

# 確実に成功する「カルメ焼きづくり」実験法の開発と実践

戸谷 義明

理科教育講座 (化学)

## Development and Practice of a Reliable Experimental Method for “Making Karumeyaki” with High Success Probability

Yoshiaki TOYA

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

### Abstract

Confections are remarkably familiar and attractive not only for the preschool or primary school children, but also for adults. Karumeyaki (foam candy made from heated sugar syrup) is known as one of confections adopted from Portugal during the Azuchi-Momoyama period and since Japanized. In order to be realized the importance and usefulness of the subject “science” by the people, a reliable experimental method for “Making Karumeyaki” with high success probability was developed. A practice by using the method was performed in a cooking room at Nagoya-Nishi Life Learning Center. The procedures and the result of the practice were detailed in this report.

### 1. はじめに

現在、身の回りや身近なことがらと結びついた内容で、理科が役に立つ教科であることを実感でき、理科学習に活用できるような化学(科学)実験教材と指導法を開発し、これを出前化学実験として実践を行い、評価し、改善して確立することを目的として研究を進めている。以前から著者は、食生活に密着した、お菓子などの作成を化学的に行う実験を開発すれば、お菓子が大好きな子どもたちが化学実験を正しく行うための基本操作(計量、温度の測定と調節、攪拌など)を、目を輝かせながら楽しく学び、実験の成果が完成したときの感動が大きく、かつ、おいしく食べられるので、教育効果のある化学実験になると考えていた。2007年に「出前化学実験のためのお菓子作成実験法の開発と実践」として、グミキャンデー、ラムネ菓子、および甘いアルギン酸ビーズを調製する実験を開発し、実践を開始した<sup>1)</sup>。これまでに多くの実験講座において実践してきており<sup>2)</sup>、極めて好評である。そこで今回、食品関係の新たな実験テーマとして、「カルメ焼きづくり」(以下、カルメ焼き実験)に注目した。

カルメ焼きは、安土桃山時代に外国から輸入された南蛮菓子(現在では和菓子的一种として分類)の1つで、もとは氷砂糖に卵白を加え、熱して泡立てたもの

を固まらせて作った。語源はポルトガル語の「甘いもの」(caramelo)により、カルメラ、軽目焼、浮石糖、泡糖とも記述される。ザラメまたは三温糖に少量の水を加え加熱して溶かし、これに重曹と卵の白身(卵白)とを混ぜたもの(重曹卵)を加えて泡立たせ、そのまま冷やして固まらせて作った軽石状の菓子である。お祭や縁日の露店などで、稀に見かけることがある<sup>3)</sup>。

カルメ焼き実験には多くの化学的な原理が関わっている。ショ糖の溶解、および溶液の状態変化があり、重曹(炭酸水素ナトリウム)の熱分解で発生する二酸化炭素によりカルメ焼きが膨らむ。重曹が膨らし粉になる原理である。カルメ焼き実験は、中学校の教科書にも掲載されており、理科が役に立つことが実感できる教材実験である。ところが、行ってみたが、うまく膨らまず、上手に作れなかったという声もよく聞く。そこで、化学実験教室の指導実験(多人数が同時に楽しめる)を前提に、簡単で、かつ確実によく膨らむカルメ焼き実験を開発するのを目的に、実験法と条件の検討、および理論的な考察を行った。

### 2. 実験法の計画と検討

カルメ焼き実験としては、銅製の専用、または一般のお玉杓子(お玉)を使用する方法と、高梨先生がオ



写真1 アルコール温度計から作成したかきまぜ棒。両端をシリコンチューブで保護（温度計の100℃要確認）

リジナルの紙カップを使用する方法が、よく知られている<sup>4, 5)</sup>。最初に、一般のお玉を使用する方法で検討を開始したが、良好な結果が得られる率が低く、また、できあがったカルメ焼きを、お玉から取り出すのが難しかった。鍋に糖液を調製し、これを紙カップに注ぎ膨らませる方法は多人数が同時に行うことが可能で、カップを切ったり破いたりすることで、できあがったカルメ焼きを簡単に取り出すことができる。そこで、紙カップを使う方法で条件検討を開始した。

## 2.1 糖液の調製, および糖液の温度を正確に測定できる, かきまぜ棒の作成

最初, 72% (w/w) の糖液を調製し, この溶液から濃い糖液を雪平鍋 (18 cm) で調製した。後日, 72% (w/w) になる砂糖と水を雪平鍋に入れ, 直接, 濃い糖液を調製するように変更した。砂糖としては, 初期の検討では, 純度が高く, 調製したカルメ焼きの色が白くて観察に適したグラニュー糖を使用した。後日, グラニュー糖より水に早く溶けて安価な上白糖の使用に変更した。後述するように, 上白糖の方が, 調製したカルメ焼きが香ばしい香りとともに褐色に着色し, 食感が, ふわふわしていた。濃い糖液を調製する過程で, 糖液の温度コントロールが最も重要であると考え, 糖液をかき混ぜるものとして200℃棒状アルコール温度計の球部に耐熱性があるシリコンチューブ (内径5 mm, 外径8 mm, 長さ5 cm, 球部先端から5 mm出す) を, 反対のリング部分にもシリコンチューブ (内径4 mm, 外径6 mm, 長さ2 cm) を保護用として被せたものを作成した (写真1)。これにより, かき混ぜながら, 糖液の正確な温度の確認が可能になった。

## 2.2 糖液の使用量, 重曹卵の組成と添加量の検討

標準の重曹卵は, 卵白2.00 g, 重曹6.00 g, 上白糖1.00 gの比率で調製<sup>6)</sup>し, お玉での調製のような後入れ法でなく, 重曹卵を入れた紙カップ (205 mL) に糖液を注ぎ, 直ちに割箸で約5秒間 (後日, 約10秒間に改良) よくかき混ぜる先入れ法で実験を行った。どちらの方法でも同様の結果が得られた。1回分の糖液の量をお玉での調製の使用量20 mLの倍の40 mLとし, 紙カップの横に黒の油性ペンで引いた線を目安に注ぐことにした。

重曹卵の量は, 以下の計算により2.00 gとした。多

く使用すると, カルメ焼きの味が苦くなった。重曹卵2.00 gに含まれる重曹 (炭酸水素ナトリウム  $\text{NaHCO}_3$ ) の量は1.33 gであり, 以下の反応で熱分解する。



熱分解時の温度を110℃ (383 K),  $\text{NaHCO}_3$  のモル質量を84 g/molとし, 気体の状態方程式 [ $V=(m/M)RT/p$ ] を用いて重曹1.33 gが完全に熱分解したときに発生する二酸化炭素の体積を計算すると, 以下のように, 約250 mLになる。

$$1.33 \text{ (g)} \div 84 \text{ (g/mol)} \div 2 \times 0.0821 \text{ (atm} \cdot \text{L/mol} \cdot \text{K)} \times 383 \text{ (K)} \div 1 \text{ (atm)} \approx 250 \text{ mL}$$

糖液40 mLを使用した場合, 最大で約6倍に膨らみ, 抜ける分も考慮すると, 紙カップ (205 mL) が適当であると予想された。通常, 雪平鍋で72% (w/w) 糖液160 g (またはシヨ糖115 g + 蒸留水45 mL) から, 1度にカルメ焼き2個分の糖液 [90% (w/w) になった時, 約90 mLになると予想] を調製し, カルメ焼き2個を連続して調製した。後日, 実験教室用に, カルメ焼き4個分 [シヨ糖280 g (115 g  $\times$  2  $\times$  1.2倍) + 水道水110 mL (45 mL  $\times$  2  $\times$  約1.2倍)] にスケールアップした。

## 2.3 糖液調製の最適温度の決定と濃度の調査

5℃毎に115-135℃の糖液をつくり, 直ちに紙カップに注いでカルメ焼きを調製した。以下のように, 120℃で, 最も良好に膨らんだ (写真2)。

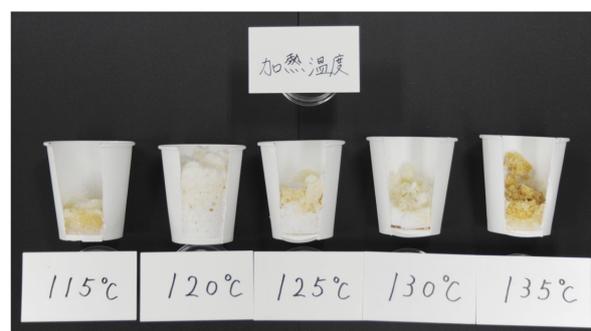


写真2 糖液の最適温度の決定

沸点上昇により, 120℃で沸騰する糖液を調製した場合, シヨ糖濃度が約90% (w/w) になる<sup>7)</sup>。この状態の糖液を調製すれば, 再現性よく, 約90%の糖液が調製できるはずであり, 実際, 120℃で調製した糖液の濃度は, 測定で約93%と判明した。

この条件は、後日、修正が必要になった。130℃(上白糖, グラニュー糖), または125℃(ザラメ)で沸騰する糖液を調製した後、120℃になるまで、ゆっくりかき混ぜながら冷却してから容器に注ぐことで良好な結果が得られた。2.2において、4個分の糖液調製に使用する上白糖と水の量を1.2倍にしたのは、粘度上昇により雪平鍋から取り出せる糖液の量が減少した分を補うためである。この状態の糖液は、わずかに結晶が析出し始める、またはカップに注いでいく間に、鍋に結晶が析出する状態であった。この結晶の析出こそが良好な結果が得られる鍵であることが判明した。

120℃で調製した糖液で、良好な結果が得られなかったのは、上白糖のメーカーを以前の検討時と変更〔バラ印(大日本明治製糖)をクルルマーク(伊藤忠製糖)に〕したことが原因かとも思われた。そこでグラニュー糖(伊藤忠製糖)で追試したところ、上記の修正条件で良好な結果が得られ、120℃の糖液では、水分が多いと思われ、結晶化が起こらず、よく膨らまなかった。現時点では、この原因は不明である。

## 2.4 重曹卵中の卵白の役割の調査

重曹のみ、卵白を抜いて調製した重曹卵(重曹+上白糖)、および水を加えた重曹(重曹+水)、または卵白の代わりに水を加えた重曹卵(重曹+上白糖+水)でカルメ焼きを調製し、比較した(写真3, 4)。



写真3 重曹, および卵白を除いた重曹



写真4 写真3と同じ。ただし卵白相当の水を添加重曹

いずれも、ほとんど膨らまず、発生した二酸化炭素が、ぶくぶくと抜けていくのを確認した。従って重曹卵の卵白は、良好に膨らむカルメ焼きを作るためには

必要不可欠で、糖液の粘度を高めるなどして発生した二酸化炭素を保持する役割があると思われた。

## 2.5 重曹卵中の上白糖の役割の調査

上白糖を抜いた重曹卵(卵白+重曹)を使用したところ、重曹卵の半分程膨らんだ(写真5)。



写真5 上白糖を抜いた重曹卵と重曹卵

上白糖を抜いた重曹卵に超音波処理を行ったもの(卵白+重曹+超音波処理)を使用したところ、ほとんど膨らまなかった(写真6左)。超音波処理した卵白、または(卵白+重曹)から作成した重曹卵では重曹卵と同等の結果が得られ、超音波処理による卵白への影響はないことが確認できた(写真6右, 写真7)。



写真6 超音波処理した(卵白+重曹)(卵白+重曹+超音波処理)と超音波処理した卵白から作成した重曹卵(卵白+超音波処理+重曹+上白糖)



写真7 超音波処理した(卵白+重曹)から作成した重曹卵(卵白+重曹+超音波処理+上白糖)と超音波処理した卵白から作成した重曹卵(卵白+超音波処理+重曹+上白糖)

以上のことから、良好に膨らむためには、上白糖を重曹卵に加える必要があり、重曹は、それ自身、ある程度、膨らむ際の核としての役割<sup>8)</sup>を果たすと思われる、超音波処理により、その機能を失うと考えられた。そこで、上白糖の結晶核としての役割を調べるために以下の実験を行った。

卵白2.00 gに上白糖1.00 gを加え、超音波処理を行い、上白糖を完全に溶解させてから重曹を加えて調製した重曹卵（卵白+上白糖1.00 g+超音波処理+重曹）2.00 gを使用してカルメ焼きを調製したところ、ほとんど膨らまなかった（写真8右）。そこで、卵白に溶け残る量の上白糖を添加した重曹卵を作成した。卵白2.00 gに含まれる水を1.8 gとすると、この水に常温でショ糖は約2倍の質量3.6 g溶解する。超音波処理しても1.00 g溶け残るように上白糖4.60 gを加えることにした。上白糖4.60 gを添加し、超音波処理を行ってから重曹を加えて調製した重曹卵（卵白+上白糖4.60 g+超音波処理+重曹）2.80 g（重曹の量が同じになるように、 $2.00 \text{ g} \times 12.60 \text{ g} / 9.00 \text{ g}$ で計算）を使用したところ、良好に膨らんだ（写真8左）。

以上のことから、良好に膨らむためには、溶けていない上白糖が存在する必要がある、膨らむ際の結晶核としての役割があると思われる、作り置きした重曹卵を使うと、良好に膨らまない（冷蔵保存なら2日で使用不可、冷凍保存では問題なし）理由は、上白糖が完全に溶解してしまい、結晶核となる、溶けていない上白糖がなくなるからであると考えられた。



写真8 上白糖の結晶核としての役割を調べる実験

後日、実験教室では、上白糖の代わりにグラニュー糖4.60 gを用い、これに重曹6.00 g、卵白2.00 gの比率で混合した重曹卵を使用した。

## 2.6 カルメ焼きの糖液調製に使用する砂糖の調査

砂糖として、グラニュー糖、ザラメ（よく使用されている）、上白糖を使用して糖液を調製し、それぞれからカルメ焼きを調製して比較した。

色や臭いについては、グラニュー糖は白っぽく、ザラメは褐色（元々の色も褐色）、上白糖は最も褐色に着色した、香ばしい臭いのカルメ焼きが得られた。これは、上白糖には、グラニュー糖、ザラメに比べ、転化

糖が多く含まれており、転化糖は、（特に酸性やアルカリ性下で）加熱すると、還元基の存在によりキャラメル化が起りやすく、褐色に変化する性質があるので、最も褐色になったと予想された。最も香ばしく、独特のよい香りがしたのはザラメであった。

カルメ焼きを食べたときの食感については、上白糖で作ったものは柔らかく、ふわとした食感で、ザラメ、またはグラニュー糖で作ったものは、若干固くてザラザラしているように思われた。これは、上白糖は、ショ糖としての純度が低く、冷却時に結晶化しにくく、グラニュー糖、ザラメはショ糖としての純度が高く、冷却時に結晶化しやすいからと予想された。

実験教室には、水に早く溶け、褐色で香ばしい香り、ふわとした食感のカルメ焼きができる安価な上白糖を使用した。

## 2.7 カルメ焼きを調製する容器の検討

ステンレス製のお玉やカップなどの容器で、カルメ焼きを調製したところ、容器からカルメ焼きを加熱して取り出すのは、かなり難しいことを再確認した。紙カップで調製した場合、カップを切ったり破いたりすることで、できあがったカルメ焼きを簡単に取り出すことができる。しかし、カルメ焼きを完全に壊れない状態で取り出すことはできなかった。

以前、グミキャンデー調製の実験を改良した際に、シリコン製の容器を使用することで、グミキャンデーを簡単に容器から取り出せるようになった<sup>9)</sup>。そこで、シリコン製の容器でカルメ焼きを調製した。その結果、100円均一ショップセリアで調達したおかずカップ9号（容積80 mL、糖液20 mL使用）、およびシリコンスチーマー（容積240 mL、糖液40 mL使用）で良好に調製でき、簡単に崩れない状態で取り出せることが確認できた（写真9）。



写真9 シリコンスチーマーで調製したカルメ焼き

## 2.8 卵白の代わりにゼラチンを使用した検討

卵アレルギーは、食品アレルギーの中で一番割合が高く、卵アレルギーの子どもも多い。重曹卵の卵白の代わりにゼラチンを使用できれば、卵アレルギーの子どもも実験可能になる。ゼラチンを使用したカルメ焼

きについてはインターネットのWebsite<sup>8)</sup>に言及があるが、詳細な条件は記載されていなかったため検討を行った。その結果、卵白の代わりに、ゼラチンパウダーと、その9倍の質量の水を加えたもの〔10% (w/w) 相当〕を卵白と同質量加えた重曹卵相当物を使用することで、良好に膨らんだ(写真10)。ゼラチンパウダーのみを使用した場合(写真10中)より、ゼラチンパウダーに水を加えた方(写真10右)が、色が白く、食感が柔らかい感じであったが、後述する乾燥卵白の結果から、水の添加の結果は再実験する必要があった。

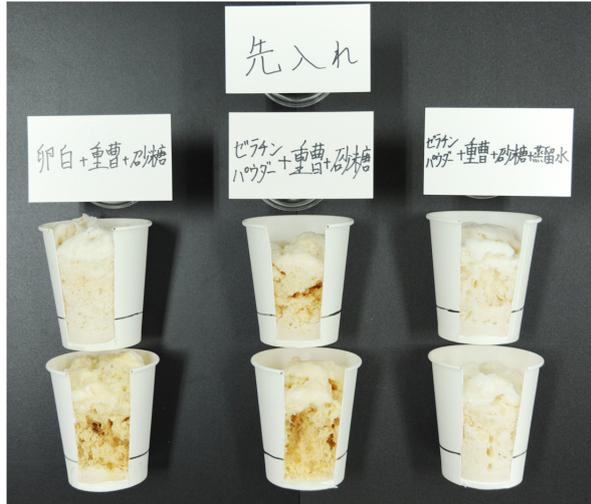


写真10 重曹卵とゼラチンを使用した重曹卵相当物

## 2.9 容器内で重曹卵を調製する方法の検討

調製した重曹卵は、べたべたの状態では、2.80 gを、スパテルなどを用いて正確に分取、秤量するのは大変な操作である。しかも実験教室で使用するのはキッチン秤であり、最小秤量は1 gである。そこで、重曹6.00 gとグラニュー糖4.60 gを混合した粉末10.60 gを調製し、そこから2.36 g (2.80 g × 10.60 g / 12.60 g) を、カルメ焼きを調製する容器に秤量し、これに卵白を3 mLポリエチレンスポイトで8滴(約0.45 g)滴下して加え、割箸で混ぜることにより、容器内で重曹卵を調製することを検討した。粉末2.36 gの秤量は、1 mL計量スプーンで、すり切り2杯量ることにより、アルミニウム製計量スプーンで2.40 ± 0.05 g、ポリプロピレン製計量スプーンで2.54 ± 0.02 gであったので、この方法で秤量することにした。また、卵白をスポイトで滴下する際に、箸で混ぜた程度では不均一であり、滴下しにくいことが分かった。そこで、卵白を50 mLポリプロピレン製広口びんに入れ、100回以上振とうし、泡の下の液の部分をスポイトで吸い上げて使用した。この状態の卵白は8滴で0.45 ± 0.02 gであった。

この状態の卵白と、箸で混ぜた状態の卵白で、それぞれ重曹卵を調製し、同様のカルメ焼きが調製できることを、別に確認した。この実験の際に、糖液の調製

にはクルルマークの上白糖280 g (4個分)を使用し、最初は重曹卵の調製にも同じ上白糖を用いたが、良好に膨らまなかった。この原因として、以前の上白糖との純度の違い、または結晶核が不足していることが考えられた。そこで、重曹卵の上白糖をグラニュー糖に変更した。さらに、マドラー1杯のグラニュー糖、約0.05 gを、重曹卵で湿らないように加えておくと、再現性よく、良好に膨らむようになった。

①から④の容器内で重曹卵を調製し、糖液の調製のために約15分経過してから糖液を加えていった。①の容器に糖液約40 mLを容器に注ぎ、加えたら、直ちに割箸で約10秒間(約5秒間から改良)、重曹卵が糖液に均一に混ざるまで混ぜ、箸を液から抜いた。その後、②から④の順に同じ操作を繰り返した。①から④までの操作に約1分を要し、注ぐ際の鍋の糖液の温度を表示した。その結果、別に重曹卵を調製し、分取、秤量した場合と同様に、良好に膨らんだ(写真11)。



写真11 カルメ焼きを調製する容器内で重曹卵を調製

## 2.10 乾燥卵白を使用した検討

生の卵白の代わりに、粉末である乾燥卵白(質量は生の卵白の8分の1)が使用できれば、卵から卵白を分離し、振とうし、スポイトで滴下する実験操作が不要で、重曹卵粉末(重曹+グラニュー糖+乾燥卵白)の計量だけで済むと考えた。重曹6.00 g、グラニュー糖4.60 g、乾燥卵白0.20 g(卵白1.6 g相当)、または0.40 g(卵白3.2 g相当)を混合し、重曹卵粉末10.80 g、または11.00 gを調製した。この粉末各2.40 g (2.80 g × 10.80 g / 12.60 g)、または各2.44 g (2.80 g × 11.00 g / 12.60 g)を、カルメ焼きを調製する容器に秤量し、さらに、マドラー各1杯(約0.05 g)のグラニュー糖を加えた。2.9と同様に糖液を調製し、乾燥卵白0.40 gで得られたカルメ焼きの写真を以下に示す(写真12)。

乾燥卵白0.20 g、または0.40 g、どちらの場合でも、あまり膨らまず、乾燥卵白を加えない粉末(重曹+グラニュー糖)を使用した場合と、同様の結果となった。

そこで、それぞれの粉末に水各0.45 gを加えて割箸



写真12 乾燥卵白を使用した重曹卵粉末

で混ぜてから、既述と同様にカルメ焼きを調製した。

その結果、乾燥卵白0.20 g、または0.40 g、どちらの場合でも、通常の重曹卵を使用した場合と同様に、良好に膨らんだ(写真13)。



写真13 乾燥卵白を使用した重曹卵粉末に水を添加

以上のことから、乾燥卵白は水を加えないと、卵白の役割を果たさないことが明らかになった。これは2.6で既述のゼラチンの結果とは異なっており、最近、再実験したところ、ゼラチンでも水の添加が必要ながことが分かった。

乾燥卵白を使うと、卵から卵白を分離し、振とうする操作は行わないで済むが、スポイトを使って水を滴下する実験操作は必要ながことが分かった。

なお、乾燥卵白、ゼラチンは、ともに0.20 g、0.40 g、0.60 gと、添加量を変えて実験を行った。添加量を多くしても膨らみ方に顕著な差がなく、褐色が濃くなるとともに、ゼラチンではゼラチン臭が、乾燥卵白では、たまごボーロのような卵臭が強くなった。好みにもよるが、既述の添加量0.20 gが無難であろう。

## 2.11 カルメ焼きが膨らむ原理を理解してもらうための演示実験の開発

カルメ焼き実験を行うだけでは、単なる楽しいお菓

子作りになってしまい、その膨らむ原理(加熱により重曹が分解し、二酸化炭素が発生する)を理解し、理科が役に立っていることを実感しにくい。そこで、重曹の熱分解により、二酸化炭素が発生することを確認する演示実験を実験教室の最初に行うことにした。

重曹の熱分解実験は通常、固体の重曹を試験管の下の方に入れ、発生する水のことを考慮し、試験管の口を斜め下になるようにして重曹の部分加熱する。今回、カルメ焼き1個分の重曹1.33 gを60% (w/w) 上白糖水[カルメ焼き調製時の糖液の濃度90% (w/w) 以上に比べると、かなり薄い]5 mLに加え、半分以上の重曹が不溶の状態の混合物を加熱する(写真14右)方法を考案した。比較実験としては、重曹を加えない60%

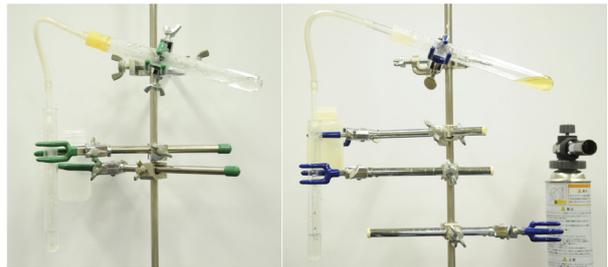


写真14 重曹の熱分解実験

(w/w) 上白糖水5 mLを加熱した(写真14左)。実験装置と使用した器材は以下の通りである(写真14)。

スタンド(クランプ4本、および3本付)2本、試験管(18 mm × 180 mm)5本、重曹1.33 g、60% (w/w) 砂糖水5 mL × 2、石灰水5-10 mL × 3、シリコンゴムキャップ付5 mL PE製駒込ピペット(石灰水用、砂糖水用)各1本、ストロー(直径5 mm、長さ約20 cm)1本、沸とう石3個 × 2、ハンドバーナー1個、100 mLポリプロピレン製広口びん(容器のみ、導入管置き場)2個、実験用配管(穴あきシリコン栓No. 3、外径6 mm、長さ3-5 cmガラス管、外径6 mm、内径4 mmシリコンチューブ、2 mLガラス駒込ピペット導入管(シリコンチューブ、またはテフロン収縮チューブで先端保護)2組。

写真14右の右を向いているクランプには石灰水とストローが入った試験管を立てた。石灰水が二酸化炭素の検出に使用でき、呼気中の二酸化炭素により白く濁ることを見せて確認してから、熱分解実験を行った。

突沸を防ぐため、加熱する試験管は、口が斜め上になるように固定した。また、逆流を防ぐために、どちらも加熱を終了する前に、導入管を石灰水から抜き、広口びんの中に入れた。

重曹を加えない上白糖水を加熱した場合、水蒸気が発生するのみで、石灰水は無色透明のまま、白く濁らなかった。試験管内の溶液の色は無色透明のままであった。一方、重曹を加えた上白糖水を加熱した場合、水蒸気とともに二酸化炭素が発生し、石灰水は白

く濁った。試験管内の混合物の、液の部分は淡褐色に着色した。なお、写真14の石灰水は5 mLであるが、演示実験では、見やすいように10 mL使用した。

なお、突沸を防ぐため、加熱する試験管は、口が斜め上になるように固定した。また、逆流を防ぐために、どちらも加熱を終了する前に、導入管を石灰水から抜き、広口びんの中に入れた。

この実験により、上白糖水が重曹と加熱されると、褐色に着色することが分かり、カルメ焼きの着色の原因であることも予想できた。併用したPowerPointプレゼンテーションの、重曹の熱分解を示すスライドを以下に示す(図1)。

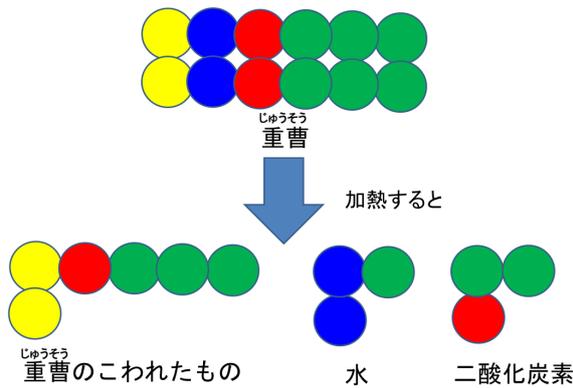


図1 重曹の熱分解を示すスライド

以上のような検討の結果、次に示すような化学実験教室用のカルメ焼き実験の方法を開発した。

### 3. 実験方法

実験教室は料理室で行い、調理台5台で、各調理台に4人1組で配置するようにした。個別指導体験型の実験であるので、糖液の調製は1組で行うが、糖液を2回調製し、1回で各個人が、シリコンスチーマーと紙カップで1個ずつ、2回で2個のカルメ焼きづくりができるように計画した。卵白を使用し、卵白は鶏卵から分離、振とうして調製することにした。指導者(教員または大学生)を各調理台に配置した。

#### 3.1 使用器材

以下に1人当りに必要な器材と数(表示のないものは1)を示す。

205 mL紙カップ、240 mLシリコンスチーマー(だ円)、割箸1膳(割って1本ずつ使用)、ジップ付ポリ袋(カルメ焼き持ち帰り用)2枚、ポリスチレン製マドラー(カルメ焼きはがし用)、軍手1組。

以下に4人1組当りに必要な器材と数(表示のないものは1)を示す。

かき混ぜ棒(シリコンチューブ付200°Cアルコール

温度計)、アルミニウム製雪平鍋(21 cm)、シリコン製鍋置き(直径約15 cm)、キッチン用秤(1-2000 g)、上白糖&スプーン入1 Lガラス製丸型保存びん、ステンレス製計量カップ(200 mL)、3 mLポリエチレン製スポイト、ステンレス製黄身分け器、陶磁器製コーヒーカップ(卵白受け用、黄身入れ用、各1個)2個、箸(卵白に入った殻をとりのぞく)1膳、B4紙13枚、油性なまえペン2本(2人で1本)、ステンレス製定規(15 cmまたは20 cm)2本(2人で1本)、ポリスチレン製マドラー[すり切り用(印なし)、グラニュー糖用(油性ペンで先から2 cmのところに黒い印をつけたもの)、各1本]2本、50 mLポリプロピレン製広口びん(卵白振とう用)、グラニュー糖入50 mLポリプロピレン製広口びん、1 mLアルミニウム製、またはポリプロピレン製計量スプーン、重曹24.00 gとグラニュー糖18.40 gの混合粉末(検討時の4倍、使用量は2倍でよいが、計量しやすさを考慮)入200 mLまたは160 mLポリプロピレン製容器、鶏卵(Sサイズ、白身が約30 g、1個で全員分あるが、1組での操作を考慮)、ぬれ雑巾、ティッシュペーパーパック、三角コーナー(卵の殻入れ)。

以上の他、給湯器でお湯の供給を可能にし、可燃物のゴミ箱を用意する。

#### 3.2 カルメ焼きづくりの実験操作

1) 鶏卵の卵白(白身)と黄身とを分ける。

- ・B4紙を敷いた上にコーヒーカップを置く。コーヒーカップの上に黄身分け器を乗せる。
- ・鶏卵を、その上で割り、黄身を真ん中のくぼみに落とす。真ん中に落とさないと、上手に分けられない。
- ・黄身分け器を、ゆっくり持ち上げて残った白身をコーヒーカップの中に完全に落とす。黄身分け器を傾けると、黄身も落ちてしまう。
- ・卵の殻は三角コーナーに捨てる。もし、卵の殻が白身に入ったら、箸で拾って取り除く。殻座は取り除く必要はない。
- ・黄身分け器に残った黄身は、もう1個のコーヒーカップに入れて回収する。実際は実験後、廃棄した。

2) 白身を広口びんに移し、よく振とうする。

- ・敷いた紙の上で、分けた白身をコーヒーカップから50 mL広口びんに移す。
- ・白身を移したら、しっかりと広口びんのふたを閉め、100回以上、激しく振とうする。ゼリーのように固まっている白身がバラバラになり、泡と、さらさらの液になる。

3) 紙カップの下から2.1 cmのところに40 mLの目印の線を引く。シリコンスチーマーには、最初から40 mLの目印の線(下から9 mm)を引いておく。

- ・定規で紙コップの下から2.1 cmを測り、そこになまえペンを使って線を引いて40 mLの目印をつける。後で、この目印まで糖液を注ぐ。

- ・ペンと定規は2人に1つずつある。
- 4) カルメ焼きを調製する容器に、重曹とグラニュー糖を混ぜた粉末を量って入れる。
- ・重曹とグラニュー糖を混ぜた粉末が入っている容器の中から、各自の紙カップとシリコンスチーマーに、それぞれ、1 mL計量スプーンとマドラー（印のない方）を使い、粉末を、すり切りで各2杯（約2.4 g）ずつ加える。すり切る操作は、粉末がこぼれないように、粉末が入っている容器の上で行う。
- ・最初にシリコンスチーマーでカルメ焼きを調製する。その後で、紙カップで調製するので、紙カップは横の方に置いておく。
- 5) 粉末に卵白を加え、かき混ぜる。
- ・スポイトを使い、卵白8滴をシリコンスチーマーの中の粉末末に加える。卵白は、泡のない底の部分を吸い取って使用する。連続して液を滴下できるようなスポイトの使い方を指導する必要がある。
- ・割箸1本で、粉末と卵白を練るようにして混ぜる。混ぜたもの（重曹卵）を、スチーマーの底の真ん中あたりに集め、グラニュー糖を入れたときに混ざらないようにしておく。混ぜた後の割箸はスチーマーに入れたままにしておく。
- 6) 結晶核として少量のグラニュー糖を入れる。
- ・黒い印の付いたマドラーを使い、グラニュー糖1杯（約0.05 g、マドラーの約2 cmの線のところまで乗せる）をシリコンスチーマーに入れる。グラニュー糖の入った広口びんを斜めにしたとき、グラニュー糖がマドラーに乗りやすくなる。
- ・なるべく重曹卵にかからないようにする。湿っていない粒が、よい結晶核となり、良好に膨らむと予想される。
- ・調理台の上にB4紙4枚を敷き、糖液を鍋から連続して注ぎやすいように、スチーマー4個を一列に並べる。
- 7) 秤の上に鍋を乗せ、その中に上白糖280 gを量る。
- ・上白糖が入ったガラスびんが鍋の上になるようにし、びんに入っているスプーンで、上白糖を掻き出すようにすると、上白糖をこぼさないで済む。
- ・鍋を秤から下ろす。
- 8) 上白糖に水を加えてかき混ぜる。
- ・計量カップで水道水110 mLを量り（秤で110 gを量ってもよい）、鍋の中に入れ、かき混ぜ棒で、かき混ぜる。上白糖が全部濡れるようにしてから、ガスコンロで鍋を加熱する。
- ・この実験で使う、かき混ぜ棒は、割れないようにしてあり、普通の温度計を、かき混ぜ棒として使ってはいけないことを強調する。
- ・やけどするのを防ぐため、次の作業からは軍手をはめるように指示する。
- 9) かき混ぜ棒で、よくかき混ぜながら糖液を沸とうさせ、水を蒸発させる。
- ・よくかき混ぜながら、110℃になるまで強火で加熱し、そこからは糖液の温度が130℃になるまで弱火で加熱を続ける。かき混ぜながら、しっかり温度もチェックする。
- 10) 糖液をゆっくり、かき混ぜながら冷ます。
- ・糖液の温度が130℃になったら、鍋をコンロから下ろし、鍋置きの上に置く。
- ・その後、糖液を大きく、ゆっくりと、かき混ぜ、120℃になるまで冷ます。だいたい2分くらいかかる。激しくかき混ぜると、結晶が析出し、白く固まってしまう。
- ・冷まし始めてから1分たったら、混ぜるのを指導者に交代してもらい、軍手をはめていることを再確認し、割箸を手に持ち、スチーマーに入った液を、かき混ぜる準備をする。
- 11) シリコンスチーマーの目印の線まで、糖液を連続して注ぐ。
- ・指導者が、それぞれのシリコンスチーマーの目印の線のところまで、糖液を4つ順番に注いでいく。
- ・各自の容器に糖液を入れてもらったら、直ちに、スチーマーを動かさないように押さえながら、糖液の透明なところがなくなるまで、約10秒間、割箸で、しっかりかき混ぜた後割箸を液から抜く。途中で液が固まり始めたら、かき混ぜるのをすぐにやめ、割箸を液から抜く。抜いた箸は紙の上に置く。混ぜた後は熱くなるので、絶対にスチーマーにさわらないようにする。膨らんでくる様子を観察する。
- 12) 鍋を洗う。
- ・お湯を出し、鍋に入れる。コンロに火をつけてお湯をわかす。
- ・お湯がわいたら、かき混ぜ棒を使って混ぜ、砂糖を溶かしてきれいに落とす。お湯であらうだけでも、かなり砂糖が落ちる。これを2回くり返す。
- 以後、5) から12) の操作を、紙カップを使ってくり返す。
- 13) シリコンスチーマーからカルメ焼きをはがして取り出す。
- ・表を向けたまま、シリコンスチーマーを、上の方から少し引っ張る。スチーマーの横の壁とカルメ焼きのすき間にマドラーを差し込み、スチーマーからカルメ焼きが、はがれるようにする。
- ・横の壁からはがれたら、シリコンスチーマーを逆さまにし、スチーマーの底を外側から内側に、そっと指で押さえいき、崩れないように丁寧にカルメ焼きを底からはがす。
- ・最後に、散らばらないように、ゆっくりとルメ焼きを紙の上に押し出す。
- 14) 作ったカルメ焼きを試食する。
- ・紙コップで作った方は、まだ熱いので、シリコンス

- ・チーマーで作った方のカルメ焼きを試食する。
  - ・各自が作ったカルメ焼きは、ポリ袋に入れ、おみやげとして持って帰る。紙コップで作った方は、まだ熱いので、最後に冷めてから、もう1つのポリ袋に入れる。
  - ・食べきれなかったカルメ焼きは、コーヒーを甘くするなど、砂糖の代わりに使用できる。
- 15) 後かたづけをする。
- ・後かたづけは化学実験の一部で、とても大切な作業である。
  - ・割箸は、そのまま可燃物として捨てる。調理台に敷いた紙も、粉が落ちないように可燃物として捨てる。
  - ・重曹とグラニュー糖の混合粉末が入っている容器、グラニュー糖、上白糖が入っている容器、および、容器に入っているスプーンは、そのまま洗わないで、回収用の調理台に集める。
  - ・他の使用した器具類、鍋、コーヒーカップを洗う。洗剤は白身を入れた容器や器具にだけ使用する。あとのものは温かいお湯で洗う。洗浄後の器具類は、回収用の調理台に集める。
- 17) まとめを行う。
- ・重曹を加熱すると、分解して二酸化炭素が発生する。これを利用して膨らませてカルメ焼きを調製する。
  - ・砂糖に水を少し加えて加熱すると、砂糖の濃い水溶液（糖液）ができる。
  - ・二酸化炭素で膨らむときに、砂糖の中で砂糖が結晶になりながら固まり、カルメ焼きの形になる。
  - ・カルメ焼きの香ばしい香りとは、砂糖が重曹と加熱されたときにできる。

## 4. 実践記録

### 4.1 実践データ

実践の詳細は以下の通りである。

- 1) 事業：「〈トライアルサタデー〉 見てみよう！ やってみよう！ ～科学で考える身の周りの不思議～ お菓子作り大作戦！ ～お菓子作りを科学する～ カルメ焼き作り」
- 2) 主催：名古屋市西生涯学習センター
- 3) 後援：日本化学会、日本理科教育学会
- 4) 対象：小学校5、6年生児童18名〔男11名（小5男5名、小6男6名）、女7名（小5女5名、小6女2名）〕、28名の申込者から抽選で当たった20名、欠席2名。
- 5) 日時：2013年9月7日（土）10：00-12：10
- 6) 場所：名古屋市西生涯学習センター料理室
- 7) 講師：戸谷 義明（愛知教育大学教授）
- 8) 外部講師：鈴木 喜隆（元広島大学教授）、跡部 昌彦（ポッカサッポロフード&ビバレッジ味の科学研究所所長）、山名 賢治（愛知学院大学准教授）

9) 実践参加学生：酒井 晃平（B4）〔大学授業「化学教材実験」（集中）受講者〕

事前指導&実験準備（於化学系理科実験実習室R201）：  
2013年7月24日（水）-2013年9月5日（木）

予行演習：2013年9月5日（木）13：20-16：20、外部講師2名参加。

事後指導：2013年9月12日（木）10：00-11：30、外部講師2名高評あり。

実践参加学生が主指導担当者となり、PowerPointプレゼンテーションを併用して説明・指導を行い、講師が必要な指示を補足した。重曹の熱分解の演示実験の後、カルメ焼きづくりを行った。講師、外部講師、参加学生が、各調理台の4名1組の指導者として実験指導を行った。1回目のスチーマーでの調製では、1組で糖液の水が蒸発しすぎて、カルメ焼きにならず、金平糖のようになってしまったが、2回目の紙カップでの調製は全員が良好な結果が得られた。実際、スチーマーでの調製は、割箸で重曹卵と糖液とを、しっかりかき混ぜるのが、紙カップに比べて難しく、必ず良好な結果が得られる紙カップと2回行うようにしたのは、この点も考慮した。

実験の最後に参加者にアンケートを依頼した。

### 4.2 アンケート結果と分析

全18名（回収率100%）の結果と分析を以下に示す。

- 1) 今回の実験教室に参加した主な理由は何ですか？
  1. 実験教室の内容に興味があったから（9.5）
  2. 化学（科学）実験が好きだから（7）
  3. 会場が近いから（0.5）
  4. 実験教室の内容を自宅・クラブ・行事などでやってみたいから（0）
  5. その他（1、母の勧め）
- 約半数（9.5/18）の子どもが「化学（科学）実験が好きだから」と回答し、約4割（7/18）の子どもが「実験教室の内容に興味があったから」と回答した。受講者は実験の内容に惹かれた、または化学（科学）実験好きの子どもであった。
- 2) 以前にも、このような実験教室に参加したことがありますか？
  1. よく参加している（0）
  2. 参加したことがある（5）
  3. 今日がはじめて（12）
  4. 未回答（1）
- 「参加したことがある」と回答した子どもが約3割（5/18）、「今日がはじめて」と回答した子どもが約7割（12/18）であり、はじめての子どもが多かった。
- 3) 今日の実験教室の、実験操作の操作は簡単でしたか、難しかったですか？
  1. とても簡単だった（3）
  2. まあまあ簡単だった（7）
  3. ふつう（6）

4. 少し難しかった (2)  
5. とても難しかった (0)

約9割 (16/18) が「ふつう」以上であり、実験操作は、概ね簡単であったと思われた。1回目にスチーマーで失敗した子どもが「少し難しかった」と回答したようであった。

4) 今日の実験教室の、実験の説明は、わかりやすかったですか、難しかったですか？

1. とてもわかりやすかった (7)  
2. まあまあわかりやすかった (9)  
3. ふつう (2)  
4. 少し難しかった (0)  
5. とても難しかった (0)

全員 (18/18) が「ふつう」以上であり、説明は極めて分かりやすかったと思われた。

5) 今日の実験教室は楽しかったですか？

1. とても楽しかった (16)  
2. まあまあ楽しかった (2)      3. ふつう (0)  
4. あまり楽しくなかった (0)  
5. 全く楽しくなかった (0)

全員 (18/18) が「まあまあ楽しかった」以上であり、楽しんでいただいたようであった。

6) 今まで、化学 (科学) が、身近で役に立っていると思っていましたか？

1. とてもそう思っていた (9)  
2. 少しそう思っていた (8)  
3. どちらともいえない (0)  
4. あまりそう思っていなかった (1)  
5. 全くそう思っていなかった (0)

7) 今日の実験をやってみて、化学 (科学) が、身近で役に立っていると思いませんか？

1. とてもそう思った (14)  
2. 少しそう思った (4)  
3. どちらともいえない (0)  
4. あまりそう思わなかった (0)  
5. 全くそう思わなかった (0)

実験後、化学 (科学) が、身近で役に立っているという認識の程度に、大幅な改善が見られた。

8) 今日の実験教室に参加してよかった (意味があった、満足した) と思いませんか？

1. とてもそう思う (13)  
2. どちらかといえばそう思う (5)  
3. どちらともいえない (0)  
4. どちらかといえばそう思わない (やや期待外れ) (0)  
5. 全くそう思わない (完全に期待外れ) (0)

9) また参加したいと思いますか？

1. ぜひ参加したい (13)  
2. 機会があれば参加したい (5)

3. どちらともいえない (0)  
4. あまり参加したくない (0)  
5. もう参加したくない (0)

実験教室の満足度、および今後の機会への参加希望は、全員が肯定的 (18/18) で、極めて高く、否定的なものは全くなかった。

## 5. 今後の実践のための反省と改善策

「カルメ焼きづくり」の実験は、はじめて実践を行ったが、概ね良好な実験結果と、受講者からの高評価が得られた。しかし、まだ詳細な検討が不十分なところも多く、以下のような改善点が挙げられる。

- 1) 糖液の調製と冷却の温度について、メーカーを含めた砂糖の種類による違いの再確認。
- 2) 乾燥卵白やゼラチンを使用する実験法の確立。ゼラチン使用時の水の添加の必要性の再確認。
- 3) 重曹卵中以外に添加するグラニュー糖の結晶核としての効果の再確認。
- 4) スチーマーで4個とも良好に膨らませる方法の検討、最後の方の膨らみが若干悪い。
- 5) 鍋の種類の違いや、雪平鍋のサイズの違いの影響。予備実験では18 cmの雪平鍋を使用した。実践会場では21 cmの雪平鍋しかなく、それを使用。
- 6) カルメ焼きの色への卵白の役割の調査。重曹の熱分解実験で、糖液に卵白を添加。

事後指導では、以下のような改善点が挙げられた。

- 7) 黄身分けの時点で、黄身を崩してしまった組が2組あり、予備の卵で対応した。卵を上手に割れない子どもがいる。日常の経験不足で指導が必要か。
- 8) すり切り操作や、スポイトによる滴下操作に、かなり時間がかかっていた。とりわけ、スポイトの使い方を知らず、液を1滴ずつ滴下できない子どもが半数以上いると思われた。これも日常の経験不足で、指導が必要。
- 9) かたづけが、かなりその場対応となってしまったので、使用し、必要なくなったものは、速やかにかたづけていくのが化学実験の基本であることを最初に、PowerPoint プレゼンテーションなどで指導すべき。
- 10) PowerPoint プレゼンテーションは、改善の余地がたくさん残っている。最初からの実験の流れがわかるように、フローチャートを何回も示し、作業しているところを赤などで強調して示してから、細かい操作を指示するスライドを示すように改良する。
- 11) まとめ部分で、実験に関する化学の内容を実感し、再確認させるような工夫 (文字ではなく、イ

ラストやアニメーションで説明するスライド)が必要.

今後も、教育効果を検証して改善と実践をくり返し、理科が役に立つ教科であることを実感できる化学教材実験法として完成させていく予定である.

## 6. おわりに

この「カルメ焼きづくり」の個別指導体験型の実験を体験した人が、理科が面白く、役に立つ教科であることを実感することを期待したい. また、実践に参加した大学生には、実践のための実験法の開発を通じ、化学(科学)的なものの見方やセンスを身につけた教員になってもらいたいと強く思う.

## 謝辞

本研究は2012, 2013年度科学研究費補助金基盤C一般(課題番号24501096)により財政的にご支援いただきました. 今回の実践の機会を設けていただいた名古屋市西生涯学習センターの佐藤 彰洋 社会教育主事に感謝いたします.

## 参考文献

- 1) 戸谷 義明, 伊藤 弘晃, 後藤 大希, 愛知教育大学研究報告, **56** (自然科学編), 2007, 33-43.
- 2) 愛知教育大学研究者総覧/戸谷義明/社会活動等  
<http://souran.aichi-edu.ac.jp/profile/ja.Te5ErVdYoNA.LO1C.0a2Gw==.html#social>
- 3) Wikipedia (日本語) の「カルメ焼き」, 「南蛮菓子」, および広辞苑第4版の「カルメル」, 下記文献5aなどを参考にした.
- 4) 左巻 健男 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 5-12; 左巻 健男 編著, “食べ物実験レシピ”, 文一総合出版, 東京, 2010, pp 34-39.
- 5) a) 高梨 賢英, “カルメ焼きはなぜふくらむ—二酸化炭素の実験—”, さ・え・ら書房, 東京, 1990, pp 51-58; b) 高梨 賢英, “砂糖と塩の実験”, さ・え・ら書房, 東京, 1997, pp 40-44; c) 白井 文子, 科学の祭典2012全国大会実験解説集 p 25.
- 6) 男の酒肴ホームページ/カルメ焼き/もう失敗しません「カルメ焼き」  
<http://www.ajiwai.com/otoko/make/karumeyaki.htm>
- 7) 高田 明和, 橋本 仁, 伊藤 汎 監修, “砂糖百科”, 社団法人糖業協会, 製糖工業会, 東京, 2007, p 274.
- 8) 杉原 和男, 午後の理科室/究極の「カルメ焼き」  
<http://www.eonet.ne.jp/~sugicon/gogo/12caramelo/caramelo.html>
- 9) 戸谷 義明, 山名 賢治, 鈴木 喜隆, “理科が役に立つことが実感できる化学教材実験集”, 愛知教育大学, 刈谷, 2012, pp 103-106.

(2013年9月30日受理)