

# 事業結果要約報告書

受付番号

2024 KJ-017

—科学技術振興関係—

公益財団法人 **マツダ財団** 御中

令和7年 8月14日

所属機関名 島根県立松江東高等学校

申請代表者 原 誠実

役 職 教諭

フリガナ ハラ マサミ

氏 名 原 誠実 印

(TEL: 0852-27-3700)

マツダ財団から受けた 助成金105千円 による事業結果について、  
次のとおり報告します。

助成事業名

糖類の熱的挙動に関する研究 ～カルメ焼きはなぜスクロースを使うのか?～

(事業期間: 令和6年6月1日～令和7年8月14日)

	計 画	実 施 結 果
事業内容	<p>日時 令和6年6月1日～令和7年6月1日</p> <p>場所 島根県立松江東高等学校化学実験室</p> <p>対象 自然科学部の生徒3名</p> <p>定員 なし</p> <p>内容 カルメ焼きづくりで観察される糖類の熱的挙動に関わる様々な物理・化学的現象を、熱分析的手法を用いて探究的に明らかにし、操作や条件の科学的意味を考察する。</p>	<p>日時 令和6年6月1日～令和7年8月14日</p> <p>場所 島根県立松江東高等学校化学実験室</p> <p>対象 自然科学部の生徒3名</p> <p>参加者(人)内訳 (小中高の先生; 1人) (生徒; 3人)</p> <p>内容 カルメ焼きづくりで観察される糖類の熱的挙動に関わる様々な物理・化学的現象を、熱分析的手法を用いて探究的に明らかにし、操作や条件の科学的意味を考察する。</p> <p>講演; 0件、発表; 3件、シンポジウム; 0件</p>

## 1. 事業の目的・ねらい

理科教育では、科学的な概念や法則を日常生活で観られる物理・化学的現象と関連づけながら理解し、新たな知識の獲得や、科学的なものの見方および考え方を習得することが求められている。そのため、従来から日常生活と関連深い素材を用いた化学教材が提案されている。そのような化学教材の一つに「カルメ焼きづくり」がある。カルメ焼きは砂糖菓子的一种であり、スクロースの融液に炭酸水素ナトリウムを加えて攪拌すると膨らみ、固まることでできる。そのため、「カルメ焼きづくり」の学習活動は、従来から中学校「理科」において炭酸水素ナトリウムの熱分解反応に関係づけて用いられてきた。糖は温度変化に伴い、脱水、ガラス転移、結晶化、融解など様々な熱的挙動を示すことが報告されている。そのため、「カルメ焼きづくり」の工程には、糖類の熱的挙動に関わる様々な物理・化学現象が関与していると考えられ、各工程における操作や条件の科学的意味を理解させる探究的な化学教材としてのさらなる活用が期待される。そこで、本事業では本校の自然科学部の生徒を対象に、カルメ焼き工程で観られる様々な物理・化学的現象を種々の熱分析的手法を用いて探究的に明らかにするプロセスを体験させることを考えた。科学的な思考の様式を学習させるとともに、化学の学習に対する興味・関心を喚起することを目的とした。また、探究の成果を学会等で発表し、化学に携わる大学の先生や研究者と情報や意見の交換を行うことで、大学で学ぶ化学の内容にも興味を持たせることを目指した。

## 2. 事業の概要

カルメ焼きづくりの工程で観られる様々な物理・化学的現象を明らかにすることを目的に、生徒に実験方法の立案から実施、データの解析・考察までの一連の探究活動を行わせた。この過程を通じて、生徒は課題設定、仮説の構築、実験計画、結果の考察といった科学的探究のプロセスを体系的に学習した。さらに、成果を外部で効果的に発信するため発表用プレゼンテーション資料およびポスターの作成に取り組み、論理的な説得力、視覚的な表現力、時間配分や質疑応答への対応力といった研究発表に必要な資質・能力の育成を図った。こうして得られた成果を、島根大学で開催された高大連携課題研究発表会および高等学校文化連盟自然科学部専門部研究発表会の化学部門において発表し、他校生徒や大学関係者との意見交換を通じて、さらなる探究意欲と科学的視野の拡大につながった。

## 3. 成果・効果

### 3.1 研究的成果と教育的意義

カルメ焼き工程で観られる3つの現象：(1) スクロース-水混合物の熱的挙動、(2) カルメ焼き工程での炭酸水素ナトリウムの熱分解、および、(3) スクロースの結晶化をもとに、3つの工程に分類し、それぞれの工程で観られる物理・化学的現象を温度測定、質量変化の追跡、および顕微鏡による形態観察などの熱分析的手法を用いて追跡した。その結果、スクロース-水混合物ではカラメル化を起こすことなくスクロースを融液にできること、炭酸水素ナトリウム添加時には分解と結晶化の進行に伴う発熱が急激な温度上昇を引き起こすことを確認した。また、水や卵白の添加が炭酸水素ナトリウムの分解速度を著しく加速することを明らかにし、卵白中の水(約89%)が触媒的役割を果たすことを解明した。さらに、結晶化は適切な水分量を保持した140℃前後で促進され、過剰な水分やカラメル化生成物は結晶化を阻害することも明らかにした。これらの知見を応用し、スクロース以外の糖(トレハロース・ラクトース)を用いたカルメ焼きづくりの条件最適化にも取り組んだ。従来条件では失敗したが、電子レンジによる高速昇温や水分量の調整によってカルメ焼きづくりに成功し、糖の化学的性質に応じた加熱条件設定の有効性を示した。この成果は、食品加工や材料科学における加熱プロセス設計にも応用可能な新たな知見である。

教育的観点では、中学校理科の教科書でも取り上げられる「身近なお菓子づくり」を素材に設定したことで、生徒が興味関心を持ちながらも高度な科学的分析手法に挑戦できる環境を提供した。実験方法の立案から測定・解析、考察、さらにポスター・プレゼンテーション資料の作成に至るまでの全工程を生徒主体で進めることにより、科学的探究の一連のプロセスを実践的に学ばせることができた。また、研究成果を外部発表する経験を通じて、論理的表現力および質疑応答能力といった研究発表に必要な資質・能力の育成にも大きく寄与した。

### 3.2 発表・受賞実績

#### (1) 島根大学主催 高大連携課題研究発表会

本研究の初めての対外発表の機会として参加した。発表後の質疑応答では、想定外の質問にうまく答えられない場面があり、生徒は自身の説明力や理解の不足といった課題を自覚した。この経験は、その後の発表準備や自己研鑽の大きな契機となった。

#### (2) 島根県高等学校文化連盟自然科学専門部研究発表会(化学部門)

口頭発表およびポスター発表の両部門に参加した。口頭発表部門において最優秀賞を受賞、ポスター発表部門において優秀賞を受賞した。この結果、化学部門の島根県代表として、全国高等学校総合文化祭への出場が決定した。

#### (3) 全国高等学校総合文化祭(かがわ総文)化学部門 口頭発表

全国規模の発表会において自信を持って研究内容を発表し、質疑応答にも的確に対応することができた。発表要旨は別紙に示す。全国の高校生や専門家との交流を通じて、さらなる探究意欲と科学的視野の拡大につながった。

(別紙)

様々な糖を用いたカルメ焼きの作製法の検討  
-電子レンジによる高速昇温-

島根県立松江東高等学校 自然科学部

## 1 動機及び目的

融けた砂糖(スクロース)に炭酸水素ナトリウムを加えて攪拌すると膨らみ、カルメ焼きができる。カルメ焼きづくりは難度の高い実験で、水の量や加熱温度など様々な条件のコントロールが必要である。そのため、カルメ焼きづくりの操作や条件の科学的意味を明らかにすることで、糖を用いた食品の適切な加工条件を検討するための重要な情報が得られる可能性がある。そこで、本研究では、カルメ焼きづくりで観られる様々な物理的・化学的現象を、温度測定と形態観察により調べ、考察した。その結果をもとに、スクロース以外の糖を用いたカルメ焼きの作製法を検討した。

## 2 方法

### 2.1 カルメ焼きづくりの操作や条件の科学的意味を明らかにする実験

#### (1) カルメ焼きづくりの工程に関わる物理的・化学的現象を明らかにする実験

スクロース 30 g と水 5 g を混合し、おたまに入れ、ガスコンロを用いてカルメ焼きづくりを行った。カルメ焼きづくりでは経験的に、炭酸水素ナトリウムに卵白を混ぜるため<sup>1)</sup>、炭酸水素ナトリウムと卵白を質量比で 2:7 の割合で混合し、重曹卵として実験に用いた。加熱に伴う試料の温度変化を、熱電対とデータロガーを用いて記録した。また、加熱に伴う試料の状態変化を USB デジタル顕微鏡で同時に記録した。

#### (2) 糖の融解に水が及ぼす影響を調べる実験

スクロース 30 g をステンレス皿にのせ、ホットプレートを用いて室温から約 200°Cまで加熱し、温度変化を記録した。同様の条件でスクロースと水の混合物(30 g : 5 g)を加熱した。温度曲線と試料の状態変化を比較することで水が及ぼす影響を調べた。また、110°C-160°Cの範囲で 10°Cごとにスクロースと水の混合物の質量を記録することで、加熱に伴う水分量の変化を調べた。

#### (3) 炭酸水素ナトリウムの分解に水と卵白が及ぼす影響を調べる実験

炭酸水素ナトリウム 2.5 g を試験管に入れ、ビーカー、サラダ油、及びホットプレートからなるオイルバスを用いて、約 130°Cで加熱した。発生した気体を水上置換法で捕集し、2 mL ごとに経過時間を記録した。また、試験管に熱電対を差し込み、温度を同時に記録した。炭酸水素ナトリウム

と水の混合物(2.5 g : 1.0 g)及び重曹卵を用いて同様の条件で実験を行った。

#### (4) 糖の結晶化に水とカラメル化が及ぼす影響を調べる実験

実験(1)と同様の条件でスクロースと水を混合して加熱し、110°C、140°C、及び 170°Cのスクロース融液を作製した。これらの融液に重曹卵を加えたときの温度変化を記録し、形態観察を行った。

### 2.2 様々な糖を用いたカルメ焼きの作製実験

スクロース、トレハロース二水和物、ラクトース水和水及びマルトース水和水をそれぞれ水と一定の割合で混合し、ビーカーに入れ、電子レンジを用いて 300 W または 500 W で一定時間加熱した。得られた糖の融液の温度を記録した後、重曹卵を加え、カルメ焼きを作製した。

## 3 結果と考察

### 3.1 カルメ焼きづくりの物理的・化学的現象

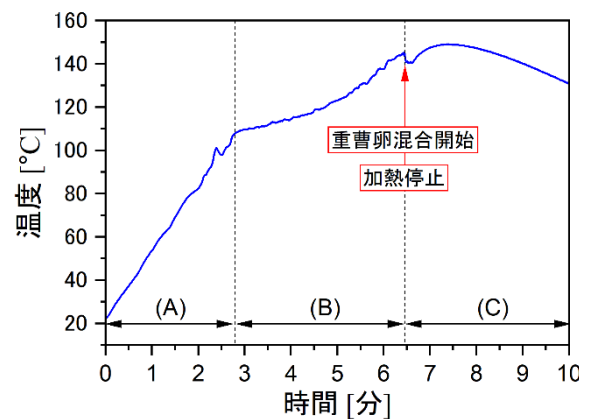


図 1 スクロースを用いたカルメ焼きづくりの温度曲線(実験(1))

図 1 はスクロースと水の混合物を 140°Cまで加熱し、重曹卵を混合してカルメ焼きを作製したときの温度曲線を示す。スクロースと水の混合物を加熱すると、約 110°Cまで急激に温度が上昇し(領域(A))、その後、緩やかになった(領域(B))。重曹卵を混合すると温度が一時的に低下したが、二酸化炭素の発生と、続く融液の結晶化に伴って急激に温度が上昇した(領域(C))。その後、緩やかに温度が低下した。形態観察の結果、領域(B)において 110°Cより水の沸騰が確認された。水の蒸発熱によって、温度上昇が緩やかになったと考えられる。領域(C)において、重曹卵の混合に伴って融液が白濁し、膨らんだ。ここでは、炭酸水素ナトリウムの分解とスクロースの結晶化が進行したと考えられる。そのため、温度曲線にみられる急激な温度上昇は、結晶化に伴う発熱によると考えられる。

### 3.2 カルメ焼きづくりに水が及ぼす影響

スクロースのみを加熱すると、約 170°Cで融解した。また、濃い茶色へと変化した。これはカラメル化とよばれる糖の分解反応であり、この温度

付近で融解と同時に起こる事が明らかになった。スクロースと水の混合物を加熱すると、100℃を超えて水の蒸発が進行しても結晶は析出せず、液体のままだった。そして、約 170℃よりカラメル化が進行した。表 1 にスクロースと水の混合物を 110℃から 160℃の範囲で異なる温度まで加熱し、加熱前後の質量から求めた水の減量率を示す。

表 1 加熱温度と減量率の関係(実験(2))

温度[℃]	110	120	130	140	150	160
減量率[%]	-38	-58	-77	-83	-85	-94

140℃以上のスクロース融液には、水はほとんど含まれておらず、過冷却液体に近い状態であると考えられる。これらの結果より、スクロースに水を加えて加熱することで、カラメル化を起こすことなく水をわずかに含んだ融液にできることが明らかになった。そこで、融液に含まれる水が炭酸水素ナトリウムの分解に及ぼす影響を調べた。

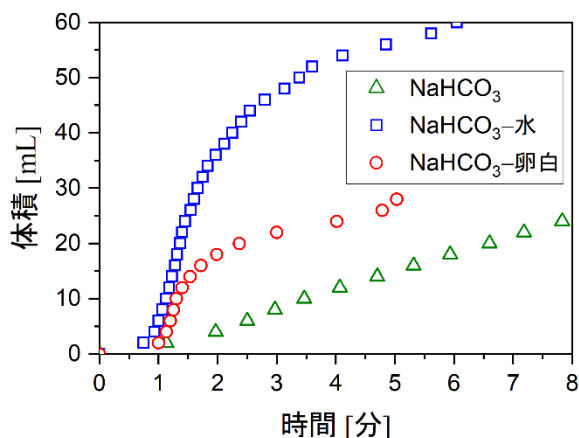


図 2 炭酸水素ナトリウム (NaHCO<sub>3</sub>) の分解速度の比較: (△) NaHCO<sub>3</sub>、(□) NaHCO<sub>3</sub> と水の混合物、及び(○) NaHCO<sub>3</sub> と卵白の混合物(実験(3))

炭酸水素ナトリウムに水を混合すると、分解速度が大きくなることが明らかになった(図 2)。炭酸水素ナトリウムに卵白を混合して実験した結果、水を加えたときと同様に分解が加速した。卵白を加熱し、加熱前後の減量率から水分量を計算した結果、卵白には 89%の水が含まれることが明らかになった。そのため、卵白は炭酸水素ナトリウムに水を供給し、分解を触媒すると考えられる。

### 3.3 結晶化に水とカラメル化が及ぼす影響

図 3 にスクロースと水の混合物を異なる温度まで加熱し、重曹卵を加えたときの温度曲線を示す。140℃のスクロース融液では結晶化が進行し、結晶化による発熱が確認された。しかし、110℃及び 170℃の融液では結晶化が進行せず、発熱も確認されなかった。そのため、加熱不足によって融液中に残った過剰な水分や、過熱に伴うカラメル化の分解生成物は結晶化を阻害すると考えられる。

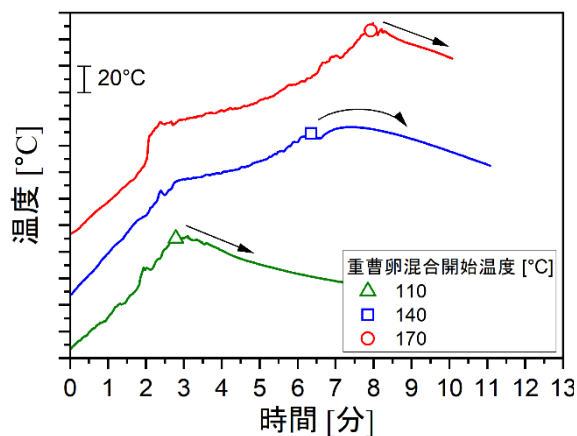


図 3 異なる温度で重曹卵を加えてカルメ焼きを作製したときの温度曲線(実験(4))

### 3.4 様々な糖を用いたカルメ焼きづくり

これらの研究結果をもとに、スクロース以外の糖を用いたカルメ焼きの作製法を検討した。実験にはスクロースと融点の近い二糖類(トレハロース・ラクトース・マルトース)を用いた。はじめに、実験(1)と同様の条件でカルメ焼きづくりを行った結果、すべて失敗した(表 2)。

表 2 失敗の詳細

トレハロース	・125℃で融液がすべて結晶化
ラクトース	・水に溶けにくい ・温度上昇に時間がかかり、その間にカラメル化が進行
マルトース	・重曹卵を加えて結晶化しない

そこで、加熱途中の融液の結晶化や長時間の加熱によるカラメル化の進行を防ぐ方法として、電子レンジによる高速昇温を考えた。また、それぞれの糖の化学的性質に応じて条件を調整した。

#### (I) トレハロース二水和物のカルメ焼き

水和物であることを考慮し、水を 4 g に減らした。電子レンジを用いて 300 W で 150 秒加熱した融液は結晶化することなく 130℃に達し、カルメ焼きづくりに成功した。

#### (II) ラクトース一水和物のカルメ焼き

水和物であるが、溶解度が小さいため水を 15 g に増やした。その結果、500 W で 140 秒間加熱した融液は、ほとんどカラメル化が進行することなく 117℃に達し、カルメ焼きづくりに成功した。

### 4 反省と課題

マルトースの融液に重曹卵を加えても十分に結晶化せず、カルメ焼きを作製することができなかった。結晶化の条件を探っていく必要がある。

### 5 参考文献

1) 山口晃弘、「物質の成り立ち」(中学校第 2 学年): 簡単? 簡単! 「カルメ焼き」、化学と教育、53 巻 2 号、2005、pp 84-85.