

コンピュータ解析法による日本産ホタルの発光パターン

大場信義*・鈴木浩文**・山崎柄根**

Luminescent pattern of Japanese fireflies based on computer analysis

OHBA N.*, SUZUKI H.** and YAMASAKI T.**

Nocturnal fireflies communicate to each other by species-specific light signals. Therefore, it is important to analyze the luminescent pattern in the study of communication system of fireflies. We recorded luminescent signals of 11 species of Japanese fireflies and then analyzed them by a new method based on computer analysis. The results were basically comparable to that of previous analyzing system using analog data, and time resolution and precision of the records were improved. Furthermore, power spectral density of flash pattern was analyzed in some fireflies.

はじめに

ホタルの発光パターンは種固有であり、コミュニケーションを行うための重要なシグナルとなっている。ホタルの発光行動やコミュニケーション・システムを解明する上で発光パターンの詳細な解析は不可欠であり、これまで日本産ホタルを対象として発光パターンの記録解析が目視観察、ストップウォッチ、8mm・16mm シネカメラ、ホトトランジスタ、イメージ・インテンシファイアを駆使した映像から、ペンレコーダ記録によって行われてきた(大場, 1979, 1985, 1986; OHBA, 1983)。しかし、これらの方法は明滅の早い発光シグナルの記録・解析にはペンレコーダが追従できなかったために、コンピュータによる発光パターンの記録解析方法が確立された(牧野ほか, 1994)。この方法により映像からの解析分解能の限界まで精度を飛躍的に上げることが可能となるとともに、解析結果のファイル保存によってデータ管理・再利用が容易になった。本報では日本産ホタル各種の発光、特に雄の探雌飛翔時の発光パターンをコン

ピュータ解析し、波形特性を比較検討した。

材料および方法

材料

第1表に示したホタルの発光、特に雄の探雌飛翔時の発光パターンを解析した。

測定方法

筆者の一人である大場が野外において、イメージ・インテンシファイアを装着したビデオカメラでホタルの発光行動を録画した。テレビモニターに再生されたホタルの発光強度の時間的な変化は牧野ほか(1994)の方法によってパーソナルコンピュータに取り込み解析した。すなわちテレビモニター上のホタルの発光を光センサーでとらえ、電気信号に変換された発光信号は増幅され、50Hzのローパスフィルターを通した後に100Hzのサンプリング速度でデジタル信号に変換されてパーソナルコンピュータに取り込まれた。光センサーにはCdSセルを用いた。ただし、ヘイケボタルの一部とツシマヒメボタルについては光電子増倍管を用いた。

* 横須賀市自然博物館 Yokosuka City Museum, Yokosuka 238.

** 東京都立大学理学部自然史講座 Dept. Natural History, Faculty Sci., Tokyo Metropolitan University, Hachioji, Tokyo 192-03.

原稿受付 1995年8月30日 横須賀市自然博物館業績 第474号.

キーワード: ホタル科, 日本産ホタル, 発光パターン, コンピュータ解析 Key words: Lampyridae, Japanese firefly, luminescent pattern, computer analysis

第1表 発光パターンの記録解析を行ったホタル。()内は生息地

Lampyridae ホタル科
Luciolinae ホタル亜科
<i>Luciola</i> ホタル属
<i>Luciola cruciata</i> MOTSCHULSKY, 1854 ゲンジボタル
西日本型ゲンジボタル(熊本県菊池郡旭志村)
東日本型ゲンジボタル(神奈川県横須賀市)
<i>Luciola lateralis</i> MOTSCHULSKY, 1874 ヘイケボタル
本州型ヘイケボタル (神奈川県横須賀市)
北海道型ヘイケボタル (北海道釧路湿原)
<i>Luciola kuroiwae</i> MATSUMURA, 1918 クロイワボタル(沖縄県那覇市)
<i>Luciola yayeyamana</i> MATSUMURA, 1918 ヤエヤマボタル(沖縄県石垣島)
<i>Hotaria</i> ヒメボタル属
<i>Hotaria parvula</i> (KIESENWETTER), 1874 ヒメボタル
大型ヒメボタル(愛知県名古屋)
小型ヒメボタル(岡山県哲多町)
<i>Hotaria tsushimana</i> NAKANE, 1970 ツシマヒメボタル(長崎県対馬)
<i>Curtos</i> スジボタル属
<i>Curtos costipennis</i> (GORHAM), 1880 キイロスジボタル(沖縄県宮古島)
<i>Curtos okinawana</i> MATSUMURA, 1928 オキナワスジボタル(沖縄県那覇市)
Lampyrinae オバボタル亜科
<i>Pyrocoelia</i> マドボタル属
<i>Pyrocoelia atripennis</i> LEWIS, 1896 オオシママドボタル(沖縄県石垣島)

結 果

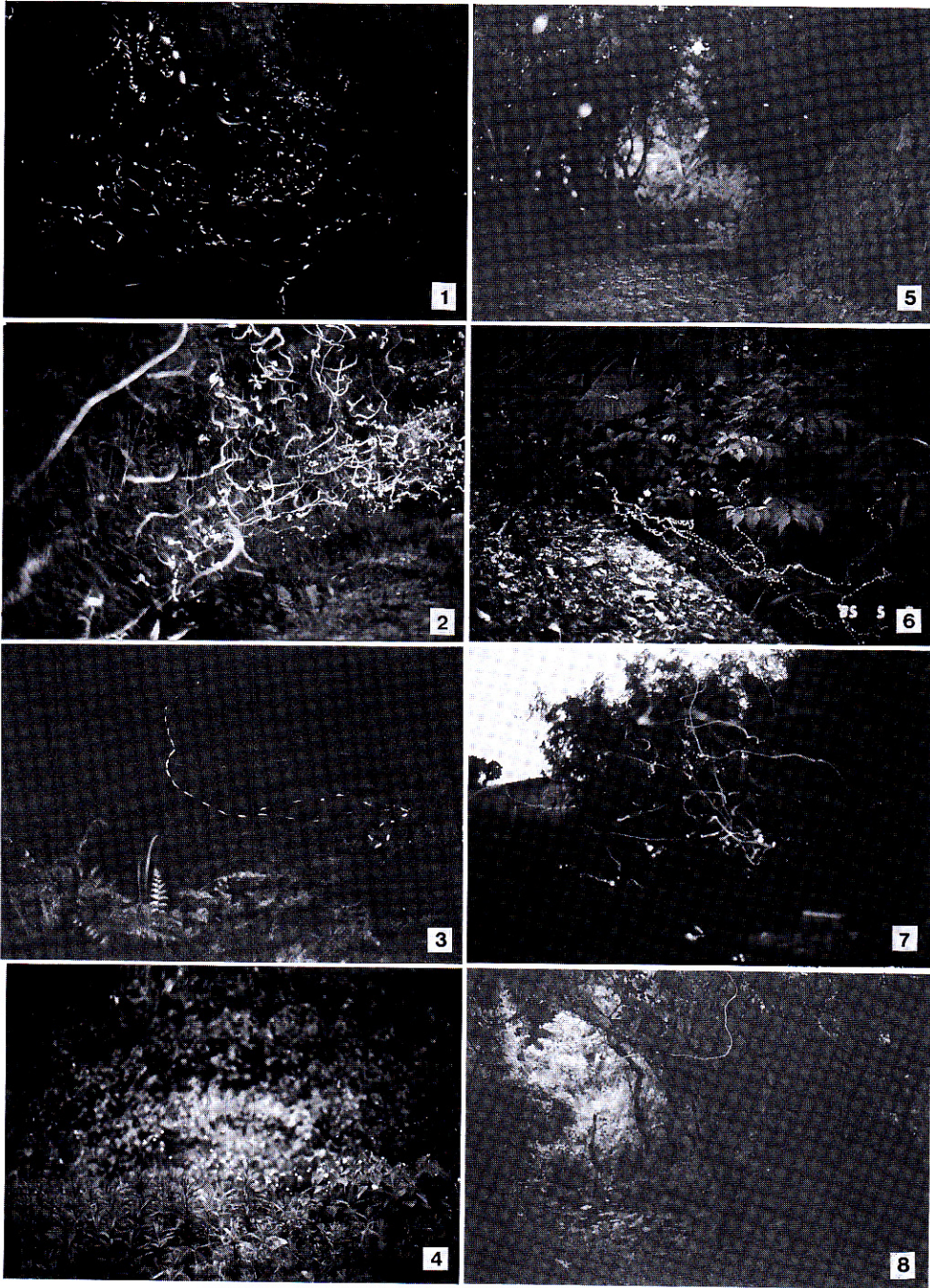
日本産ホタル雄の探雌飛翔時における発光軌跡とコンピュータ解析方法により得られた発光パターンおよび発光パターンのパワースペクトルを各々第1, 2, 3図に示した。

ゲンジボタル：第1図-1は熊本県旭志村において、典型的な西日本型ゲンジボタル雄の探雌飛翔時の発光の様子を撮影したものである。この発光パターンをコンピュータ解析した結果、気温22°Cにおいて、発光間隔は約2秒、発光時間約1秒、消光時間約0.5秒であった(第2図-1)。一方、神奈川県横須賀市における東日本型ゲンジボタルの飛翔発光軌跡は第1図-2の通りであり、気温20°Cの時に発光間隔約5秒、発光時間4秒、消光時間約1.5秒で著しく間延びした発光パターンであった(第2図-2)。東日本型、西日本型の発光パターンは共に左右対称的な波形をしているが、発光のピークに達するまでの立ち上がり時間が東日本型では約2秒かかっているのに対し西日本型では約1秒と短く、両者の発光パターンは単に発光の間隔が異なっているだけではない。各々の発光パターンのパワースペクトルは第3図-1、

2に示した通りであり、東日本型では波形の周波数成分は約0.1から0.2Hzのところにかけてゆるやかなピークがみられ、西日本型では約0.5Hzのところにはピークがみられた。

ヘイケボタル：本州型ヘイケボタル雄の探雌飛翔時(気温24°C)における発光軌跡は第1図-3の通りであり、発光間隔は約0.5秒、発光時間約0.4秒、消光時間約0.1秒であった(第2図-3)。一方北海道型ヘイケボタルでは各々約1秒、約0.8秒、約0.2秒(気温17°C)であった(第2図-4)。発光開始時間は発光波形が急激に立ち上がるので明瞭であるが、終了時間は次第に減衰するので、不明瞭であった。目視観察によれば、発光ピーク時から少し外れると急激に発光が弱くなるので、消光時間がみかけ上からより長く測定された。

横須賀市産の本州型ヘイケボタルの雄の静止発光行動時の発光パターンを光電子増倍管を用いて解析した結果、気温24°Cにおいて、発光間隔は約0.5秒であり、1つの発光波形に2つのピークと痕跡のショルダーピークが認められた(第2図-5)。この結果から1つの発光波形に明瞭な3つのピークを有しているのが確認された。それぞれのピークは約0.2秒以下の発光間隔で1つの波形が



第1図 日本産ホタルの雄成虫の飛翔発光軌跡.

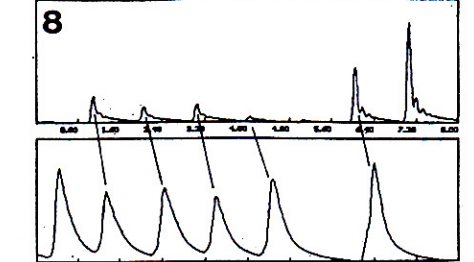
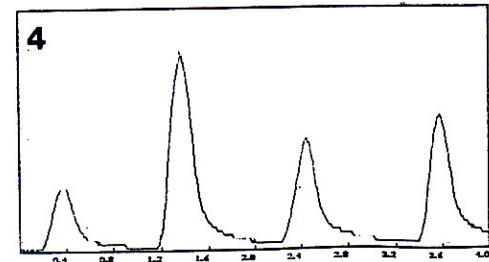
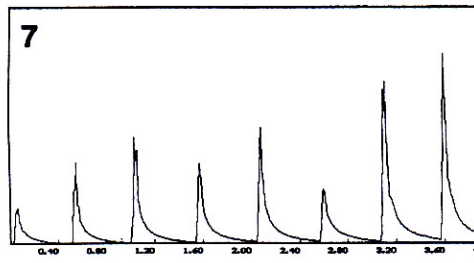
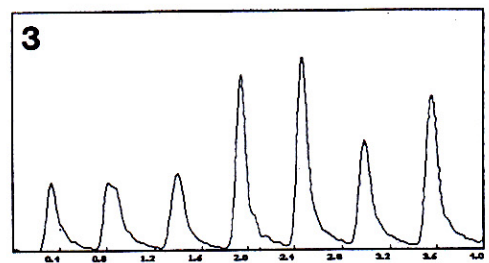
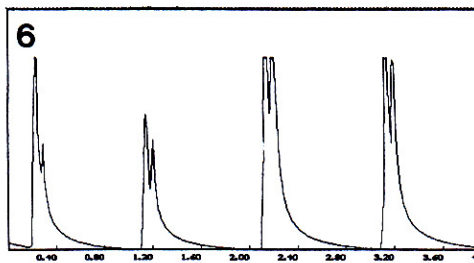
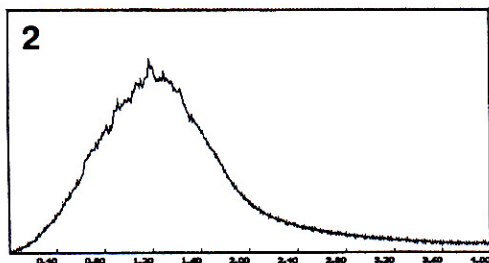
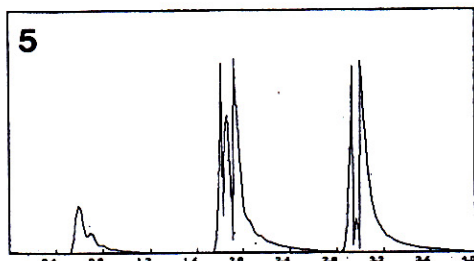
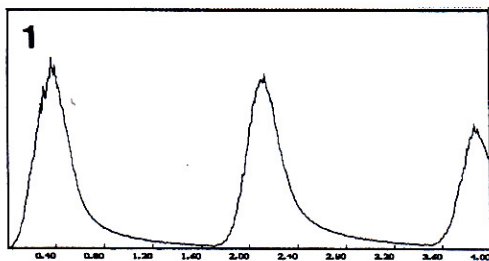
1. 西日本型ゲンジボタル, 2. 東日本型ゲンジボタル, 3. 本州型ヘイケボタル, 4. 大型ヒメボタル,
5. クロイワボタル, 6. ヤエヤマボタル(ヤエヤマヒメボタル), 7. キイロスジボタル, 8. オキナワス
ジボタル

形成されていた。

本州型と北海道型の発光パターンのパワースペクトルは第3図-3, 4に示す。本州型は、パワースペクトルに3つ周波数成分が見られたが、1.8Hzのところの主ピークがあり、北海道型では1Hzのところの主ピークがあった。

ヒメボタル：大型ヒメボタル雄の探雌行動時(気温18°C)における飛翔軌跡は第1図-4の通りであり、発光間隔は約1秒、発光時間約0.3秒以下(テリングしているので不明瞭)、消光時間約0.7秒であった(第2-6

図)。一方、小型ヒメボタルでは各々、約0.6秒、0.3秒以下(気温21°C)であり、大型のヒメボタルに比較して著しく短い明滅間隔であった(第2図-7)。両型の発光パターンのパワースペクトルは第3図-5, 6に示した通りで、共に3つの波形成分が見られたが、主ピークはそれぞれ1Hz, 2Hzのところにあった。第2図-8は、大型ヒメボタルの雄と雌の発光コミュニケーションを記録解析した結果である。雄雌は約5cmの距離にあり、雄が発光すると雌が約0.3秒後に応答発光した(気温25°C)。



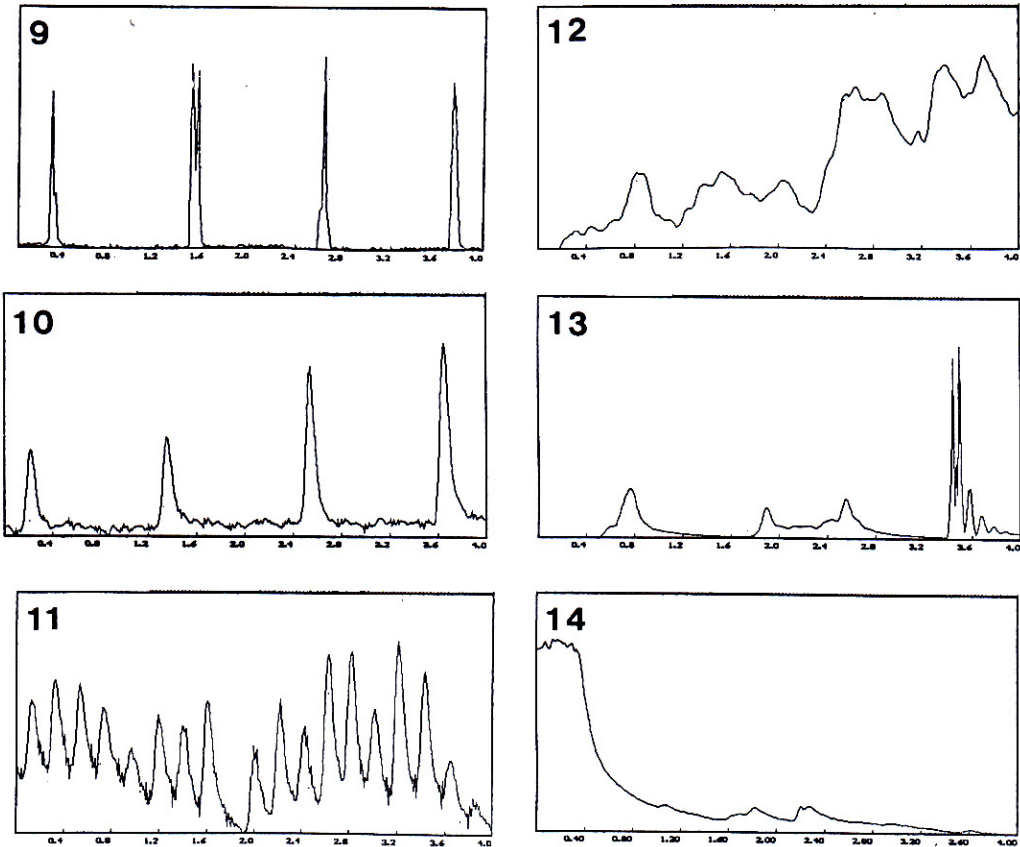
ツシマヒメボタル：長崎県の対馬にだけ生息する固有種で、雄成虫は探雌飛翔時において、大型のヒメボタルに酷似したパターンで発光し、発光間隔もほぼ同じであった。第2図-9はこのホタルの発光を光電子増倍管で取り込んだもので、パルス状の光の中にさらに短い明滅がみられた。

クロイワボタル：雄の探雌飛翔時(気温26°C)における発光軌跡は第1図-5の通りであり、発光間隔は約1.2秒、発光時間約0.25秒、消光時間は約0.85秒であった(第2図-10)。発光時間は0.2秒以下のきわめてシャープな波形であった。1つの発光波形に2つのピークが含まれることもあり、そのピークは0.1秒以下であっ

た。発光パターンのパワースペクトルは第3-7図に示した通りで、3つのピークが含まれていたが、主ピークは1 Hzのところに見られた。

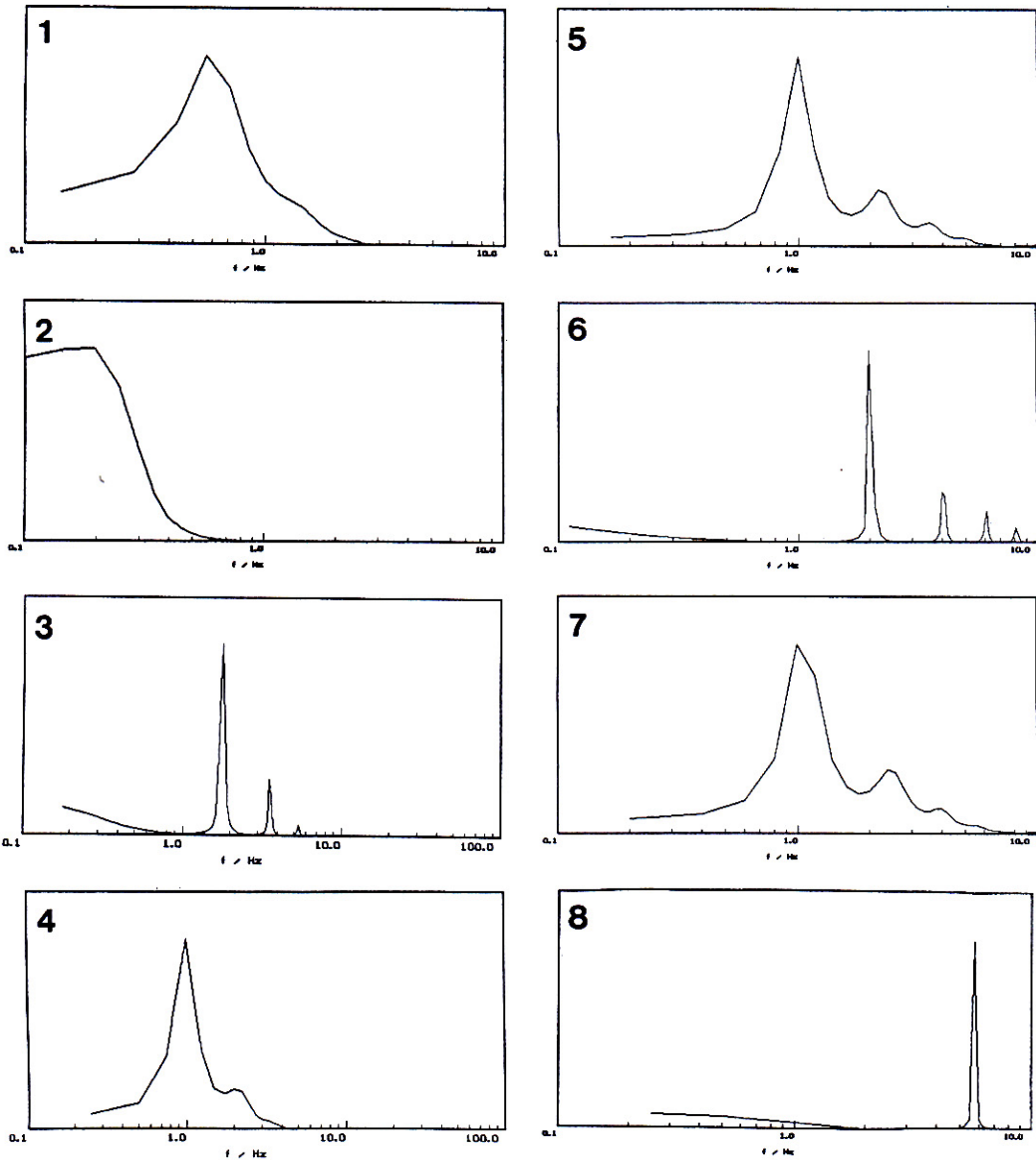
ヤエヤマボタル：石垣島と西表島の八重山諸島に生息しており、雄の形態はヒメボタルによく似ている。雄の探雌飛翔時における発光軌跡は第1図-6の通りで、地上50cmを平面的に飛翔し、気温26°Cにおける発光間隔は約0.2秒、発光時間は0.2秒以下、消光時間は測定不能であった(第2図-11)。発光パターンのパワースペクトルは第3図-8に示した通りで、きわめてシャープな単一成分から形成されていた。

キイロスジボタル：26°Cにおける雄の探雌飛翔時の



第2図 日本産ホタル雄成虫のコンピュータ解析法による発光パターン。

1. 西日本型ゲンジボタル, 2. 東日本型ゲンジボタル, 3. 本州型ヘイケボタル, 4. 北海道型ヘイケボタル, 5. 静止発光中のヘイケボタル, 6. 大型ヒメボタル, 7. 小型ヒメボタル, 8. ヒメボタルの発光交信. 上段は雄, 下段が雌であり, 雄の発光の直後に一定のタイミングで雌は雄に応答発光している.
9. ツシマヒメボタル, 10. クロイワボタル, 11. ヤエヤマボタル(ヤエヤマヒメボタル), 12. キイロスジボタル, 13. オキナワスジボタル, 14. オオシマドボタル



第3図 日本産ホタルの発光パターンのパワースペクトル。

1. 西日本型ゲンジボタル, 2. 東日本型ゲンジボタル, 3. 本州型ヘイケボタル, 4. 北海道型ヘイケボタル, 5. 大型ヒメボタル, 6. 小型ヒメボタル, 7. クロイワボタル, 8. ヤエヤマボタル(ヤエヤマヒメボタル)

発光軌跡は第1図-7の通りであり、強弱があるものの消光しない発光パターンであった(第2図-12)。

オキナワスジボタル: 25°Cにおける雄の探雌飛翔時の発光軌跡は第1図-8の通りであり、持続した発光であった(第2図-13)

オオシママドボタル: 27°Cにおける雄の探雌飛翔時

における発光軌跡はキロスジボタルと同様に持続光を放ったが、より強い光を放った(第2図-14)。

考 察

発光パターン: 本発光パターン解析法により得られたホタルの発光パターンはこれまでの解析方法による結果

と一致し、分解能が向上して精度が高くなった。このことにより、既に蓄積されているホタルの発光行動の映像データの精度高い再解析を可能とし、今後の発光パターン解析に飛躍的な進展が期待できる。またコンピュータに取り込まれた発光パターンのデータはファイル化により時間軸などの条件設定を変えて、様々な視点からの再解析を容易にした点で従来にない独自の発光パターン解析が行える。

ゲンジボタルは北海道と沖縄を除く全国各地に生息しているが、中部山岳地帯を境として東西で発光の間隔が異なっており、西日本型および東日本型の二型が認識されている(OHBA, 1984)。また、これら二型は分布域や発光パターンの差異だけではなく、雌の産卵行動やアロザイムからみた集団の遺伝的な組成も異なっていることが認識されている(大場, 1986, 1988, 1989, 1991; 佐藤ほか, 1990)。ヘイケボタルは沖縄を除く全国各地からシベリアにまで生息しているが、本州産のヘイケボタルは羽化年数が1年であるのに対して、北海道産のものは2年以上を要し、飛翔しながら明滅する頻度も本州産に比べて少なく、寒冷地適応した生活史をとっている(大場ほか, 1993)。本州型ヘイケボタルは北海道型ヘイケボタルの発光パターンやスペクトル解析の結果と比較しても明らかに短周期型であり、両者は発光間隔や生活型の違いだけではなく集団の遺伝的な組成も異なっていることが示唆されている(鈴木ほか, 1993, 1994)。ヒメボタルは北海道と沖縄を除く全国各地に生息しているが体長の異なる大小の二型が存在している(大場, 1983, 1986)。大型の集団は日本各地に見られるが小型の集団は神奈川県箱根以西でしか分布が確認されていない。箱根においては、標高700mから800mを境として上の方に大型、下の方に小型のヒメボタルが棲み分けており、しかも小型の発光間隔は大型のそれよりも速い。これらの二型もゲンジボタルやヘイケボタルと同様に遺伝的な分化を遂げていることが確認されている(鈴木ほか, 1991, SUZUKI *et al.*, 1993)。ツシマヒメボタルの雄の発光ではパルス状の光の中にさらに短い明滅がみられたが、この実態を明らかにするために、今後ビデオ画面からではなく野外個体の発光を直接光電子増倍管で測定する必要がある。クロイワボタルは沖縄本島に生息しているホタルで、ヒメボタル同様にパルス状の閃光を放つが、ヒメボタルとはパルスの形状がやや異なり尾を引かない左右対称型である。ヤエヤマボタルの閃光は緩やかな波の上に重ね合わせた形になっているが、これはビデオ映像においてホタルの飛翔移動に伴い撮影距離が変化したことによる。飛翔発光するキイロスジボタル、オキナワ

スジボタル、オオシママドボタルの各雄は持続光を放ち、特異的波形成分は認められない。

波形表示分解能: モニター映像から発光信号をコンピュータに取り込む際に、ノイズが多い映像にはCdSセル、少ないときには光電子増倍管を選択することによって、最適な分解能を持った波形を表示できる。また、発光間隔の短い発光パターンの解析には分解能が要求されるので、光電子増倍管がセンサーとしてより適切である。

2 個体以上の相互関係の解析: モニター上の光信号を2つのセンサーで追従してコンピュータに取り込むことによって、同時に2個体の発光信号の入力が可能であるが、モニター画面上で同時に2個体の発光軌跡をセンサーで追従することが困難なことが多い。そこで、1つのセンサーでも、トリガーを設定しデータ取り込みのタイミングを合わせることによって、1個体ずつコンピュータに取り込んだ波形を同時表示することが可能となり、2個体以上の相互関係を解析することができる。ヒメボタルの雄成虫が発光すると雌は約0.3秒後に応答発光することは、これまでの結果と一致するが(OHBA, 1983; 大場, 1986)、今回の方法により再確認された。このシステムの構築により、ゲンジボタルをはじめとする集団同時明滅するホタルの発光行動様式を解明する上で大きな成果が期待できる。

発光パターンのパワースペクトル: クロイワボタルの雄の探雌飛翔時における発光パターンのパワースペクトルには3つの波形成分が含まれる例があるので、発光コミュニケーションを行う上でもこうした波形成分が重要な役割を果たしている可能性がある。同様なことは大型のヒメボタルにおいても認められる。こうした波形成分は目視観察では確認できないものである。ヤエヤマボタル雄の探雌飛翔時の発光パターンのパワースペクトルは単一の波形成分から形成され、比較的一定の発光パターンであることを示している。またオオシマドボタル、ミヤコマドボタル、アキマドボタル、オキナワマドボタルなどでは明滅しない持続した光を放つので発光パターンのスペクトル解析は出来ない。

まとめ

1. 本発光パターン解析方法により得られた日本産ホタルの発光パターンはこれまでの解析方法の結果と一致したが、より分解能が向上して精度が高くなった。
2. コンピュータに取り込まれた発光パターンのデータはファイル化により時間軸などの条件設定を変化させることが容易となり、これまで蓄積された発光パターンの

映像の再解析を可能とした。

3. モニター映像から発光シグナルをコンピュータに取り込む時に、センサーとしてCdSセル、光電子増倍管を使い分けることによって、センサー分解能を変えた波形を得ることが出来た。ノイズが多いときにはCdSセル、少ないときには光電子増倍管が適する。
4. 2つのセンサーを用意することによって、同時に2個体の発光シグナルの入力が可能である。また、トリガーを設定することによって1個体ずつ入力した後に、これらの波形を同時に表示することが可能となった。
5. クロイワボタルの雄の探雌行動おける発光パターンのパワースペクトルには3つのピークがあり、3つの波形成分が含まれる例が認められた。
6. 大型ヒメボタルでは波形成分が3つから形成される例があった。こうした成分は目視観察では確認できなかったものである。
7. 今回得られたヤエヤマボタル雄の探雌飛行時の発光パターンのパワースペクトルは単一の波形成分から形成されていた。
8. 飛翔発光するキロスジボタル、オキナワスジボタル、オオシママドボタルの各雄は持続光を放った。

文 献

- 牧野 徹・鈴木浩文・大場信義 1994. パーソナルコンピュータによるホタル発光パターンの解析システム. 横須賀市博研報(自然), (42): 27-56.
- 大場信義 1979. 数種の日本産ホタル類の発光パターンと習性. 横須賀市博研報(自然), (26): 21-30, pls. 6-7.
- 大場信義 1983. 神奈川県におけるホタルの生息状況. 横須賀市博研報, (29): 17-19.
- OHBA N. 1983. Studies on the communication system of Japanese fireflies. *Sci. Rept. Yokosuka City Mus.*, (30): 1-62, pls. 1-6.
- OHBA N. 1984. Synchronous flashing in the Japanese firefly, *Luciola cruciata* (Coleoptera: Lampyridae). *Sci. Rept. Yokosuka City Mus.*, (32): 23-33, pls. 1-8.
- 大場信義 1985. 発光シグナルの記録とその解析法. 植物防疫, **39** (9): 46-51.
- 大場信義 1986. ホタルのコミュニケーション. 東海大学出版社.
- 大場信義 1988. ゲンジボタル. 文一総合出版.
- 大場信義 1989. 西と東で異なるゲンジボタル. 昆虫と自然, **24** (8): 2-6.
- 大場信義 1991. ゲンジボタルの遺伝子東西で異なる. 遺伝, **45** (10): 8-9.
- 大場信義・圓谷哲男・本多和彦・田村省平・大森雄治 1993. 北海道釧路湿原と厚岸のヘイケボタルの生息. 横須賀市博研報(自然), (41): 15-26.
- 佐藤安志・鈴木浩文・藤山静雄・大場信義 1991. ゲンジボタル地域集団における遺伝的変異. 全国ホタル研究会誌, (24): 13-14.
- 鈴木浩文・佐藤安志・藤山静雄・大場信義 1991. ヒメボタル二型の遺伝的分化. 全国ホタル研究会誌, (24): 11-12.
- 鈴木浩文・佐藤安志・大場信義 1993. 釧路湿原のヘイケボタル. 全国ホタル研究会誌, (26): 19-20.
- 鈴木浩文・佐藤安志・大場信義 1994. ヘイケボタルの地理的分化. 全国ホタル研究会誌, (27): 23-25.
- SUZUKI H., SATÔ Y., FUJIYAMA S. and OHBA N. 1993. Genetic differentiation between ecological two types of the Japanese firefly, *Hotaria parvula*: An electrophoretic analysis of allozymes. *Zool. Sci.*, **10**: 697-703.