

研究論文：論文

ホタルの光と人の感性について

発光現象のゆらぎ特性

阿部宣男, 稲垣照美, 石川秀之, 松井隆文, 安久正統

茨城大学大学院理工学研究科

KANSEI ESTIMATION ON LUMINESCENCE OF FIREFLY
FLUCTUATING CHARACTERISTICS OF LIGHT EMISSION PATTERN

Norio ABE, Terumi INAGAKI, Hideyuki ISHIKAWA, Takafumi MATSUI, Masahiro AGU

Graduate school of Ibaraki University, 4-12-1, Nakanarusawa-cho, Hitachi-shi, Ibaraki, 316-8511, Japan

Abstract: Luminous patterns of firefly were experimentally investigated to evaluate the healing effect by using an appropriate statistical analysis and image processing. This study is for fabricating a hospice space by which people can be healed from many kinds of stress due to various modern human activities. It is revealed from a series of measurements that a $1/f^n$ fluctuation mode is included in the luminous pattern of firefly and that there is a possibility that the luminescence plays a significant role in healing people. Therefore, we have always been feeling that the luminescence is so attractive from ancient times.

Keywords: Firefly, $1/f^n$ fluctuation, Light emission pattern

1. はじめに

近年の日本では、景気低迷や受験戦争などによりストレス社会が助長され、人々の精神的疲労はますます深刻化する一方である。かつてないほどの癒し関連商品需要の伸びは、現代人の精神の危機的な状況を象徴したものと言えよう。一方、潮騒、さざ波、あるいはそよ風を始めとする多くの自然現象は、人の精神への癒しとして注目を集めると同時に、その癒し効果を科学的・理論的に裏付ける研究が進められている。しかしながら、急速な都市化・宅地化に伴い、人が自然と触れ合う機会は減少する傾向にあり、現代日本人の多くがそうした元来自然が有する癒し効果の恩恵を受けづらい状況にあるとも言える。同時に、こうした人工環境下において育った若年世代の自然に対する無関心さは、更なる自然環境破壊を助長する可能性があると考えられる。

以上の社会的状況に鑑み、本研究では、日本の豊かな自然環境の象徴の一つであり、幻想的な光で古くから日本人の心を魅了している昆虫“ホタル”を取り上げ、その光の不思議と人の感性について実験的な検討を行った。すなわち、ホスピスや福祉施設へ向けたホタルやそのミニ生態系による癒し空間創造を意識して、画像処理や統計処理などの工学的技法を駆使した発光現象の計測・解析を行うとともに、ホタルの発光パターンに見られるゆらぎ特性やフラクタル次元を評価した。同時に、ホタルの光が人の精神に及ぼす影響を感性工学的に官能評価した。

2. $1/f^n$ ゆらぎについて

図1は、典型的な $1/f^n$ ゆらぎのモードを周波数空間でモデ

ル対数表示したものである。 $n=0$ のモードは、周波数に無関係なゆらぎであり、過去・現在・未来に亘って全く相関のない白色雑音あるいは白色ゆらぎとして知られている現象である。 $n=2$ のモードは、白色ゆらぎを外力として運動するブラウン粒子の速度ゆらぎとして統計力学的根拠が明確になっているゆらぎである。この現象は、過去に起こった状態に比較的強く依存する特徴がある。一方、 $n=1$ のモードは、それら両者の中間的な特徴を有する現象であるが、物理的にも数学的にも医学的にもその詳細が明らかにされていないのが現状である。この現象は、癒しに関連のある現象として現在注目されており、そよ風などの自然現象のみならず脳波や心拍などの生物電気現象にも観察されている現象である。なお、 $n=$ のモードは、ある周波数を有する規則正しい正弦波現象などである。一方、フラクタル次元が2であることは、 $n=1$ であることと等価であるため、フラクタル次元を統計的に求めることが出来れば、フラクタル次元と癒しとの関連がより一層明らかになるであろう。

3. 実験装置及び方法

3.1 発光パターンの撮影方法

ホタルの撮影は、自然環境下及び個体を拘束せず自由に動くことができる環境下及び図2に示したような透明ガラス製シャーレ(直径96 [mm], 深さ15 [mm])内で、雌雄を区別して行った。ゲンジボタルの撮影は6月上旬から下旬にかけて、ヘイケボタルの撮影は7月中旬から下旬にかけて、茨城県北部山間部(十王町・瓜連町等)および東京都板橋区立エコポリスセンターホタル飼育施設において行った。また、西日本

に生息するホタルについても同様に撮影を行った。これは、ゲンジボタルの発光パターンに生息環境（東西日本）で差違があるとされているためである [注1~3]。撮影には、デジタルビデオカメラを用い、カメラは照射を弱めた赤外線暗視モード（ナイトショット）に設定してある。時間分解能は、 $1/30$ [sec]である。なお、正確な輝度データ採取の妨げとなり得るビデオカメラの自動機能は作動しないよう予め設定した。すなわちホタルの明滅に伴う自動露出補正機能の誤作動が生じないようホワイトバランスを固定し、また暗闇においてはオートフォーカスが正確に機能しないことから手動焦点調節に切り換え、パンフォーカス撮影とした。以上の工夫により、ホタルの淡い光の明滅を正確に撮影することが可能となった。また、NHKのスーパーハープ管カメラによる撮影も実施している。なお、一連の計測では、気温、気圧及び湿度を適宜計測した。

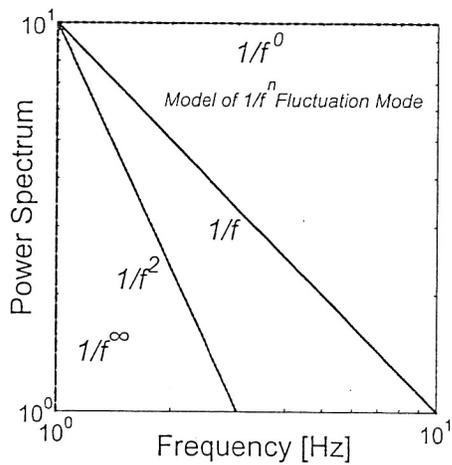


Fig.1 Model of $1/f^n$ Fluctuation Mode

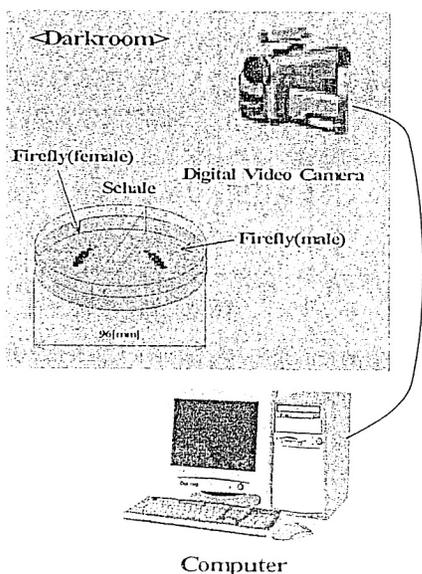


Fig.2 Experimental Apparatus

ゲンジボタルあるいはヘイケボタルの単独明滅時、集団明滅時、雌雄同時明滅時、自然環境下あるいは飼育環境下など様々な条件において取得した一連の動画は、動画処理ボードを介してコンピューターに取り込んだ。この際、動画の時間分解能が 30 [frame/sec]であることから、サンプリング周波数を 30 [Hz]とし、総数 1024 [frame] (時間にして 34.1 [sec]分)の画像を取り込んだ。この計測条件は、ホタルの明滅持続時間による生態的な要因を考慮したものである。

3.2 発光パターンの解析方法

コンピューターに取り込んだ動画は、画像濃度変位量解析システム ((株)ライブラリー製, *Gray-val32*)により画像処理し、発光パターンの輝度変動に関する時系列データを構築した。その後、時系列データを *FFT*解析 [注4]するとともに、スペクトル法を適用してフラクタル次元 [注5, 6]を統計的に決定した。また、ウェーブレット解析 [注7~11]では、ホタルの発光パターンに見られる時間周波数特性を評価した。なお、画像背景部の輝度変動およびパワースペクトルを各々のケースについて予め計測・算出し、撮影および画像処理に起因する背景ノイズが計測対象に比べて極めて小さいことを確認してある。

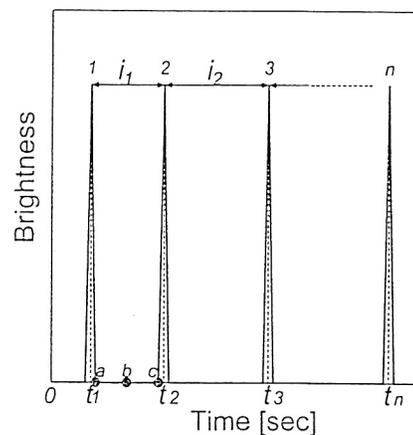


Fig.3 Model of Transient Light Emission Pattern

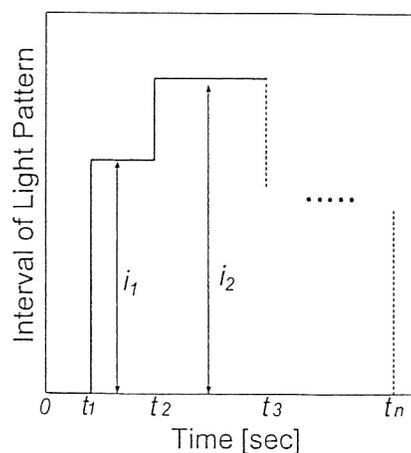


Fig.4 Transient Interval between Adjacent Maximum Luminosities

従来の研究[注 12]では、人の脈動信号における心拍間隔にも $1/f$ ゆらぎが存在することを医学的に実証しているが、ここでもホタルの発光間隔のゆらぎを同時に評価することにした。従来、心拍パルス間隔のスペクトル解析には、時間軸の代わりに心拍数を用いてきたが、各パルス間隔が時間的に変動するため、これを等間隔の時系列として扱うことには問題があるであろう。ここでは、ホタルの発光間隔の時間変動を図3に示すように定義した。まず、パルス発生時間を $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ 、パルスの時間間隔を $i_1, i_2, i_3, \dots, i_n$ とし、パルス停止期間中の任意の点はその前後のパルスによって挟まれたある長さの発光休止状態の一部であると定義する。すなわち、 $t_1 - t_2$ 間に含まれる a, b および c の各点は、いずれも長さ i_n の休止状態を構成する要素であると考えられる。したがって、このような観点に基づいた間隔変動の時系列データは、図4のように表すことができる。

次に、ホタルの発光現象における輝度差変動にもゆらぎ現象が存在するのかを調べるため、以下の様な解析を行った。図5は、輝度変動のグラフから隣接明滅輝度差変動を求めた概念図である。まず、最高輝度(山) b_2 と最低輝度(谷) b_1 の差 a_1 を求めることで、輝度差 a_1, a_2, \dots, a_n が求められ、図6のように縦軸を輝度差、横軸を時間とした図が得られる。

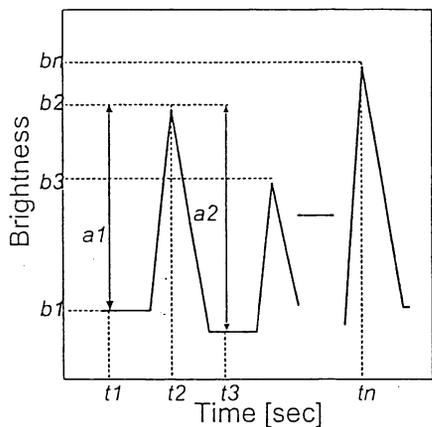


Fig.5 Model of Transient Light Emission Pattern

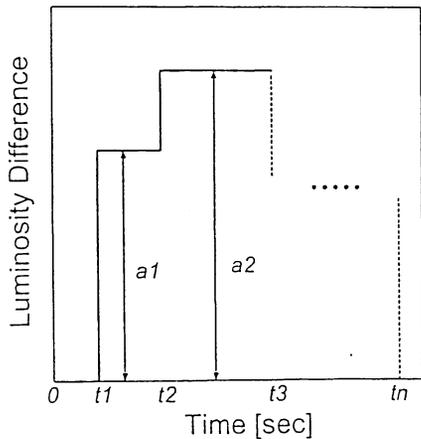


Fig.6 Transient Difference between Adjacent Maximum and Minimum Luminosities

なお、隣接する最低輝度と最高輝度の発生時間 t_1 と t_2 の間は、その輝度差を一定と仮定している。

次に、図7に示すような輝度変動の隣接最高発光輝度差変動を求める。すなわち、隣接する最高輝度 $b_1, b_2, b_3, \dots, b_n$ 、間の差から、輝度差 c_1, c_2, \dots, c_n が求められ、図8のように縦軸を輝度差、横軸を時間とした図が得られる。なお、隣接する最高輝度の発生する時間 t_1 と t_2 の間はその輝度差を一定と仮定している。

ここでは、以上のようにして得られた時系列の発光間隔や輝度差変動データを FFT 解析し、ホタルの発光現象中の発光間隔ゆらぎや輝度差変動ゆらぎを解析した。なお、発光間隔ゆらぎや輝度差変動ゆらぎの解析には、いずれの場合も比較的明滅の区別が明確な映像を用い、データ数 1024 [frame] とした。

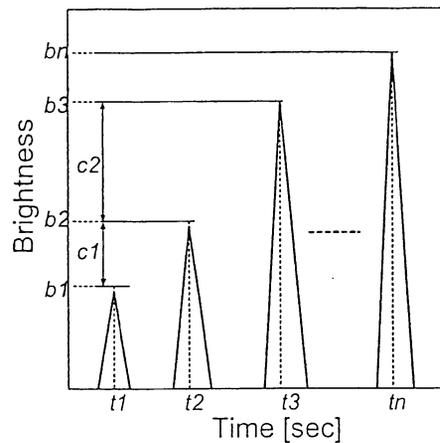


Fig.7 Model of Transient Light Emission Pattern

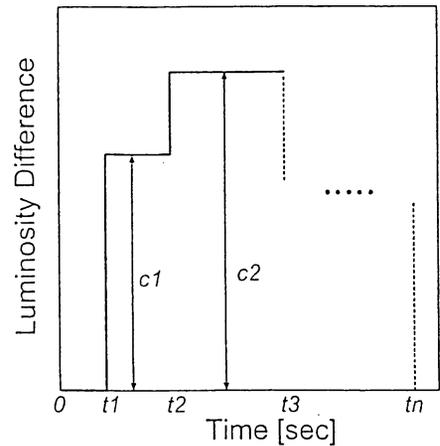


Fig.8 Transient Difference between Adjacent Maximum Luminosities

4. 結果及び考察

4.1 ホタルの光の輝度変動

図9は、一例として徳島県池田町で採取し、板橋区エコポリスセンターホタル飼育施設で撮影した西日本型ゲンジボタル(雄)の発光現象における輝度変動とそのパワースペクトルの加算平均を示したものである。サンプリング数 10240

[frame]のデータを1024[frame]ずつFFT解析した結果を加算平均してある。また、図10は、雄と同様の西日本型ゲンジボタル(雌)の発光現象における輝度変動とそのパワースペクトルの加算平均を示した一例である。サンプリング数8192[frame]のデータを1024[frame]ずつFFT解析した結果を加算平均してある。加算平均することで、パワースペクトルのノイズが減少し、ゆらぎの存在がよく確認できるようになる。輝度変動から、ホタルの発光がある程度の規則性を持った明滅であることが読みとれ、この雄雌のホタルは、それぞれ1.43[sec]と1.25[sec]周期で明滅している頻度が高いことがわかる。パワースペクトルからは、それぞれ0.7[Hz]と0.8[Hz]近傍のスペクトルピークを境として、低周波域で $1/f$ ゆらぎ、高周波域で $1/f^2$ ゆらぎ現象が確認できる。特に低周波数域の変動現象は、人の網膜に残像する時間が長く、意識により心地良い働き掛けをする可能性が高いと考えられる。

図11は、一例として板橋区ホタル飼育施設で採取・撮影したヘイケボタル(雄)の発光現象における輝度変動とそのパワースペクトルの加算平均を示したものである。サンプリング数4096[frame]のデータを1024[frame]ずつFFT解析した結果を加算平均してある。また、図12は、茨城県十王町で採取したヘイケボタル(雌)の発光現象における輝度変動とそのパワースペクトルの加算平均を示した一例である。サンプリング数4096[frame]のデータを1024[frame]ずつFFT解析した結果を加算平均してある。ヘイケボタルの明滅は、ゲンジボタルよりも短い周期を持った明滅ではあるが、発光がある程度の規則性を持った明滅であることが読みとれ、この雄雌のホタルは、それぞれ0.5[sec]と0.83[sec]周期で明滅している頻度が高いことがわかる。また、2[Hz]と1.2[Hz]近傍のスペクトルピークを境として、低周波域で $1/f$ ゆらぎ、高周波域で $1/f^2$ ゆらぎ現象が確認できる。

なお、ゲンジボタルとヘイケボタルいずれの場合も、輝度変動のパワースペクトルにおける一連の傾向は、集団や単独時、雌雄、撮影機材、場所、日時及び個体に依らずほぼ統計的に類似であった。いずれの映像でも、集団かつ自然に活動しているなかのある一匹にフォーカスしてある。

4.2 ホタルの光の発光間隔

図13は、徳島県池田町で採取し、板橋区エコポリスセンターホタル飼育施設で撮影した西日本型ゲンジボタル(雄)を撮影した映像を処理した結果の一例であり、発光間隔の時間変動とそのパワースペクトルを示したものである。また、図14は、雄と同様の西日本型ゲンジボタル(雌)の発光間隔の時間変動とそのパワースペクトルを示した一例である。撮影では、集団かつ自然に活動しているなかのある一匹をフォーカスしてある。いずれのパワースペクトルからも、発光間隔の時間変動には、輝度変動と同様に $1/f$ のゆらぎ現象や $1/f^2$ のゆらぎ現象が存在していることがわかる。

図15は、茨城県十王町で採取・撮影したヘイケボタル(雄)の発光間隔の時間変動とそのパワースペクトルを示した一例である。また、図16は、雄と同様のヘイケボタル(雌)の発光間隔の時間変動とそのパワースペクトルを示した一例で

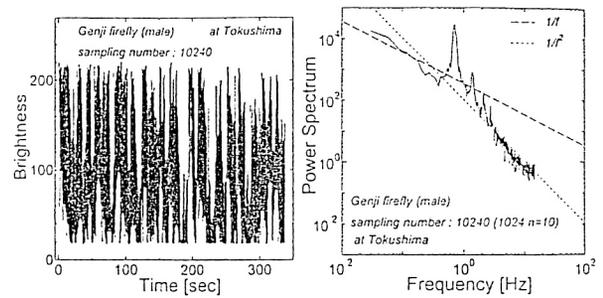


Fig.9 Brightness and Power Spectrum for a Light Emission Pattern of Genji Firefly (Male,21 [°C])

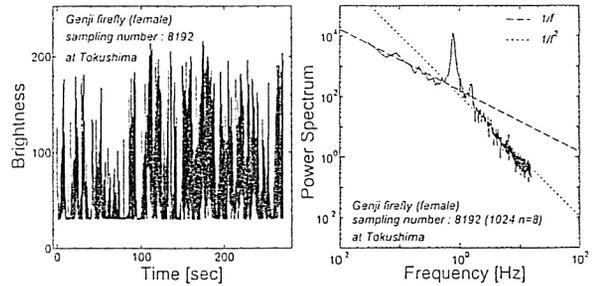


Fig.10 Brightness and Power Spectrum for a Light Emission Pattern of Genji Firefly (Female,21 [°C])

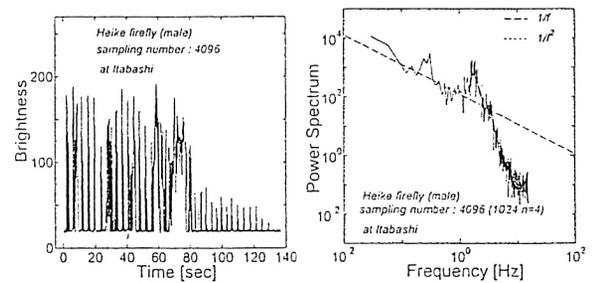


Fig.11 Brightness and Power Spectrum for a Light Emission Pattern of Heike Firefly (Male,24 [°C], 1007 [mb])

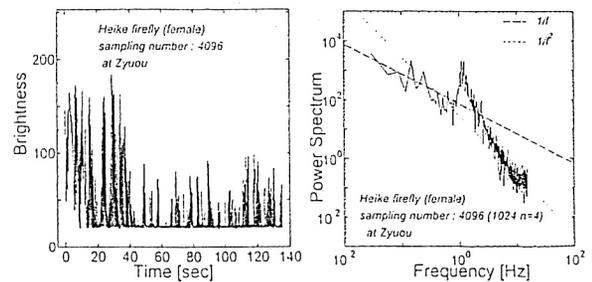


Fig.12 Brightness and Power Spectrum for a Light Emission Pattern of Heike Firefly (Female,26 [°C], 1008 [mb])

ある。撮影では、集団かつ自然に活動しているなかのある一匹をフォーカスした。いずれのパワースペクトルからも、発光間隔の時間変動には、 $1/f$ のゆらぎ現象や $1/f^2$ のゆらぎ現象が存在していることがわかる。

なお、ゲンジボタルとヘイケボタルいずれの場合も、発光間隔変動のパワースペクトルにおける一連の傾向は、集団や単

独時, 雌雄, 撮影機材, 場所, 日時及び個体に依らずほぼ統計的に類似であった。

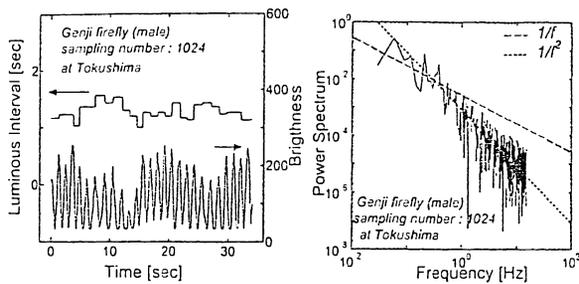


Fig.13 Transient Luminous Interval and Power Spectrum for a Light Emission Pattern of Genji Firefly (Male 22 [$^{\circ}\text{C}$], 1012 [mb])

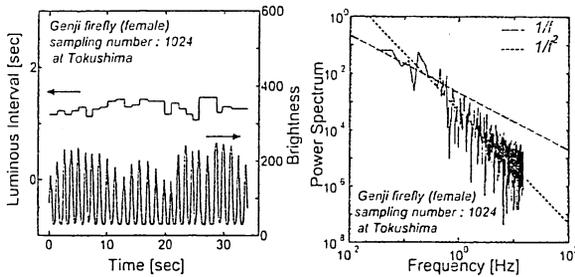


Fig.14 Transient Luminous Interval and Power Spectrum for a Light Emission Pattern of Genji Firefly (Female 21 [$^{\circ}\text{C}$])

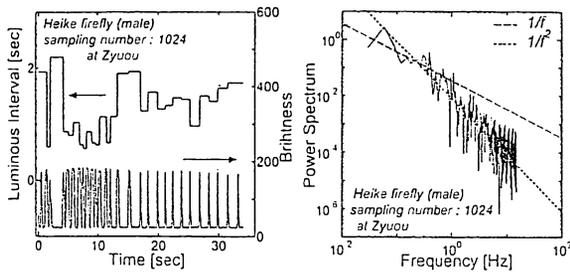


Fig.15 Transient Luminous Interval and Power Spectrum for a Light Emission Pattern of Heike Firefly (Male 29 [$^{\circ}\text{C}$], 1009 [mb])

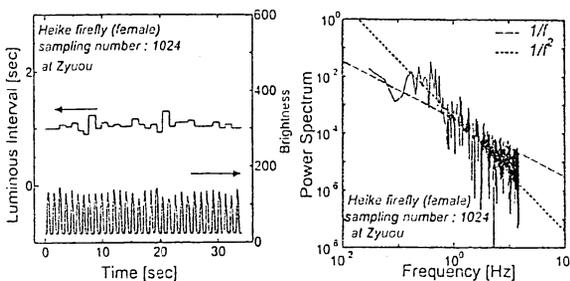


Fig.16 Transient Luminous Interval and Power Spectrum for a Light Emission Pattern of Heike Firefly (Female 28 [$^{\circ}\text{C}$], 1009 [mb])

4.3 ホタルの光の輝度差変動

図 17 と図 18 は, それぞれ徳島県池田町で採取し, 板橋区エコポリスセンターホタル飼育施設で撮影した西日本型ゲンジボタル (雄) の発光パターンから隣接明滅輝度差 (すなわち隣り合う最高輝度 (山) と最低輝度 (谷) の差) のゆらぎ及び隣接最大発光輝度差 (すなわち隣り合う山と山の輝度差) のゆらぎについて示した一例である。また, 図 19 と図 20 は, それぞれ徳島県池田町で採取し, 板橋区エコポリスセンターホタル飼育施設で撮影した西日本型ゲンジボタル (雌) の発光パターンから隣接明滅輝度差のゆらぎ及び隣接最大発光輝度差のゆらぎについて示した一例である。撮影では, 集団かつ自然に活動している中のある一匹をフォーカスしてある。いずれのパワースペクトルからも, 隣接明滅輝度差および隣接最大発光輝度差の変動には, 輝度変動のスペクトルと同様に, $1/f$ のゆらぎ現象や $1/f^2$ のゆらぎ現象が存在していることがわかる。

図 21 と図 22 は, それぞれ茨城県十王町で採取・撮影したヘイケボタル (雄) の発光パターンの隣接減輝度差のゆらぎ及び隣接最大発光輝度差のゆらぎについて示した一例である。また, 図 23 と図 24 は, それぞれ茨城県十王町で採取・撮影したヘイケボタル (雌) の発光パターンから隣接明滅輝度差のゆらぎ及び隣接最大発光輝度差のゆらぎについて示した一例である。撮影では, 集団かつ自然に活動しているなかのある一匹をフォーカスしてある。いずれのパワースペクトルからも, 隣接明滅輝度差および隣接最大発光輝度差の変動には, $1/f$ のゆらぎ現象や $1/f^2$ のゆらぎ現象が存在していることがわかる。

なお, ゲンジボタルとヘイケボタルいずれの場合も, 輝度差変動のパワースペクトルにおける一連の傾向は, 集団や単独時, 雌雄, 撮影機材, 場所, 日時及び個体に依らずほぼ統計的に類似であった。

4.4 ホタルの発光パターンにおけるフラクタル次元

フラクタル次元 D は, 発光パターンに関する時系列データを FFT 解析して求めたパワースペクトルを基に算出した。すなわち, パワースペクトルを平滑化して求めたパワーのべき指数 n とフラクタル次元 D との間には $n = 5 - 2D$ という関係が成り立つことから求めることができる [注 5, 6]。なお, n 値は, パワースペクトル分布のピーク値を境とする低周波域で定義し, その分布を線形フィッティングして算出している。特に, この低周波域は, 人の網膜に十分反応する帯域であり, 人の感性との関係がより深いと言えるからである。時系列な変動現象において, フラクタルとは, 固有の時間スケールがなく, 時間的に何桁にも亘って統計的な意味での自己相似性を有する現象の総称である。したがって, フラクタル次元 D とは, その現象の複雑さを表す尺度とも考えることができる。一般に, コッホ曲線やベアノ曲線のような構造を考えれば, $0 < D < 1$ は線を決定出来ない点と線の間構造, $1 < D < 2$ は面を決定出来ない線と面の中間構造, $2 < D < 3$ は立体を決定出来ない面と立体の中間構造を意味しており, それぞれ複雑さが増している [注 5, 6]。ここでは, ホタル

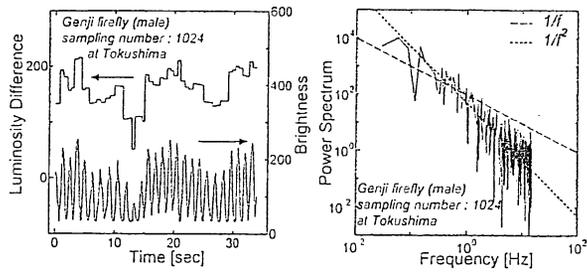


Fig.17 Transient Luminosity Difference and Power Spectrum for a Light Emission Pattern of Genji Firefly (Male) at Tokushima [°C], 1012 (mb)

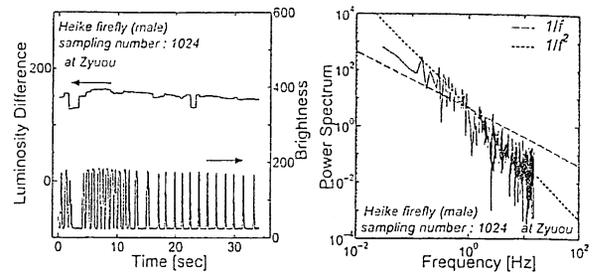


Fig.21 Transient Luminosity Difference and Power Spectrum for a Light Emission Pattern of Heike Firefly (Male) at Zyuou [°C], 1005 (mb)

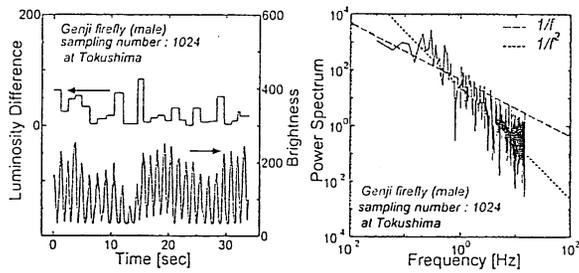


Fig.18 Transient Luminosity Difference and Power Spectrum for a Light Emission Pattern of Genji Firefly (Male) at Tokushima [°C], 1012 (mb)

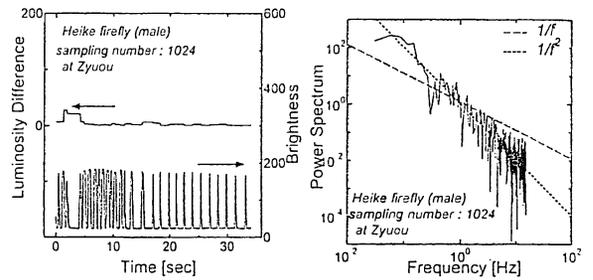


Fig.22 Transient Luminosity Difference and Power Spectrum for a Light Emission Pattern of Heike Firefly (Male) at Zyuou [°C], 1005 (mb)

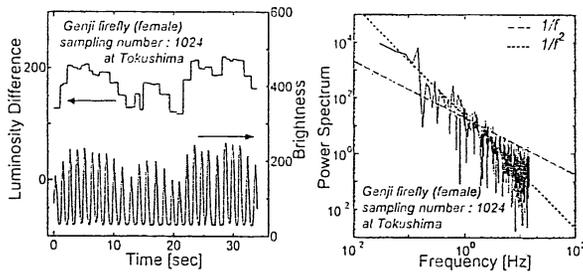


Fig.19 Transient Luminosity Difference and Power Spectrum for a Light Emission Pattern of Genji Firefly (Female) at Tokushima [°C], 21

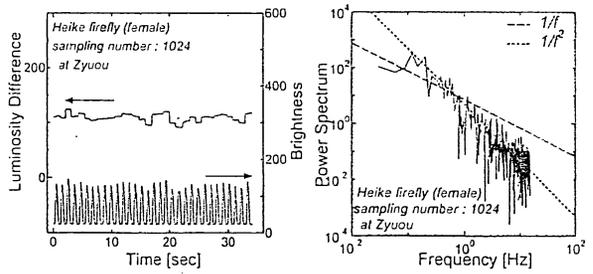


Fig.23 Transient Luminosity Difference and Power Spectrum for a Light Emission Pattern of Heike Firefly (Female) at Zyuou [°C], 1009 (mb)

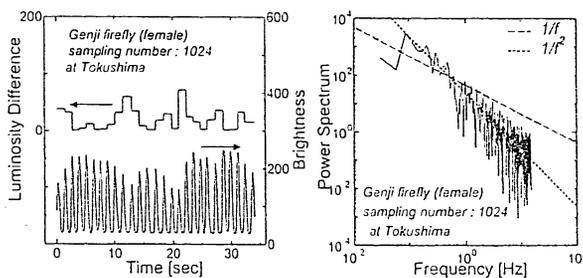


Fig.20 Transient Luminosity Difference and Power Spectrum for a Light Emission Pattern of Genji Firefly (Female) at Tokushima [°C], 21

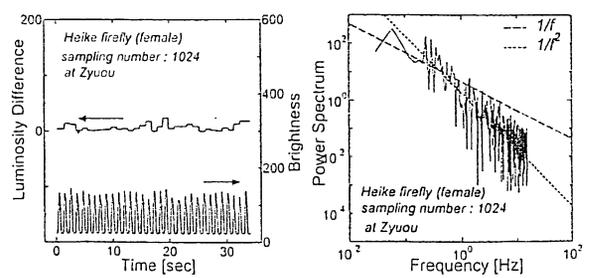


Fig.24 Transient Luminosity Difference and Power Spectrum for a Light Emission Pattern of Heike Firefly (Female) at Zyuou [°C], 1009 (mb)

の時系列な発光パターンに見られる複雑さや自己相似性の程度について検証した。

図 25 と図 26は、板橋区ホタル飼育施設において撮影した東日本と西日本に生息するゲンジボタル（雄）と（雌）の動画像に基づいてフラクタル次元を求めた統計であり、その値に対する頻度分布を示している。これらのホタルは、集団かつ自然に活動している状態である。これらの図から、発光パターンに関するフラクタル次元の値が2である場合が最も確からしいことがわかる。このことは、 $n=5-2D$ という関係から n 値が約1となっている頻度が最も高いことを示しており、ホタルの発光パターンは、低周波域で $1/f$ ゆらぎになっていることが最も確からしいとも言える。図 27 は、東日本と西日本に生息するゲンジボタルを板橋区ホタル飼育施設において雌雄を区別せずに撮影した動画像に基づいて算出したフラクタル次元の頻度分布である。この図からも、フラクタル次元の値が2である場合が最も確からしいことがわかる。

次に、板橋区ホタル飼育施設と茨城県十王町で集団かつ自然に活動しているヘイケボタルの発光パターンに関するフラ

クタル次元の算出結果について述べる。図 28 と図 29 は、ヘイケボタル（雄）と（雌）を撮影した動画像に基づいて算出したフラクタル次元の頻度分布を示したものである。これらの図から、ゲンジボタルの場合と同様、フラクタル次元の値が2である頻度が最も高いことがわかる。したがって、ヘイケボタルの発光パターンも低周波域で $1/f$ ゆらぎになっていることが最も確からしいと考えられる。図 30 は、雌雄を区別せずにヘイケボタルを撮影した動画像に基づいて算出したフラクタル次元の頻度分布を示したものである。この場合も、フラクタル次元の値が2である場合が最も確からしい。

以上のことから、ホタルの発光パターンの中にも複雑かつ強固な自己相似性が存在し、時間的に伸張・圧縮しても $1/f$ ゆらぎのスペクトル形状が変化しにくいことが明らかになった。すなわち、 $1/f^0$ と $1/f^2$ ゆらぎの中間に位置する $1/f$ ゆらぎ現象は、複雑で偶然性が強すぎる ($D: .3$) と唐突になり、単純で期待性が強すぎる ($D: .1$) と退屈になる。この中間 ($D \sim .2$) が程よい快適性を人の感性にもたらすのであろう。

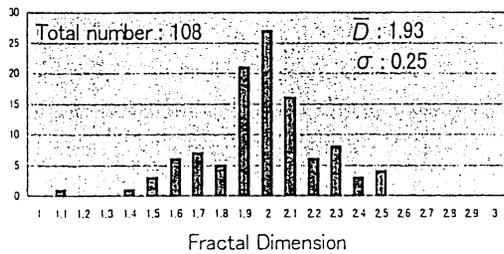


Fig.25 Distribution of Fractal Dimension for Light Emission Pattern of Genji Firefly (Male)

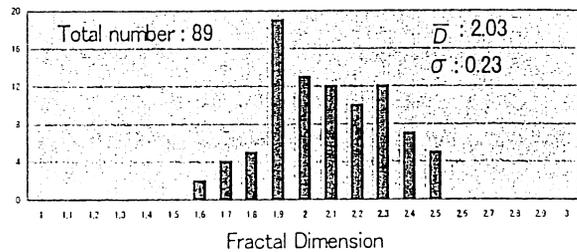


Fig.28 Distribution of Fractal Dimension for Light Emission Pattern of Heike Firefly (Male)

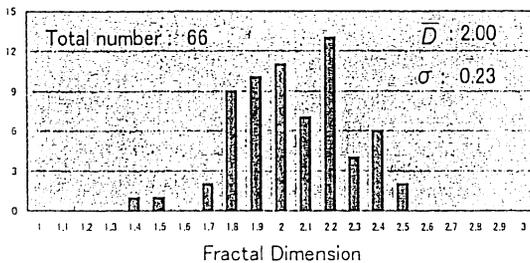


Fig.26 Distribution of Fractal Dimension for Light Emission Pattern of Genji Firefly (Female)

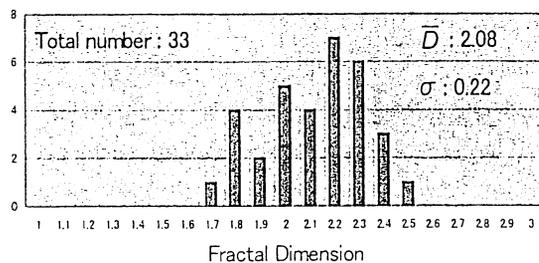


Fig.29 Distribution of Fractal Dimension for Light Emission Pattern of Heike Firefly (Female)

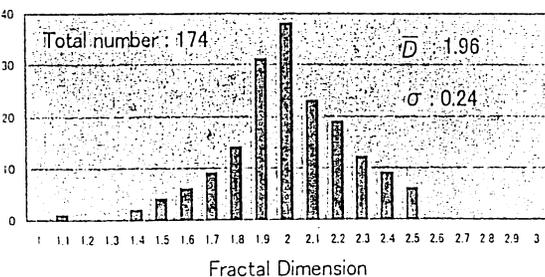


Fig.27 Distribution of Fractal Dimension for Light Emission Pattern of Genji Firefly

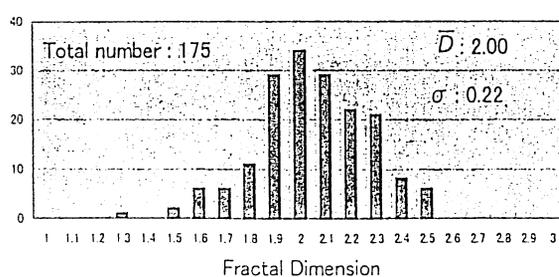


Fig.30 Distribution of Fractal Dimension for Light Emission Pattern of Heike Firefly

4.5 ホタルの発光パターンのウェーブレット解析

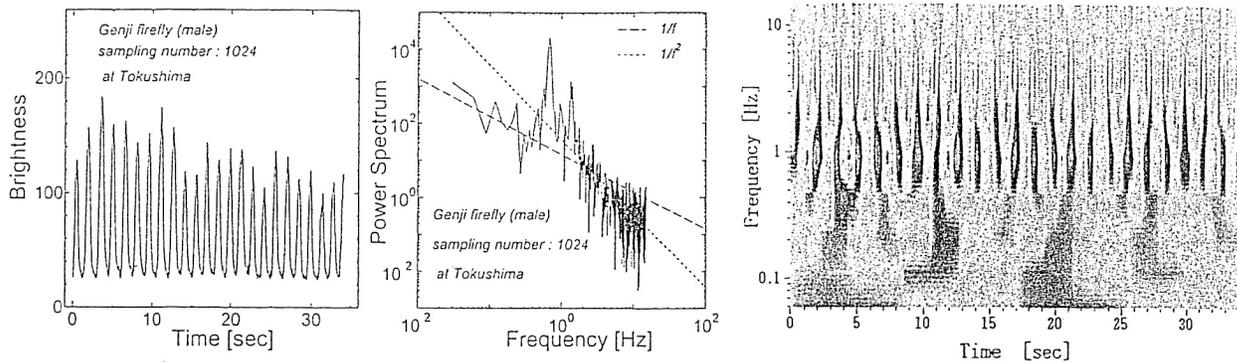


Fig.31 Frequency Characteristics of a Light Emission Pattern of Genji Firefly (Male)25 [°C], 1003 (mb)

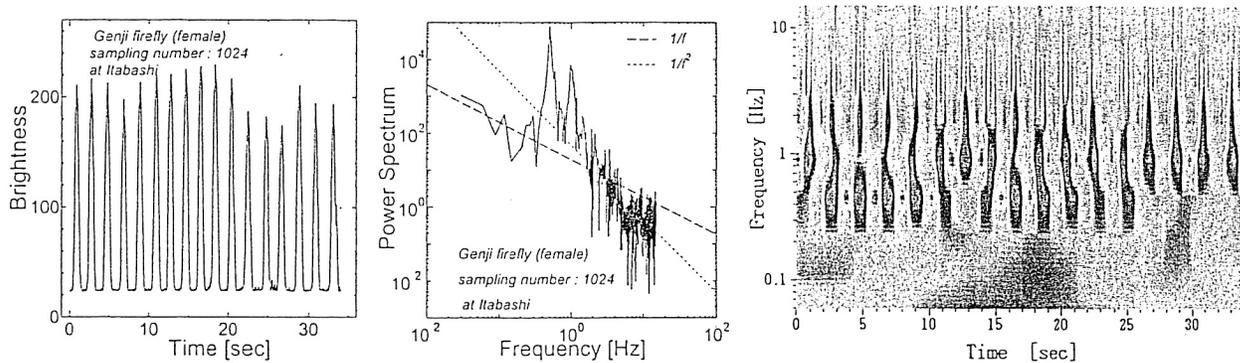


Fig.32 Frequency Characteristics of a Light Emission Pattern of Genji Firefly (Female)25 [°C], 1007 (mb)

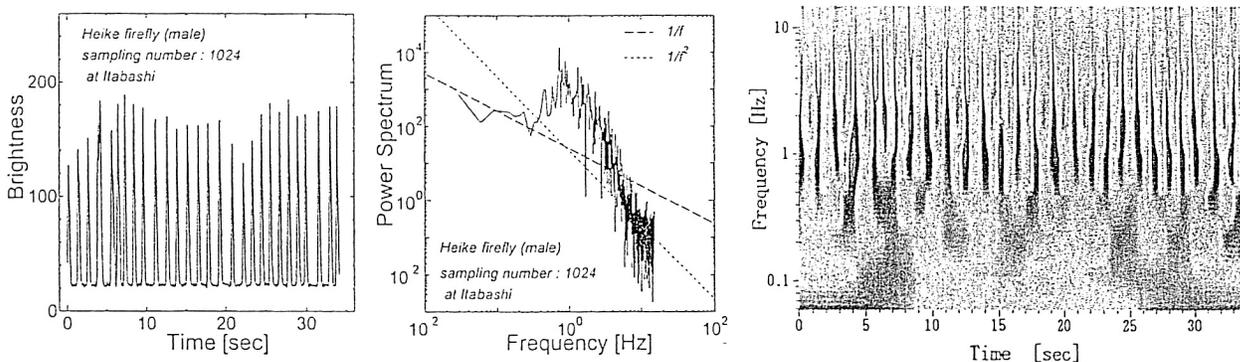


Fig.33 Frequency Characteristics of a Light Emission Pattern of Heike Firefly (Male)25 [°C], 1009 (mb)

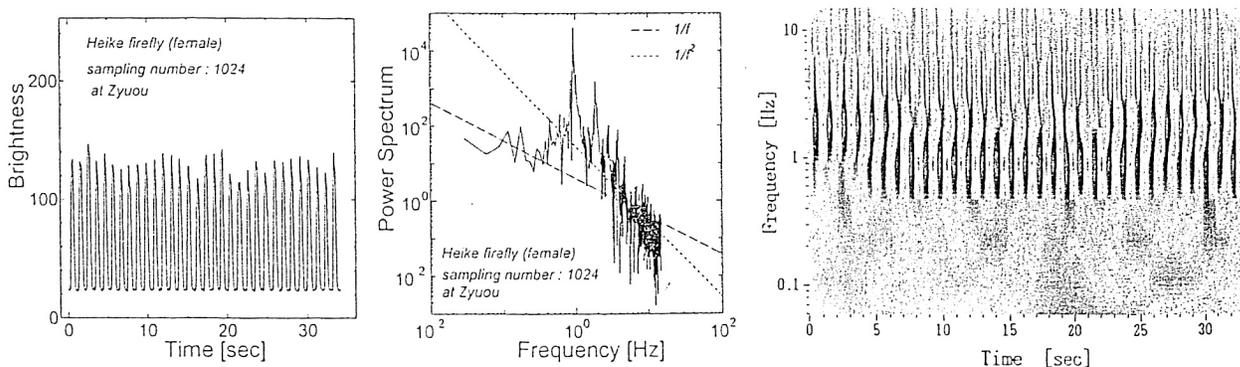


Fig.34 Frequency Characteristics of a Light Emission Pattern of Heike Firefly (Female)28 [°C], 1009 (mb)

図 31 と図 32 は、一例として徳島県池田町で採取し、板橋区エコポリスセンターホタル飼育施設で撮影した西日本型ゲンジボタル（雄）と板橋区ホタル飼育施設において採取・撮影した東日本型ゲンジボタル（雌）の発光パターンを撮影した動画を処理した結果であり、それぞれ発光現象における輝度変動とそのパワースペクトル及びウェーブレット解析結果を示したものである。これらのホタルは、集団かつ自然に活動している状態であり、いずれの映像でも、その中のある一匹にフォーカスしてある。輝度変動から、ホタルの発光がある程度の規則性を持った明滅であることが読みとれ、パワースペクトルからもゆらぎの存在が確認できる。すなわち、それぞれ 0.7 [Hz] と 0.5 [Hz] 近傍のスペクトルピークを境として、低周波域で $1/f$ ゆらぎ現象、高周波域で $1/f^2$ ゆらぎ現象が確認できる。特に低周波域は、人の網膜に十分反応する帯域であり、人の感性との関係が深いと言える。また、ウェーブレット解析でも、それぞれ 0.7 [Hz] と 0.5 [Hz] 近傍でピークを示しているが、発光の周波数特性には大きな時間変移は観察されなかった。

図 33 と図 34 は、一例として板橋区ホタル飼育施設において採取・撮影したヘイケボタル（雄）と茨城県十王町において採取・撮影したヘイケボタル（雌）の発光パターンに関する動画を処理した結果であり、それぞれ発光現象における輝度変動とそのパワースペクトル及びウェーブレット解析結果を示したものである。これらのホタルは、集団かつ自然に活動している状態であり、いずれの映像でも、その中のある一匹にフォーカスしてある。ゲンジボタル同様、輝度変動にはある程度の規則性が見られ、パワースペクトルは、それぞれ 0.8 [Hz] と 1 [Hz] 近傍のスペクトルのピークを境として、低周波域で $1/f$ ゆらぎ現象、高周波域で $1/f^2$ ゆらぎ現象が観察できた。ウェーブレット解析した結果も、それぞれ 0.8 [Hz] と 1 [Hz] 近傍でピークを示しているが、発光の周波数特性にも大きな時間変移は観察されなかった。

なお、ゲンジボタルとヘイケボタルいずれの場合も、これらの一連の傾向は、集団や単独時、種別、雌雄、撮影機材、場所、日時及び個体に依らずほぼ類似であった。また、一連の計測を通じて、東日本型と西日本型ゲンジボタルで従来から言われている生息環境による発光パターンの相違は特に観察されなかった。従来の研究[注 1～3]では、ある一匹のゲンジボタルを試験管内に固定したままフォトダイオードにより発光パターンの測定を実施している。一方、本研究では、それぞれのゲンジボタルが集団かつ自然な状態で活動している瞬間を、赤外線暗視モードのデジタルビデオカメラとスーパーハープ管カメラで測定し、画像処理を施している。さらに、著者らは、[注 13]において、西日本型ゲンジボタルと東日本型ゲンジボタルの間に見受けられるとされてきた発光パターンの相違が、従来から考えられてきたゲンジボタルの遺伝形態の相違によるものではなく、気温など生息環境条件に起因するものであることを新しく指摘した。したがって、生息環境による発光パターンの相違は、例えば、西日本型とされるゲンジボタルの発光パターンを生息環境の異なる東日本

のある場所で測定するとすれば、発光パターンの相違を見出せないものと考えられる。

4.6 ホタルの光による癒し効果の検証

ゲンジボタルやヘイケボタルの光計測から得た一連の事実を総合すれば、人はホタルの発光パターンにおける低周波領域、すなわち 0.5 ～ 10 [sec] 程度、の比較的ゆったりとした明滅周波数域に対して何らかの安らぎを感じているのではないかと考えられる。この程度の明滅周期であれば、十分に視覚神経に反応することが出来る。そのため古来より特に日本人は、夏の夜空の下、ゆったりと幻想的に繰り返されるホタルの光の営みに共感を覚えてきたのであろう。さらに、単に輝度変動や発光間隔変動のみならず、隣接明滅輝度差や隣接最大発光輝度差の変動についても、人が心地良く感じる要素を有しているものと考えられる。古典音楽のリズムをスペクトル解析[注 14]しても、スペクトルの全域で $1/f$ モードが必ずしも実現しているわけではない。また、人も常にゆらいでいることから、単調な繰り返し現象よりも、 $1/f$ に限らず、やや規則的とは言え $1/f^2$ のような何らかのゆらぎのある現象の方がむしろより快適と感じるのであろう。その意味では、高周波域で観察した $1/f^2$ モードについても、人は何らかの安らぎを感じるのではないかと推測できる。

以上のことを鑑み、さらに本研究では、ホタルの光が人の精神に及ぼす影響や癒しの効果をより客観的に検討するため、感性工学的な官能評価を実施した。平成 12 年度初夏に板橋区エコポリスセンターホタル飼育施設のせせらぎで実施したゲンジボタルとヘイケボタルの鑑賞会において、様々な年齢階層のそれぞれ約 450 人ずつから官能評価法[注 15]に基づいた意見サンプルを回収・処理・分析した。これは、言葉の意味空間から人の感性を分析する方法である。ここでは、言葉の意味空間を 7 段階で評価した。すなわち図 35 と図 36 は、人がゲンジボタルとヘイケボタルの光の鑑賞によって「心地良い（癒された）」かを、分析した結果であり、多くの分析項目中の一部を示したものである。横軸 1 → 7 ほど心地良い（癒された）度合いが高いことを示している。図から、実に 95 [%] 以上の人が「心地良い」と回答していることがわかる。したがって、これらの事実は、先に統計解析したホタルの光による癒し効果を裏付ける上で有力な客観的証拠となり得るものと考えられる。すなわち、ホタルの発光パターンやそれらのゆらぎ解析の実験的な検証に加え、それが精神に及ぼす影響を感性工学的に考察することにより、ホタルの光とその生態系には十分な「癒し効果」のある可能性が高いことが明らかになった。

5. まとめ

本研究は、ホタルの光の不思議と人の感性について実験的な検討を加えたものである。その結果、以下のようなことが明らかとなった。

(1) ホタルの発光パターンには、雌雄、種、集団、単独、場所、日時、撮影機材及び個体に関わらず、人の感性に共鳴すると言われている $1/f$ ゆらぎ現象が存在する。

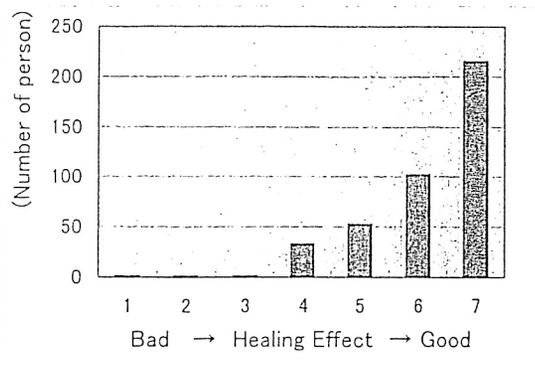


Fig.35 Healing Effect Analyzed with Semantic Differentials (Genji)

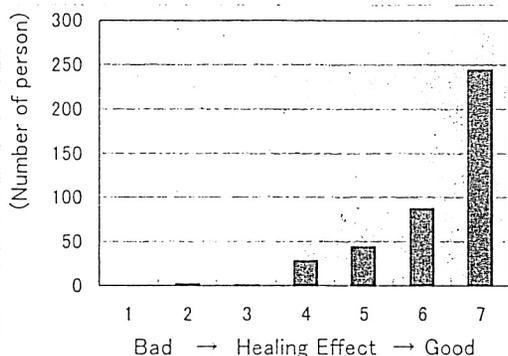


Fig.36 Healing Effect Analyzed with Semantic Differentials (Heike)

(2) ホタルの発光現象の発光間隔変動、隣接明滅輝度差変動及び隣接最大発光輝度差変動にも、 $1/f$ のゆらぎや $1/f^2$ のゆらぎ現象が存在している。

(3) ホタルの発光パターンは、低周波域の変動に対してフラクタル次元が2である頻度が最も高い。

(4) ホタルの発光パターンには、周波数特性の大きな時間変移が存在しない。

(5) ホタルの発光パターンには、感性工学的見知からも人の精神への癒し効果が期待できる。

今後は、将来のホスピスや福祉施設などにホタルやそのミニ生態系による癒し空間の創造に本研究の成果を応用して行きたい。

注

- 1) 牧野徹, 鈴木浩文, 大場信義: 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, Vol.42, pp.27-56, 1994
- 2) 大場信義, 鈴木浩文, 山崎柄根: コンピューター解析法による日本産ホタルの発光パターン, 横須賀市博研報, Vol.43, pp.17-24, 1995
- 3) 大場信義: 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, Vol.26, pp.21-31, 1979
- 4) 日野幹雄: スペクトル解析, 朝倉書店, 1997
- 5) 高安秀樹: フラクタル科学, 朝倉書店, 1995
- 6) 高安秀樹: フラクタル, 朝倉書店, 1986
- 7) 榊原進: ウェーブレット ビギナーズガイド, 東京電機大学出版局, 1999
- 8) チャールズK. チュウイ著: ウェーブレット入門, 東京電機大学出版局, 1993
- 9) チャールズK. チュウイ著: ウェーブレット応用, 東京電機大学出版局, 1997
- 10) 齊藤兆吉: ウェーブレット変換の基礎と応用, 朝倉書店, 1998
- 11) 中野宏毅, 山本鎮男, 吉田靖男: ウェーブレットによる信号処理と画像処理, 共立出版株式会社, 1999
- 12) ゆらぎ現象研究会: ゆらぎの科学, Vol.1-10, 森北出版, 1991-2000
- 13) Norio ABE, Takahisa OHIRA, Hidehiro HOSHIBA, Terumi INAGAKI: The Effect of Ambient Ecological Conditions on the Light Emission Pattern of Firefly, XIV International Congress of IUSSI, The Golden Jubilee Proceedings, p. 126, 2002
- 14) 武者利光: ゆらぎの発想 — $1/f$ ゆらぎの謎にせまる, NHK 出版, 1998
- 15) 長町三生: 感性工学—感性をデザインに活かすテクノロジー, 海文堂出版株式会社, 1997

謝辞

本研究は、茨城大学教育・研究支援経費の交付を一部受けて行われたものである。ここに謝意を表する。