

光で見る化学 ～ホタルの光から最先端研究へ～

クリーンエネルギー研究センター 井上（安田）久美

はじめに

ホタルの光やケミカルライト（サイリウム）はどのようにして光っているのでしょうか。

私たちの身の回りには、さまざまな「光」があります。太陽や電球のように熱によって光るものもありますが、ホタルやケミカルライトは、化学反応によって光っています。このように、化学エネルギーが光エネルギーへ変換される現象を「化学発光」といいます。

一方で、電気を利用して化学反応を起こし、その結果として光を発生させる方法もあります。これは「電気化学発光（Electrochemiluminescence：ECL）」と呼ばれ、医療検査や環境分析、バイオセンサなどの最先端技術に利用されています。山梨大学では、電気化学発光を利用して、細胞同士のコミュニケーションを光として観察するための研究を行っています。

実は、化学発光も電気化学発光も「エネルギーを別の形へ変換する」という点では共通しています。

ホタルやケミカルライトでは： 化学エネルギー → 光エネルギー

電気化学発光では： 電気エネルギー → 化学エネルギー → 光エネルギー

という変換が起こっています。

私たちの暮らしを支える太陽電池や燃料電池も、同じようにエネルギーを変換する技術です。クリーンエネルギー技術を理解するためにも、「エネルギーがどのように姿を変えるのか」を知ることがとても重要です。



本テーマでは、化学発光と電気化学発光を観察し、「エネルギーが光へ変わる」様子を体験します。また、人間の目では見えないほど弱い光を高感度カメラで観察し、大学で行われている最先端研究とのつながりについても紹介します。

今日の実験を通して、「化学反応を光で見る」という体験を楽しみながら、化学が社会や研究にどのように役立っているのかを考えてみましょう。

実験を安全に行うために

- 動きやすく、汚れてもよい服装で参加してください。
- 実験中は必ず保護めがね（もしくは視力矯正眼鏡）を着用してください。
- 薬品を直接手で触らないでください。
- 薬品が皮膚や衣服についた場合は、すぐに担当者へ知らせてください。
(A 液③は服につくと色が落ちませんので、その点も注意してください)
- 実験中の飲食は禁止です。
- 発光観察のため室内を暗くします。移動時は周囲に注意してください。
- 実験室内にある装置や器具、薬品などにむやみに触らないようにしてください。
- 実験は必ず担当者の指示に従って行ってください。

その他の注意

- 実験の様子は自由に撮影いただけます。なお、他の参加者の顔など個人が識別できる写真や動画については、本人の了承を得た場合を除き、SNS やホームページ等への掲載はご遠慮ください。

実験を楽しむために

- 「考えてみよう」では正しい答えが書けなくても全く問題ありません。「考えてみる」ことが大切です。
- 疑問に思うことがあれば、いつでも質問してください。



実験 1 ホタルのように光る化学反応を見てみよう

実験の概要

ルミノールという物質は、酸化されると青白い光を放ちます。これは、警察の血液検査や化学発光実験でも有名な反応です。

本実験では、ルミノール溶液に過酸化水素などを加え、暗所で化学発光を観察します。

また、蛍光物質を添加剤として加え、色の違いを観察します。

実験上の注意

・ルミノールはアルカリ性条件で発光しやすくなります。そのため、A 液は強いアルカリ性に調製されています。試薬が皮膚や目に入らないよう注意してください。万一、付着した場合は、速やかに大量の水で洗い流してください。

観察ポイント

- どのような色に光るか？

- 光の強さはどう変化するか？

考えてみよう

化学反応によって放出されたエネルギーは、どのようにして光へ変換されているのでしょうか？なぜ熱ではなく「光」が出るのでしょうか。

実験してみよう！

準備

- 保護メガネと手袋を着用する
- A 液が入った試験管 4 本（①～④）を受け取る（こぼさないように注意しましょう）

手順①

試験管の中には、以下の溶液が入っています。

A 液① ルミノール

A 液② ルミノール＋蛍光物質（フルオレセイン Na）

A 液③ ルミノール＋蛍光物質（ローダミン B）

A 液④ 蛍光物質（フルオレセイン Na）のみ

まず、液体の色や様子を観察してみましょう。

観察結果

色：① _____ ② _____ ③ _____ ④ _____

その他、気づいたこと：

なお、B 液は 3%過酸化水素水＋触媒（フェリシアン化カリウム）です。

手順②

部屋を暗くします。

担当者の合図で、

B 液

を「A 液①」の試験管にスポイトで数滴加えます（試験管内の溶液量が 2 倍になるくらい）。

手順③

軽く振って混ぜます。

どのような変化が起こるのでしょうか？よく観察してください。

一旦部屋を明るくします。

観察結果

☐ 光らなかった ☐ 光った 発光の色： _____

光の強さ：☐ とても強い ☐ 強い ☐ 弱い 何秒くらい光ったか： _____

光はどのように変化しましたか？

考えてみよう

Q1. なぜ光ったのでしょうか？

- ☐ 化学反応によって熱が発生したから
- ☐ 化学反応によって高いエネルギー状態の分子ができたから
- ☐ わからない

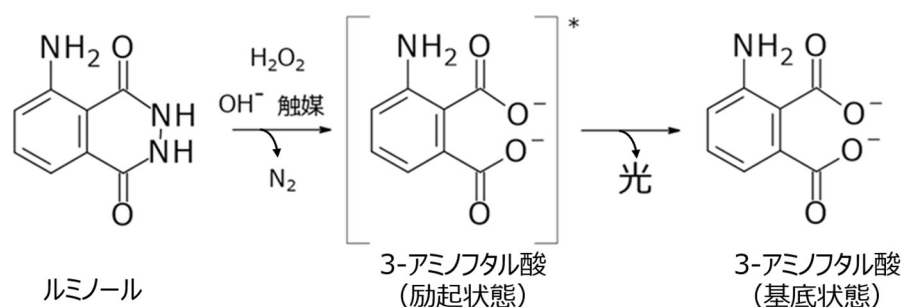
Q2. 光になる前のエネルギーは、どのような形で蓄えられていたのでしょうか？

- ☐ 熱エネルギー
- ☐ 化学エネルギー
- ☐ 電気エネルギー
- ☐ 光エネルギー

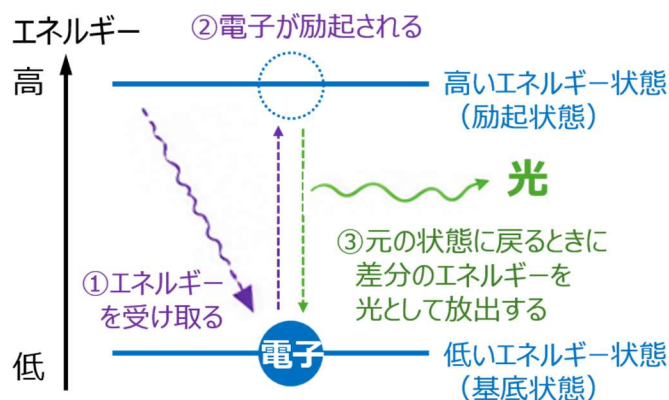
Q3. ホタルの光と、この実験の光は、どちらも「エネルギーの変換」によって生じています。どのような共通点があると思いますか？

ミニ解説： ルミノールの化学発光

ルミノールはB液中の過酸化水素によって酸化され、次のような反応を経て発光します（*印は励起状態＝高いエネルギーの状態であることを表します）：



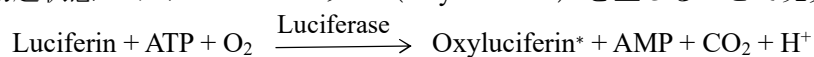
発光する分子の中では、電子が一時的に高いエネルギー状態（励起状態）になっています。電子が元の低いエネルギー状態（基底状態）に戻るとき、その差分のエネルギーが光として放出されます。



つまり、化学反応によって生じたエネルギーが光エネルギーへ変換されたといえます。

なお、ホタルはルシフェリン (Luciferin) が酸素と反応し、ルシフェラーゼ (Luciferase) の働きによ

って励起状態のオキシルシフェリン (Oxyluciferin*) を生じることで発光します。



手順④

次に、A 液②～④についても同じように実験します。

部屋を暗くします。

今度は、担当者は合図をしませんので、各自適当なタイミングで進めてください。

B 液

を「A 液②」の試験管にスポイトで数滴加えます。

軽く振って混ぜます。

どのような色に光るでしょうか？

A 液①と比べながら観察してください。

A 液③と A 液④についても同じように実験してください。

※A 液③は服につくと色が落ちないので、こぼさないように注意しましょう。

全員の実験が終わったところに部屋を明るくします。

観察結果

試験管 入っているもの	光ったか	発光の色	光の強さ
A 液① ルミノール	☐ 光った ☐ 光らなかった	_____	☐ 強 ☐ 中 ☐ 弱
A 液② ルミノール＋フルオレセイン Na	☐ 光った ☐ 光らなかった	_____	☐ 強 ☐ 中 ☐ 弱
A 液③ ルミノール＋ローダミン B	☐ 光った ☐ 光らなかった	_____	☐ 強 ☐ 中 ☐ 弱
A 液④ フルオレセイン Na のみ	☐ 光った ☐ 光らなかった	_____	☐ 強 ☐ 中 ☐ 弱

その他、気づいたこと：

考えてみよう

Q4. A 液①、A 液②、A 液③では、光の色に違いがありましたか？

Q5. A 液②と A 液③では、ルミノールに加えて蛍光物質が入っています。

なぜ光の色が変わったのでしょうか？

Q6. A 液④には蛍光物質のフルオレセイン Na だけが入っていて、ルミノールは入っていません。

B 液を加えたとき、光りましたか？その結果から、何がわかるでしょうか？

Q7. ケミカルライト（サイリウム）のように長く光らせるには、今回の実験に加えてどのような工夫が必要でしょうか？（複数選択可）（ヒント：今回のルミノール発光は、短い時間で一気に光りました。サイリウムは比較的弱い光を長い時間出し続けます。）

- ☐ 反応がゆっくりと進むようにする
- ☐ 反応が速く進むように温める
- ☐ 発光する物質を別のものに変える
- ☐ わからない

Q8. サイリウムには、青・緑・黄色・赤など、いろいろな色があります。今回の A 液②、A 液③で光の色が変わったことと、どのような共通点があるでしょうか？（ヒント：光る反応で生じたエネルギーが、別の色を出す物質に渡ると、見える色が変わります。）

ミニ解説： 蛍光物質

A 液②にはフルオレセイン Na、A 液③にはローダミン B が添加されています。これらは蛍光物質と呼ばれ、特定の波長の光を吸収して別の波長の光を放出する性質を持っています。

ルミノールの発光では、励起状態の 3-アミノフタル酸が基底状態へ戻る際に約 424 nm の青色光が放出されます。

フルオレセイン Na やローダミン B が共存している場合、この発光エネルギーの一部が蛍光物質へ移動します。エネルギーを受け取った蛍光物質の電子は励起状態となり、その後、基底状態へ戻る際にそれぞれ固有の波長の光を放出します。

蛍光物質（基底状態） + エネルギー → 蛍光物質*（励起状態）

蛍光物質*（励起状態） → 蛍光物質（基底状態） + $h\nu$ （光）

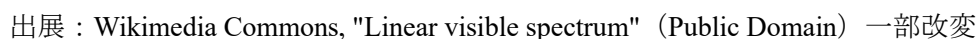
その結果、

フルオレセイン Na：黄緑色（約 520 nm）

ローダミン B：橙～赤色（約 580-600 nm）

の発光が観察されます。このような光の放出を「蛍光」と呼びます。今回の実験では、ルミノールから蛍光物質への「エネルギー移動」によって、もとのルミノールの発光とは異なる色の光が観察されました。

なお、光の波長と色にはおおよそ以下のような対応関係があります。ただし、人間の目は緑色付近の光に最も敏感で、青色や赤色の光は感じにくいため、実際に見える色は必ずしもこの通りとは限りません。



コンサートやイベントなどで使われるサイリウム（ケミカルライト）も、化学反応によって発光しています。

化学反応 → エネルギー → ~~光エネルギー~~ → 蛍光物質* → 蛍光物質 + $h\nu$ (光)

発展

実験を通して考えてみましょう。

[illegible]

実験の概要

一方、電気化学発光では、電池から供給された電気エネルギーを利用して化学反応を起こし、その結果として光が発生します。

※実験は TA が行います。

- どちらの電極が光るか？
- どの場所が光るか？
- 化学発光との違い
- スマートフォンではどのように見えるか？

考えてみよう

化学発光では「化学反応そのもの」がエネルギー源でした。

では、電気化学発光ではどこからエネルギーが供給されているのでしょうか？

実験してみよう！ ※この実験は TA が行います。

準備

- 発光溶液（ルテニウムビピリジン錯体と発光補助剤 DEEA の混合溶液）
- 白金電極 2 枚
- 1.5 V 乾電池

手順①

発光溶液の中に、白金電極が 2 枚入っています。

まず、どちらがプラス極、どちらがマイナス極につながるのか説明を聞きましょう。

予想

光るのは ☐ 溶液全体 ☐ プラス極側 ☐ マイナス極側 ☐ 両方の電極

手順②

部屋を暗くします。

TA が乾電池を接続します。

どのような変化が起こるのでしょうか？

手順③

発光の様子を観察します。

スマートフォンのカメラでも観察してみましょう。

観察結果

光ったのは：☐ 溶液全体 ☐ プラス極側 ☐ マイナス極側 ☐ 両方の電極 ☐ 光らなかった
発光の様子

化学発光との違い

考えてみよう

Q1. 電極は 2 本とも溶液に入っていたのに、発光の様子に違いが生じたのはなぜでしょうか？

観察ポイント

- 人の目では見えるか？
- 高感度カメラでは見えるか？

考えてみよう

私たちの目にも限界があります。

もし人間の目で見えない現象を調べたい場合、どのような方法が必要でしょうか？

実験してみよう！ ※この実験は TA が行います。

準備

- ルミノール溶液（実験 1 の A 液①）
- 1.5 V 乾電池と電極（プラス極側：ガラス状カーボン電極、マイナス極側：白金電極）
- 顕微鏡
- EM-CCD カメラ（顕微鏡についています）

手順①

ルミノール溶液を顕微鏡のステージ上に設置します。

2 本の電極をルミノール溶液に浸けます。

ガラス状カーボン電極（プラス極側）の表面に顕微鏡の焦点を合わせます。

まずは顕微鏡を「目で見えるモード」にします。

手順②

TA が電池を接続し、電気化学発光を起こします。

顕微鏡をのぞいてみましょう。※TA が代表でのぞいてくれます。

発光は見えるでしょうか？※TA が結果を教えてください。

手順③

次に顕微鏡をカメラモードへ切り替えます。

モニター画面を観察します。

手順④

電池を ON/OFF しながら観察します。

発光がどのように変化するのでしょうか？

観察結果

肉眼では ☐ 見えた ☐ 見えなかった
カメラでは ☐ 見えた ☐ 見えなかった
発光の様子

考えてみよう

Q1. 実験 1 では目で見えた発光が、実験 3 では見えなかったのはなぜでしょうか？

- ☐ 実験 1 とは異なる反応だから
- ☐ 電気化学反応は電極の近くでしか起こらないから
- ☐ 電極が光を吸収してしまうから
- ☐ 電気化学発光では光の色が違うから

Q2. 実験 2 のルテニウムビピリジン錯体の電気化学発光は肉眼で観察できましたが、実験 3 のルミノールの電気化学発光は肉眼では観察できませんでした。なぜでしょうか？

- ☐ ルミノールは電気化学発光しないから
- ☐ ルミノールの発光は紫外線だから
- ☐ ルミノールの電気化学発光は発光効率が低いから
- ☐ 実験 3 では DEEA を加えなかったから
- ☐ 実験 3 では電極が白金ではなかったから
- ☐ わからない

Q3. なぜカメラでは見えたのでしょうか？

- ☐ 顕微鏡を通したから
- ☐ カメラが光を作り出しているから
- ☐ EM-CCD カメラは、弱い光によって生じた電子を増幅できるから
- ☐ カメラの方が人間の目より大きいから
- ☐ わからない

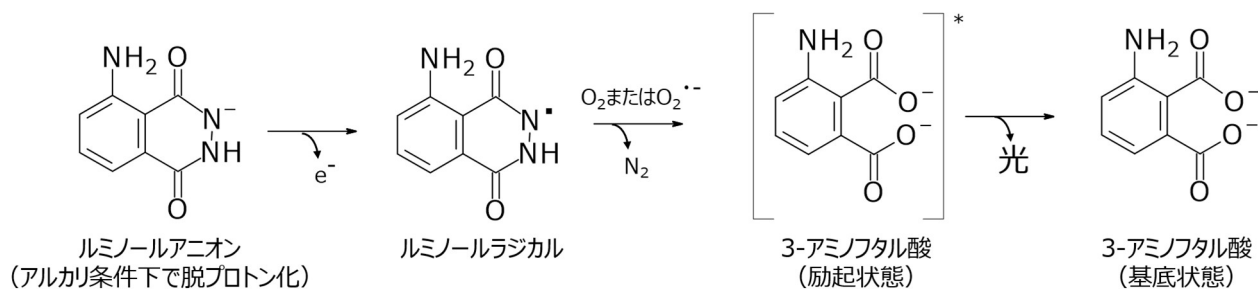
Q4. このような高感度カメラは、どのような研究に役立つと思いますか？

ミニ解説： ルミノールの電気化学発光

実験 1 では、ルミノールを過酸化水素との化学反应によって発光させました。

実験 3 で行ったように、ルミノールは、電極との電子のやり取りによっても発光することができます。

化学発光では、過酸化水素がルミノールを酸化することで発光が始まります。一方、電気化学発光では、電極へルミノールが電子を渡すことで発光反応が始まります。この反応は電極近傍でしか起こりません。電気化学発光での反応式を以下に示します（・は不対電子を持つ「ラジカル」を表す）。



このように、化学発光と電気化学発光では発光のきっかけは異なりますが、どちらも最終的には励起状態の分子が生成し、その分子が基底状態へ戻る際に光を放出します。

なお、実験 2 で使用したルテニウムビピリジン錯体と、実験 3 で使用したルミノールは、どちらも電気化学発光を起こします。しかし、同じ量の電気エネルギーを与えても、発生する光の強さは大きく異なります。これは、与えられたエネルギーが

が物質によって異なるためです。

ニ解説： EM-CCD カメラ

カメラの中では、光が当たると電子が発生します。しかし、光が非常に弱い場合には、発生する電子の数も少なく、そのままでは検出することができません。

光 → 電子 → 電子を増幅 → 画像

最先端研究とのつながり

例えば、

などに利用されています。

本テーマでは、

を体験しました。

ホタルの発光やケミカルライトは、化学反応によって光が生じる身近な例です。一方、同じ原理を応用した技術は、病気の診断、環境分析、バイオセンシングなどの最先端研究にも利用されています。

また、本日の実験で体験した「エネルギー変換」の考え方は、太陽電池や燃料電池などのクリーンエネルギー技術にも共通しています。

身の回りの現象の中にある化学の働きや、化学が未来の技術につながっていることを感じてもらえたら幸いです。