

# 錯イオン生成反応の考察 —過剰量の試薬で溶けるのはなぜか—

前田 祐作（奈良県立畝傍高等学校）

## あらまし

金属陽イオンの水溶液に沈殿を生成する試薬を加えたとき、過剰量の試薬によって錯イオンを形成して沈殿が溶解する反応の量的関係を、滴定によって明らかにした。

## キーワード

錯イオン、配位子交換、HSAB則、逐次安定度定数、全安定度定数、ルイス酸・ルイス塩基、Irving-Williamsの系列、溶解度積、

## 1 はじめに

東京書籍の教科書「改訂 化学」の遷移元素の単元内で、遷移元素の特徴として、「ほかのイオンや分子と配位結合した錯イオンをつくるものが多い。」と説明されている。

次のページには錯イオンとしてよく取り上げられる例として、「水酸化亜鉛 $Zn(OH)_2$ にアンモニア水を加えると白色の沈殿は溶け、無色の水溶液になる。これは、テトラアンミン亜鉛(II)イオン $[Zn(NH_3)_4]^{2+}$ が生じるからである。このような、中心となる金属イオンが、非共有電子対をもつ分子や陰イオンが配位結合してできたイオンを錯イオンという。」と記載されている。

この記述で正しいのだが、生徒にとってはよく分からないと思うみたいで、とりあえず頻出の錯イオンを暗記して受験に備えるという勉強の仕方をしてしまっている。そこで、もう少し理解を助ける手がかりになるように考察してみた。

金属陽イオンは、本来、気体状の金属原子を気体状の金属陽イオンにするのに、イオン化エネルギーを与えなければならないから、気体状の金属原子よりも大きなエネルギーを持っているはずである。しかし、そのような高いエネルギーを持つ粒子が水溶液中に存在できるのは、エネルギーが高いままではなく、金属陽イオンが水分子と水和することにより、非常にエネルギーの低い状態になって安定化しているからである。

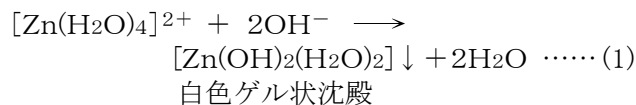
例えば、塩化亜鉛 $ZnCl_2$ を水に溶かした場合、 $Zn^{2+}$ と $Cl^-$ が分かると $Zn^{2+}$ は不安定な状態になる。そこで、まわりには水分子がたくさんあるので、水分子の電子を引きつけようとする。ところが、電気陰性度の小さい $Zn$ では、 $H-O$ 間の共有電子対は奪えないので、 $O$ 原子が持つ非共有電子対を引きつけて $Zn$ の空軌道に入れることにより錯イオンを生成する。つまり、水溶液になっている $Zn^{2+}$ は、 $Zn^{2+}$ 単独で存在するのではなく、 $[Zn(H_2O)_4]^{2+}$ のアクア錯イオンになって低エネルギーの状態で溶解している。

ここで、塩化亜鉛(II)水溶液にアンモニア水を加えたと想定すると、最初、少量のアンモニア水

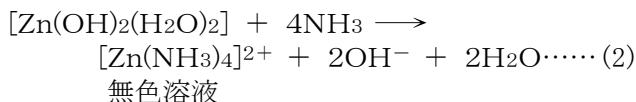
は塩基としてはたらくので、水酸化亜鉛(II) $Zn(OH)_2$ の白色ゲル状沈殿を生じる。さらに、この沈殿にアンモニア水を加えると過剰のアンモニア水は錯イオン生成にはたらくので、テトラアンミン亜鉛(II)イオン $[Zn(NH_3)_4]^{2+}$ の無色溶液を生成して白色沈殿は溶解する。

この変化は配位子交換反応としてとらえるとわかりやすい。

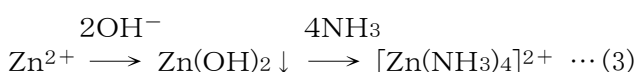
$Zn^{2+}$ 水溶液に少量の濃アンモニア水を加えたとき、 $[Zn(H_2O)_4]^{2+}$ は正に帯電しているため、水酸化物イオン $OH^-$ を引きつけて $[Zn(OH)_2(H_2O)_2]$ 錯体を生成する。この錯体は溶解度積が小さいため $Zn(OH)_2$ の式(1)の白色ゲル状沈殿を生成する。



式(1)で沈殿が生成した状態からさらに濃アンモニア水を追加すると、電離定数の小さいアンモニアはほとんどが分子として存在するので $[NH_3]$ が高くなる。電氣的に中性な $[Zn(OH)_2(H_2O)_2]$ は $OH^-$ を引きつけられないが、濃度の高い $NH_3$ の非共有電子対を引きつけて配位子を交換し、テトラアンミン亜鉛(II)イオン $[Zn(NH_3)_4]^{2+}$ となって沈殿が溶解し、式(2)で表される無色溶液になる。



つまり、水に溶解していたときに配位していた $H_2O$ を省略すると、式(3)の普段見慣れた沈殿生成と溶解反応が見て取れる。



ここで金属陽イオンと配位子の結合について考えてみる。錯イオンの生成しやすさは、金属陽イオンの種類と配位子の種類の両方から考えられるが、これを統合的に見分けるにはHSAB則がわか

りやすい。(経験則なので例外もある。)

HSAB則とは、酸(ルイス酸のことで金属陽イオン等)と塩基(ルイス塩基のことで配位子等)の相性を「硬い(Hard)」「中間」「軟らかい(Soft)」で分類したものであり、「硬い酸」と「硬い塩基」は強く結合しやすく、「軟らかい酸」と「軟らかい塩基」も強く結合しやすい。ここでいう「硬い酸」とは、イオン半径が小さく電荷の大きい金属陽イオンを指し、「硬い塩基」とは電気陰性度が大きく分極率の小さい陰イオンや分子を指す。

また、「軟らかい酸」とは、イオン半径が大きく電荷の小さい金属陽イオンを指し、「軟らかい塩基」とは、電気陰性度が小さく分極率の大きい陰イオンや分子を指す。(表1)

表1 ルイス酸・ルイス塩基による分類

	酸		塩基
硬 い	H <sup>+</sup> , Li <sup>+</sup> , Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> Mg <sup>2+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Al <sup>3+</sup> , Si <sup>4+</sup> , Co <sup>3+</sup> , Fe <sup>3+</sup> , BF <sub>3</sub> , AlCl <sub>3</sub> など	硬 い	OH <sup>-</sup> , H <sub>2</sub> O, NH <sub>3</sub> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Cl <sup>-</sup> , F <sup>-</sup> , ROH, RO <sup>-</sup> , RNH <sub>2</sub> など
	中 間		Fe <sup>2+</sup> , Cu <sup>2+</sup> , Zn <sup>2+</sup> , Sn <sup>2+</sup> , R <sub>3</sub> C <sup>+</sup> など
軟 ら か い	Ag <sup>+</sup> , Hg <sup>+</sup> , Cu <sup>+</sup> , Hg <sup>2+</sup> , Au <sup>+</sup> I <sub>2</sub> , Br <sub>2</sub> , BH <sub>3</sub> , RS <sup>+</sup> など	軟 か い	Br <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , アニリン, ピリジン, など
			SCN <sup>-</sup> , S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>2-</sup> , CN <sup>-</sup> , I <sup>-</sup> , CO ベンゼンなど

この分類から考えると、第4周期の2価陽イオンでは、中心金属のイオン半径が小さいほど配位子を引きつける力が強くなるので、原子番号順に、Mn<sup>2+</sup> < Fe<sup>2+</sup> < Co<sup>2+</sup> < Ni<sup>2+</sup> < Cu<sup>2+</sup> > Zn<sup>2+</sup> (0.091) (0.083) (0.082) (0.078) (0.069) (0.074) の順にイオン半径(( )内はnm)が変化するため、錯イオンの安定度もこの順番になることが知られている。(Irving-Williamsの系列)

なお、錯イオンの安定度とは、中心金属イオンと配位子と錯イオンの平衡定数をとったもので、



$$(4) \text{ 式 の 両 辺 の 比 } K = \frac{[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}]}{[\text{Cu}^{2+}][\text{NH}_3]^4}$$

を安定度定数という。安定な錯イオンほど解離しにくく式(4)の平衡は右に偏るのでKの値が大きくなる。

このため、同じ配位子NH<sub>3</sub>(硬い塩基)を4配位もつ[Cu(NH<sub>3</sub>)<sub>4</sub><sup>2+</sup>]と[Zn(NH<sub>3</sub>)<sub>4</sub><sup>2+</sup>]では、イオン半径の小さい[Cu(NH<sub>3</sub>)<sub>4</sub><sup>2+</sup>]の方が安定度定数が大きく、錯イオンができやすいといえる。

また、同じ金属イオンで異なる配位子が配位した場合の安定度について考えると、Zn<sup>2+</sup>やCu<sup>2+</sup>にH<sub>2</sub>Oが配位した場合とNH<sub>3</sub>が配位した場合では、H<sub>2</sub>Oが配位するよりNH<sub>3</sub>が配位した場合の方が安定な錯イオンをつくりやすい。さらに、NH<sub>3</sub>が配

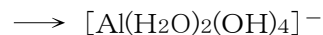
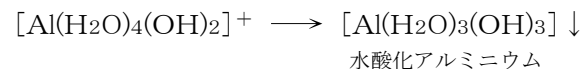
位した場合とCN<sup>-</sup>が配位した場合では、NH<sub>3</sub>が配位するよりCN<sup>-</sup>が配位した方が安定な錯イオンをつくりやすい。つまり、配位子の種類による安定度は、周期表のMnからZnの間に属する金属陽イオンに配位したとき、CN<sup>-</sup> > NH<sub>3</sub> > H<sub>2</sub>O の順に安定な錯イオンになる。これは、配位原子の電気陰性度が小さいほど非共有電子対を引きつける力が弱くなるために、中心金属に与えたときに安定的に配位結合できるからである。

$$\text{C} > \text{N} > \text{O} \quad ( ) \text{ 内 は 電 気 陰 性 度 } \\ (2.5) \quad (3.0) \quad (3.5)$$

NH<sub>3</sub>は、周期表のMnからZnの間に属する1~2価の金属陽イオンに配位しやすい傾向を持つので、Cu<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup>、Ag<sup>+</sup>と安定な錯イオンを作りやすく、生じた錯イオンがそれぞれ、[Cu(NH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>]<sup>2+</sup>、[Zn(NH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>]<sup>2+</sup>、[Ag(NH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>]<sup>+</sup> である。

さらに、過剰のOH<sup>-</sup>は両性金属イオンと錯イオンをつくる。それが、[Zn(OH)<sub>4</sub>]<sup>2-</sup>、[Al(OH)<sub>4</sub>]<sup>-</sup>、[Sn(OH)<sub>4</sub>]<sup>2-</sup>、[Pb(OH)<sub>4</sub>]<sup>2-</sup>、である。

Al<sup>3+</sup>、Zn<sup>2+</sup>、Sn<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup>に水酸化ナトリウム水溶液を加えていくと、配位子がH<sub>2</sub>OからOH<sup>-</sup>に順次置き換わった錯イオンが生成する。

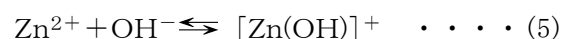


テトラヒドロキソドアルミン酸イオン

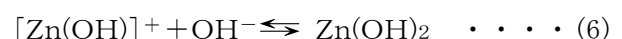
ただし、Zn<sup>2+</sup>は両性金属イオン中で2価の遷移金属でもあるため、NH<sub>3</sub>とも錯イオンをつくることができ、過剰のOH<sup>-</sup>にも過剰のNH<sub>3</sub>にも溶解して錯イオンを作る。

## 2 目的

亜鉛・銅・銀の錯イオンについて安定度定数の値どおりの錯イオン生成が行われるかどうかを考察する。ここで安定度定数とは、例えば、亜鉛イオンZn<sup>2+</sup>に対してOH<sup>-</sup>が配位結合して配位数1~4の錯イオンが順に生成するとき、



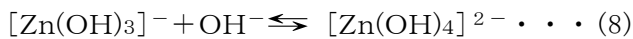
$$K_1 = \frac{[[\text{Zn}(\text{OH})]^+]}{[\text{Zn}^{2+}][\text{OH}^-]}$$



$$K_2 = \frac{[\text{Zn}(\text{OH})_2]}{[[\text{Zn}(\text{OH})]^+][\text{OH}^-]}$$



$$K_3 = \frac{[[\text{Zn}(\text{OH})_3]^-]}{[\text{Zn}(\text{OH})_2][\text{OH}^-]}$$



$$K_4 = \frac{[\text{Zn}(\text{OH})_4]^{2-}}{[\text{Zn}(\text{OH})_3]^- [\text{OH}^-]}$$

と表され、各次の平衡反応の濃度比 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 、 $K_4$ 、を逐次安定度定数という。そして、すべての逐次安定度の積  $K_1 \times K_2 \times K_3 \times K_4 = K$  を全安定度定数といい、

$$K = K_1 \times K_2 \times K_3 \times K_4 = \frac{[\text{Zn}(\text{OH})_4]^{2-}}{[\text{Zn}^{2+}] [\text{OH}^-]^4} \dots (9)$$

式(9)で表される。表2参照

表2 全安定度定数

錯イオン	全安定度定数K
$[\text{Zn}(\text{OH})_4]^{2-}$	$10^{17.7}$
$[\text{Zn}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$	$10^{9.46}$
$[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$	$10^{13.3}$
$[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]^+$	$10^{7.40}$

### 3 実験方法と結果

金属陽イオン水溶液に沈殿及び錯イオンを生成する試薬を滴下した結果と全安定度定数を比較し、錯イオンへのなりやすさや条件を考察する目的で、以下の①～④の実験を行った。

① 0.10mol/L硝酸亜鉛 $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ 水溶液10.0mLに、6mol/L水酸化ナトリウム水溶液を沈殿が消失するまで滴下しpHを測定した。すると、水酸化ナトリウム水溶液を0.39mL滴下したときに等量点に至り、4.40mL滴下したときに沈殿が消失した。(図1)

② 0.10mol/L硝酸亜鉛 $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ 水溶液10.0mLに、6mol/Lアンモニア水を沈殿が消失するまで滴下しpHを測定した。すると、アンモニア水を1.55mL滴下したときに沈殿が消失した。(図1・2・3)

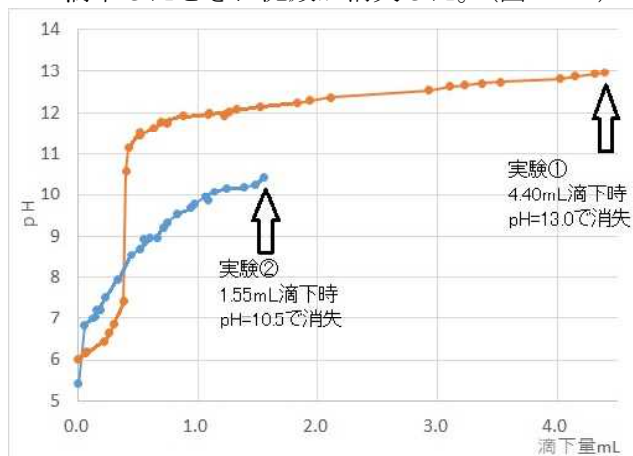


図1 実験① $\text{OH}^-$ と実験② $\text{NH}_3$ の滴定曲線比較

③ 0.10mol/L硫酸銅(II)  $\text{CuSO}_4$ 水溶液10.0mLに、6mol/Lアンモニア水を沈殿が消失するまで滴下しpHを測定した。すると、アンモニア水を1.05mL滴下したときに沈殿が消失した。(図2・図4)

④ 0.10mol/L硝酸銀 $\text{AgNO}_3$ 水溶液10.0mLに、6mol/Lアンモニア水を沈殿が消失するまで滴下しpHを測定した。すると、アンモニア水を0.49mL滴下したときに沈殿が消失した。(図2・図5)

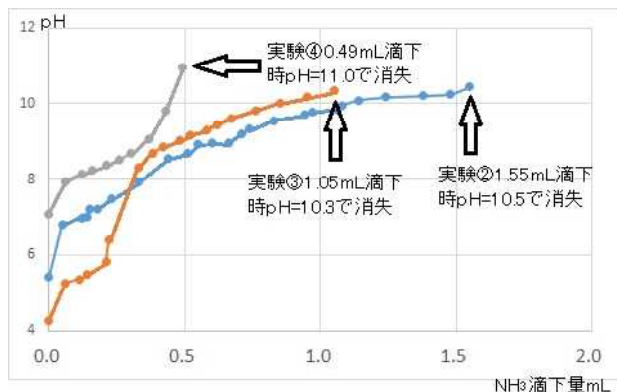


図2 実験②Zn,実験③Cu,実験④Agの滴定曲線比較

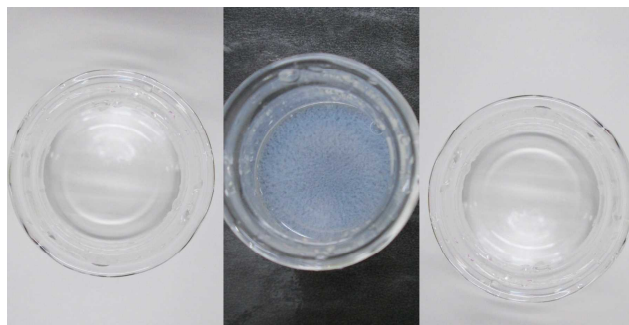


図3 実験②での沈殿生成・溶解の様子  
左から、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Zn}(\text{OH})_2$ 沈殿、 $[\text{Zn}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$

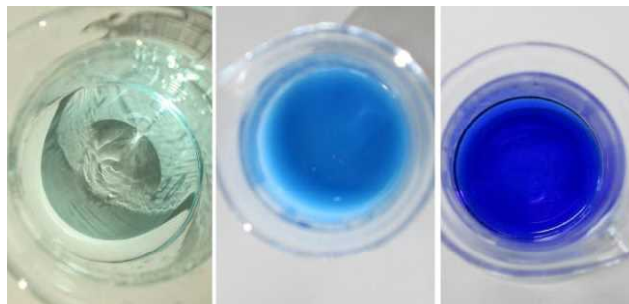


図4 実験③での沈殿生成・溶解の様子  
左から、 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Cu}(\text{OH})_2$ 沈殿、 $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$



図5 実験④での沈殿生成・溶解の様子  
左から、 $\text{Ag}^+$ 、 $\text{Ag}_2\text{O}$ 沈殿、 $[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]^+$

#### 4 考察

実験①では、 $[Zn^{2+}] = 0.10 \text{ mol/L}$ 水溶液10.0mLに、6mol/L水酸化ナトリウム水溶液を0.39mL加えたときに等量点となり水酸化亜鉛(II)  $Zn(OH)_2$ が沈殿した。

さらに過剰量の水酸化ナトリウム水溶液を追加し、合わせて4.40mL滴下したときに沈殿が消失し、テトラヒドロキシド亜鉛(II)酸イオン  $[Zn(OH)_4]^{2-}$  になった条件をあてはめる。水酸化ナトリウム水溶液を加えてもイオン濃度の積が  $K_{spZn(OH)_2}$  以下ならば沈殿は生じないから、

$$\text{溶解度積 } K_{spZn(OH)_2} = 7.0 \times 10^{-18} \text{ mol}^3/\text{L}^3$$

$$\text{全安定度定数 } K = \frac{[[Zn(OH)_4]^{2-}]}{[Zn^{2+}][OH^-]^4} = 10^{17.7}$$

$$[Zn^{2+}] = \frac{[[Zn(OH)_4]^{2-}]}{K[OH^-]^4}$$

$$[Zn^{2+}][OH^-]^2 = \frac{[[Zn(OH)_4]^{2-}]}{K[OH^-]^4} \times [OH^-]^2 \leq K_{sp}$$

$$\begin{aligned} [OH^-] &\geq \sqrt{\left( \frac{[[Zn(OH)_4]^{2-}]}{K_{sp} \times K} \right)} \\ &\geq \sqrt{\left( \frac{0.10 \times \{10.0/(10.0+4.40)\}}{7.0 \times 10^{-18} \times 10^{17.7}} \right)} \\ &\geq 0.141 \text{ mol/L} \end{aligned}$$

従って、 $[OH^-] \geq 0.141 \text{ mol/L}$ になれば、水酸化亜鉛(II)  $Zn(OH)_2$ が錯イオン  $[Zn(OH)_4]^{2-}$ になると算出された。 $[OH^-] = 0.141 \text{ mol/L}$ は  $pH = 13.1$ に相当し、実験①では  $pH = 13.0$ のときに沈殿が消失したので、ほぼ理論値どおりの濃度で沈殿が消失したことが観察された。

実験②では、 $[Zn^{2+}] = 0.10 \text{ mol/L}$ 水溶液10.0mLに、6mol/Lアンモニア水を1.55mL加えて  $pH = 10.5$ になったときに沈殿が消失した条件をあてはめると、 $pH = 10.5$ は  $[OH^-] = 10^{-3.5} \text{ mol/L}$ に相当するから、

$$\text{溶解度積 } K_{spZn(OH)_2} = 7.0 \times 10^{-18} \text{ mol}^3/\text{L}^3$$

$$\text{全安定度定数 } K = \frac{[[Zn(NH_3)_4]^{2+}]}{[Zn^{2+}][NH_3]^4} = 10^{9.46}$$

$$[Zn^{2+}] = \frac{[[Zn(NH_3)_4]^{2+}]}{K[NH_3]^4}$$

$$[Zn^{2+}][OH^-]^2 = \frac{[[Zn(NH_3)_4]^{2+}]}{K[NH_3]^4} \times [OH^-]^2 \leq K_{sp}$$

$$\begin{aligned} [NH_3] &\geq \sqrt[4]{\left( \frac{[[Zn(NH_3)_4]^{2+}] \times [OH^-]^2}{K_{sp} \times K} \right)} \\ &\geq \sqrt[4]{\left( \frac{0.10 \times \{10.0/(10.0+1.55)\} \times 10^{-7.0}}{7.0 \times 10^{-18} \times 10^{9.46}} \right)} \\ &\geq 0.809 \text{ mol/L} \end{aligned}$$

従って、 $[NH_3] \geq 0.809 \text{ mol/L}$ になれば、水酸化亜鉛  $Zn(OH)_2$ がテトラアンミン亜鉛(II)イオン  $[Zn(NH_3)_4]^{2+}$ になると算出された。実験②でアンモニア水を1.55mL滴下したとき  $[NH_3] = 0.805 \text{ mol/L}$ になるので、ほぼ理論値どおりの濃度で沈殿が消失したことが観察された。

実験③では、 $[Cu^{2+}] = 0.10 \text{ mol/L}$ 水溶液10.0mLに、6mol/Lアンモニア水を1.05mL滴下して、 $pH = 10.3$ になったときに沈殿が消失した条件をあてはめると、 $pH = 10.3$ は  $[OH^-] = 10^{-3.7} \text{ mol/L}$ に相当するから、

$$\text{溶解度積 } K_{spCu(OH)_2} = 1.9 \times 10^{-20} \text{ mol}^3/\text{L}^3$$

$$\text{全安定度定数 } K = \frac{[[Cu(NH_3)_4]^{2+}]}{[Cu^{2+}][NH_3]^4} = 10^{13.3}$$

②と同様に  $[NH_3]$ を算出すると、 $[NH_3] \geq 0.312 \text{ mol/L}$ になれば、水酸化銅(II)  $Cu(OH)_2$ がテトラアンミン銅(II)イオン  $[Cu(NH_3)_4]^{2+}$ になると算出された。実験③でアンモニア水を1.05mL滴下して  $[NH_3] = 0.570 \text{ mol/L}$ になったときに沈殿が消失したことが観察された。

実験④では、0.10mol/L硝酸銀  $AgNO_3$ 水溶液10.0mLに、6mol/Lアンモニア水を0.49mL加えて  $pH = 11.0$ になったときに沈殿が消失した条件をあてはめると、 $pH = 11.0$ は  $[OH^-] = 10^{-3.0} \text{ mol/L}$ に相当するから、

$$\text{溶解度積 } K_{spAgOH} = 2.6 \times 10^{-8} \text{ mol}^2/\text{L}^2$$

$$\text{全安定度定数 } K = \frac{[[Ag(NH_3)_2]^+]}{[Ag^+][NH_3]^2} = 10^{7.40}$$

②と同様に  $[NH_3]$ を算出すると、 $[NH_3] \geq 1.21 \times 10^{-2} \text{ mol/L}$ になれば、酸化銀  $Ag_2O$ がジアンミン銀(I)イオン  $[Ag(NH_3)_2]^+$ になると算出された。実験④でアンモニア水を0.49mL滴下して、 $[NH_3] = 0.280 \text{ mol/L}$ になったときに沈殿が消失したことが観察された。

以上より、亜鉛がテトラヒドロキシド亜鉛(II)酸イオン  $[Zn(OH)_4]^{2-}$ やテトラアンミン亜鉛(II)イオン  $[Zn(NH_3)_4]^{2+}$ になる実験①②では、理論値として算出した  $[OH^-]$ や  $[NH_3]$ が、実際に滴定実験で得られた  $[OH^-]$ や  $[NH_3]$ にきわめて近く、沈殿の消失を目視で判断できる結果となった。また、テトラアンミン銅(II)イオン  $[Cu(NH_3)_4]^{2+}$ が生成する実験③では理論値の1.8倍、ジアンミン銀(I)イオン  $[Ag(NH_3)_2]^+$ が生成する実験④では理論値の23倍のモル濃度の配位子試薬を加えたときに錯イオンが生成するという結果が得られた。

これらのことにより、金属陽イオンの水溶液に「過剰」に試薬を加えたときに沈殿が溶解する反

応は、配位子試薬の体積を増やしたから起こった反応ではなく、配位子を含む試薬の濃度を高めることにより溶解しやすい錯イオンを生成させた結果、沈殿の溶解度積を下回ったからであることがわかった。

特に今回の実験で用いた水酸化ナトリウム水溶液やアンモニア水は濃厚溶液なので容易に錯イオンが生成したが、0.1mol/L希薄溶液を用いた場合、沈殿は生成するが錯イオンは生成しないことも確認した。(図6)

つまり「過剰量」とは、体積が過剰なのではなく、濃度が過剰になっている試薬を用いなければ錯イオンが生成しないことを表している。

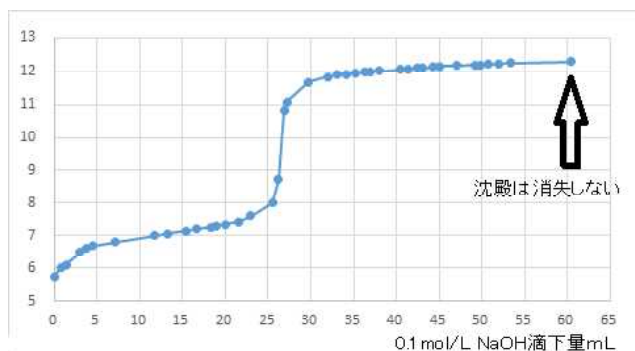


図6  $Zn^{2+}$  に0.1mol/LNaOHを滴下したときの滴定曲線

## 5 課題と展望

今回の実験では沈殿の生成と消失を目視で観察しつつ滴定したが、キレート滴定で用いるEBT指示薬やNN指示薬のような配位の仕方が変わると色調が変わる指示薬を用いると、もっと錯イオンの生成の瞬間を判断しやすいと考えられる。

亜鉛から錯イオンを生成する配位子試薬の濃度は理論値どおりだが、銀から錯イオンを生成する濃度は理論値の23倍も要した原因はまだわからない。

また、錯体の安定度は金属及び配位子の性質によって決まるが、金属イオン側の要因としては、

- i. 金属イオンが小さいほど、電荷が大きいほど、安定な錯体を作る
  - ii. 結晶場安定化エネルギー
  - iii. 配位結合の共有性とイオン性
- 配位子側の要因としては、
- i. 強塩基性の配位子ほど陽イオン性の強い金属イオンと結びつきやすい
  - ii. 単座配位子よりも多座配位子の方が結びつきやすい
  - iii. 配位子の立体的遮蔽が少ない方が結びつきやすい

など、さまざまな知見がこれまでに得られているうちのごく一部を今回考察したに過ぎないので、今後も取り組んでいきたいテーマであった。

## 6 参考文献

- 「化学I・IIの新研究」三省堂 卜部吉庸 著  
「配位化学(第2版)金属錯体の化学」化学同人  
バソロ、ジョンソン 共著 山田祥一郎 訳 1966年  
「新版錯体化学—基礎と最新の展開」講談社サイ  
エンティフィック 基礎錯体工学研究会 編 2002年  
「理科年表(平成27年)」丸善出版 国立天文台 編  
「陽イオン定性分析への考察」日本歯科大学紀要  
野本洋子・薩摩林紘子 著 1981年3月  
「金属錯体の溶液内平衡と反応」電気化学及び  
工業物化学12号66巻1998年 齊藤一夫 著  
「錯化剤を含む水溶液系の平衡図の作成とその  
活用」分析化学18(11)1969年 加藤正義 著  
「錯滴定法の基礎」分析化学5巻1956年山本勇麓著  
「金属錯体の安定度」分析化学14巻1965年  
柴田村治 著  
「キリヤ化学(Q&A白い硫酸銅を水に溶かすとどう  
して青くなるのですか?)」  
<http://www.kiriya-chem.co.jp/q62>  
「化学徒の備忘録(化学系ブログ)分光化学系列と  
配位子の電子供与、逆供与について」  
<https://www.syero-chem.com/entry/2018>  
Predicting Stability Constants of Metal Ion  
Complexes from the First Principles.  
Ondrej Gutten and Lubomir Rulisek

## 7 謝辞

いろいろな疑問に答えてくださり、実験にご協力いただいた畷傍高等学校化学科の先生方に紙面を借りて御礼申し上げます。