

# 出前化学実験で演示される化学マジック実験の 実験法と演示法の改良

戸谷 義明

理科教育講座 (化学)

## Improvement of Experimental and Exhibiting Methods of Chemical Magic Experiments, Performed in the Delivery Practice of Chemical Experiments

Yoshiaki TOYA

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

### ABSTRACT

We have investigated and developed many chemical experimental methods for delivery practices. The procedures and the estimation of practices were previously published. We, a supervisor and chemistry-major undergraduates and graduates, formed a team "Dr. Magic & His Guys & Ladies of AUE". Well-trained apprentices of the team mainly performed 8 chemical magic demonstrations. The supplemental improved methods were detailed in the following report.

### 1. はじめに

化学マジックなどの演示化学実験は、演示者、観客の両方に化学のおもしろさ、楽しさを実感してもらうことができる。教員が演示すれば、児童・生徒を授業に集中させたり、理科への興味関心を喚起させたりするために絶大な威力を発揮する。化学実験の演示を安全で確実に成功させるためには、演示者は専門の化学の講義・演習、および実験の授業により、化学の原理や法則、物質の取り扱い方や実験法などの知識と技術とを習得することが必要不可欠である。

著者は、ずっと以前から、化学専攻の教員養成の学生には、専門の化学を学ぶ動機づけ、および化学を学ぶ意義を理解してもらうため、また、化学専攻以外の学生には化学のおもしろさを知ってもらうために、演示化学実験が効果的であると確信していた。そこで、まず教員が化学の講義において演示する化学マジック等の演示実験の開発と実践を開始した<sup>1)</sup>。その後、「フレンドシップ事業」、「訪問科学実験」、さらに「サーピス・ラーニングによる出前化学実験」の活動のために、さらなる出前演示が可能な化学実験の開発・改良を、引き続き行ってきた。その結果、大学教員による演示だけではなく、チーム「ドクター・マジックとそのなかまたち」として指導を受けた学生が主役で演示可能な、多くの化学マジックを中心とする出前実験の方法が確立されている<sup>2-11)</sup>。

これまでに発表してきた実験演示法<sup>1-10)</sup>は、実践を重ねたことにより、現在では大幅に改良されているものも多い。そこで今回、化学マジック実験に関する最新の実験法、演示法、情報などを、本報にまとめて公開することにした。

### 2. 化学マジック実験の演示法と改良

現在、よく演示している化学マジック演示実験のタイトルは、以下の通りである。

1. 密閉爆発—ロケット&爆発する炎&アルコール鉄砲
2. 熱いところから出る光—花火の色の秘密
3. 冷たいところから出る光—ケミカルライトの秘密
4. オレンジパワー注入!
5. 振盪色変化の(小・中・大)瓶四姉妹
6. 時間差瞬間着色
7. 自動虹色変色
8. 瞬間消滅—魔法の綿

これらの実験は、すべてパワー・ポイントによるプレゼンテーションとともに演示されているが、プレゼンテーションの最終版は後日、作成を予定している実験集に添付して公開する予定である。今回はプレゼンテーション以外の、これらの実験演示法の現状を述べる。

## 2.1. 密閉爆発—ロケット&爆発する炎&アルコール鉄砲（可燃性ガスの爆発濃度範囲）

「アルコールロケット」として2004年に実験法を発表<sup>4)</sup>したが、現在では、さらに爆発濃度範囲を原理とする2つの実験「爆発する炎」<sup>13)</sup>、「アルコール鉄砲」<sup>14)</sup>を合わせて演示している。

### 2.1.1. ロケット

#### 1) 試材

内容量190-200gの飲料のスチール（アルミより変形しにくい！）空き缶、缶切、プラスチック画鋸&コーナン商事万能角錐ピッカー、アズワン1-4659-01 100 mL ディスポカップ（ポリプロピレン、ブロー成形）、ビニールテープ（巾19mm）&ハサミ、エタノール（ $C_2H_5OH=46.07$ 、密度 $0.790\text{ g/cm}^3$ ）、消毒用エタノール〔76.9-81.4%（v/v）エタノール〕、ウィスキー〔サントリー・リザーブ、オールド、またはマツカラン12年など、40-43%（v/v）エタノール〕、イソオクタン（ $C_8H_{18}=114.23$ 、密度 $0.692\text{ g/cm}^3$ ）、アズワン1-4653-01 ポリスポイト（採血用）、ヘアドライヤー（1000 W）、長柄ガスライター、雑巾、軍手。

#### 2) ロケット発射台の作製（写真1, 2参照）



写真1 テープの張り方。



写真2 ロケット。ただし、ビニールテープは点火用の穴のすぐ上に貼ってある。

1. スチール缶の上の面を缶切で切り取り（缶の外側にキズが付かないように注意）、けがを防止するために、切断面の角と切取口の内部にビニールテープを貼る。その際、ビニールテープを横に一巻きにす

ると、はがれやすいので、2cmぐらいの長さのテープを縦に貼り合わせていくとはがれにくい。テープが缶の外側にはみ出ないようにする。

2. 缶の底から約1.5cmの側面にプラスチック画鋸で穴を空け、ついで万能ピックを用い、直径3-4mm（これ以上大きくしない）の穴になるまで少しずつ穴を広げていく。

3. 缶の側面の穴を、はがしやすいうように端を折り重ねたビニールテープで塞ぐ。

#### 3) ロケット（ディスポカップ）の実験法

1. ポリスポイトの口から1.0cm, 2.0cm, 2.5cm, 7.7cmの長さに印をつけ、このポリスポイトで、エタノールでは2.0cm（0.068 mL）、または4滴、消毒用エタノールでは1.25倍の2.5cm（0.085 mL）、または5滴、イソオクタンでは1.0cm（0.034 mL）ウィスキーでは7.7cm（0.26 mL）の印まで各燃料を正確に量り取り、缶の内側の側面の壁に広げて入れる。

2. すぐに発射台の開口部に、ディスポカップを缶に強く押し付けて80-100 mLの目安目盛のあたりまで固くかぶせた（新品なら100 mL、使っていく毎に少しずつ深くかぶせていく）後、エタノール、消毒用エタノール、イソオクタンでは、缶を倒立させ、そのまま室温で20分間放置する。ウィスキーでは、缶の底を体の横に当て、ディスポカップが浮かないように押さえ回しながら、ドライヤーで、缶の側面、および底部から約1cmの距離で約30秒間加熱する。

3. 真上の天井に蛍光灯などがいないところの机の上に、カップを上にしてロケットを立て、大きな音がすることを予告する。缶の側面の穴を塞いだビニールテープをはがし、穴の上部に貼り付ける（写真1）。顔をカップの真上に出さないようにしながら、長柄ライターの炎を穴に近づける。パン！という大きな爆発音とともに、カップは最高で5m以上飛び上がる。

#### 4) 原理、実験上の注意、演示法

- ・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、または爆発限界値）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<sup>21, 22)</sup>。
- ・カップを固くかぶせてガスを逃げにくくし、効果的に密閉系をつくる（通常の化学実験では危険な密閉系にならないようにする）ことにより、爆発の威力が高まる。カップのかぶせ方で、ロケットの飛び方を調整できる。緩くすれば、発射の音が小さく、飛ぶ高さが低くなる。
- ・エタノールの爆発濃度範囲（体積%）は3.3-19であり、その蒸気圧が13-38℃で、この範囲に入ることがアルコールランプなどの爆発事故の原因であ

- る<sup>12)</sup>が、ロケット実験には最も適している。ライターの炎で点火する場合、炎が上がらないで良好な結果が得られる注入量は 0.050-0.080 mL であった。注入量を 0.20 mL まで増やしていても予想通り発射可能であったが、注入量が多いほど炎が上がりにくく、缶も熱くなり、危険と考えられた。
- ・イソオクタン<sup>12)</sup>の爆発濃度範囲（体積 %）は 1.1-6.0<sup>12)</sup> であるが、ライターの炎で点火する場合、確実にロケットが飛ぶ注入量の範囲は 0.030-0.050 mL であり、ガスになって濃度が 3.7% になる量 0.080 mL を注入すると、全く発射しなくなった。したがって、良好な結果を得るためには、エタノールの半分の注入量（0.034 mL、低温時はマイクロピペットで 50  $\mu$ L）を正確に注入する必要がある。ちなみに、教材として市販されている、ライターなどに使われているものより強力な圧電素子（セラテック製 PSS 8 RION 相当）の火花で点火するロケットを作ると、爆発濃度範囲の上限 0.12 mL まで発射可能であり、点火法が決定的な影響を与えることが判明している。
  - ・エタノール、およびイソオクタンの空気（酸素/窒素 = 1/4 とする）との理想爆発濃度は、それぞれ以下の式から 6.3%、1.6% になる。  

$$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O} \text{ (完全燃焼)}$$
 体積 1 3 (空気15) 2 3 + (窒素12) 6.3% (1/16)  

$$2\text{C}_8\text{H}_{18} + 25\text{O}_2 \rightarrow 16\text{CO}_2 + 18\text{H}_2\text{O} \text{ (完全燃焼)}$$
 体積 2 25 (空気125) 16 18 + (窒素100) 1.6% (2/127)
  - ・燃料として、メタノール(0.080 mL)、アセトン(0.050 mL)、エーテル(0.050 mL)、ペンタン(0.040 mL)、ヘキサン(0.040 mL)を注入、放置してもロケット実験が可能である（前報<sup>4)</sup>を訂正）。ただし、アセトンは強い刺激臭が生ずる。注入した燃料がガスになったときに、ロケットの内部の体積（310 mL）に占める割合を計算し、エタノールとメタノールでは理想爆発濃度の 1.3 倍、イソオクタン、および他の燃料では 1.1 倍になる量を注入すると、良好な結果が得られた。
  - ・全ての燃料について、反応しないと考えられる窒素を含めた反応前後の分子数による体積変化は 1.04-1.06 倍である（前報<sup>4)</sup>を訂正）。反応で生成した熱による気体の熱膨張が、ロケットが飛ぶ主原因であると考えられる。
  - ・注入量の計算、およびロケットが飛ぶ原因の詳細は別報に発表する予定である。
  - ・発射直後は缶が熱くなっていることがあるので、やけどに注意する。素手でなく、軍手や濡れ雑巾で持つか、室温で約 1 分放置すれば冷める。燃料の注入量の指示を守れば、熱さをあまり感じずに缶を手で持って横に向けて発射することもできる。
  - ・燃料は必ず正確に測って缶の中に注入する。エタ

ノールを除き、指示した量より多くても少なくても良く飛ばない。エタノールでも多く入れた場合は発射後に缶の口から炎が上がりにくく、缶が熱くなって危険である。万一、炎が出た場合、濡れ雑巾をかぶせれば消える。

- ・エタノール、または消毒用エタノールを入れて放置する方法では、冬場など、室温が低い（蒸気圧が爆発濃度範囲の下限になる引火点 13  $^{\circ}\text{C}$ <sup>12)</sup>未満）場合は原理的に飛ばなくなるので、その際はウイスキーを使った飛ばし方と同様に、ドライヤーで缶を加熱する。イソオクタン、ジエチルエーテルは引火点が、それぞれ -12  $^{\circ}\text{C}$ 、-45  $^{\circ}\text{C}$ <sup>12)</sup>であるので、エタノールに比べ、低温環境の実験には強い。
  - ・日本化学会化学教育協議会情報誌の「化学だいすキッズ No. 1, WINTER 2007」に、ウイスキーでロケットを飛ばす方法が紹介されている。ウイスキーふた 1 杯分（約 5 mL）で缶の内部全体を湿らせ、余ったウイスキー（約 4.5 mL）を捨ててから紙コップでふたをし、缶を手で 40 秒温めてから点火する。手で 40 秒温める代わりに、ドライヤーで 30 秒加熱した方が、成功する確率が高くなり、良く飛ぶ。この場合、注入量は約 0.5 mL であるが、ドライヤーで缶を加熱しすぎると、エタノールの爆発濃度範囲の上限を超えると予想されるので、注意が必要である。夏場など、缶の、特に底部の加熱が良好に行われれば、0.26 mL（理想爆発濃度の約 2 倍のエタノールが含まれる）で成功する確率が高い。
  - ・以前に入手し、現在も使用しているディスプレイカップの質量は 4 g 弱である。最近入手できるものは 7 g 弱もあり、空気抵抗で失速しにくく、良く飛ぶようである。ただし、誤って当たった場合の人のケガ、蛍光灯などの破損に、いっそう注意する必要があると思われる。
  - ・演示では各 5-10 本のエタノール、およびイソオクタンを注入して 20 分以上放置したロケットを準備しておき、最初にエタノール、ついでイソオクタンの順に連続発射する。その後、ウイスキー・ロケット（最大 4 人で 4 本）を注入から加熱、発射まで演示する。イソオクタンがガソリンの成分で、ロケットが飛んだ爆発を利用してエンジンのピストンが動き、自動車が走ることを強調する。またウイスキーは体積の約 4 割がエタノールであることを解説する。観客にウイスキー・ロケットを発射した後の発射台とカップのよい臭いをかいでもらう。マッカランは香りが強く効果的である。
- ### 2.1.2. 爆発する炎（メタンの爆発濃度範囲）
- #### 1) 試材
- ダイソー 4984343040038 クッキング缶 No. 3 密閉缶（丸筒高さ 10 cm、外径 8.6 cm、フタが合う部分の直径 5.3 cm）、またはダイソー 4984343040045 クッキン

グ缶 No. 4 密閉缶 (角/8 角高さ 10 cm, 対辺 8.8, 7.8 cm, フタが合う部分の直径 5.3 cm) (どちらも内部の容積 485 mL), ドリルドライバー, 丸ヤスリ, ガス充填用アダプタ (後述), NRK ユニストップャー M10 (アズワン 1-9662-04 極小シリコン栓 S-10 に相当), Aldrich Z565695 ナチュラルラバーセプタム (またはアズワン 1-9662-01 極小シリコン栓 S-7), 長柄ガスライター, ストップウォッチ.

## 2) 実験用の缶の作製 (写真 3 参照)

缶のフタの中央にドリル 6 mm で穴を開ける. 丸ヤスリでフタの両側のばりを削りながら穴を直径 7 mm になるまで大きくしていく. 同様にドリル 4 mm で缶の底のすぐ上の側面に直径 5 mm の穴を開ける. こちらは缶の内部のばりを削る必要はない.



写真 3 実験用の缶.

## 3) ガス充填用アダプタの作製 (写真 4 参照)

ガス用ゴム管, ゴム管用ソケットカチット JG200CR, ゴム管止め, ポリエチレン製三方コック (外径 8 mm), Aldrich Z565695 ナチュラルラバーセプタム (中央に穴を開けておく), シリコンゴムチューブ (外径 12 mm, 内径 7 mm, および外径 8 mm, 内径 6 mm, 三方コックとゴム風船, 三方コックとゴム管接続のアダプタ), ゴム風船 (ガス圧確認, およびアダプタ内部置換用), 輪ゴムから作成した. 缶に都市ガス (13A, 天然ガス) を充填する前に, アダプタをガス栓に接続し, アダプタの管と風船の内部を, 三方コックを操作することにより完全に都市ガスに置換しておく.

## 4) 都市ガスの充填

1. 缶の下の穴をラバーセプタム, または極小シリコン栓で塞ぎ, 缶に水をいっぱい入れて固くフタをす

る.

2. フタの穴に充填用アダプタのラバーセプタムを当て, 流しの近くで缶の下の穴が斜め下になるようにしてから穴を塞いでいるラバーセプタムを外し, アダプタからガスを送り込む. ガスが送られるにつれ, 缶の内部の水が下の穴から出ていく.
3. 水が出なくなった時点で, 直ちにアダプタのコックを操作してガスを送るのを止める. フタの穴をユニストップャー, 缶の下の穴をラバーセプタムの順で固く塞ぐ. アダプタをガス栓から外す.



写真 4 ガス充填用アダプタ.

## 5) 爆発する炎の実験

1. 缶の下の穴を塞ぐラバーセプタム, ついでフタの穴のシリコン栓を外す. 直ちにフタの穴の上に長柄ガスライターの炎を近づけて火をつけ, ストップウォッチで時間の計測を開始し, 約 2 分後に爆発することを予告する.
2. 最初は黄色い炎が観察されるが, 次第に黄色が見えなくなり, 約 1 分間経過した時点では, 明るい部屋では火が消えてしまったように見える. 部屋を暗くすると, 青い炎がだんだん小さくなっていくのが観察できる. 約 2 分後 (純粋なメタンガスを使用すると 1 分 30 秒後) に炎が穴に吸い込まれるようになった途端, 突然の大爆発音とともに缶のフタが 3 m ぐらい飛び上がる.

## 6) 原理, 実験上の注意, 演示法

- ・原理はロケットと同じ爆発濃度範囲である. 都市ガス (天然ガス) の主成分はメタンで, メタンの爆発濃度範囲 (体積 %) は 5.0-15.0<sup>12)</sup> である. メタン (分子量 16) は空気 (平均分子量 29) より軽いので, フタの穴から出たところに火をつけられると, 周りの空気により燃える. 缶の中には下の穴から代わりに空気が入るが, 爆発濃度範囲の上限になるまでは缶の内部に引火, 爆発しない.
- ・文献<sup>13)</sup>では 4L のすり合わせの缶を使用しているが, 缶としては固くフタの閉まる押蓋式の紅茶缶な

どのブリキ缶で、容量が500 mL ぐらいのものが適しており、十分大きな爆発音が得られる。

- ・この装置では、通常、都市ガスでは2分±10秒で爆発が起こり、穴のサイズを小さくすると時間が長くなる（フタの穴6 mm, 下の穴4 mmで約3分）。フタの穴を8 mmにした場合、大きすぎてフタが飛ばないことがあった。文献<sup>13)</sup>では4 Lの缶の上下に3 mmほどの穴を開けて実験しているが、爆発まで20分を要している。
- ・下の穴の位置を横にしたことにより、水により缶の内部をガスで完全に置換することができ、再現よい結果が得られる。
- ・缶の内部に最初から空気を残しておいてガスを充填しても、爆発までの時間が、大きくは変わらなかった。原因は不明であるが、単純に空気の量に比例して爆発までの時間が短くなるわけではないことが判明している。
- ・ラバーセプタム、およびユニストップで穴を塞いだ都市ガス入の缶は6時間後でも実験に使用可能である。実験に使えないプロパンガスの地域にも出前することができる。
- ・この実験は風に弱い。炎が消えてしまうことがあるのでエアコンなどの風にも注意する。
- ・風よけ、および安全のため、下に隙間が空くようにアクリル筒（外径30 cm）をかぶせて実験を行ったことがあるが、爆発音がこもってしまう。安全上も、今回の装置ではフタが真上以外の方向に飛んだ経験はなく、必要ないと考えられる。
- ・演示はロケット実験に引き続き行う。2007年に渋谷で起きた温泉爆発事故の原因がメタンであり、爆発濃度範囲があまり広くなく、悪い状況重なって起こった事故であったこと、都市ガスの主成分がメタンで、缶の中に都市ガスが入っていることを説明し、火をつけると、約2分後に爆発することを宣言して実験を開始する。
- ・メタンが空気より軽いこと、缶の下の穴から空気が入っていくこと、炎が黄色いうちは爆発しないこと、見かけ上、炎が見えなくなっても火がついていること、この実験は空気より重いプロパンガスではできないことなどを解説する。30秒ぐらい前からカウントダウンする。
- ・実験の後、風船にヘリウムが使われ、水素が使われなくなった理由を観客に問う。水素が可燃性で爆発濃度範囲（体積で4.0-75%<sup>12)</sup>）が広くて危険なため、空気より軽く不燃性のヘリウムが使われていることを解説する。
- ・エタノール、イソオクタン、メタン、水素、一酸化炭素（12.5-74%<sup>12)</sup>、0.15%で致死）のグラフを示し、爆発濃度範囲が広いものほど空気と混ざった場合に爆発しやすく危険であることを解説する。

・実験後の缶は、錆びぬように、よく乾燥しておく。

### 2.1.3. アルコール鉄砲

フィルムケースのキャップを飛ばすもので、高く大きな爆発音をする。ライターの圧電素子を、そのまま使う鉄砲を作成した。

#### 1) 試材

ガスがなくなった長柄ガスライター（丸柄で円筒形のもの）、フィルムケース（富士フィルム）、コニシ製プラスチック用瞬間接着剤（ポリエチレン・ポリプロピレン使用可、フィルムケース固定用）、セメダイン製エポキシパテ金属用（フィルムケース固定補強用）、シアノアクリレート系強力瞬間接着剤（ガスライター隙間、側面注入用）、コニシ製ボンドG17（ガスライター側面注入用）、エタノール、アズワン製ポリスポイト（採血用）。

#### 2) アルコール鉄砲の作製（写真5参照）



写真5 アルコール鉄砲。

1. 爆発のガスが漏れるのを防ぐため、ライターの先端部には電極につかないように気をつけながら、隙間に強力瞬間接着剤速乾性を流し込む。柄の横穴には瞬間接着剤、またはボンドG17を流し込む。
  2. フィルムケースの底に電動ドリルで長柄ライターの柄の直径より少し小さめの穴を開け、そこにライターの柄を約1.5 cm差し込んでプラスチック用瞬間接着剤で接着する。さらに衝撃に耐えるように、柄とフィルムケースの外側の底をエポキシパテ金属用で円錐形に固定する。必要に応じ、パテとケースとの間に瞬間接着剤を流し込む。
  3. キャップが飛ばないで、フィルムケースが爆ぜることがあったので、ケースの周りにビニールテープを1-2周、巻いておくとよい。
- #### 3) アルコール鉄砲の実験
1. ポリスポイトでエタノール2滴（0.05 mL）をフィルムケースの中に入れ、キャップをして20分以上放置する。
  2. かなり大きな音がすることを予言してから、カー

テンや衝立などの安全なところを狙って長柄ガスライタースイッチを押して鉄砲を打つ。

#### 4) 原理, 実験上の注意, 演示法

- 原理はロケットと同じである。ライターの炎ではなく、圧電素子で作った火花（スパークプラグの火花と同じ）で着火させる。
- 長柄ライターなどに使われている圧電素子（セラテック製 PS65 RION 相当, 1.4 kV, 14  $\mu$ s) より強力（電圧×パルス幅 1.3 倍）な、教材として市販されている圧電素子（セラテック製 PSS8 RION 相当, 1.6 kV, 16  $\mu$ s) を用い、文献<sup>14)</sup>のようなアルコール鉄砲を作ると、エタノールを多めに注入さえすれば、量に関係なく爆発が起こる。しかし、教材として市販されている圧電素子は意外に高価（¥787）である。使い終わった長柄ライター（¥105）を再利用し、簡単に作製できないかと考えて今回の方法を開発した。
- フィルムケースの容積は約 30 mL で、ロケットの約 10 分の 1 の容積なので、エタノール 5-8  $\mu$ L の注入で良好な結果が得られると予想されたが、最適な注入量は 0.040-0.060 mL であった。多く入れ過ぎると爆発しなくなり、圧電素子の違いによる火花の強さの違いを実感した。この量でも大過剰で、以下に述べるように、発射の際に炎が上がらなければ、続けて 3 回発射できる状態になった。
- 気温 24  $^{\circ}$ C でエタノール 50  $\mu$ L を注入したところ、30 秒後で発射できた。直ちにもう一度キャップをして（熱くないことを確認）20 分後、再び発射できた。さらにもう一度キャップをして（熱くないことを確認）20 分後、3 回目も発射できた。4 回目は発射できなかった。
- 以上のことから、発射後、すぐにキャップをしてはいけない！ケースの内部に、まだ蒸発していないエタノールが残っており、再発射できる状態になり、危険である。キャップをする場合、ドライヤー等でよくケースを乾かしてからにする。
- フィルムケースのキャップは硬く、質量は 1.6-1.7 g もあり、ロケットより危険である。布や衝立などの大きな的に対して発射し、顔（特に目）や蛍光灯などに当たらないように最大の注意を払う。
- 演示は爆発する炎の後で行う。黒い紙を巻いたライター、または USB マイクロスコープを活用して圧電素子の火花を観察してもらい、ロケットのライターの炎ではなく、エンジンのプラグのように、この火花で点火することを説明する。
- アルコール鉄砲は演示の後、観客の子どもに発射を体験してもらっている。発射の合図があるまでスイッチを押さない、人に向けて発射しない、全員が発射し終わるまで動かないように指示する。

#### 2.1.3. 茶筒ロケット

茶筒の缶とアズワン 1-4659-04 300 mL ディスポカップ（ポリプロピレン製、ブロー成形）を使用し、同様の方法で大型アルコールロケット（既述のもの 2.7 倍の容積、エタノールの注入量 0.185 mL）の実験が可能である。密閉爆発実験の締めとして最後に演示している。非常に大きい音をする。カップは 18 g 弱もあるが、大きいので、空気抵抗で失速しやすいと思われた。しかし、5 m 以上の天井から跳ね返ってきたことがあったので、茶筒を手横に持ち、横的に向かって発射するようにしている。

#### 2.2. 熱いところから出る光—花火の色の秘密（炎色反応）

実験については、これまでの報告<sup>1,2,22)</sup>と大きな変更はない。改良点と演示法について述べる。

- 各溶液 4.0 mL をポリプロピレン製 15 mL 遠沈菅に入れたものを回数分用意する。これをるつぼに移し、るつぼにフタをしておく。
- るつぼが安定するように、円筒形のフェライト磁石（外径 55 mm, 内径 45 mm, 高さ 19 mm）をバットにくっつけ、その中に置いている。
- この実験法では、るつぼは A1 型, C1 型よりも、B1 型で最も良好な炎色が観察できる。
- ホウ酸はアルミなるつぼを使用することにより、最後にナトリウムと思われる炎色が出るのを防ぐことができる。
- 十分な暗さを得られない会場用に、黒色スチール棚板（80×30 cm, および 45×30 cm）、カラーボルト、コーナプレートで暗枠（高さ 45×巾 80×奥行 30 cm）を作製した。枠の中にステンレストレー（245×175×16 mm）3 枚を入れ、その上に、るつぼを 3 個ずつ、観客から見て図 1 のように横一線に並べる。枠の後ろに黒色板（30×45 cm, 厚さ 3 mm）を当てながら演示する。

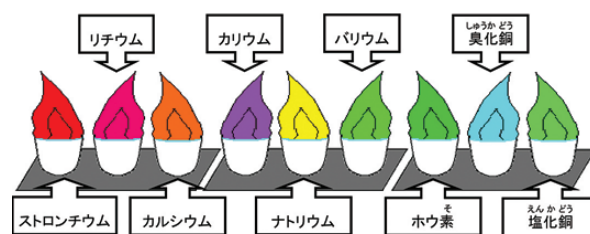


図 1 花火の色の秘密。

- それぞれの説明をする際に、るつぼの上部を、るつぼばさみではさみ、軽く振ってやると、炎が大きくなり、炎色反応が見やすく、観客は、どの物質について説明しているか良く分かる。ただし、るつぼを振りすぎて溶液をこぼしてしまうこと、るつぼばさ

- みの先に溶液をつけてしまい、他の溶液を汚染しないように注意する。るつぼの上部を、るつぼばさみではさみ、軽く振ってやれば十分に炎は大きくなる。るつぼばさみがフェライト磁石に引きつけられることもあるので気をつける。
- 各元素が身近なところで、どのようなところに存在するかを解説しながら炎色を見せる。例えば、ストロンチウムは車の発煙筒、リチウムは携帯電話やコンピュータの電池、カルシウムは骨、チョーク、真珠や鍾乳洞、カリウムは肥料や草木の灰、ナトリウムは食塩でトンネルのランプ、バリウムは胃のレントゲン検査で飲むまぜいもの、ホウ素はホウ酸でゴキブリだんごや目洗い、銅は10円玉や電線などである。
  - 花火は、いろいろな金属などの元素を燃やして炎に色をつけていることを理解してもらう。
- ### 2.3. 冷たいところから出る光—ケミカルライトの秘密（過シュウ酸エステルの化学発光）
- ほぼ最新の実験法が文献<sup>10)</sup>に既述されている。
- セレモニーセットはOYG, OWB, Bの他、Gも使用している。OYG, OWBの最終色までの変色時間の調節が難しいためである。現在のサリチル酸ナトリウムの添加量は酸化液30 mLに対し、OYGで25 mg, OWBで20 mgである。
  - 酸化液、蛍光液を入れたビーカーには、水分が入るのを防ぐため、実験の直前までパラフィルムをしておく。
  - 発光反応の原理は難しいので取り扱わず、冷たい光がどこに使われているかを説明した後、ケミカルライトは中のアンプルが割れて液が混ざり、反応が開始すること、光っているのに熱くない（炎色反応とは異なり、熱くないところから光が出ている）こと、光のエネルギーの低い蛍光物質からの色が出やすく、これを利用して長波長から短波長への変色発光が作られることを理解してもらう。
  - ケミカルライトとセレモニーセットの発光ビーカーは、観客に熱くないことを確認してもらう。その際、ビーカーごと観客に渡さないようにする。確認し終わった後のケミカルライトは、演示に集中してもらうため、全て回収する。
  - GとBとを混ぜる実験では、最初にBの半分の量をGに加え、緑色に変化しないことを確認する。次に、この緑色の液を残りのBに入れて液量を元と同じにし、両方とも緑色になることを確認する。
  - 蛍光液にブラックライトを当てる際には、液の色と蛍光の色との差が大きいBの蛍光液を最後に見せる。ブラックライトは真上に向け、コニカルビーカーの底に完全に当たるようにする。
- ### 2.4. オレンジパワー注入！（リモネンによる発泡スチロールの溶解減容）<sup>15,16,17)</sup>
- この実験については、これまで未発表で、この実験だけは、少しトリッキーな演示が必要である。タイトルは、とあるテレビドラマに由来する。
- 1) 試材
    - 1 L ビーカー, 200 mL ビーカー 3 個, 黒板 (30×45 cm) 2 枚, アズワン 100 mL アイボール広口びん 2 本, シトラスオイル(テクノクリーン, グレープフルーツ由来, 160 mL), 発泡スチロール (密度 0.014 g/cm<sup>3</sup>, 70 倍), スチロールカッター, ポリウレタン, カッターナイフ, 500 mL ポリエチレン製廃液びん。
  - 2) 事前準備
    1. 100 mL アイボール広口びんに、それぞれシトラスオイル 100 mL, 60 mL を入れておく。
    2. 発泡スチロールはスチロールカッターでブロック (約 2×2×2 cm, 100 個, 約 1×3×7.5 cm, 6 個) に、ポリウレタンはカッターナイフでブロック (約 1×3×7.5 cm, 3 個) に切っておく。
    3. 見本回覧用に、発泡スチロールとポリウレタンのブロック (約 3×3×4 cm) を接着剤で接着したものを 5-10 個用意する。
  - 3) 当日の操作
    1. 3つの200 mL ビーカーのうち、2つには発泡スチロールのブロック (約 1×3×7.5 cm) 各 3 個, 1つにはポリウレタンのブロック (約 1×3×7.5 cm) を入れ、黒板の上に、中央にポリウレタンのものになるように一列に並べておく。
    2. 最初は発泡スチロールの入ったビーカー、次にポリウレタンの入ったビーカー、最後に残りの発泡スチロールの入ったビーカーに、シトラスオイル各約 20 mL ずつをシトラスオイル 60 mL が入っている同じ広口びんから加えていく。
    3. このとき、発泡スチロールを溶かすには、シトラスオイルに魔法の呪文を唱え、3秒以内に加える必要があるという設定にする。最初のビーカーに「オレンジパワー注入！」と唱えてオイルを注ぎ、あたかもオレンジパワーによって発泡スチロールが溶けたように演示する。次に、中央のポリウレタンのビーカー（観察者からは発泡スチロールとポリウレタンの見分けはつかないであろう）にシトラスオイルを注ぐときには、オイルが入っている広口びんのフタが固くて開かず、呪文を唱えてから加える前に3秒以上経ってしまったから溶けなかったというように演じる。最後のビーカーに残りのオイルを、呪文を唱えて3秒以内に加え、溶かすには呪文が必要では？と言う。
    4. そんなばかげたことがあるはずないと言ってタネあかしをする。
    5. 形の似たもの同士（ポリスチレンとリモネン）は

溶け（混ざり）やすく、似ていないもの（ポリウレタンとリモネン）は溶け（混ざり）にくいこと、およびリモネンリサイクルについて解説する。

6. 最後に、1L ビーカーいっぱいに入れた発泡スチロールブロック（2×2×2 cm）にシトラスオイル 100 mL をかけて溶かす実験を演示する。

#### 4) 後始末と廃棄

使用後のシトラスオイルは廃液びんに入れ、適切な処理方法により廃棄する。こちらでは有機廃液として処理しているが、オイル吸収剤の使用も可能であろう。ただし、オイル吸収剤、オイルをふいた紙、布は、自然発火を防ぐため、必ず水でぬらした状態にして可燃物として廃棄する必要がある。ビーカーは紙でオイルをふいた後、ポリスチレンが溶けやすいリモネン、またはトルエンを少量使用して洗浄し、ついでエタノール、アセトンなどで洗浄する。

#### 5) 原理と注意点

- ・シトラスとはみかんの仲間のこと。シトラスオイルはジュースを搾ったあとのオレンジなどの柑橘類の皮から得られたオイル。主成分は *d*-リモネン。
- ・*d*-リモネンは柑橘類の果皮に 0.5% ほど含まれ、オレンジの臭いの原因である。リモネンは、さのう（普段、食べる部分）には、ほとんど含まれていない<sup>18)</sup>。
- ・発泡スチロールはポリスチレンというプラスチックの一種をガスで約 50 倍に膨らませたものといわれているが、実際にはいろいろな倍率で膨らませたものがあるので注意する。あるエアコンの梱包材は密度 0.025 g/cm<sup>3</sup> で 40 倍に膨らませたものであった。このものはシトラスオイルへの溶解速度が遅く、実験には使用できなかった。ホームセンターで入手した板は 70 倍のもので、良好な結果が得られた。
- ・リモネンとポリスチレンの分子のかたちはよく似ていて、似ているもの同士はお互いに溶け合いやすい。リモネンを含んだオレンジオイルを発泡スチロールにかけると、リモネンが、からまり合った発泡スチロールのポリスチレン分子を解きほぐして溶け合い、後述するように、元の体積の 16 分の 1 の液体になる。回収と運搬が容易になる。
- ・上述の液体（リモネンに溶けないラベルなどをろ過で除去可能）からリモネンを蒸発させ、リモネン（回収ロス 1%）と発泡スチロールの原料のポリスチレンに分け、両方とも回収できる。
- ・ソニーの過去の Web サイトでは、リモネン 45 mL（40 g）に発泡スチロール 1000 mL（20 g）を溶かして 65 mL（60 g）になる [33% (w/w)] とのことであった。この場合、元の体積（1045 mL）の 16 分の 1（65 mL）になったことになる。最大ではリモネン 67.5 mL（60 g）に発泡スチロール 2000 mL（40 g）が溶解可能 [40% (w/w)]<sup>17)</sup> で、107.5 mL（100 g）になると予想され、元の体積の 19 分の 1

（107.5/2067.5）になる。

- ・発泡スチロールは、最小で約 30 分の 1 の体積のリモネンに溶解するが、完全に溶解するまでには時間がかかる。ブロックを使った今回の実験では、最適化は行っていないが、約 3 分の 1 から 8 分の 1 の体積のリモネンを使用しており、30 秒以内に完全に溶解する。
  - ・発泡スチロールは、かたちが似ているトルエンに 45% (w/w) まで溶けるが、トルエンよりリモネンを使用した方が安全である。体への害（毒性）が少なく、常温で炎を近づけても火がつかない（以下、引火点参照）。実際に、発泡スチロールが完全に溶解した後の溶液にライターの炎を近づけ、火が付かないことを演示している。
  - ・*d*-リモネン：引火点 48℃、沸点 176℃。トルエン：引火点 4℃、沸点 110℃。
  - ・リモネンには発泡スチロールを溶かす力だけではなく、油污れを落とす力もある。香りもよいので、リモネンが入ったオレンジ洗剤が売られている。リモネンを多く含む洗剤（換気扇の油落としなど）でも発泡スチロールを溶かす実験ができる。
  - ・リモネンを使った発泡スチロールのリサイクル（リモネンリサイクル Orange R-net）はソニーが一宮で開発した。2005 年に施設と技術を他社に完全譲渡した。高知と宮城でリサイクル施設が稼働していたが、高知は 2009 年に廃業、宮城は 2010 年 9 月現在、停止しており、解体予定とのことである。リモネンリサイクルは環境には優しいが、コスト的に厳しく、大部分の発泡スチロールは熱と力でつぶして回収されているのが現状である。
  - ・今回の 5 倍のスケールでも演示可能である（1L ビーカー 3 個、5L ビーカー 1 個使用、シトラスオイル 100 mL×3、500 mL×1）。
- #### 2.5. 振盪色変化の（小・中・大）瓶四姉妹（色素の酸化還元による変色）<sup>4,5)</sup>
- ・びんのサイズで小びん（液量 100 mL、125 mL ガラスねじ口びん、1 倍）、中びん（液量 300 mL、500 mL ペットボトル、3 倍）、大びん（液量 1000 mL、1.5L ペットボトル、10 倍）のスケールで演示している。
  - ・アルカリが主原因と思われる色素の退色により、溶液が褐色になっていくのが最大の問題である（特に夏場）。したがって混合の順番は、すべてグルコース溶液（当日、または事前に調製）に当日、色素（溶液）を添加し、最後に水酸化ナトリウム溶液（小・中びん 1 mol/L、大びん 5 mol/L）は、演示の直前に混合するようにする。
  - ・各色素のグルコース、1 mol/L 水酸化ナトリウム溶液の使用量は、小びんスケールで次の通りである。



- メチレンブルー MB (6 g, 50 mL), フェノサフラニン PS (6 g, 50 mL), ベンジルビオロゲン BV (2 g, 10 mL), インジゴカルミン IC (6 g, 50 mL).
- ・全部混合し、一度還元色になってからびんのフタを開けて中に空気を入れる。その後、フタをしっかりと閉め、開かないように、フタにビニールテープを巻いておく。
  - ・机の上に塩ビ白板 (30×45 cm) を敷き、その上に MB, PS, BV, IC の順にびんを並べる。振盪とは振ることで、これらのびんは振られて色が変わっても、色が元に戻る (元鞘), お化け (変化) 四姉妹であることを説明して実験を開始する。
  - ・前に並んだ観客 4 人に、色が変わらないように、ゆっくりびんを逆さにして渡し、MB, PS, BV, IC の順に 1 つずつ振ってもらい、振ることで色が変化し、放置しておく、色が戻っていくことを演示していく。別の塩ビ白板 (30×45 cm) を、色を観察してもらうときの背景として使用する。
  - ・小びんの場合は、口の部分を片手で握って上下に振る。中・大びんの場合は、片手で口の部分を握り、もう一方の手をペットボトルの底に当てて上下に振る。MB は 3-5 回、PS, BV は 2-3 回で変色する。色の戻りが遅くなるので、必要以上に振らない。IC は 1-2 回振って一度止め、赤色になることを確認した後、緑色になるまで激しく振る。
  - ・溶液の液面は、空気に触れているために変色するが、それを見えなくするため、ゆっくりと円を描くようにびんを振り、中の溶液が回るようにする。
  - ・溶液の温度が低いと、変色に時間がかかるので、冬場などは、ぬるま湯を用意して温めるとよい。

## 2.6. 時間差瞬間着色 (Landolt ヨウ素時計反応)<sup>4,5)</sup>

- ・最終液量 40 mL の小スケールでは、デンプン溶液用に 100 mL コニカルビーカー、ヨウ素酸カリウム溶液用に 50 mL ビーカーを、最終液量 200 mL の 5 倍スケールでは、ヨウ素酸カリウム溶液用に 300 mL、デンプン溶液用に 500 mL のコニカルビーカーを使用している。コニカルの方が振とうしやすい。これらの溶液は TPX メスシリンダー (10 mL, 20 mL, 50 mL, 200 mL) で計量、調製している。
- ・当日、演示に使用する溶液で予備実験し、変色までの時間を、必ず確認しておく。
- ・0.5% デンプン溶液のカビ防止には、チモールよりも、安息香酸 0.2% (w/v) の添加 (500 mL に 1.0 g) が効果的である。室温で半年以上保存できる。安息香酸は、なるべく細かく粉状にしておき、デンプン溶液を作る際に熱い溶液に加えて溶解させる。
- ・安息香酸を添加すると、酸性になり反応速度が速くなるようで、添加しない場合と同じ時間にするためには、ヨウ素酸カリウム溶液の量を減らす必要があ

る。小スケールで、0.10 mol/L ヨウ素酸カリウム溶液 6.0 mL, 12.0 mL を、それぞれ 30.0 mL に希釈した場合、室温で変色までの時間は、おおよそ 25 秒、10 秒である。

- ・亜硫酸水素ナトリウムを溶解したデンプン溶液を、マジックのためにコニカルビーカーに入れ、開放状態で放置すると、変色までの時間が、だんだん長くなる (還元力が強くなる) ことが判明している。約 10 秒であったものが 90 分放置により 20 秒以上になった。溶液を入れてからコニカルビーカーの口をパラフィルムでシールすると、この現象を、ほぼ防ぐことができた。100 mL 広口びんで調製し、フタをして保存した亜硫酸水素ナトリウム-デンプン溶液は 14 時間後に使用しても、約 10 秒から数秒長くなっただけであった。亜硫酸塩は水溶液中で脱酸素剤として溶存酸素と反応して硫酸になることがよく知られている。現時点では、空气中放置により還元力が強くなる原因は不明である。変色時間の再現性をよくするため、現在、演示直前にビーカーに入れ、パラフィルムでシールするなどの検討を行っている。
- ・ビーカーの中のヨウ素デンプン反応の色は黒にしが見えないので、液を筆やハケで A3 の OA 用紙に塗り、青紫色を確認してもらう。
- ・チオ硫酸ナトリウム (カルキ抜き、小スケールで約 3 g 使用) による、廃棄処理を兼ねた色消し実験を必ず行う。塩素とヨウ素は仲間で、塩素と同様にヨウ素も抜けると説明する。1 つのビーカーで色が消えた後、その液を筆やハケで、先程の OA 用紙の青紫色の上に塗り、色を消す。最後に、もう 1 つのビーカーの黒色溶液を色が消えたビーカーの溶液に加え、色が消えるのを観察する。

## 2.7. 自動虹色変色 (塩化第三ブチルの加水分解に伴う万能 pH 指示薬の変色)<sup>1,3,5,6)</sup>

- ・マグネチックスターラを使う方法よりも、ペットボトルを使う方法が簡便で汎用性とインパクトがあるので、ほとんどの演示は、この方法である。
- ・表面がなめらかな炭酸用 1.5 L ペットボトルを使う。長く使っていると、色素が沈着し、色が観察しにくくなるので、適宜交換する。廃棄の際は回収ペットボトルではなく、切断してプラスチック、または不燃物として廃棄する。
- ・再現性よく、速く変色させるため、ペットボトルには蒸留水 1000 mL を入れ、これに酢酸アンモニウム 0.02 g, 20 mL ポリエチレン製滴びんに測って入れておいた万能指示薬 15 mL を加える。
- ・1 mol/L 水酸化ナトリウム溶液は 30 mL ポリエチレン製滴びんから加える。最初に緑色から紫にするためには 15-20 滴 (0.4-0.5 mL 相当) 加える。

- ・塩化第三ブチル 1.0 mL は 2 mL, または 1 mL ガラススクリュールバイアルに小分けし, 固くフタをしておく. バイアルから直接ペットボトルに加える.
- ・塩化第三ブチルを加えた後, 少なくとも 10 回以上, 上下に激しく振とうする. フタを緩めた後, 手で正面に持ったまま, 強力な LED ライト (人に向けない!) でボトルの斜め下から照らし, 背景として塩ビ白板 (30×45 cm) を用い, 溶液全体の色が均一に変わる変色を観察する.
- ・赤色になったら直ちに, 中の溶液が, よく回るように片手でペットボトルを振りながら, もう一方の手で滴びんの先をペットボトルの口の中に差し込んだ状態で水酸化ナトリウム溶液を全体が紫になるまで, 加え過ぎないように手早く加える (練習が必要). 水酸化ナトリウム溶液の混合が不均一 (または若干加え過ぎ) な場合, さらにフタを閉めて上下に数回振とうし, フタを緩める. 同じ操作で, 既述と同じ変色を 2-3 回観察可能である.
- ・上記で, 回し振りを緩くし, わざと水酸化ナトリウム溶液の混合が不均一な状態の溶液にすると, 複雑なむらを伴い, 下の方から赤一紫色のグラデーションになる変色が観察できる.
- ・以上のことから, 実験で均一に化学反応させるには, 効果的な攪拌が極めて重要であるということ, まさに実感できる.

## 2.8. 瞬間消滅—魔法の綿(硝酸セルロースの燃焼)<sup>1,5)</sup>

- ・文献<sup>1,5)</sup>の方法で調製した硝酸セルロースは, 反応前後の質量変化から, トリ硝酸エステルではなく, ジ硝酸エステルと予想され, 再調査を予定している.
  - ・大勢に体験してもらおう場合, ほぐした状態のものを, まとめて 1 g を越えて置いておかない. 体験する位置と 1.5 m 以上距離を保ち, 飛び火に注意する.
  - ・よくほぐし, 乾いた手のひらで燃やし, あまり熱くないのは, 子ども 0.05-大人 0.10 g ぐらいである.
  - ・実験後に手洗いをしてもらおう. 硝煙反応が検出されることが予想される (逮捕される?).
  - ・化学マジックの最後の演示として, 既述のロケットを硝酸セルロースで発射する. 以下のような「愛知教育大学鉄砲隊」の演示を, 鉄砲の原理を説明した後, 実践参加者全員で行っている. エタノールやイソオクタンロケットより威力がある.
1. ロケットの缶の穴の部分に硝酸セルロース約 0.03 g を丸めて作った導火線を差し込む.
  2. 缶の中に, ほぐした硝酸セルロース 0.20 g を入れ, 導火線と絡ませて確実に接触するようにした後, ディスポカップを固くかぶせる.
  3. 全員が横に並び, 各自が利き手で, 穴が真下になるようにロケットを水平に前に向けて, しっかりと

持つ.

4. 穴から出ている導火線に, 掛け声とともに, もう一方の手で持った線香の火をつけ, ロケットを衝立などの的を目がけて一斉に水平発射する.
- ・啓林館のサイト<sup>19)</sup>のニトログリセリンの燃焼の化学反応式を参考に, トリ, およびジ硝酸エステルの燃焼を予想すると, 以下の式になる.
 
$$4C_6H_7O_{11}N_3 (fw=297) + 9O_2 \rightarrow 24CO_2 + 14H_2O + 6N_2$$

$$4C_6H_8O_9N_2 (fw=252) + 14O_2 \rightarrow 24CO_2 + 16H_2O + 4N_2$$
 トリエステルは酸素が 34 mL あれば完全燃焼になり, 4 単量体からガス 35 分子分が増加生成し, 0.20 g は標準状態で 132 mL のガスになる. 同様にジエステルは酸素が 62 mL あれば完全燃焼になり, 4 単量体からガス 30 分子分が増加生成し, 0.20 g は標準状態で 133 mL のガスになる. ガスの発生に, ガスの熱膨張が加わり推進力となる. ロケットで既述したように, 後者の効果が大きいと予想される. 缶の内部の体積は 310 mL であり, 酸素は不足しない.
  - ・ロケットに入れる硝酸セルロース 0.20 g は確実に飛ぶ量で, これより少ない場合, カップを固くかぶせたときに発射しないことがあった.

## 3. おわりに

今年度, 忍法木の葉隠れの術 (エチレンジアミンによるニッケル錯体の逐次形成に伴う変色)<sup>20)</sup>の実験演示法の検討を行い, 科学の祭典 2010 名古屋大会で実践した. これを含め, 今後, すべての化学マジックの完成版を実験集としてまとめる予定である.

## 謝 辞

本研究は 2009, 2010 年度科学研究費補助金基盤 C 一般 (課題番号 21500870) により, 財政的にご支援いただきました.

これまでに真摯に化学を学び, サービス・ラーニングによる出前化学実験の実践に参加し, 実験, および演示法の改善に携わった, 多くの学生諸君に心から感謝いたします.

## 参 考 文 献

- 1) 戸谷 義明, 愛知教育大学研究報告, **50** (自然科学編), 2001, pp 47-53.
- 2) 戸谷 義明, 化学と教育, **50**, 2002, pp 532-533.
- 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) 戸谷 義明, 愛知教育大学研究報告, **53** (自然科学編), 2004, pp 79-88.
- 5) 戸谷 義明, “教師のための理科研究① あなたも化学の魔法の達人—簡単にできる化学マジック集—”, 愛知教育大学, 2004.
- 6) 戸谷 義明, 化学と教育, **52**, 2004, pp 188-189.
- 7) 戸谷 義明, 愛知教育大学研究報告, **55** (自然科学編),

- 2006, pp 45-53.
- 8) 戸谷 義明, 愛知教育大学研究報告, **56** (自然科学編), 2007, pp 33-43.
- 9) 戸谷 義明, 伊藤 弘晃, 愛知教育大学研究報告, **57** (自然科学編), 2008, pp 65-72.
- 10) 戸谷 義明, 月刊海洋, 号外 **51**, “発光生物研究の展開と教育への応用—光がつなぐ科学と教育—” 海洋出版, 東京, 2009, pp 128-142.
- 11) 戸谷 義明, 愛知教育大学研究報告, **59** (自然科学編), 2010, pp 33-42.
- 12) 日本化学会 編, “化学便覧 応用化学編 I プロセス編”, 丸善, 東京, 1986, pp 802-808.
- 13) 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, pp 68-69.
- 14) 左巻 建男 編著, “理科おもしろ実験・ものづくり完全マニュアル”, 東京書籍, 東京, 1993, pp 85-87.
- 15) ソニー, “CX-PAL”, **33**, 1997, 7, “CX-EYE”.
- 16) T. NOGUCHI, M. MIYASHITA, Y. INAGAKI, and H. WATANABE, Packag. Technol. Sci., **11**, 1998, pp 19-27.
- 17) T. NOGUCHI, M. MIYASHITA, Y. INAGAKI, and H. WATANABE, Packag. Technol. Sci., **11**, 1998, pp 29-37.
- 18) 農林水産消費安全技術センター, “パンフレット・広報誌”, **61**, 2002, 1, “カンキツ類中の主要な機能性成分”.
- 19) 啓林館の以下の Web サイト.  
[http://www.keirinkan.com/kori/kori\\_chemistry/kori\\_chemistry\\_2\\_kaitei/contents/ch-2/2-bu/2-1-1-1.htm](http://www.keirinkan.com/kori/kori_chemistry/kori_chemistry_2_kaitei/contents/ch-2/2-bu/2-1-1-1.htm)
- 20) 池本 勲 訳, “教師のためのケミカルデモンストラーション2 化学発光・錯体”, 丸善, 東京, 1997, pp 141-149.
- 21) 西口 毅, 化学と教育, **49**, 2001, pp 290-291.
- 22) 西口 毅, 化学と薬学の教室 New ones, **112**, 1990, pp 17-23.

(2010年9月17日受理)