

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：52501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04761

研究課題名(和文) 夜行性の両生類トウキョウサンショウウオはどのような人工光であれば悪影響を受けないか

研究課題名(英文) What kind of artificial light does the nocturnal amphibian *Hynobius tokyoensis* need to be exposed to in order for it to be adversely affected?

研究代表者

湯谷 賢太郎 (Yutani, Kentaro)

木更津工業高等専門学校・環境都市工学科・准教授

研究者番号：00344953

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、LED照明の色と照度の違いが希少種で夜行性であるトウキョウサンショウウオの夜間活動量に及ぼす影響を明らかにすることを目的として実験を行った。実験には白色、青色、緑色、黄色、赤色のLEDを用い、1ルクスと10ルクスの照度下での本種の夜間活動量を消灯時の活動量と比較した。実験の結果、照度が高くなれば、光色に関わらず本種の活動量は抑制されると考えられた。本研究より、同じ照度において夜間活動量を抑制する影響の大きさは白色 赤色 > 緑色 青色 > 黄色となると考えられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の結果から、黄色LEDを用いた照明は本種への影響を最小化することが可能になると考えられる。また、本種の自然生息地では、ゲンジボタルの生息も確認されているものの、黄色光であればゲンジボタルの成虫および幼虫に対して影響を小さくでき、同時に2種類の生物に対して配慮が可能である。しかし、全ての野生生物に対してLED単色光の影響が明らかとなっているわけではなく、特定の生物への影響が小さくなくても、他の生物への影響が大きくなる可能性も否定できず、注意が必要であると考えられる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study was to clarify the effects of color and illuminance of LED lighting on the nocturnal activity of a rare nocturnal species, the Tokyo salamander (*Hynobius tokyoensis*). We used white, blue, green, yellow, and red LEDs in the experiment, and compared the nocturnal activity of this species at 1 and 10 lux with that of when the lights were off. The results of the experiment indicated that the activity of this species was suppressed at higher illuminance, regardless of the light color. The results of this study suggest that the magnitude of the suppression of the nocturnal activity of this species at the same illuminance is white red > green blue > yellow.

研究分野：応用生態工学

キーワード：トウキョウサンショウウオ 光害 夜間行動

1. 研究開始当初の背景

トウキョウサンショウウオ (*Hynobius tokyoensis*) は、環境省の公表しているレッドリストに絶滅危惧類 (VU) として記載されており、2020 年にはさらに特定第二種国内希少野生動物種に指定され、生息地や産卵場所の保全が必要とされている。本種は、有尾目サンショウウオ科サンショウウオ属に分類される小型の両生類である。群馬県を除く関東地方の 1 都 5 県と福島県の一部に分布し、標高 300 m 程度までの丘陵地や、一部では海岸近くにも生息している。幼生の間は水中で生息し、変態後は陸上で生息するようになる。小型サンショウウオ類の多くがそうであるように、本種も夜行性と考えられ、日中は林床のリター層や他の生物が掘った穴内に潜み、雨の日や夜間に表層に上がって餌を探す。既往研究によれば、東京都多摩地区の総個体群サイズは 1978 年からの 20 年間でほぼ半減し、40 年間ではほぼ 3 分の 1 に縮小したとされ、近い将来東京都から本種の姿が消える日が来るのを否定できないと報告されている。サンショウウオ類は環境の変化に敏感であるため生態系にとって重要な指標であり、本種は日本在来の固有種でもあることから、本種の生息地の保全と個体群の保護は急務である。本種は首都圏近郊を生息地としていることや、標高 300 m 程度までの低い丘陵地に多く生息していることから、他のサンショウウオ類と比較して道路や宅地、レジャー施設などの開発による影響を受けやすい。近年では、開発を行う際に本種に対しての保全措置を行う例もみられるようになってきている。

前述した本種の個体群減少の原因の中でも開発による影響は生息場の直接的な破壊だけに留まらず、光害や騒音などによる影響も考えられる。特に光害については近年、夜間の照明が動物の移動、定位行動、誘引・忌避行動、摂食行動、個体間の情報伝達、種間関係、繁殖、死亡率など様々なことに影響があるとされており、多くの事例が報告されている。特にサンショウウオ類は光害による影響を受けやすい生物であるとされ、海外においてはサンショウウオ類への光害に関する事例が報告されている。本種においても、夜間の人工光は移動距離と活動時間を減少させ、0.02 ルクス程度の月明り程度の照度であっても、消灯条件と比較して移動距離と活動時間が 40 から 42 % 抑制され、夜間の街灯直下程度となる 40 ルクスの光を受けると、移動距離と活動時間がともに 97 から 100 % 抑制されることが明らかとなっている。一方で、夜間の人工光による野生生物への影響は、光色によっても異なることが知られており、ホテルについては多くの報告がある。

近年のサンショウウオ類の視覚に関する分子レベルの研究によれば、サンショウウオ類は人間とは異なった色覚を持つことが知られている。人間が持つ錐体細胞が 424, 532, 563 nm に最大感度を持つのに対し、サンショウウオ類は 367, 444, 567, 615 nm に感度を持つと言われている。さらに、一部の両生類には青色光に最大感度を持つ緑色杆体を含む独自の二重杆体システムがあり、薄暗がりでの色の識別が可能であることが示唆されている。そのため、サンショウウオ類は人間よりも光の色を詳細に区別している可能性が高く、光害の程度も光の色によって異なる可能性が高い。しかし、サンショウウオ類の異なる光色に対する反応の違いについては多くは知られておらず、本種においては不明である。

2. 研究の目的

本研究では LED 照明の色と照度の違いがトウキョウサンショウウオの夜間活動量に及ぼす影響を明らかにすることを目的として実験を行った。

3. 研究の方法

(1) 研究対象種

本研究では、千葉県木更津市内で 2015 年、2017 年、2019 年の 3 月に採取した本種の卵をそれぞれ孵化させ、実験に使用できるまでに育てた体重 0.562 g から 2.11 g の計 21 個体を用いた。本種の野生の成熟個体は体重 3 g から 10 g であると報告されており、本研究で用いた個体が最大でも 2.11 g であったことを考えると、実験個体の全ては亜成体に属する個体であると考えられる。実験は 3 年に渡って実施されたため、上記体重の範囲はその間の最小値と最大値であり、実験用個体は飼育中の死亡により一部入れ替わりがある。なお、本実験で用いた個体は全て同様な行動特性を有するとして個体の区別は行っていない。

実験用個体は、実験に使用しない時はプラスチック製飼育容器に入れて飼育した。個体の飼育は、加湿して温度を 15 に設定した恒温器 (EYELA LTE-500) 内で行った。飼育期間中は 8 時 30 分から 18 時まで実験室の照明を点灯させ、恒温器の観察窓より内部に光が当たるようにした。恒温器内の照度は場所により差はあるが 60 ルクス程度である。本種はワラジムシ類を主要な餌としていることから木更津市内の森林内で採取することのできるワラジムシ類を餌として主に与え、ワラジムシ類が採取できない場合には市販のミミズ類やユスリカ類の幼虫を与えた。人に馴れることを可能な限り避けるため、餌は全て生きている状態で飼育個体から離れた場所に設置し、ピンセット等を用いた直接の給餌は行っていない。給餌後 1 週間以内に排泄が見られることから、飼育容器の清掃は 1 週間ごとに行い、清掃後に再び給餌を行った。

(2) 実験方法

実験は2018年4月から2020年3月にかけて行った。実験では飼育中の個体から無作為に個体を選定し、実験の1週間前から恒温器内で絶食を行い、空腹や満腹による採餌を目的とした行動への影響が一定になるように配慮した。実験は実験室内に独立した個室として設置されている恒温室にて行った。実験中は恒温室の扉を閉めて人は立ち入らず、実験室にも人が立ち入らないようにして外部からの影響を排除した。図-1には、実験で用いた実験装置の模式図を示す。室温を15に保った恒温室内に、底面に湿らせた黄色のスポンジシートを敷いた縦310mm × 横230mm × 高さ300mmの観察用ケージを設置し、上部には調光器に接続したLED照明を設置した。このスポンジシートには3 × 3のマスに分ける枠線

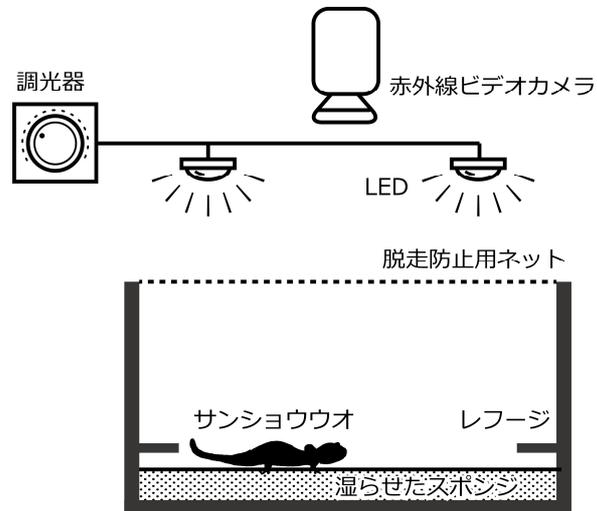


図-1 実験装置模式図。

が引かれており、後述する本種の活動量を求める際に使用した。スポンジシートの色は実験用個体の視認性を考えて決定したが、実験結果に影響する可能性も考慮して黒色スポンジを用いた検証を行っている。検証では照度を1ルクスとし、光色やケージ等の条件を本実験と一致させ、底面のスポンジの色のみを変更した。その結果、黄色のスポンジシートを用いた結果と黒色のスポンジシートを用いた結果の間には正の相関関係（ピアソンの積率相関係数： $r = 0.877$, $p = 0.050$ ）が見られ、黒色の床面は本種の活動量を一律増加させる傾向があるものの、照明色の違いによる本種活動量への影響の大小に関する傾向に影響を及ぼさないことを確かめている。また、ケージの両サイドには個体のストレス軽減のため縦20mm × 横230mm × 高さ5mmのレフージ（隠れ家）が設置してある。尚、実験では同型のケージを4個設置し、同時に最大4個体の行動を観察した。照度の調整と測定には分光放射照度計（KONICA MINOLTA CL-500A）を用い、観察用ケージの中央で光量を測定して要求する照度となるように調光器で調整した。実験には白色および単色のLEDを用い、白、青（ピーク波長465nm）、緑（515nm）、黄（591nm）、赤（629nm）の5種類の光色を用いた。実験環境の照度はスポンジシート面上で0ルクス（消灯条件： $n = 12$ ）、1ルクス（白： $n = 9$ 、青： $n = 9$ 、緑： $n = 7$ 、黄： $n = 10$ 、赤： $n = 7$ ）、および10ルクス（白： $n = 9$ 、青： $n = 11$ 、緑： $n = 11$ 、黄： $n = 12$ 、赤： $n = 10$ ）とした。各条件のデータ数は、実験個体のローテーションと実験中に個体がケージの壁面を登ってしまう等のアクシデントにより同数とはなっていないが、解析上の不都合はないため特に揃えることは行っていない。

実験開始後に観察用個体を1ケージに1個体ずつ入れ、実験環境に馴らすのと同時に日中の環境を再現するため、恒温室内の照明（白色LED蛍光灯）を点灯した状態で8時30分から18時まで放置した。その後、恒温室内を消灯し、実験用のLEDを点灯させて夜間行動の観察を開始した。夜間行動は赤外線ビデオカメラ（Panasonic HC-VX985M）で撮影することで行い、撮影時間は用いたビデオカメラの録画上限の関係で11時間とした。実験終了後には、使用した個体の体重を測定して記録した。実験に用いた個体は、次に実験に用いる前に2週間以上静養させた。

撮影したビデオを再生しながら、スポンジシートに引かれた線を跨いだ回数をカウンターを用いて記録し、線を跨いだ回数を夜間における活動量とした。なお、この回数と本種の移動距離との間には正の相関関係（ピアソンの積率相関係数： $r = 0.979$, $p < 0.001$ ）があることが予備実験により確かめられており、本研究における夜間活動量（以下、活動量と表記する）は移動距離とほぼ同義である。

(3) 解析方法

実験に用いた個体の体重と活動量との関係は、光色ごとにピアソンの積率相関係数を用いて解析した。次に、光色の違いが活動量に及ぼす影響について解析するため、消灯条件を除いたデータについて光色をカテゴリカル変数、体重と照度を連続変数として活動量に対する共分散分析を行った。この時、体重と照度の間に交互作用が確認された場合は、体重差を一般化して光色の違いが本種の活動量に与える影響を検証することができない。その場合には、活動量を被説明変数、照度と体重を説明変数、消灯条件を含む光色を変量効果とした線形混合モデルを作成し、各光色と各照度における活動量を本研究で用いた個体の平均体重を用いて代表させることで比較することを試みた。作成されたモデルの当て嵌まりの程度はNakagawa's R^2 を用いて検証した。尚、どちらの計算もフリーの統計ソフトR（ver.4.1.2）を用いて行い、共分散分析の計算にはcar（ver.3.0.12）、線形混合モデルの計算にはlme4（ver.1.1.28）、lmerTest（ver.3.1.3）、 R^2 の計算にはperformance（ver.0.9.0）パッケージを用いた。

4. 研究成果

図-2 は、本種の体重と異なる色の照明下における活動量との関係を照度別に示したものである。消灯条件の本種の体重と活動量との間には正の相関関係 ($r = 0.722$, $p = 0.008$) が見られた。同様に、1 ルクスで行った実験 (図-2a) でも、光色によらず本種の体重と活動量との間に正の相関関係 (白: $r = 0.729$, $p = 0.026$, 青: $r = 0.640$, $p = 0.038$, 緑: $r = 0.786$, $p = 0.036$, 黄: $r = 0.914$, 赤: $r = 0.640$, $p = 0.121$) が見られた。既往研究より、トウキョウサンショウウオの移動距離と体重との間には正の相関関係があることが知られており、本研究においても、光色に関わらず同様な結果となった。しかし、10 ルクスで行った実験 (図-2b) においては、本種の体重と活動量との間に相関関係はみられなかった (白: $r = 0.026$, $p = 0.948$, 青: $r = 0.024$, $p = 0.945$, 緑: $r = 0.158$, $p = 0.642$, 黄: $r = 0.049$, $p = 0.881$, 赤: $r = 0.550$, $p = 0.099$)。これは、照度の増加によって本種の活動機会が減少し、レフージから出て活動を行わない、もしくは出て度々動かなくなってしまう、活動量が抑制された結果である。実際に、白色では9個体中8個体、青色では11個体中5個体、緑色では11個体中2個体、黄色では12個体中3個体、赤色では10個体中4個体が観察中に1回も活動しなかった。

光色をカテゴリカル変数、体重と照度を連続変数として活動量に対する共分散分析を行った結果を表-1 に示す。分析の結果、本種の活動量は光色によって差があることが確認された ($p < 0.001$)。一方で、体重 ($p < 0.001$) と照度 ($p < 0.001$) によっても活動量が異なることが示されたものの、体重と照度の間には交互作用も確認され、本種の活動量を説明するためのモデルには体重と照度の交互作用を考慮する必要性が確認された。そのため、活動量を目的変数、照度と体重を説明変数、消灯条件を含む光色を変数効果とした線形混合モデルを作成した (表-2)。作成されたモデルでは、全ての変数の係数が有意であり、決定係数が0.627 となり有意なモデルが作成されたと考える。このモデルを用い、本実験で用いた個体の平均体重である1.4 gの個体に対する消灯条件、1 ルクス、10 ルクスのそれぞれの照度条件において各光色における活動量を推定した (表-3)。この値はそれぞれの実験条件下における活動量の平均値に相当すると考えられる。また、推定値がマイナスの値となった場合には活動量は0 と考えた。照明の本種の活動量に対する抑制効果は白色光で最も大きく、赤色光においても同程度の影響が見られた。この2色の光では1ルクスの照度で消灯条件と比較して活動量が32%と35%となり、10ルクスの照度において活動量がともに0となった。一方で黄色光では、1ルクスの照度での活動量が消灯条件の64%、10ルクスの照度では29%となり、他の光色の場合と比較して影響が小さいことが明らかとなった。以上より、本種の活動量に及ぼす照明色の影響の大きさを考えれば、白色 > 赤色 > 緑色 > 青色 > 黄色となると考えられた。また、10ルクスで行った実験では、最も影響を受けなかった黄色光であっても活動量が消灯条件の29%に抑制されたことから、照度が高くなれば光色に関わらず本種の活動量は抑制されることが分かった。

サンショウウオ類への照明光の色の影響に関する報告は少ないが、セアカサンショウウオ (*Plethodon cinereus*) において、消灯条件、白色光、赤色光、緑色光、青色光のもとでの反応を調べた研究では、セアカサンショウウオは赤色や青色の光よりも緑色の光を忌避するが、白色光を最も忌避すると報告されている。この報告では黄色光での実験が行われておらず、照度に関する記述もないため単純に本研究の結果と比較することはできないが、同じサンショウウオ類

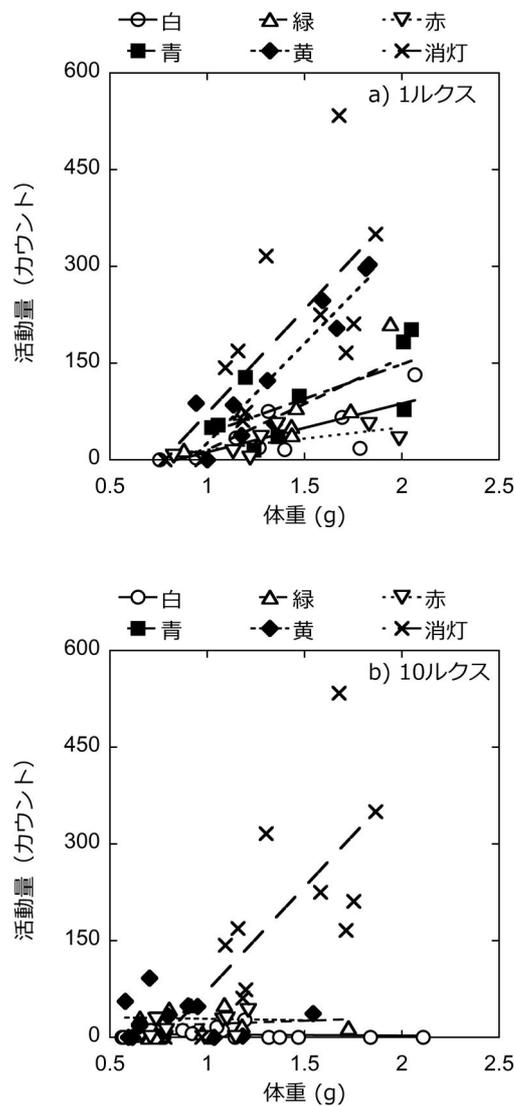


図-2 1 ルクス(a)および 10 ルクス(b)の照度での異なる照明色下におけるトウキョウサンショウウオの体重と活動量との関係。

であっても種によって忌避する光色に違いがある可能性があると考えられる。ある種のカエル幼生を用いた研究では、このカエル幼生が自然界において採餌やレフージに利用している環境と似た光の色に走光性を示すという報告がある。本種においても同様の理由から、自然界での餌やレフージとする環境に黄色の環境が存在するため、黄色の光に影響を受けにくかった可能性が考えられる。一方で、本種は単色光の中では赤色に強い感受性を示し、1ルクスの光でも活動量が強く抑制されていた。本種は夜行性と考えられており、日中は林床のリター層や他の生物が掘った穴内に潜んでいる。一般的に波長の長い赤色の光はそのような環境に侵入しにくいいため、日中であってもリター層内や他の生物が掘った穴内には赤色光がほぼ存在しない可能性が高い。そのため、本種は赤色の光を受けたことにより日中の屋外にいと認識して活動を控えたのではないかと考える。

本研究では亜成体と考えられる個体を用いて実験を行った。そのため、本研究で得られた結果を成体に当てはめて考えることには注意が必要であるが、成体と亜成体の採餌等の一般的な生態に違いは知られておらず、本研究の結果を成体に当てはめることは可能であると考えられる。光害による活動量抑制効果は採餌等の日々の活動の他に、繁殖行動に影響を及ぼすと考えられる。本種の成体は冬から春にかけて繁殖のために非繁殖期に生息する森林内から繁殖地である水辺に移動する。本種の産卵場は千葉県の丘陵地であれば谷津の谷津頭付近に多く存在し(21)、斜面林から近い産卵場で卵嚢が多く観察されることが報告されている。一方で、本種は谷津以外の場所にも生息しており、千葉県の棚田が広がる地区において調査された結果によれば、その移動距離は最大で林縁から130 mであったと報告がなされている。光害によって本種の成体の移動距離や移動機会が減少すれば、生息地から繁殖地に到達できない個体や、到達するまでに通常よりも長い時間を要する個体が生じる可能性がある。その結果、本種の繁殖機会が減少し、個体数減少につながる恐れがある。高さ12 m、路面照度30ルクスの街灯の場合、20 m離れた場所の路面照度は2ルクスとなる。このことは、人工照明が広い範囲に影響を及ぼす可能性を示しており、本種の生息する丘陵地に道路や宅地造成等のための開発が行われた場合、本種が光害の影響を受けている可能性は否定できない。

光害への対策として、一定の地域に光が入らないようにする、点灯する期間を制限する、不必要な光の漏れ込みを防ぐ、光量を変える、光の組成を変える、の5つが提唱されている。しかし、市街地や道路などの照明に対する基準では、概ね3ルクス以上の照度となるように照明の設置が求められており、光量を変えての対策は現実的ではない。そのため、普及の進む単色LED照明の活用により光の組成を変えての対策が現実的であろう。サンショウウオ類の光害対策として光の組成を変えた例は存在しないが、ホタルが生息する公園整備において、成虫期のホタルの行動への影響が小さい色であるオレンジ色のフィルターを取り付けて対策を行った例がある。本研究の結果から、黄色LEDを用いた照明は本種への影響を最小化することが可能になると考えられる。また、本種の自然生息地では、ゲンジボタルの生息も確認されているものの、黄色光であればゲンジボタルの成虫および幼虫に対して影響を小さくでき、同時に2種類の生物に対して配慮が可能である。しかし、全ての野生生物に対してLED単色光の影響が明らかとなっているわけではなく、特定の生物への影響が小さくなくても、他の生物への影響が大きくなる可能性も否定できず、注意が必要であると考えられる。

表-1 活動量に対する体重と照度及び光色による共分散分析結果。

因子	平方和	自由度	F値	p値
体重	50716	1	31.1	< 0.001
照度	19938	1	12.2	< 0.001
光色	49968	4	7.65	< 0.001
体重×照度	39440	1	24.2	< 0.001
残差	142042	87		

表-2 活動量を目的変数とし、光色を変量効果とした線形混合モデルによる推定結果。

固定効果	係数	標準誤差	t値	p値
切片	- 151	38.6	- 3.90	< 0.001
体重	182	23.2	7.85	< 0.001
照度	17.8	4.24	4.18	< 0.001
体重×照度	- 17.9	3.43	- 5.21	< 0.001

変量効果	変動量
消灯条件	81.7
白色	- 37.8
青色	- 19.4
緑色	- 14.4
黄色	21.5
赤色	- 31.6

Nakagawa's conditional $R^2 = 0.627$

表-3 モデルにより推定した光色、照度ごとの体重1.4 gのトウキョウサンショウウオの活動量。推定値が負になる場合は0とした。()は消灯条件を100としたときの割合。

照度	0	1	10
光色	(lux)	(lux)	(lux)
白色		58.9 (32)	0.0 (0.0)
青色		77.4 (42)	12.1 (6.5)
緑色	186 (100)	82.3 (44)	17.0 (9.2)
黄色		118.2 (64)	52.9 (29)
赤色		65.1 (35)	0.0 (0.0)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 湯谷賢太郎・栗田将司	4. 巻 2021 (2)
2. 論文標題 トウキョウサンショウウオの基礎代謝に対する温度環境及び体重との影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 爬虫両棲類学会報	6. 最初と最後の頁 173-178
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 湯谷 賢太郎, 三森 彩音, 堀切 もも子	4. 巻 78 巻 7 号
2. 論文標題 LED照明の色と照度の違いがトウキョウサンショウウオの夜間活動量に及ぼす影響	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会論文集G（環境）	6. 最初と最後の頁 111_425-111_430
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2208/jscej.78.7_111_425	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 湯谷 賢太郎, 佐野 尚毅	4. 巻 25号2巻
2. 論文標題 夜間のLED 照明が夜行性のトウキョウサンショウウオの行動に及ぼす影響	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 応用生態工学	6. 最初と最後の頁 63-70
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3825/ece.22-00003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 堀切もも子, 湯谷賢太郎
2. 発表標題 LED照明の色の違いが夜行性のトウキョウサンショウウオの活動量に及ぼす影響
3. 学会等名 応用生態工学会 2020年度Web研究発表会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------	---------