



化学グランプリ 2013

二次選考問題 解答例と解説

2013年8月23日（金）実施

主催

日本化学会

「夢・化学 - 21」委員会

共催

科学技術振興機構（JST）

東北大学大学院理学研究科

東北大学大学院工学研究科

東北大学高等教育開発推進センター

高等学校文化連盟全国自然科学専門部



出題のねらい

今回の二次選考を受験され、どのような感想をもたれたでしょうか。まさに予想が的中、それとも全く予想もしなかった分野からの出題だったでしょうか。ご存知のとおり、化学の分野はとても幅広いものです。高校の教科書では、単に「化学」ですが、大学では、物理化学や量子化学、無機化学、分析化学、放射化学、有機化学、生物化学など、より専門化した内容に整理・分類され、それぞれの分野を深く学んでいきます。しかし、各分野はそれぞれが独立したものではなく、互いに密接に関連しており、各分野の成果が相乗的に働くことで、化学全体が発展してきました。

この二次選考では、飲料水を題材として取り上げ、その成分分析を通して、化学的思考力や考察力の基礎となる知識や操作技術、そして実験センスを問うことを意識しました。ある物質を分析する知識や技術は、あらゆる化学分野の研究を行っていく上で欠かすことのできない基礎であると同時に、種々の分野の知識（成果）の融合の上に成り立っています。この試験で行った定量実験や設問を通して、そうしたことを少しでも感じていただけると幸いです。また、この二次選考では、色調変化を利用する定量法を特に取り上げており、試験とはいえ、化学ならではの楽しさを感じていただくことにも注意を払いました。

このグランプリの開催に関係した委員の先生方をはじめ日本化学会の関係者は、皆さんには何らかの形で将来の日本の科学技術を支え、担い、発展に貢献できる人材になってほしいと切に願っています。そのためには、幅広い基礎知識を学ぶことと同時に、ある特定の分野を深く掘り下げて自身の専門とし、さらには分野を横断して考える力（分野横断）や異分野の知識を融合して考える力（異分野融合）を身につけていくことが大切です。今回の二次選考を通じ、こうした意識を頭のどこか片隅においていただけると幸いです。そして、将来、皆さんの手で日本の科学技術を先導し、世界をリードしてください！

飲料水の成分分析 ～あなたの好みは水道水、それともボトル水～

はじめに

地球上で最も重要な化学物質のひとつが、「水」であることに異論はありません。地球表面の約70%は水に覆われており、また、子供の身体の約75%、成人の身体のほぼ50%が水なのです。わたしたちは、水がなければ命を保つことはできず、暑い夏には、美味しい水が欠かせません。

さて、水の美味しさを決めているのはその成分で、硬度が大きな要素の一つとなっています。硬度とは、水中のカルシウムイオンとマグネシウムイオンの量を、これに対応する炭酸カルシウムの量に換算したもので、水1リットル中に含まれている質量(mg/L)で表したものです。

$$\text{全硬度} = \text{カルシウム硬度} + \text{マグネシウム硬度}$$

一般に、硬度が大変低い水(軟水)は淡白でこくのない味がし、硬度の高い水(硬水)は口に残るようなしつこい味がします。飲料水の硬度は国や地域によって大きく異なります。日本の水(飲料水)は、硬度20~100(mg/L)のものが多いのに対し、海外では硬度が極めて高い水(~1,600)が飲用されていることもあります。

また、飲料水は、美味しさだけでなく安全性がとても重要です。私たちが日常口にする水道の水は、微生物を殺す殺菌処理が施されており、ほとんどの場合に塩素消毒法が使われています。我が国の水道法では、水道水中の残留塩素濃度を0.1 mg/L(0.1 ppm)以上に保持すると定められており¹⁾、蛇口から出てくる水の安全が確保されています。しかし、残留塩素の味と臭いが不快感を与えることなど、塩素殺菌には欠点もあります。

一方、市販されているボトル水(いわゆるミネラルウォーター)の場合、塩素殺菌は行われていません。これは、ボトル水の主な取水源が殺菌を必要としない湧き水や地下水であるためで、殺菌が必要な場合には塩素ではなくオゾンまたは紫外線照射等が使われています。いまでは、国内外から様々なタイプのボトル水が市販され、私たちの生活に潤いを与えています。

本試験では、次の3つのサンプルからとった飲料水(A、B、C)を未知試料として成分分析を行い、それぞれどのサンプルに相当するのか、同定を行います。

サンプル①：全硬度100(mg/L)以下の水道水

サンプル②：全硬度100~500(mg/L)の市販ボトル水

サンプル③：全硬度1,200~1,600(mg/L)の市販ボトル水

測定対象となる成分²⁾は、1) 残留塩素、2) 塩化物イオン、3) 硫酸イオン、4) 全硬度、の計4種類です。また、飲料水の成分の違いに起因する現象(紅茶の色と濁り)について考察します。

1) 結水栓(蛇口)における値。

2) 本試験では、飲料水中の陽イオンとして、カルシウムイオン、マグネシウムイオン、ナトリウムイオン及びカリウムイオンのみを考慮します。また、陰イオンとしては、炭酸水素イオン、硫酸イオン及び塩化物イオンのみを考慮し、これらの陽イオンと陰イオンの間で電荷が釣り合っているものとします。

1. 残留塩素の定量

水中の残留塩素濃度の測定法はいくつかありますが、ここでは *N,N*-ジエチル-*p*-フェニレンジアミン (DPD) を用いて残留塩素濃度を定量します。DPD は残留塩素と速やかに反応し、桃赤色を呈します。

問 1 それぞれの飲料水中の残留塩素濃度 (mg/L) を答えなさい。

問 2 塩素が水中で殺菌作用を示す原理を、化学反応式を交えて説明しなさい。

問 3 カルキ抜き (脱塩素) の手法として、下記 (3-A) ~ (3-C) はいずれも有効で、家庭でもよく行われている。それぞれの手法の原理を説明しなさい。

(3-A) 炭を入れる

(3-B) レモン汁を入れる

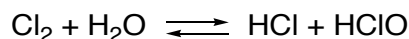
(3-C) 沸騰させる

[解答例]

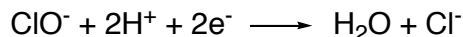
問 1 飲料水 A : 0 mg/L、飲料水 B: 0.4 mg/L、飲料水 C: 0 mg/L

*飲料水 B (水道水) の残留塩素濃度は、測定日によって異なります。

問 2 塩素は水に溶け、その一部が反応して塩化水素と次亜塩素酸が生じる。



次亜塩素酸は酸化剤として働くため、殺菌作用を示す。



問 3

(3-A) 多孔質の炭に、水に溶けた塩素や生成したイオンが吸着する。

(3-B) レモン汁に含まれるビタミン C (アスコルビン酸) は還元剤で、次亜塩素酸と酸化還元反応する。

(3-C) 水に溶けている塩素を放出させる。

[解説]

DPD を用いた残留塩素の定量法では、極めて明瞭な発色が観測されますので、飲料水 B (水道水) には残留塩素が含まれていることを実感できたと思います。ここでは、実験操作の熟練度よりむしろ、高校化学で学ぶ塩素殺菌の原理をどれだけ理解できているか、皆さんの知識を問うています。

また、塩素殺菌は飲料水の安全を確保する反面、水道水の不快な臭いや味の原因となる場合があります。ここで取り上げた脱塩素の方法は、いずれもとても簡単かつ効果的な方法で、高校化学で学ぶ知識が私たちの身近な生活に活かされている例といえます。

2. 陰イオンの定量

飲料水中の主な 2 種類の陰イオンである塩化物イオンと硫酸イオンを定量します。いずれも、難溶性の塩の生成反応（沈殿生成）を利用します。

問4 それぞれの飲料水中の塩化物イオン濃度 (mg/L) を答えなさい。蒸留水で 2 倍に希釈していることに留意すること。

問5 実験 2-1（塩化物イオンの定量）の測定原理は、難溶性の塩の生成（沈殿生成）と生成した沈殿への色素の吸着が利用されている（ファヤンス法と呼ばれる沈殿滴定）。次の問いに答えなさい。

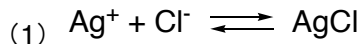
(1) 沈殿生成に用いる試薬は硝酸銀で、塩化物イオンと反応して白色の疎水性コロイドを生成する。沈殿が生成するイオン反応式を書きなさい。

(2) 終点の検出には、フルオレセインと呼ばれる色素が用いられており（図 2.1）、この色素が沈殿に吸着することで、色が変わることが利用される（吸着指示薬と呼ばれる）。興味深いことに、色素の沈殿への吸着は、当量点の前では起こらず、当量点を過ぎると初めて沈殿に吸着することができる。この理由について説明しなさい。なお、当量点とは、分析成分（ここでは塩化物イオン）と過不足なく反応する量の滴定剤（ここでは硝酸銀）が加えられた点をいう。

[解答例]

問4 飲料水 A : 10 mg/L、飲料水 B: 10 mg/L、飲料水 C: 10 mg/L

問5



(2) 生成する AgCl はコロイド粒子で、当量点の前では Cl⁻が過剰に存在するため、コロイドの表面には Cl⁻が吸着している。そのため、陰イオンである色素と反発する。

当量点をすぎると Ag⁺が過剰となり、コロイドの表面には Ag⁺が吸着してプラスに帯電するようになる。そのため、陰イオンである色素が吸着できるようになる。

問6 それぞれの飲料水中の硫酸イオン濃度 (mg/L) を答えなさい。ただし、定性分析（実験 2-2）のみ行った試料は、硫酸イオン濃度を 0 mg/L として解答すること。

問7 硫酸イオンの定量は、塩酸酸性下で検水に塩化バリウムを加え、硫酸イオンと反応して生じる難溶性の硫酸バリウム粒子により、溶液の濁度が増加することを利用している（比濁法）。硫酸バリウムの溶解度積 K_{sp} を 1.0×10^{-10} [(mol/L)²] (25°C) とし、次の問いに答えなさい。

(1) 硫酸バリウムの純水に対する溶解度 (mol/L) を計算しなさい (25°C)。計算過程も記しなさい。

(2) 実際に硫酸イオンを定量する際には、検水中に塩化バリウムが過剰に存在している。いま仮に、バリウムイオンが 0.010 mol/L 過剰に存在しているとすると、このときの硫酸バリウムの溶解度 (mol/L) を計算しなさい (25°C)。計算過程も記しなさい。

[解答例]

問6 飲料水 A : 1,200 mg/L、飲料水 B: 0 mg/L、飲料水 C: 0 mg/L

問7

(1) 溶解度 : 1.0×10^{-5} (mol/L)

計算過程 : $\text{BaSO}_4 \rightleftharpoons \text{Ba}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$

$$K_{\text{sp}} = [\text{Ba}^{2+}] [\text{SO}_4^{2-}] = 1.0 \times 10^{-10}$$

BaSO_4 の溶解度を s とおくと

$$[\text{Ba}^{2+}] = [\text{SO}_4^{2-}] = s$$

$$s^2 = [\text{Ba}^{2+}] [\text{SO}_4^{2-}] = K_{\text{sp}}$$

$$s = \sqrt{K_{\text{sp}}}$$

$$= 1.0 \times 10^{-5} \text{ (mol/L)}$$

(2) 溶解度 : 1.0×10^{-8} (mol/L)

計算過程 : このときの溶解度を s' とおくと

$$[\text{Ba}^{2+}] = 0.010 + s'$$

$$[\text{SO}_4^{2-}] = s'$$

ここで $s' \ll 0.01$ であるので

$$[\text{Ba}^{2+}] \approx 0.010$$

$$\text{よって、} 0.010 \times s' = K_{\text{sp}}$$

$$s' = 1.0 \times 10^{-8} \text{ (mol/L)}$$

[解説]

ここで取り上げた陰イオンの定量法は、難溶性の塩の沈殿生成反応を利用するもので、沈殿滴定と呼ばれています。正確な沈殿滴定を行うために重要なことは、分析成分（ここでは塩化物イオン、あるいは硫酸イオン）に対して滴定剤（ここでは硝酸銀、あるいは塩化バリウム）を過剰に加えることです。この点が、過不足なく反応する量の滴定剤を加える酸塩基滴定やキレート滴定とは大きく異なることに注目してください。

塩化物イオンの定量は、塩化銀の生成を利用した方法で、ファヤンス (Fajans) 法と呼ばれています。生成する塩化銀は疎水性のコロイド (ゾル) で、その表面に溶液中で過剰になっている (沈殿粒子の) イオンが吸着するため、電荷を帯びています。塩化物イオンを銀イオンで滴定する場合、当量点の前では、塩化物イオンが過剰であり、塩化物イオンが表面に吸着しているため、指示薬 (陰イオン) と反応します。当量点を過ぎると銀イオンが過剰となり、表面には銀イオンが吸着しているため、指示薬 (陰イオン) が吸着できるようになります。

硫酸イオンの定量には、硫酸バリウムの沈殿生成が利用されており (比濁法)、ここでも塩化バリウム (滴定剤) が過剰に加えられています。これにより硫酸バリウムの溶解度が極めて小さくなるため、より正確な定量が可能となります。この効果は、皆さんもよく知っている共通イオン効果と呼ばれるものです。なお、比濁法では、溶液の白濁度 (濁り) と硫酸イオン濃度との間に比例関係が成立することを利用して使っています。本試験では目視により定量しましたが、より正確に定量する場合には、白濁した溶液の吸光度 (600~700 nm) を測定します。

以上のように、高校化学で学ぶ知識 (沈殿生成やコロイドの性質、共通イオン効果) が、実際の陰イオンの分析に巧みに活かされていることをよく知ってください。

3. 陽イオンの定量

飲料水中の主な2種類の陽イオンであるカルシウムイオンとマグネシウムイオンを定量します。まず、フタレインコンプレクソン (PC) を発色試薬として用いたパックテストにより全硬度を測定します (全硬度 200 まで測定可能)。PC は、アルカリ性溶液中でカルシウムイオンやマグネシウムイオンと錯体を形成し、赤紫色を呈します。

全硬度 200 以上の試料 (飲料水) についてはさらに、キレート滴定により、カルシウムイオンとマグネシウムイオンの合計量を測定します。キレート滴定とは、キレート試薬とよばれる多座配位子と金属イオンとが、水溶性の安定な錯体を形成する反応を利用する定量法です。キレート試薬としては、エチレンジアミン四酢酸 (EDTA) が広く用いられています。EDTA は四塩基酸 (解離する水素イオンを 4 個もっている酸) で、アルカリ性溶液中 (pH 10 付近) において、カルシウムイオンやマグネシウムイオンと 1:1 のモル比で定量的に結合します (ナトリウムイオンなどのアルカリ金属イオンとは結合しない)。

キレート滴定では、滴定の終点を金属指示薬の色調変化を利用して検出します。金属指示薬はそれ自身もキレート試薬で、遊離して存在するときと、金属イオンと結合した場合とで明瞭な色調の変化を示します¹⁾。種々の指示薬が知られていますが (PC もキレート試薬)、EDTA でカルシウムイオンとマグネシウムイオンを滴定するときには、エリオクロムブラック T (BT) が指示薬として用いられます。この指示薬は三塩基酸で (H_3In と表記)、試料溶液に少量加えると、溶液中のマグネシウムイオンと結合して赤色を呈しますが、滴定が進むにつれて結合したマグネシウムイオンが EDTA に奪われ、終点では遊離した状態の青色となります。

1) 金属指示薬は弱酸であり、酸塩基指示薬と同様に、溶液の pH に依存して色調が変化します。例えば、BT はナフトール性ヒドロキシ基を 2 個もっており、酸性溶液では赤色、中性～アルカリ性溶液で青色を呈します。アルカリ性溶液中において、解離したヒドロキシ基が配位結合により金属イオンと結合すると、分子の電子状態が変化して赤色となります。

問8 次の問いに答えなさい。計算のために必要な場合には、以下の数値を使用すること。

原子量 H = 1.0 C = 12.0 O = 16.0 Na = 23.0 S = 32.1 Cl = 35.5
K = 39.1 Ca = 40.1

(1) パックテスト (実験 3-1) の結果から求めたそれぞれの飲料水の全硬度 (mg/L) を答えなさい。

(2) キレート滴定 (実験 3-2) の結果より、飲料水中のカルシウムイオンとマグネシウムイオンの合計濃度 (mol/L) および全硬度 (mg/L) を有効数字 3 桁で答えなさい。ただし、全硬度を計算する際には、滴定で求められた合計濃度が全てカルシウムイオンに由来するものと考えること。また、計算過程も記しなさい。

*キレート滴定を行わなかった飲料水については、解答欄に「キレート滴定を行わなかった」と答えること。また、滴定を 2 回行った場合には、2 回目の滴定結果を答えること。

(3) これまでの実験結果 (陰イオン及び陽イオンの定量結果) をまとめて示し、飲料水の成分表を完成させなさい。ミリモル濃度 (mmol/L) の単位で、小数点以下一桁まで答えること。炭酸水素イオン濃度は計算して答えなさい。なお、ナトリウムイオンおよびカリウムイオンの濃度は解答欄に記載されている値を用いること。

*塩化物イオンの定量で（実験2-1）、濃度が100 mg/L以上となった場合、その値を塩化物イオンの成分量として計算すること。

*キレート滴定を行わなかった飲料水のカルシウムイオンとマグネシウムイオンの合計濃度は、全硬度の値から計算しなさい。ただし、全硬度が全てカルシウムイオンに由来するものとして計算すること。

(4) これまでの実験結果（残留塩素、陰イオン及び陽イオンの定量結果）から、3種類の飲料水（A、B、C）が次のなかのどのサンプルであるか、同定しなさい。解答欄には、サンプルの番号を記入すること。

サンプル①：全硬度100（mg/L）以下の水道水

サンプル②：全硬度100～500（mg/L）の市販ボトル水

サンプル③：全硬度1,200～1,600（mg/L）の市販ボトル水

[解答例]

問8

(1) 飲料水A：1,500 mg/L、飲料水B：35 mg/L、飲料水C：350 mg/L

(2) 飲料水A：

分析した量 10.0 mL、EDTA溶液の滴定量 15.20 mL、合計濃度 15.2 mmol/L、
全硬度 1.52×10^3 mg/L

計算過程

合計濃度を x mmol/L とすると

$$x \text{ (mmol/L)} \times 10.0 \text{ (mL)} = 10.0 \text{ (mmol/L)} \times 15.20 \text{ (mL)}$$

$$x = 15.2 \text{ (mmol/L)}$$

全てカルシウムイオンに由来すると仮定すると、CaCO₃の式量は100.1より

$$\begin{aligned} \text{全硬度 (mg/L)} &= [\text{Ca}^{2+}] \text{ (mol/L)} \times (100.1 \times 10^3) \text{ (mg)} \\ &= 0.0152 \times (100.1 \times 10^3) \\ &= 1521.52 \end{aligned}$$

飲料水B：キレート滴定を行わなかった。

飲料水C：

分析した量 40.0 mL、EDTA溶液の滴定量 11.60 mL、合計濃度 2.90 mmol/L、
全硬度 290 mg/L

計算過程

合計濃度を x mmol/L とすると

$$x \text{ (mmol/L)} \times 40.0 \text{ (mL)} = 10.0 \text{ (mmol/L)} \times 11.60 \text{ (mL)}$$

$$x = 2.90 \text{ (mmol/L)}$$

全てカルシウムイオンに由来すると仮定すると、CaCO₃の式量は100.1より

$$\begin{aligned} \text{全硬度 (mg/L)} &= [\text{Ca}^{2+}] \text{ (mol/L)} \times (100.1 \times 10^3) \text{ (mg)} \\ &= 0.0029 \times (100.1 \times 10^3) \\ &= 290.29 \end{aligned}$$

(3)

飲料水の成分表 (mmol/L)

	$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
飲料水 A	15.2	0.5	0.3	12.5	5.6
飲料水 B	0.4	0.7	0.3	0	1.2
飲料水 C	2.9	0.3	0.3	0	5.8

(4) 飲料水 A : ③、飲料水 B: ①、飲料水 C: ②

[解説]

多くの皆さんが、初めてキレート滴定を経験されたのではないのでしょうか。キレート滴定は、金属イオンの代表的な定量法の一つで、特に全硬度（カルシウムイオンとマグネシウムイオン濃度）の測定には欠かせない定量法です。正確なキレート滴定を行うためには、ホールピペットやビュレットの取り扱いなど、定量操作や滴定操作の熟練に加えて、キレート試薬や金属指示薬等の性質をよく理解していることが重要です。

キレート試薬として用いたエチレンジアミン四酢酸（EDTA）は、4つのカルボキシ基を持つ弱酸で、アルカリ性溶液中でのみ、カルシウムイオンやマグネシウムイオンと錯体を生成することができます。しかし、強アルカリ性溶液中では、アルカリ土類金属イオンが加水分解して沈殿を生じるため、全硬度の測定には、溶液の pH を正確に調整することが基本となります。本試験では、pH 緩衝液を加えて、溶液の pH を 10 に調整しています。

終点の検出には、エリオクロムブラック T（BT）を用いました。極めて明瞭な色調変化を示す優れた金属指示薬ですが、カルシウムイオンとは安定な錯体を生成しません。そのため、溶液中にマグネシウムイオンが存在しない時には、金属指示薬として利用することができません（終点を検出できない）。また、溶液中のマグネシウムイオン濃度に応じて、終点の検出に利用する色調変化を変える必要があります。本試験で分析した試料（飲料水 A、C）のマグネシウムイオン濃度は 1~3 mmol/L で、比較的濃度が低いため、溶液の赤みが完全に消えて、青色になった点が終点となります。ところが、マグネシウムイオン濃度がより高い時には、溶液に少し青みがかかった点（変色点といいます）が終点となります。

解答例（問 8 (3)）として示した「カルシウムイオン+マグネシウムイオン」濃度の値は、実際の測定値です。どれだけ正確に測定することができたか、自分の測定値と比べてみてください。

なお、本試験では、飲料水 B（水道水）と飲料水 C（市販ボトル水）の硫酸イオン濃度を 0 mg/L としましたが、実際の濃度はそれぞれ 27.3 mg/L (0.284 mmol/L)、14.4 mg/L (0.150 mmol/L)となります。また、塩化物イオンのより正確な濃度は、飲料水 A : 12.7 mg/L (0.358 mmol/L)、飲料水 B : 11.8 mg/L (0.332 mmol/L)、飲料水 C : 8.32 mg/L (0.234 mmol/L)となります。

4. 紅茶と水

2 種類のボトル水（サンプル②、サンプル③）で紅茶をいれると、色や濁りの違いが出てきます。その理由を考察します。

問 9 サンプル②、③の水で浸出した紅茶の色や濁りの状態を、蒸留水で浸出した紅茶を基準として答えなさい。

問 10 紅茶の色や香りを決めている主な成分は、図 4. 1 に示したテアフラビンとよばれるポリフェノールである。以下の問いに答えなさい。

(1) 水の硬度の違いによって、紅茶の色や濁りの違いが生じる理由（仮説）を述べなさい。

(2) (1) で立てた仮説を確かめるための実験を立案し、実際に行いなさい。行った実験の方法と手順、結果を示すこと。なお、実験には浸出した紅茶と、EDTA 溶液を使用すること。

(3) 今回の実験で使用した市販ボトル水（サンプル②、サンプル③）を十分に煮沸した後、常温まで冷却して紅茶を入れると、紅茶の色や濁りはどのようになるか。2 種類のボトル水について、それぞれ予想される結果とその理由を述べなさい。

[解答例]

問 9

サンプル②：蒸留水で浸出した紅茶と比べて、色はより濃くなっている。また、濁りはない（蒸留水の場合と同じ）。

サンプル③：紅茶の色は蒸留水で浸出した紅茶とほぼ同じであるが、濁りが見られる。

問 10

(1) テアフラビンは Ca^{2+} (Mg^{2+}) と相互作用（結合）することができ、相互作用すると色が濃くなる（色調が変化する）。つまり、金属指示薬に似た性質をもっている。

また、テアフラビンと Ca^{2+} (Mg^{2+}) の錯体の溶解性は低く、 Ca^{2+} (Mg^{2+}) が極めて多量に存在すると（錯体の生成量が多いと）、析出する。

(2) 実験 1：サンプル②で浸出した紅茶 3 mL に EDTA 溶液 3 mL あるいは蒸留水 3 mL を加え、溶液の色を比較した。

その結果、EDTA 溶液を加えることで、紅茶の色がより薄くなることが分かった。これは、テアフラビンと結合していた Ca^{2+} (Mg^{2+}) が EDTA に奪われたためと考えることができ、テアフラビンの色調変化が Ca^{2+} (Mg^{2+}) との結合に基づくことを示唆している。

実験 2：サンプル③で浸出した紅茶 3 mL に EDTA 溶液 3 mL あるいは蒸留水 3 mL を加え、溶液の濁りを比較した。

その結果、EDTA 溶液を加えることで、紅茶の濁りがなくなることが分かった。これは、多量に存在していた Ca^{2+} (Mg^{2+}) が EDTA と結合した結果、不溶物が可溶化したものと考えることができ、紅茶の濁り（不溶物）が Ca^{2+} (Mg^{2+}) との結合に基づくことを示唆している。

(3) サンプル②

予想される結果：紅茶の色は薄くなり、蒸留水で入れたときの色に近くなる。

理由：サンプル②に含まれている陰イオンは主に炭酸水素イオンであり、煮沸すると炭酸カ

ルシウムが沈殿する。



このように煮沸することで、水が軟水化されるため。

サンプル③

予想される結果：紅茶の濁りはそのまま、大きな変化はない。

理由：サンプル③には硫酸イオンが多量に含まれており、煮沸しても軟水化されないため。

【解説】

硬度の違いによる紅茶の色や濁りの違いを上手く観測することができたでしょうか。硬度の極めて高い水で紅茶をいれると、時には黒っぽい色となることもあります。紅茶のことを英語では、「black tea」といい、これは茶葉の色が黒色であることに由来しています。しかし、ヨーロッパでは硬度の高い水が飲用されていますので、紅茶の色から「紅茶」を「黒茶」と表現しても不思議ではないかもしれません。

さて、実験4では、実験3のキレート滴定が伏線となっています。すなわち、紅茶の色と濁りの原因を紅茶色素とカルシウムイオンやマグネシウムイオンの相互作用と結びつけることができたか（金属指示薬と類似の性質）、また、EDTA を利用することで、カルシウムイオンやマグネシウムイオンを取り除くことに気が付くことができたか、これらがポイントとなります。さらに重要なことは、EDTA の効果を明確に示すために対照実験（コントロール）を行うことで、この部分で皆さんの実験センスを問いました。

また、煮沸の効果を予想するために、試料水の陰イオン成分に着目することができたでしょうか。硬度は一時硬度（炭酸塩硬度）と永久硬度（非炭酸塩硬度）に区別されます。試料水中に炭酸水素イオンが含まれていると、煮沸することで溶液中のカルシウムイオンやマグネシウムイオンが炭酸塩として沈殿し除去されます。このように炭酸塩の沈殿として除去できる量を一時硬度と呼びます。一方、硬度成分（カルシウムイオンとマグネシウムイオン）が塩化物や硫酸塩の形で溶けている場合、煮沸しても硬度成分は析出しないため、水の硬度が下がることはありません。この量のことを永久硬度と呼びます。本試験で用いた市販ボトル水では、硫酸イオン濃度が大きく異なっているため、煮沸の効果が違ってくるのです。