

# 愛知教育大学の学生による訪問化学実験のための 演示実験法の検討と開発

戸谷義明

理科教育講座 (化学)

## Investigation and Development of the Chemical Experimental Methods for the Demonstration at Many Schools by the Visiting Students from Aichi University of Education

Yoshiaki TOYA

*Department of Science (Organic Chemistry), Aichi University of Education, Kariya, 448-8542 JAPAN*

The scientific experimental demonstration has exhibited as Friendship Project at various school by the visiting university students from Aichi University of Education. For the visiting exhibition of the chemical demonstration, "Chemical Magic", the supplemental experiment were investigated. Five display experiments, "Fading Blue Flask", "Clock Reaction", "Oscillating Reaction", "Alcohol Rocket", and "Fire-Proof Handkerchief and Tissue Paper" were selected and their demonstration methods fit for the visiting exhibition were developed. The complete protocol of "Chemical Magic" was described and equipped here. The developing process and the demonstration of "Chemical Magic" are very effective educationally for the students who are majoring in chemistry. This protocol would be also useful the schoolteachers as a teaching tool, because the demonstration of the chemical experiments would concentrate the students to the teaching, and raise their interest and understanding in chemistry.

### 1. はじめに

フレンドシップ事業は平成9年度に文部省(現文部科学省)により制定された。この事業は、できるだけ早い段階から教員養成系の学生に子供に接してもらい、教師教育を開始するとともに、有為な教員を養成することを目的とする。本学理科教育講座では平成9年度から毎年、化学の長沼教授、物理の石田教授、および生物の川上教授らが中心となり、理科の学生を指導、引率して小中学校を訪問し、科学実験教室が行われてきた。平成14年度からはカリキュラムの変更に伴い、フレンドシップ事業の全体を授業として取り扱うことができなくなり、教官の指導の元で、ボランティアの学生のサークル活動として運営され、理科以外の学生も参加するようになった。活動の目的として、1) 学生の科学(理科)への興味の喚起、2) 学生の教師としての資質能力の向上、3) 地域社会との連携、4) 学校週5日制への積極的な貢献、の4点を明確にし、訪問科学実験を以下の3つの形式に分類して行っている。

- 1) 学生の授業がない水曜の午後に、10~30テーマの実験を用意し、訪問校の体育館、理科室、家庭科室等で実施。引率教官と50~100名程度の学生が参加。イベント形式。平成14年度には7回実施。
  - 2) 土曜日もしくは日曜日に、PTAや子供会等の地域のイベントに、ボランティア等として協力する。5~10テーマ程度の実験を学校の体育館や公民館等で実施。研究室単位や学生有志で参加。休日利用型地域貢献形式。平成14年度には7回実施。
  - 3) 各学校の目的に合わせ、授業時間やクラブ活動を利用し、教官や大学院生、4年生がゲストティーチャーとして参加。授業形式。平成14年度には6回実施。
- 著者は、平成12年度よりフレンドシップ事業に参加し、学生の引率とともに、主に科学(化学)マジックの演示と指導とに協力してきた。

科学マジックは「いろいろな色の変化」、「炎色反応の秘密」といったテーマが発展したものである。観客の参加を含む、5~8種ぐらいの演示実験を20~30分間で演示するマジックショーで、通常、実験教室の時間内に数

回繰り返してショーが行われる。科学マジックは、他のテーマに比べて一度に大勢の観客に対応できる長所がある。平成12年度にテーマとして登場して以来、長沼教授、長沼研究室の学生、および著者が中心になって演示されるようになり、他の学生にも指導されてきた。演示実験としては、1) 花火のひみつ(炎色反応)、2) 瞬間消滅—魔法の綿(硝酸セルロース)、3) 自動虹色変色反応(塩化 $m$ -ブチルー万能pH指示薬)、4) 青いフラスコ(メチレンブルー—グルコース—NaOH)、5) 時計反応( $\text{KIO}_3$ — $\text{NaHSO}_3$ —デンプン)、6) 振動反応{Belousov—Zhabotinsky(以下B—Z)反応、またはBriggs—Rauscher反応}、7) 燃える水(グラスに注いだ水の上に浮かんだ石油ベンジンに点火)、8) 声に感じる反応( $\text{CO}_2$ —BTB指示薬)、といった化学マジックの他、9) 念力(台からはみ出すように横に寝かせた油性ペンが台から自然に落下)、10) 鉛玉を通すお金(ビンの口にコインでフタをし、かぶせた筒の中に落とした鉛玉がコインを通り抜けてビンの中へ)、11) 消えるお金(水を入れるとスチロールカップの下に置いたコインが消える)、12) 消える水(紙コップに注がれた水が紙おむつの吸収剤に吸収され、コップを傾けても流れ出てこない)といった物理的なマジックもあり、適宜選択して演示された。

著者は、一般の人々の理科離れへの対抗策として、また、化学の実験の経験が少ない学生に化学の面白さ、楽しさを喚起し、化学の本質を理解させるために、化学マジックの演示実験を実際に見せることが有効ではないかと考えた。そこで、炎色反応<sup>1)</sup>を含む、火炎を伴う2つの演示実験、および、大学の化学の講義の内容を実際に変色や沈殿の変化で観察できるような2つの演示実験を開発<sup>2)</sup>、発展<sup>3)</sup>させ、講義の際に実践してきた。また、小中学校のフレンドシップ事業にも、これらの成果を活用し、既述の1)、2)、3)の演示実験として提案し、プロトコルを整備し、実施してきた。学生や児童の反応は極めて良く、彼らに大きなインパクトを与え、理科や化学に対する興味を喚起するのに極めて効果的であることが確信できた。

科学マジックの4)~12)の演示実験については、主に長沼教授、および長沼研究室の学生により、準備と演示が行われてきており、各演示実験のプロトコルも、ほとんど存在しなかった。ところが平成15年度は、著者、および著者の研究室の学生が中心となって科学マジックの準備と演示を行うことになり、化学マジックのプロトコルを整備する必要に駆られた。

そこで今回、実験内容を再検討した後、訪問化学実験の形式に合った演示法を確立し、実践するとともに、プロトコルとして整備することにした。

## 2. 演示実験の必要条件

今回、フレンドシップ事業に参加した学生が、また、小中学校において教師が、プロトコルに従えば誰でも安

全かつ容易に化学マジックが演示できることを目標にした。実験内容を再吟味、選択し、演示法を検討するにあたり、以下のような配慮を行った。

- 1) 実験に使用する水は、入手が必要な蒸留水や精製水でなく、可能な限り、どこにでもある水道水を用いる。
- 2) 天秤としては0.01gまで秤量可能な電子天秤があれば実験の準備が可能にようにする。
- 3) 安全面に配慮し、毒物は使用せず、なるべく劇物も使用しないで済むようにする。腐食性や刺激性の薬品の使用や、そのようなガスが発生するものは避ける。酸や塩基は、可能な限り希釈された状態で使用する。
- 4) 環境面に配慮し、できるだけ薬品類の使用量が少なくなるようにする。また、実験後の後始末が容易で、後処理後の廃液は水とともに流しに廃棄できるようにする。
- 5) 訪問化学実験の会場への往復の輸送中の破損を防ぎ、軽量で運搬を容易にするため、運搬が必要なものはガラス製のピーカー、三角フラスコを除き、プラスチック製の容器、器具を活用し、ガラス製の容器、器具の使用を必要最小限にする。
- 6) 通常、訪問実験の準備と予備実験は、訪問実験当日よりかなり前の日に行われる。実験当日の準備、調製、および演示実験の操作が単純になるように、(混合)溶液で安定な薬品類は、(混合)溶液を調製して保存し、最少回数、量って加えればいい状態しておく。溶液で不安定な薬品類は、スクリューパーに秤量して粉末(固体)のまま加える。
- 7) 実験当日の準備、調製、および演示実験中には天秤は不要で、メスシリンダーやピペットを必要とする操作も最小限にする。液量を量るときは、ピーカーやビンの目盛りで間に合うようにする。
- 8) プロトコルには、事前の準備、当日の準備、演示の際の具体的な操作とともに、種明かしに必要な化学的な原理も一緒に記述する。

以上のことを考慮しながら、「青いフラスコ」、「時計反応」、「振動反応」、「燃える水」の実験の再検討を行った。また、新たに「交通信号反応<sup>4)</sup>」、「アルコールロケット<sup>5)</sup>」、「燃えないハンカチ<sup>6)</sup>」についても演示法の検討を行った。その結果、以下に示すような演示法、およびプロトコルを完成した。

## 3. 完成したプロトコル、および実験操作の検討

### 3.1. 「青いフラスコ」、「交通信号反応」

#### 実験に必要な試材

1 mol/L 水酸化ナトリウム (NaOH=40.00) 水溶液 {市販品(劇物指定外) 500 mL, または 500 mL ポリエチレン製のビンに以下のように調製, 1 または 2 本, (500

g 試薬) (劇物)}, 水道水 (500 mL ポリエチレン製のビン, 1本), 0.1%メチレンブルー ( $C_{16}H_{16}ClN_3S=319.85$ ) 水溶液 {100 mL ポリエチレン製のビンに以下のように調製, 1本, (25 g 試薬)}, グルコース (ブドウ糖) ( $C_6H_{12}O_6=180.16$ ) {20 mL スクリューバイアルに各 2.0 g 秤量したもの, 6本, (または 500 g 試薬)}, 葉さじ (2本), インジゴカルミン ( $C_{16}H_8N_2Na_2O_8S_2=466.35$ ) (25 g 試薬, 1本), スパーテル (1本), 125 mL ねじロビン (キャップ付き, 2本), 1.5 L ペットボトル (ふた付き, 2本), ポリエチレン製のろうと (1個), 5 mL ポリエチレン製の駒込ピペット (1本), ゴム止め (1個), 葉包紙, 厚紙等の白い紙 (色がよく分かるようにするもの), 10% (2.9 mol/L) 塩酸 ( $HCl=36.46$ ) {市販品 (劇物指定外), 500 mL, または 500 mL ポリエチレン製のビンに濃塩酸 (12 mol/L, 500 mL 試薬) (劇物) 100 mL を水道水で 4 倍に希釈して調製, 1本}, pH 試験紙 (pH 1-11)。

水酸化ナトリウム, および濃塩酸は劇物である。毒性, 腐食性, 刺激性 (特に, 溶解時に発生する水酸化ナトリウムのミストや濃塩酸からの塩化水素ガス) に注意する。1 mol/L 水酸化ナトリウム水溶液, および 10% 塩酸は劇物指定外であるが, 腐食性に注意する。

#### 演示実験の事前準備

- 1) 500 mL のポリエチレンのビンにビンの目盛りを目安に水道水約 400 mL を入れ, 水酸化ナトリウム 20.0 g を加えて溶かす。その中に, ビンの目盛りを目安に 500 mL になるように水道水を加える (1.0 mol/L)。
- 2) 100 mL のポリエチレンのビンに, メチレンブルーを入れて 0.10 g 量る。その中に, ビンの目盛りを目安に水道水 100 mL を入れ, メチレンブルーを溶かす。
- 3) グルコースは 6.0 g ずつ量り, 湿らないように 20 mL のガラスのスクリューバイアルに入れておく。3本用意しておく (予備 1 回分を含む)。

#### 演示実験当日の操作

「青いフラスコ」は以下のように行う。

- 1) 125 mL のねじロビンに, ビンの目盛りを目安に水酸化ナトリウム水溶液 50 mL と水道水 50 mL とを入れる (0.5 mol/L)。
- 2) 5 mL のポリエチレン製の駒込ピペットでメチレンブルー水溶液 1.0-1.5 mL をビンの中に入れる。
- 3) グルコース 6.0 g をビンの中に入れ, ビンにふたをして振とう攪拌した後, 白い紙の上に置き, 無色の状態になったのを確認しておく。文献によると, この混合液は長時間安定ではないので, 演示実験する前 15 分以内に準備する。
- 4) ビンを振ると溶液が青色になり, これを静置すると溶液の色が無色に戻るのが観察される。時間が経って酸素が減ると変色しにくくなるので, 演示者がふ

たをときどき開けることが必要である。

- 5) 説明をしたり, 観客にビンを振らせる。その際に絶対にふたを開けないように注意しておく。

「交通信号反応」は以下のようにする。

- 1) 125 mL のねじロビンに, ビンの目盛りを目安に水酸化ナトリウム水溶液 50 mL と水道水 50 mL とを入れる (0.5 mol/L)。
- 2) ビンにインジゴカルミンの粉末をスパーテルで 1 杯 (少し山盛りぐらい) 加え, 攪拌した後, 緑色の濃さを確認する。
- 3) グルコース 6.0 g (バイアル 1 本) をビンの中に入れ, 振とう攪拌した後, 白い紙の上に置き, 緑色の溶液が茶色になり, 赤色を経て黄色になることを確認しておく。
- 4) ビンをゆっくり振とうすると, 黄色の溶液が赤色になり, さらに激しく振とうすると茶色から緑色になるのが観察される。ビンを静置すると, 溶液の色が緑色から茶色 (ここまでは変色が早い), 赤色を経て黄色に戻る (赤が残って変色遅い) のが観察される。

インジゴカルミンは退色 (光および水溶液中で不安定) が早いので, 緑色が薄くなり, きれいに出なくなったときは, インジゴカルミンをスパーテルで 1 杯 (少し山盛りぐらい), 追加する。

どちらの実験も, 変色の速さは, グルコースの濃度, または溶液の温度を上げれば早くなり, 下げれば遅くなる。

1.5 L のペットボトルで演示を行う場合は以下のようにする。

- 1) 事前に, 1.5 L のペットボトルにろうとを載せ, そこにグルコース 60.0 g を入れる。これを別のボトルの目盛り等で測った水道水 500 mL によりペットボトルの中に流し込み, 溶液とし, 当日まで保存する。
- 2) 当日, 5 mL のポリエチレン製の駒込ピペットでメチレンブルー水溶液 10 mL またはインジゴカルミンの粉末 (緑色の濃さを確認しながら添加) をペットボトルの溶液に加えた後, 水酸化ナトリウム水溶液 500 mL を加え, ペットボトルのふたを強く閉める。
- 3) 振とう攪拌した後, 白い紙の上に置き, 無色 (インジゴカルミンの場合黄色) の状態になったのを確認しておく。
- 4) ペットボトルを振ると, メチレンブルーでは溶液が青色になり, これを静置すると溶液の色が無色に戻るのが観察される。インジゴカルミンではペットボトルをゆっくり振とうすると, 黄色の溶液が赤色になり, さらに激しく振とうすると茶色から緑色になるのが観察される。ペットボトルを静置すると, 溶液の色が緑色から茶色, 赤色を経て黄色に戻るのが観察される。
- 5) 説明をしたり, 観客にペットボトルを振らせる。その際はペットボトルのふたが強く閉まっていること

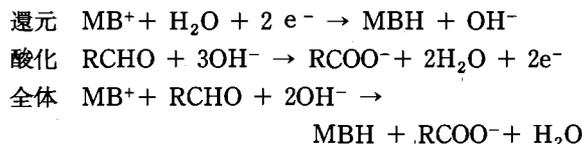
を確認しておき、観客にふたを開けないように注意する。

廃棄

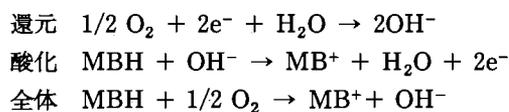
10% (2.9 mol/L) 塩酸 (廃液 200 mL あたり最大 35 mL 必要), 振動反応の廃液等の酸で中和し, 大量の水とともに流しに捨てる。

原理

以下の図に色素の構造を示した。最初, メチレンブルーは青色であるが, グルコース (RCHO) の酸化に伴い, メチレンブルーが還元されて, 青色が無色になる。反応式で表すと, 次のようになる。



次に, 還元されたメチレンブルーが酸素により酸化されて, 無色から青色になる。反応式で表すと, 次のようになる。



インジゴカルミンもメチレンブルーと同様であるが, 酸化型の緑色と還元型の黄色の変化の間に赤色が出現する。文献<sup>4)</sup>では還元型のジアニオンであると述べられているが, 実際は, 下の図のような, おそらく1電子が移動した状態のセミキノン型ではないかと想像される。

検討

どちらの実験も, 演示, および溶液の保存に関し, 蒸

留水のかわりに水道水を使用しても, 全く問題はなかった。

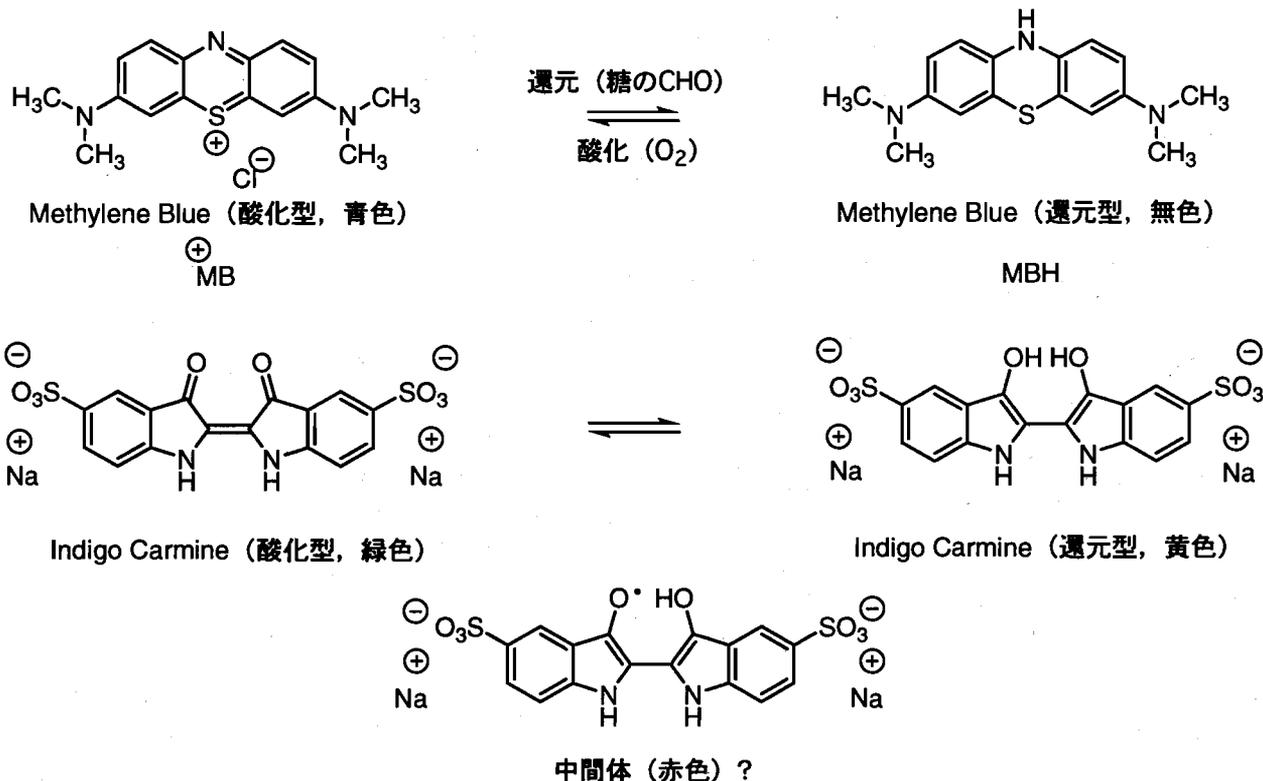
これらの実験には一般に, 水酸化アルカリは 0.25–0.5 mol/L, グルコースは 0.068–0.19 mol/L の最終濃度で用いられている。<sup>4,7,8,9,10</sup>今回, 水酸化アルカリとしては純度と価格のことを考え, 水酸化ナトリウムを用い, 濃度は変色の速度を重視し, 0.50 mol/L とした。どちらの実験も, 1.0 mol/L の溶液を, そのまま使用すると, 変色は, さらに速くなるが, 色素の退色も早くなった。

グルコースの濃度でも変色の速度の調整が可能であり, 夏場は 0.11 mol/L でもよいが, 冬場での変色の速度を速くするために 0.33 mol/L とした。

文献<sup>4)</sup>によると, 溶液の液温は低温だと反応速度が遅くなり, 演示効果が薄くなるので, 24–25 °C ぐらいがよいとの記述がある。実際, 冬場は溶液をあたためておくことと良い結果が得られる。

フラスコとゴム栓ではなく, ねじロビンやペットボトルを使用する理由は, フラスコを振っているときに栓が取れてしまい, 水酸化ナトリウム水溶液が皮膚に付いたり, 目に入ったりするのを防ぐためである。

0.1% メチレンブルー水溶液は, 最初, 水酸化ナトリウム水溶液 100 mL あたり 0.5 mL を加えて実験を行っていたが, 青色が薄かった。加える量を 2.0 mL にしたところ, 無色になったときに溶液の表面に少し青色が残ってしまった。最終的に, 0.1% メチレンブルー水溶液を 1.0–1.5 mL 加えると良い結果が得られた。なお, 0.1% メチレンブルー水溶液 2.5 mL を 0.25 mol/L の水酸化ナトリウム水溶液 500 mL に加えて1週間保存しておいたところ, 紫色に変色してしまい, グルコースを



加えても無色にならなかった。従って、メチレンブルー水溶液は実験当日に加える必要があることが分かった。

### 3.2. 「時計反応」

#### 実験に必要な試材

500 mL ペット製のビン(1本), 0.10 mol/L ヨウ素酸カリウム ( $\text{KIO}_3=214.001$ ) 溶液 {100 mL ポリエチレン製のビンに以下のように調製, 2本, (500 g 試薬)}, 100 mL, または 500 mL ビーカー (1個), 0.5% デンプン溶液 {100 mL ポリエチレン製のビンに以下のように調製, 1本, (500 g 試薬)}, 2% チモールのエタノール溶液 {9 mL スクリューバイアルに以下のように調製, 1本, (チモール 25 g 試薬, エタノール 500 mL 試薬)}, 5 mL ポリエチレン製の駒込ピペット(1本), ゴム止め (1個), 亜硫酸水素ナトリウム ( $\text{NaHSO}_3=104.06$ ) {9 mL スクリューバイアルに各 0.52 g 秤量したもの, 2本, (500 g 試薬)}, 葉さじ(5本), チオ硫酸ナトリウム 5水和物 ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}=248.19$ ) (500 g 試薬, 1本), 水道水 (500 mL ポリエチレン製のビン, 1本), 50 mL ビーカー(4個), 200 mL 三角フラスコ(2個), 300 mL 三角フラスコ(2個), 薬包紙, 廃液入れ (500 g 試薬ビン, 1本), 厚紙等の白い紙。

ヨウ素酸カリウムの固体は強力な酸化剤であるので、可燃性材料を混合すると発火、爆発する。亜硫酸水素ナトリウムは強い還元剤であり、固体や濃厚な溶液を酸化剤と混ぜてはいけない。固体や濃厚な溶液には刺激性があり、酸と混合すると刺激性の二酸化硫黄を発生する。

#### 演示実験の事前準備

- 1) 100 mL のポリエチレン製のビンに、ヨウ素酸カリウム 2.14 g を秤量する。その中にビンの目盛りを目安に水道水 100 mL を入れ、ヨウ素酸カリウムを溶かす (0.10 mol/L)。または 500 mL のペット製のビンにヨウ素酸カリウム 10.70 g を秤量する。その中にビンの目盛りを目安に水道水 500 mL を入れ、ヨウ素酸カリウムを溶かし、ストック溶液とする (0.10 mol/L)。当日は、このストック溶液各 100 mL を 100 mL のポリエチレン製のビン 1, または 2本に入れて持っていく。
- 2) 亜硫酸水素ナトリウム 0.52 g を 9 mL のガラスのスクリューバイアルに秤量し、湿らないようにしっかりふたをしておく。2本用意しておく (予備1回分を含む)。
- 3) 100 mL ビーカーに水道水約 80 mL と溶性デンプン 1.00 g を入れ、電子レンジ等で加熱処理して溶かし、これを 100 mL のポリエチレン製のビンに移しかえ、ビンの目盛りを目安に水道水を入れて 100 mL にする (1.0% デンプン溶液)。または 500 mL のビーカーに、溶性デンプン 2.50 g と水道水約 400 mL を入れて、電子レンジ等で加熱処理してデンプンを溶かし、これを 500 mL のペット製のビンに移

し、ビンの目盛りを目安に水道水を加えて 500 mL にする (0.5% デンプン溶液)。デンプン溶液は数ヶ月保存するとカビが生えるので、これを防ぐために、エタノール 6 mL にチモール 0.10 g を溶かした溶液 (2% チモールのエタノール溶液) を、デンプン溶液 100 mL あたり 2滴加えておく。

- 4) 100 mL のポリエチレン製のビンに、ビンの目盛りを目安に、調製した 1% デンプン溶液 50 mL を移し、水道水を入れて 100 mL とする (0.5% デンプン溶液)。当日は、この溶液、または保存してあった 0.5% デンプン溶液 100 mL を 100 mL のポリエチレン製のビンに入れて持っていく。

#### 演示実験当日の操作

- 1) 50 mL のビーカーを 4つ用意する (以下、ビーカー 1, 2, 3, 4 とする)。ビーカーの下に白い紙を敷いておく。ビーカー 1 にはビーカーの目盛りを目安に 0.10 mol/L  $\text{KIO}_3$  15 mL を入れる。ビーカー 2 には 0.10 mol/L  $\text{KIO}_3$  20 mL を入れる。各々のビーカーに、ビーカーの目盛りを目安に 30 mL まで水道水を加える。以下、ビーカー 1 の溶液を溶液 A、ビーカー 2 の溶液を溶液 B とする。
- 2) 0.5% デンプン溶液 100 mL が入っているビンに、秤量しておいた亜硫酸水素ナトリウム 0.52 g を入れ、振って溶かす (以下、溶液 C とする、 $\text{NaHSO}_3$  の濃度 0.050 mol/L)。
- 3) ビーカー 3, 4 に、溶液 C をビーカーの目盛りを目安に各 10 mL ずつ入れる。
- 4) 2つの溶液 C に、同時に溶液 A, B を、それぞれ一気に加えると、溶液 B を入れた方が約 10 秒後に突然深青色になり、その約 10 秒後に溶液 A を入れた方が突然深青色になるのが観察される。

#### オプションとして、

- 5) 深青色になった溶液に、チオ硫酸ナトリウム 5水和物 1粒 (約 0.3 g) を葉さじで加え、ビーカーを振とうする。溶液の色が無色になるのが観察される。5倍スケールで演示を行うときは以下のようにする。
- 1) 200 mL と 300 mL の三角フラスコを各 2個用意する (以下、200 mL 三角フラスコ 1, 2, 300 mL 三角フラスコ 1, 2 とする)。三角フラスコの下に白い紙を敷いておく。200 mL 三角フラスコ 1 には三角フラスコの目盛りを目安に 0.10 mol/L  $\text{KIO}_3$  75 mL を入れる。200 mL 三角フラスコ 2 には 0.10 mol/L  $\text{KIO}_3$  100 mL を入れる。各々の 200 mL 三角フラスコに、三角フラスコの目盛りを目安に 150 mL まで水道水を加える。以下、200 mL 三角フラスコ 1 の溶液を溶液 A、200 mL 三角フラスコ 2 の溶液を溶液 B とする。
- 2) 0.5% デンプン溶液 100 mL が入っているビンに、秤量しておいた亜硫酸水素ナトリウム 0.52 g を入れ、振って溶かす (以下、溶液 C とする)。

- 3) 300 mL三角フラスコ1, 2に, 溶液Cをビンの目盛りを目安に各 50 mL ずつ入れる。
- 4) 2つの溶液Cに, 同時に溶液A, Bを, それぞれ一気に加えると, 既述と同様の時計反応が観察される。
- 5) 深青色になった溶液に, チオ硫酸ナトリウム5粒を葉さじで加え, フラスコを振とうすると, 溶液の色が無色になる。

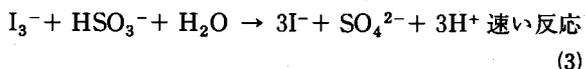
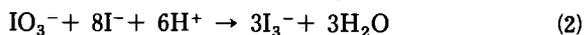
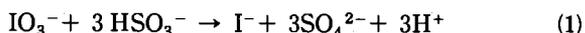
溶液Aと溶液Cを混合したとき, 各化合物の最終濃度は  $\text{KIO}_3$  が 0.0375 mol/L,  $\text{NaHSO}_3$  が 0.0125 mol/L, 物質質量比  $\text{KIO}_3/\text{NaHSO}_3$  (1/0.33), 溶液Bと溶液Cを混合したときは  $\text{KIO}_3$  が 0.050 mol/L,  $\text{NaHSO}_3$  が 0.0125 mol/L, 物質質量比  $\text{KIO}_3/\text{NaHSO}_3$  (1/0.25) である。

#### 廃棄

無色の溶液は廃液入れに集め, 多量の水とともに流しに捨てる。深青色の溶液にチオ硫酸ナトリウムを加えなかった場合は, 廃液入れに深青色の溶液を集める。廃液を攪拌しながら, 無色になるまで固体のチオ硫酸ナトリウムを, ゆっくりと加える。無色になった溶液を多量の水とともに流しに捨てる。

#### 原理<sup>11)</sup>

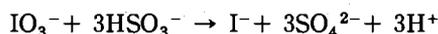
亜硫酸イオンの溶液をヨウ素酸イオンの溶液, およびデンプン溶液と混合すると, この混合物は, しばらくの間無色であるが, 突然青色に変化する。混合物が無色である間の時間を誘導期間という。この誘導期間は亜硫酸水素イオンとヨウ素酸イオンの初期濃度, 混合物の温度およびpHに依存する。この誘導期間は, ヨウ素酸イオンと亜硫酸水素イオンの濃度に反比例する。混合物の温度が高くなったり, pHが減少すると, 誘導期間は短くなる。全体の過程は以下の反応経路により表すことができる。



最初の反応1で, 亜硫酸水素イオンがヨウ素酸イオンをヨウ化物イオンに還元する。反応2では, ヨウ化物イオンはヨウ素酸イオンにより三ヨウ化物イオンに酸化される。この時点で, この溶液には三ヨウ化物イオンとデンプンが存在する。これらは, 反応4で生成する青色の錯体の成分である。しかし, 反応3が急速に起こるので, 青色の錯体の生成が妨害される。反応3では, 三ヨウ化物イオンは, すべての亜硫酸水素イオンが消費されてしまうまで, 亜硫酸水素イオンにより, ヨウ化物イオンに還元される。亜硫酸水素イオンが消費されてしまった時点で, 三ヨウ化物イオンとデンプンは結合して青色のデンプン-I<sub>5</sub><sup>-</sup>錯体を形成する。このように, この溶液は, 亜硫酸水素イオンが消費されている間は無色であるが, ひとたび亜硫酸水素イオンがなくなると, 錯体の青色が

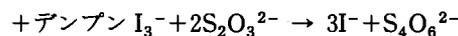
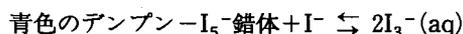
出現する。

式1から式3を1つの式にすると, 反応の全体は以下のようになる。



反応1から反応3までの全体の結果として, 1個のヨウ素酸イオンが還元されると, 3個の亜硫酸水素イオンが酸化される。亜硫酸水素イオンの初期濃度がヨウ素酸イオンの初期濃度の3倍以上であれば, 過剰の亜硫酸水素イオンが反応2で生成する  $\text{I}_3^-$  を, すべて消費するので, 色変化は起こらない。

深青色になった溶液に, チオ硫酸ナトリウム ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) を加えると, 溶液の色が脱色されるのは次の式で説明できる。



#### 検討

文献<sup>11)</sup>の時計反応のうち, 必要な薬品のストック状態と毒性, 廃棄の容易さ, および他の実験との重複を考慮し, 最もよく知られた Landolt ヨウ素時計反応を選択した。

デンプンとヨウ素酸カリウムは水道水を用いて保存溶液とした。どちらも室温で数ヶ月間保存しても, 全く実験に問題はなかった。水溶液にすると不安定な亜硫酸水素ナトリウムは演示実験当日にデンプン溶液に溶かすようにした。

混合時に攪拌される効率を考え, 1容の亜硫酸水素ナトリウム-デンプン溶液に3容のヨウ素酸カリウム溶液を一気に加えるようにした。文献<sup>11)</sup>に従い, 最初に室温下, ヨウ素酸カリウム 10 mL (最終濃度 0.025 mol/L), 亜硫酸水素ナトリウム 10 mL (最終濃度 0.0125 mol/L) で実験を行ったが, 変色は記述の約9秒 (25℃) ではなく, 25秒, 37秒といった誘導期間になった。誘導期間が伸びたのは, おそらく亜硫酸水素ナトリウムの組成によるものであり, 値がばらついたのは, 正確に両方の試薬の液量を量ってないからであると思われた。予備実験の結果, ヨウ素酸カリウム溶液の量を記述のように増加した。

なお, 廃棄のために, 深青色になった溶液に, カルキ抜きとして知られているチオ硫酸ナトリウムを加え, 色が消えて無色になる現象を演示したところ, 効果的であったので, 演示実験に加えた。

### 3.3. 「振動反応」

#### 実験に必要な試材

臭素酸カリウム ( $\text{KBrO}_3=167.00$ ) 保存溶液 (500 mL ペット製のビンに以下のように調製, 2本), 臭化カリウム ( $\text{KBr}=119.00$ )-硫酸 ( $\text{H}_2\text{SO}_4=98.08$ ) 保存溶液 (500 mL ペット製のビンに以下のように調製, 1本, {500 mL ビーカー (1個), ガラス攪拌棒 (1本), 濃硫酸 (18 mol/L)

(500 mL 試薬), 100 mL ビーカー (1 個)), フェロイン溶液 (100 mL 滴ビンに以下のように調製, {硫酸鉄(II) 7 水和物( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ )=278.02) (25 g 試薬), 1,10-フェナントロリン 1 水和物 ( $\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )=198.22) (25 g 試薬), 100 mL ビーカー (1 個), 超音波洗浄器 (1 台)}, または市販品 (100 mL 試薬), 1 本, これらを 2 mL スクリューバイアルに各約 1 mL (20 滴) 秤量したものを, 4 本), 2 mL ポリエチレン製の駒込ピペット (1 本), ゴム止め (1 個), マロン酸 ( $\text{CH}_2(\text{COOH})_2$ )=104.06) (20 mL スクリューバイアルに各 2.00 g 秤量したものを, 4 本, (500 g 試薬)), 硫酸セリウム(IV) 水和物 ( $\text{Ce}(\text{SO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ )=404.30,  $n=4$ ) (9 mL スクリューバイアルに各 0.20g 秤量したものを, 4 本, (25 g 試薬)), 薬さじ (6 本), 100 mL ビーカー (1 個), 200 mL 三角フラスコ (2 個), 500 mL 三角フラスコ (1 個), 攪拌子 (2 個), 三角フラスコに合うゴム栓 (各 1 個), 水酸化ナトリウム ( $\text{NaOH}$ )=40.00) {廃棄用, 100 mL ポリエチレン製のビンに下記の必要量を入れたものを, (500 g 試薬)}, 廃液入れ (500 g の大きいポリエチレン製試薬ビン, 1 本), マグネティックスターラー (1 台), 薬包紙, 厚紙等の白い紙。

臭素酸カリウムの固体は強力な酸化剤であり, 可燃性材料を混合すると発火, 爆発する。経口毒性あり。濃硫酸は劇物の強酸であり, 刺激性, 腐食性が強い。薄い硫酸でも服についたまま乾くと穴があく。こぼれたり服についた場合は炭酸水素ナトリウムの飽和水溶液で中和後, 拭いたり洗うと良い。硫酸鉄(II), およびマロン酸は皮膚や粘膜への刺激性がある。

#### 演習実験の事前準備

- 1) 500 mL のペット製のビンに臭素酸カリウム 30.00 g を秤量する。その中に, ビンの目盛りを目安に水道水 450 mL を入れて溶かす (0.40 mol/L  $\text{KBrO}_3$ )。この溶液を 2 本用意しておく。以下, この溶液を溶液 A とする。この溶液は長期保存が可能である。
- 2) 500 mL のビーカーに水道水約 400 mL を入れ, これをガラス攪拌棒で攪拌したところに 100 mL ビーカーで濃硫酸 (18 mol/L) 50 mL を量り, 注意深く加える。ビーカーの目盛りを目安に, 500 mL になるように水道水を加える。この希硫酸に臭化カリウム 16.00 g を入れ, 臭化カリウムを溶かす (1.80 mol/L  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , 0.27 mol/L  $\text{KBr}$ )。この溶液を 500 mL のペット製のビンに移しかえる。ペット製のビンに直接, 濃硫酸を入れると冒されるので, ビーカーで溶液を調製する。以下, この溶液を溶液 B とする。この溶液も長期保存が可能である。
- 3) 100 mL の滴ビンに, 硫酸鉄(II) 7 水和物 0.23 g と 1,10-フェナントロリン 1 水和物 0.51 g を秤量し, その中に 100 mL ビーカーで量った蒸留水 100 mL を入れ, 超音波処理等で溶解させる (0.025 mol/L フェロイン溶液)。調製した溶液, または市販の試薬溶液約 1 mL (20 滴) を 2 mL ポリエチレン製の

駒込ピペットを用い, 2 mL のガラスのスクリューバイアルに秤量し, しっかりふたをしておく。4 本用意する (予備 1 回分を含む)。

- 4) マロン酸 2.00 g を 20 mL のガラスのスクリューバイアルに秤量し, 湿らないようにしっかりふたをしておく。4 本用意する (予備 1 回分を含む)。
- 5) 硫酸セリウム 0.20 g を 9 mL のガラスのスクリューバイアルに秤量し, 湿らないようにしっかりふたをしておく。4 本用意する (予備 1 回分を含む)。

演習実験当日の操作 {通常 (または 2 倍スケール)}

- 1) マグネティックスターラーの上に白い紙を敷いて 200 mL (または 500 mL) 三角フラスコを置き, 攪拌子を入れる。フラスコ, またはビンの目盛りを目安に溶液 A 150 mL (または 300 mL) を入れる。この溶液の中に秤量しておいたマロン酸 2.00 g (または 4.00 g, 2 本分) を加え, スターラーを渦が攪拌子に届くぐらい速く回してマロン酸を溶かす。
- 2) マロン酸が完全に溶けたら, この溶液に, 直ちに硫酸セリウム 0.20 g (または 0.40 g) と, 2 mL スクリューバイアルに測っておいたフェロイン溶液約 1 mL (20 滴) {または約 2 mL (40 滴), 2 本分} を加える。溶液の色は赤橙色になる。この溶液に 100 mL のビーカーで, ビーカーの目盛りを目安に溶液 B 50 mL (または 100 mL) を量り, 攪拌を続けた状態の 1) の溶液に一気に加え, 全量を 200 mL (または 400 mL) とする。臭素が発生するので, 溶液 B を加えたら直ちにゴム栓でフラスコの口に栓をする。溶液は褐色の懸濁物となる。攪拌を続け, 徐々に懸濁物が透明な溶液になり, 臭素の発生が収まった時点 (溶液 B を加えてから約 2 分後) で, フラスコの口の栓を緩め, スターラーの回転をゆっくりにすると, 溶液の色は黄色から緑色, そして無色となり, 次に赤色となる。紫色から瞬間的に青色を経た後, 溶液の色は黄色に戻る。ガス(二酸化炭素)の発生を伴い, 約 30 秒の周期から, 徐々に周期が長くなりながら, この色の変化のサイクルが 40 回以上繰り返される。

混合後の濃度は, それぞれ次のようになる。 $\text{KBrO}_3$ : 0.30 mol/L,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ : 0.45 mol/L,  $\text{KBr}$ : 0.067 mol/L,  $\text{CH}_2(\text{COOH})_2$ : 0.10 mol/L,  $\text{Ce}(\text{SO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ :  $2.5 \times 10^{-3}$  mol/L ( $n=4$  の場合), フェロイン:  $1.3 \times 10^{-4}$  mol/L (20 滴を 1.0 mL とした場合)。

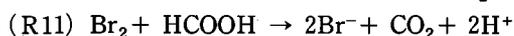
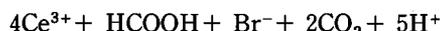
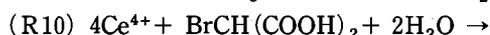
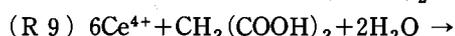
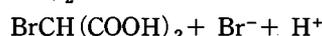
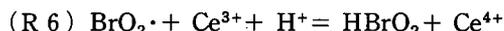
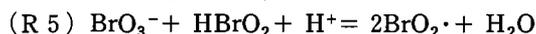
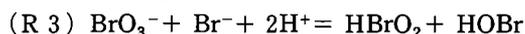
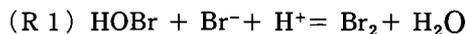
#### 廃棄

反応混合物はポリエチレン製の廃液入れに集め, 振とう攪拌したところに, 秤量してポリエチレン製のビンに入れておいた水酸化ナトリウムを, 発熱に注意しながら少しずつ加えていく。中和後, 廃液を水とともに流しに捨てる。3 回 (2 倍スケールで 1 回) 実験を行うとすると, 使用した硫酸とマロン酸 (合わせると約 0.33 mol (約 0.22 mol)) を中和するのに水酸化ナトリウムは, 約 26.4

g (約 17.6 g) 必要である。

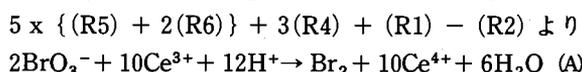
原理<sup>17)</sup>

B-Z 反応の基本的な反応は (R 1) ~ (R 11) の 11 種類に要約できる。

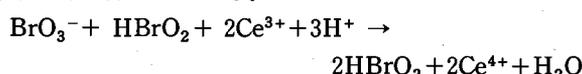


この反応は反応中間生成物の 1 つである臭化物イオン ( $\text{Br}^-$ ) の濃度のしきい値 ( $[\text{Br}^-]_c$ ) を境として、以下に示すように支配的反応 (A) + (B) と (C) + (B) とが入れ替わるものである。

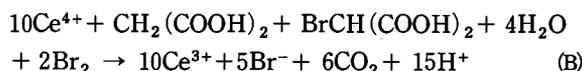
$[\text{Br}^-] < [\text{Br}^-]_c$  のとき、セリウム (III) イオン ( $\text{Ce}^{3+}$ , 黄色) の酸化反応 (A) が主要な反応として起こる。



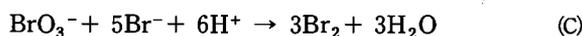
ここに含まれる (R 5) + 2(R 6) の過程は、以下の式で示される自己触媒の反応であり、 $\text{HBrO}_2$  は反応により倍増する。振動反応には、このような過程が必要であることが分かっている。



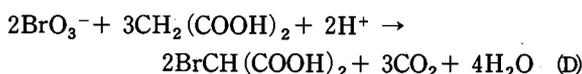
(A) で生成したセリウム (IV) イオン ( $\text{Ce}^{4+}$ , 無色) は以下の反応 (B) により  $\text{Ce}^{3+}$  に還元され、 $\text{Br}^-$  が生産される。この反応 (B) は常に起こっている。(R 9) + (R 10) + 2(R 11) より、



$[\text{Br}^-] > [\text{Br}^-]_c$  になると、(A) は停止し、常に起こっている反応 (B) とともに (C) が開始し、結果的に  $\text{Br}^-$  が消費され、 $\text{Ce}^{4+}$  が  $\text{Ce}^{3+}$  に還元される。3(R 1) + (R 2) + (R 3) より、

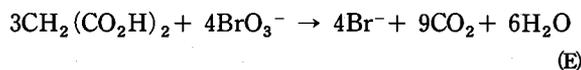


(C) により、 $[\text{Br}^-] < [\text{Br}^-]_c$  になると、再び (A) が開始し、以降、この反応の交代を繰り返す。全体としての反応式は (D) で示される。 $\{2(\text{C}) + (\text{A}) + (\text{B}) + 5(\text{R 8})\}/2$  より、



マロン酸が酸化されて最終的に二酸化炭素になるとす

ると、反応全体の式は下の式 (E) となる。



繰り返しの機構の詳細は文献<sup>16,17,18)</sup>を参照せよ。

フェロインを加えると、 $[\text{Ce}^{4+}]/[\text{Ce}^{3+}]$  比が大きいつきは  $\text{Ce}^{4+}$  (無色) がフェロイン ( $\text{Fe}^{2+}$ , 赤色) 錯体をフェリイン ( $\text{Fe}^{3+}$ , 青色) 錯体へと酸化する。 $[\text{Ce}^{4+}]/[\text{Ce}^{3+}]$  比が小さいときは  $\text{Ce}^{3+}$  (黄色) による  $\text{Fe}^{3+}$  の  $\text{Fe}^{2+}$  への還元が起こる。

検討

振動反応は多くの文献<sup>12,13,14,15)</sup>に実験例があるが、特に、文献<sup>12)</sup>に詳細な原理とともに多くの実験の記述がある。Briggs-Rauscher 反応は文献<sup>14)</sup>に硫酸を使わない実験もあったが、記述の「時計反応」と同じ変色なので、多色に渡る変色が観察できる、文献<sup>12)</sup>の古典的な B-Z 反応を選択し、検討を行った。

8 分の 1 スケールで、硝酸アンモニウムセリウム (IV) の代わりに、ストックがあった硫酸セリウム (IV) を用いて実験を追試した。予備実験では 1 分程度の周期で振動が観察できたが、当日、再現できなかった。調べた結果、マロン酸と硫酸セリウムを溶液にして保存しておいたことに問題があると思われた。また、マグネチックスターラーの攪拌速度が速いと振動が観察できないとあることも判明した。

この時点で「化学展'85 (名古屋)」で演示した、比較的振動周期の速い B-Z 反応のプロトコルを見つけた。使用薬品は硫酸セリウム (IV) 以外は文献<sup>12)</sup>と同じで、濃度は全く異なっており、一般的に濃い設定になっていた。スターラーの攪拌速度の影響は、ほとんどなく、また、マロン酸と硫酸セリウム (IV) は固体で加えていた。そこで、このプロトコルの実験を詳細に検討した。

臭素酸カリウム (0.40 mol/L, 飽和に近く、冬場はあたためて溶かす必要有)、およびマロン酸 (2.00 g 固体を添加) はプロトコルの濃度と量に設定し、硫酸の濃度を決定後、これに臭化カリウムを溶解することにした。次いで変色を見ながら、試行錯誤で硫酸セリウム (IV) (固体を添加)、およびフェロインの適切な添加量を決定した。最後に、発生する臭素ガスの漏出を防ぐため、固体、および溶液を加える順序、スターラーの攪拌速度、ゴム栓の脱着のタイミングを試行錯誤で決定した。

文献<sup>12,13,14)</sup>には、溶液中に少量の塩化物イオンが存在しても、B-Z 反応の機構に干渉し、振動を抑制するので、きれいな容器で蒸留水を用いるとの記述があった。今回、設定した条件で、蒸留水の代わりに水道水を用いて操作を行ったところ、各試薬の濃度が濃い設定のためと思われるが、問題なく振動反応が観測された。但し、透明になるまでの時間が蒸留水を用いた時より長くなり、周期も早めに長くなっていくように思われた。

さらに、少し大変ではあるが、スターラーを使用しないで、手でフラスコを振っても、同様に振動反応の演示

が可能であることがわかった。

### 3.4. 「アルコールロケット<sup>5)</sup>」

#### 実験に必要な試材

スチール, またはアルミ製空き缶 (例えば 190 g 入, 直径 52 mm×高さ 103 mm, 1個), 缶切り (1個), 電動ドリル, またはキリ (1個), アズワン株式会社製 100 mL ディスポカップ (ポリプロピレン製, ブロー成形), または空き缶に強く押し付けて堅くふたをすることができるカップ (数個), エタノール { $C_2H_5OH=46.07$ , 密度  $0.79 \text{ g/cm}^3$ ,  $24.6 \text{ L/mol}$  ( $27^\circ\text{C}$ )} 99%, 25 g 試薬ビンに分取), 長柄ガスライター (1個), ポリエチレン製 1 mL ピペット (0.25 mL 目盛付, 1本), 磁器製の皿 (直径 20 cm, 1枚), 濡れ雑巾 (1枚)。

#### 演示実験の事前準備

- 1) 空き缶の上のふたを缶切りで切り取り, 底から約 1.5 cm の側面に電動ドリルやキリ等で直径約 3 mm の穴をあける。
- 2) 予備実験を行い, 缶の中に入れるエタノールの量を再確認し, 見当をつけておく。絶対多く入れないこと。

#### 演示実験当日の操作

- 1) 室温が低い時は缶を手, ポケット, ヘアドライヤー等で, あらかじめ温めておく。
- 2) ポリエチレン製ピペットで缶の内側の側面の壁にエタノール約 0.13 mL を広げてたらす。
- 3) すぐにカップを缶に強く押し付けて堅くかぶせた後, 缶を横にして回転させたり, 逆さまにしたりしながら, 手で 10 秒くらい温め, エタノールの蒸発と空気との混合を助ける (このとき, 缶の下の穴を親指でおさえてふさいでおく)。
- 4) 机の上に置いた磁器製の皿の上に, カップを上にして缶を立てる。演示者は顔をカップの真上に出さないようにしながら, 長柄ガスライターの炎を缶の穴に近づける。パン! という大きな音とともにカップは 3 m 以上飛び上がる。発射直後は缶が熱いので, やけどに注意する。

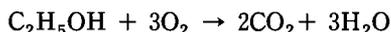
#### 廃棄

廃棄物はない。

#### 原理

可燃性の気体, または液体の蒸気を空気と適当な割合 (爆発濃度範囲) に混合したものに点火すると, 爆発的に燃焼する。濃度が濃すぎても薄すぎても爆発にはならない。エタノールの爆発濃度範囲 (体積%) は 3.3–19% であり, この実験に最も適している。

以下の式で完全燃焼するとすると, エタノールの空気との理想爆発濃度は 6.25% になる。300 mL の容量ではエタノール約 0.045 mL (気化すると約 19 mL) になる。



反応によりエタノールと酸素の体積は 1.25 倍にな

り, これに反応熱による膨張 ( $0-273^\circ\text{C}$  で 2 倍) が加わり, ロケット発射の力となる。

ガソリンとして用いられるイソオクタン<sup>6)</sup>の爆発濃度範囲 (体積%) は 1.1–6.0 であり, エタノールよりもかなり薄い。

#### 検討

この実験で最も難しいのが缶に入れるエタノールの量である。エタノールの蒸発のしやすさが異なるからと思われるが, 室温によって適量は変わる。一般にエタノールを多く入れ過ぎる傾向があり, 爆発しないで点火口から小さな炎が出たり, カップのロケット発射後に, 発射カップに火がついたり, 台の缶の口からエタノールが燃えて炎が上がり, 缶が熱くなることがあり危険である。このような時には濡れ雑巾をかぶせると良い。缶とカップを合わせた内部の体積は約 300 mL であり, 300 mL の 3.3–19% は 9.9–57 mL である。エタノール 0.13 mL が  $27^\circ\text{C}$  で完全に気化すると約 55 mL になる。エタノール 0.13 mL の使用量は十分であり, 蒸発の効率により良い爆発の条件となるのであろう。さらに缶にフィットしたカップを堅くかぶせたため, 爆発の威力が密閉により増し, 効果的な演示となった。

メタノールの爆発濃度範囲 (体積%) は 6.0–35% であり, 実験に適すると思われたが, 過剰に用いたためか, 爆発が起こらなかった。

### 3.5. 「燃えないハンカチ<sup>6)</sup>」または「燃えないティッシュペーパー」

#### 実験に必要な試材

エタノール–水道水 (4/6) 250 mL に塩化ナトリウム 1 g を含む溶液 (口径 84 mm で容量 1.3 L のポリエチレン製の試薬ビンに以下のように調製, 1本, {200 mL ビーカー (1個), エタノール (500 mL 試薬), 塩化ナトリウム (500 mL 試薬, または食塩), 薬さじ (1本)}, 磁器製の皿 (直径 20 cm, 1枚), ハンカチ, またはティッシュペーパー (1枚), 長柄ガスライター (1個)。

#### 演示実験の事前準備

- 1) 1.3 L のポリエチレン製の広口試薬ビンに, 200 mL ビーカー等でエタノール 100 mL, および水道水 150 mL を入れ, 混合し, これに塩化ナトリウム 1 g を溶解する。

#### 演示実験当日の操作

- 1) 広口試薬ビンの中の溶液に (折りたたんだ) ハンカチを浸し, 滴がたれない程度に軽く絞る。ハンカチを広げた場合は, これを 8 分の 1 か 16 分の 1 に折りたたんで皿の上に置く。ティッシュペーパーの場合, 2 枚重ねのものを 4 つ折りにし, 溶液に浸した後, そのまま皿の上に置く。ティッシュは観客に提供してもらっても良い。
- 2) 火をつけるとハンカチやティッシュから急に炎が立ち上がるが, ハンカチやティッシュ自体は燃えない状

態で炎が消える。炎が消えた直後はハンカチやティッシュ、皿が熱いので、やけどに注意する。

#### 廃棄

広口試薬ビンの中の溶液は、なくなるまで何度でも使える。ハンカチは洗濯する。ティッシュはゴミ箱に捨てる。

#### 原理

液体の蒸発による気化熱により、ハンカチやティッシュは冷却され、燃えない。アルコールランプやロウソク等は可燃性の木綿や紙等を芯に用いているが、芯による燃焼が可能なのも同じ原理である。気化熱の大きい水を加えるのは、エタノールの燃焼、および加熱のされ方がハンカチやティッシュの場所によって違うからである。1枚の状態の縁等の乾き易いところでは、エタノールが先に蒸発して燃焼してなくなり、蒸発熱が奪われなくなるので、他の部分の炎で加熱されて焦げた後、全部燃えてしまう。

#### 検討

実際、ハンカチやティッシュを折りたたまないと、縁が焦げることがあった。

また、明るいところでは炎が観察しにくかったので、塩化ナトリウムを溶液に加えたところ、ナトリウムの炎色反応により、観察しやすくなった。塩化ナトリウムの代わりに炎色反応が出易いホウ酸を添加してみたが、緑の炎色は観測されなかった。

### 4. おわりに

以上のように、今回、フレンドシップ事業に参加した学生が、また、小中学校において教師が、誰でも安全かつ容易に化学マジックが演示可能であるようなプロトコルを完成した。これにより、既にプロトコルが整備されていた演示実験と併せ、訪問化学実験の化学マジックとしては十分な数の実験が演示可能となった。

このように多くの化学マジックが自分で演示できることは、現職の教師、および将来、教師となる学生にとって、生徒に理科を教える(化学に興味を持たせ、理解させる)ための魅力的な授業を行うために効果的な教材を所持していることになる。さらに、観客に説明できるように原理を理解して化学マジックを演示すること、および新たな化学マジックの開発や演示法の検討を行うことは、さまざまな化学の知識の習得につながり、また、化学の知識を駆使することを要求されるので、学生への教育としても非常に効果がある。化学を専攻し、教師をめ

ざす学生にとっては、まさに一石二鳥のメリットがある。

今後は、さらに著者の長年の研究テーマでもある化学発光や生物発光を題材とした化学マジックを開発、検討し、演示実験として完成させ、それを訪問化学実験や講義の一部として実践する予定である。

### 謝 辞

化学マジックの文献を調べ、実験をお手伝いしてくれた当研究室4年の佐々木 淳子さんに、この場を借りて感謝します。

### 参 考 文 献

- 1) 戸谷 義明, 化学と教育, **50**, 2002, pp 532-533.
- 2) 戸谷 義明, 愛知教育大学研究報告, **50**(自然科学編), 2001, pp 47-53.
- 3) 戸谷 義明, 愛知教育大学研究報告, **52**(自然科学編), 2003, pp 23-28.
- 4) 日本化学会 編, “実験で学ぶ化学の世界2 物質の変化”, 丸善, 東京, 1996, pp 105-106.
- 5) 文献<sup>4)</sup>, pp 37-38.
- 6) L. A. Ford 著, 金沢 養 訳, “化学マジック 化学を使う奇術百科”, 白揚社, 東京, 1960, p 85.
- 7) 日本化学会 編, “新版 化学を楽しくする5分間一手軽にできる演示実験一”, 化学同人, 京都, 1986, pp 132-137.
- 8) 文献<sup>6)</sup>, pp 55-56.
- 9) 池本 勲 訳, “教師のためのケミカルデモンストレーション3”, 丸善, 東京, 1997, pp 138-143.
- 10) 日本化学会 訳編, “実験による化学への招待”, 丸善, 東京, 1987, pp 134-135.
- 11) 池本 勲 訳, “教師のためのケミカルデモンストレーション6”, 丸善, 東京, 1998, pp 81-181. 特に, Landolt ヨウ素時計反応は pp 97-108.
- 12) 文献<sup>11)</sup>, pp 1-79. 特に, 古典的な Belousov-Zhabotinsky 反応は pp 28-33. Briggs-Rauscher 反応は pp 18-27.
- 13) 日本化学会 編, “楽しい化学の実験室”, 東京化学同人, 東京, 1993, pp 54-59. Belousov-Zhabotinsky 反応.
- 14) 日本化学会 編, “教師と学生のための化学実験”, 東京化学同人, 東京, 1987, Briggs-Rauscher 反応は pp 45-46, Belousov-Zhabotinsky 反応は pp 47-51.
- 15) 日本化学会 編, “統実験による化学への招待”, 1989, pp 60-61.
- 16) 吉川 研一, 現代化学, 1982, 66 14-22.
- 17) 吉川 研一, “非線形科学—分子集合体のリズムとかたち—”, 学会出版センター, 東京, 1992, pp 39-51.
- 18) 早川 俊美, 吉川 研一, 脇 健, 化学教育, **27**, 1979, pp 355-359.

(平成15年9月11日受理)