

ゲンジボタルの発光強度と雌雄および体サイズの関係

川野敬介¹⁾・大呑文人²⁾

¹⁾ 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

²⁾ 〒750-0315 山口県下関市菊川町大字七見 292

Individual Variation of Flash Intensity in the Firefly, *Luciola cruciata* (Coleoptera, Lampyridae) and its Association with Sexual Difference and Body Size

Keisuke KAWANO¹⁾・Fumihito OHNOMI²⁾

¹⁾The Firefly Museum of Toyota Town, Nakamura 50-3, Toyota, Shimonoseki, Yamaguchi Pref., 750-0441 Japan

²⁾Nanami 292, Kikugawa, Shimonoseki, Yamaguchi Pref., 750-0315 Japan

Abstract : In this study, the relation between the flash intensity and the body size of the firefly, *Luciola cruciata* was investigated. Flash intensity of the firefly was measured by a super-sensitive illuminometer developed specifically for this research. The result indicated a significant positive correlation between the flash intensity and the body size on the side of the male, while for females the correlation was negative.

キーワード : ゲンジボタル, 発光強度, 体サイズ, 独自の照度計

Key words : *Luciola cruciata*, luminescent intensity, body size, original illuminometer

はじめに

ゲンジボタル *Luciola cruciata* Motschulsky は雌雄ともに発光するが、発光器の節の数は雌雄で異なり、雄では腹部の第5・6節に、雌では第5節にしかない(大場, 1988)。ただし、体サイズは雄より雌の方が大きい傾向がある(土井, 1958)ので、発光器の節の数が雄の方が多いため、一概に発光面積が雄の方が大きいとは限らない。なお、ゲンジボタルが放つ光については、発光スペクトルなど光の質に関する研究はある(神田, 1935; Eguchi *et al.*, 1984; 臼田, 2003)が、光の強さ(以下、発光強度)に関する研究はほとんどない。

なお、発光コミュニケーションおよび雄の雌認識において発光強度は重要な要素と思われる。そこで、本研究ではゲンジボタルの雌雄の発光強度を独自で開発した高感度照度計を用いて計測した。また同時に体サイズも計測し、発光強度を体サイズおよび雌雄で比較した。

材料および方法

ゲンジボタルの発光強度と体サイズ及び性別の関係を明らかにするために、個体の発光強度および体サイズを2012年5月28日, 6月2日, 6月3日に、室内で測定した。測定には、一の俣川から採集した雄

成虫 63 個体，一の俣川および鷹子用水路から採集した幼虫から羽化させた未交尾雌成虫 32 個体を用いた。雌雄ともに，羽化後の日齢は不明である。

測定対象の光と測定装置の受光部との距離・角度によって測定値に大きな誤差が生じないように，以下に示す装置を用いて測定を行った。まず，内部を均等に白く塗装した塩ビ管（内径 3.5cm×高さ 5.0cm）を受光部上端に取り付け，塩ビ管上端に透明のアクリル板を水平に固定した（図 1）。そして，ホタルの腹面（発光器）を塩ビ管上のアクリル板中央に押し付けるようにして，小型プラスチックシャーレの蓋（直径 3.9cm×高さ 0.5cm）で固定し，5cm 離れた受光部で発光強度を計測した。測定装置の詳細については以下に説明する。なお，一般に入手することができる照度計ではホタルの光を測定するのに感度が足りないことから，発光強度は以下に示す独自に作成した受光部と増幅器を用いた高感度照度計を用いて計測した。作成した照度計の概要を図 1 に示す。

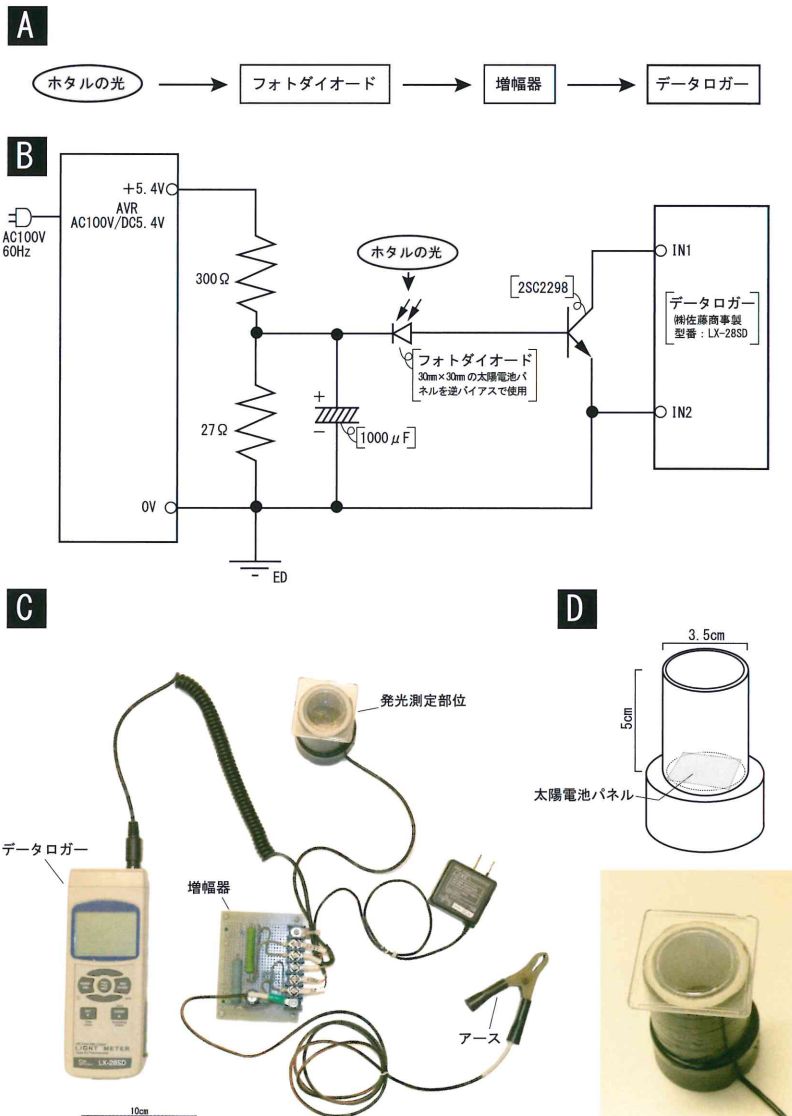


図 1. 超高感度に改良した照度計の回路図と全形および測定部位
 A, 超高感度に改良した照度計の模式回路図；B, 回路図；C, 装置全形とホタルの発光測定器具；D, 発光測定部位。

回路構成: 安定化電源装置 (図 1, AVR) の二次側に設けた抵抗 (図 1, 300Ω, 27Ω) 及び、電解コンデンサ (図 1, 1000μF) により 0.5V のバイアス電圧を得て、これを太陽電池パネルに逆バイアスとなるように接続した。逆バイアスによる太陽電池パネルは、ホタルの発光器からの微弱光を受ける事により電気抵抗の変化を生じ、これにより生じた信号電流をダーリントトランジスタ (図 1, 2SC2298) により増幅し、データロガーに入力し A/D 変換 (アナログ/デジタル変換, アナログ電気信号からデジタル電気信号への変換) を行った。得られたデータはサンプリング周期 1 秒毎に、タイムコードと併せてデータロガーに記録した。回路の性質上、直流電流増幅率が高く、微小電流を扱うため外来ノイズの対策として装置全体を 1m 立方の鋼板製の筐体に納め、回路中の 0V ラインを接地 (ED) した。また回路を安定させるため装置全体を空調設備により一定の温度に保ち、電源を入れてから 2 時間後に、数値が安定した事を確認した上で計測を開始した。太陽電池パネルによっては、1 枚のパネルであっても電気的特性に部分的な偏りがあるため、数種類の太陽電池パネルを試験し、偏りが極めて少ない物を採用した。

受光素子の選定: ホタルの発光器からの光の強さを直接測定する方法として光電管や高感度型フォトダイオードを用いる方法などが考えられる。しかし、光電管の場合感度は十分であるがコストが高く複雑な周辺回路が必要であり、フォトダイオードでは高感度型であってもホタルの発光器からの光を測定するには感度不足で、ホタルの発光器を受光面に殆ど密着せざるを得なくなり、そのため S/N 比 (シグナル/ノイズ比、電気信号に含まれるバックグラウンド電気ノイズの比率) や A/D 変換後の分解能の不足に加え、ホタルの発光器と受光面との僅かな位置関係の変化などから測定誤差が生じやすく、満足な測定を行う事が難しい。そこで、フォトダイオードと同じ原理で、しかも受光面積の広い太陽電池パネルを採用した。また微弱光の検出を行うため、通常の太陽電池パネルの使用方法とは異なる逆バイアス方式を採用した。これにより、ホタルの発光器からの光の強弱を電気抵抗の変化として精密に計測し A/D 変換する事を可能にした。

発光強度校正: 微弱光 1lux 未満の照度の校正を行う検査機関がないため、0.1 ~ 20000lux の測定範囲を有する校正済の市販の照度計 (LM - 332, AS ONE 社製) を基準とし、白熱電球を光源として今回製作した照度計の校正を行った。これにより市販照度計と今回作成した照度計の発光強度の対応図を作成した。

計測は、1 秒おきに 30 秒間連続記録した。計測時の室温は 24.0±0.5°C (平均±S.D.) であった。

また、発光を測定した個体の体長と発光器 (腹部第 5 節) の最大幅をマイクロメーター装着の実体顕微鏡とノギスを併用して計測した。体長は頭部の可動範囲が広いことから頭部からではなく前胸背前縁からとし、腹部末端までを測定した。

雌雄間で光の強度は、マンホイットニーの U 検定を用いて比較した。加えて、雌雄間の体サイズ差が大きいため、一般線形モデルにより体サイズを考慮した解析も行った。このモデルでは、体サイズと性別を説明変数、発光強度を応答変数とした。体長と発光器幅には雄 (ピアソンの相関係数, $r=0.674, P<0.0001$), 雌 ($r=0.7112, P<0.0001$) とともに有意な正の相関が認められたので、一般線形モデルの説明変数には体長のみを体サイズの指標として用いた。今回の解析では、モデルへのあてはまりの良い平均発光強度を発光強度の指標とした。交互作用が有意になった場合は雌雄間で単純な比較ができないので、雌雄別に、体長を説明変数、平均発光強度を応答変数とした回帰分析を行った。解析にはソフトウェア R (R Development Core Team 2011) を用いた。

結果

測定発光強度の市販照度計による照度との対応表を図 2 に示した。すなわち今回の計測では 0.1lux は 121 に相当し、2.0lux は 895 に相当した。

計測の結果、30 秒間の雄の平均発光強度 (平均±SE) は、118.22 ± 8.65、雌では 91.32 ± 7.39 で雌雄間にお

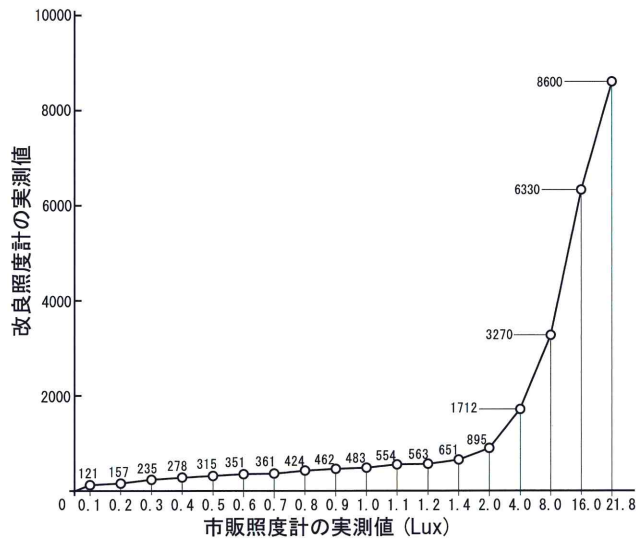


図 2. 超高感度に改良した照度計と市販照度計の照度の対応表

いて有意な差は認められなかった(マンホイットニーの U 検定, $P=0.09$). 一方, 最大発光強度(平均 \pm SE)は, 雄が 363.03 ± 17.88 , 雌が 223.63 ± 14.50 と有意な差が認められた(マンホイットニーの U 検定, $P<0.0001$). すなわち, 雌より雄の方が強く発光できることがわかった.

一般線形モデルの発光強度に, 平均発光強度と最大発光強度のいずれかを応答変数に組み込んで比較した場合, 平均発光強度(AIC = 1044.2)の方が最大発光強度(1173.8)よりもAICの値が低かったため, 今回の解析では, モデルへのあてはまりの良い平均発光強度を発光強度の指標とした. また, 体長と発光器幅には雄(ピアソンの相関係数, $r=0.674, P<0.0001$), 雌($r=0.7112, P<0.0001$)ともに有意な正の相関が認められたので, 一般線形モデルの説明変数には体長のみを体サイズの指標として用いた. その結果, 体長($t=-0.36, P=0.717$)は有意ではなく, 性別($t=-2.47, P=0.015$)及び性別 \times 体長の交互作用($t=2.93, P=0.0043$)が有意だった. 雌雄別に解析したところ, 雄では体長と平均発光強度の間に強い相関が認められた(単回帰分析, $y=34.07x-294.78, R^2=0.166, P<0.001$) が, 雌では認められなかった($y=3.409x+143.27, R^2=0.0083, P=0.620$). すなわち, 大型の雄は小型の雄に比べて強い光を放つ傾向があり, 雌は体サイズに関係なく一定の光を放つ傾向があることがわかった(図3).

考 察

川野(2012)は野外生息地において交尾していた雄の体サイズが全体平均と比較して有意な差がなかったことを報告した. すなわち, 交尾していた雄が全体の中でとりわけ大型であったり, 小型であったりということではなく, 雄の交尾の成否において体サイズの関与が少ないことを示唆した. 本研究において雄は体サイズと発光強度に強い正の相関があったことから, 大型の雄は強く発光できるが, 小型の雄は大型の雄ほど強く発光することができないことがわかった. このことは, 体サイズが交尾の成否に強く関与しない(川野, 2012)ことから, 交尾の成否に発光強度の関与も少ないことを示唆した. また, 雌雄で最大発光強度に有意な差が認められたものの, 平均発光強度では有意な差は認められなかった. 大型の雄では明らかに雌より強く発光できるが, それ以外の雄では雌と異なる強さの光を放つことはできない. このことから, 発光強度の差異によって雄が雌を認識することは難しいと思われた.

ゲンジボタル雌雄の発光強度の比較

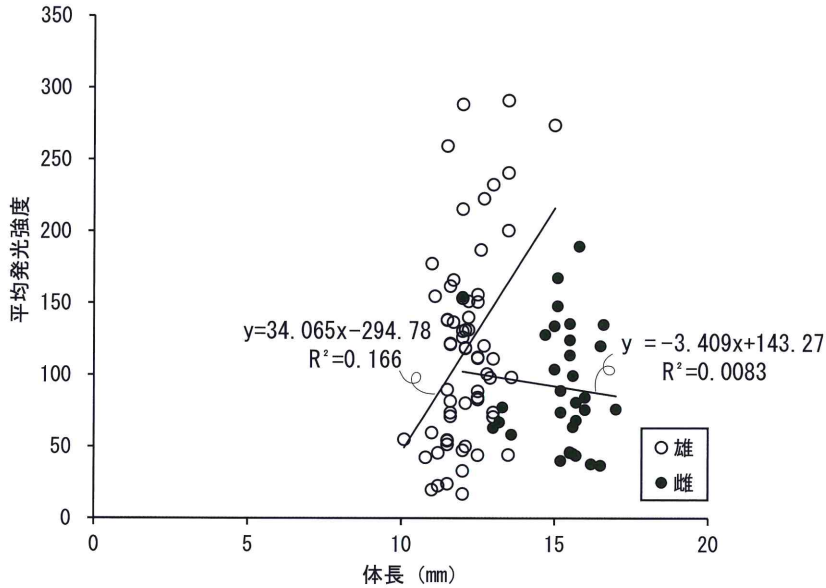


図3. 雌雄の体長と発光強度の関係

謝 辞

本稿を作成するにあたり、データの処理方法や解析についてご協力、ご指導頂いた大庭伸也准教授（長崎大学）、文章の校閲をして頂いた竹松葉子准教授（山口大学）、林成多博士（ホシザキグリーン財団）、測定方法および測定器具についてご教示頂いた渡辺雅夫教授（山口大学）に対して心から御礼申し上げます。

引用文献

- 土井久作 (1958) ゲンジボタル *Luciola cruciata* の体長の変異. 福島大学学芸学部理科報告, 7: 5-8.
- Eguchi E., A. Nemoto, V. B. Meyer-Rochow, N. Ohba (1984) A comparative study of spectral sensitivity curves in the three diurnal and eight nocturnal species of Japanese fireflies. *J. Insect Physiol.* 30(8), 607-612.
- 神田左京 (1935) 「復刻 ホタル」. サイエンス社, 東京.
- 川野敬介 (2012) ゲンジボタルの交尾行動と光以外の配偶者選択に関与する要素. 豊田ホタルの里ミュージアム研究報告書, (4): 7-11.
- 大場信義 (1988) 日本の昆虫⑫ ゲンジボタル. 93-97pp. 文一総合出版, 東京.
- R Development Core Team (2011). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.
- 白田昭司・伊藤敏・井上祥史 (2003) 「Excel で学ぶ理工系シミュレーション入門」: 116-129pp, CQ 出版株式会社, 東京.

