

化学発光で光の三原色を実現する探求型 STEAM 実験教材の開発と実践評価 ～光で体験する化学反応の世界～

加藤 綾子

奈良工業高等専門学校 教育研究支援室

1. はじめに

化学発光で光の三原色を実現する探求型 STEAM 実験教材を開発した。本開発では複雑な化学反応機構と目に見えないエネルギー移動について理解を深めることができる教材を目指し、化学発光の反応出発物質の選定、反応条件 (pH、溶媒、酸化剤、触媒) の検討、種々の蛍光色素から得られる発光色を用いた加法混色の検証を行った。また科学イベントの一般来場者と本校物質化学工学科の学生を対象に教材を実践し、教育効果を評価した。

2. 実験教材の開発

2.1 反応出発物質の選定と発光強度の評価

化学発光の反応出発物質としてルシゲニン、ルミノール、シュウ酸エステルが知られている。ルミノール発光は微光であることから、本開発ではルシゲニンとシュウ酸エステルを用いた化学発光について行った。

発光強度は、自作の暗箱内でデジタル照度計 LX-1108 と PC 接続・データ編集用ソフトウェア SW-E816 を用いて照度を 3 秒間隔で測定し、経時変化により評価を行った。

2.2 ルシゲニン化学発光の反応条件検討

ルシゲニンを用いた化学発光の反応条件の検討を行った。検討した反応条件を表 1 に示す。ルシゲニンをエタノール (EtOH) に溶解した 1 mg/mL ルシゲニン溶液 1 mL に水酸化ナトリウム (NaOH) 水溶液 1 mL を加え塩基性条件下にした後、酸化剤の過酸化水素 (H_2O_2) 1 mL を加え、酸化反応中の照度変化を測定した。加える NaOH 水溶液濃度により反応溶液の pH を 9,10,11,12,13,14 に調整し

表 1 ルシゲニン化学発光の検討反応条件

反応出発物質	ルシゲニン	1 mg/mL
溶媒 (出発物質溶解)	エタノール	1 mL
反応溶液 pH	9, 10, 11, 12, 13, 14	水酸化ナトリウム水溶液 1 mL 添加
酸化剤	3 %, 30 % 過酸化水素	1 mL

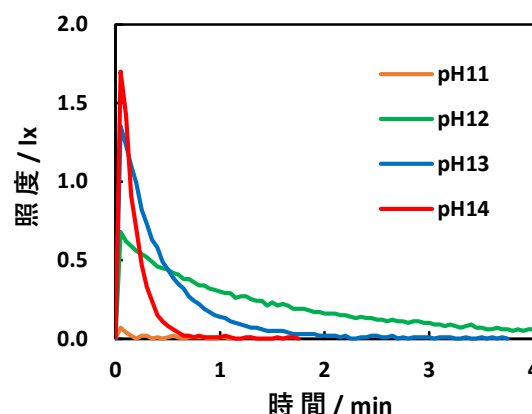


図 1 pH 変化による照度変化(ルシゲニン化学発光)

た。 H_2O_2 濃度は 3 % または 30 % を用いた。

反応の結果、pH10 以下では発光せず、pH11 以上で発光した。また、30 % H_2O_2 使用時の発光は瞬時に終了したことから、継続して発光する反応条件は pH11 以上で 3 % H_2O_2 を用いた酸化反応であることが分かった。pH11 以上での照度変化から、pH が高くなれば最高照度も高くなるが発光時間とは相反関係であることが示された (図 1)。

ルシゲニンを用いた化学発光では、実験目的に合った最高照度と発光時間を得るために反応溶液の pH を選択し、酸化剤としては 3 % H_2O_2 が適していることが分かった。

2.3 シュウ酸エステル化学発光の反応条件検討

シュウ酸エステルを用いた化学発光の反応条件の検討を行った。検討した反応条件を表 2 に示す。溶媒にフタル酸ジメチル (DMP) またはテトラヒドロフラン (THF) を用いた 4 mg/mL しゅう酸ビス (2,4,6-トリクロロフェニル) (TCPO) 溶液を調製し、蛍光色素【赤】のローダミン B を 1 mg/mL 濃度となるよう添加し溶解させた。この TCPO 溶液 1 mL に酸化剤の H_2O_2 を 1 mL を加え、酸化反応を起こした。 H_2O_2 濃度は 3 % または 30 % を用い、本反応における触媒使用の有無および使用する触媒の違

表2 シュウ酸エステル化学発光の検討反応条件

反応出発物質	しゅう酸ビス(2,4,6-トリクロロフェニル) (TCPO)	4 mg/mL
蛍光色素 【赤】	ローダミン B	1 mg/mL
溶媒 (出発物質・蛍光色素溶解)	フタル酸ジメチル (DMP) テトラヒドロフラン (THF)	1 mL
触媒	N/A 酢酸ナトリウム (SA) サリチル酸ナトリウム (SS)	— 0.2 mg/mL 0.2, 1, 2, 4, 10 mg/mL
酸化剤	3%, 30% 過酸化水素 (H ₂ O ₂)	1 mL

いによる酸化反応中の照度変化を測定した。触媒は酢酸ナトリウム (SA) またはサリチル酸ナトリウム (SS) を使用し、H₂O₂ にあらかじめ溶解し反応に作用させた。

反応の結果、溶媒に DMP を用いた場合は時間経過とともに酸化剤 H₂O₂ との二層化が見られ、THF を用いた場合は H₂O₂ と完全に混和した。反応溶液の二層化は、発光時間への影響 (短縮化) が考えられることから、溶媒として THF を選定した。

触媒未使用時の H₂O₂ 濃度の違いによる照度変化 (図2) と触媒使用時の照度変化 (図3) から、ルシゲニン発光と同様に実験目的に合った H₂O₂ 濃度と触媒を選択可能であることが分かった。

本教材では教材対象者の安全性の観点から、酸化剤として 3% H₂O₂ と触媒 SS の使用を選定した。また、3% H₂O₂ 使用時での SS 濃度の違いによる照度変化 (図4) から、本教材の使用目的としての SS 濃度は 2~4 mg/mL が適していることが分かった。

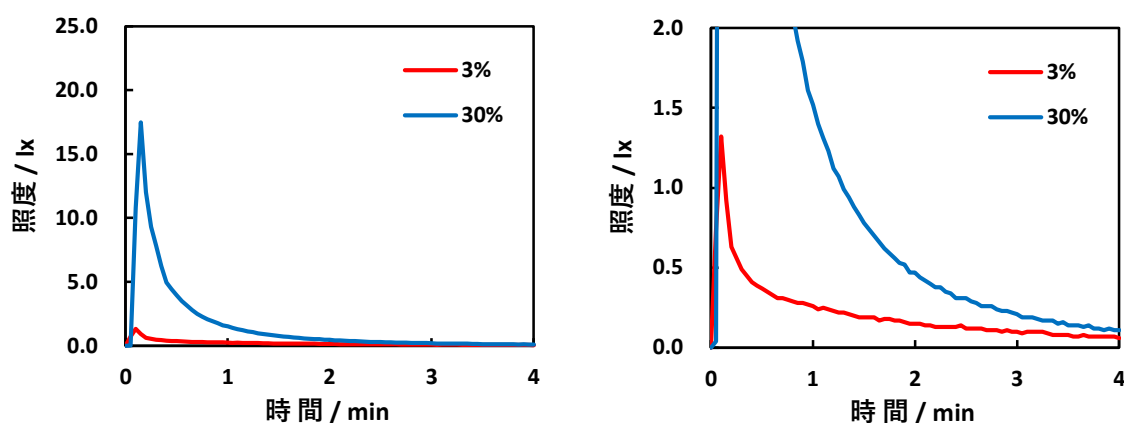


図2 H₂O₂ 濃度変化による照度変化 (シュウ酸エステル化学発光)

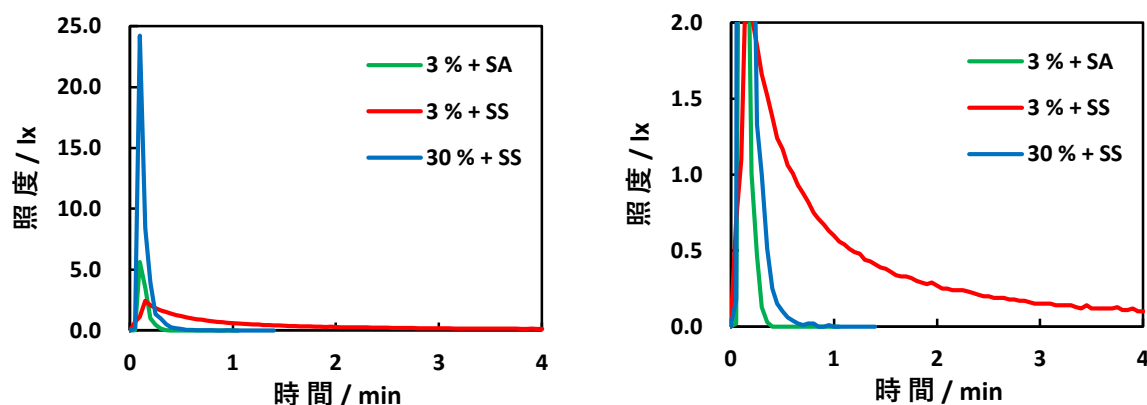


図3 触媒 (0.2 mg/mL) 使用時の照度変化 (シュウ酸エステル化学発光)

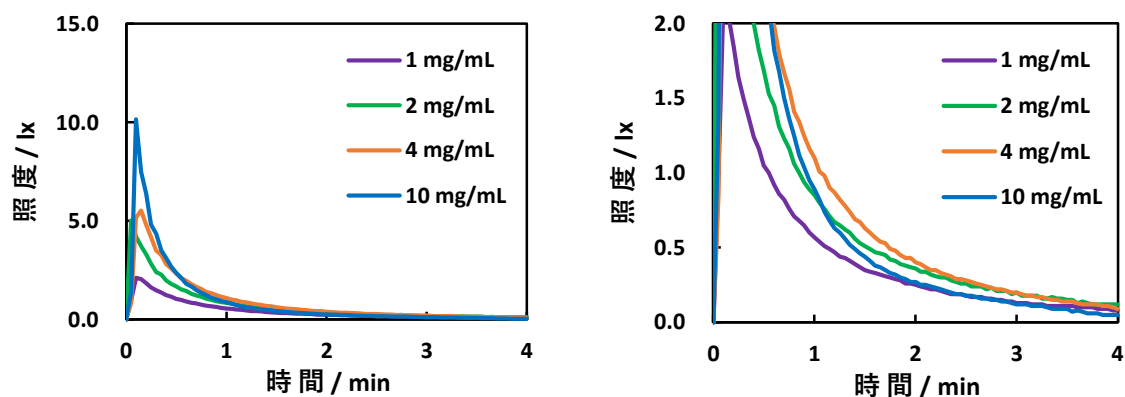


図4 SS濃度変化による照度変化（シュウ酸エステル化学発光）

2.4 蛍光色素を用いた加法混色の検証

シュウ酸エステルを用いた化学発光により赤、緑、青に発光させた反応溶液（図5）を用いて加法混色による光の三原色の実現を試みた。用いた蛍光色素と濃度を表3に示す。THFに溶解しにくいローダミンBはEtOHに一旦溶解しTCPO溶液に加えた。各色の反応溶液を適量混合することで紫、水色、薄黄、白を実現することができた（図6）。

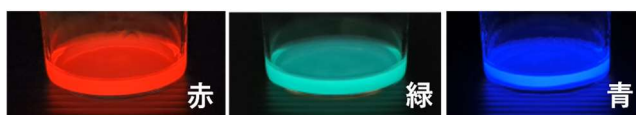


図5 シュウ酸エステルを用いた化学発光

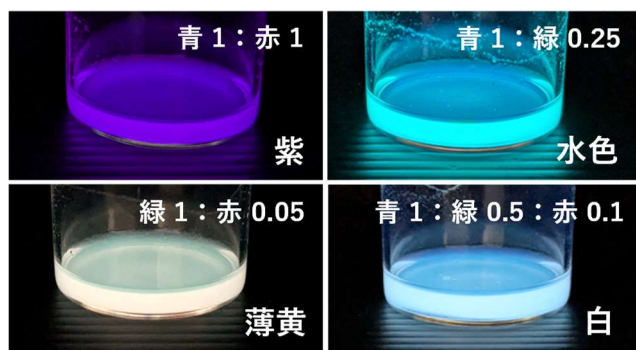


図6 光の三原色（加法混色）の実現と反応溶液混合比

3. 探求型 STEAM 実験教材の実践と評価

青少年のための科学の祭典 2024 奈良大会の一般来場者 36人と本校物質化学工学科2学年の学生 15

表3 蛍光色素

【赤】	ローダミンB	0.5 mg/mL
【緑】	9,10-ビス(フェニルエチニル)アントラセン	0.25 mg/mL
【青】	9,10-ジフェニルアントラセン	2 mg/mL



青少年のための科学の祭典2024奈良大会



奈良高専物質化学工学科（2年生）

図7 教材実践の様子

表4 実験教材の反応条件

反応出発物質	しゅう酸ビス(2,4,6-トリクロロフェニル) (TCPO)	4 mg/mL	
蛍光色素	【赤】	ローダミンB	0.5 mg/mL
	【緑】	9,10-ビス(フェニルエチニル)アントラセン	0.25 mg/mL
	【青】	9,10-ジフェニルアントラセン	2 mg/mL
溶媒 (出発物質・蛍光色素溶解)	テトラヒドロフラン (THF)	2 mL	
触媒	サリチル酸ナトリウム (SS)	3 mg/mL	
酸化剤	3% 過酸化水素 (H ₂ O ₂)	2 mL	

人を対象に本教材を実践した(図7)。教材は表4に示す反応条件で3色の発光色を観察した後、各色に発光した混合溶液を試行錯誤で適量混合し、光の三原色を実現する内容とした。化学実験に不慣れな一般来場者に分かりやすく実験操作を説明するための手順書(図8)と、複雑な化学反応機構と目に見えないエネルギー移動の理解を深めるための解説書(図9)を、それぞれ図解を用いて作成した。一般来場者には、安全メガネ、使い捨て手袋・エプロンの着用により安全性に配慮した。またPP製カップとPE製スポイトを実験器具として使用することで実験操作の疑似体験化を行い、一般来場者にも化

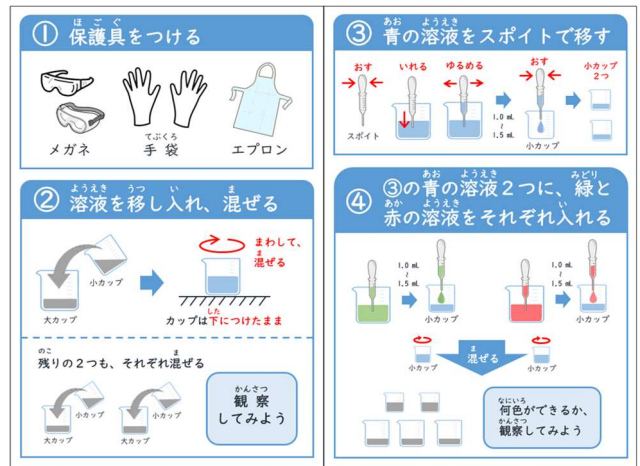


図8 実験操作の手順書

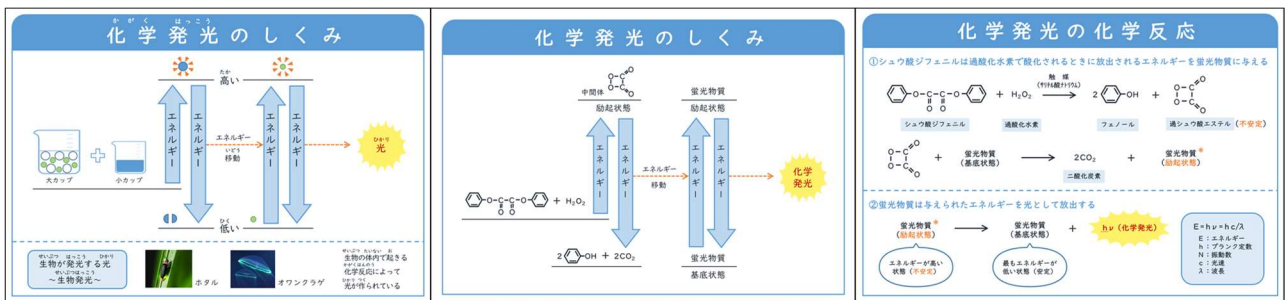


図9 化学発光の反応機構とエネルギー移動の解説書

一般来場者

高専2年生

「光で体験する化学反応の世界」アンケート	「光で体験する化学反応の世界」アンケート
<p>本日はご参加いただきありがとうございました。今後の参考とさせていただきますので、アンケートへのご協力をお願いします。</p> <p>1. 体験者情報について 【体験者の学年】 1. 幼児 2. 小学生(年) 3. 中学生(年) 4. 高校生(年) 5. 大学生 6. 大人</p> <p>2. 化学反応について 2-1. 「化学反応」という言葉を知っていましたか?学校で「化学反応」を習いましたか? 【言葉を知っていた】 1. 知っていた 2. 知らなかった 3. どちらか分からない 【学校で】 1. 習った 2. 習っていない 3. どちらか分からない 2-2. 身の回りの生活にも化学反応が存在していることを知っていましたか? 【存在を】 1. 知っていた 2. 知らなかった 3. どちらか分からない 2-3. 「化学反応にはエネルギー移動を伴うこと」を知っていましたか?学校で習いましたか? 【伴うことを】 1. 知っていた 2. 知らなかった 3. どちらか分からない 【学校で】 1. 習った 2. 習っていない 3. どちらか分からない</p> <p>3. 理科(化学)の授業や実験について 3-1. 学校の理科(化学)の授業は好きですか?理科(化学)の学習は楽しい(難しい)ですか? 【授業は】 1. 好き・好きだった 2. ふつう 3. きらい・きらいだった 【学習は】 1. 楽しい・楽しかった 2. ふつう 3. 楽しくない・楽しくなかった 【学習は】 1. 難しい・難しかった 2. ふつう 3. 楽しくない・難しくなかった 3-2. 今までに学校などで理科(化学)の実験をしたことはありますか?その実験は楽しかったですか? 【実験をしたことは】 1. ある 2. ない 3. どちらか分からない 【その実験は】 1. 楽しかった 2. ふつう 3. 楽しくなかった 3-3. 今までに学校などで、「色が変わる実験」や「光る実験」をしたことはありますか? 【色が変わる実験をしたことは】 1. ある 2. ない 3. どちらか分からない 【光る実験をしたことは】 1. ある 2. ない 3. どちらか分からない</p> <p>4. 今日の化学発光実験について 4-1. 今日の「色が変わる実験(透明→青色)」『光る実験(青緑赤の3色)』は楽しかったですか? 【今日の実験は】 1. 楽しかった 2. ふつう 3. 楽しくなかった 4-2. 今日の「色を混ぜて色が変わる(光の三原色)実験」は楽しかったですか? 【今日の実験は】 1. 楽しかった 2. ふつう 3. 楽しくなかった 4-3. 今日の実験を体験してみて、理科(化学)の学習や実験に興味を持っていましたか? 【興味】 1. 持った 2. 持たなかった 3. どちらでもない</p> <p>気づいたことや感想などがありましたら、ぜひご記入ください。</p> <p>ご協力ありがとうございました!</p>	<p>本日はご参加いただきありがとうございました。今後の参考とさせていただきますので、アンケートへのご協力をお願いします。</p> <p>1. 体験者情報について 【体験者の学年】 1. 幼児 2. 小学生(年) 3. 中学生(年) 4. 高校生(年) 5. 大学生 6. 大人</p> <p>2. 化学反応について 2-1. 「化学反応」という言葉を知っていましたか?学校で「化学反応」を習いましたか? 【言葉を知っていた】 1. 知っていた 2. 知らなかった 3. どちらか分からない 【学校で】 1. 習った 2. 習っていない 3. どちらか分からない 2-2. 身の回りの生活にも化学反応が存在していることを知っていましたか? 【存在を】 1. 知っていた 2. 知らなかった 3. どちらか分からない 2-3. 「化学反応にはエネルギー移動を伴うこと」を知っていましたか?学校で習いましたか? 【伴うことを】 1. 知っていた 2. 知らなかった 3. どちらか分からない 【学校で】 1. 習った 2. 習っていない 3. どちらか分からない</p> <p>3. 理科(化学)の授業や実験について 3-1. 学校の理科(化学)の授業は好きですか?理科(化学)の学習は楽しい(難しい)ですか? 【授業は】 1. 好き・好きだった 2. ふつう 3. きらい・きらいだった 【学習は】 1. 楽しい・楽しかった 2. ふつう 3. 楽しくない・楽しくなかった 【学習は】 1. 難しい・難しかった 2. ふつう 3. 楽しくない・難しくなかった 3-2. 今までに学校などで理科(化学)の実験をしたことはありますか?その実験は楽しかったですか? 【実験をしたことは】 1. ある 2. ない 3. どちらか分からない 【その実験は】 1. 楽しかった 2. ふつう 3. 楽しくなかった 3-3. 今までに学校などで、「色が変わる実験」や「光る実験」をしたことはありますか? 【色が変わる実験をしたことは】 1. ある 2. ない 3. どちらか分からない 【光る実験をしたことは】 1. ある 2. ない 3. どちらか分からない</p> <p>4. 今日の化学発光実験について 4-1. 今日の「色が変わる実験(透明→青色)」『光る実験(青緑赤の3色)』は楽しかったですか? 【今日の実験は】 1. 楽しかった 2. ふつう 3. 楽しくなかった 4-2. 今日の「色を混ぜて色が変わる(光の三原色)実験」は楽しかったですか? 【今日の実験は】 1. 楽しかった 2. ふつう 3. 楽しくなかった 4-3. 今日の実験を体験してみて、理科(化学)の学習や実験に興味を持っていましたか? 【興味】 1. 持った 2. 持たなかった 3. どちらでもない</p> <p>気づいたことや感想などがありましたら、ぜひご記入ください。</p> <p>ご協力ありがとうございました!</p>

図10 アンケート設問内容

学実験の楽しさを伝えた。

一般来場者と高専生にアンケートを実施し、教材を評価した。設問内容は対象者に合わせて変更した(図10)。アンケート結果(一部抜粋)を図11に示す。本教材は理科・化学を学習したことがない若しくは深く理科・化学を学んだことがない一般来場者にとっては理科・化学への興味を持つきっかけとなり、化学を専門に学んでいる高専生にとっては化学の勉強に対する動機付けとなったことが示された。また得られたコメントから、作成した解説と色合成の試行錯誤は複雑な化学反応機構と目に見えないエネルギー移動への理解を深めたと言える。

4. おわりに

シュウ酸エステルを用いた化学発光で光の三原色を実現する探求型STEAM実験教材を開発した。本教材では①生徒のワクワクを重視する、②様々な教科を横断的に活用する、③試行錯誤しながら問題解決をめざす学びの方法であるTEAM^[1]を化学実験に取り入れた。化学実験で最も興味を引く発光・変色

が観察できる化学発光実験(①)に、光の三原色(加法混色)を組合せ(②)、試行錯誤によって色を合成する(③)内容とした。複雑な化学反応機構と目に見えないエネルギー移動について理解を深めることができる教材を開発することができた。

参考文献

- [1] 「生徒の気づきと学び」を最大化するプロジェクト 第20回
- [2] 厚生労働省 職場のあんぜんサイト、
URL : <https://anzeninfo.mhlw.go.jp/>

謝辞

本研究は科学研究費補助金(奨励研究24H02479)の助成を受けて実施しました。実験教材の開発では本校物質化学工学科の亀井稔之教授から助言をいただき、教材評価の際には久保佳苗技術補佐員から支援を受けました。ここに深く感謝の意を表します。

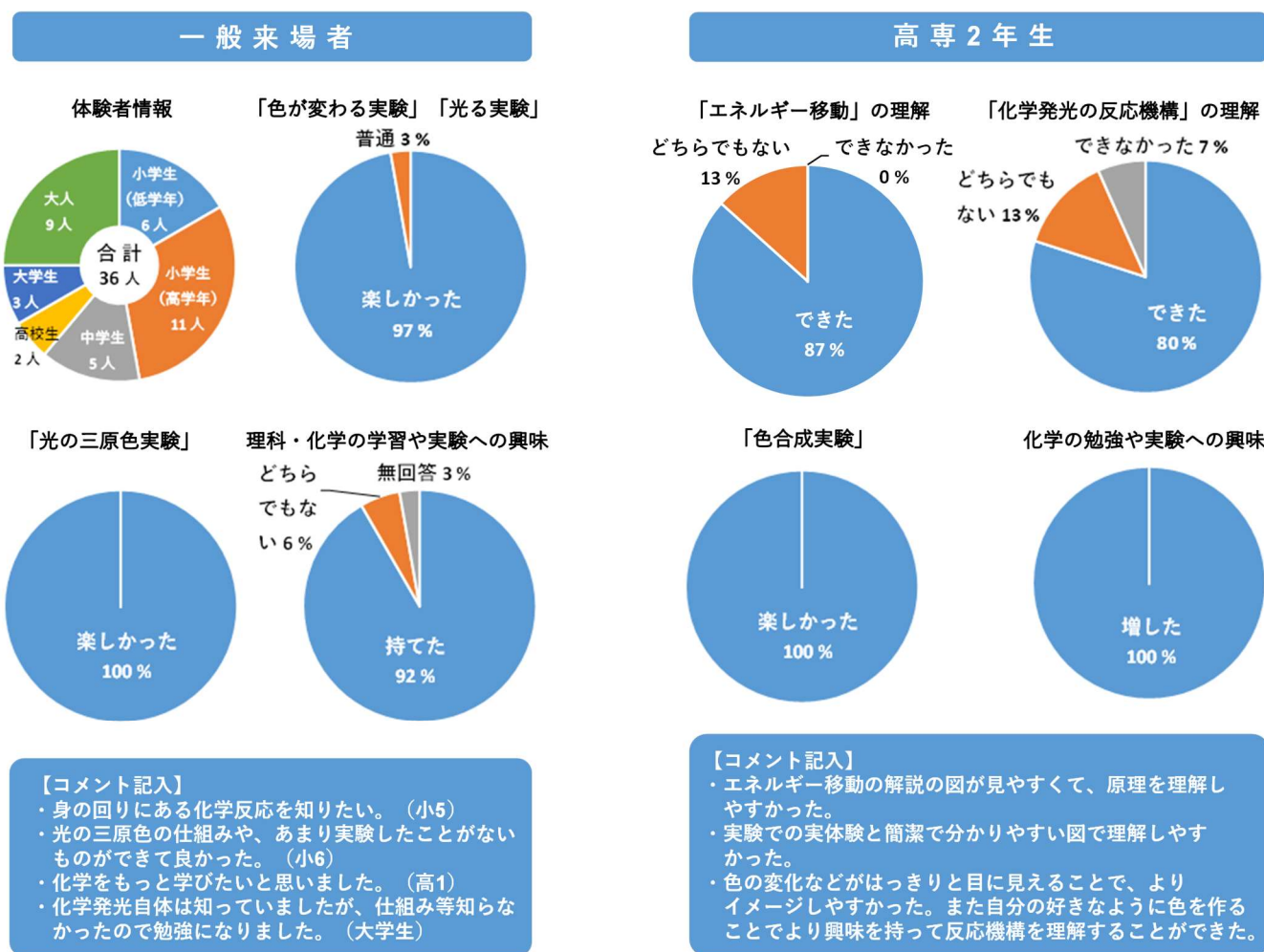


図11 アンケート結果(一部抜粋)