CO_3 の水溶液に適用し、これらを希釈する際の体積変化について検討した。この2種類の水溶液を研究対象にした理由は、以下の通りである。第一に、いずれの水溶液も、これまでに研究対象とした水溶液と同様に、高等学校理科の授業でよく用いられ、教員や生徒にとってなじみ深い試薬である。第二に、いずれも強塩基性の水溶液で前回用いた水酸化ナトリウムおよび水酸化カリウム水溶液⁸⁾同様危険性が大きい⁹⁾が、本計算方法により実験を行わなくても混合後の体積を算出できる。第三に、カウンターアニオンである CO_3^{2-} が共通であるため、希釈における体積減少と Na^+ 、 K^+ のイオン間の相違との関係が考察できる。加えて、前報⁷⁻⁸⁾との比較により、アニオンの相違、特にアニオンの価数による体積減少への影響についても検討することができる。

2 理論

2-1 二成分系溶液の希釈後の体積

いま、それぞれ一種類の溶質（成分1）と溶媒（成分2）からなる濃度既知の溶液Aがあり、温度、圧力一定の条件で溶媒Sを加えて希釈し、濃度未知の溶液Mを調製する。その体積 V_M は、希釈前後で全体の質量が保存されることにより、

$$V_M = \frac{V_A d_A + V_S d_S}{d_M} \quad (1)$$

により算出できる⁶⁾。ここで、 V_A 、 V_S はそれぞれ溶液A、溶媒Sの体積、 d_A 、 d_M 、 d_S はそれぞれ溶液A、溶液M、溶媒Sの密度である。

2-2 二成分系溶液の希釈後の密度と濃度

式(1)より、 V_M の算出には、 d_M 、 d_A 、および d_S の値が必要となる。二成分系溶液の場合、その密度は溶質濃度の関数であり、つぎの経験式で表現できる⁶⁾。

$$d(w_1) = d_s + \sum_{i=1}^n a_i w_i^i \quad (2)$$

ここで w_1 は溶質の質量分率、 a_i は係数である。

溶液 M に含まれる溶質の質量分率 $w_{M,1}$ は、

$$w_{M,1} = \frac{w_{A,1} V_A d_A}{V_A d_A + V_S d_S} \quad (3)$$

で求められる⁶⁾。ここで、 $w_{A,1}$ は溶液 A に含まれる溶質の質量分率である。式(2)に $w_{A,1}$ や $w_{M,1}$ を代入して d_A や d_M を算出し、得られた値を式(1)に代入すれば、 V_M を推算できる。

溶液中の溶質の濃度は質量分率 w_1 以外に、モル分率 x_1 で表現することも可能である。両者の間には、つぎの関係式が成立する⁹⁾。

$$x_1 = \frac{w_1 M_2}{w_1 M_2 + (1-w_1)M_1} = \frac{w_1 M_2}{w_1(M_2 - M_1) + M_1} \quad (4)$$

ここで、 M_1 、 M_2 はそれぞれ溶質、溶媒のモル質量である。

3 計算

3-1 対象とした系とデータソース

本研究では、常圧、20°Cにおいて炭酸ナトリウム水溶液および炭酸カリウム水溶液を水で希釈した場合を対象とした。すなわち、溶質が炭酸ナトリウムおよび炭酸カリウム、溶媒が水に相当する。

常圧、20°Cにおける水溶液の密度¹⁰⁾および水の密度¹¹⁾ ($0.9982067 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$) に関しては、CRCハンドブックより引用した。最小二乗法により、 w_1 に対して水溶液の密度 d を式(2)の2、3、および4次式に回帰し、係数 a_i を算出した。ただし、 d_s は $0.9982067 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$ とした。

3-2 希釈後の体積の推算

式(1)を用いて、希釈前の炭酸ナトリウム水溶液および炭酸カリウム水溶液の体積 V_A と加えた水の体積 V_S がそれぞれ、1.000 mL と9.000 mL、3.000 mL と7.000 mL、5.000 mL と5.000 mL、7.000 mL と3.000 mL、9.000 mL と1.000 mL、すなわち、希釈前の水溶液と水の体積の合計 $V_A + V_S$ が10.000 mL となる場合について、希釈後の体積 V_M を推算した。

希釈前の水溶液の質量分率 $w_{A,1}$ は、炭酸ナトリウム水溶液に関しては水に対する溶解度が小さいため0から0.1500 (飽和水溶液)、炭酸カリウム水溶液に関しては0から0.5000 (飽和水溶液) とし、前者については0.0100、後者については0.0200間隔で V_M を算出した。また水溶液の密度 d の算出には、式(2)を用いた。

V_M を推算した順序は、以下の通りである。

- (1) $w_{A,1}$ を式(2)に代入して d_A を算出した。
- (2) V_A 、 V_S 、 d_A 、 d_S 、 $w_{A,1}$ を式(3)に代入して $w_{M,1}$ を算出した。
- (3) $w_{M,1}$ を式(2)に代入して d_M を算出した。
- (4) V_A 、 V_S 、 d_A 、 d_S 、 d_M を式(1)に代入して V_M を推算した。

4 結果と考察

4-1 水溶液の密度の濃度関数式の決定

4-1-1 炭酸ナトリウム水溶液

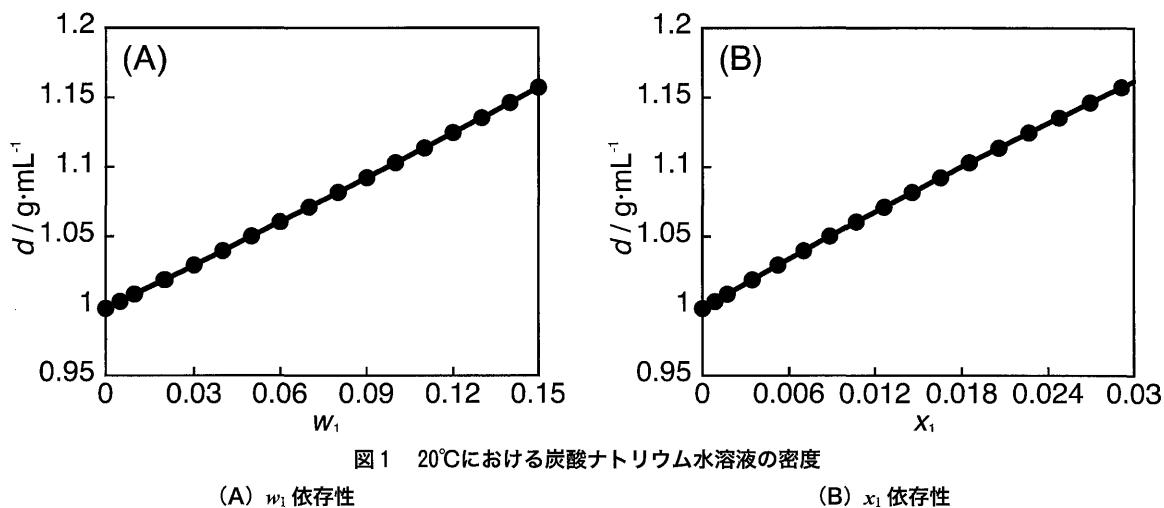


図1 20°Cにおける炭酸ナトリウム水溶液の密度

(A) w_1 依存性

(B) x_1 依存性

図1に、炭酸ナトリウム水溶液の密度 d の濃度依存性を示す。 d は w_1 、 x_1 いずれに関してもほぼ線形的に増大し、式(2)で回帰可能である。表1に、最小二乗法により d を w_1 に対して回帰して得られた係数 a_i と標準偏差 σ を示す。いずれの場合も回帰式の σ は極めて小さく、回帰式は実測値をよく再現している。また、回帰式の次数 n の増大とともに σ も減少した。

表1 炭酸ナトリウム水溶液の密度 d の回帰係数 a_i と標準偏差 σ

	$a_1/\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	$a_2/\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	$a_3/\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	$a_4/\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	$a_5/\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	$\sigma/\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$
$n = 2$	1.0256	0.22653	—	—	—	1.5×10^{-4}
$n = 3$	1.0406	-0.097394	1.5734	—	—	2.0×10^{-5}
$n = 4$	1.0426	-0.17571	2.4664	-3.0977	—	1.7×10^{-5}

n : 回帰式の次数

表2に、種々の w_1 に対する d の文献値と計算値を示す。いずれの場合も、密度の計算値は実測値の $10^{-3} \text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ の位まで再現した。さらに、 n が3以上の場合には、計算値は実測値とほぼ完全に一致した。そこで、 d の回帰式として3次式(表1の $n=3$)を採用し、 V_M を 10^{-3}mL の位まで算出した。

表2 炭酸ナトリウム水溶液の密度 d の比較

w_1	0.0500	0.0800	0.1000	0.1100	0.1400	0.1500
$d_{\text{obsd}}/\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	1.0502	1.0816	1.1029	1.1136	1.1463	1.1574
$d_{\text{calcd}}/\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ ($n = 2$)	1.0501	1.0817	1.1030	1.1138	1.1462	1.1571
$d_{\text{calcd}}/\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ ($n = 3$)	1.0502	1.0816	1.1029	1.1136	1.1463	1.1574
$d_{\text{calcd}}/\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ ($n = 4$)	1.0502	1.0816	1.1029	1.1136	1.1463	1.1574

w_1 : 炭酸ナトリウムの質量分率、 d_{obsd} : 実測値¹⁰⁾、 d_{calcd} : 計算値、 n : 回帰式の次数

4-1-2 炭酸カリウム水溶液

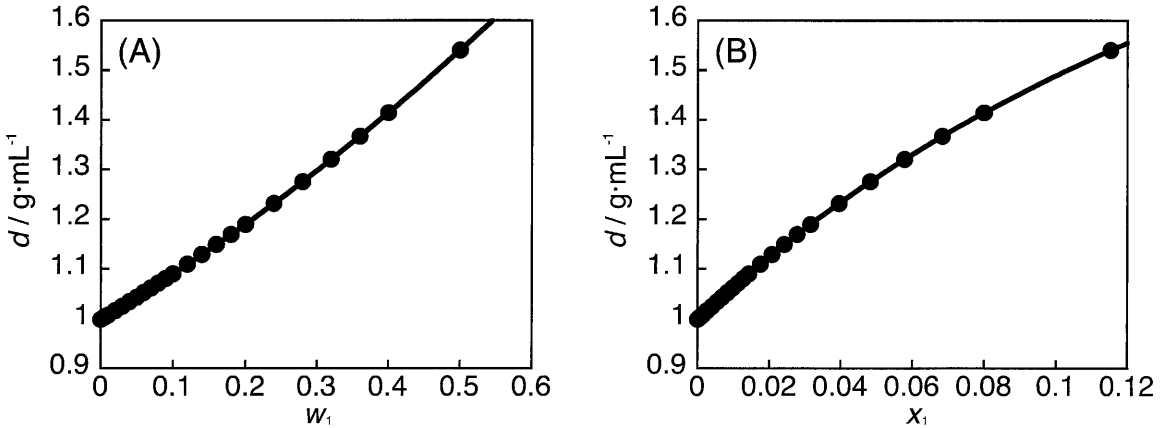


図2 20°Cにおける炭酸カリウム水溶液の密度

(A) w_1 依存性

(B) x_1 依存性

図2に、炭酸カリウム水溶液の密度の濃度依存性を示す。密度 d の値は w_1 、 x_1 いずれに対しても単調に増加し、式(2)で回帰可能である。表3に、最小二乗法の手法により、 d を w_1 に対して回帰して得られた係数 a_i と標準偏差 σ を示す。炭酸カリウムは水に対する溶解度が大きく、 d を広い濃度範囲で回帰したため、いずれの回帰式の σ の値も、炭酸ナトリウムのそれに較べて一桁程度大きくなった。また、回帰式の次数 n の増大とともに σ も減少した。

表3 炭酸カリウム水溶液の密度 d の回帰係数 a_i と標準偏差 σ

	$a_1/\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	$a_2/\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	$a_3/\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	$a_4/\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	$a_5/\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	$\sigma/\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$
$n = 2$	0.87649	0.41189	—	—	—	4.8×10^{-4}
$n = 3$	0.88799	0.32741	0.13129	—	—	1.7×10^{-4}
$n = 4$	0.89305	0.25910	0.38337	-0.27331	—	4.0×10^{-5}

n : 回帰式の次数

表4に、種々の w_1 に対する d の文献値と計算値を示す。いずれの場合も、密度の計算値は実測値を $10^{-2} \text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ の位まで再現した。さらに、 n が4以上の場合には、計算値は実測値の $10^{-3} \text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ の位まで再現した。 d の回帰式としては、 σ の値が一桁小さくなる4次式(表3

表4 炭酸カリウム水溶液の密度 d の比較

w_1	0.0500	0.1000	0.1600	0.2000	0.4000	0.5000
$d_{\text{obsd}} / \text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$	1.0437	1.0904	1.1490	1.1898	1.4142	1.5404
$d_{\text{calcd}} / \text{g} \cdot \text{mL}^{-1} (n = 2)$	1.0431	1.0900	1.1490	1.1900	1.4147	1.5395
$d_{\text{calcd}} / \text{g} \cdot \text{mL}^{-1} (n = 3)$	1.0434	1.0904	1.1492	1.1900	1.4142	1.5405
$d_{\text{calcd}} / \text{g} \cdot \text{mL}^{-1} (n = 4)$	1.0436	1.0905	1.1491	1.1898	1.4144	1.5403

w_1 : 炭酸カリウムの質量分率、 d_{obsd} : 実測値¹⁰⁾、 d_{calcd} : 計算値、 n : 回帰式の次数

の $n=4$) を採用し、 V_M を 10^{-3} mL の位まで算出した。

4-2 希釈した水溶液の体積

4-2-1 炭酸ナトリウム溶液

水に対する炭酸ナトリウムの溶解度は比較的小さく、 20°C では質量分率にして0.15程度である。したがって、濃厚な水溶液は調製できないため、希釈した際の体積変化も僅少であることが予想される。図3に、 20°C における炭酸ナトリウム水溶液の希釈後の体積を示す。ごく僅かではあるが、全濃度範囲で体積減少が認められた。また、炭酸ナトリウムの濃度が增大するにつれて体積減少率が増大し、 $V_A=5.000$ mL、 $V_S=5.000$ mL の場合に V_M は最小値を示した。

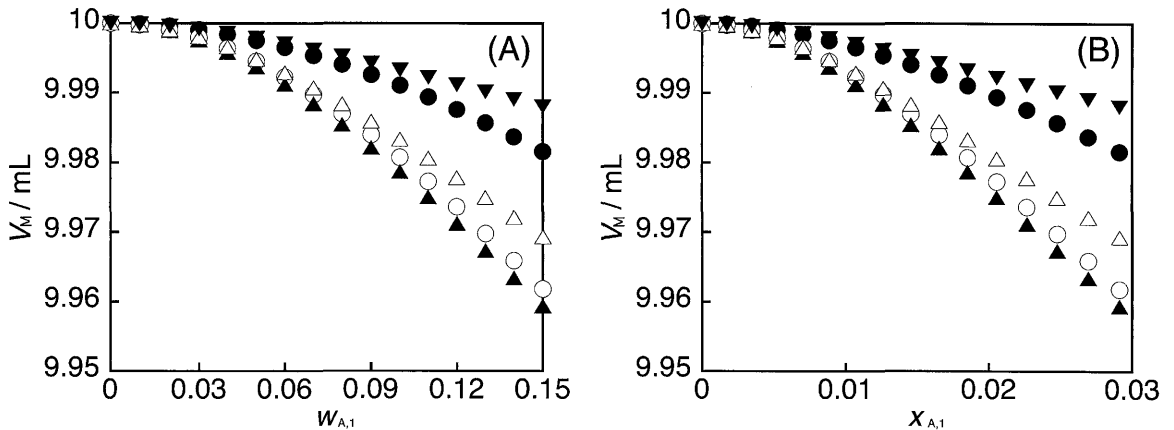


図3 20°C における炭酸ナトリウム水溶液の希釈後の体積

(A) $w_{A,1}$ 依存性

(B) $x_{A,1}$ 依存性

- : $V_A=1.000$ mL, $V_S=9.000$ mL, ○: $V_A=3.000$ mL, $V_S=7.000$ mL,
- ▲: $V_A=5.000$ mL, $V_S=5.000$ mL, △: $V_A=7.000$ mL, $V_S=3.000$ mL,
- ▼: $V_A=9.000$ mL, $V_S=1.000$ mL.

表5に、主な $w_{A,1}$ における有効数字を考慮した V_M を示す。これらの値から、いずれの場合も、微量ではあるが有意な体積減少が認められた。 $V_A=5.000$ mL、 $V_S=5.000$ mL の体積減少率は $w_{A,1}=0.15$ ($x_{A,1}=0.029$) の場合で最大0.4%であるが、同一モル分率の水酸化ナトリウム水溶液の希釈に伴う体積減少率よりも3倍程度大きい⁸⁾。これより、炭酸ナトリウム水溶液は水酸化ナトリウム水溶液よりもより構造化されており、希釈に伴いその構造が破壊される。

その結果、体積減少率が大きくなるものと推察される。中でも炭酸イオン CO_3^{2-} は二価の負電荷を有しており、一価の負電荷を持つ水酸化物イオン OH^- よりも、回りの水分子を強く引きつける。そして、その一部は加水分解により炭酸水素イオン HCO_3^- と OH^- を生じる。このように、 CO_3^{2-} が水溶液の構造形成に大きく寄与していると考えられる。

なお、この程度のわずかな体積減少は、マイクロスケール実験による実測は困難であろう。

表5 炭酸ナトリウム水溶液を水で希釈した後の体積 V_M

V_A/mL	1.000	3.000	5.000	7.000	9.000
V_S/mL	9.000	7.000	5.000	3.000	1.000
V_M/mL ($w_{A,1}=0.0500$)	9.998	9.995	9.994	9.995	9.998
V_M/mL ($w_{A,1}=0.0800$)	9.994	9.987	9.985	9.988	9.995
V_M/mL ($w_{A,1}=0.1000$)	9.991	9.981	9.979	9.983	9.993
V_M/mL ($w_{A,1}=0.1200$)	9.988	9.974	9.971	9.978	9.991
V_M/mL ($w_{A,1}=0.1500$)	9.982	9.962	9.959	9.969	9.988

4-2-2 炭酸カリウム水溶液

図4に20°Cにおける炭酸カリウム水溶液の希釈後の体積を示す。全濃度範囲に渡り体積減少が認められ、とりわけ高濃度領域において顕著であった。炭酸カリウムの濃度が增大するにつれて体積減少率が增大し、 $V_A=5.000\text{ mL}$ 、 $V_S=5.000\text{ mL}$ の場合に V_M は最小値を示した。

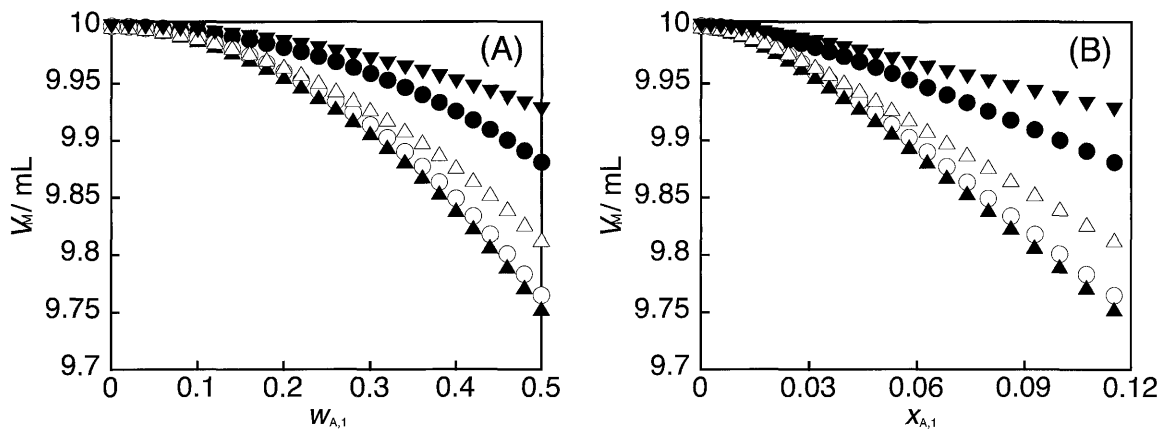


図4 20°Cにおける炭酸カリウム水溶液の希釈後の体積

(A) $w_{A,1}$ 依存性

(B) $x_{A,1}$ 依存性

- : $V_A=1.000\text{ mL}$, $V_S=9.000\text{ mL}$, ○ : $V_A=3.000\text{ mL}$, $V_S=7.000\text{ mL}$,
- ▲ : $V_A=5.000\text{ mL}$, $V_S=5.000\text{ mL}$, △ : $V_A=7.000\text{ mL}$, $V_S=3.000\text{ mL}$,
- ▼ : $V_A=9.000\text{ mL}$, $V_S=1.000\text{ mL}$.

表6に、主な $w_{A,1}$ における V_M を示す。これらの値から、 V_A と V_S の体積比にかかわらず、いずれの場合も有意な体積減少が認められる。 $V_A=5.000\text{ mL}$ 、 $V_S=5.000\text{ mL}$ の場合に最大となる体積減少率は $w_{A,1}=0.50$ ($x_{A,1}=0.12$) の場合で約2%であり、同一モル分率の水酸化カ

リウム水溶液の希釈に伴う体積減少率よりも2倍程度大きい⁸⁾。これは、炭酸カリウム水溶液は水酸化カリウム水溶液よりもいっそう構造化されており、希釈に伴いその一部が破壊されるため、結果的に体積減少率が大きくなるためと推察される。

さらに、 $x_{A,1}=0.030$ あたりの炭酸カリウム水溶液の場合、 $V_A=5.000$ mL、 $V_S=5.000$ mLでは体積減少率は0.4%程度であり、これは同一モル分率の炭酸ナトリウム溶液のそれとほぼ同じオーダーである。これより、炭酸カリウムは炭酸ナトリウムとは異なり水に対する溶解度は大きいですが、同一のモル分率であれば、両者の水溶液は類似の構造を形成しているものと示唆される。 K^+ は構造破壊型イオンであるのに対して、 Na^+ は構造形成型イオンだから¹²⁾、炭酸カリウム水溶液と炭酸ナトリウム水溶液は、異なる溶液構造を示すはずである。しかし、両者の構造が類似するのは、共通に含まれる CO_3^{2-} の寄与が大きいためと推察される。

なお、この程度の体積減少であればマイクロスケール実験による実測も可能である。しかし、炭酸カリウム水溶液も水酸化カリウム水溶液同様に、強塩基水溶液で劇薬である。よって、生徒実験の教材としての利用は、回避すべきであろう。

表6 炭酸カリウム水溶液を水で希釈した後の体積 V_M

V_A /mL	1.000	3.000	5.000	7.000	9.000
V_S /mL	9.000	7.000	5.000	3.000	1.000
V_M /mL ($w_{A,1}=0.1000$)	9.995	9.990	9.988	9.990	9.996
V_M /mL ($w_{A,1}=0.2000$)	9.982	9.961	9.956	9.965	9.986
V_M /mL ($w_{A,1}=0.3000$)	9.959	9.913	9.907	9.928	9.971
V_M /mL ($w_{A,1}=0.4000$)	9.926	9.849	9.840	9.877	9.952
V_M /mL ($w_{A,1}=0.5000$)	9.881	9.765	9.753	9.813	9.927

5 おわりに

本研究では、我々がすでに誘導した二成分系溶液の希釈後の体積を推算するのに必要な一般式を、炭酸ナトリウム水溶液および炭酸カリウム水溶液について適用した。水溶液と水の体積がそれぞれ、1.000 mLと9.000 mL、3.000 mLと7.000 mL、5.000 mLと5.000 mL、7.000 mLと3.000 mL、9.000 mLと1.000 mL、すなわち、両者の体積の合計が10.000 mLとなる場合について、水溶液を希釈した後の体積を推算した。前者では、僅少なから有意な体積減少が認められ、後者では、とりわけ高濃度領域においては、顕著な体積減少が認められた。そして、両者の水溶液の希釈に伴う体積減少には、二価アニオンである炭酸イオンの寄与が大きいと推察される。

本手法は実験を伴わないため、試薬の調製や器具の準備、実験後の器具の洗浄や廃液処理等も不要である。単純な数式を用いて簡便かつ迅速に希釈した溶液の体積を調べ、希釈時に体積の加成性が破綻することがわかるので、高等学校の物理学・化学の探究活動あるいは理科課題研究の教材としての活用が期待できる。とりわけ、今回のように炭酸ナトリウム水溶液や炭酸カリウム水溶液のような強塩基水溶液を用いて議論する場合には、たとえマイクロスケール実

験の手法を用いる場合でも、実験時の危険性を完全に回避することは難しい。そのような場合、本手法は極めて有用であろう。

本研究は、JSPS 科研費24501072の助成を受けたものである。

文献と註

- 1) 中川徹夫, 「液体の混合に関するマイクロスケール化学実験—エタノール—水の混合に伴う体積減少—」, 理科の教育, **56**(8), 566-569 (2007).
- 2) 中川徹夫, 「アルコール—水混合物の体積: 密度または過剰体積から算出した計算値とマイクロスケール実験による実測値との比較」, 神戸女学院大学論集, **57**(2), 99-107 (2010).
- 3) T. Nakagawa, "Microscale Experiment on Decreases in Volume when Forming Binary Liquid Mixtures: Four Alkanol Aqueous Solution," *Chemical Education and Sustainability in the Global Age*, Springer, Dordrecht, 335-346 (2013).
- 4) T. Nakagawa, "Decreases in Volume on Mixing Ethanol and Water using Microscale Experiments at Several Volume Ratios," *Abstract of 23rd International Conference on Chemistry Education*, <http://www.icce2014.org/html/00000294.htm>.
- 5) 中川徹夫, 「種々の体積比におけるエタノールと水の混合に伴う体積減少」, 日本物理教育学会第31回物理教育研究大会発表予稿集, 53-54 (2014).
- 6) 中川徹夫, 「二成分系水溶液の希釈に伴う体積変化に関する考察 (1) —推算式の誘導と D-グルコース水溶液およびスクロース水溶液への適用—」, 神戸女学院大学論集, **59**(2), 93-102 (2012).
- 7) 中川徹夫, 「二成分系水溶液の希釈に伴う体積変化に関する考察 (2) —塩化ナトリウム水溶液および塩化カリウム水溶液—」, 神戸女学院大学論集, **60**(1), 169-178 (2013).
- 8) 中川徹夫, 「二成分系水溶液の希釈に伴う体積変化に関する考察 (3) —水酸化ナトリウム水溶液および水酸化カリウム水溶液—」, 神戸女学院大学論集, **61**(1), 51-60 (2014).
- 9) T. Nakagawa, "Concentration Units on the Table," *Educ. Chem.*, **35**(4), 108-109 (1998).
- 10) W. M. Haynes (ed.), "Concentrative Properties of Aqueous Solutions: Density, Refractive Index, Freezing Point Depression, and Viscosity," *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 93rd Edition, CRC Press, Section 5, Boca Raton, 123-148 (2012).
- 11) W. M. Haynes (ed.), "Standard Density of Water," *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 93rd Edition, CRC Press, Section 6, Boca Raton, 7-8 (2012).
- 12) 上平恒, 水の分子工学, 講談社, 4章, 78-119 (1998).

(原稿受理日 2014年9月19日)