

実験教室で実施可能な「水あめ作り」実験の改良法の開発

戸谷 義明* 平岩 大作**

* 理科教育講座 (化学)

** 南山国際高等学校

Development of an Improved Experimental Method of “Making Starch Syrup” for Delivery Practices

Yoshiaki TOYA * and Daisaku HIRAIWA **

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

**Nanzan Kokusai Junior & Senior High School, Toyota, Aichi 470-0375, Japan

Abstract

We have investigated and developed many chemical experimental methods for delivery to classrooms. In Japan, English is implemented as a regular subject from the 5th grade at elementary school in AY 2020. Over two thirds of the students of our Science Teacher Training Programs will teach at primary schools. So, we have challenged to demonstrate the chemical magic and the hands-on experiment class in English for returnee students as a university class. Last year, we were able to hold a hands-on experiment class “Making Karume-yaki” in English. We have realized the importance of repeating preliminary experiments to improve the experimental methods and procedure. Then, we planned to hold another hands-on experiment class “Making Starch Syrup” in English, this year, however, all delivery practices were cancelled because of the epidemic of COVID-19. Nevertheless, we carried out the preliminary experiment of “Making Starch Syrup” to develop an improved experimental method for the future. We report here the process in detail.

I. はじめに

これまで著者は、身の回りや身近なことに関連した内容で、人々が、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てきた。開発した教材と指導法を出前化学実験として実践¹⁾し、評価、改善して確立することを目的として研究を進めてきた^{2) 3)}。

近年、著者は小学校における英語の教科化に対応し、英語指導ができる能力を身に付けた、理科に強い小学校教員を養成することが喫緊の課題であると考えた。そこで著者の指導の下、学生が日本語で行ってきた観察参加型の化学マジック実験の演示、及び個別指導体験型の化学実験教室の指導を英語で行うための教材と指導法を開発することを計画した。

最初に観察参加型の化学マジック実験教材(含英語版)を開発、実践することを目指した。2018年3月に化学マジック実験集日本語改訂版(9種類のマジック、日本語英語版スライド、シナリオ入CD付)⁴⁾、さら

に2019年3月に、その英語版⁵⁾を出版した。これまで著者自身が帰国学級生徒対象の実践、及び国際学会NICE 2015, NICE 2017, NICE 2019で化学マジックを英語で演示してきたが、2019年7月には、南山国際高等学校の帰国学級生徒対象に、大学生が英語で化学マジックを演示するに至った。⁶⁾

引き続き、個別指導体験型の実験教材(含英語版)を開発、実践することを目指した。

個別指導体験型の実験教材としては、これまで特に、生活に密着した、食品関係の化学実験を開発すれば、教育効果のある実験になると考え、2007年以降、お菓子類を調製する実験を開発、実践してきた^{1) 3)}。

2019年7月22日に南山国際高等学校の帰国学級生徒対象に、2014年に日本語で実践を行ったカルメ焼き作り^{3) 7)}を大学生が英語で指導する機会が得られた。そこで、まず2019年7月6日に名古屋市西生涯学習センターで大学授業「化学教材演習」として日本語による2時間の「カルメ焼き作り」実験教室を開催した。そのための予備実験で、化学教材実験集II³⁾の実験法

に、幾つかの改良すべき点（特に上白糖でなくザラメを使用）が見付かった。改良した日本語プレゼンテーションを英語化して英語版を作成した。これを使用し、1回のみ英語での予行演習と同様に、日本語と同様、ほぼ2時間で実験教室を実施することができた。⁶⁾

以上の結果を受け、化学教材実験集Ⅱ³⁾の、ほかの10種類の実験（食品系は5種類）の日本語プレゼンテーションを改訂しながら英語化して英語版を作成することにした。そのうちの食品系の「水あめ作り」実験^{3) 8)}は、2014年にパイロット実践、2015年に完成形の実践を日本語で行っており、2020年度、日本語と英語、各1回の実験教室を計画した。大変残念なことに、新型コロナウイルス感染症が流行し、感染防止のため、両方の実践が中止となってしまった。

しかしながら、前年、「カルメ焼き作り」実験教室を開催するために、予備実験を行った結果、幾つかの改良すべき点が見付かり、改良することができたことから、予備実験を繰り返すことの重要性を再認識した。そこで、コロナ禍で、出前実践が不可能になり、対面の卒業実験の指導も大きく制約される状況ではあるが、できる限り、短い時間で、3密を避けるように「水あめ作り」実験の予備実験を行い、これまでの実践から判明していた改良すべき点を含め、改良法を開発することにした。これまでに改良できた成果を報告する。

Ⅱ. 「水あめ作り」実験法の改良すべき点

2016年出版の化学教材実験集Ⅱ³⁾にある、カタクリ粉を使用する実験法では、以下の問題が判明していた。

1. カタクリ粉と水の混合物を糊化する際に、粘度が大きく上昇する。糊化が開始する前に、カタクリ粉が鍋の底に残らず、水に均一に混ざった状態になるように、よくかき混ぜるといふ指示はあるが、実際は難しい。かき混ぜが不十分であると、均一に糊化が起こらず、デンプンのゼリー状の固まりが、たくさんできた。このものは酵素により糖化されず、そのまま残り、アク取りの際に一緒に除去された。
2. 実験法に示した器具類で糊化する際に、十分かき混ぜることができるカタクリ粉の濃度は8.0% (w/w) が上限。濃度を下げると、最後に得られる水あめの量（4人で60-70 g）が少なくなってしまう。
3. 濃縮終了は設定した最終濃縮質量を目安に、質量の計量で行っているが、万一、操作の過程で、糊化物や糖化液を、こぼしてロスすると、目安が使えなくなってしまう。

濃縮終了の目安は、ある水あめ製造会社にお問い合わせみたところ、糖度計でBrix値（屈折率をショ糖の20℃の水溶液の屈折率と比較し、ショ糖の質量%で示したものを測定して濃縮の目安としているとのことであった。そこで、高温のまま2秒で糖度が測定

できる株式会社アタゴ製のポケット糖度計PAL-H（測定範囲0.0-93.0%、測定精度±0.5%、温度補正範囲10-100℃）を入手し、濃縮前の糖化液を含め、最終濃縮質量の水あめの糖度（目安は83°）を測定して濃縮終了の目安とすることを計画した。

糊化の際の粘度上昇の改善策としては、文献^{9) 10) 11) 12)}を調査したところ、他のデンプンに比べ、カタクリ粉の糊化時の粘度上昇が極めて大きいことが判明した。そこで、最初に、カタクリ粉（ジャガイモ）以外に、身近で入手しやすいデンプン類〔コーン、サツマイモ、タピオカ（キャッサバ）〕を使用して「水あめ作り」実験を行い、以下の点に注目して検討を行うことにした。

1. デンプンの種類に関わらず、カタクリ粉と同様の実験法で、水あめが調製できるか否か。これが最も重要で、デンプンの種類による、糊化温度の違い（各デンプンの糊化開始-中間-終了温度：ジャガイモ59-63-68℃；コーン62-67-72℃；サツマイモ58-74-無℃；タピオカ62-68-73℃⁹⁾、又はジャガイモ64.5℃；タピオカ69.6℃；サツマイモ72.5℃；コーン86.2℃¹²⁾）による糊化の様子、及び食品製造用 α -アミラーゼであるスミチームLによる糖化の様子（ヨウ素デンプン反応による終了までの時間）に違いが出るのが予想された。
2. 実際に糊化させる際の粘度が、文献の糊化デンプンの粘度（6% BU粘度の強さ：ジャガイモ1028；サツマイモ683；タピオカ340；コーン260）¹²⁾又は粘度曲線（アミログラム）¹³⁾の粘度の順に従い、糊化させる際の、かき混ぜる操作が改善されるか。改善された場合、デンプンの濃度を現在の8%から増やし、最後に得られる水あめの量を増やすことが可能か。
3. 糖化反応の進行をヨウ素デンプン反応で追跡した際に、ジャガイモと同様に、残存デンプンの青紫色が消えていくのが、明瞭に観察できるか。

さらに、実験の際には糊化（かき混ぜ方）、糖化（最初にデンプンが液化する変化）、及び糖化液の濃縮（泡立ち、アクの生成）の様子を写真やビデオで撮影し、糊化の際に、よくかき混ぜる操作などが、実際に、どのように行われているかを示すデータを得るようにした。

Ⅲ. 「水あめ作り」実験法

今回、ベネジクト液による還元糖の検出の操作は検討を省略した。実験教室は4人1組で実施予定であるが、検討実験は3人で操作を分担して行った。なお、本学の自然科学棟の改修のため、教材実験に使用できる適当な化学実験室がなかったが、本学家庭科教育講座の板倉厚一教授の御厚意で、家政実験準備室を使用し、検討を行うことができた。食品用実験台にはOA紙を敷かず、毎回、実験の前後にアルコール消毒を行って使用した。室温は25-30℃であった。

1. 必要な材料と器具類 (写真1参照)

カタクリ粉 (火乃国食品工業, 南部太白片栗粉, 北海道産ジャガイモ, ¥150/250 g), カセットコンロ (イワタニカセットフー達人CB-AP-14) 1台, カセットコンロ用ガスボンベ2本 (1本はコンロにセット, 1本は予備), 205 mL紙カップ2個 (水用&水用ピペット立て用, 酵素用ピペット立て用), 1.6 mL PE製ピペット (サンブラテックパスツール4型PP-4N) 2本 (水用, 酵素用, 各1本), シリコンへら [ダイソー 4549131281521, シリコンスパチュラ (大), 柄部PP) 1本, 竹割り箸3膳 (1人1膳, 割って1本ずつ使用), キッチン温度計 (ドリテックO-207SV) 1本, アルミニウム製雪平鍋 (18 cm) 1個, シリコン製鍋置き (ダイソー 4984343701557, シリコン製マルチマット, 直径約15 cm) 2枚 (キッチンばかり, 及び電子上皿天びん用), キッチンばかり (タニタKD-176, 最小表示1 g, 最大計量2 kg) 1台, スミチームL (新日本化学工業) 0.40 g入5 mL PYREXスクリュールバイアル1本, 約25 cm角アルミホイル1枚 (鍋の覆い, 及び水あめを鍋から移すときに使用), ステンレス製茶こし2個 [味道, 二重茶こし (中), 和平プレイス (株) AD-106, ¥398], PP製バット (ダイソー 4993152332326, 又は4993152333798, 浅型万能トレイ) 1枚 (氷水を入れて鍋を冷却する), OA紙A4 4枚 (茶こし置き用, 酵素, 又は水あめ置き用), PS製マドラー 1本 (糊化したデンプンを時計皿に取る), 50 mL PP製広口瓶 (アイボーイ広口瓶) 1本 (作った水あめを入れる)。以下, 写真1に写っていないもの, コーンスターチ (火乃国食品工業, コーンスターチ, ¥820/kg), タピオカスターチ (GABAN, タピオカスターチ, ¥767/kg), サツマイモスターチ (火乃国食品工業, さつまいも粉, 南九州産サツマイモ, ¥956/kg), 実験ノート1冊, ワークシート1枚, スライド印刷資料1部, 蒸留水3 L入5 Lアルミ製やかん1個, 蒸留水入500 mL PP製角洗瓶1本, 消毒用80% (v/v) エタノール入500 mL PP製角洗瓶1本, 消毒用80% (v/v) エタノール入PP製スプレーボトル, 電子上皿天びん (Sartorius, QUINTIX2012-1S, 0.01-2100.00 gまでひょう量可能, シリコン製マルチマットを敷く), 軍

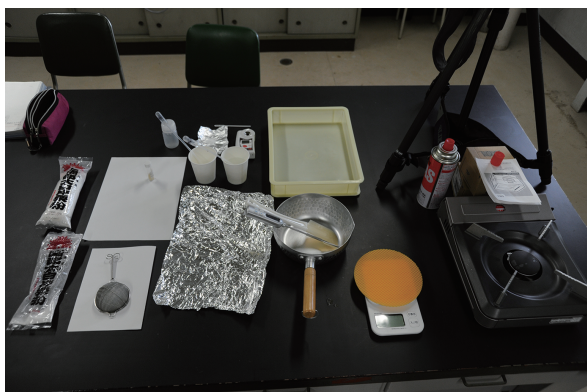


写真1 必要な材料と器具類

手3双 (1人1双, 両手に着用), むれ雑巾1枚, ティッシュペーパーパック1個, ストップウォッチ1個 (スマートフォンを使用), 可燃物用ゴミ袋1個。

ほかに糖化反応を追跡するために, 非食品用実験台に以下の器具を用意。75 mm PYREX時計皿6枚, 0.02 mol/Lヨウ素ヨウ化カリウム溶液 (ヨウ素液) 入50 mL褐色ガラス製滴瓶1本, 時計皿置き用A3紙1枚 (班の番号と時計皿を置く位置を印刷済)。ヨウ素液は, ヨウ化カリウム (KI, $M=166.00$ g/mol, ¥1479/25 g, SAJ 1級) 8.30 g, ヨウ素 (I_2 , $M=253.81$ g/mol, ¥1814/25 g, SAJ 1級, 劇物) 0.25 g, 蒸留水50.0 mLを混合して調製した。

2. 実験操作

化学教材実験集II³⁾と同様であるので, 変更した箇所を主に, 簡略に記載する。ワークシートも以下の図1のように若干補足し, 改訂した。

2020 愛知教育大学IP研研究実・名古屋西郷学園センター連携事業「科学的な考え方を学びながら楽しむ化学」(科学) 実験実習 氏名

食品作りには酵素や化学が大活躍！～カタクリ粉から水あめを作ろう！

ベネジクト濃に加え、加熱したときの色

◎質量の測定		◎糖化		糖化前	
鍋+シリコンへらの合計質量 (a)	質量 (g)	加熱開始からの時間 (分)		糖化後	
鍋+シリコンへら+温度計の合計質量 (b)		58 °C			
鍋		70 °C			
シリコンへら		90 °C			
クッキング温度計		糖化終了時の合計質量(e) _____ g		◎濃縮	
空の広口瓶 (c)		蒸発した水の質量(d-e) _____ g		濃縮に変化した時間	
カタクリ粉		50 °Cに冷却後の合計質量(f) _____ g		分	
水		蒸発した水の質量(e-f) _____ g		質量 (g)	
鍋+シリコンへら+温度計+カタクリ粉+水の合計質量 (d)		◎糖化		濃縮開始時の質量 (h)	
最終濃縮質量 = _____ +83 g		糖化の時間 (分)	ヨウ素液を加えたときの色	約半分まで濃縮したときの時間と質量	
鍋と、シリコンへらの質量(a)		0		分 秒	
= _____ g		8		約8分の1まで濃縮したときの時間と質量	
		16		分 秒	
		32		鍋+シリコンへら+水に残った水あめ (A)	
		蒸発後		鍋に残った水あめ (C+A-e)	
		糖化終了時の質量(h)		広口瓶+水あめ (B)	
		蒸発した水の質量(f-h)		広口瓶の中の水あめ (D-B-c)	
				得られた水あめの全部の質量 (C+D)	
				メモ	

図1 ワークシートの改良版

- 1) 実験器材の質量を量る。雪平鍋+シリコンへらの質量 (水あめができた状態で差し引く質量) をワークシートの (a) に, 雪平鍋+シリコンへら+温度計の質量 (糖化終了時の質量を求める) をワークシートの (b) に記入する。万一の破損などを考慮し, 雪平鍋, シリコンへら, 温度計, それぞれの質量を量り, ワークシートに記入する。水あめを入れる50 mL PP製広口瓶の空の質量をキッチンばかり, 及び電子上皿天びんで量り, 両方の質量 (gまで, 0.01 gまで, ひょう量) をワークシートの (c) に記入する。
- 2) 酵素に水約3 mL (1.5 mL×2回) を加え, 溶かして溶液にする。バイアルの蓋を固く閉めてから, 軍手の上でタッピングすると, 簡単に酵素粉末と水とが混ざり, その後, 上下に振れば, 完全に溶けて褐色の透明な溶液となるまでに時間は掛からない。
- 3) シリコンへらが入った雪平鍋の中にデンプン80 gを量る。デンプンの質量をワークシートに記入する。
- 4) 引き続き, デンプンが入った雪平鍋に水920 gを量り加える。最後はピペット (水用) を使い, 920 gに合わせる (ワークシートに記入)。最後に,

鍋を下ろし、鍋に温度計を乗せ、合計の質量（雪平鍋+シリコンへら+温度計+片栗粉+水）を量る。この質量をワークシートの（d）に記入する。

- 5) 最終濃縮質量（濃縮を終了する目安の質量）を計算する。濃縮の時には温度計は使わないので、温度計のない状態で質量を計算する。最終濃縮質量は以下のようにして設定した。

水あめの炭水化物成分は食品成分表2015¹⁴⁾では85.0%（酵素糖化、酸糖化）、ソントンヤスドーの市販のものでは77-82%であり、残りは水分とみなしてよい。また、食品成分表2015¹⁴⁾では、各デンプン100 g当たりの炭水化物成分（デンプンと見なす）は、それぞれジャガイモで81.6 g、サツマイモで82.0 g、タピオカで85.3 g、コーンで86.3 gであり、残りは水分と見なして良い。デンプン x g ($M=162$ g/mol $\times n$) が完全に二糖 ($M=342$ g/mol, 162 g/mol $\times 2+18$ g/mol) に加水分解されると、付加した水 ($M=18$ g/mol) の M 分の質量 [$x/(162\times n) \times (n/2) \times 18$] gが増加するはずである。カタクリ粉80.0 gに含まれるデンプン65.3 gが完全に二糖（分子量342）まで加水分解（DE 50）されると、質量は68.9 g [$65.3 + (65.3/162) \times (1/2) \times 18$] になり、不揮発物として残ると仮定する。したがって、68.9 gが83%の水あめになるようにするには、最終的に83 g (83.0 g, カタクリ粉の質量80 g+3 g) になるまで濃縮すれば良い。同様に計算すると、サツマイモで83 g (83.4 g)、タピオカで87 g (86.8 g)、コーンで88 g (87.8 g) となる。それぞれの計算値に鍋+シリコンへらの合計質量 (a) を加えれば最終濃縮質量となる。この値をワークシートに必ず記入しておく。

- 6) デンプンを糊化させる前に、混ぜる人、温度計を持って時間と温度とを測り、読み上げる人、及び時間と温度をノートやワークシートに記入する人を1人ずつ決める。やけどするのを防ぐため、混ぜる人、及び温度計を持つ人は両手に軍手を着用する。鍋の中全体で、デンプンを均一に糊化させることができれば、糖化が良好に進行する。そのために今回の実験では、全体をよくかき混ぜ、デンプンと水とがよく混ざった状態にすること、及び後述するように、糊化が開始したら、ゆっくりと温度を上げることが最も重要である。
- 7) ガスコンロの上に鍋を置き、取っ手をしっかり持ち、鍋の底にデンプンが沈んでいない状態になるようにシリコンへらを立て、底のデンプンに引っかからなくなるまで、よくかき混ぜる。加熱時間を計るために、ガスコンロに火を付ける（加熱開始）のと同時にストップウォッチをスタートさせる。温度を測る人は、加熱開始と共に温度計のプローブを3分の1くらいまで混合物に入れて温度を測定する。温度計を必ず手に持ったまま、かき混ぜる人の邪魔にならないように、鍋の端の1箇所温度計を入れる位置を決めておく（写真2参照）。

- 8) 混合物全体をムラなく、よくかき混ぜながら、加熱開始から5-7分後に58-60℃（実際の糊化開始温度より5℃くらい低い温度）になるように、鍋底の直径の半分ほどの炎の大きさで加熱する。かき混ぜている間に、1分ごとの温度、及び実際に58℃になった時間を読み上げ、記録係がノートとワークシートに記入する。1分ごとの温度上昇を見ながら、炎の大きさを僅かに調節して温度を上げていく。火が強いと、鍋の側面が焦げてしまうことがある！！



写真2 糊化させる際のかき混ぜと温度測定

- 9) 次に、58-60℃から5分後に70℃になる（1分間に2-3℃温度が上昇する）ように、火が消える直前まで炎を小さくしてから調節して加熱を続ける。ここが一番よくかき混ぜないといけないポイント！！急に粘り気が出て、かき混ぜが重くなるので、混ぜる人が、糊化開始を知らせ、温度測定する人が、そのときの温度を読み上げる。混合物が糊状になっていくので、こぼさないように注意して全体がよく混ざるように、しっかりかき混ぜる。読み上げられた、1分ごとの温度、糊化開始温度、及び70℃、又は80℃になった時間を、ノートとワークシートに記入する。
- 10) 70℃、又は80℃になったら、最初の鍋底の直径の半分ほどの炎の大きさで加熱する。1分ごとの温度と、90℃になった時間をノートとワークシートに記入する。火が消える直前くらいまで炎を小さくしてから調節して加熱を続ける。90℃を挟んで温度の上下が観察されることがあるが、90℃より温度が下がらなくなったら、その後、4分間、90℃以上を保つように、加熱を続ける。大きな泡が出る沸とうが観察されるようになるので、混合物を、よくかき混ぜる。
- 11) 加熱終了後、直ちに糊化終了時の質量 (e) を量り、ワークシートに記入し、糊化で蒸発した水の質量 (d-e) を計算する。バケツの水をバットの約3分の2の深さまで入れたところに鍋を入れ、鍋の中身

- を約6分間冷やす（写真3参照）。氷水中から鍋を取り出し、ときどき中身をかき混ぜながら糊化物全体の温度をチェックしながら空気中で鍋を冷却する。55℃になったら、ティッシュで鍋の底に付いた水を拭き取って質量（f）を量り、ワークシートに記入し、冷却中に蒸発した水の質量（e-f）を計算する。
- 12) 糊化した糊状のデンプンをマドラーの細い方ですくい取り、反応開始前の（0分）時計皿に入った蒸留水2滴と混ぜ合わせる。また、ブランクとして蒸留水2滴の入った時計皿を用意し、これらを時計皿置き用A3紙に置き、ヨウ素液各1滴を添加し、色を確認する。
 - 13) スミチームL水溶液を加え、糖化を行う前に、糖化反応物をかき混ぜる人、糖化反応物の温度を測り、49℃になったらコンロを点火（最小の炎）し、51℃になったら火を消す人、時間を計測し、糖化の様子の記録とヨウ素デンプン反応を行う人を1人ずつ決める。カタログによると、スミチームLの至適温度は50℃で、55℃以上にすると、失活が顕著になる。55℃以下になった糊化物にスミチームL水溶液をピペット（酵素用）で、表面全体に散らばるように加える。
 - 14) コンロの上に鍋を乗せ、シリコンへらで、糊化物をかき混ぜ始めると同時にストップウォッチを再スタートさせる。糊状のデンプンが、どのように変化するかを観察する。糖化を速やかに進行させるために、温度を50℃に保ち、よくかき混ぜる。鍋の側面や温度計に付いた糊をシリコンへらで落とす。シリコンへらに付いた糊は糖化反応物に浸けるようにすると、よく落ちる。ゼリー状のものが、なくなるように、シリコンへらでゼリー状のものを押しつぶしながら混ぜる。ゼリー状のものが32分後に残っているか、また、ほぼ消失した場合は、その時間を記録する。
 - 16) 糖化開始後、8、16、32分のときに、既述のように、糖化反応物の残存デンプンのチェックを行う。
 - 17) 糖化終了後、終了時の質量（h）を量り、ワークシートに記入し、糖化中に蒸発した水の質量（f-h）を

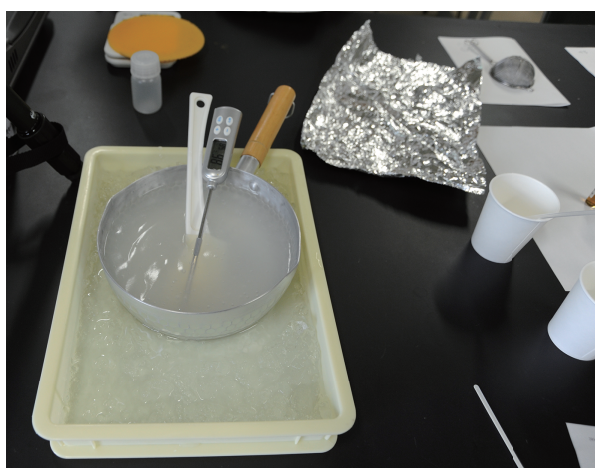


写真3 バットの氷水中での鍋の冷却

- 計算する。ヨウ素デンプン反応の結果を確認し、ワークシートに記入する。
- 18) 糖化反応液の糖度を、糖度計と酵素用PE製ピペットを使って測定する。
午前中の実験は、ここまで。鍋にアルミホイルをかぶせて1-1.5時間、室温で放置した。
 - 19) 糖化反応液の様子を観察し、糖度の測定と、濃縮前のヨウ素デンプン反応を行う。温度計を鍋から取り出し、糖化反応液+鍋+シリコンへらの質量（h'）を量る。質量（h'）から鍋+シリコンへらの質量（a）を差し引くと、糖化反応液の質量（E）が求まる。この質量（E）の中に、得られる予定の水あめ100%が含まれると考えると、以降のアク取りなどの操作でロスした時点の糖化反応液などの質量を量ることにより、ロスした水あめの質量が予想できた。
 - 20) 糖化反応液を濃縮する前に、かき混ぜて鍋の質量を量る人、濃縮の様子の記録と時間を計る人、糖度、及び鍋以外のものの質量を量る人を1人ずつ決める。鍋底の直径の半分ほどの炎の大きさで加熱する。この火力では濃縮には60-70分掛かるが、濃縮の際に、絶えずかき混ぜる必要はなく、鍋の側面で濃縮物が焦げることはなかった。また、へらの柄を、鍋の柄の上になるように置けば、コンロの熱でへらの柄が溶けるようなこともなかった。濃縮の時間を計るために、火を付けるのと同時に、時間を計る人がストップウォッチを再スタートさせる。かき混ぜる人は両手に軍手を必ず着用する。
 - 21) 加熱開始後7-10分で糖化液が沸とう開始し、その後、10-15分で繊維状の濁り（アク）が出ている場合、加熱を続けながら、OA紙と共に空体をひょう量した茶こしで濁り（アク）、及び残っているゼリー状のものがあれば、これを、すくって取り除く。この時点の糖化反応液の質量、及びアクなどが入った茶こしの質量を量れば、アク取りによるロスが見積もれる。
 - 22) 濃縮開始から30分たったら、一度、質量を量る。沸騰してから1分間当たり10-13g蒸発していれば火力は適切である。必要に応じて火力を調節する。
 - 23) 糖化反応液が、始めの質量の8分の1（質量Eから計算）になったら、一旦コンロの火を消す。コンロから下ろした鍋を傾け、もう1個の茶こし（OA紙と共に空体をひょう量）で濁り（アク）、及び残っているゼリー状のものがあれば、これを、すくい、できる限り取り除く。その後、糖度を測定する。この時点の糖化反応液の質量が分かっているので、アクなどが入った茶こしの質量、及び糖度の測定に使用後の糖度計（空体をひょう量）、酵素用の紙カップ&PE製ピペット（空体をひょう量）の質量を量れば、アク取りと糖度測定によるロスが見積もれる。濃縮された、この時点のロスは水あめ2.3g（2.4-3.6%）相当になることが分かり。この分を最終濃縮

質量から補正（差し引く）すると、糖度計で83%前後の水あめが得られた。

- 24) 再びコンロで加熱し、1-2分ごとに鍋の質量を量りながら濃縮を続ける。最終濃縮質量+10 gになったら、火が消える直前まで炎を小さくして火力を弱める。最終濃縮質量になるまで加熱と計量を、こまめに繰り返す。最終濃縮質量になったら、直ちに、糖度を測定し、80°以上であることを確認する。80°未満の場合、最終濃縮質量より、さらに2-3g少なくなるまで濃縮する。その後、アルミホイルを敷いた上で、こぼさないように気を付けながら、鍋のとがった口のところから水あめを、できるだけ広口瓶に移した後、直ちに、瓶に固く蓋をする。コンロの火は、瓶に移している人以外が消す。
- 25) 鍋に残った水あめの質量 (C) と広口瓶の中の水あめの質量 (D) を求める。鍋に残った水あめの水が蒸発してしまうので、直ちに、鍋+シリコンへら+鍋に残った水あめの質量 (A) を量り、ワークシートに記入する。鍋に残った水あめの質量 (C) を求めるために、(A) から鍋とシリコンへらの合計質量 (a) を差し引く。次に、広口瓶+水あめの質量 (B) を量る。広口瓶の中の水あめの質量 (D) を求めるために、(B) から空の広口瓶の質量 (c) を差し引く。得られた水あめの全部の質量を求めるために、(C) と (D) を合計する。
- 26) 205 mL紙カップ（酵素用）に少量の水を入れて洗い、これを2回繰り返す。450 mL紙カップがあれば、それを使用の方が良い。カップにバケツの水水を入れ、そこに固く蓋を閉めた、水あめの入った広口瓶を入れて15分冷却する。適宜、紙カップの水を流しに捨て、水を補充する。ときどき、広口瓶を紙カップから取り出し、ひっくり返したり回したりして、瓶の中の水あめの流れ方（固さ）を観察しながら混ぜる。水あめの固さは温度で、ある程度加減できる。糖度が高く、固めの場合は広口瓶を早めに冷たい水から取り出し、糖度が低く、柔らかい場合は長く冷却する。バケツの大量の水水に広口瓶を入れて冷却するのが、最も簡単である。
- 27) 水あめを冷却する間に、後片付けを行う。
- 28) 水あめを試食する。取り出す際に柔らかさを観察し、その後、味と風味をチェックする。
- 29) 写真と動画を整理する。実験のまとめを行う。

IV. 4種類のデンプンを使用した実験の結果

ジャガイモ、サツマイモ、及びタピオカデンプンでは各4回、実験を行った。以下の表1-3に結果を示す。

ジャガイモの1回目は、担当した学生にとって初めての「水あめ作り」の実験で、化学教材実験集II³⁾のスライドの操作に従って実験するように、実演せずに

指示したが、糊化の際の、最初のかき混ぜが不十分で、鍋底の粉が残ったまま、強い火で加熱したため、大量のゼリー状のものが生成し、アクと共に除かれ、糖度が低い水あめとなった。個別指導がある実験教室でも、受講中学生が、糊化の操作に苦勞していた理由が、指導する側も熟練を要する操作であるからと分かった。上手な糊化の操作を指導するためには、撮影した動画が有用であろう。最終濃縮質量を2-3 g少なく設定、濃縮すれば、良好な水あめが得られるのを確認した。

サツマイモはジャガイモより鍋の底から水に懸濁させにくかったが、糊化時の粘度が低く操作しやすかった。ヨウ素デンプン反応（写真4参照）はジャガイモより消えにくいと思われた。ジャガイモに比べて濃縮液は透明で、アク（写真5参照）は、僅かであったので、アク取りはしなくても良いと推測され、最終濃縮質量まで濃縮し、良好な水あめが得られた。水あめの色はジャガイモに比べて濃かった（写真6参照）。

タピオカの4回目はデンプン100 g, スミチームL 0.50 gを使用し、濃度1.25倍で行った。

タピオカはサツマイモより鍋の底から水に懸濁させにくかったが、一度懸濁させると沈みにくいように思われた。サツマイモと同様に糊化時の粘度が低く操作しやすかった。冷却しても糊化物の高い透明度が保たれた。ヨウ素デンプン反応（写真4参照）はジャガイモより消えにくいですがサツマイモよりは消えやすいと思われた。サツマイモと同様に、ジャガイモに比べて濃縮液が透明で、アクも、ほとんど出ないので、アク取りはしなくても良いと推測された。水あめは、ほかのデンプンと同じ糖度でも柔らかいのではと思われた。水あめは最も色が薄く（写真5参照）、ジャガイモやサツマイモのような匂いや風味がなく、上品な味であった。いずれも糖化終了後から濃縮まで放置したが、顕著な糖度の上昇は見られなかった。

表1 ジャガイモの結果

ジャガイモ	1	2	3	4
糊化開始温度(°C)	-	-	-	63
糖化終了時の糖度	8.0°	8.0°	-	8.0°
濃縮前の糖度	-	8.0°	8.0°	-
約1/8濃縮時の糖度		61.0°		60.5°
最終濃縮質量(g)	83-1	83-2	83-2	83 83-3
水あめの糖度	78.3°	83.7°	81.3°	77.5° 80.5°
水あめの質量(広口瓶)(g)	66 66.20	66 65.80	68 68.55	67 66.97
水あめの質量(鍋に残ったもの)(g)	15	13	11	12
水あめの総収量(g)	81	79	79	79
ゼリー残存の有無 消失時間(min)	無 29	-	ごく僅 か残	ごく僅 か残
水あめの固さ	柔らかい	少し固め	良好	少し柔らかい

表2 サツマイモの結果

サツマイモ	1	2	3	4
糊化開始温度(°C)	74	73	72	74
糖化終了時の糖度	-	7.8°	8.0°	8.0°
濃縮前の糖度	8.0°	8.0°	8.5°	-
約1/8濃縮時の糖度	54.0°	56.0°	59.0°	62.5°
茶こしに残ったア クと濃縮液(g)	-	-	-	3.30
最終濃縮質量(g)	83	83	83	83-3
水あめの糖度	82.5°	82.3°	81.5°	86.0°
水あめの質量(広 口瓶)(g)	69 68.72	71 71.42	70 70.06	66 66.84
水あめの質量(鍋 に残ったもの)(g)	14	10	12	11
糖度測定でピペッ トに残った水あめ(g)	-	-	-	1.15
水あめの総収量(g)	83	81	82	77
ゼリー残存の有無	-	無	無	無
消失時間(min)	-	17	20	20
水あめの固さ	-	-	-	非常に 固い

表3 タピオカの結果

タピオカ	1	2	3	4 1.25倍
糊化開始温度(°C)	68	64	68	63
糖化終了時の糖度	-	8.0	-	10.0
濃縮前の質量(g) と糖度	907 8.3°	890 8.0°	874 8.5°	927 10.0°
約1/8(約1/4)濃縮時 の質量(g)と糖度	116 63.5°	125 58.3°	107 69.5°	216 (44.0°)
最終濃縮質量(g)	87	87	87-1	109-3
水あめの糖度	82.0°	79.5°	80.5°	84.5°
水あめの質量(広口 瓶)(g)	74 73.83	76 75.70	69 68.96	91 90.42
水あめの質量(鍋に 残ったもの)(g)	11	9	15	13
水あめの総収量(g)	85	85	84	104
ゼリー残存の有無	無	無	無	無17 濁り有
消失時間(min)	25	30	32	25
水あめの固さ	-	柔らか い	少し柔 らかい	良好

ジャガイモの糊化時の粘度を低下させるために、ジャガイモ40g+タピオカ40gでも実験を行った。糊化開始温度は64℃で、ジャガイモ単独よりは粘度が低下し、糊化物の透明度が高くなった。ヨウ素デンプン反応はジャガイモ単独より消えにくく、糖化終了時には僅かにゼリー状のものが残った。濃縮前の糖度8.5°、1/8濃縮時の糖度は67.5°であった。アク取りと糖度測定によるロス(茶こし2.25g、糖度計0.06g、ピペット+紙カップ0.36g)であったので、85.3gを最終濃縮質量とした。糖度84.5°の水あめが81g(広口瓶67.93g、鍋残り13g)得られたが、かなり固かった。ただし、固めの水あめの方が柔らかい水あめより練った際に泡が入りやすかった。

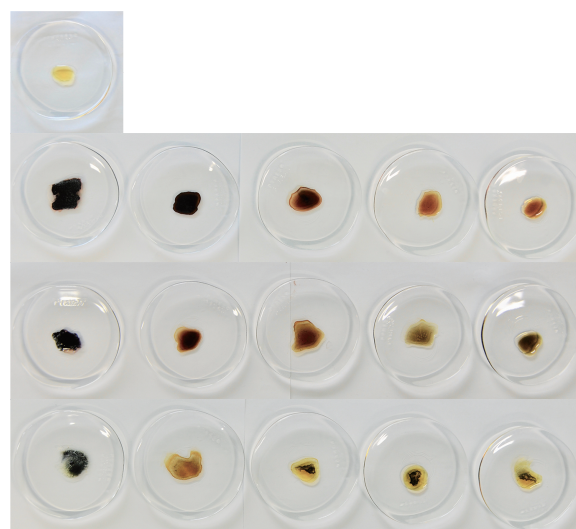


写真4 各デンプンの糖化反応物のヨウ素デンプン反応。左上から空白、以下の列は上から順に、ジャガイモ、サツマイモ、タピオカ、各列左から右に糖化開始0min、8min、16min、32min、及び濃縮前。

今回、報告したジャガイモ+タピオカ(1/1)混合、及びタピオカ濃度1.25倍の実験法は、ジャガイモ単独に比べ糊化時の粘度が大幅に改善されているとは言えず、操作性と単純さを考慮すると、タピオカ単独が最も適していると推測された。

コーンスターチは1回目の実験で、糊化物(糊化開始温度72℃)を90℃(サツマイモより粘度低い)から50℃に氷冷した際に鍋の縁の方から白く濁り(白蠟化)、ゼリー状に固まるのが観察された。これを糖化した反応物(糖度7.5°)のヨウ素デンプン反応の結果、開始時



写真5 ジャガイモの糖化反応物を濃縮した際に生成したアク



写真6 各デンプンから得られた水あめ。左から右にタピオカ、ジャガイモ、サツマイモ。

と同様にデンプンが明瞭に検出されたこと、及び糖化反応物中の白い濁り (α -アミラーゼで消化されない) が、濃縮したときに最後まで消えず、最終濃縮質量 (88 g) まで濃縮したときに水あめが得られず、白く濁ったペースト状で切れやすく、粉っぽい味がするもの (糖度 76.3°) が得られた。以上のことから、糊化した α -デンプンが β -デンプンに戻る、デンプンの老化が起こったと予測され、コーンスターチでは、報告した実験法で水あめが得られないことが判明した。

V. コーンスターチで水あめを調製する検討

アミロース含量が多い (25%) コーンスターチの老化が早いことは文献^{9) 15) 16)}にあったが、濃度 (8%) や温度 (90℃ から 50℃ へ冷却) を考慮すると、予想を超えた条件で老化が起こった。そこで老化を防止する方法を検討した。

最初に 90℃ から 50℃ へ冷却するのを氷水中と空気中で比較した。結果は差がなく、急冷が原因ではないことが判明した。糊化後、氷水で冷却した場合の写真 7 を以下に示す。

次に、三和澱粉工業から御供与いただいた、原料が明白なコーンスターチ 3 種、コーンスターチ Y (イエロー種ウルチ)、コーンアルファ Y [糊化 (100% α 化) 済のイエロー種ウルチコーンスターチ]、及びワキシースターチ Y (イエロー種モチ) を用いて以下の実験を行い、結果を得た。

1. コーンスターチ Y で既述と同じ方法で糊化を行い (糊化開始温度 76℃)、市販コーンスターチと同様に、冷却時に老化が起こることを確認した。糖化し、ヨウ素デンプン反応と (全て青紫色)、最終糊化物の糖度 (7.5°) を確認、濃縮は行わなかった。
2. コーンアルファ Y を少量ずつ、スミチーム L 0.40 g を加えた 50℃ の蒸留水 920 g に加えてかき混ぜた (4 分 20 秒掛かった)。糖化時間を測定開始し、ヨウ素デンプン反応と (全て青紫色)、白く濁った糖化終了物の糖度 (7.0°) を確認、濃縮を行うと最終濃縮質量 88+5 g までしか濃縮できず、既述と同様の、水あめではなく、白く濁った褐色のペースト状のもの 91 g が得られた (写真 7 参照)。老化は 50℃ で、 α -アミラーゼ存在下でも速やかに進行することが分かった。
3. アミロースを 1.0%⁹⁾ しか含まず、アミロペクチンを主に含み、老化しにくいことが知られているワキシースターチ Y で実験を行ったところ、糊化終了 (糊化開始温度 67℃) し、冷却後、さらに糖化終了後も淡黄色の半透明の液であったが、濃縮のために沸とうさせると、淡黄色の透明な溶液になっていった。ヨウ素デンプン反応は全て赤褐色、又は黒褐色のデンプンの残存が検出され、僅かに老化している可能性が考えられた。濃縮前の糖度 8.5°、1/8 濃縮

時の糖度は 68.0° であった。アク取りと糖度測定によるロス は 3.46 g (茶こし 3.41 g, 糖度計 0.05 g) であったので、88.3 g を最終濃縮質量とした。糖度 82.5° の水あめが 82 g (広口瓶 72.14 g, 鍋残り 10 g) 得られたが、少し柔らかかった。水あめの糖度測定によるロス は 1.28 g (糖度計 0.26 g, ピペット + 紙カップ 1.02 g) であると分かった。水あめの色はジャガイモの水あめが黄色みを帯びたようであった。

以上のことから、コーンスターチは、報告した実験法ではワキシー種でない、老化が起こり、水あめが得られないことが確認できた。

VI. 添加物によりジャガイモデンプンの糊化時の粘度を低下させる検討

ジャガイモデンプンの糊液の粘度は、塩の影響を強く受け、 Ca^{2+} で大きく低下する (4% 溶液の粘度が Ca^{2+} 8 mg/450 mL で約 4 割になる) というデータ⁹⁾があった。そこで、余り味がしない食品添加物の乳酸カルシウム [$\text{Ca}(\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $M=308.30$ g/mol, 人工イクラの実験で使用、食品添加物としての許容添加量は製品の 1% 未満, キシダ ¥2970/500 g] を添加することを思い付いた。8% 溶液であるので 2 倍にし、920 mL で計算すると Ca^{2+} ($M=40.07$ g/mol) で 32.7 mg, 乳酸カルシウムで 252 mg になる。取りあえず乳酸カルシウム 0.20 g, 0.40 g (Ca^{2+} で 26 mg, 52 mg 相当) を添加して実験を行った。結果を表 4 に示す。

乳酸カルシウムの添加により顕著な糊化時の粘度低下があり、0.20 g より 0.40 g の方が低下した。糖化時



写真 7 糊化後の冷却で観察されるコーンスターチの老化と濃縮生成物。左上: 94℃で氷水中に入れたところ、右上: 53℃まで冷却したところ、左下: 右上のものを氷水中から取り出してかき混ぜて 50℃ になったところ。右下: コーンアルファ Y の糖化反応物を濃縮して得られたペースト状の生成物。

のヨウ素デンプン反応やゼリーの消失が無添加の場合より早く、糊化が良好で、pHなどの酵素反応条件が良いことが推定された。濃縮前の糖化物には沈殿が見られたが、沸とう後10-15分で大量のアクが生成し、液は透明になった。この時点でアク取りをすれば、後のアク取りは不要と推測された。得られた水あめの味は無添加のものと変わらなかった。なお、1.25倍（カタクリ粉100 g、酵素0.50 g、乳酸カルシウム0.50 g）の条件でも同様の水あめ100 g（広口瓶89.95 g、鍋残り10 g）が得られたが、糊化時の粘度が大きくなり、ヨウ素デンプン反応やゼリーの消失が遅くなった。

以上の結果から、乳酸カルシウムを添加すれば、カタクリ粉の糊化時の粘度が低下し、全体を良好に糊化させることができ、その後の糖化反応もヨウ素デンプン反応の消失も早くなった。濃縮時のアク取りも簡単になり、無添加のものと変わらない味の水あめができると分かった。今後、ほかのデンプンでも調査したい。

VII. おわりに

コロナ禍で、出前実践が不可能になり、対面の卒業実験の指導も大きく制約される状況下、将来を見据え、出前実験を含む、化学教材実験を、遠隔授業やオンライン講座に対応して実施可能なコンテンツを開発する

表4 ジャガイモに乳酸カルシウムを添加した結果

乳酸カルシウム(g)	0.20	0.40	0.40	0.40
糊化開始温度(°C)	63	65	65	65
糖化終了時の糖度	8.0	7.8	8.0	7.8
濃縮前の質量(g)と糖度	903 8.0°	875 8.0°	870 8.0°	911 -
濃縮前の pH	-	5.77	5.73	5.80
分取した糖化反応物の質量(g)	-	16.22	15.41	11.64
約 1/8(18分)濃縮時の質量(g)と糖度	113 63.0°	109 65.5°	(623) - 120 -	114 61.0°
茶こしに残ったアクと濃縮液(g)	3.08	3.16	(2.34) 2.97	2.45
糖度測定で、糖度計、ピペットに残った濃縮液(g)	0.03 0.22	0.07 0.34	0.03 0.15	-
最終濃縮質量(g)	83-3	83-5	83-1	83-4
水あめの糖度	84.5°	83.5°	83.8°	82.5°
水あめの質量(広口瓶)(g)	67 67.04	62 62.39	69 68.61	70 70.50
水あめの質量(鍋に残ったもの)(g)	11	14	11	8
糖度測定で、糖度計、ピペットに残った水あめ(g)	0.33 1.12	0.22 1.08	0.30 1.17	0.16 1.04
水あめの総収量(g)	78	76	80	78
ゼリー残存の有無	無	無	無	無
消失時間(min)	20	24	32	27
水あめの固さ	良好	少し柔らかい	少し柔らかい	少し柔らかい

ことは喫緊の課題であろう。食品関係の実験は自宅の台所でできる可能性があり、身近で入手困難な食品製造用アミラーゼなど、若干の器材を提供すれば、実施可能であろう。今後、自宅のできる実験キットを開発し、実験操作の様子を動画としても提供していきたい。同様に、出前実験の化学マジック演示についても、演示の様子を動画として提供できるようにするほか、入念な感染防止対策を施した対面形式の演示方法を検討、実施していきたい。安全に実験ができる化学マジック実験キットの開発・提供も検討したい。

謝辞

本研究は2018-2020年度科学研究費補助金基盤C一般(課題番号18K02934)により財政的に御支援いただきました。実験法の開発を行った家政実験準備室の使用をお許しいただいた本学家庭科教育講座の板倉厚一教授に深く感謝いたします。実験に使用したコーンスターチY、コーンアルファY、及びワキシースターチYは三和澱粉工業株式会社から、御供与いただきました。厚く御礼申し上げます。

文献

- 以下のWebサイト(2020年09月20日閲覧)
愛知教育大学研究者総覧>理科教育講座(化学分野)>戸谷義明の「論文」、及び「社会活動」。
<http://souran.aichi-edu.ac.jp/person/bd4c9ab730f5513206b999ec0d90d1fbja.html>
- 戸谷義明, 山名賢治, 鈴木喜隆, “理科が役に立つことができる化学教材実験集”, 愛知教育大学, 刈谷, 2012. ISBN:9784903389592
- 戸谷義明, 山名賢治, 跡部昌彦, 鈴木喜隆, “理科が役に立つことを実感できる化学教材実験集II ~個別指導体験型実験~”, 愛知教育大学, 刈谷, 2016. ISBN: 9784903389677
- 戸谷義明, 山名賢治, 鈴木喜隆, “理科が役に立つことを実感できる化学マジック実験集”, 愛知教育大学出版会, 刈谷, 2018. ISBN: 9784903389783
- Yoshiaki TOYA, Kenji YAMANA, Nobutaka SUZUKI. Translated by Kazuharu IENAGA and Co-authors. Edited by Yoshiaki TOYA, “You can realize that “Science” is useful! Chemical Magic Demonstrations”, Aichi University of Education Press, Kariya, 2019. ISBN: 9784903389868
- 戸谷義明, 平岩大作, 愛知教育大学研究報告2020, 69 (自然科学編), 33-43.
- 戸谷義明, 愛知教育大学研究報告2014, 63 (自然科学編), 41-51.
- 戸谷義明, 愛知教育大学研究報告2015, 64 (自然科学編), 21-29.
- 小倉徳重, 調理科学1973, 6(2), 76-87.
- 二國二郎 監, 中村道徳 編, 鈴木繁男 編, “澱粉科学ハンドブック”, 朝倉, 東京, 1977. ISBN: 4254430124
- 高橋禮治, 高橋幸資, “でん粉製品の知識”, 幸書房, 東京, 2016. ISBN: 9784782104057
- 河田昌子, “お菓子の「こつ」の科学”, 柴田書店, 東京, 1987, p 33表1-10. ISBN: 9784388250806
- 文献11, p 68.
- 日本食品標準成分表2015年版(七訂).
- 渡辺長男, “菓子の科学”, 同文書院, 東京, 1980, pp193-196, p 195図13.
- 文献10, pp 39-42. 文献11, p 111表3.8.

(2020年9月24日受理)