

酒石酸カリウムナトリウム塩結晶の自然分割に関する教材化

巻本 彰一・織田 壘

The Teaching Material on the Natural Division of the Tartaric Acid Potassium Sodium Salt Crystal

Shoichi MAKIMOTO and Rui ODA

Accepted June 21, 2021

抄録：高等学校化学の教科書では、光学異性体についての記述はあるものの、実験はほとんど取り上げられていない。そのためパスツールが行った酒石酸ナトリウムアンモニウム結晶の自然分割実験は、生徒が光学異性体の存在を実感できる実験教材として追試が行われている。しかし実験の過程でアンモニア水を適宜補充する必要があり、得られた結晶が風解しやすいといった難点がある。そこで、同じく酒石酸塩である酒石酸カリウムナトリウムを用いて、より簡単に光学異性体の結晶を得ることができるような教材化の開発を試みた。

索引語：酒石酸カリウムナトリウム，光学異性体，結晶，自然分割

Abstract: Although high school chemistry textbooks describe optical isomers, they do not cover most experiments. Therefore, Pasteur's natural division experiment of sodium ammonium tartrate crystals is being retested as an experimental teaching material in which students can experience the existence of optical isomers. However, the ammonium solution must be appropriately supplemented during the experiment, and it is difficult to effloresce a provided crystal. We tried to develop teaching materials that would make it easier to obtain crystals of optical isomers using tartrate, which is tartaric acid potassium sodium.

Key words: potassium sodium tartrate, optical isomer, crystal, natural division

1. はじめに

ある四面体炭素が4つの異なる置換基と結合しているとき、その四面体炭素は不斉炭素と呼ばれ、分子には鏡像異性体と呼ばれる2つの立体異性体が生じる。鏡像異性体には2つの分子を俯瞰してみると分子間に対称面が存在し、その面を境に分子どうしが鏡合わせ（鏡像）の関係にあるので、2つの分子はいわば右手と左手のように立体的に重ね合わせることができない。鏡像異性体の関係にある分子どうしは、融点や沸点、密度といった物理的性質やアキラルな分子に対する反応性といった化学的性質は同じであるが、生理的活性は片方のみが示す。また、

平面偏光を異なる向きに同じ角度だけ回転させるという性質の違いもみられるので、鏡像異性体は光学異性体とも呼ばれている。高等学校化学の教科書^{1,2)}では、両者が鏡像関係にある乳酸(図1)やアラニン为例に鏡像異性体や光学偏光に関する記述が見られる。

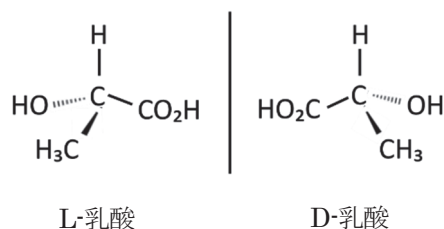


図1 鏡像異性体の例(乳酸)

鏡像異性体は光学偏光が異なるのでD-、L-以外に両者を旋光度で区別することがある。偏光面の回転が右回りになるものを右旋性(dextrorotatory)といい旋光性を表す(+)や*d*-を化合物名の前に、逆に左回りになるものを左旋性(levorotatory)といい(-)や*l*-を化合物名の前に付けることがある。しかし、これらの旋光性と分子中の各官能基の絶対配置とは直接関係がないので、D-グルコースは右旋性なのでD-(+)-グルコースとなるが、前述のL-乳酸は右旋性なのでL-(+)-乳酸、まれに*d*-乳酸と表す場合がある。もちろんD-乳酸は左旋性なのでD-(-)-乳酸、まれに*l*-乳酸と表すことになる。

一般的に分子内に不斉炭素が*n*個ある分子の場合は、 2^n 個の立体異性体ができる。立体異性体には、分子同士が互いに鏡像異性体の関係にあるエナンチオマーとそれらと関係がないジアステレオマーに分けられる。酒石酸は炭素数が4で、カルボキシ基を2つ、ヒドロキシ基を2つもつヒドロキシ酸であり、二塩基酸でもある。酒石酸の構造式をまとめて図2に示す。

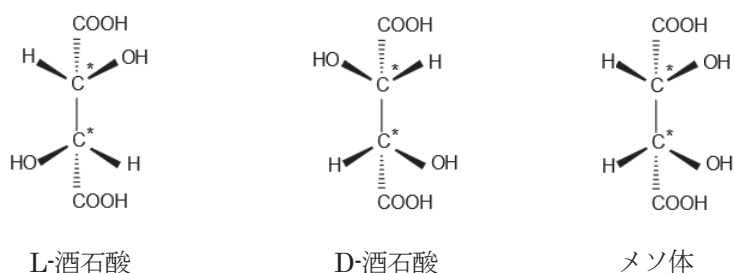


図2 酒石酸の構造式

酒石酸は分子内に2つの不斉炭素を持つので4つの立体異性体ができる。そのうち2つは鏡像異性体の関係にあるL-体とD-体であり、両者はエナンチオマーであるので光学異性体の関係にある。一方、残り2つであるが、それらの分子は分子内に対称面をもつので回転させると同一分子となり、メソ体と呼ばれている。

パスツールは1848年に酒石酸ナトリウムアンモニウムのラセミ溶液から、右旋性であるL-酒石酸ナトリウムアンモニウムと左旋性であるD-酒石酸ナトリウムアンモニウムの結晶を自然分割することに成功し、1850年に詳細を報告した。これによりパスツールは光学異性体の存在

を発見し、立体化学発展の先駆けになった。パスツールの実験の追試を行うことは、生徒が光学異性体の存在を実感できる教材となり、中崎³⁾、村田⁴⁾、福田⁵⁾などが追試を行っている。酒石酸ナトリウムアンモニウムに特徴的な結晶面がD-体とL-体で対称になることが確認できるので、生徒が光学異性体の存在をより実感しやすいと考えられる。それらの追試において、村田はラセミ溶液からの自然分割は行っておらず、L-体、D-体の結晶を別々に得ているが、実験の難易度について、「生徒が実験する場合 難しい」としている。その理由として、酒石酸ナトリウムアンモニウムの結晶化では、濃アンモニア水を適宜補充する手間がかかる点、酒石酸ナトリウムアンモニウムが59℃で分解してしまうために溶液調製時の温度管理が難しいといった点が挙げられる。また、福田はできた結晶を「空気中に放置すると1～2日ほどで結晶水を失って風解」するとし、保存が難しい点を挙げている。

そこで今回は結晶化させる物質として、風解しにくくより安定である酒石酸カリウムナトリウム（ロッシュェル塩）を用い、結晶化とラセミ溶液からの自然分割を行い、より簡易に光学異性体の存在を実感できるような教材の開発を試みた。

2. 結晶化および結晶成長

図2で示したようにメソ体は不斉炭素原子を持っているが、分子内に対称面をもつため光学異性体は存在しない。そこで今回の実験ではそれぞれL-酒石酸とD-酒石酸の塩である、L-酒石酸カリウムナトリウムとD-酒石酸カリウムナトリウムの結晶化、およびラセミ溶液から自然分割を試みた。

試薬に関してL-酒石酸、D-酒石酸、L-酒石酸カリウムナトリウムは市販品があるが、D-酒石酸カリウムナトリウムは市販品がない。そのため、D-酒石酸カリウムナトリウムは、市販D-酒石酸を中和させて作成することになる。作成方法を探るために、市販L-酒石酸を中和してL-酒石酸カリウムナトリウムとし、それが市販品と同程度なら、その作成方法でD-酒石酸をD-酒石酸カリウムナトリウムにすることにした。

順序とすると、最初に①市販L-酒石酸カリウムナトリウムから結晶を作成した。次に②市販L-酒石酸を炭酸カリウムもしくは炭酸ナトリウムで中和をしてL-酒石酸カリウム水溶液とL-酒石酸ナトリウム水溶液を調製し、それらを等量混合することでL-酒石酸カリウムナトリウム水溶液とし、その溶液が①で作成した市販品からのものと同じ結晶を形成するか確かめた。その後、L-体と同じ手順で市販D-酒石酸からD-酒石酸カリウム水溶液とD-酒石酸ナトリウム水溶液を調製し、それらを等量混合することで、D-酒石酸カリウムナトリウム水溶液としてD-体の結晶作成を試みた。最後に③L-酒石酸とD-酒石酸を等量混合してラセミ酒石酸水溶液を作成してから②と同じ手順で中和をしてラセミ酒石酸カリウムナトリウム水溶液を作成し、自然分割を行った後に④分割の精度を確かめた。実験は以下の4段階に分けて行った。

- ① 市販品L-酒石酸カリウムナトリウム塩からの結晶作製と接種法による成長
- ② 市販L-酒石酸からのL-酒石酸カリウムナトリウム溶液の調製および結晶作製と成長と、市販D-酒石酸からのD-酒石酸カリウムナトリウム溶液の調製および結晶作製と成長
- ③ 酒石酸カリウムナトリウムのラセミ溶液の調製および結晶作製と成長
- ④ 結晶の旋光度測定

(1) L-酒石酸カリウムナトリウム塩結晶の作製・接種法による成長

L-酒石酸カリウムナトリウム塩結晶の結晶面を確認するために、L-酒石酸カリウムナトリウム溶液から再結晶により析出させた 5mm ほどの小さな結晶を種結晶とし（図 3）、接種法により結晶を成長させた。

接種法は過飽和溶液中に種結晶を吊るし、結晶を成長させる方法である。種結晶をビーカーの底で成長させた場合、ビーカーの底に接している面が成長せず、次々と析出する結晶が重なり合い結晶面が確認しづらくなる欠点がある。接種法を用いれば結晶がビーカーの壁に触れることなく成長させることが可能なので、この方法を採用した。実験操作は以下に示す。

< 実験操作 > (実験 1)

- ① 100mL ビーカーに水 50mL を加え、そこに L-酒石酸カリウムナトリウム 35g を加えて加熱により溶かした。
- ② ①のビーカーを放冷し、蓋をしないで冷蔵庫に放置した。3～5 日ほどで、5mm 前後の結晶が析出する。それらを取り出し、表面に付いた溶液を乾かないうちに丁寧に拭き取り、ひび割れがなく、形がきれいなものを種結晶とし、以降の操作に用いた。
- ③ 約 10cm に切断した 0.3mm ϕ ステンレス線の先端をピンセットでつまみ、ガスバーナーで先端の 1mm ～ 5mm ほどを赤熱し、種結晶の側面に押し当て、先端の 1mm ほどで結晶の表面を融かした（図 4）。
- ④ 100mL ビーカーに、デカンテーションにより得た①のビーカーの上澄み液を入れ、種結晶を吊るし、ビーカーに蓋をしないで冷蔵庫に放置した（図 5）。

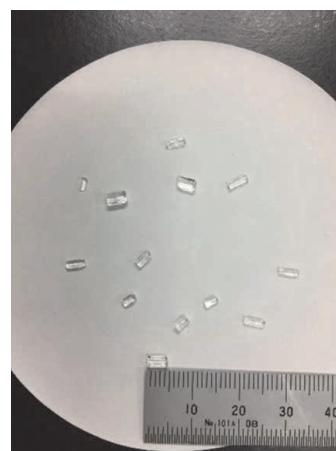


図 3 5mm ほどに成長した種結晶



図 4 ステンレス線に取り付けた種結晶

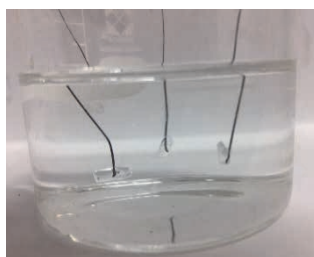


図 5 上澄み液に吊るした種結晶



図 6 割りばしを用いた吊るし方

図 5 のようにステンレス線をビーカーのふちに引っ掛けて種結晶を吊るす方法をとったが、吊るす種結晶の数が多き場合は、図 6 のように割りばしを用いる方法がある。図 5 のように吊るした場合、結晶がビーカーの壁に触れて、きれいに成長できない可能性があるが、図 6 のようにすれば、種結晶をまっすぐ吊るすことができるので、ビーカーの壁に触れにくくなる。

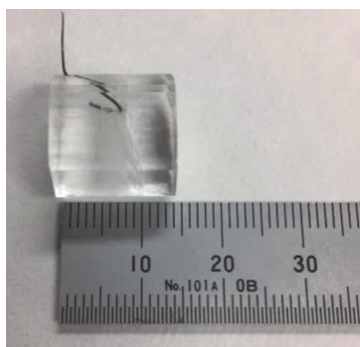


図7 接種法により成長させた結晶



図8 成長させた結晶に見られた特徴的な結晶面

2～3日で種結晶は1個あたり長さ12mm～20mm程度の大きさに成長した(図7)。成長させた結晶で、L-酒石酸カリウムナトリウムに特徴的な不斉小面⁶⁾が観察できるものが得られた(図8)。

(2) L-体およびD-体の酒石酸カリウムナトリウム水溶液の調製・結晶作製・結晶成長

最初にL-酒石酸カリウム水溶液とL-酒石酸ナトリウム水溶液を調製し、それらを等量混合することでL-酒石酸カリウムナトリウム水溶液とし、それが市販品のものと同じ結晶を形成するか確かめた。その後、同じ手順でD-酒石酸カリウム水溶液とD-酒石酸ナトリウム水溶液を調製し、それらを等量混合することで、D-酒石酸カリウムナトリウム水溶液としてD-体の結晶作成を試みた。それらの実験操作は以下に示す。D-酒石酸カリウムナトリウムについては、D-酒石酸の量に限りがあったので、L-体と同じ手順で、すべての試薬を半分量で行った。

<実験操作> (実験2)

- ① 200mLのビーカーに水20mLを加え、そこにL-酒石酸12.5g(0.083mol)を加えて加熱して溶かした。
- ② ①のビーカーに炭酸ナトリウム8.9g(0.083mol)を攪拌しながら少しずつ加え、L-酒石酸ナトリウム溶液とした。
- ③ ①と同様にした別のビーカーに、炭酸カリウム11.5g(0.083mol)を攪拌しながら少しずつ加え、L-酒石酸カリウム溶液とした。
- ④ 100mLビーカーに②、③の溶液をそれぞれ5mLずつ取って混合させ、溶液を温めてから放冷し、直接蓋をしないでドラフトに放置した。実験1と同様に、析出した結晶から種結晶を選び、以降の実験に用いた。
- ⑤ 約10cmに切断した0.3mmφステンレス線の先端をピンセットでつまみ、ガスバーナーで先端1mm～5mmほどを赤熱し、種結晶側面に押し当て、先端1mmほどで結晶表面を融かした。
- ⑥ 200mLビーカーに、種結晶として用いることのできなかつた結晶と水を加えて加熱し、過飽和溶液とした。
- ⑦ ⑥のビーカーを放冷させたのちに種結晶を吊るし、ビーカーに直接蓋をしないでドラフトに放置した。

この実験は冬場に行ったため、実験 1 を行った夏場に比べて室温が低かった。そのため、冷蔵庫を用いずに結晶を析出させた。結果として、成長させた L- 酒石酸カリウムナトリウムの結晶では、実験 1 で得られた結晶に見られた不斉小面が確認できた (図 9)。D- 酒石酸カリウムナトリウムの結晶では、L- 酒石酸カリウムナトリウムの結晶に見られた不斉小面と対称な面が確認できた (図 10)。

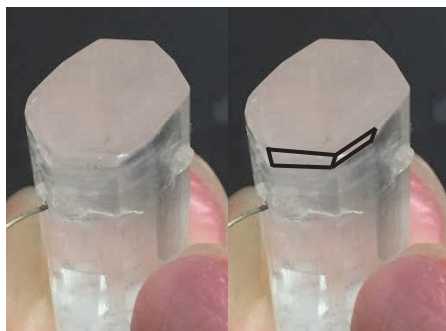


図 9 L-酒石酸カリウムナトリウムの結晶

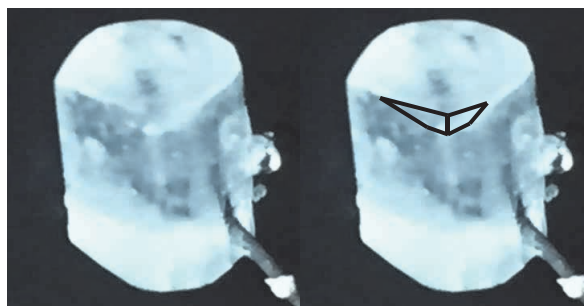


図 10 D-酒石酸カリウムナトリウムの結晶

(3) ラセミ溶液の調製および結晶作製・結晶成長

ラセミ溶液は L- 体と D- 体を等量含んだ溶液であり、ラセミ溶液から結晶を析出・成長させることで結晶の自然分割が行える。その実験操作を以下に示す。

< 実験操作 > (実験 3)

- ① L- 酒石酸と D- 酒石酸を同量量り取り、乳鉢で混合してラセミ体を作った。
- ② 200mL のビーカーに水 20mL を加え、そこに①で作った酒石酸 12.5g (0.083mol) を加えて加熱して溶かした。
- ③ ②のビーカーに炭酸ナトリウム 8.9g (0.083mol) を攪拌しながら少しずつ加えた。
- ④ ②と同様にした別のビーカーに、炭酸カリウム 11.5g (0.083mol) を攪拌しながら少しずつ加えた。
- ⑤ 100mL ビーカーに③、④の溶液をそれぞれ 5mL ずつ取って混合させ、溶液を温めてから放冷し、直接蓋をしないでドラフトに放置した。実験 1、実験 2 と同様に、析出した結晶から種結晶を選び、以降の実験に用いた。
- ⑥ 約 10cm に切断した 0.3mm φ ステンレス線の先端をピンセットでつまみ、ガスバーナーで先端 1mm ~ 5mm ほどを赤熱し、種結晶側面に押し当て、先端 1mm ほどで結晶表面を融かした。
- ⑦ 100mL ビーカーに③、④の溶液を同量加え、そこに種結晶として用いるこのできなかった結晶を加えて加熱し、過飽和溶液とした。
- ⑧ ⑦のビーカーを放冷させたのちに種結晶を吊るし、ビーカーに直接蓋をしないでドラフトに放置した。

1 ~ 2 日で種結晶は 1 個あたり長さ 10mm ほどの大きさに成長し、L- 酒石酸カリウムナトリ

ウムに見られる不斉小面を確認できるものと、D-酒石酸カリウムナトリウムに見られる不斉小面を確認できるものを得ることができた（図 11）。また、得られた結晶を目視で L-体、D-体、結晶面が確認できないものに分離し（図 12）、個数と質量を記録したものを表 1 に示す。

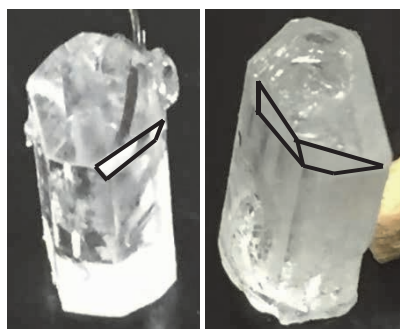


図 11 ラセミ溶液から成長させた結晶。左：L-体，右：D-体

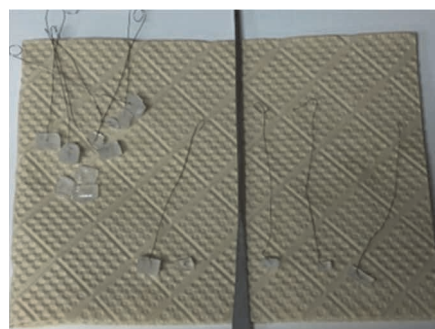


図 12 分離させた結晶
右：L-体，左：D-体
左上：結晶面が不確かなもの

表 1 ラセミ溶液から得られた結晶の個数と質量

	個数	質量(g)
L-体	3	0.63
D-体	2	0.83
結晶面が不確かなもの	13	5.71

(4) 結晶の旋光度測定

自然分割により得られた結晶は、その不斉小面により L-体と D-体とに分離したが、分離の正確さを確認する必要がある。光学異性体の関係にある分子どうしは、融点や沸点、密度といった物理的活性が同じであるので、それらの物性では比較することができない。一方、光学的活性は異なり、それらの溶液を通過する平面偏光の振動面を同じ大きさの角度だけ逆向きに回転させる性質を持つ。L-体は偏光面を右に回転させる右旋性であり、D-体は左に回転させる左旋性である。L-体と D-体の結晶の分離の正確さを確認するために、日本分光の旋光計 DIP-4 を用いてナトリウム D 線 589nm の波長で旋光度を測定した。

<実験操作>（実験 4）

- ① 市販品の L-酒石酸カリウムナトリウム四水和物（L-体）、実験 2 で得られた L-体結晶、実験 3 で自然分割により得られた L-体結晶、D-体結晶をそれぞれ 5mL のメスフラスコに入れ、水を加えて溶解し、それぞれ各 5mL の溶液とした。結晶は溶解しやすいよう乳鉢上ですりつぶして粉末状にした。
- ② 市販品の L-酒石酸カリウムナトリウム四水和物（L-体）を標準溶液として、各溶液の旋光度を旋光度計で測定した。測定結果を表 2 に示す。

表 2 市販品標準溶液および結晶の旋光度, 比旋光度

	試料の濃度 [g/mL]	旋光度 [°]	比旋光度 [°]
市販 (+)L-酒石酸カリウム ナトリウム四水和物	0.2072	+0.462	+22.3
実験 (2) で得られた L-体結晶	0.1463	+0.313	+21.4
自然分割で得られた L-体結晶	0.0914	+0.210	+23.0
自然分割で得られた D-体結晶	0.1146	-0.260	-22.7

旋光度、試料溶液の濃度 (g/mL)、試料セル長 (dm)、比旋光度には (1) 式の関係がある。

$$\text{比旋光度 } [\alpha]_{\lambda}^t = \text{旋光度} / (\text{濃度} \times \text{セル長}) \quad (1)$$

t は温度 (°C)、 λ は測定波長、セル長は 0.1dm で測定しており、旋光度を各試料濃度により比旋光度に換算した。酒石酸カリウムナトリウム四水和物の比旋光度は 20°C、ナトリウム線波長による測定において、21.70° ~ 22.16° と報告されている⁷⁾。市販品標準溶液、実験 2 で得られた L-体結晶、実験 3 の自然分割で得られた D-体結晶の比旋光度の値は、報告されている値とよく合っていると思われる。

絶対値が大きくなる要因としては、溶解度が酒石酸カリウムナトリウム四水和物よりも小さく、比旋光度が約 +26°⁸⁾ である酒石酸ナトリウム二水和物が結晶に析出していた可能性が考えられる。自然分割で得られた結晶が正しく分離されていなければ、旋光度は L-体、D-体とで相殺して絶対値が小さくなるので、L-体と D-体の分離は正しく行われたことを示していると考えられる。

3. 考察

L-酒石酸カリウムナトリウム水溶液、D-酒石酸カリウムナトリウム水溶液、ラセミ溶液のいずれからでも酒石酸カリウムナトリウムの特徴的な不斉小面を持つ結晶を得ることができた。このことから、酒石酸カリウム水溶液と酒石酸ナトリウム水溶液の混合溶液から、目的の酒石酸カリウムナトリウムが結晶として析出していると考えられる。ラセミ溶液からの自然分割では、少量ではあるが L-体と D-体の結晶をそれぞれ得ることができた。しかし結晶面が不明瞭なものも多く得られた。原因としてきれいな結晶面でなく、欠けた結晶面を持つ種結晶が混入したとか、放冷時の急激な温度低下により次々と結晶が析出してしまったことなどが考えられる。しかし、旋光度の測定により、自然分割により得られた結晶の分離が正しく行えたことがわかった。不斉小面は肉眼で確認できるものであるため、光学異性体の存在を実感できる教材になると考えられる。

(1) 教材化の検討

本実験から、酒石酸カリウムナトリウムの L-体、D-体結晶を得られることがわかった。このことから、光学異性体を実感できる教材として本研究で行った実験は活用可能だと考えられる。表 3 は酒石酸ナトリウムアンモニウムを用いたパスツールの追試と本実験とを比較したものであり、それぞれの項目について考察する。

表 3 パスツールの追試（酒石酸ナトリウムアンモニウム）と本実験（酒石酸カリウムナトリウム）との項目別比較

	酒石酸ナトリウムアンモニウム	酒石酸カリウムナトリウム
実験操作	結晶作製・成長で濃アンモニア水を溶液に補充する必要あり ^{3, 4, 5)}	溶液を補充する必要なし
結晶の成長時間	5 日～1 週間 ⁵⁾	2～3 日
結晶の表面	1～2 日で白くなり始める ^{3, 5)}	1 週間～2 週間で白くなり始める

1) 実験操作

パスツールの追試では結晶の作製・成長時に濃アンモニア水を用いることが多い。そのため、溶液からアンモニアが気化するので、その分を補うために 2 日に 1 回ドラフト内で濃アンモニア水を補充する必要がある。一方、本実験で用いた酒石酸カリウムナトリウムは、気化することがなく、溶液を補充する必要がないので、パスツールの追試に比べて実験の手間が省ける。

2) 実験時間

種結晶から結晶を成長させるまでの時間について、パスツールの追試では 5 日～1 週間ほどかかるのに対して、酒石酸カリウムナトリウムを用いると、2～3 日で結晶面が確認できるほどの大きさに成長させることができる。

3) 結晶の表面

酒石酸ナトリウムアンモニウムの結晶は空気中にそのまま放置すると 1～2 日で表面が白くなり始め、およそ 2 週間で結晶が不透明になるという報告がある³⁾。酒石酸カリウムナトリウムの結晶は空気中にそのまま放置しておくと 1 週間、長ければ 2 週間ほどで表面が白くなり始めるが、結晶面の確認が容易である。結晶を長期保存する場合は、クリアラッカーやニスで表面を塗装する方法をとれば、空気中に放置してもほとんど結晶表面は変化しない⁵⁾。

(2) 教材化のまとめ

以上のような点から、本研究で行った実験はパスツールの追試と比べると実験作業の手間が少なく、より短期間で結晶を得ることができ、得られた結晶の表面も白くなりやすく、光学異性体を実感できる教材として活用可能だと考える。ただし、光学異性体である結晶を得るまでの時間が短縮できたとは言え、種結晶を析出させてから結晶を成長させるのに少なくとも 5 日

以上はかかってしまうので、通常の授業で実験を完結させることは不可能である。そのため、酒石酸カリウムナトリウム塩結晶の自然分割実験は、サイエンスクラブのような化学に興味がある生徒のコミュニティで行うのが適していると考える。また、実験 2.2 から酒石酸カリウムナトリウムの L-体、D-体それぞれの結晶を得られることがわかったので、結晶を提示することで生徒が光学異性体を分子としてではなく実際に手にとって観察することもできる。

4. 結論

酒石酸と炭酸ナトリウムから得られる酒石酸ナトリウム溶液と、酒石酸と炭酸カリウムから得られる酒石酸カリウム溶液とを混合することで、酒石酸カリウムナトリウムの複塩を生成し、結晶を得ることができた。L-体、D-体それぞれの結晶を成長させると、L-体と D-体で対称になる特徴的な不斉小面が確認できた。酒石酸のラセミ体を用いて調製した酒石酸カリウムナトリウムのラセミ溶液から結晶化を行うと、L-体と D-体それぞれに特徴的な結晶面をもつ結晶が得られた。また旋光度を測定することでそれらの結晶を正しく L-体と D-体に分離できていたことがわかった。このことから生徒が実験を行った際にも、得られた結晶の不斉小面から、L-体と D-体を正しく分離できると考えられる。

これらの実験はパスツールの酒石酸ナトリウムアンモニウムの自然分割の追試に比べ、実験工程の手間が省け、短期間で結晶が成長できることから光学異性体を実感できる教材として活用が可能である。とはいえ結晶を得られるまでに数日を要するので化学に興味・関心のあるコミュニティで行うのが適している。その際、生徒が実験を行っても、十分な量の結晶を析出させられるようにさらに実験の条件を改善させる必要がある。また、旋光度を測定することで、光学異性体に対する理解が深まることが期待される。

参考文献

- 1) 竹内敬人ほか 16 名 『化学』東京書籍, 2012, p. 337, 420.
- 2) 山内薫ほか 18 名 『高等学校化学』 第一学習社, 2012, p. 272.
- 3) 中崎昌雄 「酒石酸ナトリウムアンモニウム塩の結晶形について—パスツールの“自然分割”実験とその追試—」『化学の領域』33, 1979, pp. 951-962.
- 4) 村田吉彦, 作田恵美子 「パスツールが発見した光学異性体 D, L-酒石酸ナトリウムアンモニウムの合成」『化学と教育』55, 2007, pp. 348-349.
- 5) 巻本彰一, 福田佑樹 「化学の原典の教材化—パスツールによる光学異性体の分離実験とその教材化—」『京都教育大学紀要』135, 2019, pp.95-104.
- 6) 横浜旧軍無線通信資料館 HP (最終閲覧: 2020 年 2 月 7 日) <http://www.yokohamaradio-museum.com/cgi-bin/imgboard.cgi>
- 7) 都築洋次郎 「酒石酸の化学」『有機合成化学協会誌』2, 1944, pp. 604-614.
- 8) ChemicalBook com. HP (2021 年 4 月 26 日 閲覧) https://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_JP_CB1105238.htm