

高等学校「化学基礎」における中和反応による 水溶液の体積増加に関する理論的考察（2）

— 中和反応前の体積の和が 8.00 mL の条件下での塩酸と水酸化ナトリウム水溶液の混合 —

中 川 徹 夫

**Theoretical Consideration on Volume Increase of Aqueous Solutions owing to Neutralization Reactions
in Japanese High School “Basic Chemistry,” Part 2
— Mixing Hydrochloric Acid and Sodium Hydroxide Aqueous Solution under Conditions
Where Sum of Volumes is 8.00 mL before Completely Reacting Neutralization —**

NAKAGAWA Tetsuo

要 旨

高等学校「化学基礎」では、酸と塩基の中和反応が指導される。我々はすでに、中和反応の最も単純な例のひとつである1価の酸と塩基の水溶液の混合による体積増加量の推定方法を導出した。この方法を用いれば、1価の酸・塩基水溶液を混合した際の体積増加量を、容易に算出できる。そして、常圧、20℃において中和反応が過不足なく起こる等モル濃度で等体積の塩酸と水酸化ナトリウム水溶液の混合に適用し、体積増加量を推算した。本研究では、前回の研究の継続として、常圧、20℃において中和反応前の塩酸と水酸化ナトリウム水溶液の体積の和を8.00 mLとして、一定濃度（1.00、3.00、6.00 および9.00 mol/L）の塩酸および水酸化ナトリウム水溶液にそれぞれ水酸化ナトリウム水溶液および塩酸を加えて過不足なく中和反応が生じた場合の反応後の水溶液の体積増加量を算出した。体積増加量の計算値は常に正であり、これは水の生成を意味している。しかしながら、 H^+ や OH^- の消失や Na^+ と水、 Cl^- と水の相互作用のために、塩酸または水酸化ナトリウム水溶液が高濃度になるにつれて体積増加量は抑えられた。この方法を用いれば、濃度の異なる1価の酸・塩基水溶液を混合した際の体積増加量を容易に算出できる。そのため、高等学校「化学基礎」の教材としても有用である。

キーワード：水溶液、中和、体積増加量、水

Abstract

Acid-base neutralization reaction is introduced in Japanese high school basic chemistry. We have already derived the method of estimating increases in volume by mixing monovalent acid and base aqueous solutions, which is one of the simplest examples of neutralization reactions. Using this method, the increase in volume when mixing aqueous solutions of monovalent acid and base can be easily calculated. Next, we have applied this method to mixing equimolar and equivolume hydrochloric acids and sodium hydroxide aqueous solution, in which neutralization reactions occur completely, and estimated the increases in volume at atmospheric pressure and 20 °C. In this study, as a continuation of our previous work, we will estimate the increases in volume after completely reacting neutralization under the conditions that the sum of volumes of hydrochloric acid and sodium hydroxide aqueous solution before mixing is 8.00 mL, where either molar concentration is 1.00, 3.00, 6.00 or 9.00 mol/L. The calculated increases in volume are constantly positive, and these results suggest the formation of water. However, those values are more reduced as the molar concentration of hydrochloric acid or sodium hydroxide aqueous solution is higher due to the loss of H^+ and OH^- , and the Na^+ -water and the Cl^- -water interactions. Using this method, it is easy to estimate the increases in volume by mixing monovalent acid and base aqueous solutions, where both molar concentrations are different. Therefore, it is a useful and informative teaching material in high school basic chemistry.

Keywords: aqueous solution, neutralization, increase in volume, water

1 はじめに

中和反応は、中学校では理科第一分野、高等学校では化学基礎や化学、大学や短期大学では一般化学や分析化学と、幅広い校種で扱われ、化学を履修する際に不可欠な基本概念のひとつである。一般に中和反応といえば、酸水溶液中の酸と、塩基水溶液中の塩基が反応して塩と水を生じる反応である。そして、この場合の酸および塩基は、いずれもアレニウス酸およびアレニウス塩基であり、それぞれ、水溶液中で電離して水素イオン H^+ や水酸化物イオン OH^- を生じる。その際、水の生成により、一般的には反応後に生じた塩水溶液の体積が、反応前の酸水溶液および塩基水溶液の体積の和よりも増加する。

酸の化学式を H_mA ($m = 1, 2, 3$)、塩基の化学式を $\text{B}(\text{OH})_n$ ($n = 1, 2, 3$)、生じる塩の化学式を B_mA_n ($m = n$ のときは、 $m\text{BA}$) とすれば、中和反応は、



と記述される。水溶液中では通常、酸、塩基および塩は電離しているので¹⁾、



となり、式(2)-(4)を式(1)に代入すると、



両辺から同一の物質を消去し、 mn も消去すれば、



つまり、式(5)より中和反応は、水素イオン H^+ と水酸化物イオン OH^- から水 H_2O が生成する反応であるといえる。しかしながら、これまでに通常の液相反応で進行する中和反応で、水の生成を確認する手法に関しては、近藤²⁾の報告を除き、ほとんど検討されていない。そこで著者はこの問題に取り組むため、最も単純な1価の酸水溶液と1価の塩基水溶液を混合して過不足なく生じる中和反応に着目した。この反応に伴う水溶液の体積の増加から、水の生成を確認する手法を理論的に誘導し、等モル濃度かつ等体積の塩酸と水酸化ナトリウム水溶液の中和反応に適用した³⁾。

本報告はその続編として、中和反応前の塩酸と水酸化ナトリウム水溶液の体積の和を8.00 mLとして、一定濃度(1.00、3.00、6.00 および9.00 mol/L)の塩酸および水酸化ナトリウ

ム水溶液にそれぞれ水酸化ナトリウム水溶液および塩酸を加えて過不足なく中和反応が生じた場合の反応後の水溶液の体積増加量を算出した。さらに、高等学校化学基礎で扱う具体的な演習問題の事例についても提示した。

2 理論

本研究の理論的背景に関しては、前報で論じた³⁾。本報では、その概要について述べる。中和反応前の酸水溶液、塩基水溶液、および中和反応により生じた塩水溶液に関する物理量に、それぞれ下付き A、B、S を、酸、塩基、塩、および新たに生成した水に関する物理量に、それぞれ下付き a、b、s、w を付して表現する。本研究では、1 価の酸と 1 価の塩基が過不足なく反応する中和反応に限定して議論する。

酸水溶液中の酸、塩基水溶液中の塩基、塩水溶液中の塩、および新たに生成した水の物質量を、それぞれ $n_{A,a}$ 、 $n_{B,b}$ 、 $n_{S,s}$ 、 $n_{S,w}$ とすると、次の関係が成立する。

$$n_{A,a} = n_{B,b} = n_{S,s} = n_{S,w} \quad (6)$$

酸水溶液、塩基水溶液、および塩水溶液のモル濃度を、それぞれ、 $c_{A,a}$ 、 $c_{B,b}$ 、 $c_{S,s}$ 、酸水溶液、塩基水溶液、および塩水溶液の体積を、それぞれ V_A 、 V_B 、 V_S とすると、次の関係式が成立する。

$$n_{A,a} = c_{A,a} V_A \quad (7)$$

$$n_{B,b} = c_{B,b} V_B \quad (8)$$

$$n_{S,s} = c_{S,s} V_S \quad (9)$$

$$c_{A,a} V_A = c_{B,b} V_B = c_{S,s} V_S \quad (10)$$

中和反応前の酸水溶液および塩基水溶液の密度をそれぞれ d_A 、 d_B とすると、これらの値は次の経験式で算出できる。

$$d_A = d_w + \sum_{i=1}^n a_i c_{A,a}^i \quad (11)$$

$$d_B = d_w + \sum_{i=1}^n b_i c_{B,b}^i \quad (12)$$

式中の d_w は水の密度、 a_i 、 b_i は最小二乗法により算出された係数である。 $c_{A,a}$ および $c_{B,b}$ の初期値を定め、式(11)および(12)に代入すれば、 d_A 、 d_B が求まる。一方、塩水溶液の密度 d_S は、次の経験式で算出できる。

$$d_S = d_w + \sum_{i=1}^n s_i w_{S,s}^i \quad (13)$$

ここで s_i は最小二乗法により算出された係数、 $w_{S,s}$ は塩の質量分率である。反応後の $w_{S,s}$ は次式より算出できる。

$$w_{S,s} = n_{A,a} M_s / (d_A V_A + d_B V_B) \quad (14)$$

式中の $d_A V_A + d_B V_B$ は、中和反応前の水溶液の全質量であり、反応前後で質量は保存されるため、反応後の水溶液の質量でもある。式(14)を式(13)に代入すれば、 d_s を算出できる。

中和反応により生じる塩水溶液の体積 V_S は、

$$V_S = (d_A V_A + d_B V_B) / d_s \quad (15)$$

により算出できる。式(15)に d_A 、 V_A 、 d_B 、 V_B および d_s を代入すれば、 V_S が得られる。中和反応に伴う水溶液の体積増加量 ΔV は、

$$\Delta V = V_S - (V_A + V_B) \quad (16)$$

により評価できる。中和反応によって生成した水の物質質量 $n_{S,w}$ は、温度、圧力一定の条件下で次式により体積 $V_{S,w}$ に換算できる。

$$V_{S,w} = n_{S,w} M_w / d_w \quad (17)$$

ここで M_w は水のモル質量、 d_w は水の密度である。

3 計算

3-1 対象とした系とデータソース

前報³⁾と同様、本研究でも常圧、20℃において過不足なく中和する塩酸（塩化水素 HCl 水溶液、以下 HCl aq と略記）と水酸化ナトリウム NaOH 水溶液（以下 NaOH aq と略記）、および反応後に生成する塩化ナトリウム NaCl 水溶液（以下 NaCl aq と略記）に着目した。

今回は、中和前の HCl aq の体積 V_A と NaOH aq の体積 V_B の和を 8.00 mL に固定し、HCl aq のモル濃度 $c_{A,a}$ または NaOH aq のモル濃度 $c_{B,b}$ を 1.00、3.00、6.00 および 9.00 mol/L とした。HCl aq および NaOH aq の体積を 0.00 mL から 6.00 mL まで 0.10 mL ずつ変化させ、それぞれ NaOH aq または HCl aq を加えて過不足なく中和反応した後の体積 V_S および体積増加量 ΔV を算出した。

計算に用いた HCl aq⁴⁾、NaOH aq⁴⁾、NaCl aq⁴⁾ および水⁵⁾の密度 ($0.9982067 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$) は、CRC ハンドブック（第100版）より引用した。そして、これらの水溶液の密度の値を最小二乗法によりそれぞれ式(11)、(12)および(13)に回帰して得られた係数は、前報³⁾で示した。

3-2 中和反応後の体積増加量推算の手順

中和反応後の体積 V_S および体積増加量 ΔV を、以下の順序①～⑧で推算した。なお、計算に必要な HCl、NaOH、NaCl および H₂O のモル質量を、それぞれ $36.459 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ 、 $39.997 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ 、 $58.441 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ および $18.015 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ とした。

- ① 式(6)および(10)を満たすように、HCl aq の $c_{A,a}$ や NaOH aq の $c_{B,b}$ の初期値を 1.00

mol/L、3.00 mol/L、6.00 mol/L または 9.00 mol/L に定め、 $V_A + V_B = 8.00$ mL でかつ $0.00 \text{ mL} \leq V_A, V_B \leq 6.00 \text{ mL}$ という条件を設定した。

- ② 式(11)および(12)より、HCl aq および NaOH aq の密度 d_A, d_B を算出した。
- ③ d_A, d_B, V_A および V_B より、反応前後の水溶液の全質量 $d_A V_A + d_B V_B$ を算出した。
- ④ 式(14)より、反応後に生じた NaCl aq 中の NaCl の質量分率 $w_{s,s}$ を算出した。
- ⑤ 式(13)に $w_{s,s}$ を代入して、NaCl aq の密度 d_s を算出した。
- ⑥ 式(15)を用いて、反応後の体積 V_s を算出した。
- ⑦ 式(16)より、中和反応に伴う体積増加量 ΔV を算出した。
- ⑧ 式(17)より、中和反応で生成した水の物質質量 $n_{s,w}$ を常圧、20°C の条件で体積 $V_{s,w}$ に換算した。

4 結果と考察

4-1 モル濃度一定の塩酸 (HCl aq) と水酸化ナトリウム水溶液 (NaOH aq) の中和反応

図 1 に、 $c_{A,a}$ が 1.00、3.00、6.00 および 9.00 mol/L の HCl aq を、反応前の全体積 $V_A + V_B = 8.00$ mL となる条件で、NaOH aq を加えて過不足なく中和反応した後の体積増加量 ΔV を、生成した水の物質質量 $n_{s,w}$ を常圧、20°C の体積に換算した値 $V_{s,w}$ とともに示す。(D) の $V_A > 5.8$ mL の領域を除き、 ΔV は常に正であった。これより、前報の等モル濃度 ($c_{A,a} = c_{B,b}$) かつ等体積 ($V_A = V_B$) による HCl aq と NaOH aq の中和反応³⁾ の場合と同様に、水分子の生成に伴う体積の増加が認められた。

図 1 の (A) では $V_A < 5.8$ mL、(B) では $V_A < 3.7$ mL、(C) では $V_A < 2.4$ mL、(D) では $V_A < 1.4$ mL で ΔV は $V_{s,w}$ にほぼ等しく、中和反応の前後における水溶液と体積の和と生成した水の体積との間に加成性が認められた。これは、中和前の HCl aq と NaOH aq 中に占める各種イオンの存在割合が小さいために、中和反応に伴う水分子生成の寄与が、これに伴う H^+ と OH^- の消失や、 Na^+ や Cl^- と水分子とのイオン-分子間相互作用 (主としてイオンの水和) の寄与を凌駕したためと考えられる。

近藤は、ふたまた試験管と恒温槽を使用した実験的手法により、30.0°C で 1 mol/L の HCl aq 25 mL と 1 mol/L の NaOH aq 25 mL を中和した場合の体積増加量の実測値を 0.484 mL と報告した²⁾。本研究で得られた計算結果と比較するため、この値を、1 mol/L の HCl aq 4.0 mL と 1 mol/L の NaOH aq 4.0 mL を中和した場合の体積増加量に換算すれば、0.0774 mL となった。一方、本研究では、図 1 の (A) で $V_A = 4.00$ mL における ΔV は 0.0762 mL となり、両者はよく一致した。これより、本研究で得た計算値の妥当性が示された。

なお、中和反応における体積変化を実験的に確認するには、1 mol/L よりも高濃度の HCl aq と NaOH aq を使用するのが効果的であることが予想される。ただし、高濃度の HCl aq と NaOH aq、とくに NaOH aq は非常に危険である。実験時には、安全眼鏡や白衣の着用はもとより、絶対に手や皮膚に触れないように細心の注意を払う必要がある。

上記以外の領域では、 ΔV と $V_{s,w}$ の間に顕著な差が認められ、常に $\Delta V < V_{s,w}$ であった。これは、中和前の HCl aq と NaOH aq 中に占める各種イオンの存在割合が増加し、中和反応に伴

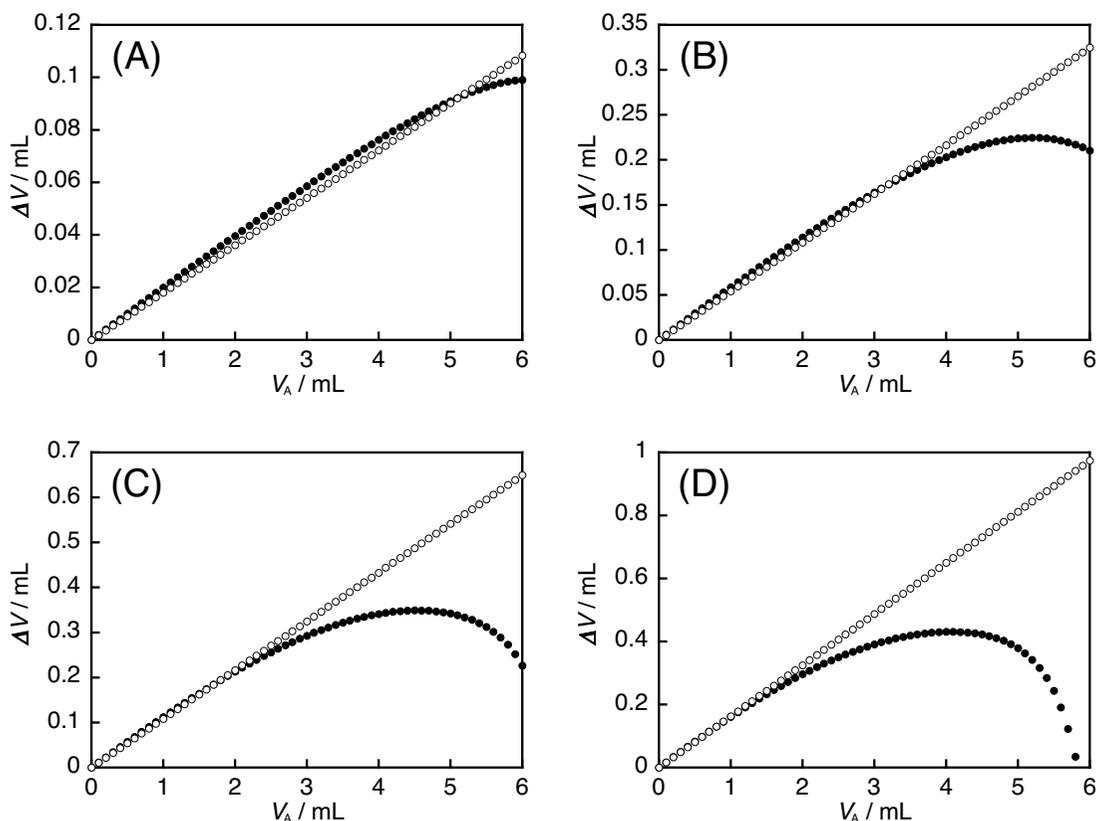


図1 モル濃度一定のHCl aqと種々の濃度のNaOH aqの中和反応に伴う体積増加量 ΔV
 (A) $c_{A,a} = 1.00 \text{ mol/L}$ (B) $c_{A,a} = 3.00 \text{ mol/L}$ (C) $c_{A,a} = 6.00 \text{ mol/L}$ (D) $c_{A,a} = 9.00 \text{ mol/L}$

計算条件： $V_A + V_B = 8.00 \text{ mL}$ かつ $0.00 \text{ mL} \leq V_A \leq 6.00 \text{ mL}$

●：体積増加量 ΔV 、○：水の物質質量 $n_{s,w}$ を常圧、20℃で体積に換算した値 $V_{s,w}$

う H^+ や OH^- の消失や Na^+ や Cl^- と水分子とのイオン-分子間相互作用の寄与が、水分子の生成による寄与を凌駕したためである。そのため結果的には中和反応後の水溶液の体積増加が抑制されたためと推察される。 NaCl aqの希釈に伴う体積減少⁶⁾に関してはすでに議論した。本研究では、HClとNaOHの中和反応に伴い水が生成し、生じた NaCl aqはこの水により希釈されることにも、注意を払う必要がある。

このように、中和反応前のHCl aq中のHClの物質質量 $n_{A,a}$ が増加するにつれて、NaOH aq中のNaOHの物質質量 $n_{B,b}$ も増加し、その結果 H^+ や OH^- の消失量も増加する。加えて、水溶液中に存在する Na^+ や Cl^- と水分子間の相互作用の寄与も増大するため、水が生成するにもかかわらず、水溶液全体の体積増加が妨げられる。つまり、反応前のHCl aqとNaOH aqの体積の和と、反応後に生成した水の体積との間の加成性が破綻したものと推察される。

4-2 モル濃度一定の水酸化ナトリウム水溶液 (NaOH aq) と塩酸 (HCl aq) の中和反応

図2に、 $c_{B,b}$ が1.00、3.00、6.00および9.00 mol/LのNaOH aqを、反応前の全体積 $V_A +$

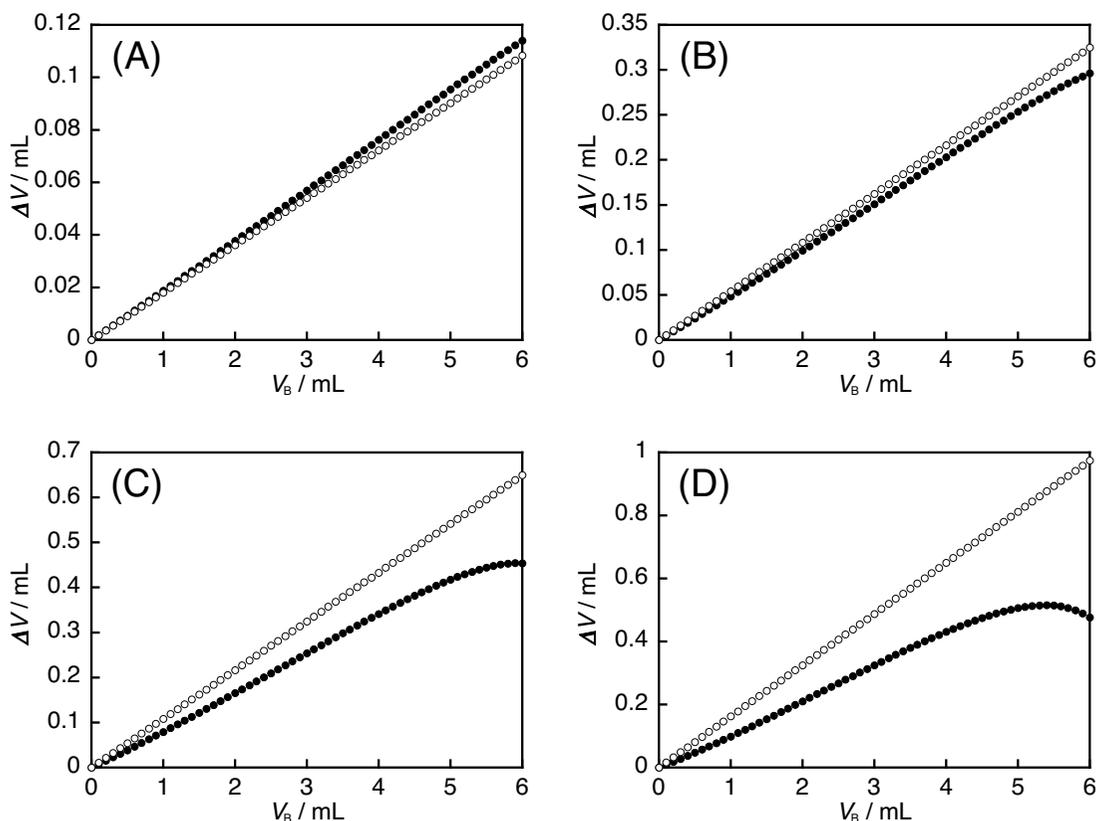


図2 モル濃度一定の NaOH aq と種々の濃度の HCl aq の中和反応に伴う体積増加量 ΔV
 (A) $c_{B,b} = 1.00 \text{ mol/L}$ (B) $c_{B,b} = 3.00 \text{ mol/L}$ (C) $c_{B,b} = 6.00 \text{ mol/L}$ (D) $c_{B,b} = 9.00 \text{ mol/L}$

計算条件: $V_A + V_B = 8.00 \text{ mL}$ かつ $0.00 \text{ mL} \leq V_B \leq 6.00 \text{ mL}$

●: 体積増加量 ΔV , ○: 水の物質質量 $n_{s,w}$ を常圧、20℃で体積に換算した値 $V_{s,w}$

$V_B = 8.00 \text{ mL}$ となる条件で、HCl aq を加えて過不足なく中和反応した後の体積増加量 ΔV を、生成した水の物質質量 $n_{s,w}$ を常圧、20℃で体積に換算した値 $V_{s,w}$ とともに示す。 ΔV は常に正であった。これより、前報³⁾および上述の事例と同様に、水の生成による体積の増加が認められた。

図2の(A)では、 V_B の全領域で ΔV は $V_{s,w}$ にほぼ等しく、中和反応の前後で、水溶液の体積の加成性が成立している。この現象は、先述の $c_{A,a}$ 一定の HCl aq と NaOH aq の中和反応の場合と同様の解釈が可能である。つまり、両者がいずれも低濃度なため、水溶液中に占める各種イオンの存在割合が小さい。そのため、 H^+ と OH^- の消失や、 Na^+ や Cl^- と水分子との相互作用よりも、中和反応に伴う水の生成の寄与が凌駕したためと考えられる。図2の(A)で $V_B = 4.00 \text{ mL}$ における ΔV は 0.0762 mL となり、前述の実測値 0.0774 mL とよく一致した。

図2の(B)では $V_B > 0.4 \text{ mL}$ 、(C)および(D)ではほぼ全領域で、 ΔV と $V_{s,w}$ の間に顕著な差が認められ、常に $\Delta V < V_{s,w}$ であった。これは、先述の図1の解釈と同様、中和前の HCl aq と NaOH aq 中に占める各種イオンの存在割合が増加し、中和反応に伴う H^+ や OH^- の消失や

Na^+ や Cl^- と水分子とのイオン-分子間相互作用の寄与が、水分子の生成による寄与を凌駕したためである。そのため結果的には中和反応後の水溶液の体積の増加が抑制されたものと推察される。

図2を図1と比較すると、中和反応の前後で、水溶液の体積の加成性が成立する領域が極めて小さい。これは、 NaOH aq 中の OH^- が HCl aq 中や NaCl aq 中の Cl^- よりも水和しやすく⁷⁾、低濃度の NaOH aq の場合でも、すでに体積減少が生じているためであろう。

このように、中和反応前の NaOH aq 中の NaOH の物質量 $n_{\text{B},\text{b}}$ が増加するにつれて、 HCl aq 中の HCl の物質量 $n_{\text{A},\text{a}}$ も増加し、結果的には H^+ や OH^- の消失量も増加する。加えて、 Na^+ や Cl^- と水分子間の相互作用の寄与も増大するため、水溶液全体の体積の増加が妨げられ、反応前後で水溶液および水の体積の加成性が破綻したものと推察される。

4-3 高等学校「化学基礎」で取り扱う練習問題の事例

化学量論の視点からは、単に水の生成を確認するという定性的な理解にとどまらず、定量的な理解も重要である。前報³⁾と同様に、高等学校「化学基礎」における具体的な指導事例を、練習問題の形式で提示する。授業時の問題演習として取り扱うことも可能である。

(練習問題：高等学校「化学基礎」履修者用)

常圧、 20°C の条件で、 3.00 mol/L の塩酸 5.60 mL と 7.00 mol/L の水酸化ナトリウム水溶液 2.40 mL を混合して、過不足なく中和反応させた⁸⁾。反応後の水溶液の体積と反応前の塩酸と水酸化ナトリウム水溶液の体積の合計との差 ΔV を小数第2位まで算出しなさい。また、この中和反応で生成した水の物質量を、水の密度の値を利用して換算した体積 v の値も小数第2位まで算出しなさい。その際、 ΔV と v の値が異なる原因についても考察しなさい。ただし、 3.00 mol/L の塩酸の密度を $1.05\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、 7.00 mol/L の水酸化ナトリウム水溶液の密度を $1.25\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、反応後の水溶液の密度を $1.08\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、水の密度を $0.998\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、水のモル質量を $18.0\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ として計算しなさい。

(解答例)

中和反応前の水溶液の質量の和は、 $(1.05\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1})\cdot(5.60\text{ mL}) + (1.25\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1})\cdot(2.40\text{ mL}) = 8.88\text{ g}$ であり、これは中和反応後の塩化ナトリウム水溶液の質量に等しい。この密度が $1.08\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ だから、体積は、 $(8.88\text{ g})/(1.08\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}) = 8.22\text{ mL}$ となる。反応前の水溶液の和は、 $5.60\text{ mL} + 2.40\text{ mL} = 8.00\text{ mL}$ だから、 $\Delta V = 8.22\text{ mL} - 8.00\text{ mL} = 0.22\text{ mL}$ となる。

(答) $\Delta V = 0.22\text{ mL}$

中和反応によって生じた水の物質量は、化学反応式より、反応前の塩化水素や水酸化ナトリウムの物質量に等しく、その値は、 $(3.00\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1})/(5.60\text{ mL}) = (3.00\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1})/(5.60 \times 10^{-3}\text{ L}) = 1.68 \times 10^{-2}\text{ mol}$ である [または、 $(7.00\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1})/(2.40\text{ mL}) = (7.00\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1})/(2.40 \times 10^{-3}\text{ L}) = 1.68 \times 10^{-2}\text{ mol}$]。これを体積 v に換算すると、 $v = (1.68 \times 10^{-2}\text{ mol})\cdot(18.0\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1})$

$\text{mol}^{-1}) / (0.998 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}) = 0.3030 \dots \text{ mL} = 0.30 \text{ mL}$ となる。

(答) $v = 0.30 \text{ mL}$

ΔV と v の値が異なる原因として、水の生成に伴う H^+ や OH^- の消費や、生成した水と Na^+ や Cl^- の間の相互作用等が考えられる。

HCl aq と NaOH aq の中和反応に伴う水の生成を実験的に確認する手段として、先述の近藤²⁾の方法がある。その際温度制御のための恒温槽が必要となる。中和滴定のように常温で実施できないので、限られた経費で運営されている高等学校では、生徒実験として導入するのは極めて難しい。

一方、本研究の計算手法であれば、高等学校の授業時に十分導入が可能である。難解な理論や複雑な数式はいっさい使用しておらず、 Σ 記号を除き、すべて高等学校化学基礎や数学 I 程度の知識があれば容易に理解できる内容である。

なお式(1)-(3)を用いて実際に水溶液の密度を算出させる場合、もし数学で総和を意味する Σ の記号を未履修であれば、 Σ を使用せずに、具体的な展開式を使用すればよい。高次多項式であれば数学 I で履修するため、授業で使用して差し支えない。あるいは予め 0.01 mol/L 刻みのモル濃度あるいは 0.01 刻みの質量分率ごとに密度の値を算出し、表に整理して与えてもよい。

なお、水溶液の密度に関しては、文献 4 に常圧、 20°C における豊富なデータが集約されている。出典を明示すれば、教育研究に使用できるので、化学に関わる教育者や研究者にとって極めて貴重な資料である。

5 おわりに

本研究では、常圧、 20°C において、反応前の塩酸と水酸化ナトリウム水溶液の体積の和を 8.00 mL として、一定濃度 (1.00 , 3.00 , 6.00 および 9.00 mol/L) の塩酸および水酸化ナトリウム水溶液にそれぞれ水酸化ナトリウム水溶液および塩酸を加えて過不足なく中和反応が生じた場合の反応後の水溶液の体積増加量を算出した。そして、この値と生成した水の物質量を体積に換算した値を比較し、中和反応前後の水溶液の体積の加成性の有無およびその原因について考察した。とりわけ、 1.00 mol/L で 4.00 mL の塩酸と水酸化ナトリウム水溶液を中和した場合の体積増加量は、既報の実測値とよく一致した。さらに、高等学校数学 I 程度の知識があれば容易に理解できる高等学校「化学基礎」で扱う具体的な練習問題の事例を提示した。

このように、本研究の成果は高等学校「化学基礎」の教材としても有用である。今後、授業や探究活動等で活用されることを期待する。

本研究は、JSPS 科研費 JP17K00991の助成を受けたものである。

文献と註

- 1) 厳密に言えば、酸、塩基がそれぞれ弱酸、弱塩基の場合は、式(2)および(3)は、完全に反応が右辺に進行せずに電離平衡の状態になる。しかし、過不足なく中和反応が生じる場合には、最終的に酸、塩基は完全に反応してしまうため、ここでは \rightleftharpoons を使用せずに \rightarrow で表記した。
- 2) 近藤俊彰 (1990) 「中和反応における体積変化」『化学と教育』第38巻、第1号、107-108.
- 3) 中川徹夫 (2020) 「高等学校「化学基礎」における中和反応による水溶液の体積増加に関する理論的考察 (1)―推算方法の誘導と等モル濃度、等体積の塩酸と水酸化ナトリウム水溶液の混合への適用―」『神戸女学院大学論集』第67巻、第2号、65-76.
- 4) “Concentrative Properties of Aqueous Solutions,” in *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 100th edition, Section 5, J. R. Rumble (Editor-in-Chief), CRC Press, Boca Raton, 129-144 (2019).
- 5) “Standard Density of Water,” in *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 100th edition, Section 6, J. R. Rumble (Editor-in-Chief), CRC Press, Boca Raton, 7-8 (2019).
- 6) 中川徹夫 (2013) 「二成分系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』第60巻、第1号、169-178.
- 7) 中川徹夫 (2014) 「二成分系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』第61巻、第1号、51-60.
- 8) 3.00 mol/L の塩酸 5.60 mL から、塩酸中の塩化水素の物質量が定まる (1.68×10^{-2} mol)。この塩酸と水酸化ナトリウム水溶液は過不足なく反応する。そこで、練習問題として扱う際に、中和の公式を用いて、水酸化ナトリウム水溶液のモル濃度 7.00 mol/L あるいは体積 2.40 mL のいずれかを算出させる問題を課してもよい。

(原稿受理日 2023年3月12日)