

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月23日現在

機関番号：12612  
 研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2010～2012  
 課題番号：22550031  
 研究課題名（和文） ウミホタル発光系の化学励起機構解明と高性能化  
 研究課題名（英文） Elucidation of the chemiexcitation mechanism and an improvement of luminescence performance of the Cypridina bioluminescence system  
 研究代表者  
 平野 誉（HIRANO TAKASHI）  
 電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授  
 研究者番号：20238380

研究成果の概要（和文）：ウミホタルの生物発光に関わるイミダゾピラジノン化合物を対象として、発光の高効率化に働く化学励起機構の解明と化学発光の高性能化を目指した。この結果、①化学励起機構の電荷移動に関与するπ共役置換基効果の解明、②化学励起制御に働く反応中間体の配座効果を調査するためのトリアルコキシフェニル置換誘導体の合成と基本発光特性の確立、③高性能化学発光を示す誘導体を分子設計するための置換位置効果の確立に成功した。

研究成果の概要（英文）：Based on the imidazopyrazinone molecular system related to Cypridina bioluminescence, studies were undertaken to elucidate the chemiexcitation mechanism to increase luminescence efficiency and to construct a high-performance chemiluminescence system. The studies on the chemiexcitation process lead to (1) clarify the role of π-conjugated substituents to modulate charge transfer in chemiexcitation and (2) establish the fundamental chemiluminescent property of (trialkoxypheyl)imidazopyrazinones for investigating the effect of intermediate conformations. (3) The position effect of a π-conjugated substituent on chemiluminescence character of the imidazopyrazinones was also confirmed for designing a high-performance chemiluminescent derivative.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：化学

科研費の分科・細目：基礎化学・有機化学

キーワード：ウミホタル、生物発光、化学発光、イミダゾピラジノン、化学励起、ジオキセタン、置換基効果、量子収率

1. 研究開始当初の背景

(1) 発光生物ウミホタルは酵素ルシフェラーゼで制御されたルシフェリン（発光基質）とO<sub>2</sub>の反応を利用して発光する（図1）。この生物発光に対し、ルシフェリンとO<sub>2</sub>がルシフェラーゼ無しで発光する場合を化学発光と呼ぶ。ルシフェリンとその誘導体は、O<sub>2</sub>やスーパーオキシドと反応して化学発光を示す発光センサーとして利用されており、化学発

光分析の応用範囲を広げるためにも、利用目的に合った発光特性を示すルシフェリン誘導体の創製が切望されている。

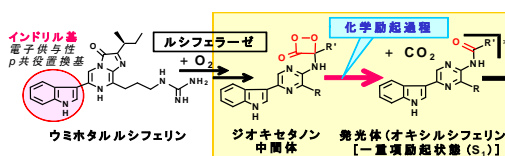


図1 ウミホタルの生物発光反応

(2) ウミホタルルシフェリンの研究は下村博士(米国)、後藤教授(名古屋大)、中村教授(名古屋大)、寺西教授(三重大)らによって発展してきたが、ルシフェリンの分子改良に必要な反応機構は未解明であった。生物発光よりも化学発光の発光効率が低い原因も解っておらず、ルシフェリン誘導体の論理的な分子設計が困難であった。このため申請者は反応機構の問題解決に取り組んだ。

(3) ルシフェリンと  $O_2$  の反応は途中で高エネルギーのジオキセタノン中間体を与え、この熱分解で一重項励起 ( $S_1$ ) 状態のオキシルシフェリン(発光体)を生成して発光する(図1)。ジオキセタノンの熱分解で励起分子を生成する過程は化学励起過程と呼ばれ、30%の高い生物発光効率を支配する重要なプロセスである。

(4) 我々は、生物発光のモデル反応として化学発光を利用し、置換基効果の研究手法を用いて反応機構を解析した結果、ルシフェリンが持つインドリル基は電子供与性置換基として酸素化の加速と化学励起の高効率化に寄与すること、さらに化学励起ではジオキセタノン中間体の熱分解が分子内電荷移動(ICT)性を持つ遷移状態を経て ICT 性を持つ発光体の  $S_1$  状態を生成する機構(電荷移動分解機構)(図2)が高効率化に働くことを見出した。

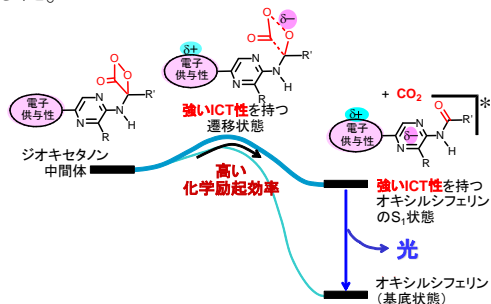


図2 化学励起の電荷移動分解機構

(5) 以上の背景から、我々は化学励起機構を解明するためには①電荷移動分解機構の検証と②生物発光よりも化学発光の発光効率が低い問題点を解決する必要があることに着目した。特に②は反応制御にルシフェラーゼの反応場が重要な役割を持つことに注目した。加えて置換基効果の調査法を活用して、ルシフェリン誘導体による化学発光の高性能化を目指し、研究目的を設定した。

## 2. 研究の目的

(1) 目的1: ウミホタル生物発光系の高効率性を支配する化学励起過程における電荷移動分解機構の検証と解明を目指す。このため、

具体的な2項目に取り組む。

①ルシフェリン(発光基質)の分子構造の特徴である  $\pi$  共役置換基が化学発光特性に及ぼす影響を明らかにする。

②ルシフェラーゼ(酵素)による反応場制御の影響を、人工反応場を用いたモデル系を用いて調査し、化学励起機構の解明を目指す。

(2) 目的2: ルシフェリンの基本骨格であるイミダゾピラジノン環において、置換基導入の効果が未解明な置換位置の置換基効果を調査してルシフェリン誘導体の化学発光特性の高性能化を目指す。

## 3. 研究の方法

(1) ウミホタルルシフェリンのインドリル置換位置(6位)への  $\pi$  共役置換基の導入の効果を調査して、化学励起における電荷移動分解機構を検証する。

①  $\pi$  共役置換基としてオリゴチオフェン基をルシフェリン基本骨格の6位に導入した誘導体を合成する。併せて化学発光の生成物であるアミドピラジン誘導体も合成する。

②生物発光のモデル反応条件である(i)有機塩基を含む DMSO 条件と(ii)酢酸緩衝液を含むジグリム条件を採用し、ルシフェリン誘導体の化学発光の経時変化追跡により化学発光量子収率 ( $\Phi_{CL}$ ) を測定する。スペクトル測定からは発光体構造の情報を得る。 $\Phi_{CL}$  は反応効率  $\Phi_R$  と化学励起効率  $\Phi_S$  と発光体の蛍光量子収率  $\Phi_F$  の積であり、HPLC による生成物分析と生成物の蛍光測定により  $\Phi_R$  と  $\Phi_F$  を求め、 $\Phi_S$  を算出して評価する。

③化学励起に関わるジオキセタノン中間体と熱分解遷移状態、発光体の密度汎関数(DFT)計算を行う。計算と実測の  $\Phi_S$  値の相関から化学励起過程に及ぼす  $\pi$  共役置換基効果を評価し、電荷移動分解機構を検証する。

(2) 人工反応場による反応中間体の配座固定機能がルシフェリン誘導体の化学発光特性に及ぼす効果を調査して化学励起の高効率化要因を探索する。

①ルシフェラーゼに包接された分子の配座固定機能を模倣するため、疎水性ゲスト分子を内包できる逆ミセル等の人工反応場を選び、内包させたルシフェリン誘導体の化学発光特性を調査する。

②疎水性による人工反応場への内包性の向上と、反応場による配座固定が期待されるトリアルコキシフェニル基を2位に導入したルシフェリン誘導体を合成し、基本的な化学発光特性を確立する。

③疎水性誘導体について、人工反応場への内包状態の化学発光特性を調べて反応場による化学励起過程への影響を調べる。

(3) 置換基効果が未解明であったルシフェリン基本骨格の5, 8位での置換基効果の調査と高性能化因子の探索を行う。

① 電子的性質および $\pi$ 共役を調整した置換基を、基本骨格の5, 8位に有する誘導体を合成し、化学発光特性を調査する。

② 化学発光の波長と量子収率の測定結果から高効率化と多色化に寄与する高性能化因子を探索する。化学励起の知見は電荷移動分解機構に照らし合わせて評価する。

#### 4. 研究成果

(1) 化学発光特性に及ぼす $\pi$ 共役置換基効果を調査して、化学励起機構における電荷移動の関与に関する以下の知見を得た。

① イミダゾピラジノン環の6位にオリゴチオフェン基を導入した誘導体 **T1**~**T8** を系統的に合成することに成功した(図3)。

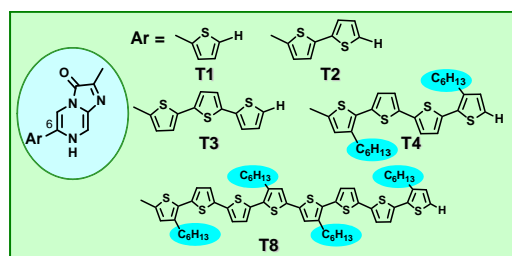


図3 オリゴチオフェン導入型誘導体

② 生物発光のモデル反応条件での化学発光特性(反応速度、量子収率、発光極大波長、反応収率)を調べた。この結果、置換基のチオフェン数の増加に応じて化学励起効率が上昇することを見出した。**T4**と**T8**で溶解度調整のためのチオフェン環のヘキシル側鎖は効率低下に作用した。

③ ジオキセタノン中間体と熱分解遷移状態、発光体のDFT計算の結果より、ジオキセタノン環が分解する遷移状態において、オリゴチオフェン基から分解部位への負電荷の流入が起こることが予想された(図4)。化学励起効率の実験データと計算結果を総合的に判断して、ジオキセタノン分解における電荷移動が化学励起の高効率化に寄与する「電荷移動分解機構」が確認された。

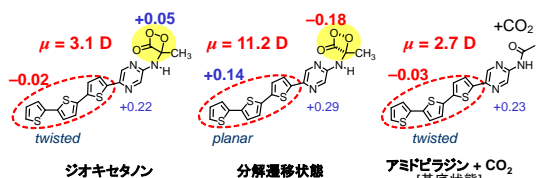


図4 ターチオフェン誘導体の化学励起

(2) 化学励起における反応中間体の配座の役割を明らかにするための研究を進め、以下の成果を得た。

① 人工反応場との疎水的相互作用を増強す

るため、疎水性の(トリアルコキシ)フェニル [(RO)<sub>3</sub>Ph] 基をイミダゾピラジノン環の2位に導入した誘導体の合成を目指した。メチレンを介した(RO)<sub>3</sub>Ph 基の導入は困難が多く達成できなかったが、直接2位に(RO)<sub>3</sub>Ph 基を導入した誘導体の合成に成功した。同時に、6位の置換基を調整することで良好な化学発光性を示す誘導体の開発に成功した(図5)。

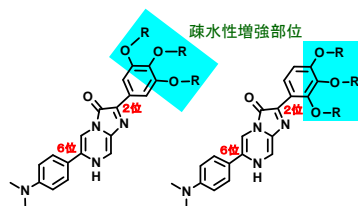


図5 2-(トリアルコキシ)フェニル誘導体

③ DFT 計算により、ジオキセタノン中間体の配座の違いが分解遷移状態の電子的性質に影響することを予測するができ、化学励起に影響する人工反応場による配座固定の効果を評価する基礎を固めた。以上より、電荷移動分解機構における反応中間体の配座の役割に関する知見を得るには至らなかったものの、本問題を研究する基盤が固まった。

(3) 未解明であったイミダゾピラジノン環の5, 8位における化学発光性に及ぼす置換基効果を調査して以下の成果を得た。

① 基本的な $\pi$ 共役置換基であるフェニル (Ph) 基を5, 8位に導入した誘導体および5, 8位を含めた複数の位置に Ph 基を有する誘導体を合成して化学発光性を調べた(図6)。この結果、5位への Ph 基導入は量子収率の低下に働くものの、発光の長波長化には有効であり、8位への Ph 基導入は量子収率の向上と発光の長波長化に有効であった。Ph 基の二置換体では、5,8-, 6,8-二置換が量子収率を保持したまま、発光波長の制御に有効なことを見出した。さらに5,6,8-三置換は発光が最も長波長であるが、量子収率が低い。以上より、 $\pi$ 共役置換基の導入位置と置換数に対する化学発光特性の相関が明らかとなり、高性能発光基質の分子設計指針を確立できた。

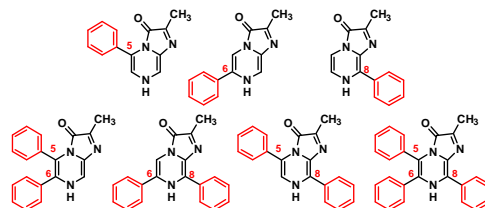


図6 フェニル置換位置の効果

②Ph 基の二置換体の有効性を基に、PE 基をイミダゾピラジノン環に 2 個導入した 5,6-, 5,8-, 6,8-二置換体を合成し(図 7)、化学発光特性を調べた。この結果、6,8-二置換体が発光の効率向上と長波長化に働き、高い化学励起効率を保持した分子設計に有効なことがわかった。

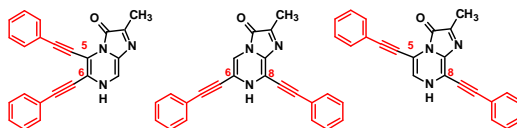


図 7 di-PE 置換基効果

③新たにイミダゾピラジノン環の 2 位のフェニル基上の置換基効果を検討した(図 8)。2-フェニル誘導体の化学発光特性を調査した結果、置換基は反応速度に影響するものの、発光効率と波長への影響が小さいことを見出した。DFT 計算の結果より、ジオキセタン中間体と分解遷移状態、発光体の励起状態においてフェニル基の  $\pi$  共役が働きにくい電子的性質を持つことが判明し、2 位のフェニル基の化学修飾は化学発光特性を保持した分子改良に有効なことがわかった。

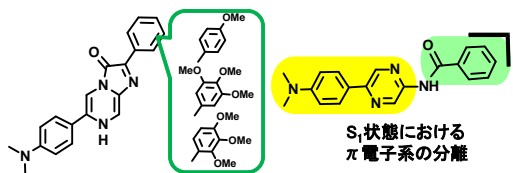


図 8 2-フェニル基上の置換基効果

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- (1) Takashi Hirano, Tatsuki Nakagawa, Ai Kodaka, Shojiro Maki, Haruki Niwa, and Minoru Yamaji, (Takashi Hirano), "5-[4-(Dimethylamino)phenyl]-2-benzamido pyrazines: Fluorescent dyes based on Cypridina oxyluciferin," *Research on Chemical Intermediates*, 査読有, Vol. 39, **2013**, 233–245.  
DOI 10.1007/s11164-012-0645-3
- (2) Takashi Hirano, "The reaction mechanism of calcium-activated photoprotein bioluminescence," *Current Pharmaceutical Biotechnology*, 査読有, Vol. 13, **2012**, 2551–2561.  
DOI なし  
<http://www.benthamscience.com/contents.php?in=105748&m=November&y=2012>

[学会発表] (計 40 件)

- (1) 平野 蒼, "バイオ・ケミルミネッセンスの基礎化学と展開", 日本化学会第 93 春季年会(招待講演), 2013 年 3 月 25 日, 立命館大学 びわこ・くさつキャンパス (滋賀県) .
- (2) 林 千尋, 牧昌次郎, 丹羽治樹, 平野 蒼, "オワンクラゲ生物発光機構の解明:  $\pi$  共役拡張型発光体アナログの発光特性の評価", 日本化学会第 93 春季年会, 2013 年 3 月 23 日, 立命館大学 びわこ・くさつキャンパス (滋賀県) .
- (3) 石井雄基, 牧 昌次郎, 丹羽治樹, 平野 蒼, "ウミホタルルシフェリンの基本骨格(イミダゾピラジノン)を利用した化学発光系の高性能化", 電気通信大学・東京農工大学「ナノ未来材料とコヒーレント光科学」第 9 回合同シンポジウム, 2012 年 12 月 15 日, 電気通信大学 (東京都) .
- (4) 林 千尋, 牧 昌次郎, 丹羽治樹, 平野 蒼, "オワンクラゲ生物発光機構の解明:  $\pi$  共役拡張型発光体アナログの発光特性の評価", 生物発光化学発光研究会第 29 回学術講演会, 2012 年 11 月 17 日, 産業技術総合研究所 臨海副都心センター (東京都) .
- (5) 石井雄基, 牧 昌次郎, 丹羽治樹, 平野 蒼, "置換基導入による 2,6-ジフェニルイミダゾピラジノン誘導体の化学発光特性制御", 生物発光化学発光研究会第 29 回学術講演会, 2012 年 11 月 17 日, 産業技術総合研究所 臨海副都心センター (東京都) .
- (6) 笹 真希子, 牧 昌次郎, 丹羽治樹, 平野 蒼, "系統的フェニルエチニル基導入によるイミダゾピラジノン化学発光特性の制御", 生物発光化学発光研究会第 29 回学術講演会, 2012 年 11 月 17 日, 産業技術総合研究所 臨海副都心センター (東京都) .
- (7) 中川達規, 牧 昌次郎, 丹羽治樹, 平野 蒼, "ウミホタル発光体に基づく蛍光色素構築: チアゾピラジンの発光性と  $\pi$  電子構造の相関", 第 23 回基礎有機化学討論会, 2012 年 9 月 21 日, 京都テルサ (京都府) .
- (8) 笹 真希子, 牧 昌次郎, 丹羽治樹, 平野 蒼, "系統的フェニルエチニル基導入によるイミダゾピラジノン化学発光特性の制御", 2012 年光化学討論会, 2012 年 9 月 14 日, 東京工業大学 大岡山キャンパス (東京都) .
- (9) 林 千尋, 牧 昌次郎, 丹羽治樹, 平野 蒼, "オワンクラゲ生物発光機構の解明:  $\pi$  共役拡張型発光体アナログの発光特性の評価", 2012 年光化学討論会, 2012 年 9 月 12 日, 東京工業大学 大岡山キャンパス (東京都) .



- (10) 石井雄基, 牧 昌次郎, 丹羽治樹, 平野 蒼, “置換基導入による 2,6-ジフェニルイミダゾピラジノン誘導体の化学発光特性制御”, 2012 年光化学討論会, 2012 年 9 月 12 日, 東京工業大学 大岡山キャンパス (東京都) .
- (11) 平野 蒼, “Important roles of electron-transfer and charge-transfer in bioluminescence reactions”, 2012 年光化学討論会(招待講演), 2012 年 9 月 12 日, 東京工業大学 大岡山キャンパス (東京都) .
- (12) Y. Ishii, S. Maki, H. Niwa, and T. Hirano, “Modulation of chemiluminescence of 2,6-diphenylimidazopyrazinones by substituent effects,” International Workshop on Modern Science and Technology 2012 (IWMST2012), 2012 年 8 月 30 日, 電気通信大学 (東京都) .
- (13) M. Sasa, S. Maki, H. Niwa, and T. Hirano, “Modulation of imidazopyrazinone chemiluminescence by systematic introduction of phenylethynyl groups,” International Workshop on Modern Science and Technology 2012 (IWMST2012), 2012 年 8 月 30 日, 電気通信大学 (東京都) .
- (14) 石井雄基, 牧 昌次郎, 丹羽治樹, 平野 蒼, “置換基導入による 2,6-ジフェニルイミダゾピラジノン誘導体の化学発光特性制御”, 日本化学会第 92 春季年会, 2012 年 3 月 26 日, 慶応義塾大学 日吉・矢上キャンパス (神奈川県) .
- (15) 中川達規, 牧 昌次郎, 丹羽治樹, 平野 蒼, “ウミホタル発光体に基づく新規な ICT 型縮環蛍光色素の開発研究”, 日本化学会第 92 春季年会, 2012 年 3 月 26 日, 慶応義塾大学 日吉・矢上キャンパス (神奈川県) .
- (16) 笹 真希子, 牧 昌次郎, 丹羽治樹, 平野 蒼, “系統的フェニルエチニル基導入によるイミダゾピラジノン化学発光特性の制御”, 日本化学会第 92 春季年会, 2012 年 3 月 25 日, 慶応義塾大学 日吉・矢上キャンパス (神奈川県) .
- (17) 平野 蒼, “ウミホタル生物発光分子系に学ぶ蛍光色素開発”, 第 8 回バイオオプティクス研究会理研シンポジウム「蛍光相関分光と情報伝達 (8)」合同シンポジウム (招待講演), 2011 年 12 月 16 日, 北里大学 相模原キャンパス (神奈川県) .
- (18) 中川達規, 牧 昌次郎, 丹羽治樹, 平野 蒼, “ウミホタル発光体に基づく新規蛍光色素の開発研究”, 電気通信大学・東京農工大学「ナノ未来材料とコヒーレント光科学」第 8 回合同シンポジウム, 2011 年 12 月 10 日, 東京農工大学 小金井キャンパス (東京都) .
- (19) T. Nakagawa, S. Maki, H. Niwa, and T. Hirano, “Design of Novel Intramolecular Charge-transfer Type Fluorescent Dyes Based on Cypridina Bioluminescence Emitter,” 2011 Korea-Japan Symposium on Frontier Photoscience (KJFP-2011), 2011 年 10 月 29-30 日, Seoul (Korea).
- (20) 平野 蒼, 八谷聡二郎, 高橋友登, 中川達規, 小鷹 藍, 牧 昌次郎, 丹羽治樹, 橋爪大輔, 池田 浩, 水野一彦, “ウミホタル型蛍光色素の  $\pi$  共役制御: オキシルシフェリン誘導体と二環性ホウ素誘導体の構造と性質”, 第 22 回基礎有機化学討論会, 2011 年 9 月 23 日, つくば国際会議場 (茨城県) .
- (21) 笹 真希子, 小林弘和, 藤尾俊介, 牧 昌次郎, 丹羽治樹, 平野 蒼, “系統的フェニル基導入によるイミダゾピラジノン化学発光特性の制御”, 第 22 回基礎有機化学討論会, 2011 年 9 月 22 日, つくば国際会議場 (茨城県) .
- (22) 石井雄基, 牧 昌次郎, 丹羽治樹, 平野 蒼, “2,6-ジフェニルイミダゾピラジノン誘導体による高効率化学発光系の構築”, 第 22 回基礎有機化学討論会, 2011 年 9 月 22 日, つくば国際会議場 (茨城県) .
- (23) 中川達規, 牧 昌次郎, 丹羽治樹, 平野 蒼, “ウミホタル発光体に基づく分子内電荷移動性縮環型蛍光色素の構築”, 第 22 回基礎有機化学討論会, 2011 年 9 月 21 日, つくば国際会議場 (茨城県) .
- (24) 平野 蒼, 高橋友登, 中川達規, 小鷹 藍, 牧 昌次郎, 丹羽治樹, “ウミホタル型蛍光色素の開発: オキシルシフェリン誘導体の励起状態の構造と性質”, 2011 年光化学討論会, 2011 年 9 月 8 日, 宮崎市河畔コンベンションエリア (宮崎県) .
- (25) 平野 蒼, 大庭洋志, 石井雄基, 牧 昌次郎, 丹羽治樹, “ウミホタル生物・化学発光の分子機構: 効率的化学励起過程の解析”, 2011 年光化学討論会, 2011 年 9 月 6 日, 宮崎市河畔コンベンションエリア (宮崎県) .
- (26) 笹 真希子, 小林弘和, 藤尾俊介, 牧 昌次郎, 丹羽治樹, 平野 蒼, “フェニル基導入によるイミダゾピラジノン化学発光特性の制御”, 日本化学会第 5 回関東支部大会(2011), 2011 年 8 月 31 日, 東京農工大学 小金井キャンパス (東京都) .
- (27) 石井雄基, 小林弘和, 牧 昌次郎, 丹羽治樹, 平野 蒼, “2-フェニルイミダゾピラジノン誘導体による高効率化学発光系の構築”, 日本化学会第 5 回関東支部大会(2011), 2011 年 8 月 31 日, 東京農工大学 小金井キャンパス (東京都) .
- (28) 中川達規, 牧 昌次郎, 丹羽治樹, 平野 蒼, “ウミホタル発光体に基づく新規な

- 分子内電荷移動型蛍光色素の構築”，日本化学会第 5 回関東支部大会(2011)，2011 年 8 月 31 日，東京農工大学 小金井キャンパス（東京都）。
- (29) 中川達規，牧 昌次郎，丹羽治樹，平野 蒼，“ウミホタル発光体に基づく分子内ドナー-アクセプター型蛍光色素の構築”，第 35 回有機電子移動化学討論会，2011 年 6 月 23 日，九州大学（福岡県）。
- (30) 石井雄基，小林弘和，牧 昌次郎，丹羽治樹，平野 蒼，“フェニル共役イミダゾピラジノン誘導体の化学発光特性の制御”，日本化学会第 91 春季年会，2011 年 3 月 11 日，震災のため予稿集上での発表。
- (31) 小鷹 藍，中川達規，牧 昌次郎，丹羽治樹，平野 蒼，“ウミホタル型蛍光色素の発光特性制御:ゼオライト内包効果”，日本化学会第 91 春季年会，2011 年 3 月 11 日，震災のため予稿集上での発表。
- (32) 小林弘和，藤尾俊介，牧 昌次郎，丹羽治樹，平野 蒼，“フェニル共役イミダゾピラジノン誘導体の化学発光特性の評価”，日本化学会第 91 春季年会，2011 年 3 月 11 日，震災のため予稿集上での発表。
- (33) 中川達規，牧 昌次郎，丹羽治樹，平野 蒼，“ウミホタル型蛍光色素の発光特性制御”，日本化学会第 91 春季年会，2011 年 3 月 11 日，震災のため予稿集上での発表。
- (34) 小林弘和，藤尾俊介，牧昌次郎，丹羽治樹，平野 蒼，“ウミホタルルシフェリンの分子改良： $\pi$ 共役制御したイミダゾピラジノン誘導体の化学発光”，東京農工大学・電気通信大学第「ナノ未来材料とコヒーレント光科学」7 回合同シンポジウム，2010 年 12 月 11 日，電気通信大学（東京都）。
- (35) 平野 蒼，“ウミホタルルシフェリンアナログの化学発光特性制御”，第 7 回バイオオプティクス研究会理研シンポジウム「蛍光相関分光と情報伝達（7）」合同シンポジウム（招待講演），2010 年 12 月 3 日，東京農工大学 小金井キャンパス（東京都）。
- (36) 小林弘和，藤尾俊介，牧昌次郎，丹羽治樹，平野 蒼，“ $\pi$ 共役制御したイミダゾピラジノン誘導体の化学発光特性の評価”，生物発光化学発光研究会第 27 回学術講演会，2010 年 10 月 30 日，昭和大学（東京都）。
- (37) 中川達規，牧昌次郎，丹羽治樹，平野 蒼，“ウミホタル型アミドピラジン蛍光色素の合成と分光学的性質の評価”，生物発光化学発光研究会第 27 回学術講演会，2010 年 10 月 30 日，昭和大学（東京都）。
- (38) 中川達規，牧昌次郎，丹羽治樹，平野 蒼，“ウミホタル型アミドピラジン蛍光色素の合成と分光学的性質の評価”，2010 年光化学討論会，2010 年 9 月 8 日，千葉大学（千葉県）。
- (39) 小林弘和，藤尾俊介，牧 昌次郎，丹羽治樹，平野 蒼，“ $\pi$ 共役したイミダゾピラジノン誘導体の化学発光特性の評価”，2010 年光化学討論会，2010 年 9 月 8 日，千葉大学（千葉県）。
- (40) 八谷聡二郎，稲垣貴之，橋爪大輔，池田浩，水野一彦，牧昌次郎，丹羽治樹，平野 蒼，“ウミホタル生物発光体構造を利用した蛍光色素：アミドピラジン配位ホウ素誘導体”，2010 年光化学討論会，2010 年 9 月 8 日，千葉大学（千葉県）。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

平野 蒼 (HIRANO TAKASHI)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：20238380

### (2) 研究協力者

小林 弘和 (KOBAYASHI HIROKAZU)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・博士前期課程学生

研究者番号：なし

中川 達樹 (NAKAGAWA TATSUKI)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・博士前期課程学生

研究者番号：なし

石井 雄基 (ISHII YUKI)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・博士前期課程学生

研究者番号：なし

笹 真希子 (SASA MAKIKO)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・博士前期課程学生

研究者番号：なし

林 千尋 (HAYASHI CHIHIRO)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・博士前期課程学生

研究者番号：なし

小鷹 藍 (KODAKA AI)

電気通信大学・電気通信学部・4 年生

研究者番号：なし

福島 栄一 (FUKUSHIMA EIICHI)

電気通信大学・電気通信学部・4 年生

研究者番号：なし