

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04989

研究課題名（和文）超高速時間分解計測・高度計算科学による酵素内反応追跡に向けた化合物最適化技術開発

研究課題名（英文）Development of compound optimization technology for tracking reactions within enzymes

研究代表者

樋山 みやび（Hiyama, Miyabi）

群馬大学・大学院理工学府・准教授

研究者番号：90399311

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：光解離型ケージドルシフェリンは、光照射によりホタル生物発光は基質であるルシフェリンを生成する化合物である。本研究では、当研究室にて独自に開発したケージドルシフェリンの合成方法を改良し、これまでよりも多く、さらに、純度の高い化合物の合成に成功した。この化合物への光照射から生成したD-ルシフェリンの分子数を発光量絶対値測定系により定量することで、ケージド化合物の定量的な評価方法を確立した。ケージドルシフェリンへの光照射実験を実施し、光開裂量子収率を決定した。また、ルシフェリンの脱プロトン化に対するX線吸収測定と、理論計算による帰属から、軟X線吸収計測の反応追跡への利用の可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で確立した方法により、新たに開発される光解離型ケージドルシフェリンの統一的な性能評価が可能になった。また、ホタル生物発光は薬剤動態やがんの転移経路観測のための生体内の分子イメージングに用いられている。光解離型ケージドルシフェリンは、光照射のタイミングによりルシフェラーゼを含む細胞内で発光する時刻を制御することができる。本研究で開発したDEACMケージドルシフェリンは、今後、生体内分子イメージングへの利用が期待される。

研究成果の概要（英文）：Photocleaving type of caged luciferin is a compound that produces a substrate for firefly bioluminescence luciferin by irradiation. In this study, we improved the synthesis method of DEACM-caged luciferin, which was originally developed in our laboratory. It was succeeded in synthesizing a larger amount and higher purity of this compound than ever before. A quantitative method for evaluating the feature of caged compounds was established by obtaining the number of molecules of D-luciferin produced from the irradiation of this compound with the absolute photon-yield measurement system. The photocleavage quantum yield of DEACM-caged luciferin were determined from the irradiation experiments for this compound. Moreover, the X-ray absorption spectra (XAS) measurements for luciferin were performed and the characteristics of XAS for the protonation/deprotonation structure of luciferin were shown by the assignment of these spectra using theoretical calculations.

研究分野：物理化学

キーワード：ケージドルシフェリン 光開裂量子収率 光開裂断面積 光褪色量子収率 光褪色断面積

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ホタル生物発光は、励起光を必要としない・発光波長の範囲が広い・高い発光量という特徴を生かし、腫瘍増殖や病原菌感染を観測する生体内分子イメージングから食品衛生検査まで、幅広く使われている[1]。この発光は、タンパク質酵素中で基質であるルシフェリンとアデノシン三リン酸(ATP)とが反応し、生成される発光体(オキシルシフェリン)の励起状態から基底状態へ遷移する際におこる。その発光色や発光強度は温度・溶媒のpH・タンパク質の種類などに依存し[2-7]、ホタル生物発光の反応過程を詳細に調べることが求められている。

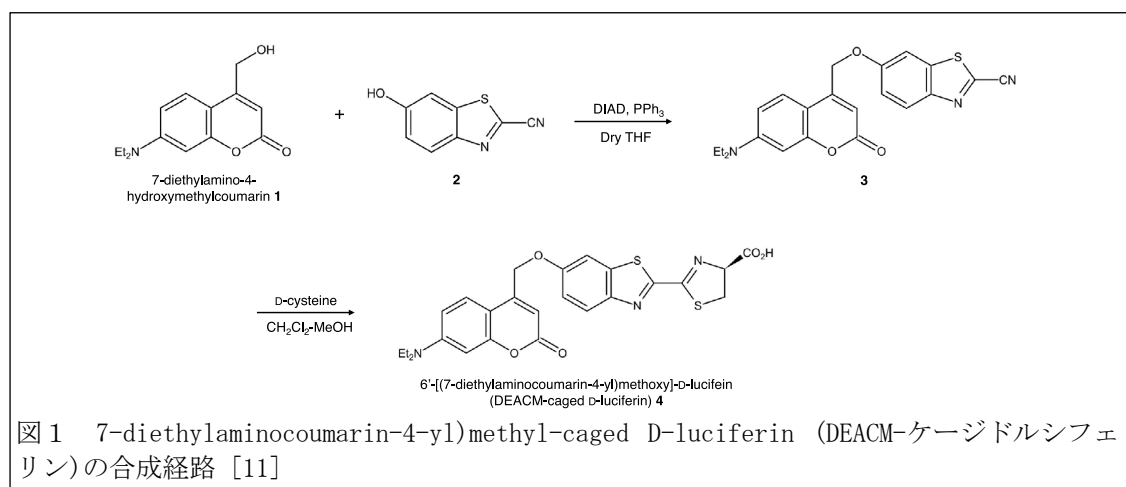
化学反応過程を追跡する有効な実験方法として、はじめに照射するポンプ光により反応を開始し、時間差を置いて照射するプローブ光により反応途中の分子のスペクトル測定を行う超高速時間分解測定が有効である[8]。現在ではこの超高速時間分解測定法のタンパク質反応への応用が進んでいる。しかし、ホタル生物発光のようにタンパク質酵素中でおこる化学反応は、基質・補因子・タンパク質を混ぜると反応がはじまるため、反応開始時刻を正確に決定できない。そこで、光切断によりルシフェリンを生成するケージドルシフェリンの開発を目指した。

### 2. 研究の目的

既存のケージドルシフェリン[9]は解離速度が遅く、ホタル生物発光の反応追跡には向いていない。さらに、光照射によりルシフェリンをより多く生成するために必要な、照射光の波長・強度・時間に関する情報はほとんどなかった。それは、ケージドルシフェリンの光安定性についての評価方法が定まっていなかったためである。そこで、本研究では光照射型ケージドルシフェリンに対して、光照射によるケージド基開裂過程の詳細な情報を明らかにし、ケージド化合物の評価方法を確立する。独自に開発した(7-diethylaminocoumarin-4-yl)methyl-caged D-luciferin (DEACM-ケージドルシフェリン)[10]を用いて、ケージドルシフェリンの評価方法を確立するとともに、DEACM-ケージドルシフェリンの化学結合開裂のメカニズムを明らかにする。

### 3. 研究の方法

図1に本研究でのDEACM-ケージドルシフェリンの合成経路を示す。合成したDEACM-ケージドルシフェリンの純度はqNMRにより決定した。先行研究[10]の合成方法とは異なり、化合物1を出発物質とすることにより、これまでよりも多く(112mg)、さらに純度が約94%のDEACM-ケージドルシフェリン4の合成に成功した[11]。



先行研究[10]では、水銀ランプを用いた光照射により、ケージドルシフェリンから生成するルシフェリンが、さらに照射光を吸収して壊れる可能性が示唆された。水銀ランプは複数の波長を含む光となっているため、ルシフェリンを壊す波長の光を含む可能性がある。そこで、ケージドルシフェリンの光開裂研究に先立ち、照射波長を選択し、ルシフェリン分子の光照射強度・光照射波長・光照射時間に対する安定性の特徴(光褪色量子収率、光褪色断面積)を調べることとした[12]。

図2にpH 8でのルシフェリンの吸収スペクトルおよび水銀ランプの相対強度を示す。光照射波長はルシフェリンの吸収スペクトルおよびケージドルシフェリンの理論吸収スペクトル[13]から、405nm、365 nm および 325 nm とした。先行研究と同じ水銀ランプを用いて、波長選択にはバンドパスフィルターを使った。

光褪色量子収率を決定するためには、各波長における光照射強度の情報が必要である。そこで、パワーメータを用いて、各波長における光照射強度を測定した。今回の実験で用いる照射光 325, 365, 405 nm の強度はそれぞれ 8.12, 27.45, 12.49 mW/cm<sup>2</sup>であることがわかった。

標準的なホタル生物発光の発光量子収率は 41%[5]であることから、光照射後のルシフェリン溶液と北米産ホタルルシフェラーゼを用いた生物発光スペクトルを測定すれば、スペクトル積

算値から光照射により破壊されずに残ったルシフェリンの分子数を見積もることができる。そこで、水銀ランプを用いて光照射したルシフェリン 溶液に、北米産ホタルルシフェラーゼ、アデノシン三リン酸、 $Mg^{2+}$ 、GTA 緩衝液を加え、pH 8 において発光量を測定した。

図 3 に光照射による DEACM-ケージドルシフェリンの光開裂過程を示す。DEACM-ケージドルシフェリンは照射光を吸収することにより、励起状態を經由して結合を開裂させ、ルシフェリンを生成する。同時に、DEACM-ケージドルシフェリンから副生成物になる光褪色過程と、生成するルシフェリンの光褪色過程もあるため、これらの反応過程を考慮する必要がある。

ルシフェリンの光褪色量子収率を決定する際に用いた方法と同様に、北米産ホタルルシフェラーゼを用いた生物発光スペクトル測定を利用し、光照射した DEACM ケージドルシフェリンから生成した D-ルシフェリンの分子数を定量した。照射光には、水銀ランプと 405nm および 325nm のフィルターを組み合わせ、405nm と 325nm の光を用いた。405nm と 325nm におけるモル吸光係数は、DEACM-ケージドルシフェリンの pH 8 における吸収スペクトルから決定した。

研究開始当初は、検出用の光源として紫外光を想定していたが、近年、X 線時間分解分光法の開発が進んだ[14]ことから、X 線の利用も検討すべきであると考えた。軟 X 線を用いた吸収計測では、分子の結合状態を反映したスペクトルを得られることが知られている。しかし、気相中の孤立分子や、比較的構成原子数の少ない有機分子とは異なり、緩衝液中のケージドルシフェリンのような環境中の有機分子の X 線吸収スペクトルは、かなり複雑になると予想される。そのため、結合の開裂や脱プロトン化などの結合の違いに対して、異なる X 線吸収スペクトルが得られるかどうかは自明ではない。そこで、まず X 線吸収計測により、ルシフェリンの脱プロトン化による構造の違いについて区別できるか検証した[15]。

ルシフェリンの  $pK_a$  は 8.7[16]であることから、pH 8 以下でアニオン、pH 9 以上で水酸基からプロトン脱離したジアニオンの構造が主な化学種であることが知られている[17, 18]。そこで、本研究では、分子科学研究所の長坂らにより開発された厚さ可変の溶液セルシステム[19, 20]を用いて、高エネルギー加速器研究機構にて、pH 5, 7, 10 のルシフェリン炭素原子 X 線吸収スペクトルを測定した。pH ごとに得られた X 線吸収スペクトルピークが、どの炭素の励起状態に対応するかを調べるため、ルシフェリンアニオンとジアニオンに対して、時間依存密度汎函数法 (TDDFT) 計算を実施した。

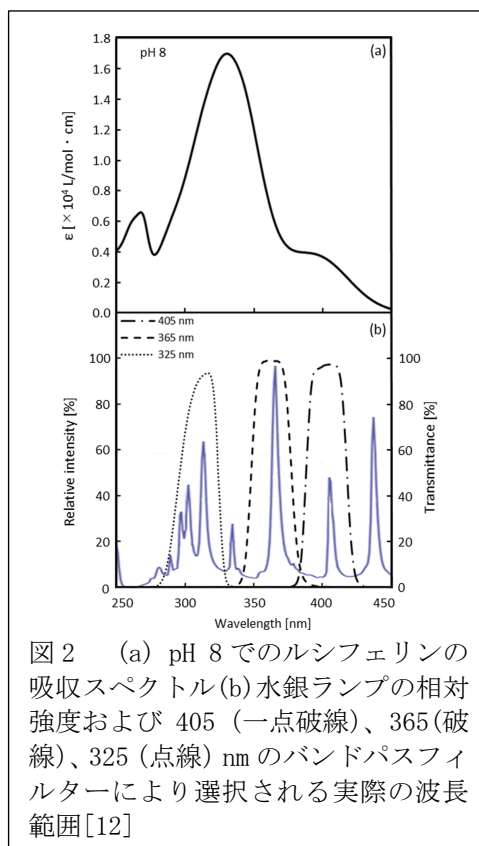


図 2 (a) pH 8 でのルシフェリンの吸収スペクトル (b) 水銀ランプの相対強度および 405 (一点破線)、365 (破線)、325 (点線) nm のバンドパスフィルターにより選択される実際の波長範囲[12]

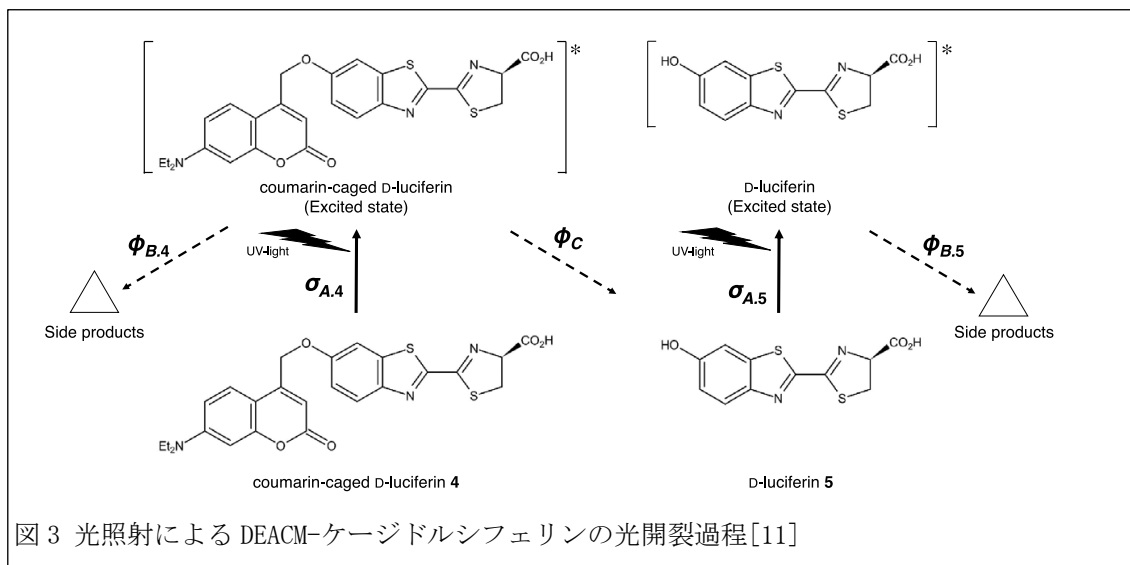


図 3 光照射による DEACM-ケージドルシフェリンの光開裂過程[11]

#### 4. 研究成果

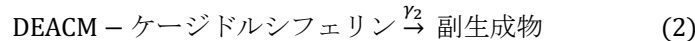
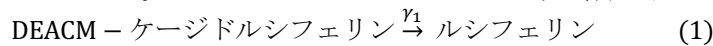
図4に光照射した後のルシフェリンを用いた生物発光における光子数を示す。光の波長を選択した場合に比べて、選択せずに水銀ランプの光を直接照射した場合(no filter)、光照射時間に対してルシフェリン分子の壊れる量が最も多い結果となった。一方、ルシフェリンの吸収ピークに近い325-nm光は、365-nm光よりもルシフェリンを壊すと予想されたが、実際には、365-nm光のほうがルシフェリン分子を多く壊すという結果になった。405-nm光は照射時間が長くなってもあまりルシフェリンを壊さないことがわかった。

図4の光子数から、光照射時間に対するルシフェリンの分子数を得て、光安定性の特徴を定量的に示す物理量である光褪色量子収率および光褪色断面積を見積もった。その結果、ルシフェリンの光褪色断面積はおおよそ $1.0\text{--}5.0 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ であることがわかった。また、ルシフェリンの光褪色量子収率は $8 \times 10^{-4}$ であり、照射波長に依存しないことがわかった。以上の結果より、ルシフェリンの光破壊量をもっとも少なくする波長は、405-nmの光照射であると言える。

上記の生物発光測定によるルシフェリン分子の定量計測と合成した高純度のケージドルシフェリンを用いて、ケージドルシフェリンの光開裂過程を調べた。純度94%を考慮したDEACM-ケージドルシフェリンの濃度( $0.9 \times 10^{-5}$ 、 $1.9 \times 10^{-5}$ 、 $2.7 \times 10^{-5}$ 、 $3.6 \times 10^{-5}$ 、および $4.5 \times 10^{-5} \text{ M}$ )とpH 8における吸光度の関係を図5に示す。光開裂量子収率を得るためには325 nmおよび405 nmにおける吸収断面積が必要である。そこで、図5の325 nmおよび405 nmのモル吸光係数( $2.12 \times 10^4 \text{ L/mol cm}$ 、 $1.88 \times 10^4 \text{ L/mol cm}$ )から吸収断面積を決定した。

図6に光照射した後のDEACM-ケージドルシフェリンを用いた生物発光におけるルシフェリン生成率(DEACM-ケージドルシフェリン分子数に対する生成したルシフェリン分子数)を示す。325-nm光の場合、照射時間と共にルシフェリン生成率は増加するが、照射時間が10分を超えると減少に転じた。この減少は、生成したルシフェリンが、光照射によりさらに破壊されることにより起きていると考えられる。一方、405-nm光の場合には、照射時間と共にルシフェリン生成率は増加した。ただし、405-nm光よりも325-nm光の方が、ルシフェリンの最大生成率が大きいという結果になった。

モル吸光係数、照射強度、照射波長および図6から、DEACM-ケージドルシフェリンから光開裂によりルシフェリンが生成する速度定数 $\gamma_1$ 、DEACM-ケージドルシフェリンが光褪色を起こし、ルシフェリン以外の副生成物が生成する速度定数 $\gamma_2$ 、およびルシフェリンが光褪色を起こす速度定数 $\gamma_3$ を見積もることができる。DEACM-ケージドルシフェリンの光解離過程から、反応式は



となる。DEACM-ケージドルシフェリンの分子数を $c_{CL}$ 、ルシフェリンの分子数を $c_{DL}$ とすると、反応速度式は

$$\frac{dc_{CL}}{dt} = -\gamma_1 c_{CL} - \gamma_2 c_{CL} \quad (4)$$

$$\frac{dc_{DL}}{dt} = \gamma_1 c_{CL} - \gamma_3 c_{DL} \quad (5)$$

となる。

(4)(5)式から、DEACM-ケージドルシフェリンからルシフェリンが生成する速度定数 $\gamma_1$ は、325-nm光の場合は $5.8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 、405-nm光の場合は $1.2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ であることがわかった。また光開裂量子収率は、325-nm光の場合は $5.41 \times 10^{-4}$ 、405-nm光の場合は $6.27 \times 10^{-5}$ と決定することができた。すなわち、ケージド化合物の定量的な評価方法を確立することができたと言える。

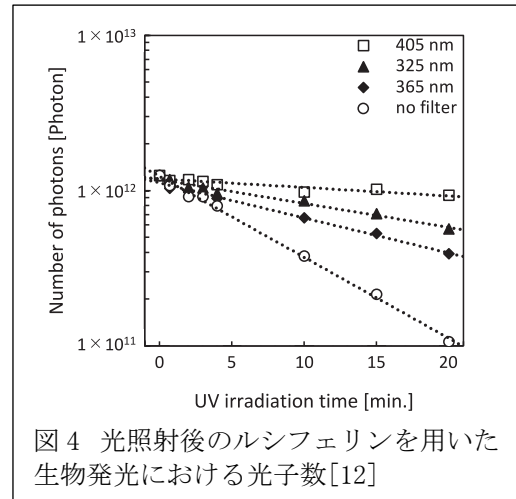


図4 光照射後のルシフェリンを用いた生物発光における光子数[12]

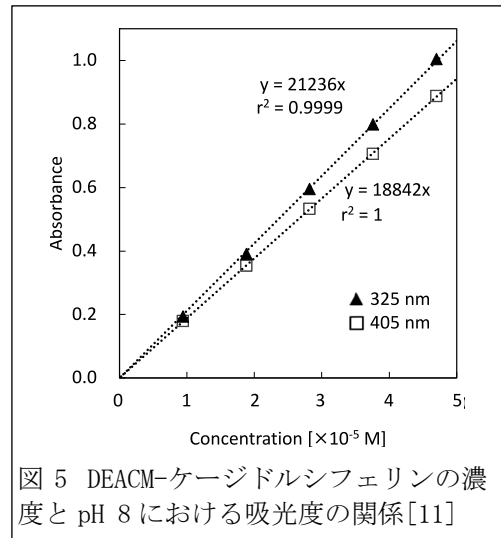


図5 DEACM-ケージドルシフェリンの濃度とpH 8における吸光度の関係[11]



図7に pH 5, 7, および 10 の pH 5, 7, 10 のルシフェリン炭素原子 X 線吸収スペクトルを示す。どのスペクトルにも特徴的なピークが4つあることがわかった。量子化学計算より、ヒドロキシ基の脱プロトン化は、炭素原子 X 線吸収スペクトルのピーク a とピーク b のエネルギー差に反映されることがわかった。このエネルギー差は pH 7 では 1.0eV であったが、pH 10 では 2.3eV であった。これは、ヒドロキシ基の脱プロトン化に伴い、ヒドロキシ基に結合した C 原子の 1s 軌道からの励起エネルギーがレッドシフトするためである。

本研究では、OH または O<sup>-</sup> に結合した C 原子の 1s 軌道からの励起に注目した。ルシフェリンのベンゾチアゾール環の一部であるこの炭素原子に関連する炭素原子 X 線吸収スペクトルは、共鳴によって記述される電子の非局在化の影響を受ける可能性がある。特にルシフェリンジアニオンで顕著であると考えられる。ケージドルシフェリンの光開裂の様に C-O 単結合が直接切断される場合は、非局在化の影響は少ないと予想されるため、炭素原子 X 線吸収スペクトルはより大きく変化することが予想される。

今回の研究ではルシフェリンの光褪色過程を調べ、次に DEACM-ケージドルシフェリンの光開裂過程を調べることで、DEACM-ケージドルシフェリンの化学結合開裂機構を定量的に明らかにすることができた。本研究で確立した方法により、今後新たに開発される光解離型ケージドルシフェリンの統一的な性能評価が可能になった。さらに、時間分解測定における検出方法の一つとして、軟 X 線を用いた吸収計測利用についての検討を行い、軟 X 線をプローブ光に用いる可能性を示した。

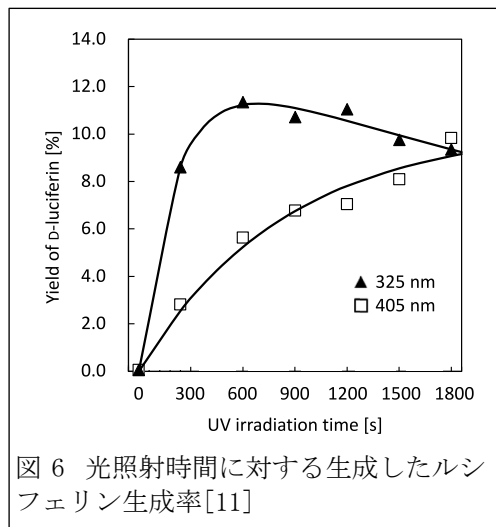


図6 照射時間に対する生成したルシフェリン生成率[11]

#### 参考文献

- [1] Shimomura, Bioluminescence: Chemical Principles and Methods, World Scientific, New Jersey (2006).
- [2] Seliger et al. Arch. Biochem. Biophys. 88, 136 (1960).
- [3] Kajiyama et al. Protein Eng. 4, 691 (1991).
- [4] Nakatsu et al. Nature 440, 372 (2006).
- [5] Ando et al. Nat. Photo. 2, 44 (2008)
- [6] Wang et al. Photochem. Photobiol. 87, 846 (2011)
- [7] Mochizuki et al. Appl. Phys. Lett. 104, 213704 (2014).
- [8] Kosumi et al. Chem. Phys. Lett. 483, 95 (2009)
- [9] Shao et al. Chem. Commun. 27, 4028 (2009).
- [10] Kurata et al. J. Photochem. Photobiol. B, 189, 81 (2018).
- [11] Kumagai et al. J. Photochem. Photobiol. A, 434, 114230 (2023).
- [12] Kumagai et al. Chem. Phys. Lett. 792, 139414 (2022).
- [13] Usukura et al. Photochem. Photobiol. 96, 805 (2020).
- [14] Kumaki et al. J. Chem. Phys. 158, 104201 (2023).
- [15] Kudo et al. J. Phys. Chem. A 128, 611 (2024)
- [16] Morton et al. Biochemistry 8, 1598 (1969)
- [17] Ando et al. Jpn. J. Appl. Phys. 49, 117002 (2010)
- [18] M. Hiyama et al. Photochem. Photobiol. 89, 571 (2013).
- [19] Nagasaka et al. Chem. Lett. 50, 956 (2021).
- [20] Nagasaka et al. J. Chem. Phys. 158, 024501 (2023).

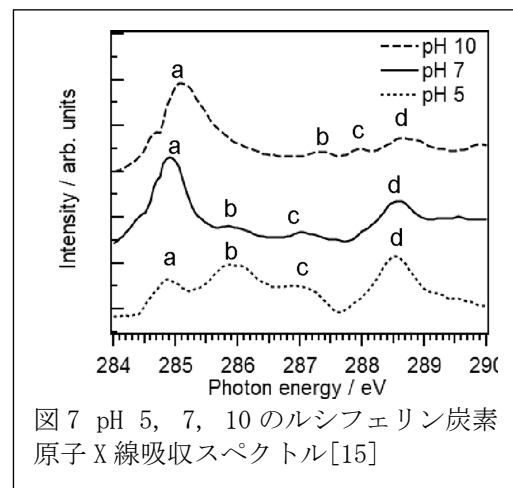


図7 pH 5, 7, 10 のルシフェリン炭素原子 X 線吸収スペクトル[15]

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kudo Yuto, Kumaki Fumitoshi, Nagasaka Masanari, Adachi Jun-ichi, Noguchi Yoshifumi, Koga Nobuaki, Itabashi Hideyuki, Hiyama Miyabi	4. 巻 128
2. 論文標題 Experimental and Theoretical Study for Core Excitation of Firefly Luciferin in Carbon K-Edge Spectra	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry A	6. 最初と最後の頁 611 ~ 617
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpca.3c07504	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kumagai Ryo, Ono Ryohei, Sakimoto Shu, Suzuki Chiharu, Kanno Ken-ichiro, Aoyama Hiroshi, Usukura Junko, Kobayashi Masataka, Akiyama Hidefumi, Itabashi Hideyuki, Hiyama Miyabi	4. 巻 434
2. 論文標題 Photo-cleaving and photo-bleaching quantum yields of coumarin-caged luciferin	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry	6. 最初と最後の頁 114230 ~ 114230
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jphotochem.2022.114230	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ryo Kumagai, Ryohei Ono, Hidefumi Akiyama, Hideyuki Itabashi, Miyabi Hiyama	4. 巻 791
2. 論文標題 Photo-bleaching of Firefly Luciferin with UV Irradiation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chem. Phys. Lett.	6. 最初と最後の頁 139414
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cpllett.2022.139414	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Haruhisa Ogawa, Ryohei Ono, Yoshifumi Noguchi, Nobuo Kitada, Ryohei Saito-Moriya, Shojiro A. Maki, Hidefumi Akiyama, Hideyuki Itabashi, Miyabi Hiyama	4. 巻 97
2. 論文標題 Absorption Spectra for Firefly Bioluminescence Substrate Analog: TokeOni in Various pH Solutions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Photochem. Photobiol.	6. 最初と最後の頁 1016-1022
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/php.13458	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計26件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Miyabi Hiyama,
2. 発表標題 Experimental and theoretical study for photo-cleavage of coumarin-caged luciferin
3. 学会等名 Joint Meeting of the Tohoku Area Chemistry Societies (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 樋山みやび
2. 発表標題 ホタル生物発光基質類似体の理論研究
3. 学会等名 生物発光化学発光研究会第38回学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松永 大輝, 小野 稜平, 小林 真隆, 秋山 英文, 板橋 英之, 樋山 みやび
2. 発表標題 レーザーと及びLED光源によるD-Luciferin光破壊条件
3. 学会等名 第17回分子科学討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 熊谷 遼, 小野 稜平, 菅野 研一郎, 青山 洋史, 薄倉 淳子, 小林 真隆, 秋山英文, 板橋英之, 樋山みやび
2. 発表標題 クマリンケージドルシフェリンの光開裂過程
3. 学会等名 第17回分子科学討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中野 智哉, 小野 稜平, 菅野 研一郎, 青山 洋史, 薄倉 淳子, 小林 真隆, 秋山英文, 板橋英之, 樋山みやび
2. 発表標題 キラルHPLCを用いたDEACMケージドルシフェリンの光解離定量計測
3. 学会等名 第17回分子科学討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 今西勇輔, 小野稜平, 中野智哉, 松永大輝, 小林真隆, 秋山英文, 板橋英之, 樋山みやび
2. 発表標題 レーザー及びLED光源を用いたケージドルシフェリンの光開裂
3. 学会等名 第17回分子科学討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 樋山みやび
2. 発表標題 生物発光研究と原子分子物理学
3. 学会等名 第42回原子衝突若手の会「秋の学校」(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 勝見深太, 菅野研一郎, 板橋英之, 樋山みやび
2. 発表標題 新規光解離型ケージドルシフェリンの開発
3. 学会等名 日本化学会関東支部 群馬地区研究交流発表会
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 工藤優斗, 熊木文俊、足立純一, 長坂将成, 野口良史, 古賀信明, 板橋英之, 樋山みやび
2. 発表標題 ホタル生物発光基質D-LuciferinのC1s内殻励起スペクトル測定
3. 学会等名 日本化学会関東支部 群馬地区研究交流発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryohei Ono, Ryo Kumagai, Ken-ichiro Kanno, Hiroshi Aoyama, Junko Usukura, Masataka Kobayashi, Hidefumi Akiyama, Hideyuki Itabashi, Miyabi Hiyama
2. 発表標題 Photo-cleavage quantum yield of coumarin-caged luciferin
3. 学会等名 The 8th Quantum Science (QS) symposium, ICCMSE 2022-Computational Chemistry and Computational Physics, 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 熊谷遼、小野稜平、秋山英文、板橋英之、樋山みやび
2. 発表標題 ホタル生物発光基質の光褪色
3. 学会等名 第16回分子科学討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryo KUMAGAI, Ryohei ONO, Hidefumi AKIYAMA, Hideyuki ITABASHI, Miyabi HIYAMA
2. 発表標題 Photo-bleaching of firefly luciferin
3. 学会等名 37th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Miyabi Hiyama
2. 発表標題 Study for firefly bioluminescence related molecules
3. 学会等名 The 7th Quantum Science (QS) symposium, ICCMSE 2021-Computational Chemistry and Computational Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 熊谷遼, 小野稜平, 秋山英文, 板橋英之, 樋山みやび
2. 発表標題 UV光によるホタルルシフェリン光分解の定量評価
3. 学会等名 第15回分子科学討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 崎元 柊, 熊谷 遼, 菅野 研一郎, 板橋 英之, 樋山 みやび
2. 発表標題 7-(diethylaminocoumarin4-(yl)methyl caged D-luciferin)の合成および吸収・蛍光スペクトル測定
3. 学会等名 第81回分析化学討論会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

プレスリリース「ホタルの発光メカニズムを探れ！炭素原子X線吸収計測でルシフェリン分子の構造変化を解明」  
 【群馬大学HP】<https://www.gunma-u.ac.jp/information/175499>  
 【群馬大学理工学部HP】<https://www.st.gunma-u.ac.jp/24593>  
 つくばサイエンスニュースHP  
 記事  
<https://www.tsukuba-sci.com/?p=14724>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------