

《報告》

野外生息地における西日本型ゲンジボタルの産卵雌誘引手法の開発

川野敬介

豊田ホタルの里ミュージアム, 〒750-0441 山口県下関市豊田町大字中村 50-3

はじめに

ゲンジボタル *Nipponoluciola cruciata* (Motschulsky, 1854) は中部地方を境に東日本に東日本型（東本州型）が、西日本に西日本型と呼ばれる生態的に異なる2つのグループに分けられ（Ohba, 1984; 大場, 2001）, ゲノムレベルでの集団解析においてもそれは支持され、さらに西日本型は西本州型と九州型に分けられることが知られている（Kato *et al.*, 2019; Suzuki *et al.*, 2023）. 生態的な違いとしては、生息環境をはじめ（大場, 2004）, 雄の集団同時明滅時の明滅間隔が東日本型では4秒前後であるのに対して、西日本型では2秒前後（五島列島の個体群は1秒前後）であったり（Ohba, 1984; 大場, 2001; Ohba *et al.*, 2020）, 産卵様式が西日本型が集団（10～30個体）で産卵するのに対して、東日本型は単独で産卵することなどが顕著な例として知られている（大場, 2004; 遊磨・堀, 1981）.

これまで全国的にゲンジボタルの保全・増殖のため、他地域からの人為的な移入が頻繁に行われてきた（勝野, 1968; 全国ほたる研究会, 1978 など）. そのため、各地域個体群の移入による在来個体群への遺伝的および生態的攪乱が生じる可能性が指摘され（村上, 2012）, 特に東日本型の生息域に西日本型が移入されることが多く、在来個体群への影響が危惧されている（日とほか, 2007; 2008; Iguchi, 2009; 井口, 2009; 草桶ほか, 2011; 後藤, 2012）.

在来個体群への影響を回避するために現在用いられている手法は、移入個体群の排除であるが（村上, 2012）, 在来個体（東日本型）と移入個体（西日本型）を形態や体色等で区別することは困難であり（Ballantyne *et al.*, 2023）, 選択的な排除はできない. また、たとえ他地域のゲンジボタルが移入されていたとしても長年大事に保護されてきたゲンジボタルであることに変わりはなく、それを排除することは保護してきた人々やその地域としては多くの苦痛を伴うことになる.

そこで、本研究ではゲンジボタルの西日本型と東日本型の生態的な差異としての集団産卵に着目し、野外生息地において西日本型の産卵雌を誘引する手法の開発を目的に実験を行った.

調査方法

野外生息地における産卵時の発光パターン解析

雌が産卵時に集団を形成するためには、集合を誘発するような発光パターンが存在していると考えられる. そこで、自然条件下における産卵時の雌の発光パターンを撮影・解析するために2023年5月16日～6月9日に山口県下関市豊田町内の荒木（一の俣川）、中村（水路）、檜原（稲見川）において調査を行った. 調査は河川内を歩きながら産卵している雌を探した. 産卵している雌を確認した場合は、産卵していることを目視で確認（産卵管をコケに差し込んでいるところ）した上で、その時の発光をデジタルカメラ（TG5, Olympus 社製）でマクロ撮影した. 撮影した映像を元に川野（2013）の手法で解析して数値化し、波形を出した.

野外生息地におけるLEDライトによる産卵雌の誘引

ゲンジボタルの配偶行動調査の一環で、本種の発光を撮影・解析し、得られた数値を音に変換して、そ

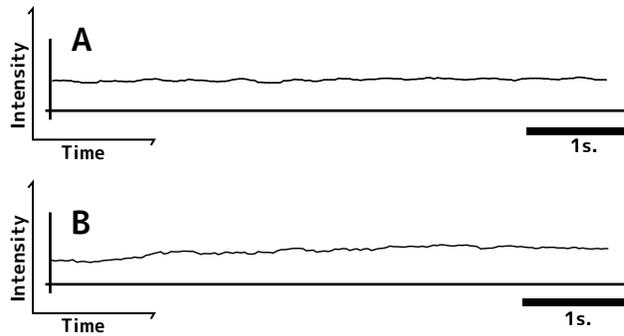


図1. 雌が誘引された波形 (A), Aを元にLEDライトを野外で実際に光らせた時の光を解析した波形 (B) .

※図に示した部位はAとBは同じではない.

れを電圧に変換することで3種類の異なる発光パターンをLEDライトで再現した装置を用いて雄の誘引実験を自然条件下で実施し、その内の1種類の発光パターンにだけ雄ではなく複数の雌が誘引された(川野, 2013). その発光パターンは雌が単独で発光していた光を解析・再現したもので、強弱を伴う連続的な発光パターンであった(図1-A). そこで、その結果を踏まえて、予備調査として雌が誘引された発光パターンを詳しく調べるとともに、LEDライトの配置や数量等を変えて実験して、もっとも効果があると思われる発光パターンとLEDライトを配置した装置を作成して、本実験では使用した. 実験に用いた装置の根幹装置(音を電圧に変換する装置)は川野(2013)を用いて、雌が誘引された音(=発光パターン)(図1-A)を実験時間中に途切れることがないようにデータ上で繰り返し繋げて、それを音楽プレイヤーで再生することでLEDライトを光らせた(図1-B). 光広散キャップを装着したLEDライト11個を乳白色のカップ状のケースに配置した(図2). 本種の発光波長(486~680nm)の中で560nmあたりにピークがあることから(Eguchi *et al.*, 1984), 実験には560nmにピークを持つLEDライト(520~600nm)を使用した. 光の強さはLEDライトに光広散キャップを装着した状態で5cm離れたところで計測した時最大0.9luxになるよう調整した.

実験は山口県下関市豊田町荒木一の俣川において、2023年5月16日20:00-21:23, 5月17日20:07-21:20, 5月20日19:47-20:46, 5月21日19:55-21:07, 5月23日20:01-20:34に実施した. なお、5月16日, 17日, 21日は風がなく暖かったため、非常に多くの個体が飛翔していたが、5月20日, 23日は風が強く寒かったため、ほとんど飛翔している個体はいなかった.

LEDライトは実験開始時より点灯し、それを河川の反対岸に向けて静置した. LEDライトに誘引され、着地した個体のみを対象として、着地した時間、飛来してきた方向(下流側・上流側)、性別を記録し、その個体を採集して個別に分けて持ち帰った. 持ち帰った個体は産卵雌なのかを確認するためにプリンカッ

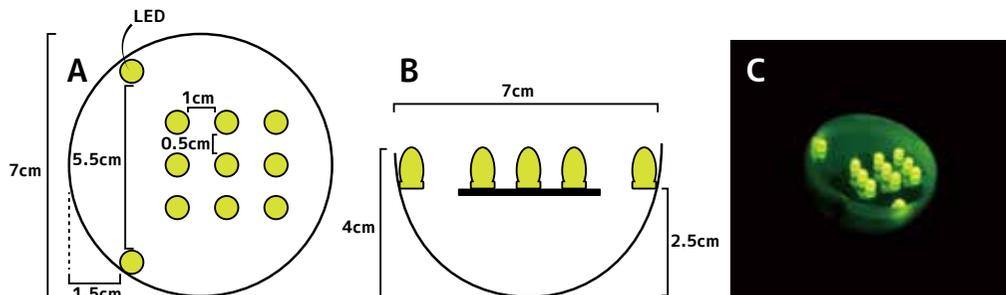


図2. 誘引装置のLEDライトの配置 (A・B) と点灯時 (C) .

A. 装置を上から見たところ, B. 装置を横から見たところ(断面), C. 実験時の様子.

プ（底直径 8 cm，蓋直径 10 cm，高さ 4.2 cm）に産卵床として湿らせたオオミズゴケとともに個別に入れて飼育して，毎日産卵の有無を確認した．受精の有無を孵化の有無で確認するために，産卵を確認してから 14 日後に個別にプラスチック網（網目 1 cm）の上に産卵されたコケを置き，それを水を張ったバットの上に置いて孵化した幼虫のみがバットに落下するようにした．受精が正常に行われ，産卵のために飛来してきたのかを確認するために，孵化した幼虫を計数した．

結 果

野外生息地における産卵時の発光パターン解析

調査の結果，産卵を確実に確認することが出来たのは 2023 年 6 月 9 日 23 : 23 に中村の水路において 2 雌であった．この 2 雌は同じところで産卵していた．その内 1 雌の産卵中の発光を撮影・解析することができた（図 3-A）．観察できた発光パターンは弱く持続的に発光しながらも強い光で規則的な明滅をしていて（約 1 秒間持続発光，約 1 秒間休息），2 雌が同調することもあれば，しないこともあった．また，通常時の雌の発光よりも光が強いと思われた．観察している間に他の雌が誘引されることはなかったが，周囲には多数の雄がいたがそれらが寄ってくることはなかった．

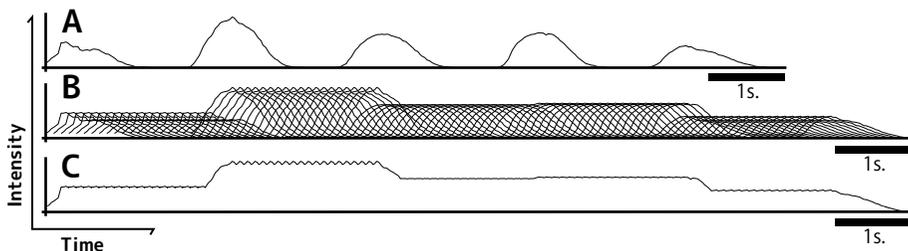


図3. 自然条件下の産卵時の雌の発光波形 (A)，複数の雌が産卵していたと仮定してAの波形を0.1秒ずらして繰り返した場合 (B)，Bを全体として見た場合の波形 (C)．

野外生息地における LED ライトによる産卵雌の誘引と受精の有無

実験の結果，12 雌が LED ライトに誘引され，着地した（表 1）．なお，実験中にこの LED ライトの周囲には多数の雄が発光飛翔していたが，1 個体も誘引されることはなかった（ホバリングする個体すらなかった）．誘引された雌は下流側から飛来した個体が 9 個体，上流側からが 3 個体と下流側から遡上するように飛来する傾向が高いことがわかった．

これら 12 雌を飼育し，受精の有無を孵化の有無で確認したが，産卵前に死亡した 2 個体以外はすべてで産卵が確認され，正常に孵化した（表 2）．孵化数も個体差はあったが正常に受精できていることが確認できた（表 2）．

考 察

実験の結果，LED ライトに雌のみが誘引され，しかもすべてが産卵雌であることが確認できた（産卵前に死亡した 2 個体を除く）．ただ，誘引できた発光パターン（図 1-A, B）は，自然条件下で産卵時に雌が放つ発光パターンとはまったく違うものであった（図 3）．また，予備実験において LED ライトを 1 個のみで今回用いた発光パターンで放っても雌が誘引されることはなく，本実験で使用したように複数の LED ライトを配置しなければ誘引されなかった．さらに，誘引された雌は LED ライトの周辺ではなく，LED ライ

表1. LEDライトに誘引された個体

調査日（調査時間）	飛来時刻	性別	飛来方向
5/16（20:00-21:23）	20:30	♀	下流
〃	20:35	♀	下流
〃	20:43	♀	下流
〃	21:05	♀	下流
〃	21:13	♀	下流
5/17（20:07-21:20）	20:45	♀	下流
〃	20:46	♀	下流
〃	20:57	♀	上流
〃	21:13	♀	下流
〃	21:16	♀	上流
5/21（19:55-21:07）	20:12	♀	上流
〃	20:22	♀	下流

トの集合体の中心付近に必ず着地したことから、今回用いた発光パターンを集合体として産卵雌が認識している可能性が考えられた。すなわち、本調査で観察された2雌の産卵時の発光は同調することもあれば、しないこともあった。これが大きな集合体として複数個体（10～30個体）いた場合、個々に規則性のある明滅をして産卵したとしても、それが同調したりしなかったりした場合、集合体として見ると本実験で用いた不規則で持続的な発光パターンに見えるのかもしれない（図3-B,C）。しかし、複数個体が集合していた場合の集合体として見た時はこのような推測もできるが、今回は2雌が集団産卵していたが、同時に2雌が同じところに集まって産卵したとは考えられないので、最初に1雌が産卵し、それにもう1雌が誘引されたと考えべきであろう。そうすると、集合時の初期（最初の1個体目）の段階ではこの推測は当てはまらない。なお、産卵中の雌は強弱を伴う連続光を放ち（大場, 1986）、その光に誘引されて産卵集団は夜が更けるとともに大きくなってゆく（遊磨, 1987）という観察が報告されているので、産卵中の雌の発光

表2. 誘引された雌が産卵した卵の孵化数

採集日	孵化開始日	孵化数（匹）	孵化数計数日
5/16	6/15	668	6/18
5/16	6/15	928	6/18
5/16	6/17	638	6/18
5/16	6/15	457	6/18
5/17	6/15	1377	6/18
5/17	6/15	378	6/20
5/17	6/15	486	6/20
5/17	6/15	547	6/20
5/21	6/18	309	6/20
5/21	6/18	266	6/20

※採集した個体の内2雌は産卵前に死亡したため産卵の有無は不明。

パターンにはバリエーションがあるのかもしれない。

なお、集団産卵の加入は23時～24時が最大で、午前2時～3時にも小さなピークが見られる（遊磨・堀，1981）と報告されていることから、LEDライトをこの時間帯に活用するとより多くの産卵雌を誘引できる可能性がある。

本実験では、西日本型ゲンジボタルの集団産卵を、実際に観察し、さらに産卵雌を人工的に誘引することで確認した。この成果は東日本型ゲンジボタルの生息地に移入された西日本型ゲンジボタルをこの習性の差異を用いて選択的に取り出すことや産卵場所を制御して両個体群を共存させることに応用できるかもしれない。さらに、人工水路などにゲンジボタルを放流しても雌は長距離を遡上して産卵するため（堀ほか，1978）、敷地外へ逸脱して定着しにくい、産卵させたい場所を人工的に制御することで産卵雌の逸脱を軽減し、無駄な放流や周辺個体群への影響を減少させることができるかもしれない。他にも、保全だけでなく教育などでもさまざまな活用が期待される。

最後に、本研究成果はこれまで問題であったゲンジボタルの地域個体群の保全に対して有用な活用が期待できる可能性があるが、その一方で、悪用すると産卵雌の大量な捕獲が懸念される。かつて他地域に移入されたゲンジボタルや、本種を一生懸命守ろうとしている人々に寄り添う有用な活用を願う。

謝辞

実験装置の作成に際して大吞文人氏に終始にわたりご協力、ご指導頂き、大庭伸也博士（長崎大学）に草稿原稿を読んで頂き、有益な助言を頂いた。ここに記して御礼申し上げる。

参考文献

- Ballantyne L., Kawashima I., Wan F. A. JUSOH, Suzuki H. (2023) A new genus for two species of Japanese fireflies having aquatic larvae (Coleoptera, Lampyridae) and a definition of *Luciola* s. str., *European Journal of Taxonomy*, **855**: 1-54.
- Eguchi E., Nemoto A., Meyer-Rochow VB, Ohba N. (1984) A comparative study of spectral sensitivity curves in three diurnal and eight nocturnal species of Japanese fireflies. *Journal of Insect Physiology*, **30**: 607-612.
- 後藤好正 (2012) 神奈川県横浜市におけるゲンジボタル 在来個体群と移入個体群の同時明滅周期について。豊田ホテルの里ミュージアム研究報告書, **4**: 19-26.
- 日和佳政・水野剛志・草桶秀夫 (2007) 人工移入によるゲンジボタルの地域個体群の遺伝的構造への影響。全国ホテル研究会誌, **40**: 25-27.
- 日和佳政・佐久間慎介・柑子木郁也・草桶秀夫 (2008) ゲンジボタルの遺伝的分化と多様性から見た移植の問題点。全国ホテル研究会誌, **41**: 33-38.
- 堀 道雄・遊磨正秀・上田哲行・遠藤 彰・伴 浩治・村上興正 (1978) ゲンジボタル成虫の野外個体群。インセクトリウム, **15**(6): 4-11.
- Kato D., Suzuki H., Tsuruta A., Maeda J., Hayashi Y., Arima K., Ito Y., Nagano Y. (2020) Evaluation of the population structure and phylogeography of the Japanese Genji firefly, *Luciola cruciata*, at the nuclear DNA level using RAD-Seq analysis. *Scientific Reports*, **10**: 1533.
- 勝野重美 (1968) 辰野のホテルと人工孵化養殖。昆虫と自然, **3**(6): 13-17.
- 川野敬介 (2013) ゲンジボタルの配偶行動に関する研究。農学博士学位論文, 鳥取大学連合大学院。
- 草桶秀夫・木村和裕・日和佳政 (2011) 遺伝子から見たゲンジボタルの生物多様性と人為的放流の問題点。全国ホテル研究会誌, **44**: 13-19.

- Iguchi Y. (2009) The ecological impact of an introduced population on a native population in the firefly *Luciola cruciata* (Coleoptera: Lampyridae). *Biodiversity and Conservation*, **18**: 2119-2126.
- 井口 豊 (2009) ゲンジボタルの移入問題 . 全国ホタル研究会誌 , **42**: 35-38.
- 村上伸茲 (2012) ホタル移植指針とホタル再生・保護運動 . 全国ホタル研究会誌 , **45**: 19-21.
- Ohba N. (1984) Synchronous flashing in the Japanese firefly, *Luciola cruciata* (Coleoptera: Lampyridae). *Science report of the Yokosuka City Museum*, **32**: 23-33.
- 大場信義 (1986) ホタルのコミュニケーション . 東海大学出版会 .
- 大場信義 (2001) ゲンジボタルの形態と発光パターンの地理的変異 . 横須賀市博物館研究報告 (自然) , **48**: 45-89.
- 大場信義 (2004) ホタルの点滅の不思議 - 地球の軌跡 -, 横須賀市自然・人文博物館 , 神奈川 .
- Ohba S., Numata K., Kawano K. (2020) Variation in flash speed of Japanese firefly, *Luciola cruciata* (Coleoptera: Lampyridae), identifies distinct southern "quick-flash" population on Goto Islands, Japan. *Entomological Science*, **23**: 119-127. doi.10.1111/ens.12403
- Suzuki T., Hiraishi N., Ohba S. (2023) Fine-scale phylogeography of the Japanese Genji firefly, *Biological Journal of the Linnean Society*, **XX**: 1-13.
- 遊磨正秀 (1987) 人工水路のゲンジボタル成虫個体群 . 遺伝 , **41**(3): 48-52.
- 遊磨正秀・堀 道雄 (1981) ゲンジボタルの産卵行動 . 全国ホタル研究会誌 , **14**: 6-7.
- 全国ほたる研究会 (1978) ほたる幼虫の放流増殖事業 . 全国ホタル研究会誌 , **11**: 28.