

ホタルの光計測

白田 昭司*・深田 三夫**・奥田 昌宏***

*大阪府立工業高等専門学校システム制御工学科 〒572-8572 寝屋川市幸町 26 番 12 号

**山口大学農学部生物資源環境科学科 〒753-8515 山口市吉田 1677-1

***奥田技術事務所 〒591-8032 堺市百舌鳥梅町 1 丁目 2-27-201

Optical Measurements of Firefly Light

Shouji USUDA*, Mitsuo FUKADA** and Masahiro OKUDA***

*Osaka Prefectural College of Technology, Department of Systems and Control Engineering, 26-12 Saiwaicho, Neyagawa 572-8572

**Department of Biological and Environmental Sciences, Faculty of Agriculture, Yamaguchi University, 1677-1 Yoshida, Yamaguchi 753-8515

***Okuda Technical Office, 1-2-27-201 Mozu Umemachi, Sakai 591-8032

We measured the blinking patterns and emission spectra of Genji Botaru fireflies (*Luciola cruciata*) using an optical power meter and a spectroradiometer. We also measured the emission spectra of combined LEDs (light emitting diodes) and compared them with the firefly spectra. Furthermore, we analyzed the frequencies of the insect's blinking patterns. As a result, we have concluded that dominant frequencies obtained by analysis nearly conform with the fireflies' blinking intervals measured visually and that the firefly's emission spectrum can be approximately simulated by a combination of LEDs that have different wavelengths and half-value widths.

Key words: firefly, blinking patterns, emission spectra, combined light emitting diodes (LEDs), dominant frequency

1. ま え が き

わが国に生息している約 30 種類のホタルのうち、発光するのはゲンジボタル、ヘイケボタルなど約 10 種類である。本研究で測定対象に採取したのはゲンジボタルである。ホタルが発光するのは、交尾のためのコミュニケーションと考えられている。過去の報告によると¹⁾、明滅の周期や発光パターンはホタルの種類によって異なり、交尾の信号を発しているときと、外敵により刺激を受けたときとは異なるようである。明滅現象については不明な点も多く、集団同時明滅現象については今後の研究が必要とされている。本研究における測定では、毎年ホタルが群棲している山口市内 A 地区（平地）と秋吉台近くの美東町 B 地区（山間部）の 2 箇所においてホタルを採取した²⁾。ホタルの出現時間は夜 8 時ごろから 11 時ごろまでであるが、その時間に合わせて現地での測定を行った。

ホタルの明滅パターンについては、数種類のホタルにつ

いて光電子増倍管により記録した明滅パターンの報告がある¹⁾。また、発光スペクトルについてはラマン効果用の分光器を用いた国内外の測定例が紹介されており、スペクトルが最大をとる波長とスペクトルの波長範囲についての報告がある³⁾。さらに、ゲンジボタルとヒメボタルについて、その複眼の構造と発光スペクトルの関係を調べ、発光スペクトルの 570 nm 付近に顕著なピークをもつことが報告されている⁴⁾。

筆者らは、ホタルの発光についてより詳細な情報を得る目的で、ホタルの明滅パターンと発光スペクトルの光計測を行った。ここでの微弱光計測において、比較的安価に市販されている一般的な光学測定器が利用可能であることを示すことにより、その利便性にもとづいて、生物を対象とする微弱光計測の今後の発展が期待される。また、ホタルの発光スペクトルと比較するために波長別 LED (light emitting diode) による発光スペクトルを測定した。ホタ

E-mail: usuda@sys.osaka-pct.ac.jp

ルの発光スペクトルに複数の顕著なピーク波形が認められたことにより、波長別のLEDを複数組み合わせることでホタルの発光スペクトルを模擬できる可能性について検証した。さらに明滅パターンの特徴を調べるために自作プログラムによる周波数解析を行った。本論文はこれらについて報告する。

2. 測定方法

2.1 明滅パターンの測定

測定に使用した光パワーメーター（アンリツ製）は光検出器（MA9411A）と本体部（ML9001A）から成る。光検出器（Si フォトダイオード：9.5 mmφ、波長帯域：0.38~1.15 μm）には光ファイバー（FC-2-3M-GI、ファイバー径：100 μm、コア径：50 μm）を接続し、光ファイバーの先端部から受光する。

端面処理した光ファイバーの先端部をホタルの発光部に近接して測定した。ホタルの発光部はやや湾曲した形状であり、ホタルの発光全体を捕らえてはいないものの光ファイバーで受光することができた。発光部の側部側にファイバー先端部を近接した場合は光ファイバーの入射光が少なくなるため本測定系では計測することはできなかった。

受光した光出力（明滅パターン）は光パワーメーター本体に接続したレコーダーによりアナログデータとして収集した。アナログデータはディジタイザーにより0.1秒間隔でデジタルデータ（ASCIIデータ）に変換した。

飛翔中のホタルや葉に止まっている状態のホタルの明滅は通常は求愛のコミュニケーションと考えられる¹⁾。このような自然の状態での発光を測定することは困難なので、実際には採取したホタルを透明の飼育器に入れた状態、または捕捉した状態で光ファイバー先端をホタルの発光部に近接して測定した。

Fig. 1はコップに入れた状態で観測したホタルの光跡を示す。

2.2 光スペクトルの測定

光スペクトルの測定には、光源または物体からの反射光エネルギーを波長別に解析することが可能な波長別光エネルギー分析装置（米国LI-COR社製LI-1800/22、波長帯域：300~1100 nm、半値幅：6 nm、波長精度：±2 nm、感度： $3.5 \times 10^{-8} \text{ W cm}^{-2} \text{ nm}^{-1}$ ）を用いた。本装置は光学システム、マイクロコンピューター、バッテリー、センサーの各部位で構成され、センサー部の拡散板から入射した光のエネルギー強度を波長別に分析することができる。非接触で対象物の微小部分や広範囲における分光放射強度、分光放射照度、分光反射率の測定が可能である。

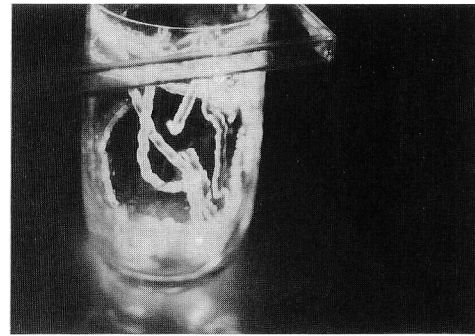


Fig. 1 Trails of fireflies in a glass.

ホタルの測定条件は明滅パターンのときと同様に自然の状態での測定は困難なので、飼育器に入れた状態、または捕捉した状態で測定した。測定条件として、400~800 nmの波長範囲でサンプリング間隔を2 nmとし、1回のスキャン回数を3~5回とした。さらに数分間の間を取りながら1個体について3~4回測定を行った。

3. 結果

3.1 明滅パターンの測定

空中を飛翔するホタルはほとんどオスといわれている。明滅パターンを測定する前に、飛翔中の10数個のホタルについて明滅間隔をストップウォッチで計測した。目測では明滅間隔は約2.2秒であった。単純な周期現象として測定した。

明滅パターンの測定のために採取したホタルは31個体である。メスのホタルは数個体を採取した。Fig. 2に、採取地区別とオス、メスの場合について測定した明滅パターンの例を示す。明滅パターンには、突発的に強烈な光を発するものもあれば、ほとんど発光しない時間間隔が存在するものもある。メスの発光強度はオスに比べて数分の1程度である。また、明滅周期が長く波形の振動が単調である。このように、狭いガラス容器に入れた場合や手で捕捉した場合など、採取したホタルの状態により種々の複雑な発光パターンが存在する。

3.2 発光スペクトルの測定

B地区で採取したオスのホタルのうち、比較的発光の強かった9個体について発光スペクトルを測定した。Fig. 3に発光スペクトルの測定例を示す。スペクトル波形には複数の大小のピークが重なった形状や連続した形状、卓越したピークが複数存在する形状などいくつかの異なる波形形状が測定された。ピークの半値幅は10~50 nmの範囲に分布している。同一個体で測定を繰り返した場合、測定ごとに最大ピーク値の位置がずれたり、振動の様子が異なった波形形状が観測された。Fig. 3(a)は、いくつかのピー

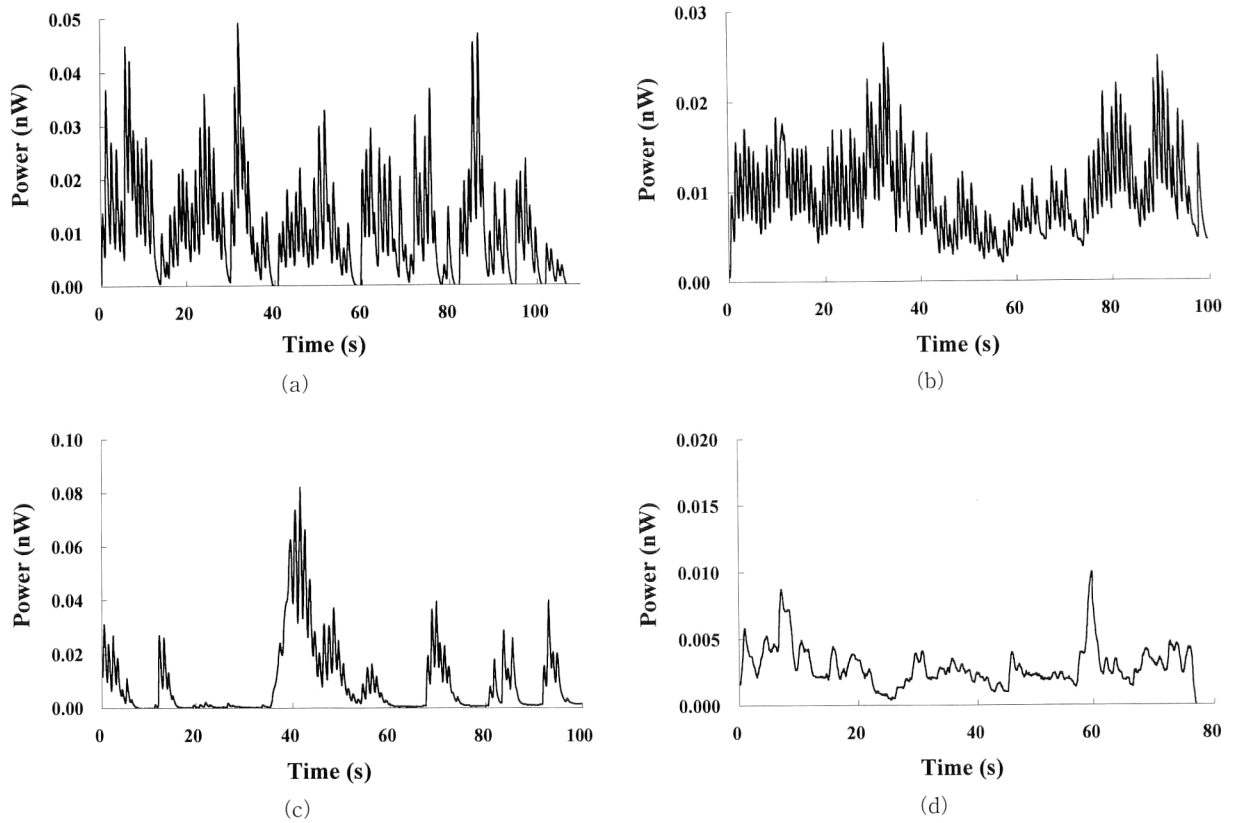


Fig. 2 Blinking patterns of fireflies: males caught in Area A (a, b), males in Area B (c) and females in Area B (d).

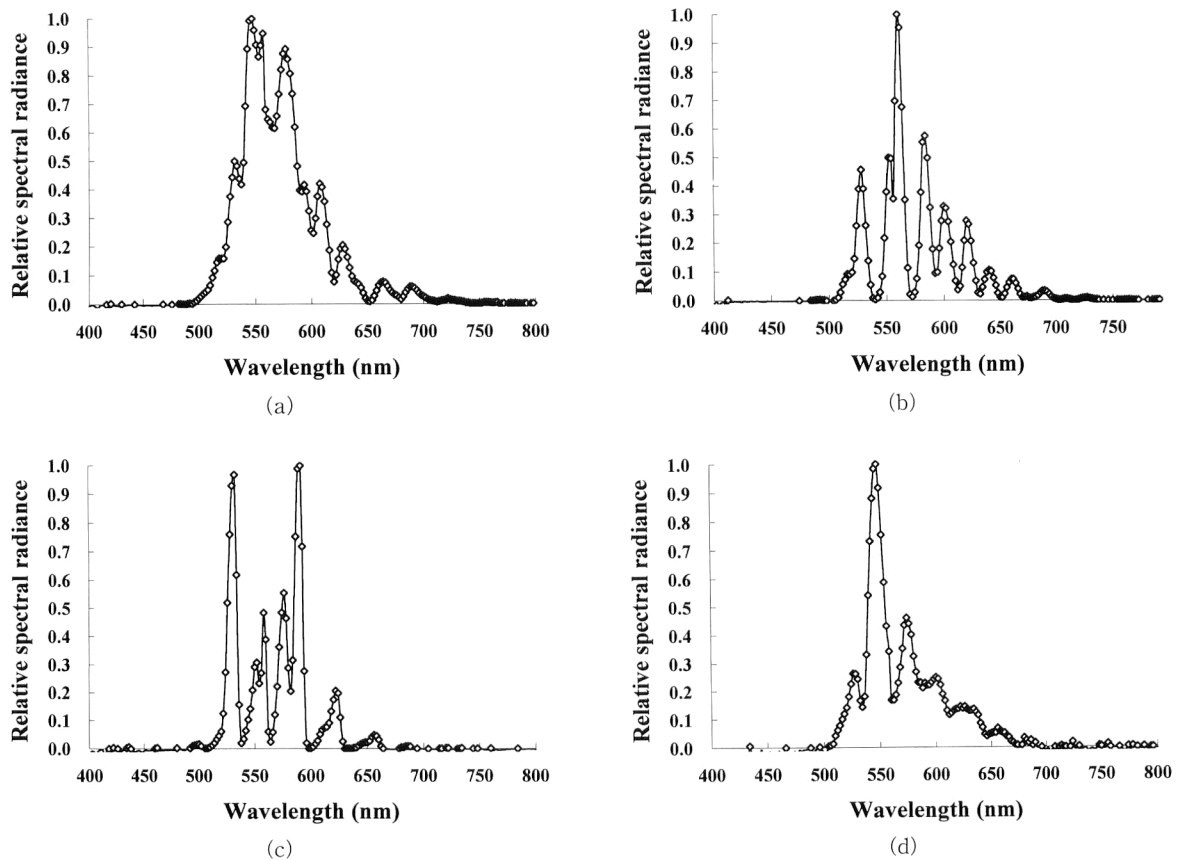


Fig. 3 Emission spectra of males caught in Area B.

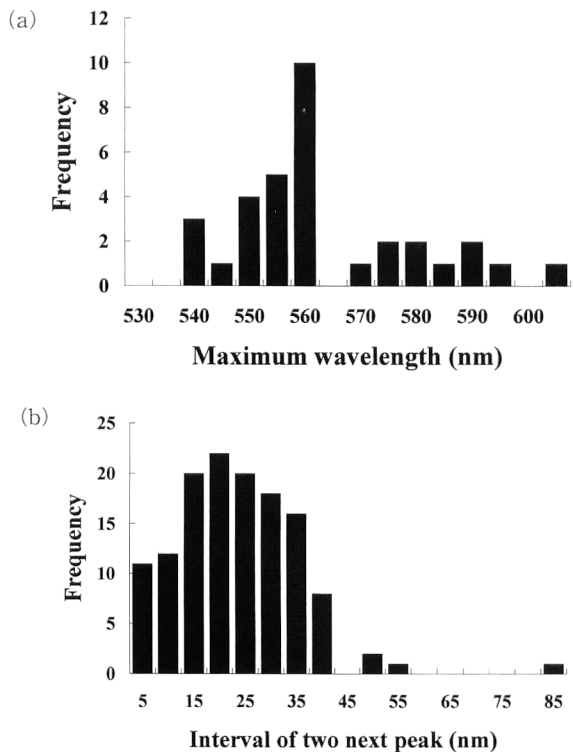


Fig. 4 Frequency distribution of maximum wavelengths (a) and peak intervals (b).

クが観察されるものの全体的に山型の連続曲線で近似される (タイプ I). Fig. 3(b) は、顕著なピーク値をもつ 1 つの波形を含む、いくつかの独立した波形でスペクトルが構成される (タイプ II). Fig. 3(c) は、顕著なピークをもつ 2 つ以上の波形を含む、いくつかの独立した波形でスペクトルが構成される (タイプ III). Fig. 3(d) は、タイプ I とタイプ II の両方の特徴を備えている (タイプ IV). Fig. 4(a) は最大ピーク波長の度数分布をみたもので、最大ピーク波長は 550~600 nm の波長範囲に分布していることがわかる. Fig. 4(b) は隣接するピーク波長間隔の度数分布をみたもので、ピークの間隔は 5~40 nm の範囲に分布している. これらの度数分布は、2 地区のメス 1 個を含む 9 個体について合計 35 回の測定結果から得られたもので、複数のピークが存在するものの連続的な波形形状を示すものは 8 例で、その他の波形についてはいくつかのピークが離散的に並ぶ波形形状を示す.

3.3 波長別 LED の発光スペクトルの測定

ホタルの発光スペクトルには大きさの異なる複数のピークが含まれることが確認された. 波長の異なる複数の LED を組み合わせることにより、ホタルの発光スペクトルを模擬できることが予想される. LED は発光波長のバリエーションが多く、ドライブ回路も比較的簡単に製作できる. また、レーザー光と異なり、固有のスペクトル幅を

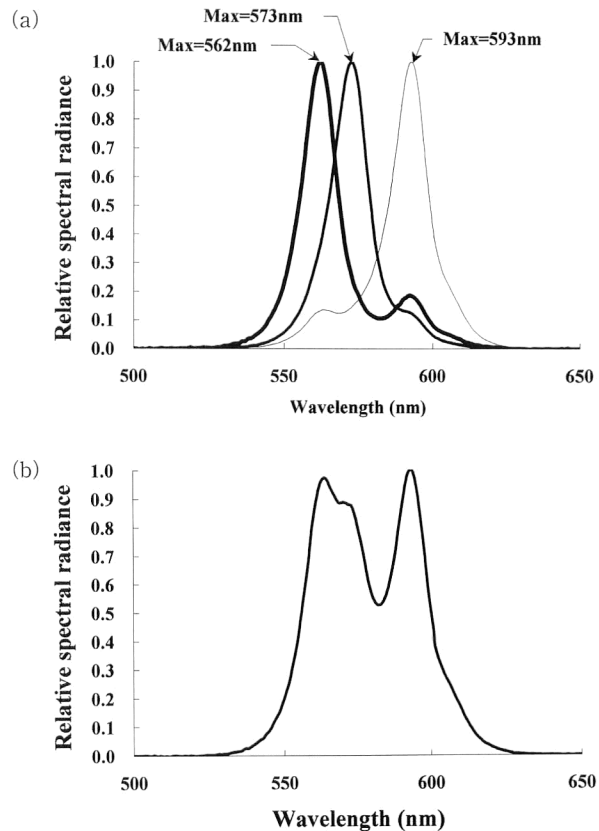


Fig. 5 Emission spectra of LEDs with different wavelengths when turned on individually (a) and simultaneously (b).

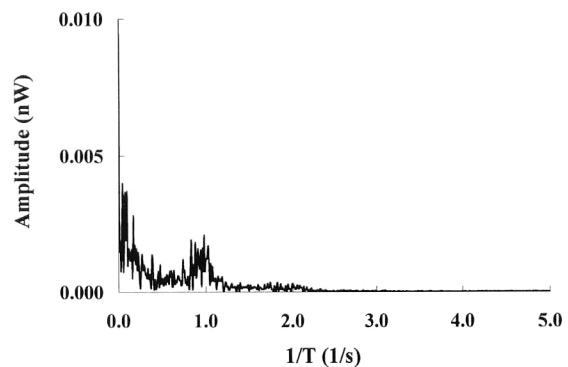


Fig. 6 Power spectrum obtained from a frequency analysis of the blinking patterns of fireflies in the case of Fig. 2(a).

もっているもので、これらの LED を組み合わせにより裾野が重なり合った発光スペクトルが実現できる.

ホタルの発光スペクトルと比較するために、ホタルの発光波長領域に近い発光波長の異なる 3 種類の LED (緑色 562 nm, 緑色 572 nm, 黄色 590 nm) を同一の電子基板に取り付け、個別に点灯させた場合と同時点灯させた場合の発光スペクトルを測定した. Fig. 5(a) は個別に点灯させた場合を、Fig. 5(b) は同時点灯させた場合の発光スペクトルを示す. 同時発光させた場合の 562 nm と 572 nm

の発光スペクトルは波長の差異が確認できる程度に重なっているが、590 nm のスペクトルは容易に波長を確認することができる。スペクトルの半値幅はいずれも 20 nm 程度である。

4. 明滅パターンの周波数解析

測定した明滅パターンは複雑な波形形状を示す。これらの明滅パターンについて波形の特徴を調べるために周波数解析を行った。具体的には、Excel のマクロ機能で作成したプログラムを用いて有限フーリエ解析を行い、パワースペクトルを出した。パワースペクトルは最大ピーク値で規格化し、ピーク値を大きい順に並べ替えた。

Fig. 6 は Fig. 2(a) の場合のパワースペクトルを示す。顕著なピークではないが、レベルの低い卓越周波数が認められた。他の明滅パターンについても同程度の卓越周波数が得られた。卓越周波数は約 1 秒程度であった。

5. ま と め

ゲンジホタルを採取し、光パワーメーターと波長別光エネルギー分析装置を用いて明滅パターンと発光スペクトルの光計測を行った。また、LED を組み合わせた場合の発光スペクトルを測定し、ホタルの場合と比較した。さらに、明滅パターンについて周波数解析を行った。これらを通してホタルの発光に関して多くの有益な情報を得ることができた。

得られた結果を以下に要約する。

- (1) 採取したホタルの状態により、種々の異なった明滅パターンが観測された。同じホタルでも測定のために異なった明滅パターンを示す。自然の状態におけるホタルについても状況に応じた明滅パターンで発光しているものと考えられる。
- (2) オスとメスのホタルの明滅パターンには顕著な差異は認められなかったが、メスの場合の発光強度はオスに比べて数分の 1 程度である。
- (3) 採取したホタルの発光スペクトルはいくつかの異なった波形形状が観測された。単一のピーク波形ではなく、複数の大小のピークが重なった形状や連続した形状、卓越したピークが複数存在する形状が観測された。自然の状態におけるホタルの発光スペクトルについても類似の波形形状であると考えられる。

過去に報告されたホタルの発光スペクトルは、最大ピーク波長と発光波長範囲のみが示されている³⁾。また、Fig. 3(a), (d) に類似した、570 nm 付近に顕著なピークをもつ波形は例示されているが、Fig. 3(b)

に示すような異なる波長で同程度の強さをもつピークをもつ波形は示されていない⁴⁾。

筆者らが得たホタルの発光スペクトルは、波長と大きさの異なる複数のピークを含む複雑な波形形状であることが確認された。

- (4) 光スペクトルの最大ピーク波長は 550~600 nm で、緑色から黄色の色帯域に分布していることがわかった。また、ピークの半値幅は 10~50 nm の範囲に分布している。
 - (5) 発光波長の異なる 3 種類の LED (562 nm, 572 nm, 590 nm, 半値幅: 20 nm) を同時発光させたときの光スペクトルを測定した。この結果から、波長と半値幅の異なる LED を複数組み合わせることにより、ホタルの発光スペクトルを近似的に模擬できることがわかった。
 - (6) 明滅パターンについて自作プログラムによる周波数解析を行い、パワースペクトルを求めた。ピークレベルは低かったが卓越周波数 (約 1 秒) が認められた。この値は飛翔中の目測による明滅間隔 (約 2.2 秒) と異なる。ホタルを捕捉した状態と自然の状態における発光形態の違いによるものと考えている。
- 明滅パターンの特徴をさらに詳細に調べるためには、周波数解析のみならず統計解析やカオス解析などを加えた総合的な波形解析を行う必要があると考えている。また、自然の状態におけるオスとメスの発光データの収集や集団同時明滅現象における発光データなど、より多くのデータ取得が必要であると考えている。

最後に、本研究を遂行する際に、ホタルの生態や観察方法に関して多くのアドバイスをいただいた前山口大学農学部講師浜崎詔三郎氏に感謝いたします。また、山口ふるさと伝承総合センターの平野慎吾氏には飼育場の見学をはじめとして多くのことを教えていただき感謝いたします。

文 献

- 1) 大場信義: ホタルのコミュニケーション (東京大学出版会, 1986) pp. 17-160.
- 2) 深田三夫, 白田昭司: 光デバイス (オーム社, 2001) pp. 80-87.
- 3) 神田左京: ホタル (丸善, 1935) pp. 355-358.
- 4) E. Eguchi, A. Nemoto, V. B. Meyer-Rochow and N. Ohba: "A comparative study of spectral sensitivity curves in the three diurnal and eight nocturnal species of Japanese fireflies," *J. Insect Physiol.*, **30** (1984) 607-612.