博士学位論文

人の感性に共鳴する
ホタルの光と
快適水圏環境の創成について

平成17年3月

茨城大学 大学院理工学研究科
博士後期課程 生産科学専攻

阿 部 宣 男

甲第 11 号証

論文要旨

本論文は「ホタルの光と人の感性」「ホタルを活用した癒し空間の創造」及び「ホタル飼育の科学」の3つの大きな論旨から構成されている。すなわち、ホタルの光の物理・数学的な考察に始まり、ホタルの光の感性工学的な評価に基づいた癒し空間の創成、ホタルの水圏環境を精査なモデリングによって確立した水圏環境によるホタル飼育の科学で締め括っている。したがって、本論文では、ホタルの光と人の感性について発光現象のゆらぎ特性が人に与える影響について最初に考察し、次に感性情報計測と福祉応用の面からホタルによる人工ミニ生態系を提案・評価した後、新たに考案したホタル飼育の科学について、それぞれの論旨の流れに沿って議論を展開してある。

本研究では、まず自然環境が本来有する癒し効果に着目し、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"（ホタルの光やその生態系としての水圏環境）を「癒し」の一つとして取り上げ、それが人々の心にどのような効果を及ぼすのかについて、その光の不思議と人の感性について実験的な検討を最初に行った。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。しかしながら、これらの計測では、ホタルの発光パターンから得られる生物情報のある一面を考察しているだけであり、もう一つの重要な情報、すなわち、光の色相とそのゆらぎについては言及していない。したがって、本研究では、ホタルの発光パターンが有する色相のゆらぎ、色相心理と感性情報計測の面からホタルの光と人の感性についてさらに詳細な考察を加えた。さらに、ホタルの光の色や色相変動が人の精神にどのような心理的効果をもたらすのかについても併せて検討した。次に、ホタルの発光パターンやゆらぎの研究に基づいて開発したバーチャルホタルイルミネーションシステムを利用し、人工のミニ生態系の有り方についても考察するとともに、人口の光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、ホスピスや福祉施設向けの癒し空間の実現を目指した。本研究で新たに開発したバーチャルホタルイルミネーションシステムは、天然のホタルを模擬した光を提供することができ、天然のホタルを鑑賞するのと同様な癒し効果を有することが期待

できる。天然のホタルは夏のある一時期にしか鑑賞することができないが、人工のシステムではホスピスや福祉施設などの住人の要請に応じていつでも身近な場でホタルの光と癒しが感じられる。

一方、本研究では自然生態系への回帰や環境保全のため、板橋区役所資源環境部エコポリスセンター板橋区ホタル飼育施設（以下、板橋区ホタル飼育施設とする）においてホタルを中心とした水圏環境を生態槽内に試行的に再現し、世代継承へ向けた様々な実験的な考察を進めた。ここで報告する内容はホタルが生息し続ける上での必要十分条件、最適な水環境、土壌環境、温熱環境及び動植物群との共生関係であり、水圏環境の自然回帰へ向けたホタル生態系の設計と構築を目的とした閉鎖型ミニ生態系の模擬と１６世代継承の成果である。これは、大量飼育に関する成果であり、これまで誰もが実現し得なかった成果である。さらに本研究では、これらの成果を基に、ホタルを基軸としたより自然に近い生態系の模擬に向けて板橋区ホタル飼育施設内に新たな疑似生態系を創成した。すなわち、これまでに提案したホタル生態槽をスケールアップし、より現実的な生態環境への接続について実験的な検討を加えた。これは、都市近郊においてもホタルが自然の姿ありのままで乱舞する光景を実現するための第二段階の試みである。人工的な飼育では、如何なる形態であってもホタルの真の保護とは言い難く、身近な自然ありのままの生態環境の中でホタルが定着し、優雅な光の舞を未来永劫継承し続けてこそ初めて真の保護と言える。ここでは、ホタルに最適な自然の生態系を精査し、適切な生態系のモデリングに基づいて「せせらぎ」のある疑似生態系を創り上げた。さらに本研究では、この空間を様々な階層の人々に体験してもらい、感性工学的にホタルの疑似生態系が人々の精神に及ぼす影響についても合わせて考察した。将来的には、創成した疑似生態系で培ったホタル飼育の技術を実際の自然生態系へ発展・応用するとともに、せせらぎ空間を福祉・情緒・環境教育の場としても活用する。昨今、商業的な立場からホタルを大量購入して乱舞させ、遠隔地域から遺伝的にも遠いホタルを移入しているような現状が見受けられるが、これらの動きには生態学的にも問題がある。しかしながら、ある地域のホタルが失われてしまった以上、出来る限りその地域固有の遺伝形態に近いホタルを継続的に保全することは、極めて重要なことでもある。一方で、本研究の成果をビル屋上に空中庭園として導入することで、近年問題となっているビルの省エネルギー化、二酸化炭素削減などの環境問題、また情操教育・心の癒しなどの社会的効果が期待される。

Keynote of Dissertation

Applicant: Norio Abe

This dissertation is composed of three major arguments; “Light Emission Pattern of Firefly and Human Sensitivity”, “Creation of Cure Spaces by Utilizing Firefly” and “Science of Firefly Rearing”. More specifically, it begins with physical and mathematical study of light emission of fireflies and creation of cure spaces based on the evaluation of light emission of fireflies from the viewpoint of Kansei Engineering, and it rounds out with the science of firefly rearing in the hydrosphere environment established by modeling precisely the environment in nature. I first examined the effects of the fluctuating property of the firefly’s light emission pattern on humans, and secondly suggested and evaluated the mini ecosystems from the viewpoint of Kansei Information Measurement and welfare utility. Lastly I developed an argument on science of firefly rearing which we newly developed in line with each thesis accordingly.

In the first phase of this study, I focused on the healing effects of natural environments. I took up the firefly (the light emission and its hydrosphere environment from the viewpoint of an ecosystem) as one of the healing factors, as it keeps fascinating the heart of the Japanese people with its fantastic light as a part of Japan’s bountiful nature. Then I studied the mysterious light and human sensitivity. I examined whether it causes human mind any effect or not. I measured and analyzed luminescence phenomenon by using technological application such as image data processing and statistical processing, in consideration of creation of healing spaces with fireflies and mini ecosystems for hospices and welfare facilities. I also evaluated fluctuating property and fractal dimension which are found in the light emission pattern of the firefly. At the same time, I evaluated the effects of firefly’s light on human mind by using sensory evaluation method through the viewpoint of Kansei Engineering. However, these measurements covered only one side of bioinformatics given by the light emission pattern of the firefly, and they do not consider the other important information, i.e., the hue of light and its fluctuation. Therefore, I added more detailed consideration of the light of fireflies and human sensitivity, by trying another approach to examine the fluctuation of the hue of light which was seen in the emission pattern of fireflies from the viewpoint of hue psychology and Kansei Information Measurement. In addition, I examined how the color of light and the variation of the hue of light affects human mind psychologically. Next, I utilized the virtual firefly illumination system which I developed based on our study of firefly’s light emission pattern and its fluctuation to examine the nature of artificial mini ecosystem. At the same time, I aimed at creating cure spaces for hospices and welfare facilities with consideration on the effects of

artificial light on human mind from the viewpoint of Kansei Engineering. The virtual firefly illumination system which we have newly developed can provide the light imitating that of a natural firefly, and it is expected to have the same cure effect with the natural one. Although natural fireflies can be seen only in a certain period of summer, the artificial system can provide the light of fireflies and cure effect, whenever and wherever, according to the requests from hospices and welfare facilities.

On the other hand, I reconstructed hydrosphere environments mainly with fireflies in ecological tank at the Itabashi Firefly Facility (at Eco-Polis Center, Resource and Environment Division, Itabashi Ward Office, Tokyo). I also carried on various experimental examinations seeking for succession to the next generations, aiming at regression to natural ecosystem and environment protection. The information reported in the dissertation includes necessary requirement, most suitable hydrosphere environment, soil environment and thermal environment sufficient for fireflies to keep living, and symbiosis with fauna and flora. Also, it includes a simulation of a closed mini ecosystem aiming at designing and developing ecosystem for fireflies in order to make hydrosphere environment return to natural state, achieving succession of sixteen generations. It is the evidence of our success in mass rearing that nobody has ever achieved. Moreover, in this study, I additionally created a simulated ecosystem at the Itabashi Firefly Facility based on our achievement, seeking for more natural ecosystem. To be more precise, we made the ecological tanks bigger than those we ever had, and challenged for more realistic ecological environments. This is our second trial to actualize the scene with fireflies in a state of nature even in urban areas. However, artificial rearing is far from the protection of fireflies. It can be achieved only by having fireflies settled in a state of nature and keeping the elegant luminescence illusion succeeded forever. In the study, I carefully examined perfect ecosystems for fireflies and created a simulated ecosystem with "Seseragi" (means small stream) based on an appropriate model of an ecosystem. In addition, I asked people with various backgrounds to experience the space, examining the effects of this simulated ecosystem with fireflies on human mind. I am planning to advance our technology of firefly rearing learned from the simulated ecosystem and put it into practical use, utilizing the "Seseragi" space as a place for various kinds of education (ex ; welfare, emotion, environment). Recently, it is found that some facilities buy fireflies massively for commercial purposes and bring them to remote areas where they do not match hereditarily. These situations create problems ecologically. Nonetheless, as the fireflies in certain areas have died off, it is critical to preserve fireflies which are close to the heredity trait of the area as much as possible. I believe my study described in this dissertation will be able to make a significant contribution to this end.

目　次

1. 緒言

2. 従来の研究

2. 1. ホタル

2.1.1. ゲンジボタル (*Lampyridae Luciola cruciata*)

2.1.2. ヘイケボタル (*Lampyridae Luciola lateralis*)

2. 2. 従来の飼育技術

2.2.1. 地域のホタル飼育

2.2.2. 多摩動物公園におけるホタル飼育

2.2.3. 板橋区ホタル飼育施設におけるホタル飼育

2. 3. ホタルの発光メカニズムと光によるコミュニケーション

2.3.1. 発光のメカニズム

2.3.2. 発光によるコミュニケーション

3. 実験及び解析法

3. 1. ホタルの光と人の感性

3.1.1. *1/f"* ゆらぎ

3.1.2. 光と色の意味

3.1.2.1. 等色関数と RGB 表色系

3.1.2.2. XYZ 表色系

3.1.2.3. *sRGB* (Standard RGB)

3.1.2.4. 色相解析

3.1.3. 脳波

3.1.4. 官能評価

3.1.5. ホタルの発光現象の撮影

3.1.6. ホタルの発光現象の解析

3.2. バーチャルホタルイルミネーションシステム

3.3. 生態水槽

3.3.1. ホタルの生活史と生態槽

3.3.2. ホタルと水

3.3.3. ホタルと土壌

3.3.4. ホタルと温熱環境

3.3.5. その他の環境

3.3.6. ホタルと共生生物

3.4. せせらぎ空間

3.4.1. ホタルに関わるマクロ生態系の現状と環境

3.4.2. ホタル生態系のモデリング

3.4.3. せせらぎの設計指針

3.4.4. せせらぎの流速制御

3.4.5. せせらぎの水深・土壌・底質制御

3.4.6. せせらぎの温熱環境制御

3.4.7. せせらぎの降雨制御

3.4.8. せせらぎの水質制御

3.4.9. せせらぎの共生動植物群

3.4.10. せせらぎ空間の維持・管理

3.5. ホタルの水

3.5.1. ホタル生息環境の水質

3.5.2. 亜硝酸とアンモニアの動物への影響

3.5.3. 微生物による化学物質の分解

3.5.4. 窒素化合物とアンモニア化合物の動態

3.6. ホタルの発光パターンに見られる温熱環境依存性

4. 実験結果と考察

4.1. ホタルの光と人の感性

4.1.1. ホタルの光の輝度変動

4.1.2. ホタルの光の発光間隔

4.1.3. ホタルの光の輝度差変動

4.1.4. ホタルの発光パターンにおけるフラクタル次元

4.1.5. ホタルの発光パターンのウェーブレット解析

4.1.6. ゲンジボタルの官能評価

4.1.7. ヘイケボタルの官能評価

4.1.8. 色相解析

4.1.9. 脳波解析と官能評価

4.1.10. 色相の心理的意味と官能評価

4.2. バーチャルイルミネーションシステム

4.2.1. バーチャルイルミネーションシステムの官能評価

4.2.2. バーチャルイルミネーションシステムの脳波解析

4.3. 生態水槽

4.4. せせらぎ空間

4.4.1. ホタル飼育の成果

4.4.2. せせらぎ空間の感能評価

4.5. ホタルの水

4.5.1. ホタル生息環境の水質

4.5.2. 亜硝酸とアンモニアの動物への影響

4.5.3. 微生物による化学物質の分解

4.5.4. 窒素化合物とアンモニア化合物の動態

4.5.5. ホタル生息環境への硝化システムの導入と今後の課題

4.6. ホタルの発光パターンに見られる温熱環境依存性

4.6.1. ゲンジボタルの温度変化

4.6.2. ヘイケボタルの温度変化

4.6.3. 温熱環境による発光パターンの変化

5. 応用

5.1. 福祉応用について

5.2. ホタル生態系の新提案

6. 結言

参考文献

資料 学術論文別刷り

謝辞

1. 緒 言

本論文は,図 1-1 に示されるような「ホタルの光と人の感性」,「ホタルを援用した癒し空間の創成」及び「ホタル飼育の科学」の 3 つの大きな論旨から構成されている.すなわち, ホタルの光に関する物理・数学的な考察に始まり,ホタルの光の感性工学的な評価に基づいた癒し空間の創成,ホタルの水圏環境を精査なモデリングによって確立した水圏環境によるホタル飼育の科学で締め括っている.したがって,本論文では,ホタルの光と人の感性について発光現象のゆらぎ特性が人に与える影響について最初に考察し,次に感性情報計測と福祉応用の面からホタルによる人工ミニ生態系を提案・評価した後,新たに考案したホタル飼育の科学について,それぞれの論旨の流れに沿って議論を展開する.

戦後の日本は,高度経済成長を遂げ,交通の高速化・情報化社会の進展など物質的には豊かになったが,90 年代に入り,受験戦争や長期に及ぶ不況・リストラなどによって生活のゆとりが喪失するとともにストレス社会が深刻化した.すなわち,近年の日本では,こうした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,人々の精神的疲労がますます深刻化する一方にある.このような時代を背景とし,癒しやヒーリングといった言葉が現在注目されるようになってもきている.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も言えよう.また,医療・福祉現場やホスピスなどにおいては,現代医学をもってしても治療困難な人々が数多く存在し,精神的な癒しを日々求めている.これには,医療・福祉現場へ向けて何らかの癒し空間を適切な形態で提供するなど,医療・福祉環境の改善が希求される.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.一般に, 自然環境には,そよ風や川のせせらぎなど,人に快適さをもたらすと言われる *1/f* ゆらぎを有する現象が存在することが知られている［武者利光：1998,ゆらぎ現象

研究会：1991-2000］.しかしながら,物質的な豊かさは,高度消費社会を生み,開発に伴う森林伐採・自動車の排気ガスによる大気汚染・生活廃水による河川の汚染などの自然環境破壊を引き起こし,元来自然が有する癒し効果の恩恵を受けづらくしている.自然環境の破壊は,地球温暖化やオゾン層破壊などの原因となるだけはでなく,そこで暮らしてきた多様な生物の生態系を奪い,種の存続さえも危ぶませている.さらに,急速な都市化・宅地化に伴い,人が自然と触れ合う機会が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もあると考えられる.

以上の社会的状況に鑑み,本研究では,このような自然環境が本来有する癒し効果に着目し,日本の豊かな自然環境の象徴の一つでもあり,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"（ホタルの光やその生態系としての水圏環境）を「癒し」の一つとして取り上げ,それが人々の心にどのような効果を及ぼすのかについて,その光の不思議と人の感性について実験的な検討を最初に行った.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.しかしながら,これらの計測では,ホタルの発光パターンから得られる生物情報のある一面を考察しているだけであり,もう一つの重要な情報,すなわち,光の色相とそのゆらぎについては言及していない.したがって,本研究では,ホタルの発光パターンが有する色相のゆらぎ,色相心理と感性情報計測の面からホタルの光と人の感性についてもさらに詳細な考察を加えた.さらに,ホタルの光の色や色相変動が人の精神にどのような心理的効果をもたらすのかについても併せて検討した.次に,ホタルの発光パターンやゆらぎの研究［稲垣照美：2000, 阿部宣男：2003］に基づいて開発したバーチャルホタルイルミネーション

システムを利用し,人工のミニ生態系の有り方についても考察するとともに,人工の光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,ホスピスや福祉施設向けの癒し空間の実現を目指した.本研究で新たに開発したバーチャルホタルイルミネーションシステムは,天然のホタルを模擬した光を提供することができ,天然のホタルを鑑賞するのと同様な癒し効果を有することが期待できる.天然のホタルは夏のある一時期にしか鑑賞することができないが,人工のシステムではホスピスや福祉施設などの住人の要請に応じていつでも身近な場でホタルの光と癒しを感じてもらえるであろう.

我々日本人は,優雅に飛翔する淡い光に魅了されて万葉の時代からホタルを歌や詩にも度々登場させている.ホタルは，それだけ豊かな自然の象徴であり，日本に生息するゲンジボタルやヘイケボタルが継続的に発生し続けるためには，多くの条件が満たされなくてはならない．日本では，稲作とともにホタルの生息に最適な環境（適度な有機成分を含んだ水環境）を提供し続けて来たと考えられている［遊磨正秀：1996, 嘉田由紀子：1997, 小澤祥司：2000］．そのため昭和30年の前半までは,都市近郊のあちこちでごく自然にホタルを見掛けることができた.ホタルが育つ環境は,全ての動植物,当然人類も含めて最適な生活環境であった.しかしながら,高度経済成長を境として田畑・沼地・小川などは,宅地や工場に姿を変え,それに伴う河川改修の影響などによりホタルを始めとする様々な動植物が次々に我々の周りから姿を消して行った.特に近年,ホタルは,都市化に伴う様々な開発や生活環境の激変に起因して自然界における生息数が激減しており,都市郊外でもその優雅な光の舞を見ることができなくなっている.ホタルは,いつも豊かな水が流れ,かつ河川に豊かな生態系が存在していなければ生き続けることができない.ホタルの餌となる巻貝（カワニナ）の生育には,藻類など植物性の餌が必要であり,藻類の生育には,魚類から排出される有機物やそれを分解するバクテリア類の存在が必要不可欠である.さらに,ホタルが産卵や蛹化するためには,川岸に苔類や柔らかい土壌が必要である.化学肥料,農薬及び工場排水などの流入は,ホタ

ルの生態系だけではなく水圏環境を構成している様々な動植物群の死滅を意味する.また,ホタルは暗所でなければ繁殖することができず,人間の生活様式の変化に伴う光害も,ホタルの繁殖を阻害する要因となっている.一度破壊され尽くした自然環境を再生させることは極めて難しいと言える.現在,ホタルの保全や水圏環境の管理については,全国の様々な自治体や地域のコミュニティーでも実践され,様々な年齢層の人々が参加している［水と文化研究会：2000］.このこと自体は,科学や環境教育上も望ましい動きである.しかしながら,ホタルの大量累代飼育を長期間に亘って科学的に成功した例は,多摩動物園のホタル飼育を例［萩野：1997, 1998］にとったとしても，ほとんど報告されていない.これは,その生態科学も含めてホタルの飼育に関する確固とした技術が確立されていないためであった.すなわち,ホタルの生態や飼育の方法については,これまで十分な系統的議論が展開されておらず,自然保護・保全の上でも科学的な知見が蓄積されて来たとは必づしも言い難い.

このことから,本研究では,自然生態系への回帰や環境保全のため，板橋区役所資源環境部エコポリスセンター板橋区ホタル飼育施設（以下、板橋区ホタル飼育施設とする）においてホタルを中心とした水圏環境を生態槽内に試行的に再現し,世代継承へ向けた様々な実験的な考察を進めた［阿部宣男：2000, 2001, 2002, 2003］.ここで報告する内容は,ホタルが生息し続ける上での必要十分条件,最適な水環境,土壌環境,温熱環境及び動植物群との共生関係であり,水圏環境の自然回帰へ向けたホタル生態系の設計と構築を目的とした閉鎖型ミニ生態系の模擬と数世代継承の成果である.これは,大量飼育に関する成果であり,これまで誰もが実現し得なかった成果である.さらに本研究では,これらの成果を基に,ホタルを基軸としたより自然に近い生態系の模擬に向けて板橋区ホタル飼育施設内に新たな疑似生態系を創成した.すなわち,これまでに提案したホタル生態槽をスケールアップし,より現実的な生態環境への接続について実験的な検討を加えた.これは,都市近郊においてもホタルが自然の姿ありのままで乱舞する光景を実現するための第二段階の試みである.人工的な飼育では,如何なる形態であってもホタルの真の保護とは言い難く,身近な自然ありのままの生態環境の中でホタルが定着し,優雅な光の舞を未来永劫継承し続けてこそ初めて真の保護と言える.ここでは,ホタルに最適な自然の生態系を精査し,適切な生態系のモデリングに基づいて「せせらぎ」のある疑似生態系を創り上げた.さらに本研究では,この空間を様々な階層の人々に体験してもらい,感性工学的にホタルの疑似生態系が人々の精神に及ぼす影響についても合わせて考察した.将来的には,創成した疑似生態系で培ったホタル飼育の技術を実際の自然生態系へ発展・応用するとともに,せせらぎ空間を福祉・情緒・環境教育の場としても活用する.昨今,商業的な立場からホタルを大量購入して乱舞させ,遠隔地域から遺伝的にも遠いホタルを移入しているような現状が見受けられるが,これらの動きには生態学的にも問題がある［嘉田由紀子：1997, 小澤祥司：2000］.しかしながら,ある地域のホタルが失われてしまった以上,出来る限りその地域固有の遺伝形態に近いホタルを継続的に保全することは,極めて重要なことでもある.一方で、これらの成果をビル屋上に空中庭園として導入することで，近年問題となっているビルの省エネルギー化，二酸化炭素削減などの環境問題，また情操教育・心の癒しなどの社会的効果が期待される.

Fig. 1-1 本研究における 3 つの論旨

2. 従来の研究

2. 1. ホタル

ホタルは，昆虫綱甲虫目に属し，世界で約 2,000 種，日本で約 44 種 2 亜種が確認されている．寒冷地ほどその種数は少なく，熱帯にいくほど種数が増加する傾向にある．おそらく，ホタルは，もともと暖かい地域に分布し，熱帯から亜熱帯へと生活圏を拡大し，現在に至っているものと考えられる．日本では，成虫がよく発光するホタルは 14 種で，一般的によく知られているのがゲンジボタル，ヘイケボタル，ヒメボタルの 3 種類である．なかでもゲンジボタルとヘイケボタルの 2 種は，大部分のホタルが林や草原で一生を過すのに対し，幼虫時代を水中で過す世界でも珍しいホタルである．

本実験では，ヘイケボタルとゲンジボタルを使用したため，その 2 種の生態について簡単に紹介する．

2.1.1. ゲンジボタル (*Lampyridae Luciola cruciata*)

ゲンジボタルは日本の固有種で，北海道と沖縄を除く全国各地（北限は青森）の河川（流水）に生息している．体長は，雄で約 15mm，雌で約 20mm である．体は黒色で，前胸背が赤く，黒い十字の紋が見られる．この模様は変異が大きいとされている［大場，2001］．食性は狭く，カワニナのみを餌とする．6 月～7 月上旬に成虫が羽化し，6 月中旬に最盛期をむかえる．交尾した雌は，500～1000 個の大きさが直径 0.5mm ほどの淡黄色球状の卵を川や水辺の草の根元や水苔に産卵する．成虫の寿命は，10 日前後である．卵は約 30 日後に孵化し，孵化幼虫は体長 2mm 前後で腹節にえら器官を持ち，水中で生活する．幼虫期は，カワニナに消化液を注入し，肉を溶かして吸い込んで食べ，短くて 10 ヶ月，長い場合は 2 年間も水中生活を送る．体長 20～30mm の黒褐色の終齢幼虫に達すると，4 月中旬の雨の降る夜に川岸に上陸し，土にもぐり土繭を造る．幼虫はこの土繭の中で蛹化し，蛹は体長 10～20mm の乳白色だが，羽化間近になると次第に複眼，肢などが黒化する．約 50 日後に羽化を迎える．

2.1.2. ヘイケボタル (*Lampyridae Luciola lateralis*)

ヘイケボタルは，沖縄を除く日本をはじめ韓国・中国東部・東シベリヤに分布し，水田や溝（止水）に生息する．体長は，ゲンジボタルに比べ小型で，雄で約 10mm，雌で約 12mm である．体は黒色で，赤色の前胸背に，縦にはっきりとした黒いすじが見られる．食性はゲンジボタルに比べて広く，モノアラガイ・タニシ・カワニナなどを餌としている．成虫の羽化は，ゲンジボタルに少し遅れて 7 月～8 月で，最盛期は 7 月下旬である．メスは羽化後，交尾し，水田や川などの水辺の草の根元や水苔に，直径約 0.6mm の乳白色球状の卵を 50～100 個ほど産む．卵は約 30 日後に孵化し，幼虫は水中で生活を始める．孵化後すぐの幼虫はゲンジボタルに似ているが，2 齢以上になると前胸の紋が黒い縦すじに変わり区別できる．翌年の 5~7 月まで水中生活を送り，17mm 前後の黒褐色の終齢幼虫に生育すると，ゲンジボタルと同様に水際の岸にはい上がり，土繭を造る．蛹は体長 10mm 前後で，約 30 日前後に羽化するが，上翅が硬くなるまでしばらく土中にいる．

以上がゲンジボタルとヘイケボタルの生態である。ここでは種ごとの生活史についてもふれているが，温度変化などの気候の影響や地域個体差によって左右される．

2. 2. 従来の飼育技術

浮世絵や俳句にも登場するように［遊磨・後藤：1999］，日本人は古くからホタルの光の美しさに魅了され身近な生き物として愛着をもってきた．しかし，近年の人間による開発・護岸工事などの急激な環境の変化により，しだいにその姿が私達の身近な環境から消えていった．そのような中，自然や環境に対する意識の高まりとともに，ホタルが生育できる環境を復活させたいとの願望から，各地で復活活動が盛んになってきた．ホタル復活に向けた運動を含めた飼育例は，1966 年から 1999 年までに約 100 例も報告されている．ホタルの飼育に関する研究は，地域ごとの様々な運動に支えられてきたといえる．

2.2.1. 地域のホタル飼育

地域のホタル飼育は，採取したカワニナによるホタルの飼育から始まり，カワニナの飼育・水質・周辺の環境などを含めた総合的な飼育技術へと発展した．水質に関しては，比較的よく調査されている．ホタルは塩素と銅イオンに弱く［大場：1988］，ホタルが見られる川の水質は，pH7 前後の中性で透明度が高く，COD・亜硝酸窒素・硝酸窒素・アンモニア窒素が少ない．また，酸素が十分に溶けており，カワニナの繁殖に欠かせないカルシウム分が多く，さらに，珪藻類の繁殖に必要な珪藻塩・マグネシウムも含まれることも重要である．物理的条件としては，幼虫自身が流されない緩慢な流れの場所や流れの速い場所など自然界に近い多様な構造が必要である．ホタルの幼虫は緩慢な流れに生息し，そこにいるカワニナを食べる．ホタルの住みやすい緩慢な流れだけを持つ構造にした場合，カワニナとホタルのバランスが崩れる恐れもある．多様な構造を持たせることで，ホタルはカワニナの生息圏内の一部を餌とし，カワニナを壊滅させることなく共存することが可能である．土に関しての記載は非常に少なく，水はけがよく保水性がありやわらかいもの（例えば，黒土・赤玉土・川砂・ピートモス・細かく砕いた炭）などを混合し，殺菌してから使用するのがよいとされている［ホタル百科事典］．以上のような水質，物理的環境，土などの調査は行われているにもかかわらず，現在でも室内で幼虫を飼育し，放流するのが主流である．多くが，ホタルの成虫の雌雄を採取し，水苔・湿ったガーゼ・スポンジに人工的に産卵させる．孵化した幼虫に，別に飼育した，もしくは採取してきた幼虫のサイズに合わせたカワニナを与える．適当な時期や大きさになったら，ホタルの幼虫を川などに放流する．もちろん，放流するホタルが住む川の環境整備や浄化作戦などの活動も同時に行われ，人工的な“ホタルの川づくり”にも取り組まなければならない．しかしながら，現状では，ホタルが自然のままに生活史のサイクルをおくるまでにいたっていない．この大きな要因には，カワニナの大量増殖が不可能とされ，幼虫に合わせた様々なサイズのカワニナの確保が非常に困難であること，死んだカワニナが水質を悪化させてしまう

問題がある．この問題を解決するために，魚介類にカワニナのエキスをブレンドして乾燥した人口餌の開発が行われたが［小野：1993］，実用化には至っていない．現状としては，数年経つと水質の悪化に伴いカワニナが消滅し，ホタルの数は年々減りほとんど見られなくなる傾向にあるようである．

2.2.2. 多摩動物公園におけるホタル飼育

ここでは，この難しい問題に 1962 年から取り組んできた多摩動物公園の例を取り上げながら，ホタルの飼育についてより具体的に説明してみよう［萩野：1997, 1998］．1964 年に埼玉県高麗川にてゲンジボタルの成虫を採取し，試験的に飼育を行なった．1966 年に玉川上水を守る会からヘイケボタル，1968 年に奥多摩町からゲンジボタルの保護の要請を受け，成虫を捕獲採卵し，幼虫を放流した．それぞれ翌年に，成虫が見られる成果を得ている．1969 年に昆虫園本館が開設され，1973 年には多摩動物公園のホタル飼育施設が設立され，山口県産ゲンジボタルをもって本格的な飼育を開始した．この施設は，野外の傾斜地にめぐらした循環式水路とその周辺の自然生態系に近い環境を再現したものである．ポンプ室と飼育室の地下に $30m^3$ の貯水槽があり，貯水槽の水は高さ 3.5m まで引き上げられ，傾斜 50 度から滑り落ちて水路に入るようになっている．水路は，8.3m の部分が 7 列，コの字型に接続され，最後に 18m の直線コースとなり再び貯水槽に戻る仕組みになっている．水路の周囲は，ホタルの蛹化場所になるため，黒土が入れてある．まず水路内にカワニナを定着・増殖させるとから始めたが，コンクリートの浸みだしや深井戸の貧栄養な水のため定着させることができなかった．その後，水路と貯水槽の中間を網で仕切り，鯉を飼育し，その糞からの栄養塩類によって植物性プランクトンの繁殖を促すことで水質を管理した．カワニナには小松菜や鯉用ペレットを餌として与えた．その結果，水路内のカワニナの繁殖が少しずつ見られ，2001 年に顕著に見られるようになった．この施設内では，カワニナの種貝の動向に合わせ，ゲンジボタルの幼虫を放流して飼育しており，1997 年には，開設当初に使用していた西日本型ゲンジボタル（山口県産）から東日本型（千葉県大原町産）に変更した．水路の上空の四方と天井にケージを張り大きな網室にしてあるが，外部の生物の進入や外部環境の影響を受けやすい．水温の上昇は水路周辺に生えた草により抑え，大雨の後の水量は適度な排水により調節できるが，外部からの生物の進入は完全に防ぐことができない．天敵の進入や水路内の生物層の多様化による競争の結果，羽化数の減少が見られた．羽化数は 1000 匹を超えたことがあったが，水路内の甲殻類のミズムシが多く発生し，100 匹前後にまで減少した．1983 年，水路の清掃を行ったことで，羽化数が 300 匹まで回復した．しかし，1988 年辺りから，100 匹前後に落ち込み，以来ずっとその状態が続いている．

一方，ヘイケボタルの飼育は，室内で 2 通りの方法で周年飼育をおこなっている．まず，4 月から 8 月にかけては，70×50cm，高さ 10cm の発泡スチロールの容器に半分土砂を入れ，自然に幼虫が上陸できる方法である．その他の季節は，フタのできる容器に大きめの幼虫を入れ，暖かい部屋で飼育する．立てかけた植木鉢のかけらを登ってくる幼虫を，湿った砂とピートモスを混合した容器に移し変える方法をとっている．餌は，ヒメタニシの肉片を与えている．1994 年の羽化総数は，1454 匹にも上ったが，幼虫につく白いカビが発生し，1995 年には 51 匹まで減少した．その後、1996 年には 315 匹まで回復したが，カビをつけたまま羽化する個体が見られる状態である．

多摩動物園の例をとっても，ホタルの飼育は非常に困難なことがわかる．水路内だけで完全に世代交代するまで至っておらず，幼虫を放流する形をとっている．また，ゲンジボタルに関しては，羽化数の減少，ヘイケボタルに関しては，白いカビの問題が残されている．そのため，定期的な水路の掃除の必要性や外部からの天敵防除などの課題が残すとともに，ホタルが自然に生息している環境を根本的に見直す必要がある．

2.2.3. 板橋区ホタル飼育施設におけるホタル飼育

一方，平成元年に板橋区では，旧温室植物園の冷房室（山野草等を地に植え）にて，従来の飼育方法を見直し，ホタルの生息環境を水・共生生物・土まで総合的に考えた，

全く独自の飼育理念に基づいた方式で飼育を始めたところ，かつてなかったほどの成功を納めた．この“阿部方式”を基礎として大型の水槽（生態水槽），さらにこの生態水槽をスケールアップした温室内に“せせらぎ”を設けて飼育を続行し，完全な飼育技術の確立に至った．この飼育技術の確立は，環境の保全などに還元することができるとともに，今まで難しいと考えられていた様々な実験に大きな役割を担う可能性を持っている．板橋区のホタル飼育施設の閉鎖空間内で，カワニナ，ゲンジボタル，ヘイケボタル，その他の共生生物がそれぞれの生活史を繰り返し，現在，16 世代目をむかえている．この詳細については，後述する．

2. 3. ホタルの発光メカニズムと光によるコミュニケーション

2.3.1. 発光のメカニズム

共生微生物が発光する昆虫は多いが，自分で発光する昆虫は少ない．ホタルは，自分で発光する数少ない昆虫のひとつである．発光器の位置や数は，種や性によってそれぞれ異なっている．本実験で使用しているホタルの発光器は，幼虫の時期には後端腹節の左右に１つずつあり，外部からはあまり見えない．成虫になると，雄は，第５・６節の２つが発光し，雌は，腹部の第 5 節の一部だけが発光し，その後側は赤い色をしている．

発光現象は，1885 年フランスの *Dubois* によって，その発光物質ルシフェリンと酵素ルシフェラーゼの存在が明らかにされた．その後，初めてルシフェラーゼが単離され[Gree and McElroy ：1956]，発光メカニズムが解明された[McElroy et al.: 1969, White et al. : 1971, DeLuca : 1976]．発光は，まずルシフェラーゼとルシフェリンが結合し，ルシフェリン C-4 位のカルボキシル基への AMP の結合が生じる．複合体ルシフェニルアデニレート（E･L H_2･AMP）は，C-4 位の陽子の引抜き反応を受け酸素と結合，分解されて 1 量子の光を出す．すなわち，ルシフェラーゼはルシフェリンの酸化を触媒し，励起状態の反応産物が基底状態へと遷移する時に発光する．この発光過程は，余

分な熱を発することなく，最も効率の高いエネルギー変換反応と考えられる．

$$E + LH_2 + ATP \xrightarrow{Mg^{2+}} E\cdot L\,H_2\cdot AMP + PP + Mg$$

$$E\cdot L\,H_2\cdot AMP + O_2 \rightarrow \text{反応産物} + CO_2 + AMP + h\nu\ (\text{光})$$

- E：ルシフェラーゼ
- LH_2：ルシフェリン
- AMP：アデノシン一リン酸
- ATP：アデノシン三リン酸
- E･L H_2･AMP：複合体ルシフェリルアデニレート

また，ルシフェラーゼの化学的構造の違いによって光色が異なることや[Seliger and McElroy : 1964, Bruce 1999]，種ごとに発光スペクトルが変わることがわかっている[Seliger et al. : 1964, Biggley et al. : 1967, Cook : 2004]．日本のホタルについても，ルシフェラーゼの cDNA 解析がなされている［Masuda et al. : 1989, Tatsumi et al. : 1992, Ohmiya : 1995］.

2.3.2. 発光によるコミュニケーション

ホタルは成虫だけでなく，卵・幼虫・蛹も発光する．幼虫期の発光は，防衛，捕食，誘引，縄張り，幼虫ー成虫間の交信のためなどの諸説がある．成虫の発光は，刺激を受けた時に発する刺激光・警戒した時に発する威嚇光・配偶行動に伴う発光もある．特に，配偶行動にともなう発光は，雌雄間のコミュニケーションに大きな役割を果たしており［Buck : 1937, Case : 1984］，種によって異なる［Mast : 1912, Lloyd : 1966, 1969, 1971,1973］．そのコミュニケーションシステムは，雌は飛ばずに地上や草の上で発光し，これに雄が誘引される原始的なシステムや飛翔している雄が発光すると，雌は種特異的な発光信号で応答し，雄を誘引するシステムやそれらの中間型などが上げられる．これらのシステムには，光の波長や明度，発光パターン，発光体の大きさや形や動きなどが大きく関わっている．

Photinus pyralis の雌が，紫や青色付近では反応せず，緑やオレンジや黄色にだけ反応することを発見したが［Buck：1937］，実験的には，雌の応答は得られなかった．520nm 以上の波長で雌の応答が得ることに成功し[Case:1937]，さらなる研究で 480nm 以上の波長に強く反応することが分かった［Worthy and Lall：1996］．480nm 以上，特に 520nm～660nm は雌による応答が見られたが，480nm 以下（420-460nm）の青色光には反応がないことを報告した［Lall：2000］．これらの光の波長に対する一連の実験から，雄は種固有の光の波長をもち，それに雌が反応していることがわかった．

発光パターンについての実験は，アメリカの Photinus 属のホタル 20 種について知られている［Lloyd：1966］．同所性ホタルの間では，オスの発光パターンや飛び方が著しく異なる上に，接近してくる雄を感知した地上または植物体上の雌もそれぞれ種特異的な一定の時間遅れの応答閃光を発する．雌の存在を確認した雄は定位飛行をおこなって着陸・接近という一連の定型行動をとる．したがって，それぞれの種が同種の雄または雌を識別できるので生殖隔離が完全である．インドからニューギニアにかけて分布する Pteroptyx 属のほとんどの種において，雄ボタルは飛び回らないで，川岸の木に止まって発光し，雌を誘引する．しかも，ペースメーカーよって発光が調節され，全個体がいっせいに同時明滅をおこなう［Buck and Buck：1978, Buck and Case：1986］．タイにいる種は，無数の雄が同じ場所に集まり，0.5 秒間隔で同時閃光し，そのパターンが 0.02 秒以上ずれる個体は 1 匹もいないという．それゆえ 1 本の木全体あるいは複数の樹木群全体が光って見え，雌にとっての標識（長距離信号）として役立つことになる．また，日本のヒメボタルの雄は日没後，0.9 秒前後の閃光時間と間隔で飛びながら発光する．雄は草上で種特異的な閃光（2～3 秒間）を発している未交尾の雌を見つけるとそばに飛び降りる．雌は雄の発光信号に対して，雄の閃光後 0.3 秒前後遅れて，0.2～0.6 秒間の応答閃光をする．誘引された雄が近づくと，雌は応答閃光を徐々に雄に同調し，ついには両性がほとんど同時明滅をして交尾する［Ohba：1983］．ヘイケボタルの雄は，1 秒前後の雌の閃光（2～6 秒間隔で，1～3 秒間の閃光）

に誘引されるが，応答閃光は行わない［Ohba：1983］．また，雌は連続閃光で雄に応答するとも言われている［矢島：1978］．日本固有種のゲンジボタルに関しては，糸魚川静岡構造線を境に西が西日本型，東が東日本型に分けられ，前者が 2 秒間隔，後者が 4 秒間隔に明滅するといわれている［Ohba：1983, 1984, 大場：1986, 1988］．これらの両集団の分布境界域には，約 3 秒の中間型の存在が確認されたとの報告もある［大場：1991］．詳細な研究は，各地域集団のアロザイム解析［Suzuki et.al.：1996］やミトコンドリア DNA の解析［鈴木ら：2000, 武部ら：2000］がおこなわれており，いずれも発光パターンによる各地域集団と一致すると報告されている．各地域集団の個体変異が大きく，西日本型と東日本型の形態的相違と発光パターンとの対応は特に認められなかったが，発光パターンによる分類はミトコンドリア DNA のタイプと一致するとの見解をあらためて示している［大場：2001, 2002］．ミトコンドリア DNA とは，ミトコンドリア中に存在する小さな DNA のことで，大量に取れて塩基数が少なく，個体差が大きく，母系遺伝しかしないという特徴がある．主に系統を調べるのに利用されており，ミトコンドリア DNA と形態・行動を制御する遺伝子とは必ずしも関連がなく，ミトコンドリア DNA の違いが，発光パターンの制御に遺伝的に関わっているかは不明である．一方，気温が高いほど明滅周期が短くなることが分かり，明滅周期に気温が影響することが指摘されている［笹井：1999］．この問題は，西日本型と東日本型の交配実験や特定遺伝子の分析，環境要因など総合的に見直す必要がある．

発光に関する一連の実験は，生物にとって子孫を残すという最も重要な配偶行動に関連し，多様な光の波長や明度，発光パターンなどにより種固有のものが進化していると考えられる．しかし，従来の実験では，光の色相や発光パターンについては個々に実験されており，総合的な実験がなされていないのが現状である．本研究では，飼育技術の確立から色相や発光現象の解析など多岐にわたり総合的に解析し，その応用までを視野にいれた実験を行った．

3. 実験及び解析法

3. 1. ホタルの光と人の感性

3.1.1. *1/f*^{n}ゆらぎ

図 3-1 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. *1/f*^{0} モードの変動現象は, スペクトルの強度が周波数に依らず一定かつ全くランダムである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. *1/f*^{2} モードの変動現象は,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. *1/f*$^{\infty}$ モードの変動現象は,ある特定の周波数を有する規則正しい正弦波現象などである.一方, *1/f* モードの変動現象は,それら両者の中間的な特徴を有する現象であり, ある程度未来を予測できるが,完全には予測し切れない特徴的な変動である. そもそも *1/f* ゆらぎとは,パワースペクトルが周波数の逆数に比例する変動現象のことである.この現象は,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. すなわち,*1/f*^{0}ゆらぎのように複雑で偶然性が強過ぎると唐突になり,*1/f*$^{\infty}$ゆらぎのように単純で期待性が強過ぎると退屈になる.この中間が程よい快適性を人の感性にもたらすのではないかと考えられる.また,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. たとえば,生体膜電位のゆらぎや生体内部で発生している電気信号のゆらぎにも *1/f* モードのゆらぎ現象が含まれており,これらを *1/f*ゆらぎと呼んでいる.この *1/f*ゆらぎを持つ変動現象は,最近の様々な研究から人間にとって心地良く感じられる現象であることが明らかになって来ているが,その理由は未だ解明されていない.また,心拍ゆらぎに代表されるような人体固有の変動現象には,*1/f* ゆらぎを持つものが多いことが挙げられている［武者利光：

1998,ゆらぎ現象研究会：1991-2000］. その他,*1/f* モードのスペクトルを示す現象としては,電気抵抗体から発せられるノイズなどが知られており,熱雑音と呼ばれている［橋本佳久：1991］.

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.

3.1.2. 光と色の意味

3.1.2.1. 等色関数とRGB 表色系

IEC/CIE1987 国際照明用語集（LIV）［IEC/CIE：1987］によると,光には二義ある.一つは（知覚）光で,視覚系特有な全ての知覚および視覚に普遍的で本質的な属性のことである.これは,しばしば主に視覚系に対する光刺激の作用の結果として生じる.もう一つは,可視放射で,目に入って直接に視感覚を生じさせ得る放射のことである.X 線から赤外線まで網羅する電磁波の中で,可視光の波長範囲（可視波長域）は極めて狭く, 短波長端は 360～400［nm］, 長波長端は 760～830［nm］に相当する［大田登：1994］. 一般に,白色光をプリズムに通すと分光が起こり,波長により様々な光の色に分類できる.このように,それ以上分光することが不可能な光を単色光という.また,単色光を波長順に並べたものがスペクトルである.

等色関数は,単色放射の一定放射量に対応する規格化された三刺激値を波長の関数として表したものである.波長 λ［nm］に対応する等色関数の値を$\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$,単色放射の単位量を［M(λ)］とすると,単位量の単色放射の等色式は次式で表される.

$$[M(\lambda)] \equiv \bar{r}(\lambda)[R] + \bar{g}(\lambda)[G] + \bar{b}(\lambda)[B] \qquad (1)$$

ここで,［R］,［G］,［B］は,表色系の原刺激の単位量を表す.

等色関数を用いると,連続スペクトルの分光分布を持つ複合放射の三刺激値は,分光測色計算から求めることができる.まず,連続スペクトルの任意の波長 λ［nm］における分光放射輝度分布を *Le*, λ(λ)とすると,その波長を含む微小幅 *dλ* の単色刺激 *Le*, λ(λ)の等色式は比例則（重み関数）によって以下のように表される.

$$\begin{aligned} L_{e,\lambda}(\lambda)d\lambda[M(\lambda)] \equiv\ & L_{e,\lambda}(\lambda)\bar{r}(\lambda)d\lambda[R] \\ & +L_{e,\lambda}(\lambda)\bar{g}(\lambda)d\lambda[G] \\ & +L_{e,\lambda}(\lambda)\bar{b}(\lambda)d\lambda[B] \qquad (2) \end{aligned}$$

また,複合刺激の色刺激 *C*［C］は,加法則によって（２）式の可視域にわたる定積分で与えられるので,色刺激 *C*［C］の等色関数は次式で表すことができる.

$$\begin{aligned} C[C] = & \left\{ \int_{380}^{780} L_{e,\lambda}(\lambda)\bar{r}(\lambda)d\lambda \right\}[R] \\ & +\left\{ \int_{380}^{780} L_{e,\lambda}(\lambda)\bar{g}(\lambda)d\lambda \right\}[G] \\ & +\left\{ \int_{380}^{780} L_{e,\lambda}(\lambda)\bar{b}(\lambda)d\lambda \right\}[B] \qquad (3) \end{aligned}$$

ここで,［M(λ)］は波長の関数として単色放射の単位量を,［C］は複合放射の単位量を表す.上式の右辺における原刺激の単位量［R］,［G］,［B］の係数は,この表色系に基づく三刺激値を表し,これらを記号 *R*, *G*, *B* で表すと, *R*, *G*, *B* は次式で与えられる.

$$\left.\begin{aligned} R &= \int_{380}^{780} L_{e,\lambda}(\lambda)\bar{r}(\lambda)d\lambda \\ G &= \int_{380}^{780} L_{e,\lambda}(\lambda)\bar{g}(\lambda)d\lambda \\ B &= \int_{380}^{780} L_{e,\lambda}(\lambda)\bar{b}(\lambda)d\lambda \end{aligned}\right\} \qquad (4)$$

こうして得られた三刺激値を用いれば,任意の分光分布を持つ色刺激を,3 つの値（*R*, *G*, *B*）だけで一義的に決めることができる［日本色彩学会：1998］.

3.1.2.2. XYZ 表色系

1931 年に CIE で標準表色系として採択された *XYZ* 表色系は,等色関数に基づいて三刺激値（*X*, *Y*, *Z*）を決定し,それを用いて色を表示する三色表色系のことである.

網膜中央部には,短波長光を吸収する黄斑色素が中心窩を中心に直径約 10°にわたって分布しているため,視角 4°を超える大きな視野ではその中心部と周辺部で等色データが異なる.従って *XYZ* 表色系が視角 4°を超える色刺激に適合しないため,CIE は 1964 年に従来の *XYZ* 表色系と類似の特性を持つ $X_{10}Y_{10}Z_{10}$ 表色系を補助標準表色系として採択している.

3.1.2.3. *sRGB*（Standard RGB）

sRGB とは,メーカー・機種毎に著しく異なっていた「色再現・色空間」を統一しようという計画の下,Hewlett-Packard 社と Microsoft 社が共同で開発した標準の RGB-XYZ 変換方式のことである.元々は HDTV（High-Definition TV）の CRT の色再現性をベースとした「次世代」標準であるが,現在,ディスプレイ,プリンタ,デジタルカメラ,スキャナ,ソフトウェア（OS,Application）,ファイルフォーマットなどに適用されている.1999 年 10 月には,IEC（International Electrotechnical Commission）から国際標準の色管理方式として発行された（IEC61966-2-1）［The International Electrotechnical Commission：1999］.

3.1.2.4. 色相解析

次に,コンピューターに取り込んだ動画像から,画像濃度変位量解析ソフト（(株) ライブラリー製　Gray-Val32）を用いて,ホタルの光の輝度変動をモノクロおよび *R*, *G*, *B* 三成分の時系列データに変換した.そして *R*, *G*, *B* 成分それぞれの輝度変動を後述する（６）～（８）式に従って色度座標に変換し,*XYZ* 表色系あるいは $X_{10}Y_{10}Z_{10}$ 表色系に当てはめることによってホタルの光の主波長を算出した.

一般に,前述した CIE の *XYZ* 表色系とは,適当に選んだ三つの原刺激の加法混色で任意の色を表現できる原理のことであり,色の定量的表示のための体系である［日本色彩学会：1998］.原刺激とは,表色系の加法混色において基礎となる三つの色光を指し,等色とは二つの色光が等しいと知覚すること,または等しくなるように原刺激の輝度を調節することを意味する［日本色彩学会：1998］.従って CIE の *XYZ* 表色系では,三刺激値と呼ばれる三つの数値 *X*, *Y*, *Z* を用いて色を表示することができる.三刺激値 *X*, *Y*, *Z* は,色刺激の分光分布（分光放射輝度分布）を φ(λ)とすると,等色関数 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ を用いて,

$$\left.\begin{aligned} X &= \int_{380}^{780} \varphi(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda \\ Y &= \int_{380}^{780} \varphi(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda \\ Z &= \int_{380}^{780} \varphi(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda \end{aligned}\right\} \qquad (5)$$

のように求められる.ここで, *XYZ* 表色系の等色関数 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ ［図 3-2 参照］は, RGB 表色系の等色関数 $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ ［図 3-3 参照］から線形変換によって導かれる.この変換目的は, RGB 表色系の等色関数が負の値を示す波長域が存在することで生じる不都合を回避し,より合理的で利用しやすい表色系を確立することにある.

一方, パソコン画面などの色管理に使用されている *sRGB* 値は,モニタ *RGB* と呼ばれ,CIE の *RGB* 値とは異なる.モニタ RGB において,三原色の *R*, *G*, *B* は,0～255 のデジタル値として扱われている.前述したように,モニタ *RGB* のことを画像ソフトでは *sRGB* 値と称している.したがって, *sRGB* 値のそれぞれを 255 で割って,0 から 1 の実数にし,これを *R'*, *G'*, *B'*値とする.次に,(6)式を用いて *R'*, *G'*, *B'*値をガンマ補正することによってリニア*RGB* に変換する.

$$\left.\begin{aligned} R &= R'\wedge 2.2 \\ G &= G'\wedge 2.2 \\ B &= B'\wedge 2.2 \end{aligned}\right\} \qquad (6)$$

すると,*X*, *Y*, *Z* は,次式［大阪カラーワーク協会：2003］を用いて導くことができる.

$$\left.\begin{aligned} X &= 100(0.3933R + 0.3651G + 0.1903B) \\ Y &= 100(0.2123R + 0.7010G + 0.0858B) \\ Z &= 100(0.0182R + 0.1117G + 0.9570B) \end{aligned}\right\} \qquad (7)$$

これらの値がほぼ CIE の *X*, *Y*, *Z* 値となる.このように変換することによって, (5)式を(7)式で置き換えることが可能になる.［小林光夫：2002］　次に,こうして得られた三刺激値 *X*, *Y*, *Z* を図 3-4 や図 3-5 に示したような色度図に当てはめるため,次式を利用して二次元の座標に変換する.

$$\left.\begin{aligned} x &= \frac{X}{X+Y+Z} \\ y &= \frac{Y}{X+Y+Z} \\ X+Y+Z &= 1 \end{aligned}\right\} \qquad (8)$$

ここで,式(8)で定めた *x*,*y* を色度座標といい,色度座標を平面上に表したものを色度図と呼ぶ.試料の主波長は,観測者の目に対して張る角が 1°～4°の視野に対応する場合は *XYZ* 色度図（図 3-4 参照）に,4°以上の視野に対応する場合は $X_{10}Y_{10}Z_{10}$ 色度図（図 3-5 参照）に色度座標を当てはめることによって求められる.本研究では,観察視野を広げ

た場合に適応される $X_{10}Y_{10}Z_{10}$ 色度図［日本標準調査会：1999］を採用した.

したがって,ホタルの光の主波長($F'(x, y)$)は,(8)式から算出した x と y (すなわち $F(x, y)$)を図3-5に代入し,その点と白色点を通る直線が単色光軌跡と交わる点から求められる.

3.1.3. 脳波

一般に,脳神経細胞が活動すると電位が発生し［石山陽事：1994］,頭皮上の異なる2点の電位差を計測したものが脳波である.脳波は,周波数帯によって,δ波(0.4～4[Hz]‥深い睡眠),θ波（4～8［Hz］‥眠気,ぼんやり）,α波（8～14［Hz］‥リラックス）,β波（14［Hz］以上‥覚醒,興奮）に分類されている.この中でα波の出現頻度は,安静閉眼時に多く,神経緊張がなくリラックスした状態にいるかどうかを確かめる方法として広く利用されている.したがって,ホタルの光を観察している被験者の脳波を計測すれば,*1/f*ゆらぎを有しているホタルの発光パターン［稲垣照美：2000, 阿部宣男：2003］に人がどのような感性を抱いているのかを客観的に知ることが出来るであろう.

本節では,バーチャルホタルイルミネーションシステムの有効性を検証するための脳波測定について述べる. バーチャルホタルイルミネーションシステムとは, ホタルの発光パターンをコンピューターに取り込み, その生物情報に基づいてLEDを発光させるものである.脳波の測定方法には,耳朶を基準電圧に取る耳朶基準単極導出法を用いた.図3-6に示したように,電極の装着部位は,視覚を司る後頭葉に近い1点とした.また,ボディーアースは額に取り付けた.被験者は,健康な20代の男女22人で,外部からの電波に影響を受けないシールドルーム内において,いずれもリクライニングチェアーに座った状態でそれぞれ本システムを3回鑑賞し,その時々の脳波を測定した.その際,本システムが発光を開始したら直ぐには測定せず,1分ほど時間を空けてから測定を開始するようにした.これは,測定環境に慣れさせ,できる限りリラックスした状態で脳波を安定させるためである.

本節では, LEDの光の明滅に対して人がどのような感性を抱くのかについて検証した.したがって,本システムの発光パターンには,図3-7～図3-9にそれぞれ示したように,ゲンジボタルの発光パターン,1［Hz］の正弦波,乱数の3種類を用いた.被験者には,1回の測定でこの3パターンを連続して鑑賞してもらい,その後充分な間隔を空けて合計3回測定し,それぞれ毎に脳波に及ぼす影響を比較した.発光パターンの順序は,被験者の慣れや期待感などを防ぐため,測定毎にランダムに入れ替えた.なお,脳波測定には,生体電気現象用増幅器（(株) 日本電気三栄製,バイオトップ6R12－2）を使用した.

さらに本節では, LEDの光の色相に対して人がどのような感性を抱くのかについて検証した.本システムの発光パターンは,図3-7に示したようにゲンジボタルの発光パターンを用い, LEDの色は,緑（最大輝度波長：530［nm］）,黄緑（最大輝度波長：565［nm］）,黄（最大輝度波長：585［nm］）の3色とした.これらの色を選択した理由は,アンケート結果［稲垣照美：2000, 阿部宣男：2003］から,被験者がホタルの光の色相を正確に認識する上で混乱が生じていた色であったことから対象色に選出した.被験者には,1回の測定でこの3色のLEDを連続して鑑賞してもらい,その後十分な間隔を空けて合計3回測定し,それぞれ毎に脳波に及ぼす影響を比較した.3色の鑑賞順序は,被験者の慣れや期待感などを防ぐため,測定毎にランダムに入れ替えた.脳波は,一つの発光パターンにつきサンプリングレート100［Hz］,データ数12000［点］,時間にして2［min］測定した.データを解析する際には,256点ずつに分割してFFTにかけ,積算平均することで*SN*比を6倍程度改善している.また,脳波におけるα波,θ波,β波の占める割合は,α波,θ波,β波帯域の各パワー値の比（各周波数帯域のパワー値／(α,θ,β波の総パワー値)）を求めることで算出した.

3.1.4. 官能評価

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,2000（平成12年度）年初夏に板橋区ホタル飼育施設のせせらぎ空間で実施

したゲンジボタルとヘイケボタルの鑑賞会において,様々な年齢階層から官能評価［長町光夫：1989］に基づいた意見サンプルを回収,処理・分析した.この鑑賞会は,ホタルが集団かつ自然に活動している状況下で実施されている.官能評価法とは,人間の感覚（視覚,聴覚,嗅覚,味覚,触覚）を用いて対象を評価する評価法である.ここでは,尺度の幅を 7 段階に持たせた. なお,意見サンプル総数は,様々な年齢階層の男女に対して,それぞれの鑑賞会において約 450 人ずつであった.

また,本研究では,生物情報に基づいて開発したバーチャルホタルイルミネーションシステムを利用し,ホタルの光を模した人工の LED 光による癒し効果の存在を検証した.すなわち,板橋区ホタル飼育施設のせせらぎ空間に本システムを設置し,2000 年（平成 12 年度）12 月に冬ホタル鑑賞会と称して地域住民の方々に鑑賞してもらった.バーチャルホタルイルミネーションシステムによる鑑賞会は,人目に付かないように草花や植木の中に LED を設置して,被験者の手に直接触れられない状況下において実施した.自然界のホタルは,特に羽化直後の個体や雌など,飛翔することがほとんどなく,このような設置をしても生態上に大きな違和感はないものと考えられる.その際,ホタルの光が人工的な光であることを伏せて実施した.なお,意見サンプル回収後,被験者にはホタルの光が人工光であることを伝えてある. なお,意見サンプル総数は,様々な年齢階層の男女に対して約 150 人であった.さらに, 本研究では,LED の光の色相に対して人がどのような感性を抱くのかについて検証するため,官能評価に基づいた意見サンプルを回収し分析した.また,本研究では,ホタルの光といえばどのような言葉が連想されるかについてアンケートを実施し,回収・分析した.意見サンプル総数は,様々な年齢階層の男女約 230 人である.

板橋区ホタル飼育施設は,独自の設計概念［阿部宣男：2000, 2001, 2002, 2003］に基づいた人工の「せせらぎ（全長 16［m］,幅 1.2［m］,最大深さ 0.5［m］）」が温室内に施工されており,十数世代以上に亘って継続的なホタルの飼育に成功している準自然のミニ生態系である.「せせらぎ」は,東西方向であり,一部に蛇行部を設けるとともに,

随所に落ち込み部なども設けてある.この空間は,例え器が人工的でも,中身はほぼ自然の摂理に従っていると考えられる.すなわち,ここは,水,土壌,植物,空気,温湿度,風,香り,そして様々な生物達の織りなすハーモニーに直接触れることができる空間であり,自然の力の偉大さとその美しさを「感動」と「感謝」の気持ちで受け止めることができる空間でもある.ホスピスや福祉施設などにおいて,春夏秋冬を通してバーチャルホタルイルミネーションシステムを援用した癒し空間を人工的に創造する上で絶好な全天候型のモデル環境でもある.

3.1.5. ホタルの発光現象の撮影

図 3-10 は,ホタル計測システムの概略を示したものである. この際,自然な状態で生息しているホタルを撮影した他,水苔を敷いた仕切りのあるガラス製シャーレ（直径 96［mm］,深さ 15［mm］）内にホタルを拘束して撮影を行った.これは,オス・メスの発光を区別し,雌雄間の応答を調べるためである.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［大場信義：1979, 1994, 1995］.

撮影には,ホタルの光の色相情報をより正確に得るため,NHK 製の高感度カメラ（スーパーハープ管カメラ）を利用し,（株）NHK テクニカルサービスのプロカメラマンの協力を得た. したがって,ホタルの映像は,すべてフルカラーで撮影されている. これは,ゲンジボタルおよびヘイケボタルの光の色相が実際にはどのような波長帯域に分布し,人がその色相や色相ゆらぎに対してどのような感性を抱いているのかに着目したためである. また, 撮影には,デジタルビデオカメラも利用し,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）に設定した.時間分解能は,1/30 [sec]である.

この際,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,デジタルビデオカメラでも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.なお,一連の計測では,気温,気圧及び湿度を適宜計測した.

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像は,動画像入力・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,動画像の時間分解能が 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.この際,撮影された動画像は,画像入力ソフトウェア（(株）ライブラリー製　CosmosCapture）を用い,モノクロおよび *R*, *G*, *B* 成分に分けてコンピューターに取り込んだ.そして,ホタルの発光パターンの測定は,デジタルビデオカメラの映像から濃度解析ソフト（(株）ライブラリー製,Gray-val32）を用いて行った.

3.1.6.　ホタルの発光現象の解析

コンピューターに取り込んだ動画像は,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［日野幹雄：1997］するとともに,スペクトル法を適用してフラクタル次元［高久秀樹：1986, 1995］を統計的に決定した.また,ウェーブレット解析［榊原進：1999, チャールズ K チュウイ：1993, 1997, 斉藤兆吉：1998, 中野宏毅：1999］では,スプライン関数をウェーブレット変換の基底関数として,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.

従来の研究［ゆらぎ現象研究会（監修：武者利光）：1991～2000］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 3-11 に示すように定義した.まず,パルス発生時間を $t_1, t_2, t_3, \ldots, t_n$,パルスの時間間隔を $i_1, i_2, i_3, \ldots, i_n$,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 3-12 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 3-13 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 $a_1, a_2, \ldots, a_n$,が求められ,図 3-14 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 3-15 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 $b_1, b_2, b_3, \ldots, b_n$, 間の差から,輝度差 $c_1, c_2, \ldots, c_n$,が求められ,図 3-16 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.

3. 2. バーチャルホタルイルミネーションシステム

本システムは,ホタルの発光パターンをコンピューターに取り込み,その生物情報に基づいて LED を発光させるものである.すなわち,バーチャルホタルイルミネーションシステムに供すべき生物情報は,前節のようにして得られた動画像に基づいた発光部の時系列な輝度変動である.濃度解析ソフトの解像度は 8 ビットであり,輝度値は 256 階調の相対的な値で得られる.図 3-17 は,システム全体の概略図を示したものである.コンピューターには,16 ch の DA ボード（(株) CONTEC 製,DA12-16）を 4 枚搭載し,合計 256 個の LED に対して 64 通りの発光パターンを再現することが可能である.図 3-18 は,バーチャルホタルイルミネーションシステムの電子回路の詳細である.使用した LED は,φ3 [mm] と φ5 [mm] の黄緑色であり,砂粒子により表面を拡散面に加工してある.これは,ホタルの発光部を出来る限り忠実に再現するためであると同時に,発光の色相情報に合致させるためである.生態的な輝度の考察から,φ3 の LED はヘイケボタル,φ5 の LED はゲンジボタルに見立てている.しかしながら,ホタルの時系列な輝度変動データは 34 秒ほどしかないため,長時間発光させ続けるにはデータを繰り返し使用せざるを得ない.ここでは,繰り返しによる違和感や慣れを防ぐため,図 3-19 に示すように,一定の発光パターンの間に休止区間を入れ,それを *1/f* でゆらがしてある.ここで,A 区間は取り込んだホタルの発光パターン,B1～B5 区間は発光休止区間である.図 3-19 では,ゲンジボタル（雄）の生物情報の一例を示しているが,その他にもゲンジボタル（雌）やヘイケボタル（雌雄）についてもデータベースを構築してある.

図 3-20 は,天然のホタルの生物情報とともにバーチャルホタルイルミネーションシステムの出力としての時系列な輝度変動を拡大して示したものである.サンプリングレートの関係から,1 分間に 0.6 [msec] ほどの誤差が生じているものの,その輝度変動はほぼ実際のホタルの発光パターンと同様なものと考えることができる.図 3-21 は,バーチャルホタルイルミネーションシステムからの出力に基づいて FFT 解析したパワースペクトルを示したものである.この図から,本システムが誘起する発光パターンにも図 3-22 に示した天然ホタルの発光パターンと同様,*1/f* ゆらぎモードが存在していることがわかる.したがって,開発したバーチャルホタルイルミネーションシステムは,天然のホタルの光を可能な限り忠実に再現することが可能なシステムでもある.なお,いずれの図も,ゲンジボタル（雄）に対しての比較・考察である.

3. 3. 生態水槽

3.3.1. ホタルの生活史と生態槽

ホタルの生活史は, 図 3-23 に示すように, 大きく 4 つに区分される : 卵期 (6-7 月), 幼虫期 (7-4 月), 蛹期 (4-5 月), 羽化・繁殖期 (6 月). それぞれのステージにおいて, ホタルの生息場所は異なる. 卵は交尾後に水辺の植物表面に産み付けられ, 約 30 日で幼虫が孵化する. 幼虫は河川に移り, 巻き貝の一種であるカワニナを食べて成長し, 脱皮を繰り返す. 終齢幼虫になると幼虫は上陸し, 土中にもぐって蛹になる. 上陸後, 約 40 日で羽化すると, 交尾をし, メスは産卵する. したがって, ホタルの生息空間を考慮する際, 上記の 4 つのような物理的・生物的環境を考慮しなくてはならないだろう.

図 3-24 は, 図 3-23 に基づいて設計したホタル生態槽であり, ホタルの生育に適した生態環境をある一つの閉鎖空間に模擬したものである. 本生態槽の寸法は, 1800 [mm] × 600 [mm] × 600 [mm] である. この中では, 水中部, 上陸羽化部及び産卵孵化部の三部が一体となってホタルのミニ生態系が形成されており, バクテリア類を始めとしてカワニナ, ホタルその他の魚なども自然繁殖を繰り返している. 本生態槽

では，常に新鮮な水が流れ込んで来る自然の小川とは異なり，様々な環境の整備が必要である．例えば，飼育水製造，飼育水交換や生物濾過が必要となる．

3.3.2. ホタルと水

本節では，まずホタルの生活史の大部分に影響を及ぼす水環境について実験的に検討する．とりわけホタルの餌となるカワニナに毎日最大限の稚貝を産み続けさせるためには，弱アルカリ性を保ったまま溶存酸素量が常に飽和状態にあり，アンモニアや亜硝酸の濃度，COD 値などが可能な限りゼロに近い値を実現しなければならない．また糞尿などから発生するアンモニアや亜硝酸性窒素は，生物の生息を脅かす存在であり，飼育水はこれら有害物が認められない状態でなければならない．したがって，本節では，ホタルの一生に及ぼす水環境の維持・管理について実験的な検討を加えた．

まず，飼育水の製造であるが，実験室の給水源が水道水であるため，それを水槽内に入れる際には骨炭を通す事を基本としている．骨炭は，塩素を取り除くだけでなく，濾過細菌の温床にもなって亜硝酸性窒素などを効果的に除去する物質であり，また，水質を弱アルカリ性に維持する上でも効果がある．したがって，骨炭約 1［kg］程を布袋に入れて生態槽の濾過器周辺に設置した．

次に，飼育水の濾過について述べる．濾過器の役割は，ただ単に飼育水を綺麗にするだけではなく，濾過バクテリアを繁殖させ，常に一定の水質に保つ役割を果たしている．本研究では，上部濾過方式，エアーポンプ運転式スポンジフィルター濾過方式，底面フィルター濾過方式，水中濾過方式をそれぞれ検討した．上部濾過方式は，濾過能力に優れてはいるものの，水槽内に飼育水を 90［%］以上入れないと濾過ポンプが作動しないし，ストレーナーが多数の孵化幼虫やカワニナの稚貝を吸入してしまう問題が発生した．また，水槽内に幼虫の上陸用スペースが十分に確保出来ない欠点もあった．エアーポンプ運転式スポンジフィルター濾過方式は，濾過面積が大きいため濾過バクテリアの繁殖には適しているが，物理濾過が難しい．例えば，濾過バクテリアを死滅させることなく毎回スポンジフィルターを清掃するためには，スポンジフィルターが入っている飼育水そのものを使用する必要がある．また，清掃中にスポンジフィルターに孵化幼虫が多数付着し，スポンジ内部まで幼虫が入り込むケースが多かった．なお，この濾過装置では，上陸地を確保すること自体は可能であったが，濾過スポンジが水位を下げると露出してしまい，露出した部分に悪性のカビなどが発生してしまう．底面フィルター濾過方式は，上記の諸欠点を克服して水創りには最適な結果を得たが，濾材交換の際に土壌を含めた全てを取り出さなければならず，事実上濾材交換が出来ない．その点，水中濾過方式では，水創りそのものは底面フィルター濾過方式に劣るものの，使い易さの面で優れ，エアーポンプからチューブで空気を濾過器に送るだけの単純なもので，大変簡単で且つ効率が良い．この濾過装置は，二重構造で，外側が重石の役割と濾過バクテリアの繁殖及び物理濾過を行い，内側が主に物理濾過を担うガラス繊維のウールマットである．したがって，水部分と土壌部分が一体となり，水中で増繁殖した好気性バクテリアが水槽底面に設置した濾過器を通って土壌部に移ることが可能であるし，逆に土壌部分で増繁殖している好気性バクテリア（土壌細菌）も水中濾過器を通って水中に移動することが可能である．水中濾過方式では，濾材交換も容易で，装置を単に置き換えるだけで済み，周囲の生態環境に及ぼす影響を限りなく少なくできる．以上の結果，水中濾過器による濾過方式が最も有効であることが判明した．なお，飼育水や土壌の交換にも共通のことではあるが，濾材交換の際は，出来上がった生態系が壊れないよう細心の注意が必要である．

次に，一連の実験から明らかになった飼育水の交換と水質の管理について述べる．上陸期から産卵期が終わるまでの期間は，数日に一度の割合で全ての生態槽内の飼育水を約 1/3～2/3 の割合で交換する．特に，初春と秋は一週間に 1 回，夏場は 3 日（場合によって毎日）に一度，冬場は 1 週間～10 日に一度の割合で飼育水を交換する．この時に注意しなければならないのは，水温，pH 値及びミネラル（カルシウム）濃度の維持である．交換時の水温差は±1［℃］以内，pH 値は±0.2 以内にしなければ pH ショックを特にカワニナが起こし易かったからである．水質検査は，毎朝 8 時に簡易検査

及び外気温・飼育室温度など表 3-1 に示すような 15 項目に亘って実施している．NO^{2-}・NO^{3-}・NH^{4+}は，テトラテスト(Tetra Test)を用いて測定し，＜0.1mg/l の表示が最低測定数値であった（現在は NO^{2-}に関しては＜0.3mg/l に変わった）．COD は共立パックテスト(KYORITSU Pack Test)を用いており，同様に最低測定値は＜0.1mg/l であった．より詳細な水質は，表 3-2 に示すような項目についてさらに月に一度の検査を実施している．ここでは，単位を mg/l に統一し，小数第 2 位を四捨五入して示した．さらに，表 3-3 は，生態槽内に繁殖しているバクテリア群を示したものである．表 3-1 と表 3-2 の計測結果から，本生態槽内では，水の交換に加え，*Nitrosomona* や *Nitrobacter* のような硝酸菌・亜硝酸菌を代表とする好気性バクテリアが、前述したアンモニアや窒素化合物などの有害物の除去に役立っていることが推測される［近藤次郎：1984］.

3.3.3. ホタルと土壌

土壌環境は，水とともにホタルの生息にとって非常に重要な要素である．水と土壌は，前述したように常時相互に互いの栄養分やバクテリアなどを交換し合っているからである．地上部分に生息する動植物あるいはそれらの死骸から発生する有機物は，分解され，栄養素を水中へ供給すると同時に，そこで発生した二酸化炭素を含んだ水が土壌のミネラル分を溶解して水中に無機や有機の栄養源をさらに補給する．また，この過程で発生した炭酸水素イオンは，水に緩衝性を持たせる働きがある．したがって，飼育の際には，このような一連の生物連鎖をも考慮して土壌構成を行う必要がある．ホタルは，たとえ蛹化のために上陸・潜入したとしても，土壌に何らかの問題があれば，これまで水中で順調に育った幼虫の上陸･潜土率が低下する．したがって，本節では，ホタルの一生に及ぼす土壌環境の影響について実験的な検討を加えることにした．

本研究では，幼虫上陸の様子と成虫発生を確認した際，水中で育った幼虫がどのようにして上陸し，土に潜り，繭を作り，羽化するのかに着目・観察した．ここでは，

上陸後のホタル羽化率を人工飼育下で低下させないためにはカビの発生を極力抑える土壌創りが必要であると考え，ホタルが上陸する諸条件を検討し，実験的に探ることにした．まず，水槽を 50 本用意し，ホタルの生息場所における土壌調査を参考にして各種の土壌を調合し，それらを幾層にも組み合わせて，水槽内部に様々な土壌環境を試行的に作り上げた．実験では，室内湿度を日中 50［%］前後，夕方 75［%］前後，夜間 95［%］前後に設定し，室内温度を日中 25［℃］前後，夕方 23［℃］前後，日没 2 時間後 20 ℃前後に設定した．一回目の試験では，28 時間後に 15 本の水槽上層部に白カビが発生し，48 時間後さらに 10 本の水槽上層部がカビに浸食され，78 時間後には他の 20 本の水槽にもカビが発生した．そして，10 日後には，残りの水槽全てにカビが発生した．この原因を実験的に検討した結果，土壌環境に微生物を始めとする生態のバランスが成立していないことが原因と推察された．すなわち，ただ単に様々な土壌を組み合わせただけでは，生態系が成り立たなかったのである．次に，この結果と推察を踏まえて，前回と同様な土壌の配分と構成を施した各水槽内に，ミミズ，ダンゴムシ及びワラジムシを各種 2 匹ずつ放し，さらに安定した菌相を有する用土を小さじ一杯ずつ入れた．前回は 28 時間後に白カビが発生したのに対して，今回最初にカビが発生したのは 15 日後であった．また，30 日後にもカビが発生しなかったのは，50 本中の 2 本だけであった．そこで，カビが発生しなかった 2 本の水槽と同様な土壌環境にゲンジボタルの終齢幼虫を 50 匹放した結果，その内 44 匹が上陸し，38 匹が成虫となって羽化することに成功した．実に 76［%］もの確率で羽化した．この結果を踏まえて，現在の土壌構成は，図 3-24 と表 3-4 に示すような様々な土壌が幾層（10 層）にも重なった複雑な構成である．

土壌構成の各層は，以下のそれぞれの役割を考慮したものである．表層から第 1 層はホタル幼虫の蛹化域であり，保水や排水の機能を果たすと同時に，好気性バクテリアを安定的に保持する場所である．第 2 層は，上陸地の動植物非用の生育ベースである．第 3 層は，上陸地における pH 値の調整を担っている．第 5 層部分は上陸地の植

物や水中植物への栄養源であり，土壌細菌の着床場でもある．第 6，7 層は嫌気性バクテリアを吸着し，好気性バクテリアを増繁殖させる働きがある．第 8 層部分は水及び土壌の pH 値の安定，カルシウム補給及びバクテリア群の生息ベースで，上陸地から水中部分への酸素供給の橋渡し的な機能を果たしている．第 9 層部分は，生態槽全体の骨格である．すなわち，水底の那智石や硅砂などがコケや水草の育成を図り，水中濾過器とともに水質の改善に役立てている．第 10 層部分は，バクテリア群の着床を目的とする．なお，上層部の土壌は，原則的に年 2 回交換する．これは，上層部でホタルの幼虫が羽化出来ずに死亡した個体や成虫の死骸などがカビの発生要因となるためである．

3.3.4. ホタルと温熱環境

ホタルの飼育過程においてもう一つの重要な要素は，温熱環境の維持・管理である．ホタルは，温度変化に敏感で，外気温が卵の孵化や幼虫の脱皮・羽化に与える影響は大きい．したがって，本節では，ホタルの一生に及ぼす温熱環境の影響について実験的な検討を加えることにした．なお，実験は，豊富なカワニナの稚貝と土壌・水質共に一定の状態で外気・水・土壌温度をパラメータとして行った．なお，水温の調整はクーラー(タカラ海水クーラーTK150 型)を生態槽の水深でも使用可能に改造したものを用い，上陸温度は個別の水槽ではなく飼育室全体を大型エアコン（日立 PR-10RH2）で調節した．

一連の観察から，ゲンジボタルの卵は，6 月下旬から 7 月中旬にかけた昼夜間平均外気温 23［℃］において約 28 日間で孵化することが明らかになった．これが 22［℃］になると約 26 日間で孵化し，僅か 1［℃］の外気温の低下で 2 日も孵化が早まった．さらに平均外気温を 3［℃］下げて 19［℃］にすると約 35 日間で孵化し，逆に 7 日も孵化が遅くなると言う結果を得た．

次に，水中の温熱環境の変化が幼虫期ゲンジホタルに及ぼす影響についても考察した．孵化直後は，気候的にも夏を迎えている関係で水温は平均 18～19［℃］に保たれている．この水温であれば，約 30 日後には 2 令幼虫に脱皮する．本研究における観察においても，平均水温が 20［℃］であれば約 28 日間で 2 令幼虫になり，平均水温が 21［℃］において約 26 日間，22［℃］において約 25 日間，23［℃］において約 23 日間で 2 令幼虫になることが明らかになった．平均水温が 24［℃］を越えると活動は更に活発になるが，脱皮が上手く行かず死亡する個体が増加した．逆に，水温が低下するとともに脱皮に要する期間は延びることが明らかになった．例えば，平均水温が 16［℃］であれば 2 令幼虫になるまでに約 50 日間，15［℃］では約 60 日間，14［℃］では約 70 日間を要する．さらに，平均水温が 14［℃］以下では，死亡個体は少ないものの殆どが 2 令幼虫になれないまま 1 年を過ごす結果になる．したがって，水温は，四季に合わせて調整する．すなわち，上陸期は水温を約 17～18［℃］，羽化期は 18～19［℃］にし，産卵から孵化までは約 19［℃］前後を保つ．秋口からは徐々に水温を下げ，冬場の最低水温は 12［℃］前後に設定する．なお，水温を 1［℃］でも上下させる場合は，1 日に 0.5［℃］以内に止める必要があることが判明した．すなわち，2［℃］上げるためには，4 日間を要することになる．

さらに，ゲンジボタルの蛹の成長に及ぼす土壌の温熱環境の影響についても観察した．外気温や水温の変化以外にも，土壌温度により羽化に要する日数も大幅に変動することが考えられる．一般に，蛹は，平均土壌温度が 21［℃］において約 37 日間で羽化する．これを 1［℃］上げると約 35 日間，2［℃］上げると約 33 日間で羽化することが明らかになった．逆に，平均土壌温度を下げ 20［℃］にすると羽化までに約 39 日間，19［℃］で約 41 日間，18［℃］で約 45 日間も要した．平均土壌温度が 15［℃］以下では，羽化できずに死亡する個体が増加し，14［℃］に近づくと殆どが死滅した．

以上のことから，1［℃］の環境温度の変化は，ホタルの生育に大きく影響すると結論付けられる．同様に，自然界におけるホタルも，その一連の変態過程を季節毎の外

気温，水温及び土壌温度の変化に大きな影響を受けていると考えられる．したがって，ホタルの生態環境を人工的に幾世代にも亘って継続し続けるためには，季節に合わせた生態槽の温熱環境の維持・管理が大切である．

3.3.5. その他の環境

その他，本研究では，気圧の変化が幼虫の上陸に及ぼす影響を簡単に調査した．例えば，平成 6 年 5 月 3 日午後 9 時，天候・晴，外湿度 51［%］，飼育室湿度 94［%］の環境下において，60［cm］生態槽を 2 本用意し，それぞれにゲンジボタルの終令幼虫を 50 匹入れた．1 つの生態槽には，掃除機のホースの先端を水槽内に入れ，ガラス蓋をして粘着テープで密閉し空気が漏れないようにした．もう片方は，開放状態にして外気と同じにした．掃除機で約 1 分間水槽内の空気を吸引し，約 3 分間後に同じ操作を合計 5 回にわたって繰り返した．密閉水槽では午後 9 時 30 分頃から 27 匹上陸を開始したが，開放水槽では 1 匹だけ上陸した．この簡単な実験だけで判断することは困難であるが，ホタルは気圧に敏感に反応するようである．すなわち，ホタルの終令幼虫は，水中から降雨有無の判断を気圧の変化から読み取っているものと推察できる．これは，ホタルの上陸に降雨条件が必要不可欠だからであろう．

湿度もホタルの生息にとって重要な要素である．適した湿度は，ホタルの生活史のうち上陸期・羽化期・産卵期で全て異なる．湿度に関する実験的な検討から，上陸期は午後 8 時の時点で約 95［%］，羽化期は約 93［%］，産卵期は約 91～93［%］とした．湿度の調整は飼育室に水を満たした 90［ℓ］のポリバケツ 2 ヶ，40［cm］× 30［cm］× 25［cm］産卵用プラスチックケースを約 40 ヶ所に適宜設置し，必要に応じて時間ごとに細霧器にて上陸場所に飼育水を散布した．なお，幼虫期に湿度の調節は行わなかった．

3.3.6. ホタルと共生生物

前述したように，ただ単に様々な土壌を組み合わせただけでは，生態系は成り立たず，ホタルとカワニナ以外の様々な生物がバクテリア群も含めて一つの生態系の中に共存してこそ生態のバランスが保たれる．したがって，ホタルの飼育に際しては，どの様な生物がどれだけ，あるいはどのような生物の組み合わせが最適であるかをも見極めなければならない．すなわち，ホタルが生息する流域の上流部にはいかなる生物が生息しているのか，また，ホタルの生息域にはいかなる生物が共生・共存していて，何が天敵なのかを調べる必要がある．

そこで，本研究では，ゲンジボタルやヘイケボタルが自然発生している数カ所の場所（秋田県本荘市，福島県双葉郡大熊町，静岡県河津町，栃木県那須塩原，徳島県三好郡池田町）に出向き，具体的な調査を実施した．その結果，ホタルの生息場所には表 3-5 に示すような動植物が観察された．これらの生物は，ホタルと共存できるものと考えられる．したがって，表 3-5 中の＊の動植物を生態槽に導入した．一方，河川の上流部にはイワナ類，下流にはコイなど多様な生物相からなる．これら全てを一つの生態槽に共存させ，より自然の状態に近づけることは理論上可能であろう．しかしながら，本生態槽には，物理的な容量の関係からその全てを共存させることは出来ないため、ここでは，魚類をメダカで代用している．また，カワニナなどの巻貝を食べるコイ科の魚類やヘビトンボの幼虫などは，物理的な制約上やホタルに与える被害の大きさから，生態槽内にホタルと共存させることはできない．なお，表 3-5 に記載した生物群は，自然の生態系のほんの一部であり，その他プラナリアやプランクトン，ヒル類など実際には多種多様な生物群が生息している．

最後にカワニナの病気，寄生虫及び天敵であるヒルの予防対策について述べる．自然界で実際にホタルが生息している箇所をデジタル塩分濃度計（シナール塩分濃度計 NS-3P）で計測した結果，全ての河川及び小川で塩分を検出しない箇所は一カ所も存在しなかった．すなわち，自然界の平均塩分濃度は，0.01～0.05［%］の範囲であった．その結果，カワニナの健康維持には，全ての飼育水を 0.03～0.1［%］の塩分濃度に常時保つ必要があることが判明した．特別な理由で薬浴的効果を行う場合は，一定時間

塩分濃度を 1.5［%］を限度として維持することにより，好結果が得られることも判明した．48 時間以内であればカワニナ自身にほとんど影響がなく，ヒルは殆ど全て死滅する．なお，薬浴は，カワニナ育成水槽においての応急処置であり，ホタル生態槽に対しての処方ではない．現在の所，本ホタル生態槽では，ヒルの大量発生は一度も起こっていない．

3. 4. せせらぎ空間

3.4.1. ホタルに関わるマクロ生態系の現状と環境

本研究で提唱する自然環境の復元が時代的要請となった背景には,全国のホタルの里創り運動が大きく寄与している.ホタルの保全・復活の運動やその実績が存在しなければ,かくも早く水辺の生態系や人工生態系が注目を浴びることはなかったのかも知れない.今日では,治水や利水目的,さらには親水や景観に配慮するだけでは社会的に満足を得られない状況を抑えつつある.

現在でも治水,土地改良及び都市環境整備事業などによる水圏環境の人工的な改変事業は,依然として根強く,地方においても水辺の環境整備事例が着実に増え続けている.当初,水圏環境整備に関する概念は,効率的な治水・利水の他に,園地的な親水整備や高水敷のグランド化など水辺空間への住民解放や利用促進を中心に構築されていた.しかし,これらの中には,河川を単に埋設・整備したケース,堤外施設を堤内に単に移入したケース,整備後に親水性を逆に損なったケースなど様々な問題点が少なからず残っていた.また,これらの親水整備では,規格化された環境護岸など水辺の個性を無視した画一的な土木整備だけが目立っていた.すなわち,地域に固有な生態学的個性を軽視したまま河川や土地の整備事業を続けた結果,様々な形態の水圏環境が急速に失われ,地域の環境を健全かつ安定に維持していた生態系のバランスを崩壊させたのである.

しかしながら,近年では,自然の生態系をも意識した水圏の再生が,全国の自治体やコミュニティーにおいて共通認識になりつつある.我が国でも,全国の一級河川に対して河川環境管理基本計画の策定を開始し,自然の生態系を考慮した「ふる里川モデル」事業や河川環境整備事業などを展開している.これまでは,「治水・利水の促進か環境・生態の保全」と言った二者択一的な議論が環境行政の中で展開されて来たが,これらの新しい国策事業は水圏環境整備にとって飛躍的な進歩である.この発展型は,各地に整備されつつある「ビオトープ」を核とした水辺の環境整備であろう.ビオトープとは,「特定の生物群集が生存できるような特定の環境条件を備えたある均質な限られた地域」と定義されている［自然環境復元研究会：1994］.こうした概念を取り入れて水辺の価値を再評価することが今後の水圏開発には必要である.また,多様なビオトープは生態系だけではなく,景観としても街づくりの軸として有機的な繋がりを保持し続けられるであろう.本研究では,提案するホタル生態系を大自然の環境体系の一部として有機的に組み込み,モデリングを行う.なお,ホタルに関わるミクロ生態系の詳細や生息に最適な環境指針については,前節を参照されたい.

3.4.2. ホタル生態系のモデリング

一般に,野生の動植物は,種によって生息生育に必要なビオトープの形態や規模が異なり,生物群の規模が大きくなるほど単独のビオトープの中だけで生態系を完結することができない.なお,ビオトープを基本単位とした地域全体の生態学的環境保全あるいは生態系のモデリングでは,以下のような項目に十分な注意を払わなければならない.①生物多様性の観点からは,学術的に貴重であるとか減少が著しい希少な動植物だけではなく,普遍的で身近に生息している野生生物をも地域の生態系に沿って保護の対象とすること.②広域ネットワークの視点からは,多種多様な動植物の生態を踏まえながら,都市中心部・郊外・森林・草原・湿地・湖沼・河川などへ様々な大きさや形態のビオトープを多種多様な手法でネットワークすること.③既存の生態空間保全の観点からは,進行中の開発事業との連動や地域の種供給ポテンシャルを考慮しつつ,多種

多様な野生生物の再生が可能な自然環境の復元・創造に取り組むこと.これらを念頭に置いた上で,複数の異なる形態のビオトープのネットワーク化が必要不可欠である.これは近親交配を避け,個体群の存続を図る上でも必要である.すなわち,ビオトープのシステムは,互いに繁殖交流できる一定範囲内に共存している必要がある.すなわち,生態系のモデリングとは,ミクロからマクロな生態系まで有機的に連鎖したネットワーキングのことである.

この状況は,ホタルの生態系においても全く同様である.図 3-23 に示したようなホタルの生命サイクルにおいて,採餌・休息・繁殖など,ホタルの必要とする環境は発育段階ごとに異なり,それら環境の成立には以下に述べる様々な物理的・生物的要因が関わっている.その他,前節で述べたようなホタルの生息に関わるミクロ生態系や生息に最適な環境指針についても,モデリングの際には十分に考慮しなければならない.

以上のことを考慮して,図 3-25 では,本研究で新たに創成する人工空間におけるホタルの疑似生態系を実際の生態系に即して簡易的なモデリングを行った.図には,自然界での生態系とせせらぎでの生態系を併記した.例えば,森林による水の濾過は,人工空間では骨炭や濾過装置が代用している.また,自然の河川や小川は,人工空間内のせせらぎが代用する.人工のせせらぎでは,ホタルを中軸に,カワニナ,メダカ,ヨシノボリ,ヤマトヌマエビなどの魚貝類,多くの水性昆虫,これらの生物の排泄物を分解する好気性バクテリア群及び栄養素や水質浄化作用のある水草類による一連の生物生態連鎖が自然の生態環境を凝縮したように維持されていなければならない.

また,人工のせせらぎでは,バクテリア類や植物群も含めた多種多様な共生生物群に対して様々な生息環境を提供するためにも,落ち込みや巻き込みに伴う瀬あるいは曲線部など可能な限り変化に富んだ多様な形状が必要となる.例えば,捕食関係にあるホタル幼虫とカワニナの生息域は,巨視的には重なっているが,微視的には異なっている.また,同種であっても発育段階で生息場所は異なる.図 3-23 に示したように,ホタルは複数の生息環境にまたがっている.また親カワニナが数多く生息する場所と,稚貝が生息

する場所も異なる.ホタルの孵化幼虫が水中に落ちた先には,稚貝が生息していて初めてホタル幼虫の成長が可能になり,ひいては世代交代も可能になる.そして,それらのバランスが保たれた時,ホタルの個体群が維持される.

幾世代にも亘る継続的な飼育を可能にするためには,せせらぎの水質,温熱環境,土壌環境及び共生生物群などをモデリングすることも忘れてはならない重要な要素である.これらは,季節の変化・自然の生態系に合わせて,適宜制御する必要がある.さらに,人工空間の内部では,ビオトープネットワークの機能をせせらぎとその周囲の陸地が代用し,河川・湿地・草原・森林へと連鎖する環境を小規模ながら模擬できていなければならない.

以上のような様々な工夫により,本研究で新たに創成する人工のせせらぎ空間では,自然生態系をモデリングする上での必要条件,生物多様性・ビオトープの広域ネットワーク・生態環境保全,に対する対策がほぼ施されていると考えられる.人工のせせらぎ空間における飼育では,従来の生態槽による飼育とは若干異なり,ホタルの生息支援というべきものである.ホタルを本来の自然生態系に接続するためには,例え器は人工的であったとしても内部は自然の生態環境に近づいている必要がある. 板橋区ホタル飼育施設は,独自の設計概念［阿部宣男：2000, 2001, 2002, 2003］に基づいた人工の「せせらぎ（全長 16［m］,幅 1.2［m］,最大深さ 0.5［m］)」が温室内に施工されており,十数世代以上に亘って継続的なホタルの飼育に成功している準自然のミニ生態系である.「せせらぎ」は,東西方向であり,一部に蛇行部を設けるとともに,随所に落ち込み部なども設けてある.この空間は,例え器が人工的でも,中身はほぼ自然の摂理に従っていると考えられる.すなわち,ここは,水,土壌,植物,空気,温湿度,風,香り,そして様々な生物達の織りなすハーモニーに直接触れることができる空間であり,自然の力の偉大さとその美しさを「感動」と「感謝」の気持ちで受け止めることができる空間でもある.ホスピスや福祉施設などにおいて,春夏秋冬を通してバーチャルホタルイルミネーションシステムを援用した癒し空間を人工的に創造する上で絶好な全天候型のモデル環

境でもある.

3.4.3. せせらぎの設計指針

ここでは,ホタルが人工的な環境下で生息し続ける上での重要な設計指針,最適な水環境,土壌環境,温熱環境及び動植物群との共生関係,について前節で明らかにした結果に基づいて述べる.最適な水環境とは,溶存酸素量が常に飽和状態のまま一定の水質（弱アルカリ性）を保持し,ホタル以外にも様々な動植物群が安定して生息でき,有機物を分解する好気性バクテリアが無数に住み続けられる水である.糞尿から発生するアンモニアや亜硝酸性窒素は,生物の生息を脅かす存在であり,それらを僅かに含有しているだけで,カワニナが稚貝を産まなかったり,稚貝が死滅することもある.飼育水は,これら有害物が限りなくゼロに等しい状態に維持されていなければならない.したがって,本研究では,水質の維持・管理に木炭や骨炭などを利用し,水底に那智石や硅砂などを用いてコケや水草の育成を図りながら環境土壌とともに水質の改善に役立てている.また,最適な土壌環境とは,栄養素に富んで植物がよく育ち,ミミズやダンゴムシ,ワラジムシなどの土壌生物が生息でき,微生物による分解活動も盛んで,清潔に浄化されたカビなどが発生しない弱アルカリ性を保った土壌である.さらに,その土壌は,適度な湿り気を保ちながら水捌けも良くなければならない.これらは,ホタルが上陸,蛹化及び羽化する上での必要条件であるばかりではなく,ホタルの活動のし易さをも考慮した結果である.一方,土壌は,水質の浄化・再生への大きな役割も同時に担っており,様々な汚れを吸収・浄化するとともに,飼育水の硬度やpHを維持するための様々なミネラル補給の役割も果たさなくてはならない.さらに,最適な温熱環境とは,出来る限りホタルの生活史に合致しているとともに,季節的変化に反しない環境である.これは,何千年何万年の歳月を通じて現在の生息環境に適応して来たためである.最後に,最適な動植物群との共生関係とは,できる限りホタル生息地域の共生動植物群落と合致させ,ホタルの生息環境に見合わない外来種の動植物群と共生させないことである.ホタルに最適

な水や土壌環境を実現する上でも,バクテリア類から魚類までに至る広範囲な生態系が達成されていることが重要である.

以上の必要十分条件を考慮しながら本研究では,板橋区ホタル飼育施設内に新たな「せせらぎ空間」を創成した.図 3-26-1 は,せせらぎ空間全体の概略図を示したもので,全天候型のせせらぎ生態空間である.以下に施設の詳細を述べる.

3.4.4. せせらぎの流速制御

ここでは,まず,せせらぎの流速制御について述べる.せせらぎは,人工的な流れではあるが,実際にホタルが生息する地域に合わせて,一年を通じてせせらぎの流速を流出口（図 3-26-2 及び 3 参照）で約 40～50 [cm/s],直線部で約 10～20 [cm/s],曲線部で約 15～25 [cm/s]と設定してある.流速の制御は,図 3-26-4 に示した循環ピット内に設置した 2 台のポンプ（荏原製作所製ステンレス水中ポンプ PONTOS717 型,二相 100 [V], 吸込口径 50 [mm],吐出口径 50 [mm],吐出量 300 [ℓ/min],全揚程 6.0 [m]）を使用して行い,印加電圧を調整しながら両方又は片方ずつ切り替えて運転している.両方を同時に稼働させるのは,雪解けを模擬する春先だけで 30 [cm/s]に達する流速を実現できる.雪解け時期の自然界では,河川流速が 30 [cm/s]よりも早い場合もあり,ホタルの幼虫などがしばしば流されてしまうケースがある.一方,通常,せせらぎでは,4 月中旬から 11 月中旬までは 1 台のポンプを稼働させて平均流速を 15 [cm/s] に維持し,11 月中旬から翌年の 3 月中旬までは 10 [cm/s],3 月中旬から 4 月中旬までは 2 台同時に稼働して 22～25 [cm/s] 前後に設定している.一方,自然界での河川では,台風や大雨などによる大量の雨水が河川に入り込み,川底までも綺麗に浄化してくれる.せせらぎでも,ここまでは模擬出来ないまでも 9 月,10 月の台風シーズンには,出来る限り自然条件に合わせて数回程度ポンプ 2 機を同時稼働させながら水底の汚れを除去している.この際,自然界同様,無数のホタル幼虫やカワニナが流されるため,ここでは,循環ピット（図 3-26-4 参照）に入る手前にステンレス製の網（3 [mm]ピッチ）を二重に重ねた受け皿を設置し,毎日掛かった

ホタル幼虫やカワニナなどを念入りにせせらぎへと戻す作業を繰り返している.

3.4.5. せせらぎの水深・土壌・底質制御

次に,せせらぎの水深・土壌・底質の制御について述べる.せせらぎでは,水深が平均約 20～40 [cm]であり,瀬（図 3-26-5 参照）,落ち込みや巻き込みに伴う深み（図 3-27-6 参照）など変化に富んだ水深を提供できるよう設計してある.これらの値は,あくまでも一つの目安であるが,適宜調整や制御が可能になっている.図 3-26-7 は,せせらぎ任意地点の断面形状を示したもので,水底は,那智：硅砂石を 1:1 の割合で混合した土壌を敷き詰めてある.那智石は,濡れ縁面積を増大させる効果があるとともに,ホタルの幼虫やカワニナの稚貝に格好の隠れ場を提供する.さらに,表面にはカワニナの餌となる苔等が多く付着するため,格好の摂食・繁殖場ともなる.硅砂は,水草の植え付けや自生を助け,かつ水質の安定にも有効な寄与を果たしている.せせらぎの土台にはモルタルを用い,表面に那智石を埋め込んだ.周囲の客土は約 30 cm で,以下の土壌を混入して造成した（黒土・赤玉土・富士砂＝5：3：2）.

3.4.6. せせらぎの温熱環境制御

次に,せせらぎの温熱環境制御について述べる.室内温度は,せせらぎ空間がガラス張りの温室で構成されているため,特に夏場はその制御が困難となる.そこで,室内両端に冷房機 2 台（日立製作所製 RP-5RH2+RCR-5H2,法定冷凍能力 2.00/2.40 [t] 冷房能力 11200/12500 [Kcal/h],日立製作所製 PR-8RH2+RCR-8H2,法定冷凍能力 3.23/3.89 [t],冷房能力 16000/18000 [Kcal/h]）を設置した.これら冷房機には,機械室の中で温度調節が出来るよう集中コントローラ（日立製作所製 PSC-3S）を付加してある.しかしながら,夏期には,これら冷房機を最大限稼働させたとしても,ホタル上陸地面から高さ 2 [m]の位置において平均 30 [℃],上陸地面で平均 28 [℃]になってしまう.ここでは,日照調節が可能な寒冷沙を天窓に設置し,室内温度を調整するとともに,日照周期も寒冷沙を降ろすことで,人工的に調整することを可能にした.これにより,夏場に外気温が 33 [℃]でも室内温度を平均 26 [℃]に保持することが可能であった.

一方,ホタルは水生昆虫である以上,水中の温熱環境変化にも大きく影響を受ける.［阿部宣男：2000, 2001］でも明らかにしたように,僅かな水温の変化も,上陸・羽化・孵化・脱皮に要する日数を大きく変化させるに十分である.したがって,せせらぎでは,季節や時刻毎に水温が所定の温度を維持するよう,濾過槽の直前に 2 台の冷温水機（タカラ工業製 TKC2200C,使用限度水量 7500 [ℓ/h],冷凍機出力 2200 [W],ファンモーター出力 48 [W]×2,電源三相 200 [V],寸法 791 [mm] × 630 [mm] × 760 [mm]）を設置して制御した.

3.4.7. せせらぎの降雨制御

ホタルは,雨と気圧に非常に敏感であることが長年の飼育経験と生態水槽における定量的なデータから明らかになっている.上陸,羽化,産卵及び孵化に至る行動全ては,弱い降雨時あるいは降雨直後に生起している.当然,せせらぎ空間内でもより自然に近い状態で降雨したり,霧が発生する必要がある.ここでは,上記で述べた室内温度調整により室内湿度が低下するのを,細霧発生装置で調節している.また一般に,成虫は夜露しか摂食しないため,この細霧発生装置が必要不可欠である.

したがって,まず降雨は,約 1 [kg]の骨炭を介して完全に塩素分を除去された水を受水槽（川本製作所製,特注）に導水し,せせらぎ空間の屋根に張り巡らしたスプリンクラーに降雨ポンプ（川本製作所製 N3-205SH,単相 100 [V], 吸込口径 25 [mm],吐出口径 25 [mm],吐出量 24 [ℓ/min],全揚程 16 [m]）で誘導して発生させる.細霧は,降雨発生装置と同様に塩素分を除去した水を受水槽（川本製作所製,寸法 500 [mm] × 550 [mm] × 540 [mm]）に導水し,細霧ポンプ（サンノー製 MS-153 型,単相 100 [V], 吸込口径 15 [mm], 吐出口径 15 [mm],吐出量 10 [ℓ/min],全揚程 8.1 [m]）を介してせせらぎ空間の左右端に配管をした 36 箇所のノズルから発生させる.ここでは,季節毎にプログラムしたタイ

マーでそれらの発生回数や発生時間を制御している.これは,降雨や霧の発生を出来る限り自然条件に合わせるためである.

3.4.8. せせらぎの水質制御

次に,せせらぎの水質制御について述べる.本研究では,当初から総水量 27 [t]の飼育水を如何に最適な自然状態に近づくまで濾過可能であるかが最大の課題であった.自然状態に近い最適な濾過とは,上流からホタルが生息する中流域に至る様々な過程で増繁殖した多様な微生物群や土壌環境を援用して,ミネラル分などが豊富な栄養度の高い弱アルカリ性のせせらぎ水を創り上げることである.当然,せせらぎでは,好気性バクテリアが無数に生息し,BOD 値が限りなくゼロに近い状態に維持されていなければならない.ここでは,図 3-27 に示した濾過槽（タカラ工業製 SC-5,寸法 1080 [mm] × 830 [mm] × 760 [mm],容量 650 [リットル]）を濾過ポンプ(タカラ工業製 GP-200 型,単相 100 [V], 吸込口径 75 [mm],吐出口径 75 [mm],吐出量 26 [t/h],全揚程 4.0 [m]) とともにせせらぎ空間の外側にそれぞれ 2 台ずつ設置し,それらを交互に運転することにより装置寿命の延命化や安全装置として不足の事態に備えた.内部の濾材には,塩化ビニル,ナイロン,シェルフルターを用いた.

表 3-6 は,以上の工夫によって達成したせせらぎの水質検査結果を示したものである.表 3-2 と同様に，単位を mg/l に統一し，小数第 2 位を四捨五入して示した．この表から,カワニナなどが生息し続ける上で最適な水環境が達成できていることがわかる.特に,せせらぎでは,アンモニアや亜硝酸性窒素濃度,COD 値や BOD 値が極めて低いことは注目に値する.

3.4.9. せせらぎの共生動植物群

最後に,せせらぎにおける共生動植物群について述べる.表 3-7 は,実際にせせらぎの中で生息している代表的な動植物群である.せせらぎの土手には,ヨモギ,カヤ,シダ類,スギゴケがあり,ホタルの成虫の休息・産卵地となる.水中には,クレソン,カズノコゲが

繁茂し,また,ホタルの幼虫やカワニナに加え,メダカやハゼ,ヌマエビが生息している.さらに,水中および土壌には硝酸菌をはじめとする豊富な菌類が存在し,環境浄化に役立っている.

これらの生物群は,バクテリア類も一体となった有機的な連鎖を保持しつつ,せせらぎ空間としての生態系をより自然環境に近い状態で構成しているものと考えられる.一方,せせらぎから水辺にかけては,それぞれの生息条件に適応した植帯域を設定し,それぞれの生態に見合った様々な動植物群の生息環境が維持されている.

3.4.10. せせらぎ空間の維持・管理

ホタルの生息支援は,ゲンジボタルやヘイケボタルの図 3-23 に示したような生命サイクルに基づいたきめ細かな水質調整や土壌管理などで成り立っている.このため,飼育の際には,ホタル（卵,幼虫,蛹,成虫の全て）を取り巻く生態系の状態に臨機応変に対処しなければならない.例えば,図 3-23 の生命サイクルを考慮すると,4 月から 6 月にかけて終齢幼虫が上陸し,無事に蛹の期間を越して成虫として羽化するまでの時期,あるいは 6 月から 10 月にかけての孵化幼虫が成育する時期は,ホタルの死亡率が最も高いため,最も微妙な水質調整や土壌管理が必要になる.したがって,この期間は,濾過装置,バクテリア群及び環境土壌による自然濾過だけでは十分でない場合,水質調整剤（テトラ社,バイオコリン H3,バイタル,ステラコリン）を投入して水質を微調整する.しかしながら,ホタルの幼虫がある程度成長すると,多少の水質変動にも堪えることができるようになるため,それまでの期間のように水質調整剤を援用する必要はなくなる.その他の管理作業内容は,表 3-8 に示した通りである.

3. 5. ホタルの水

3.5.1. ホタル生息環境の水質

近年，本州以南で見られたホタルがその姿を消している．これは，農薬による水質

悪化や開発に伴う河川改修による環境撹乱により，水圏の生態系破壊されたことが主な原因ではないかと言われている．現在，かつてホタルが生息していた河川に飼育したホタル成虫や幼虫を放流するなど，ホタルの保護や回復に向けた活動が各地で行われている．しかしながら，それらのホタルが繁殖し，次年に再び姿を見せることは少ないようだ．これは，現在においてその流域がホタルの生息に適さなくなったことを示唆しており，環境の改善が必要であることを意味する．

ホタルの生息環境を作る上で大きな役割を果たすのは，その生息水圏の形成過程および河川の生態系である．湧水や侵出水が源流となる小川の水溶物は，流域の地表や地下層の構成によって決定される．全ての水源は雨水である．雨水が地中に浸透し，地中で吸着や脱窒の作用によりミネラルや酸素，その他の有機物を溶解し，地面に表出する．地表に出てからは，さまざまな生態的な過程を交えながら，より多種の有機物・無機物を溶解していく．

次に生態系ついて述べる．生態系とは物質循環の過程であるといえる．まず，水溶した無機物が水草や藻類など生産者によって吸収されて，植物のタンパク源となる．多様な種および豊富な量の植物は，それらを食べる動物（一次消費者）や，さらにそれらを捕食する，より高次の消費者を支え，多様な生態系の土台となるであろう．また，微生物はそれら生物の死体や排泄物を無機物のレベルまで分解する．再び，植物はこうした無機物を吸収するという，物質循環が存在する．こうした豊かな水源ではホタルだけでなく，ホタルの餌となるカワニナや他の動植物の生存・繁殖が可能であろう．

こうした生態系において重要なのが分解者である微生物の存在である．死体，排泄などから生態系に生じた窒素化合物は，動物にとって毒性を示すことが知られる．こうした化学物質の存在が，野外においてホタルの生息を制限しているということは否定できない．一方，微生物はそれら有害な物質を分解し，植物にとってのタンパク質の原料として必要な養分供給する．こうした分解の作用は水の浄化を促進し，生態系

の回復に寄与すると思われる．こうした過程を回復することで，野外におけるホタルの再生に寄与するかもしれない．本研究ではこれら化合物のホタルの生息環境への影響と，微生物による分解の過程およびその促進方法について，ホタルの生息環境を模擬したモデルを用いて実験的に考察した．

3.5.2. 亜硝酸とアンモニアの動物への影響

ホタル生息下の水環境において，アンモニアおよび窒素系化合物が動物生息の制限要因であることが示唆された。本章では，これらの化学物質が生物に及ぼす影響について考察する．

亜硝酸の影響は，2基の同一仕様のホタル生息環境モデル（ホタル生態槽）[阿部宣男：2004] を用いて，ミニ生態系における水中の亜硝酸濃度の変化を観察した．ホタル生息環境モデルとは，ホタル生態槽を用いて室内で実現したミニ・ホタル生態系である．これらのモデルにはホタルと同所的に生息するカワニナおよびメダカを導入したが，ホタルは導入しなかった．この観察中，両モデルに実験的操作は行わなかった．

一般に，アンモニアは非常に強い毒性を示し，生物にとって有害な物質である．しかしながら，板橋区ホタル施設でホタルの飼育をはじめて以来，ホタル生息環境モデル内でアンモニアの増加による死亡はほとんど観察されなかった．それは，ある生態系おいてアンモニアの発生量が少ない，あるいは好気条件下では容易に微生物によって分解されうることが考えられる．そこで，微生物による分解について実験的に考察した．

3.5.3. 微生物による化学物質の分解

窒素化合物やアンモニアなどの化学物質は，微生物，特に硝化細菌によってその化学組成が変化する．たとえば，アンモニア化合物はニトロモナスなどの硝化細菌によって亜硝酸に変換される．亜硝酸はニトロバクターによってさらに硝化され，硝酸塩となる．この硝酸塩は植物が吸収し，蛋白源となる．この章では亜硝酸およびアンモニア化合物の硝化実験について述べる．

アンモニアがどれくらいの時間で硝化されるかを調べるために，以下の実験を行った．試験水として蒸留水 1.7l を容器に分注し，濃度 0.05mg/l となるようアンモニアを加えた．実験中は動物を試験水に入れず，水の補充・交換は行わなかった．試験水は常にエアレーションし，温度を平均 13℃に保った．菌類を固着させるための濾過材には硅砂，骨炭，サンゴ砂を用い，十分に微生物の付着した濾過材（処理）とそうでないもの（非処理）に分けた．濾過材の量は，混合した濾過材資料を 600cc となるよう調節した．また，単一の濾過材の試行では 500cc とした．コントロールとして，濾過材無しの実験もあわせて行った．

次に，亜硝酸がどれくらいの時間で硝化されるかを調べるために，実験環境下で濾過材の状態を変えて実験を行った．実験では生物が活動した水の状態を考慮し，水棲動物を 2 日間生息させた水を試験水とした．試験水は 2l の容器に分注し，濃度 0.2mg/l となるよう亜硝酸を加えた．実験中は動物を試験水に入れず，水の補充・交換は行わなかった．試験水は温度を平均 13℃に保ち，常にエアレーションした．濾過材には硅砂，骨炭，サンゴ砂を用い，十分に微生物の付着した濾過材（処理）とそうでないもの（非処理）に分けた．濾過材は３種を混合した資料を 750cc になるよう調節した．濾過材のアンモニアが溶解し，それが分解されて亜硝酸になる可能性があるため，上記の実験でアンモニアが発生したと思われる骨炭を非処理状態で実験し，その亜硝酸増加への影響を調べた．一方，アンモニア発生の見られなかった硅砂のみを単体の濾過材として活性・未活性を比較した．コントロールとして，濾過材無しの実験も行った．

3.5.4. 窒素化合物とアンモニア化合物の動態

ホタル生息モデル環境を用いて，これら化学物質の溶存量の経時変化および動物への影響を実験的に調べた．水槽内の水は 2/3 を週１回の割合で交換した．水槽内の水について，エアレーションは行ったが水の強制循環は行わなかった．水槽内にはホタル，カワニナ，メダカおよび水草を随時導入した．水槽内では有機物の分解を行う多

くの微生物が確認された［阿部宣男：2004］.

3.6. ホタルの発光パターンに見られる温熱環境依存性

ゲンジボタルの発光パターンは，雌雄間のコミュニケーションの手段として知られている．そのパターンは，現在２つのタイプに分類されている．すなわち，西日本に生息する *2* 秒間隔で発光するタイプ，および東日本に生息する *4* 秒間隔で発光するタイプである，発光パターンの相違は，上記２タイプの種の相違に起因すると言われている．しかしながら，様々な地域に生息するゲンジボタルの幻想的な光のゆらぎを分析する過程で，上記２種の発光パターンを識別することが難しいという事実に遭遇した．このことは，ホタルの発光パターンをこれまでのような解釈を用いて判断することが困難であることを示唆している．

したがって，本研究では，統計解析や画像解析を援用して，ホタルの発光パターンがその生息環境から受ける影響を実験的に明らかにすることにした．実験は，彼らの生息地環境に応じて，温度・湿度・気圧などの環境要因を変えることによって行った．

ホタルの撮影は，図 3-28 に示したようなアクリル製シャーレ(幅 *20* [cm]，高さ *20* [cm])を用いて，雌雄を区別したものと，雌雄をペアにしたものをそれぞれベンチレータ内に入れて実施した．温度を *15* [℃]から *25* [℃]まで上昇させその後，*25* [℃]から *15* [℃]まで低下させた時と，逆に温度を *25* [℃]から *15* [℃]まで低下させその後，*15* [℃]から *25* [℃]まで上昇させた時の，各温度での発光パターンを撮影して明滅間隔の変化を計測した．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，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．撮影には，東日本に生息するホタルや，西日本に生息するホタルなど，様々な地域に生息する個体を用いて撮影を行った．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．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．なお，一連の計測では，気圧及び湿度を適宜計測した．

ゲンジボタルあるいはヘイケボタルの明滅を採取した一連の動画像は，動画像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，動画像の時間分解能が *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．次に，コンピューターに取り込んだ動画像は，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，得た時系列データから発光パターンの明滅間隔を測定し温度上昇時と低下時の各温度で平均と信頼区間を求める．この時，信頼区間は９５％とした．すなわち，ホタルの発光パターンの時間変動を図２に示すように定義した．発光の発生時間を *t1,t2,t3,...,tn* とし，その差から明滅間隔 *i1,i2,...,in* 求める．なお一連の明滅間隔の測定には，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．

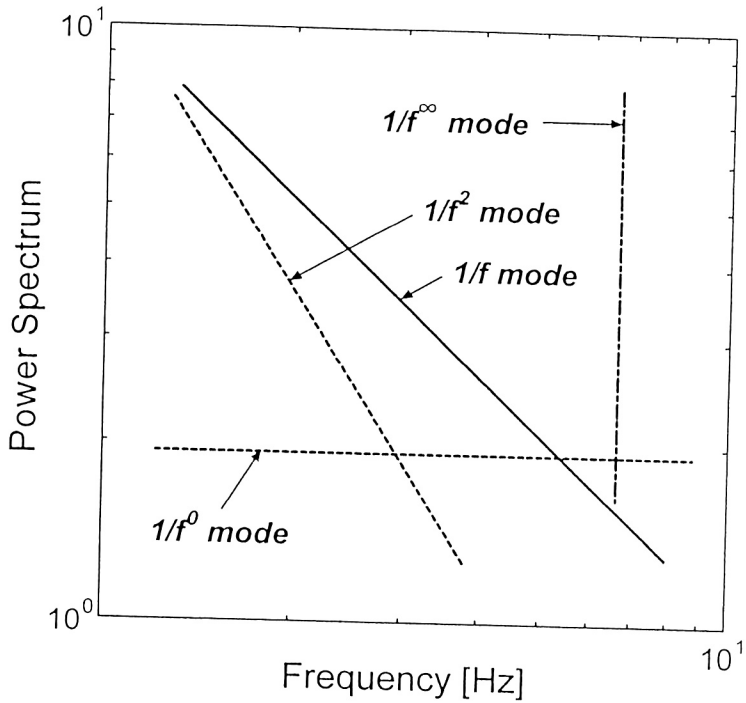


Fig.3-1　Definition of *1/f"* Mode

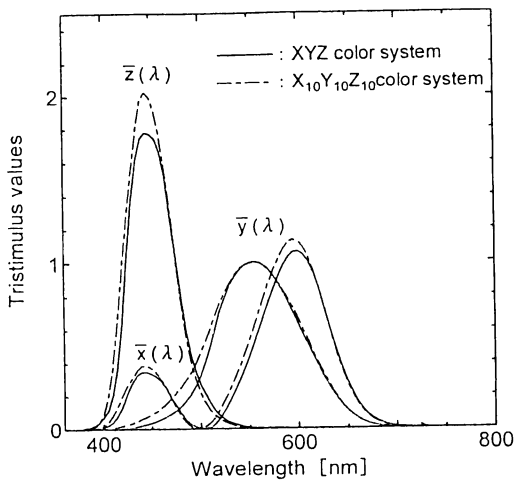


Fig.3-2 Color Matching Functions (XYZ and $X_{10}Y_{10}Z_{10}$)

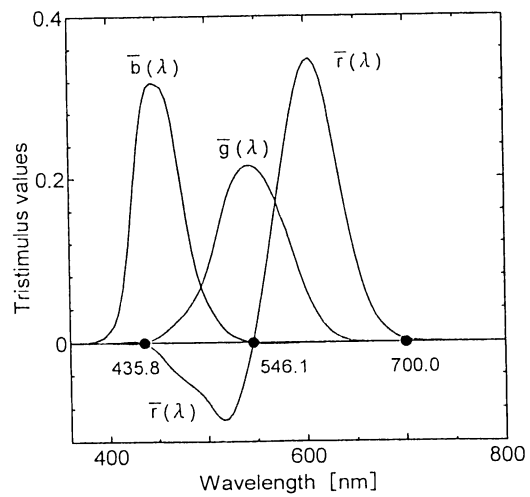


Fig.3-3 Color Matching Functions (RGB)

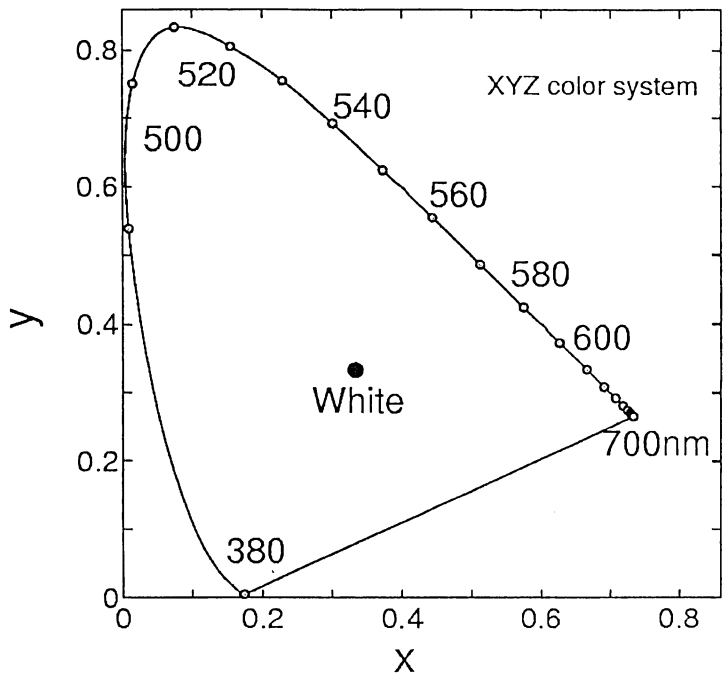


Fig.3-4 Chromaticity Diagram (XYZ)

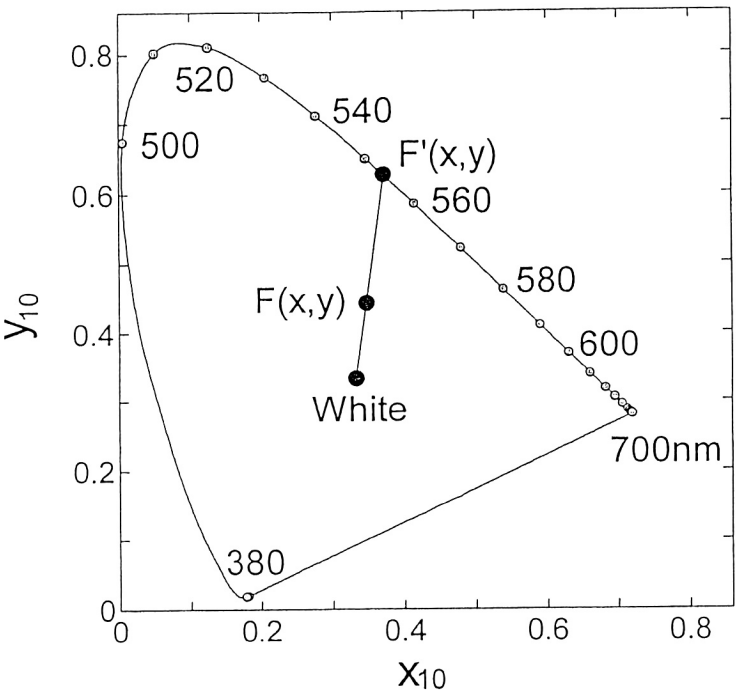


Fig.3-5 Chromaticity Diagram ($X_{10}Y_{10}Z_{10}$)

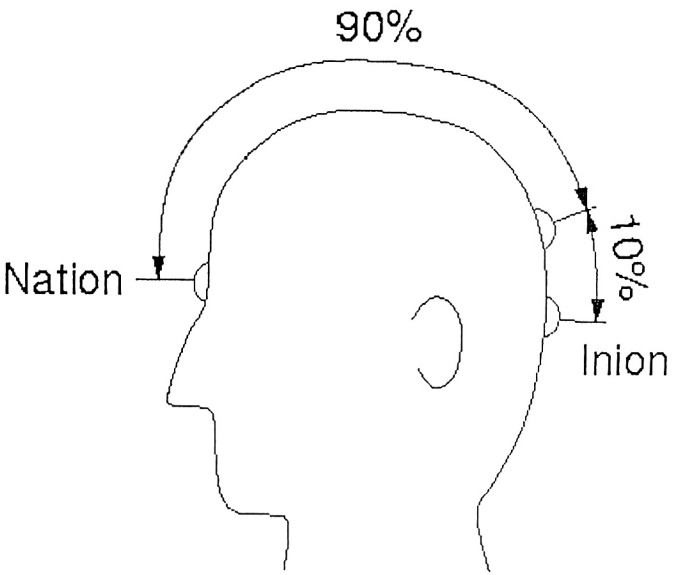


Fig.3-6 Measuring Point for Electroencephalogram

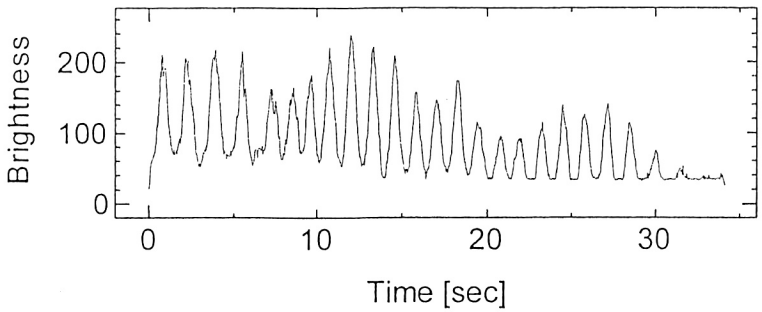


Fig.3-7 Test Pattern of Genji Firefly

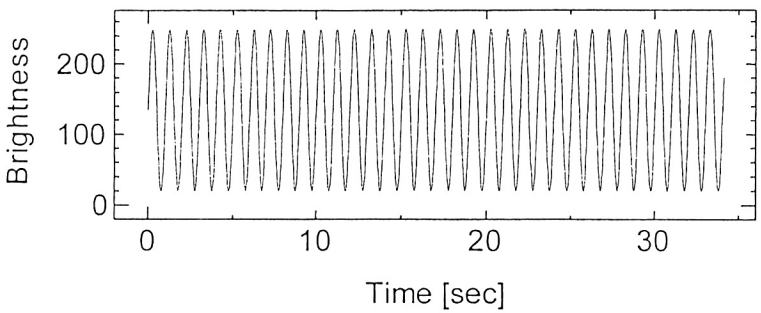


Fig.3-8 Test Pattern of Sine Wave Signal

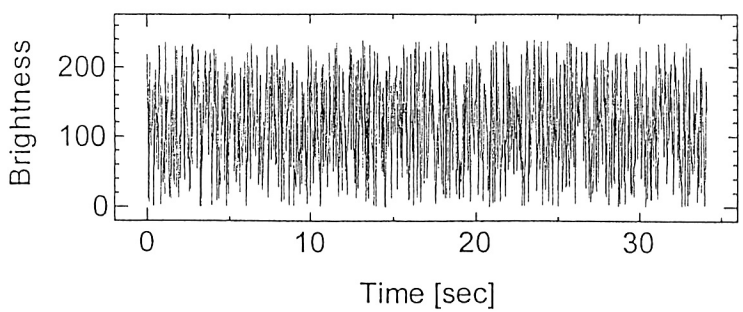
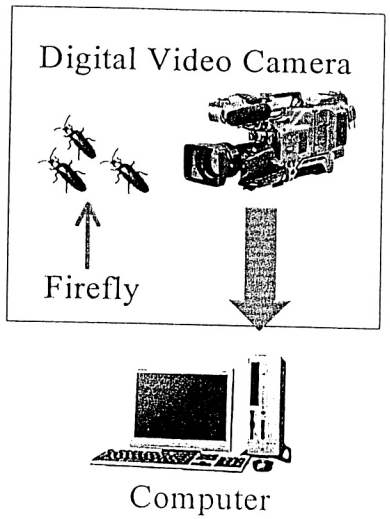


Fig.3-9 Test Pattern of Random Signal



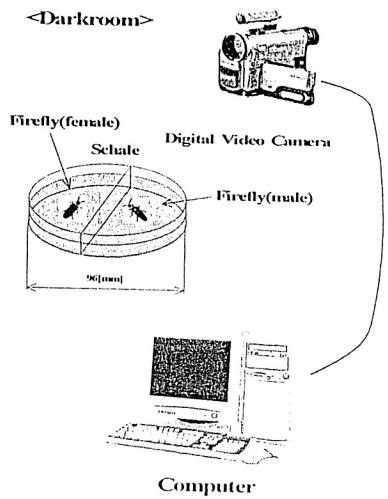


Fig.3-10 Schematic Diagram of Measuring Luminance Information of Firefly

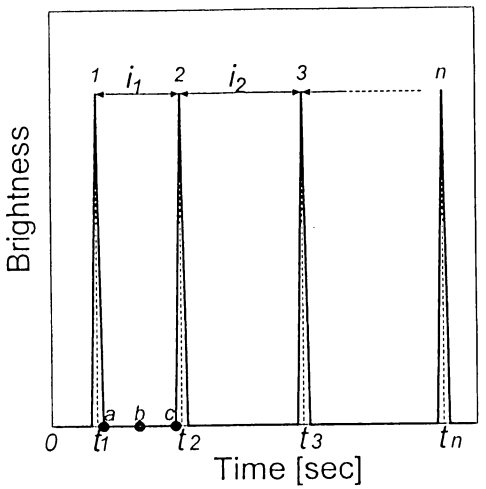


Fig.3 -11 Model of Transient Light Emission Pattern

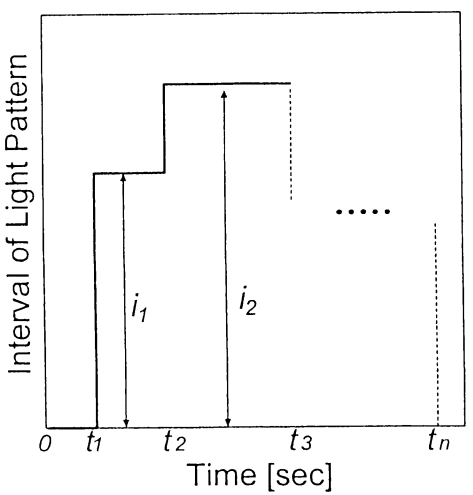


Fig.3-12 Transient Interval between Adjacent Maximum Luminosities

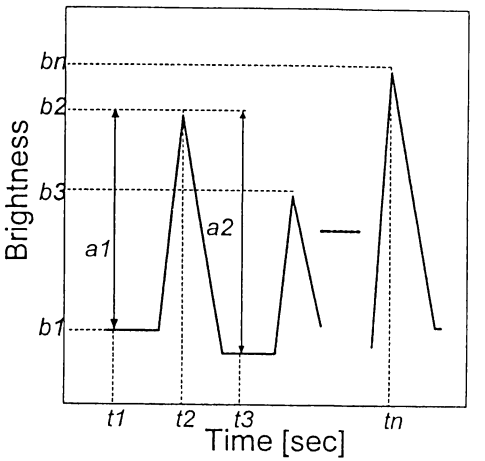


Fig.3-13 Model of Transient Light Emission Pattern

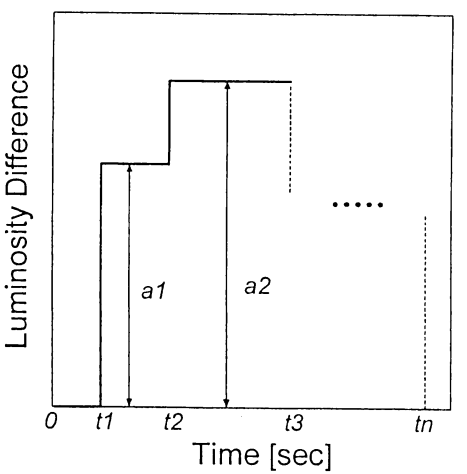


Fig.3-14 Transient Difference between Adjacent Maximum and Minimum Luminosities

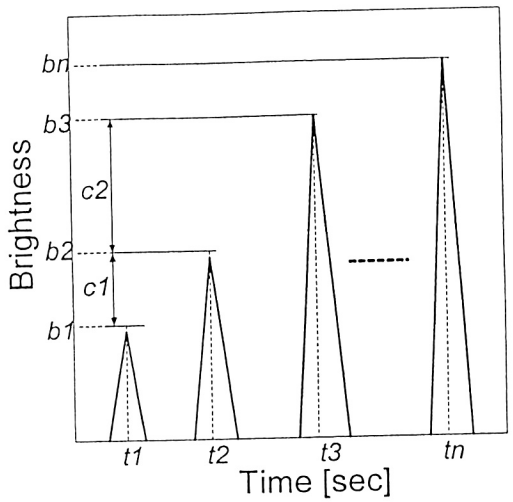


Fig.3-15 Model of Transient Light Emission Pattern

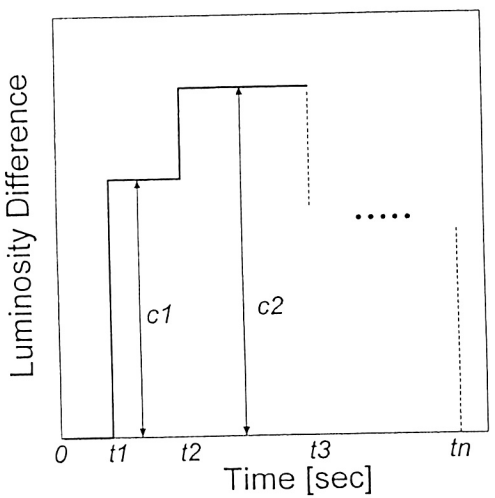


Fig.3-16 Transient Difference between Adjacent Maximum Luminosities

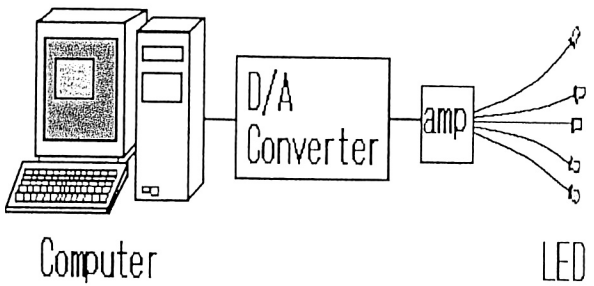


Fig.3-17 Schematic Diagram of Virtual Firefly Illumination System

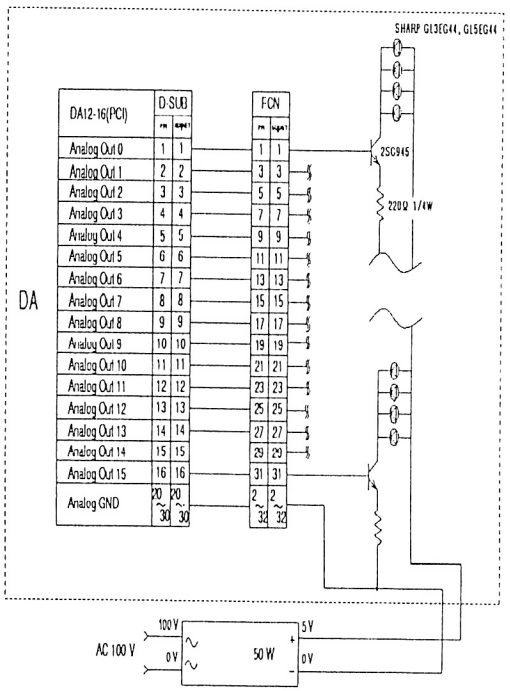


Fig.3-18 Electronic Circuit for Virtual Firefly Illumination System

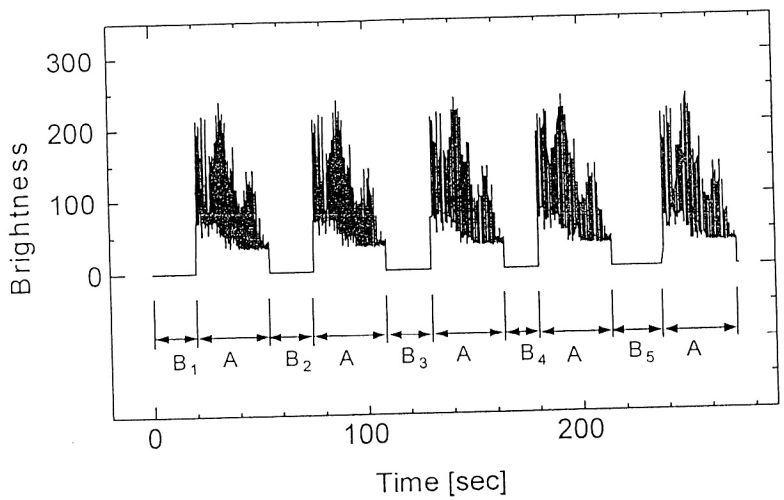


Fig.3-19 Biological Information Data for Virtual Firefly Illumination System

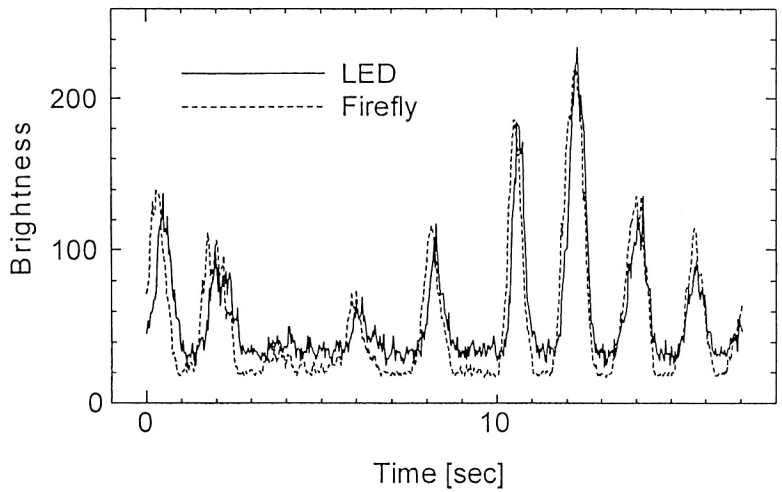


Fig.3-20 Transient Light Emission Patterns of Virtual Firefly Illumination System and Real Firefly

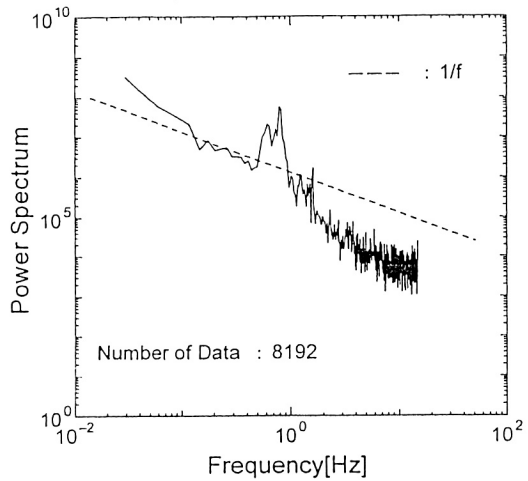


Fig.3-21 Power Spectrum of Transient Light Emission Pattern of Virtual Firefly Illumination System

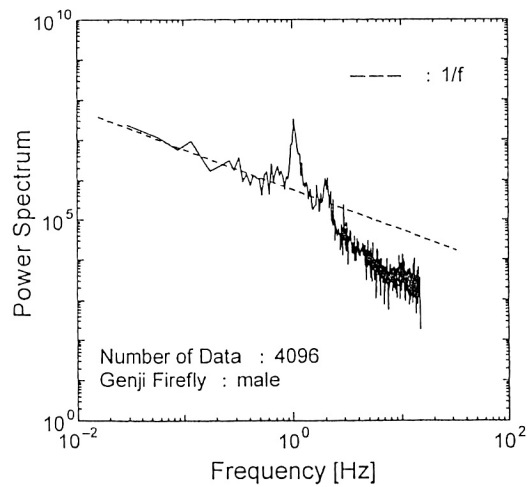


Fig.3-22 Power Spectrum of Transient Light Emission Pattern of Genji Firefly

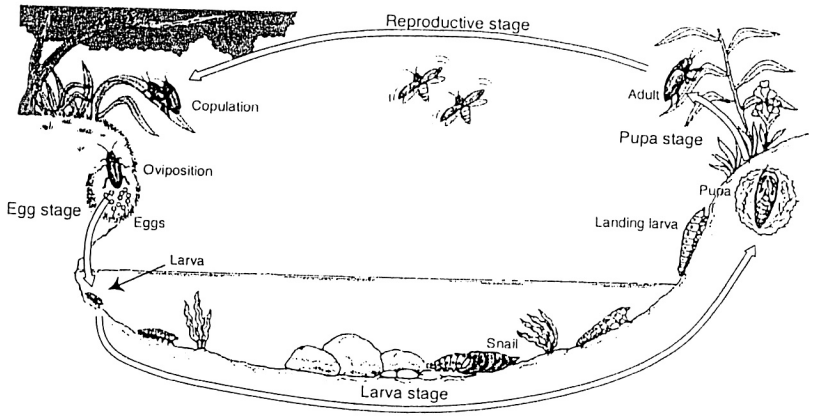


Fig.3-23 The life cycle is divided into four stages: Egg stage (June); Larva stage (from July to April); Pupa stage (May); Reproductive stage (June)

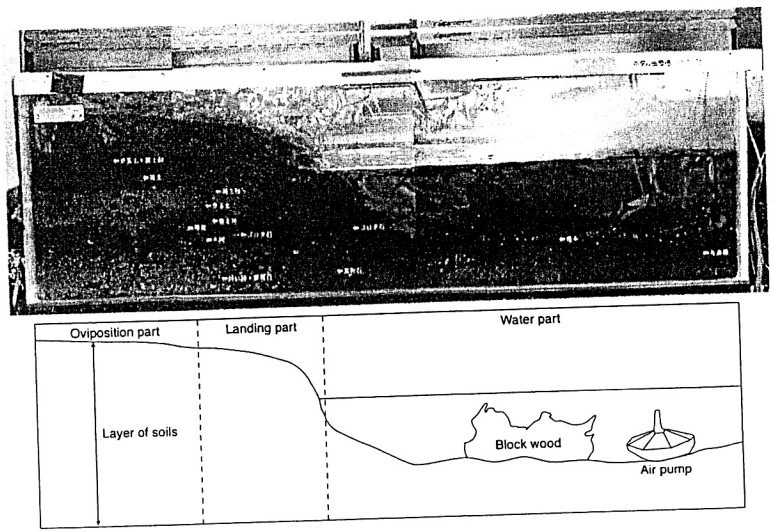


Fig.3-24 Photo of ecologically-balanced aquarium (upper) and its scheme (lower).

The aquarium is divided as follows: oviposition part, landing part and water part.

Table 3-1 Daily-water-examination items in an ecologically-balanced aquarium measured at 08:00 from 1993 to 2002 and their mean values. In this table, the values were determined from the data of the fifth day every month for ten years.

Month	Conditions in ecologically-balanced aquarium											Environmental conditions		
	Water temperature (°C)		pH	Solute substances (mg/l)								Ambient temperature (°C)		Relative humidity (%)
	Firefly	Snail		O^2	CO^2	NO^{2}*	NO^{3}*	NH^{4+}*	GH	KH	COD**	Outdoor	Room	Outdoor	Room
Jan.	11.6	20.1	8.0	10.6	7.2	<0.1	1.4	<0.1	6.2	6.8	<0.1	4.5	9.9	51.4	53.4
Feb.	10.7	19.7	8.0	10.7	8.3	<0.1	3.1	<0.1	6.4	7.1	<0.1	2.2	8.1	55.8	54.0
Mar.	10.7	20.3	8.0	10.6	8.3	<0.1	4.2	<0.1	5.9	7.4	<0.1	6.2	10.3	53.6	55.2
Apr.	13.3	21.3	8.0	10.3	8.0	<0.1	2.8	<0.1	5.6	7.4	<0.1	11.6	14.0	51.3	54.2
May	15.6	21.7	8.0	9.8	8.4	<0.1	2.8	<0.1	5.9	7.4	<0.1	17.7	17.4	60.3	76.4
Jun.	16.8	21.8	7.9	9.5	8.3	<0.1	2.6	<0.1	5.6	7.5	<0.1	22.0	18.1	57.1	72.8
Jul.	17.2	22.1	7.9	9.4	8.4	<0.1	5.1	<0.1	5.6	7.4	<0.1	25.7	19.9	71.4	81.1
Aug.	18.1	22.2	7.9	9.2	8.3	<0.1	3.8	<0.1	5.7	7.6	<0.1	27.5	20.0	63.2	78.4
Sep.	17.7	21.9	7.9	9.3	8.3	<0.1	3.8	<0.1	6.2	7.7	<0.1	26.2	19.0	61.9	70.2
Oct.	17.9	22.5	7.9	9.4	7.9	<0.1	5.6	<0.1	5.6	7.8	<0.1	20.0	18.4	66.7	63.6
Nov.	16.0	21.1	7.9	10.1	8.4	<0.1	4.0	<0.1	6.3	7.5	<0.1	13.6	16.1	57.5	54.5
Dec.	13.4	20.1	7.9	10.5	8.1	<0.1	5.8	<0.1	6.3	7.1	<0.1	7.8	12.3	61.2	59.1

* Measurement has been started from 1996.

** Measurement has been started from 1996. Measured by KYORITSU Pack Test

Table 3-2 Monthly-water-examination items measured in an ecologically-balanced aquarium. Mean (n=5) values were determined from the results of five months, i.e., Jan., Feb., May, Jun. and Sep., in 2002.

Items	Value	Method (JIS-K-0101)
BOD (mg/l)	<1.0	Diaphragm-electrode
COD (mg/l)	<1.0	Glass-electrode
DO (mg/l)	10.6	Diaphragm-electrode
NO_2^- (mg/l)	0.0*	Ion chromatography
NO_3^- (mg/l)	0.0*	Ion chromatography
NH_4^+ (mg/l)	0.0*	Titrimetric analysis
GH (mg/l)	8.8	Titrimetric analysis
CaGH (mg/l)	102.2	Titrimetric analysis
SS (mg/l)	<1.0	Gravimetric analysis
PH	7.7	Ion chromatography
Turbidity	<1.0	Visual range

*round off numbers to the nearest zero point one.

Table 3-3 Flora of bacteria and fungi seen in an ecologically-balanced aquarium

Genus	Activities of microbe	Decomposed-substances
Achromobacter		
Flavobacterium		
Psuedomonas		
Propionibacterium	Saccharification	
Streptomyces	Saccharification	
Arthrobacter	Hydorcarbonization	
Debarypmyces	Decomposition	
Actinomyces	Decomposition	Phenol
Nocardia	Oxidation	
Nitrosomonas	Nitrification	Ammonia
Nitrobacter	Nitrification	Ammonia
Mucor	Decomposition	Lignin
Pichia	Oxidation	
Microbispore	Decomposition	Unknown
Aspergillus	Saccharification & decomposition	Unknown
Thiobacillus	Oxidation	Thiosulfate & Cyanide
Bacillus	Saccharification & decomposition	Unknown
Thermoactinomyces	Oxidation	
Cellulomononas	Decomposition	Cellulose
Clostridium	Saccharification	

Table 3-4 Soil composition in an ecologically-balanced aquarium

Layer of soil	Soil composition (rate of mixture)	Thickness (mm)
1	Fujisuna-sand+Akadamatsuchi-mud+Kurotsuchi+mud (5:4:3)	100
2	Akadamatsuchi-mud+Kurotsuchi+mud (8.2)	50
3	Fujisuna-sand+Akadamatsuchi-mud+Kiryu-sand (5:3:2)	50
4	Kurotsuchi+mud	30
5	Bincho-charcoal+Bone black (5:5)	50
6	Bone black	50
7	Fujisuna-sand	30
8	Silica sand+Corallite sand (5:5)	30
9	Gorota-stone	40
10	Nachi-stone+ Silica sand (5:5)	80

Table 3-5 Typical organisms seen around the habitat of fireflies

Animal			Common name	Species
	Fish	*	Cyprinodont	*Oryzias latipes latipes*
			Goby	*Rhinogobius flumineus*
			Bullhead	*Cottus pollux*
	Crustacean	*	Shrimp	*Paratya compressa*
	Water bug		Giant water bug	*Lethocerus sp.*
		*	Stonefly	*Perla sp.*
			Dobsonfly	*Protohermes sp.*
			Diving beetle	*Cybister sp.*
Plant				
	Grass	*	Mugwort	*Artemisia sp.*
		*	Cogongrasses	*Torreya nucifera*
		*	Sweet flag	Acorus gramineus
	Water plant		Bladderwort	*Utricularia sp.*
		*	Water cress	Nasturtium officinale
	Moss	*	Hair moss	Polytrichum juniperinum

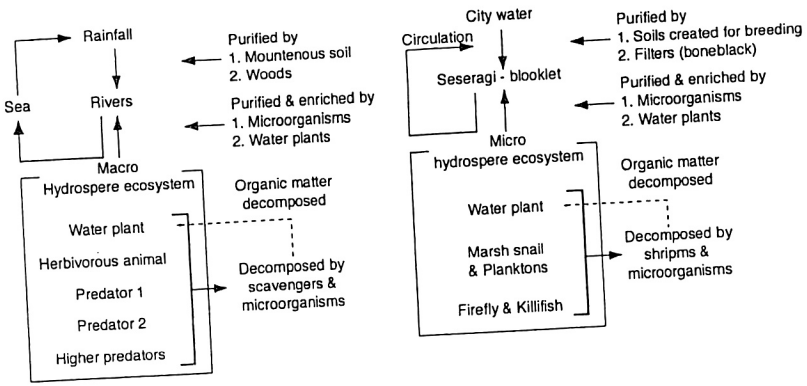


Fig.3-25 Model of firefly ecosystem

(left: natural condition, right: artificial condition in "Seseragi")

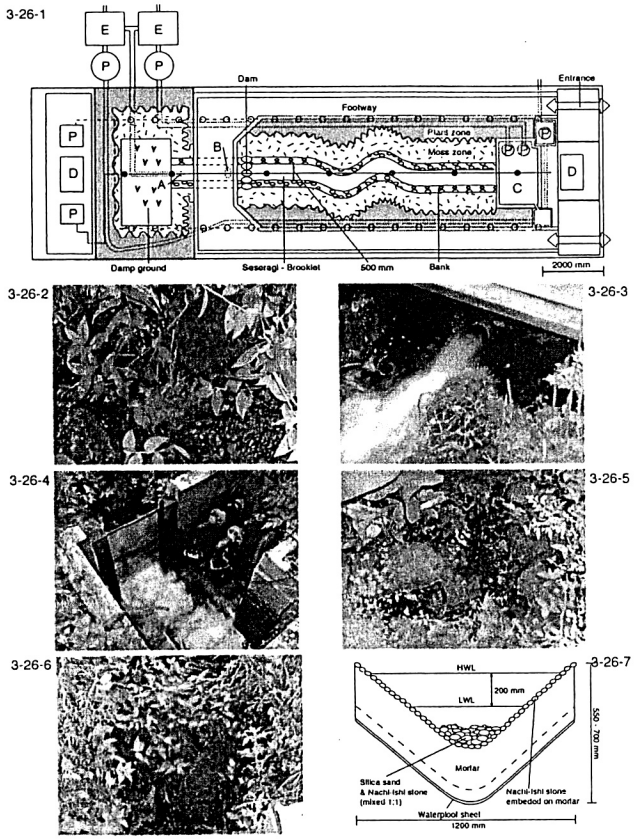


Fig.3-26 Outline of artificial stream "Seseragi". 3-26-1: Scheme of "Seseragi".

A: Debouchment (see, Fig.3-26-2); B: Regulator of water flow (Fig.3-26-3);

C: Circulation pit (Fig.3-26-4); D: Air conditioner; E: Filter tank of circulation water; P: Pump; ● and ○ mean sprinklers and water sprayers, respectively. Fig.3-26-2～Fig.3-26-4: see caption in Fig.3-26-1; Fig.3-26-5: A rapid in "Seseragi"; Fig.3-26-6: A steep flowing

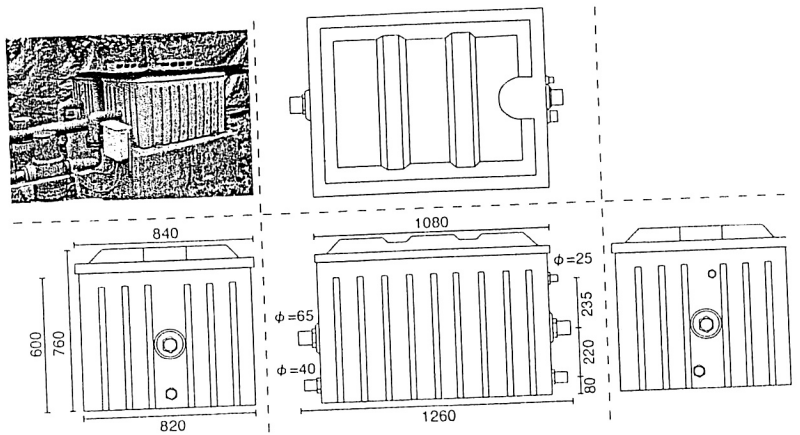


Fig.3-27 Outline of filtering tank for circulation water

Table 3-6 Monthly-water-examination items measured in "Seseragi". Mean (n=5) values were estimated from the result of five month, i.e., Apr., Jul., Aug, Nov. and Dec., in 2002.

Items	Value	Method (JIS-K-0101)
BOD (mg/l)	< 1.0	Diaphragm-electrode
COD (mg/l)	< 1.0	Glass-electrode
DO (mg/l)	11.1	Diaphragm-electrode
NO_2^- (mg/l)	0	Ion chromatography
NO_3^- (mg/l)	0	Ion chromatography
NH_4^+ (mg/l)	0	Titrimetric analysis
GH (mg/l)	9.8	Titrimetric analysis
CaGH (mg/l)	14.6	Titrimetric analysis
SS (mg/l)	< 1.0	Gravimetric analysis
PH	7.8	Ion chromatography
Turbidity	< 1.0	Visual range

*round off numbers to the nearest zero point one.

Table 3-7 Typical organisms seen around the habitat of fireflies.

MO means micro organism.

Animal		Common name	Species
	Fish	Cyprinodont	*Oryzias latipes latipes*
		Goby	*Rhinogobius flumineus*
		Bullhead	*Cottus pollux*
	Crustacean	Shrimp	*Paratya compressa*
Plant			
	Tree	Angelica	*Aralia elata*
	Grass	Mugwort	*Artemisia sp.*
		Cogongrasses	*Torreya nucifera*
		Sweet flag	Acorus gramineus
		Cogongrasses	*Torreya nucifera*
	Water plant	Bladderwort	*Utricularia sp.*
		Water cress	*Nasturtium officinale*
	Moss	Hair moss	*Polytrichum juniperinum*
			Riccia sp.
MO	Bacteria	Nitrate bacteria	*Nitrosomonas sp.*
		Nitrate bacteria	*Nitrobacter sp.*

Table 3-8 Items of daily management

Examination of water
Examination of instruments
Power controller
Regulator of water temperature
Regulator of water speed
Water circulation pump
Care of firefly larvae
Care of plants
Cleaning of filter in Seseragi

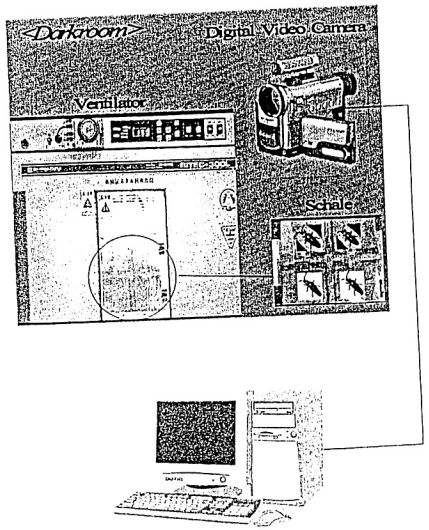


Fig3-28 Experimental Apparatus

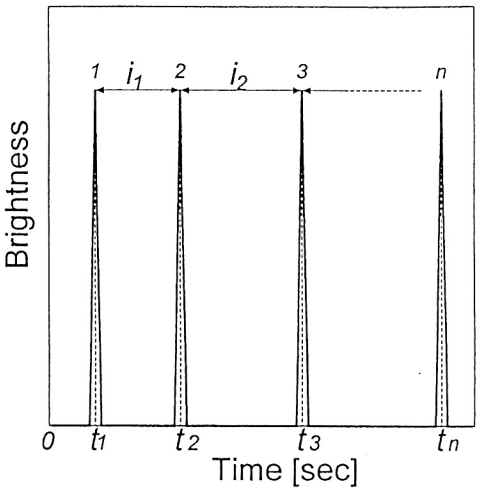


Fig3-29 Model of Transient Light Emission Pattern

4. 実験結果と考察

4.1. ホタルの光と人の感性

4.1.1. ホタルの光の輝度変動

図 4-1 は,一例として徳島県池田町で採取し,板橋区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 4-2 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 4-3 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 4-4 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.

4.1.2. ホタルの光の発光間隔

図 4-5 は,徳島県池田町で採取し,板橋区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 4-6 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 $1/f^2$ のゆらぎ現象など何らかのゆらぎが存在していることがわかる.

図 4-7 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 4-8 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 $1/f^2$ のゆらぎ現象など何らかのゆらぎ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.

4.1.3. ホタルの光の輝度差変動

図 4-9 と図 4-10 は,それぞれ徳島県池田町で採取し,板橋区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 4-11 と図 4-12 は,それぞれ徳島県池田町で採取し,板橋区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 $1/f^2$ のゆらぎ現象など何らかのゆらぎが存在していることがわかる.

図 4-13 と図 4-14 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.また,図 4-15 と図 4-16 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 $1/f^2$ のゆらぎ現象など何らかのゆらぎ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.

4.1.4. 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［高安秀樹：1986, 1995］.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出来る.一般に,コッホ曲線やペ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中間構造,$1 < D < 2$ 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［高安秀樹：1986, 1995］.ここでは,ホタル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4-17と図4-18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4-19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4-20と

図4-21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4-22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（$D \rightarrow 3$）と唐突になり,単純で期待性が強すぎる（$D \rightarrow 1$）と退屈になる.この中間（D〜2）が程よい快適性を人の感性にもたらすのであろう

4.1.5. ホタルの発光パターンのウェーブレット解析

図 4-23 と図 4-24 は,一例として徳島県池田町で採取し,板橋区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像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 4-25 と図 4-26 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像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［牧野透：1994, 大場信義ほか：1979, 1995］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,［Norio ABE et al.: 2002］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.

4.1.6. ゲンジボタルの官能評価

図 4-27～図 4-36 は,人がゲンジボタルの光やその生態系をどのように感じているかについて分析した結果であり,横軸-3 → +3 ほど心地良い（癒された）度合いが高いことを示す.いずれも意見サンプル総数は,様々な年齢階層の約 450 人である.なお,ゲンジボタルの鑑賞会は,6 月下旬に実施されている.

図 4-27 と図 4-28 から,レベル 1 以上に対して実に 92 [%]の人が“ホタルの光は,美しくて幻想的だ”と回答していることがわかる.以下の数字は,全てレベル 1 以上に対しての値である.図 4-29 と図 4-30 は,“ホタルの光のみに癒されたか”あるいは“ホタルの光と生息環境に癒されたか”の趣旨についての結果である.62 [%]の被験者は,“ホタルの光のみによって癒された”と回答しており,90 [%]以上の被験者がホタルを含めその空間全体に癒しを感じている.また,図 4-31 は,“鑑賞後リラックスできた”について尋ねた結果であり,90 [%]近くの人が“リラックスできた”と回答している.次に,図 4-32 から図 4-35 は,生態系の構成要素であるせせらぎの音,温度,湿度および香りに対する官能評価結果であり,音に関しては 86 [%],温度に関しては 69 [%],湿度に関しては 65 [%],香りに関しては 60 [%]の被験者が,これら構成要素についても快適と感じていることがわかる.したがって,これらの事実は,ホタルの光とその空間全体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,図 4-30 からも明らかなように,人は,ホタルの光以外にも,せせらぎの音,温度,湿度および香りに反応しつつ,総合的に癒しを享受しているものと推察できる.これらの点は,人工のミニ生態系を設計する上で考慮しなければならない要素である.図 4-36 は,被験者が感じたホタルの色相を尋ねた結果を示しており,緑と黄をほぼ半々に感じていることがわかる.したがって,人によって,ホタルの光の色に対する感じ方が違うことが推察できる.

4.1.7. ヘイケボタルの官能評価

図 4-37 から図 4-46 は,人がヘイケボタルの光やその生態系をどのように感じているかについて分析した結果であり,横軸-3 → +3 ほど心地良い（癒された）度合いが高いことを示す.様々な年齢階層の意見サンプル総数は,いずれもゲンジボタルとほぼ同数の約 450 人である.なお,ヘイケボタルの鑑賞会は,7 月下旬に実施されている.

図 4-37 と図 4-38 から,レベル 1 以上に対して実に 94 [%]の人が“ホタルの光は,美しくて幻想的である”と回答していることがわかる.以下の数字は,全てレベル 1 以上に対しての値である.図 4-39 と図 4-40 は,“ホタルの光のみに癒されたか”あるいは“ホタルの光と生息環境に癒されたか”の趣旨についての結果である. 60 [%] の被験者は,“ホタルの光のみによって癒された”と回答しており, 90 [%] 以上の被験者がホタルを含めその空間全体に癒しを感じている.また,図 26 は,“鑑賞後リラックスできたか”について尋ねた結果であり, 90 [%] 近くの人が“リラックスできた”と回答している.次に,図 4-42 から図 4-45 は,生態系の構成要素であるせせらぎの音,温度,湿度および香りに対する官能評価結果であり,音,温度,湿度に関しては,約 90 [%]の人が,香りに関しても 71 [%] の被験者が快適であると感じていることがわかる.図 4-33,4-34 と図 4-43,4-44 の最大の相違は,ヘイケボタルとゲンジボタルの鑑賞会当日におけるせせらぎ空間内外の温湿度差に起因する.すなわち,ヘイケボタル鑑賞会当日は,7 月下旬のこともあって,室外は高温湿潤な天候であり,空調された空間内の温熱環境を人がより快適と感じたためであろう.図 4-46 は,被験者が感じたホタルの色相を示しており,緑と黄をほぼ半々に感じていることが伺える.これら一連の結果は,ゲンジボタルの意見分布とほぼ一致している.

4.1.8. 色相解析

図 4-47 および図 4-48 は,ゲンジボタルとヘイケボタルの発光パターンに関する *R, G, B* 各成分の輝度変動とそれを *FFT* 解析したパワースペクトルを表したものである.図 4-47 に示したゲンジボタルの *R,G,B* 各成分の輝度変動から,前節で明らかにした発光パターンの輝度変動同様,これらの変動もある程度の規則性を持った明滅であることが

読み取れ,約 2 [sec]から 3.3 [sec]周期で各成分の輝度を変化させている頻度が高いことがわかる.また,パワースペクトルからは,それぞれ約 0.8 [Hz]から 1.0 [Hz]近傍のスペクトルを境として,低周波域で *1/f* ゆらぎ現象が確認できる.ただし,10 [Hz] 以上の高周波帯域を除いている.一方,図 4-48 は,ヘイケボタルの *R*, *G*, *B* 各成分の輝度変動を示したものである.図から,約 3.3 [sec]から 5.0 [sec]周期で各成分の輝度を大まかに変化させている頻度が高いことが分かる.また,パワースペクトルからは,それぞれ約 2.0 [Hz]から 3.0 [Hz]近傍のスペクトルを境として,低周波域で *1/f* ゆらぎ現象が確認できる.その他,一連の傾向は,輝度変動の周期性が高いことを除いて,ゲンジボタルの場合と同様である.なお,撮影の都合上,これらのデータには,雌雄のホタルに関する生物情報を区別して記載していない.

図 4-49 と図 4-50 は,ゲンジボタルおよびヘイケボタルの光の主波長を波長帯毎のヒストグラムで表したものである. 図 4-49 と図 4-50 9 から,ゲンジボタル,ヘイケボタルの光の色相分布は,530 [nm]～580 [nm]の主波長帯に分布していることが分かる.なお,色相の平均値は,ゲンジボタルで 554.8 [nm] (標準偏差 : 10.50 [nm]) ,ヘイケボタルで 535.2 [nm] (標準偏差 : 21.88[nm]) であった.詳細は不明であるが,ヘイケボタルの光の色相は,ゲンジボタルのものに比べてスペクトルの広がりが大きいと言える.

図 4-51 と図 4-52 は,色相のゆらぎを調べるため,ゲンジボタルおよびヘイケボタルの色相変動 (主波長変動) とそれを *FFT* 解析したパワースペクトルを表したものである. 図 4-51 に示したゲンジボタルの色相変動から,前節で明らかにした発光パターンの輝度変動同様,色相変動にもある程度の規則性を持った明滅であることが読み取れる.また,パワースペクトルからは,10 [Hz]以上の高周波帯域を除く帯域のほぼ全域で *1/f* ゆらぎ現象が確認できる. 図 4-52 に示したヘイケボタルの色相変動からも,周波数帯域のほぼ全域で *1/f* ゆらぎ現象が確認できる.なお,撮影の都合上,これらのデータには,雌雄のホタルに関する生物情報を区別して記載していない.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.このことから,色相変動についても人がホタルの光から何らかの癒しを感じていることが推察できる.

図 4-53 は,ゲンジボタル 23 匹について,それぞれのホタルにおける色相の主波長変動を *FFT* 解析し,パワースペクトルで表した際の傾き(*n* 値)をヒストグラムで表したものである.この結果から,平均値 0.824,標準偏差 0.415 であり,1.0 付近を中心に *n* 値が分布していることが分かる.一方, 図 4-54 は,ヘイケボタル 8 匹について,それぞれのホタルにおける色相の主波長変動を *FFT* 解析し,パワースペクトルで表した際の傾き(*n* 値)をヒストグラムで表したものである.この結果からも,平均値 0.857,標準偏差 0.357 であり,1.0 付近を中心に *n* 値が分布していることが分かる.すなわち,このことからも,ホタルの光の主波長変動にも *1/f* ゆらぎ現象が存在し,癒し効果の存在する可能性が高いものと考えられる.

4.1.9. 脳波解析と官能評価

図 4-55 は,実際に測定した脳波の生データである.また, 図 4-56 は,各発光パターンに対するα波の占有率を測定回数毎に求めたグラフである.占有率とは,1 回目・2 回目・3 回目において,それぞれの光に対して最もα波が出現した人数の割合を求めたものである. 図 4-57 は,被験者が感じたゲンジホタルの色相を尋ねた官能評価結果を示したものである. 図 4-56 から,1 回目,2 回目,3 回目の測定において,黄,緑,黄緑のパターンそれぞれのα波の占有率から考察すると,緑のパターン時のα波占有率が若干高めであるが,3 パターンともにほぼ同率の占有率を示していることがわかる.また, 図 4-57 からも明らかなように,被験者が感じるホタルの光の色相については,黄から緑にかけての色相を同等に感じていることがわかる.すなわち,人によってホタルの光の色に対する感じ方が違うことが推察できる.したがって,被験者は,これらの色相帯の範囲内であれば,例えバーチャルホタルイルミネーションシステムの光であっても,現実のホタルの光と感じていることが伺える.すなわち,*LED* の光に関しても,被験者は,この波長帯内

における色であれば天然のホタルと同様に感じ,*LED* の光によっても癒されるものと推察される.

4.1.10. 色相の心理的意味と官能評価

ここでは,ホタルの光の色相が人の精神にどのような心理的効果をもたらすのかについて述べる.

図 4-53 と図 4-54 から,ゲンジボタルおよびヘイケボタルの主波長帯は 530～585[nm]に最も多く分布することが明らかになったが,これらの主波長帯の色相が有する心理的な意味合いは,文献［末永蒼生：1994］によると,知性,若さ,平和,安らぎなどである.このことからも,ホタルの色相そのものに関しても癒し効果が存在する可能性が高いと推察できる.すなわち, 図 4-36 や図 4-46 からも明らかにしたように,ホタルの光の色相,黄,黄緑,緑に対して,人は同等な感じを抱いており,これらの色相が持つ心理的意味合いについても調べてみた.文献［末永蒼生：1994］によると,黄：やる気・希望・上昇志向,黄緑：知性,若さ,平和,安らぎ,緑：安定・健康などであり,いずれの色相も心理的にプラスの働きをもたらすと言われている.したがって,心理的意味合いからも,人はこれらの波長帯の色相から癒しを感じていることが伺える.

また,本研究では,ホタルの光といえばどのような言葉が連想されるかについてアンケートを実施し,回収・分析した.意見サンプル総数は,様々な年齢階層の男女約 230 人である.表 4-1 は,出てきた語句の中から 5 つのキーワードを抽出し,それらのキーワードに類似する主な語句を挙げた結果を表にまとめたものである.これらの因子にも,前述した色相心理のイメージを連想させるものがあることがわかる.

4. 2. バーチャルイルミネーションシステム

4.2.1. バーチャルイルミネーションシステムの官能評価

図 4-58 から図 4-68 は,ホタルの光を模した人工バーチャルホタルイルミネーション

システムの光やその生態系を人がどのように感じているかについて分析した結果であり,横軸-3 → +3 ほど心地良い（癒された）度合いが高いことを示す.様々な年齢階層の意見サンプル総数は,約 55 人である.

図 4-58 と図 4-59 から,レベル 1 以上に対して実に 85 [%]以上の人が“ホタルの光は,美しくて幻想的である”と回答していることがわかる.以下の数字は,全てレベル 1 以上に対しての値である. 図 4-60 と図 4-61 は,“ホタルの光のみに癒されたか”あるいは“ホタルとその生息環境に癒されたか”の趣旨についての結果である. 65 [%]の被験者は,“ホタルの光のみによって癒された”と回答しており,83 [%]以上の被験者が“ホタルの光と生息環境に癒された”と感じている.また, 図 4-62 は,“鑑賞後リラックスできたか”を尋ねた結果であり,90 %近くの人が“リラックスできた”と回答している.次に,図 4-63 から図 4-66 は,生態系の構成要素であるせせらぎの音,温度,湿度および香りに対する官能評価の結果であり,音,温度,湿度に関しては,約 80 [%]の人が,香りに関しては 83 [%]の人が快適であると感じていることがわかる.図 4-67 は,鑑賞した“ホタルは本物だ”と感じたかどうかについての結果であり, 61 [%]の人が“本物だ”と感じたと回答している.図 4-68 は,被験者が感じたバーチャルホタルイルミネーションシステムの光の色相を示しており,天然ホタルの光と同様,緑と黄をほぼ半々に感じていることが伺える.これら一連の結果は,天然ホタルの意見分布とほぼ一致している.

以上の事実は,バーチャルホタルイルミネーションシステムが創り出す光が天然のホタルの光と同様な輝度変動および色相を有していることと同時に,人工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,バーチャルホタルイルミネーションシステムを援用した福祉向け人工癒し空間創造への確かな証拠となり得るものである.今後は,バーチャルホタルイルミネーションシステムの有効性をより普遍的に裏付けるためにも,天然のホタルが活動している最中に人工のホタルを設置して,両者が人の感性に及ぼす影響を同時かつ総合的に計測・評価して行く必要がある.

4.2.2. バーチャルイルミネーションシステムの脳波解析

脳波は,一つの発光パターンにつきサンプリングレート 100 [Hz],データ数 12000 [点],時間にして 2 [min]測定した.データを解析する際には,256 点ずつに分割して *FFT* にかけ,積算平均することで *SN* 比を 6 倍程度改善している.また,脳波における α 波,θ 波,β 波の占める割合は,α 波,θ 波,β 波帯域の各パワー値の比（各周波数帯域のパワー値／(α,θ,β 波の総パワー値)）を求めることで算出した.

図 4-69 は,実際に測定した脳波の生データである.図 4-70 は,各発光パターンに対する α 波の占有率を測定回数毎に求めたグラフである.1 回目の測定ではホタル,正弦波,乱数の発光パターンに起因する脳波にそれほど差がないが,2 回目,3 回目と測定回数を重ねるにつれてホタルの発光パターン時に最も α 波が優勢になってくることが分かる.すなわち,リラックスした状態になっていくと考えられる.図 4-71 は,各発光パターンに対する θ 波の占有率を測定回数毎に求めたグラフである.1 回目の測定ではホタル,正弦波,乱数の発光パターンにそれほど差は見られないが,2 回目,3 回目と測定回数を重ねる毎に正弦波と乱数の発光パターン時に θ 波が優勢になり,ホタルの発光パターンの時には少なくなっていることが分かる.すなわち,正弦波や乱数の発光パターンに飽きが生じていると考えられる.図 4-72 は,各発光パターンに対する β 波の占有率を測定回数毎に求めたグラフである.測定を重ねるにつれて,正弦波と乱数の発光パターン時に β 波が優勢になり,ホタルの発光パターンの時には少なくなり,被験者が興奮もなくリラックスしていることが推察できる.

以上の知見を総合すると,1 回目の測定では,発光パターンの違いによって優位になる脳波の違いは見られなかった.しかしながら,2 回目,3 回目と測定回数を重ねるにつれて,ホタルの発光パターンの時に α 波が優位になり,正弦波や乱数のパターンの時に θ 波と β 波が優位になるという結果になった.これは,どの発光パターンも最初は“綺麗だ”と感じているが,時間が経つにつれて正弦波や乱数の発光パターンに飽きが生じ,θ 波が優位になってくるのに比べ,ホタルの発光パターンは長時間鑑賞しても飽きが来

ないためではないかと考えられる.すなわち,生物情報に基づいたバーチャルホタルイルミネーションシステムは,正弦波や乱数に基づいた発光パターンと比較し,より多くの α 波を誘起させることができ,輝度変動および色相など,天然のホタルの光を可能な限り忠実に演出することが可能であると考えられる.

4.3. 生態水槽

本節では，ホタル飼育に関する具体的な成果の指標として，上陸数と羽化個体数，産卵数と孵化個体数について述べる．また，これらの経時変化についても併せて考察する.

まず，上陸数と羽化個体数の測定に際しては，上陸期に各ホタル生態槽で毎夜 20 時～24 時の間に観察を行なった．ホタルの生態槽では，計測領域が限られている上に，ホタル幼虫が発光しながら歩くため比較的容易に上陸個体数を把握することができる．羽化個体数の計測では，30 分置きに細霧作業を行いながら毎夜成虫を採取し，産卵苔を敷いたプラスチックケース（443 [mm] × 265 [mm] × 325 [mm]）に移して生態槽別に匹数を記録した．表 4-2 は，ある生態槽で得られた上陸数と羽化個体数の計測結果とその経時的な推移を表したものである．表 4-2 から，例年順調に上陸数と羽化個体数が推移していることがわかる.

比較的限られた空間内で近縁のホタルを飼育する場合，近親交配などによる個体数の減少やひいては全滅などの恐れが心配される．しかしながら，我々の調査・観察や文献［遊磨正秀：1996］から，自然界のホタルが集団毎にその移動範囲をかなり限定していることが明らかになりつつある.例えば,集団間に小さな橋や堤が存在すれば,ホタルはそれらを乗り越えて移動して行けない．したがって，長年世代継承を続けている自然界でも本生態槽内と類似な交配事情にあるのではないかと推測される.

4.4. せせらぎ空間

4.4.1. ホタル飼育の成果

表 4-3 は,最近 6 年間のせせらぎ空間におけるホタル飼育の具体的な成果の指標であり,産卵数,孵化幼虫数,上陸数及び羽化成虫数とそれらの経時変化を記載したものである.この図から,例年順調に産卵数,孵化幼虫数,上陸数及び羽化成虫数が推移しており,創成したせせらぎ空間が長年に亘りホタルが生息し続ける上で有効に機能していることがわかる.本研究におけるホタルの生息支援技術は,長年の研究に基づき蓄積してきた独自の方法であり,これまで全く前例のないものである.

なお,匹数の計測法は,以下のようである. まず, 各生態槽で羽化したホタルの成虫 5 ペアをガーゼの敷いたケース（深皿シャーレ）に入れて産卵させる. そして全てのペアが産卵し終わった後, 実体顕微鏡でモニタに拡大したものを正確に数えてビデオ, 写真及びコンピューターなどに記録しておく. 最後に, 5 ペアの産卵数の合計を 5 で割り, 出た数を平均産卵数とした. 全体の産卵数は, この平均産卵数に基づいて推定した. 孵化個体数は, 平均産卵数を求めるためにガーゼに産ませた卵が孵化してくる時点において実体顕微鏡で生存と死亡とを確認し, 推定した. このようにして推定したホタルの個体数は, 実際の数よりも下回っていると考えられるが, これは, 生態槽内部で採取しきれなかった多くの成虫個体が水際にさらに数多くの産卵をしており, この数が計測した数の中に含まれていないためである. ここで推定した数は, あくまでも捕獲・視認したものだけに限っている.

4.4.2. せせらぎ空間の感能評価

板橋区ホタル飼育施設では,毎年,ホタルの羽化・発生時期に合わせて夜間公開を実施しており,ホタルの淡く幻想的な光は例年数千から一万人近い見学者を魅了し続けている.これは,現代人に対する精神の癒しや情緒・環境教育などに向けても貴重な試みであると言える.本研究では,この一般公開に合わせて感性工学手法第Ⅱ類に基づいた

解析を実施し,約 1000 人の老若男女被験者集団の中から図 4-75 に示したような解析結果（快適・安らぎ・癒しのレベル）を得ることが出来た.すなわち,見学者のほぼ全てがホタルの淡く幻想的な光や生息環境に「安らぎ」や「癒し」を感じていることをより定量的に評価することができたのである.これは,飼育数の維持・向上以外の,もう一つのせせらぎ空間の成果でもある.

4.5. ホタルの水

4.5.1. ホタル生息環境の水質

表 4-4 は, 山口県から福島県まで, 10 地点のゲンジボタル（以下, ホタル）の生息地において水質を測定した結果である. 表 3-1 と同様に, NO^{2-}・NO^{3-}・NH^{4+}は, テトラテスト(Tetra Test)を用いて測定し, ＜0.1mg/l の表示が最低測定数値であった（現在は NO^{2-}に関しては＜0.3mg/l に変わった）. COD は共立パックテスト(KYORITSU Pack Test)を用いており, 同様に最低測定値は＜0.1mg/l であった. これらの地点では, 同時にカワニナ, メダカ, ドジョウ, エビなどの動物が確認された. 表から, ホタル生息域の水質の特徴として, 以下のことが考えられる： 1. カルシウムを中心とした多様なミネラルが溶存； 2. ほぼ中性に近い弱アルカリ性； 3. 酸素を十分に含む； 4. 亜硝酸の量は微量だが, 硝酸の量は各地域で大きく異なる； 5. アンモニウム化合物が存在しない. 本研究では, この結果の平均値を野外におけるホタル生息下の標準水質とする. なお, ホタル生態槽とせせらぎの水質は, この標準水質に近い値が達成されている［阿部宣男：2004］.

次に, ホタルの生息していないいくつかの水圏の水質について述べる. 表 4-5 は, ホタルの生息しない 7 地点での NO_2, NO_3, アンモニウム化合物量である. A グループは, かつてホタルが生息していワニナ, メダカ, ドジョウ, エビなどの動物は見られなかった. ホタル生息環境の水とた可能性のある農業用水で, B グループは井戸や

池など人工的な環境である．各地点で，カ比較したとき，特にアンモニアの多い水環境は，動物の生息には適さないということが考えられる．A グループの農業用水に関しては，亜硝酸，硝酸の量はホタル生息環境の水と遜色ないが，アンモニアが非常に多かった．一方，B グループに関しては，化学物質の量・種類の違いによらず，井戸，池，公園内の小川では生物が見られなかった．これは，この環境では動物の移入が全くないこと，また，動物が生息可能な生態系が存在しないことに起因すると考えられる．以上のことから，水質では特にアンモニアおよび亜硝酸の量が，また動物の生息には移入出可能な空間的広がりと生態系の存在が必要であることが考えられる．

4.5.2. 亜硝酸とアンモニアの動物への影響

表 4-6 は，ホタル生息環境モデル 2 基における亜硝酸量の経時変化を示したものである．A 槽では，亜硝酸の濃度が常に高く，平均して 0.09mg/l であった．動物の繁殖は見られず，死亡率は高かった（カワニナ 176 匹、メダカ 17 匹）．また，水槽内で藻類・菌類が繁茂した．一方，B 水槽では，亜硝酸が増減を繰り返し，比較的低いレベルを保った．亜硝酸の平均は 0.04mg/l で，これはホタル生息下の標準水質の値に似ていた．B 水槽では，カワニナの繁殖が確認され（200 個体以上），動物の死亡率も低く（カワニナ 0 匹、メダカ 8 匹），水槽内には目立った藻類・菌類の発生は見られなかった．これらの違いが生じた理由は，水槽設置場所による光環境の違いや，水槽内の菌層の形成状態などが考えられるが，残念ながら特定できていない．

A と B を比較したとき，B 水槽でも 7 月 8 日以降の亜硝酸濃度の変動が大きいことから，亜硝酸の変動がすぐに生物の死亡要因に結びつくとは言いがたい．一方，A 水槽では，連続して高い濃度にさらされていた．こうした曝露された期間が死亡率を高めた可能性が考えられる．したがって，短期間の亜硝酸濃度の変化が生物に影響を及ぼす可能性は低いが，ホタル生息環境モデルにおいて，長期的な亜硝酸量の変化は生物の繁殖・生存を知るための指標になることが推測される．

4.5.3. 微生物による化学物質の分解

表 4-7 は，濾過材の組み合わせを変えて実験した水槽内のアンモニア濃度の変動を示す．全体を通して，実験的に加えたアンモニアよりも濃度は減少した．コントロールのアンモニア濃度の減少が見られないことから，アンモニアの減少は気化したことに起因するわけではないことがわかる．ここで，コントロールとは，濾過材を入れていない蒸留水に濃度 0.05mg/l となるようアンモニアを加えたもののことである。他の全ての試行で硝化がおきたことが示唆される．処理した濾過材を用いた試行では，硅砂において硝化が最も遅く，硝化まで 72 時間以上を要した．他の処理した濾過材では，48 時間後にはアンモニアが硝化されており，サンゴ砂，3 種混合，骨炭の順に消化が早かった．一方，非処理の試行では，硅砂が最も早く，以下，3 種混合，サンゴ砂，骨炭の順に消化が早かった．特にサンゴ砂，骨炭では，一時，アンモニア濃度が上昇したことから，濾過材に生物由来のアンモニアが残留していた可能性がある．生物由来でない硅砂においては，残留アンモニアが少なかったのかもしれない．以上の結果から，アンモニアの硝化には，処理した濾過材を用いる際にはサンゴ砂が，非処理の濾過材を用いる際には硅砂が有効であることが示唆される．

次に，表 4-8 は，濾過材の組み合わせを変えて実験した水槽内の亜硝酸濃度の変動である．全体を通して，コントロールと比較し，実験的に加えた亜硝酸よりも濃度が上昇しているが，これは試験水に含まれていた有機物から生じたためと思われる．処理した濾過材を用いた試行では，亜硝酸は増減を繰り返し，およそ 1 ヶ月後には標準的なホタル生息環境レベルに下降した．一方、非処理の濾過材を用いた試行では，亜硝酸の増加後，その濃度が減少することはなかった．また，濾過材の組み合わせによって異なる影響が生じる可能性が示された．非処理の硅砂と骨炭を比べたとき，骨炭の方が濃度はより高かった．これは，骨炭表面や内部に有機物やおそらくはアンモニアが残留し，それが分解されて亜硝酸になったためかもしれない．

以上のように，アンモニアや亜硝酸の硝化は，菌層の発達によって促進され，その

発達にはそれぞれおよそ1ヶ月以上要することが示された．また，濾過材によって，硝化作用が安定するまでに時間が異なることが示された．こうした傾向はホタル生息環境モデルでも見られ，より大きな環境である本ホタル生息環境モデルでは約3ヶ月を要する［阿部、未発表］．こうしたより自然の状態に近い菌相の発達についての知見を得るためには，野外で実験・観察する必要がある．

4.5.4. 窒素化合物とアンモニア化合物の動態

図4-73は，ホタル生息環境モデル内における，アンモニウム化合物および窒素系化合物の経時変化である．初めにカワニナとメダカを導入したときにアンモニウム化合物が見られたが，その後は確認されなかった．平成10年3月5日と4月24日に見られた亜硝酸の急増は，動物を移入したことによる影響であると考えられる．それらが減少するのに，およそ15−20日を要した．この実験で得られた化学物質の値は，野外で測定された，ホタル生息の標準水質の値とよく似ていた．アンモニアの発生は平成10年3月5日に確認されたが，その後発生は見られなかったことから，アンモニアは亜硝酸に比べて発生頻度あるいは量が少ないか，除去が容易であることが確認された．また，これらの結果から，野外条件では，化学物質の除去に微生物による分解や流水（実験では交換）が重要な役割を果たしていると思われる．

4.5.5. ホタル生息環境への硝化システムの導入と今後の課題

本研究の最終的な目的は，ホタルが野外で生存・繁殖できるための，一時的ではない環境を整備することである．その達成のためには，われわれのホタルの生息環境に対する知識，つまりホタルを取り巻く物理的，生物的そして人的環境の相互関係について理解をより深める必要がある．例えば，ホタル生息環境モデルに微生物を利用した硝化システムを導入するにあたって，以下のような注意が必要であろう．まず，硝化細菌相の発達のために，砂礫など適切な濾過材を選定する．次に，動物の移入や水の交換は，硝化の安定を崩さないことを考慮して行う．最後に，硝化で分解しきれなかった場合，有機物を水槽内から除去することがあげられる．こうした成果の一部は

記述しており［阿部宣男：2004］，板橋区ホタル飼育施設内の，生態槽（＝ホタル生息環）という小さな生態系にも微生物の活動が欠かせないことを意味する．

ホタルの生息する場所，特に河川は上流から下流まで非常に大きな生態系を含み，その全てを理解するのは困難である．［阿部宣男：2004］の研究では，ホタルの生息している地点の環境・生態系のみを抽出して議論しており，河川という生態系全体を考慮しているわけではない．また，ホタルの移入によって現存する他の生物を脅かしてはいけない．したがって，河川全体の生態系を考慮しなければホタルの安定した繁殖は望めないだろう．ホタルの生息する環境をより広げるために，今後は，ホタル生息域に加え，その周縁の広域かつ詳細な環境調査が望まれる．

4.6. ホタルの発光パターンに見られる温熱環境依存性

4.6.1. ゲンジボタルの温度変化

図4-74は，一例として板橋区ホタル飼育施設で採取した東日本型のゲンジボタル（雄）の温度変化に対する明滅間隔の変化を示したものである．表4-9は，各温度での個体数，データ数，平均及び標準偏差を示したものである．ホタルをベンチレータに入れ温度を*15* [℃]から*25* [℃]まで温度上昇させその後，*25* [℃]から*15* [℃]まで温度低下させた時の各温度での明滅間隔の平均と信頼区間を求めたものである．この時の湿度は，*80*〜*95* [%]である．*25* [℃]時は，ほぼ*1.4* [sec]周期で明滅し，*15* [℃]時は，*2.13*〜*2.76* [sec]周期で明滅している．ホタルは，温度が上昇すると徐々に発光間隔は短くなり，逆に温度が低下すると発光間隔は長くなることから，発光パターンは，環境条件に依存することが読みとれる．

図4-75は，一例として板橋区ホタル飼育施設で採取した東日本型のゲンジボタル（雌）の温度変化に対する明滅間隔の変化を示したものである．表4-10は，各温度での個体数，データ数，平均及び標準偏差を示したものである．*25* [℃]時は，ほぼ*1.4* [sec]

周期で明滅していることが分かり，*15* [℃]時は，*1.92～2.59* [sec]周期で明滅している．ホタルの発光パターンは，温度が上昇すると発光間隔は短くなり，逆に温度が低下すると発光間隔は長くなることから，発光パターンは，環境条件に依存することが読みとれる．

図 4-76 は，一例として徳島県池田町で採取した西日本型のゲンジボタル（雄）の温度変化に対する明滅間隔の変化を示したものである．表 4-11 は，各温度での個体数，データ数，平均及び標準偏差を示したものである．*25* [℃]時は，ほぼ *1.4* [sec]周期で明滅し，*15* [℃]時は，ほぼ *2.7* [sec]周期で明滅していることが読みとれる．西日本型のホタルの発光パターンも東日本型のホタル同様に，温度が上昇すると発光間隔は短くなり，逆に温度が低下すると発光間隔は長くなることから，発光パターンの違いは，型の違いによるものでは無く環境条件に依存することが読みとれる．

図 4-77 は，一例として徳島県池田町で採取した西日本型のゲンジボタル（雌）の温度変化に対する明滅間隔の変化を示したものである．表 4-12 は，各温度での個体数，データ数，平均及び標準偏差を示したものである．*25* [℃]時は，*1.37～1.66* [sec]周期で明滅しているのが読みとれ，*15* [℃]時は，*2.11～2.79* [sec]周期で明滅しているのが分かる．西日本型のホタルの発光パターンも東日本型のホタル同様に，温度が上昇すると発光間隔は短くなり，逆に温度が低下すると発光間隔は長くなることから，発光パターンの違いは，種の違いにより起こるのでは無く環境条件に依存することが読みとれる．

図 4-78 は，一例として北九州で採取した西日本型のゲンジボタル（雄）の温度変化に対する明滅間隔の変化を示したものである．表 4-13 は，各温度での個体数，データ数，平均及び標準偏差を示したものである．*25* [℃]時は，ほぼ *1.7* [sec]周期で明滅し，*15* [℃]時は，ほぼ *2.5* [sec]周期で明滅しているのが読みとれる．西日本型のホタルも東日本型のホタル同様に，温度が上昇すると明滅間隔は短くなり，逆に温度が低下すると明滅間隔は長くなることから，発光パターンの違いは，種の違いによるものでは

無く環境条件に依存することが読みとれる．

図 4-79 は，一例として北九州で採取した西日本型のゲンジボタル（雌）の温度変化に対する明滅間隔の変化を示したものである．表 4-14 は，各温度での個体数，データ数，平均及び標準偏差を示したものである．*25* [℃]時は，ほぼ *1.67～2.00* [sec]周期で明滅し，*15* [℃]時は，*2.66～3.26* [sec]周期で明滅している．ホタルの発光パターンは，温度が上昇すると発光間隔は短くなり，逆に温度が低下すると発光間隔は長くなることから，発光パターンは、環境条件に依存することが読みとれる．

図 4-80 は，それぞれの地域で採取したゲンジボタル（雄）の温度変化に対する明滅間隔の変化の平均を示したものである．表 4-15 は、各温度での総個体数、総データ数，平均及び標準偏差を示したものである．*25* [℃]時には、*1.3～1.44* [sec]周期で明滅し，*15* [℃]時は，ほぼ *2.28* [sec]周期で明滅している．ゲンジボタルの発光パターンは，温度が上昇すると発光間隔は短くなり，逆に温度が低下すると発光間隔は長くなることから，発光パターンの違いは，種の違いによるものでは無く環境条件に依存することが読みとれる．

図 4-81 は，それぞれの地域で採取したゲンジボタル（雌）の温度変化に対する明滅間隔の変化の平均を示したものである．表 4-16 は，各温度での総個体数，総データ数，平均及び標準偏差を示したものである．*25* [℃]時には，*1.41～1.48* [sec]周期で明滅し，*15* [℃]時は，*2.18～2.70* [sec]周期で明滅している．ゲンジボタルの発光パターンは，温度が上昇すると明滅間隔は短くなり，逆に温度が低下すると明滅間隔は長くなることから，発光パターンの違いは，種の違いによるものでは無く環境条件に依存することが読みとれる．

ゲンジボタルを，*15* [℃]から *25* [℃]まで温度上昇させその後，*25* [℃]から *15* [℃]まで温度低下させた時の各温度での明滅間隔は，温度上昇させた時と温度低下させた時では，同一温度で明滅間隔に差が生じる．温度を低下させた時の方が同一温度で明滅間隔が長くなる傾向にある．

図 4-82 は，一例として徳島県池田町で採取した西日本型のゲンジボタル（雄）の温度変化に対する明滅間隔の変化を示したものである．表 4-17 は，各温度での個体数，データ数，平均及び標準偏差を示したものである．ここでは、ホタルをベンチレータに入れて温度を *25* [℃]から *15* [℃]まで温度低下させ，その後，*15* [℃]から *25* [℃]まで温度上昇させた時の各温度での明滅間隔の平均と信頼区間を求めている．*25* [℃]時はほぼ *1.38*～*1.57* [sec]周期で明滅し，*15* [℃]時は *2.80*～*3.26* [sec]周期で明滅している．ホタルは，温度が上昇すると徐々に発光間隔が短くなり，逆に温度が低下すると発光間隔が長くなることから，発光パターンは，環境条件に依存することが読みとれる．なお，明滅間隔は，図 4-76 からも明らかなように，*15* [℃]から *25* [℃]まで温度上昇させ，その後，*25* [℃]から *15* [℃]まで温度低下させた条件の各温度での明滅間隔とほぼ同じ傾向が見られた．

図 4-83 は，徳島県池田町で採取したゲンジボタル（雌）の温度変化に対する明滅間隔の変化の平均を示したものである．表 4-18 は，各温度での総個体数，総データ数，平均及び標準偏差を示したものである．*25* [℃]時には *1.76*～*2.29*[sec]周期で明滅し，*15* [℃]時は *3.59*～*4.1* 周期で明滅している．ゲンジボタルの発光パターンは，温度が上昇すると発光間隔が短くなり，逆に温度が低下すると発光間隔が長くなることから，発光パターンの違いは，型の違いによるものでは無く環境条件に依存することが読みとれる．

図 4-84 は，一例として北九州で採取した西日本型のゲンジボタル（ペア）の温度変化に対する明滅間隔の変化を示したものである．表 4-19 は，各温度での個体数，データ数，平均及び標準偏差を示したものである．*25* [℃]時は *1.72*～*1.91* [sec]周期で明滅し，*15* [℃]時は *3.58*～*4.07* [sec]周期で明滅している．ホタルの発光パターンは，温度が上昇すると発光間隔が短くなり，逆に温度が低下すると発光間隔が長くなることから，発光パターンは、環境条件に依存することが読みとれる．

図 4-85 は，一例として秋田で採取した東日本型のゲンジボタル（ペア）の温度変化

に対する明滅間隔の変化を示したものである．表 4-20 は，各温度での個体数，データ数，平均及び標準偏差を示したものである．*25* [℃]時は *1.66*～*2.38* [sec]周期で明滅し，*15* [℃]時は *2.82*～*3.55* [sec]周期で明滅している．ホタルの発光パターンは，温度が上昇すると発光間隔が短くなり，逆に温度が低下すると発光間隔が長くなることから，発光パターンは、環境条件に依存することが読みとれる．

図 4-86 は，板橋区ホタル飼育施設で採取した東日本型のゲンジボタル（ペア）の温度変化に対する明滅間隔の変化を示したものである．表 4-21 は，各温度での個体数，データ数，平均及び標準偏差を示したものである．*22* [℃]時は *1.49*～*2.03* [sec]周期で明滅していることが分かり，*15* [℃]時は *3.52*～*3.91* [sec]周期で明滅している．ホタルの発光パターンは，温度が上昇すると発光間隔が短くなり，逆に温度が低下すると発光間隔が長くなることから，発光パターンは，環境条件に依存することが読みとれる．

ゲンジボタルは，*25* [℃]から *15* [℃]まで温度が低下する途上と，*15* [℃]から *25* [℃]まで温度が低下する途上とでは，同一温度でも明滅間隔に差が生じる．また，*15* [℃]から *25* [℃]まで温度上昇させ，その後，*25* [℃]から *15* [℃]まで温度低下させた場合にも生じている．いずれも，温度が低下する途上の方が同一温度でもより長い明滅間隔になる傾向にある．原因としては，ルシフェラーゼの活性や反応速度が，温度などの条件によって左右されることが考えられる．ホタルのルシフェラーゼを使用した実験で，光の強度が気圧や温度に影響されるとの報告がある［Ueda : 1994］．この実験で，光の最大強度を示したのが 22.5℃で，ある程度の温度条件下（22.5～32℃）で加圧すると，光の強度が増加する傾向が示された．しかし，温度による反応速度の変化や生体内で同様な働きが観察されるかについては，詳細な記載がなかった．現段階においては，この原因については不明であり，今後の研究課題となる．

4.6.2. ヘイケボタルの温度変化

図 4-87 は，一例として板橋区ホタル飼育施設で採取したヘイケボタル（雄）の温度変化に対する明滅間隔の変化を示したものである．表 4-22 は，各温度での個体数，デ

ータ数，平均及び標準偏差を示したものである．ホタルをベンチレータに入れて温度を *15* [℃]から *25* [℃]まで温度上昇させ，その後，*25* [℃]から *15* [℃]まで温度低下させた時の各温度での明滅間隔の平均と信頼区間を求めたものである．*25* [℃]時は，*0.6*～*0.9* [sec]周期で明滅していることが分かる．*15* [℃]時は，ほぼ *1.2* [sec]周期で明滅している．ヘイケボタルの発光パターンは，温度が上昇すると発光間隔は短くなり，逆に温度が低下すると発光間隔は長くなることから，ゲンジボタル同様に，発光パターンの違いは，環境条件に依存することが読みとれる．

図 4-88 は，一例として板橋区ホタル飼育施設で採取したヘイケボタル（雌）の温度変化に対する明滅間隔の変化を示したものである．表 4-23 は，各温度での個体数，データ数，平均及び標準偏差を示したものである．*25* [℃]時は，*0.72*～*1.20* [sec]周期で明滅していることが分かる．*15* [℃]時は，*1.38*～*1.89* [sec]周期で明滅していることが読みとれる．ヘイケボタルの発光パターンは，温度が上昇すると発光間隔は短くなり，逆に温度が低下すると発光間隔は長くなることから，発光パターンの違いは，環境条件に依存することが読みとれる．

図 4-89 は，一例として板橋区ホタル飼育施設で採取したヘイケボタル（雌）の温度変化に対する明滅間隔の変化を示したものである．表 4-24 は，各温度での個体数，データ数，平均及び標準偏差を示したものである．*25* [℃]時は，*0.42*～*0.92* [sec]周期で明滅していることが分かる．*15* [℃]時は，*0.74*～*1.10* [sec]周期で明滅していることが読みとれる．ヘイケボタルの発光パターンは，温度が上昇すると発光間隔が短くなり，逆に温度が低下すると発光間隔が長くなることから，発光パターンの違いは，環境条件に依存することが読みとれる．

図 4-90 は，一例として板橋区ホタル飼育施設で採取したヘイケボタル（ペア）の温度変化に対する明滅間隔の変化を示したものである．表 4-25 は，各温度での個体数，データ数，平均及び標準偏差を示したものである．ホタルをベンチレータに入れて温度を *25* [℃]から *15* [℃]まで温度低下させ，その後，*15* [℃]から *25* [℃]まで温度上昇

させた時の各温度での明滅間隔の平均と信頼区間を求めたものである．*25* [℃]時は，*0.46*～*0.51* [sec]周期で明滅していることが分かる．*15* [℃]時は，*0.81*～*2.26* [sec]周期で明滅している．*15* [℃]から *25* [℃]まで温度上昇させ，その後，*25* [℃]から *15* [℃]まで温度低下させた条件の各温度での明滅間隔と同様に，温度を低下させた時の方が同一温度でも明滅間隔が長くなる傾向にある．ヘイケボタルの発光パターンは，温度が上昇すると発光間隔が短くなり，逆に温度が低下すると発光間隔が長くなることから，ゲンジボタル同様に，発光パターンの違いは，環境条件に依存することが読みとれる．

生物情報に基づいた客観的統計分析から，ホタルの発光パターンは，採取場所，型，雌雄，個体に関わらず，周囲温度・湿度・気圧などの環境要因に依存する．ホタルの明滅間隔は，温度を上昇させてから温度を低下させると，温度を上昇させた時と低下させた時の同一温度で明滅間隔に差が生じる，温度を低下させた時の方が同一温度で明滅間隔が長くなる傾向にある．

4.6.3. 温熱環境による発光パターンの変化

ゲンジボタルとヘイケボタルに関する，温熱環境による明滅間隔の一連の実験から，その関連性を総合的に考察する．*15* [℃]から *25* [℃]まで温度上昇させた後，*25* [℃]から *15* [℃]まで温度低下させた時と，逆に *25* [℃]から *15* [℃]まで温度低下させた後，*15* [℃]から *25* [℃]まで温度上昇させた時の，各温度での明滅間隔を測定した．この二つの条件下で，種ごとに各地域で採取した雄・雌・雄と雌を一緒に入れたペアで実験を行なった結果，明滅間隔にある一定の傾向が見られた．温度上昇に伴い，明滅間隔は短くなる傾向が見られ，それに対し温度を下降させていくと，明滅間隔は長くなる．ゲンジボタルに比べ，ヘイケボタルの間隔は全体的に短いなどの種ごとの基本的な違いはみられるが，両種とも採取場所，雌雄，個体に関係なく，同様の結果が得られた。つまり，明らかに温度変化がホタルの発光パターンに影響していることが示唆される．

ゲンジボタルの発光パターンに関しては，糸魚川静岡構造線を境に西が西日本型，東が東日本型に分けられ，前者が 2 秒間隔，後者が 4 秒間隔に明滅するといわれてい

る［Ohba：1983, 1984, 大場：1986, 1988］. これらの両集団の分布境界域には，約 3 秒の中間型の存在が確認されたとの報告もある［大場：1991］. この説に基づき，使用したゲンジボタルを分類する. 北九州・徳島で採取したものは西日本型（2 秒間隔）に属し，板橋・秋田で採取したものは東日本型（4 秒間隔）に属する. 温度環境を変化させても，前者の明滅間隔は 2 秒のまま一定であり，後者は 4 秒のまま一定にならなければならない. しかし，本実験結果からは，このような傾向は見られず，西日本型・東日本型関係なく，温度上昇に伴い明滅間隔は短くなる傾向を示し，温度を下降に伴い明滅間隔は長くなる傾向を示した. 温度変化に明滅間隔が影響を受けていることが明らかになった.

本研究から，ホタルの発光パターンは，西日本型と東日本型の違い，採取場所，雌雄，個体に関わらず，周囲温度・湿度・気圧などの環境要因に依存すると考えられる. 中でも，周囲の温度環境に大きく影響され，発光パターンと温度の深い関連性が示唆された.

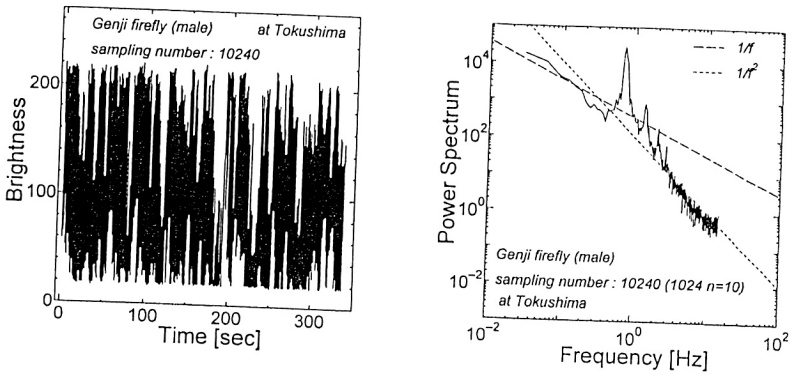


Fig.4-1 Brightness and Power Spectrum for a Light Emission Pattern ofGenji Firefly (Male, *21* [℃])

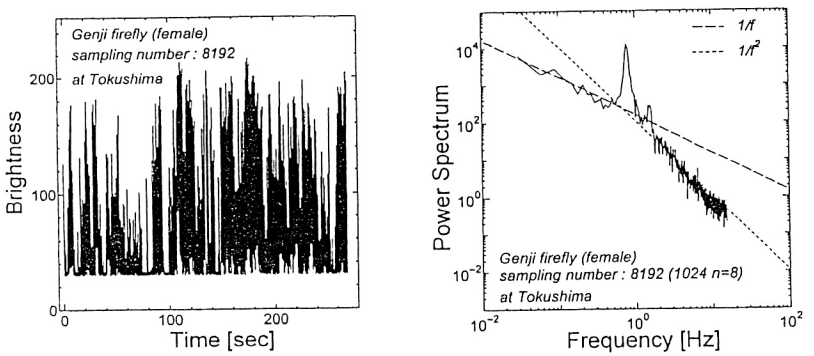


Fig.4-2 Brightness and Power Spectrum for a Light Emission

Pattern of Genji Firefly (Female, *21* [℃])

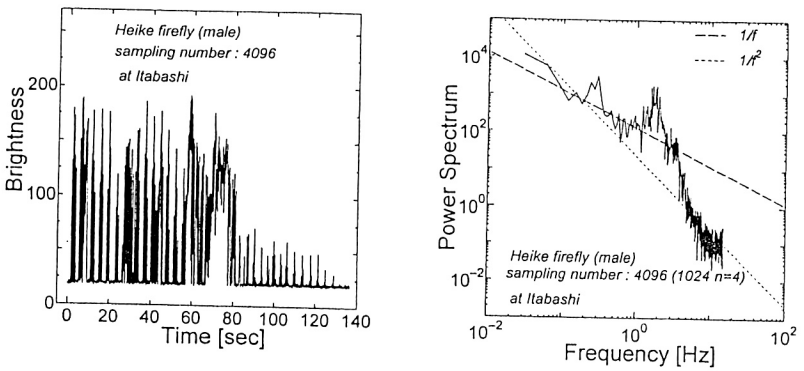


Fig.4-3 Brightness and Power Spectrum for a Light Emission

Pattern of Heike Firefly (Male, *24* [℃], *1007* [mb])

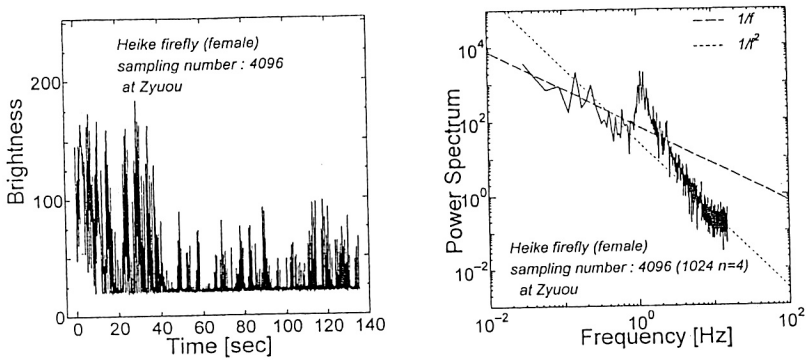


Fig.4-4 Brightness and Power Spectrum for a Light Emission Pattern of Heike Firefly (Female, *26* [℃], *1008* [mb])

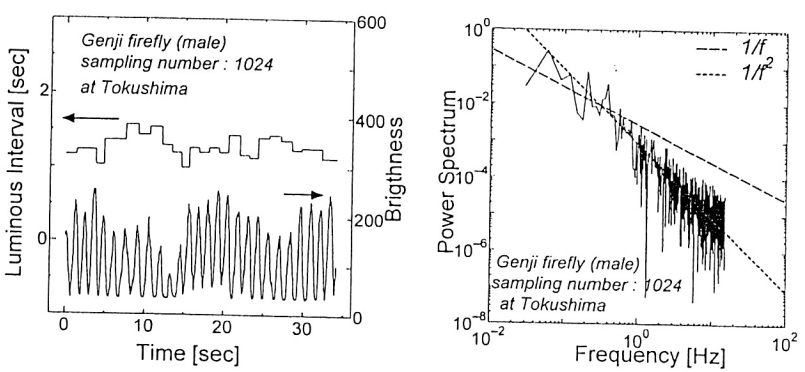


Fig.4-5 Transient Luminous Interval and Power Spectrum for a Light Emission Pattern of Genji Firefly (Male, *22* [℃], *1012* [mb])

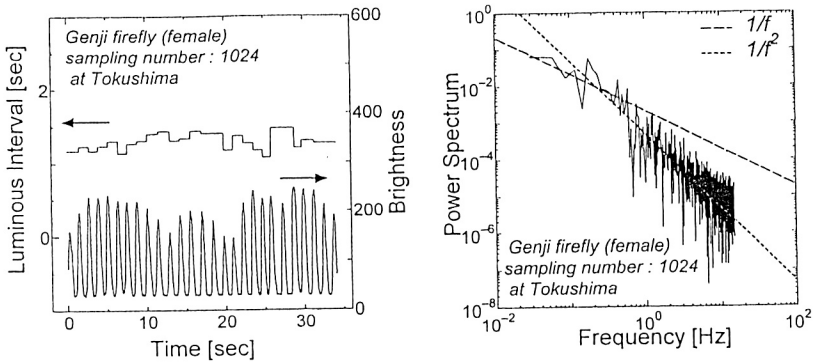


Fig.4-6 Transient Luminous Interval and Power Spectrum for a Light Emission Pattern of Genji Firefly (Female, *21* [℃])

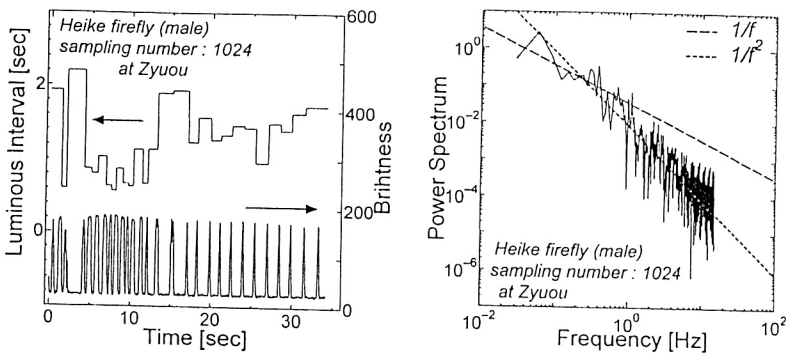


Fig.4-7 Transient Luminous Interval and Power Spectrum for a Light Emission Pattern of Heike Firefly (Male, *29*[℃], *1009* [mb])

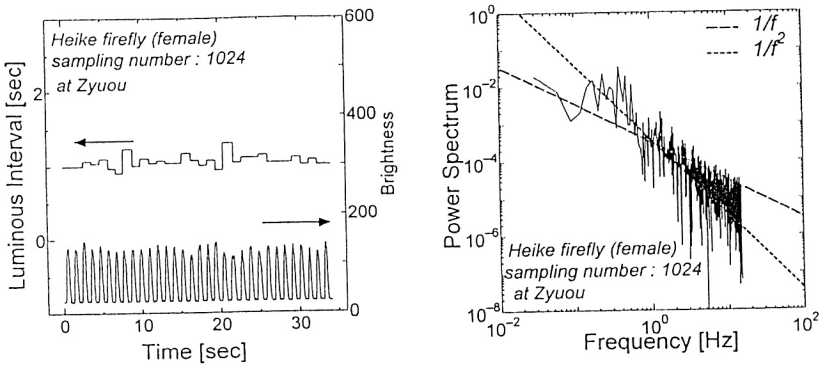


Fig.4-8 Transient Luminous Interval and Power Spectrum for a Light Emission Pattern of Heike Firefly (Female, *28* [℃], *1009* [mb])

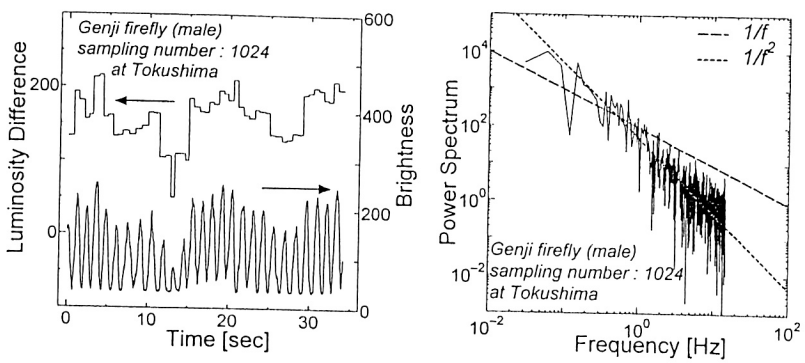


Fig.4-9 Transient Luminosity Difference and Power Spectrum for a Light Emission Pattern of Genji Firefly (Male, *22* [℃], *1012* [mb])

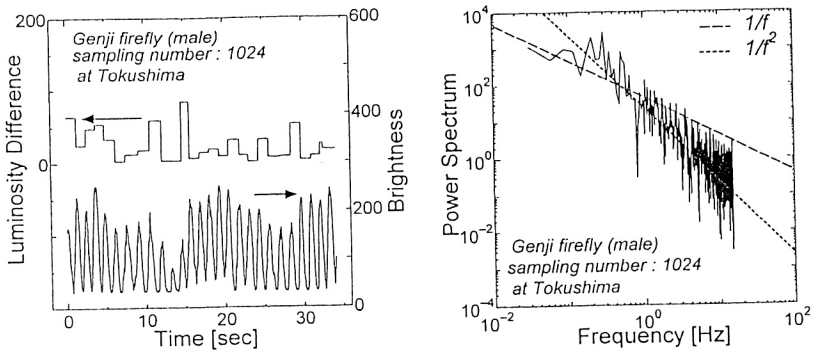


Fig.4-10 Transient Luminosity Difference and Power Spectrum for a Light Emission Pattern of Genji Firefly (Male, *22* [℃], *1012* [mb])

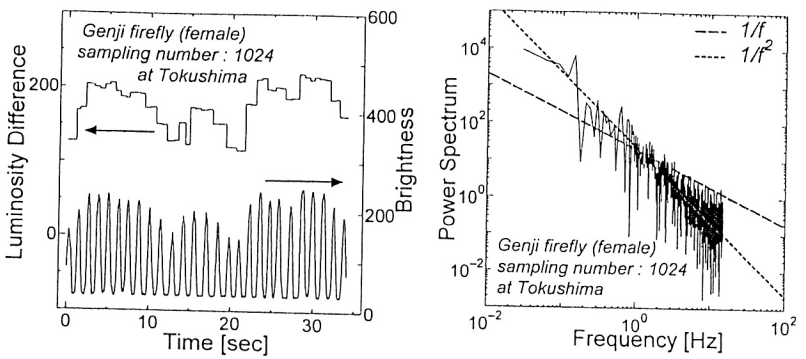


Fig.4-11 Transient Luminosity Difference and Power Spectrum for a Light Emission Pattern of Genji Firefly (Female, *21* [℃])

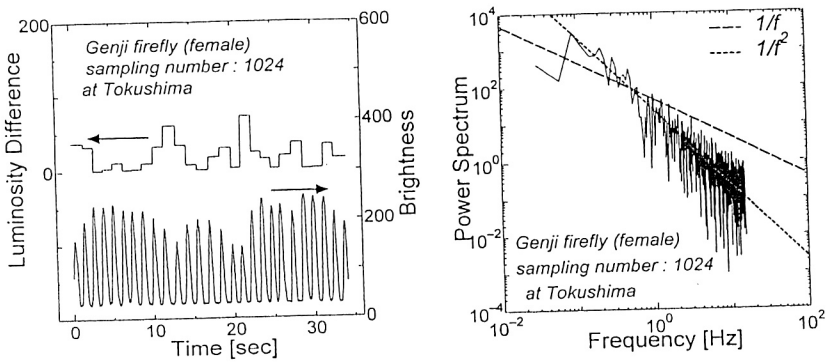


Fig.4-12 Transient Luminosity Difference and Power Spectrum for a Light Emission Pattern of Genji Firefly (Female, *21* [℃])

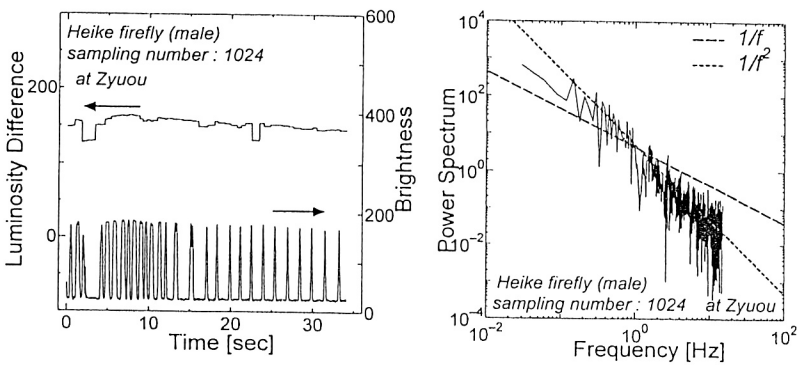


Fig.4-13 Transient Luminosity Difference and Power Spectrum for a Light Emission Pattern of Heike Firefly (Male, *29* [℃], *1005* [mb])

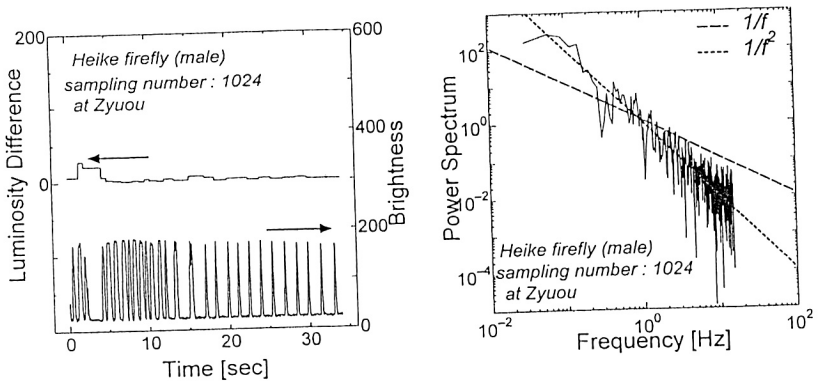


Fig.4-14 Transient Luminosity Difference and Power Spectrumfor a Light Emission Pattern of Heike Firefly (Male, *29*[℃], *1005* [mb])

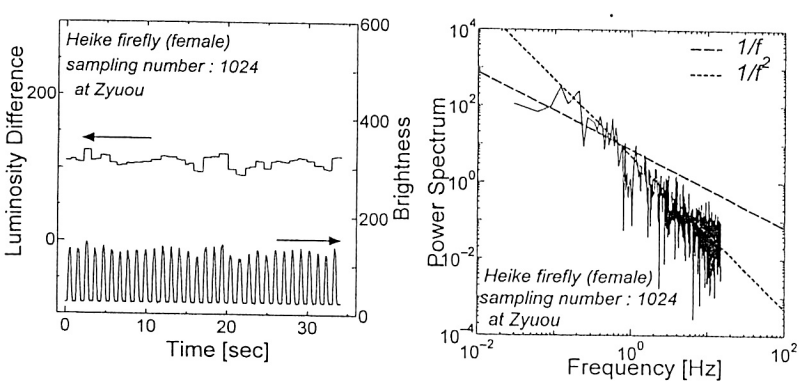


Fig.4-15 Transient Luminosity Difference and Power Spectrum for a Light Emission Pattern of Heike Firefly (Female, *28* [℃], *1009* [mb])

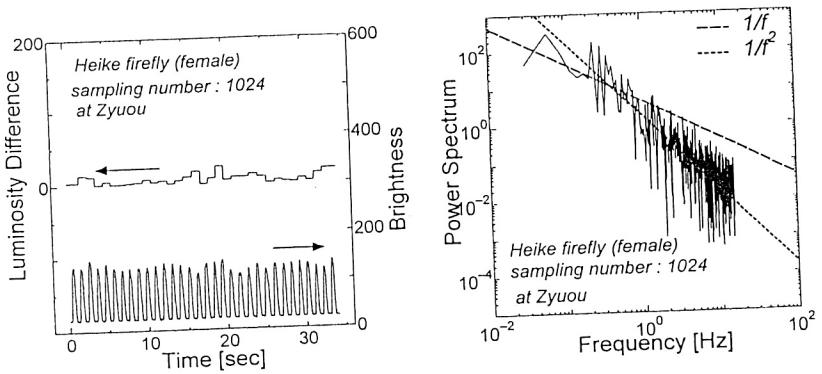


Fig.4-16 Transient Luminosity Difference and Power Spectrum for a Light Emission Pattern of Heike Firefly (Female, *28* [℃], *1009* [mb])

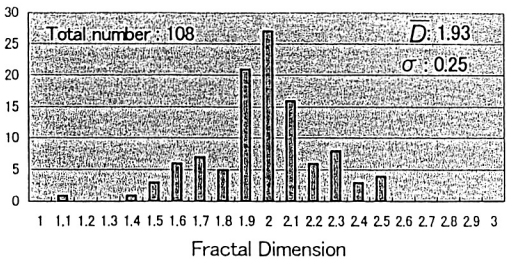


Fig.4-17 Distribution of Fractal Dimension for Light Emission Pattern of Genji Firefly (Male)

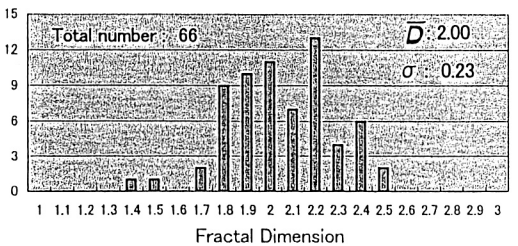


Fig.4-18 Distribution of Fractal Dimension for Light Emission Pattern of Genji Firefly (Female)

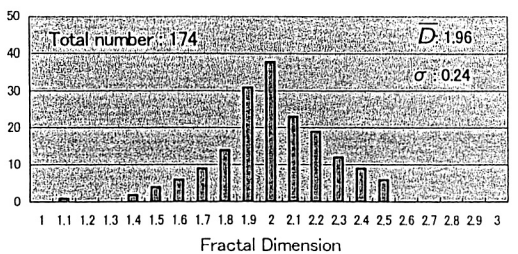


Fig.4-19 Distribution of Fractal Dimension for Light Emission Pattern of Genji Firefly

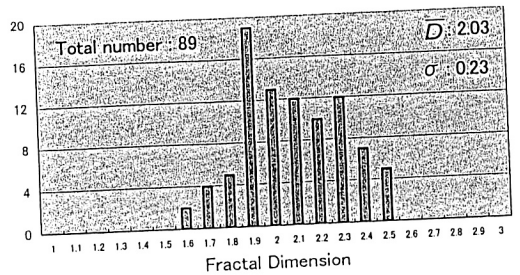


Fig.4-20 Distribution of Fractal Dimension for Light Emission Pattern of Heike Firefly (Male)

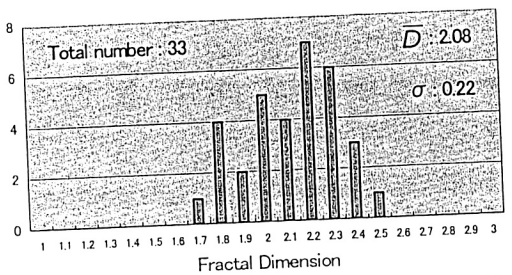


Fig.4-21 Distribution of Fractal Dimension for Light Emission Pattern of Heike Firefly (Female)

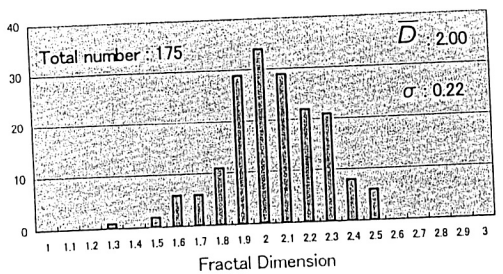
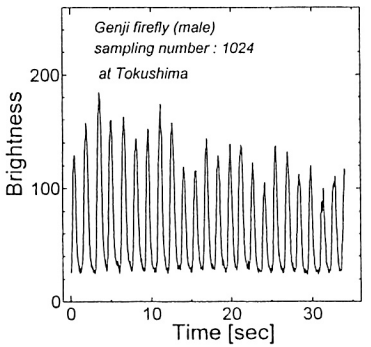
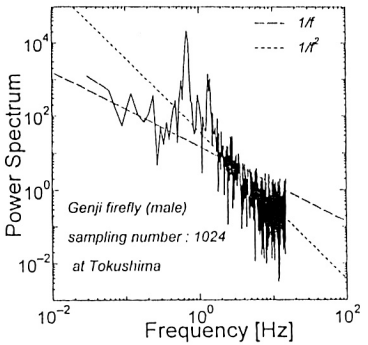


Fig.4-22 Distribution of Fractal Dimension for Light Emission Pattern of Heike Firefly





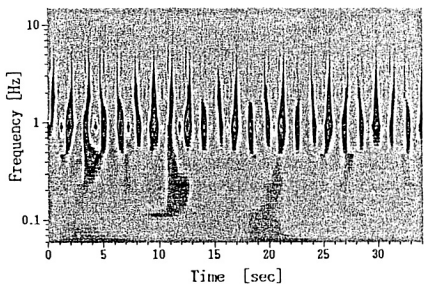


Fig.4-23 Frequency Characteristics of a Light Emission Pattern of Genji Firefly (Male, *25* [℃], *1003* [mb])

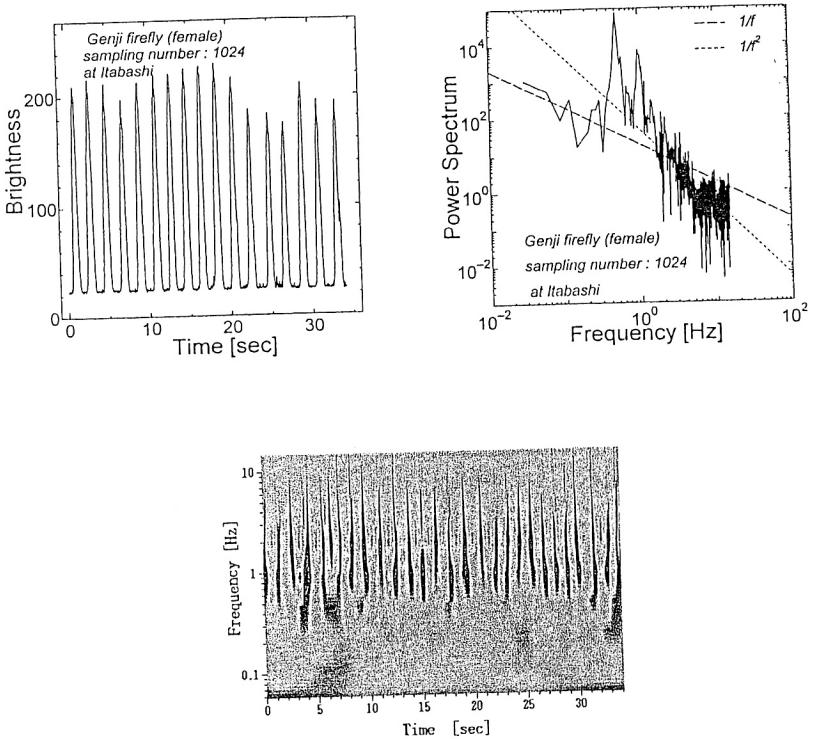


Fig.4-24 Frequency Characteristics of a Light Emission Pattern of Genji Firefly (Female, *25* [℃], *1007* [mb])

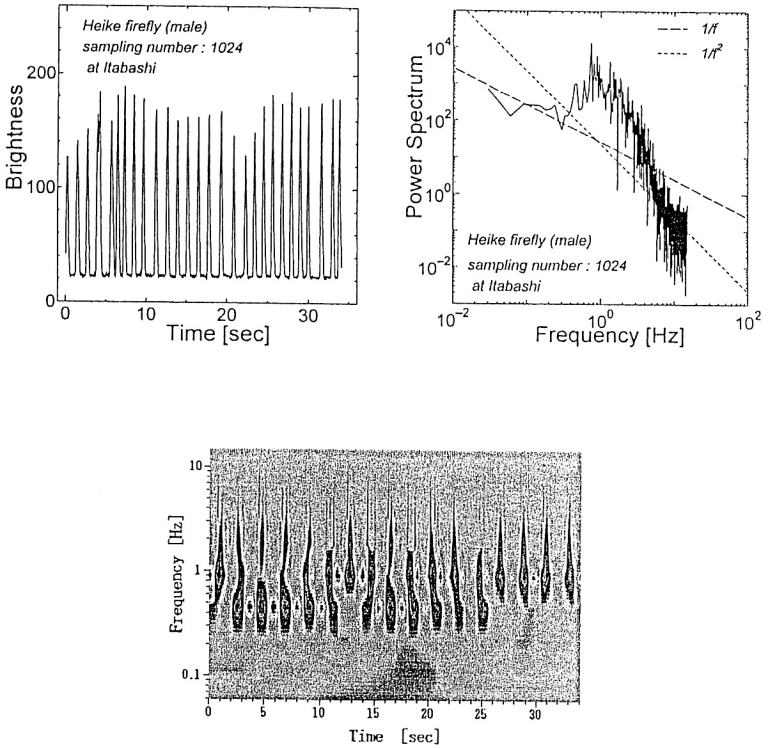


Fig.4-25 Frequency Characteristics of a Light Emission Pattern of Heike Firefly (Male , *25* [℃], *1009* [mb])

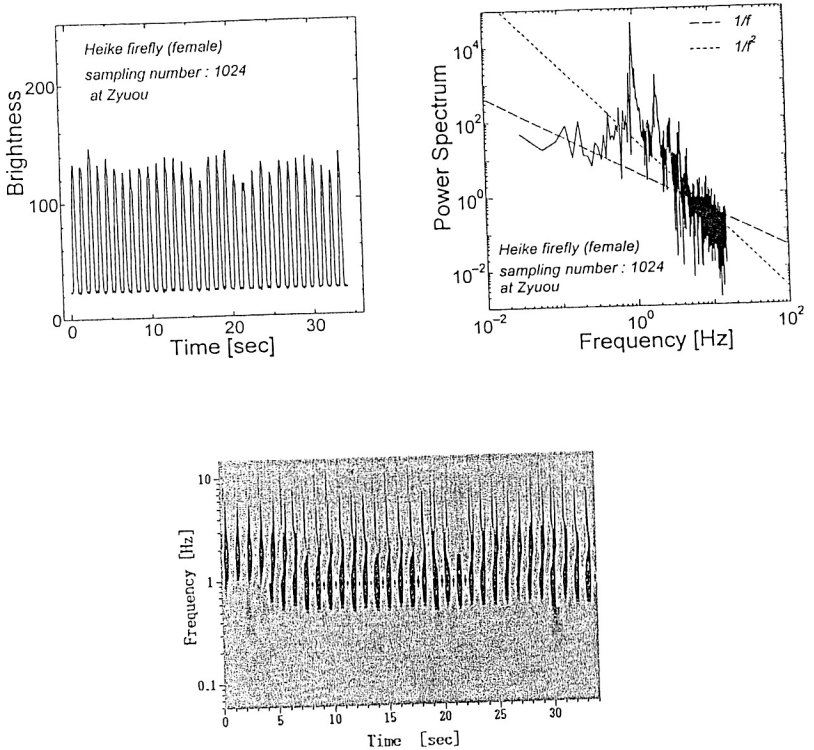


Fig.4-26 Frequency Characteristics of a Light Emission Pattern of Heike Firefly (Female , *28* [℃], *1009* [mb])

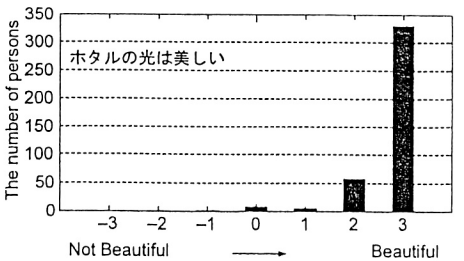


Fig.4-27 The Feeling to the Light of Firefly (Genji Firefly)

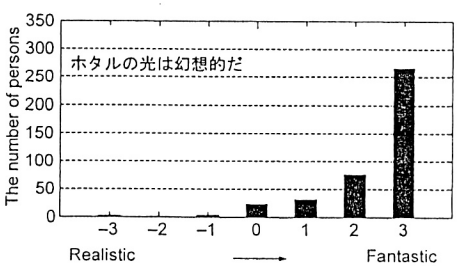


Fig.4-28 The Feeling to the Light of Firefly (Genji Firefly)

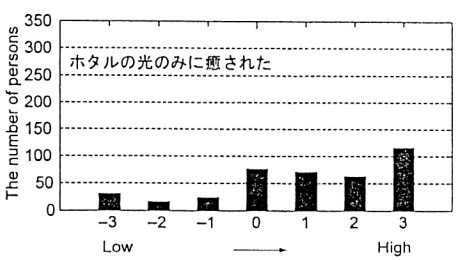


Fig.4-29 The Healing Effect Due to Only the Light of Firefly (Genji Firefly)

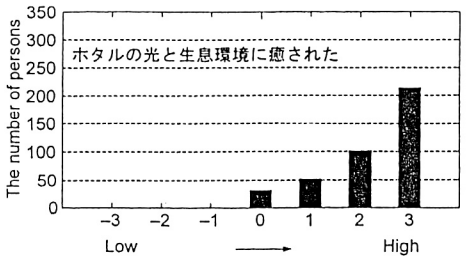


Fig.4-30 The Heeling Effect Due to the Whole Environment (Genji Firefly)

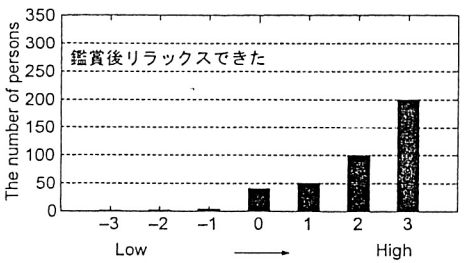


Fig.4-31 The Healing Effect Due to the Appreciation (Genji Firefly)

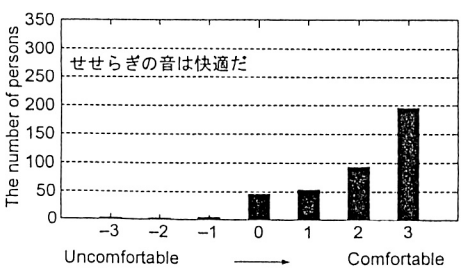


Fig.4-32 The Comfortable Sounds of Stream (Genji Firefly)

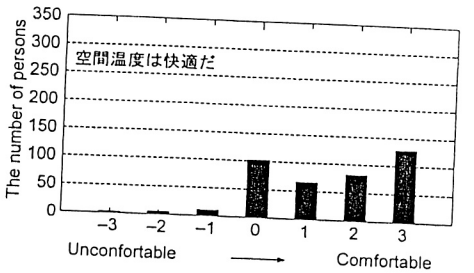


Fig.4-33 The Comfortable Ambient Temperature (Genji Firefly)

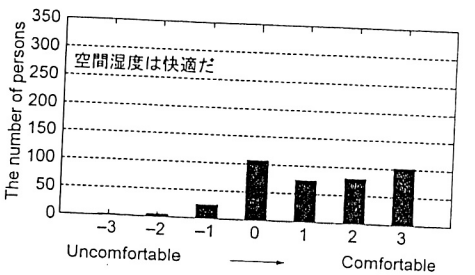


Fig.4-34 The Comfortable Ambient Moisture (Genji Firefly)

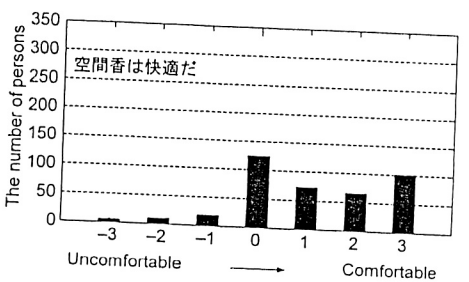


Fig.4-35 The Comfortable Ambient Perfume (Genji Firefly)

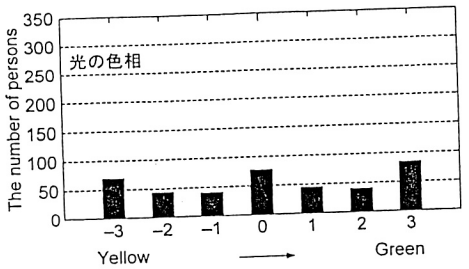


Fig.4-36 The Color Phase of the Light (Genji Firefly)

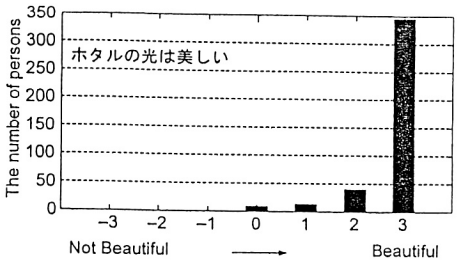


Fig.4-37 The Feeling to the Light of Firefly (Heike Firefly)

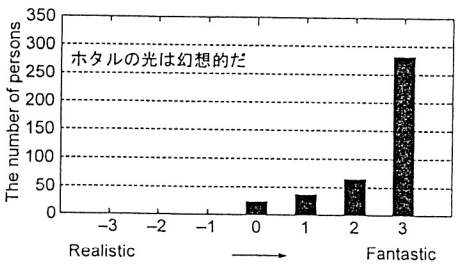


Fig.4-38 The Feeling to the Light of Firefly (Heike Firefly)

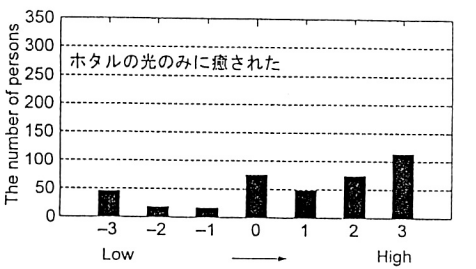


Fig.4-39 The Healing Effect Due to Only the Light of Firefly (Heike Firefly)

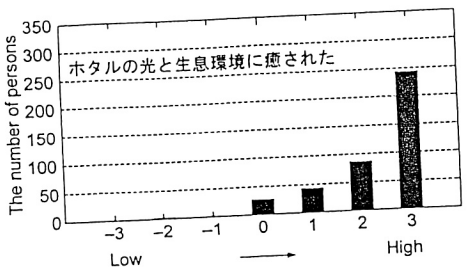


Fig.4-40 The Heeling Effect Due to the Whole Environment (Heike Firefly)

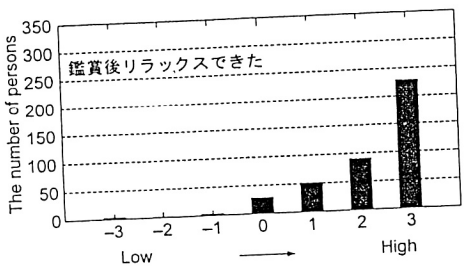


Fig.4-41 The Healing Effect Due to the Appreciation (Heike Firefly)

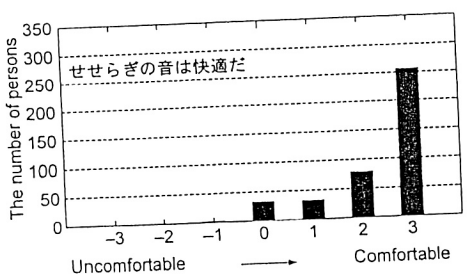


Fig.4-42 The Comfortable Sounds of Stream (Heike Firefly)

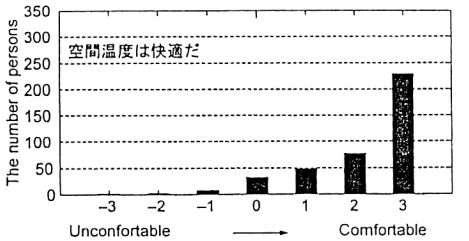


Fig.4-43 The Comfortable Ambient Temperature (Heike Firefly)

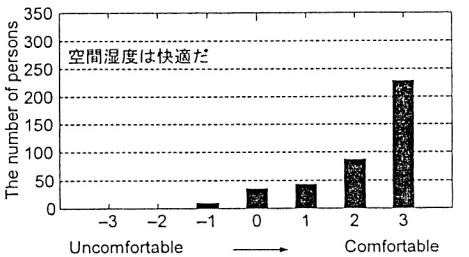


Fig.4-44 The Comfortable Ambient Moisture (Heike Firefly)

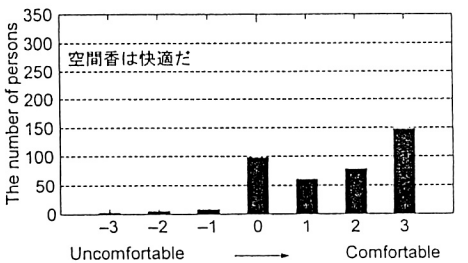


Fig.4-45 The Comfortable Ambient Perfume (Heike Firefly)

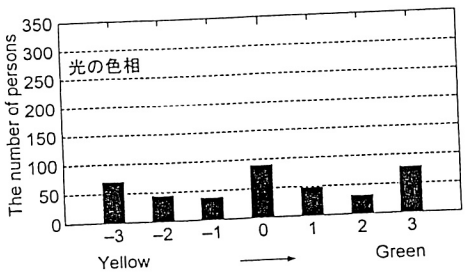


Fig.4-46 The Color Phase of the Light (Heike Firefly)

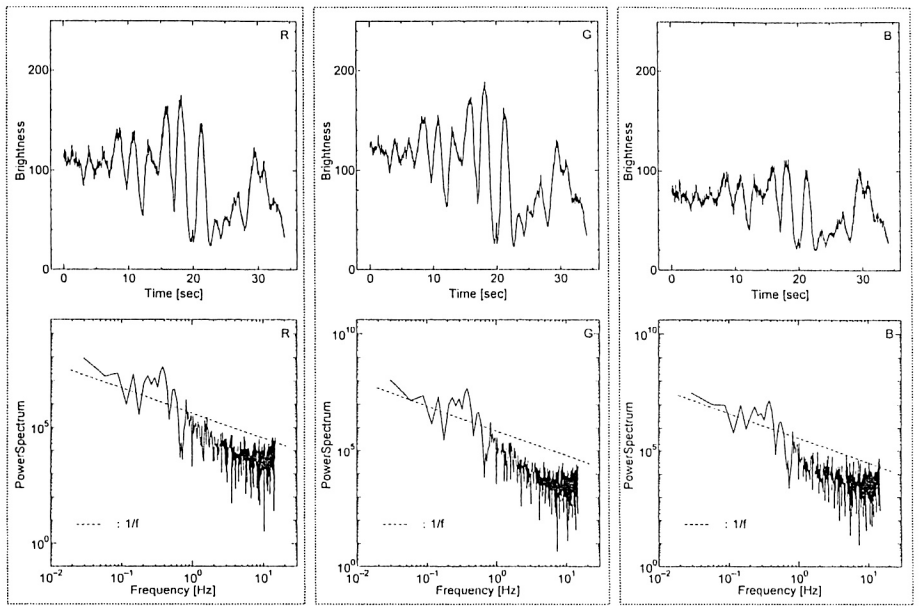


Fig.4-47 Luminance Information of *R*, *G*, *B* Components (Genji Firefly)

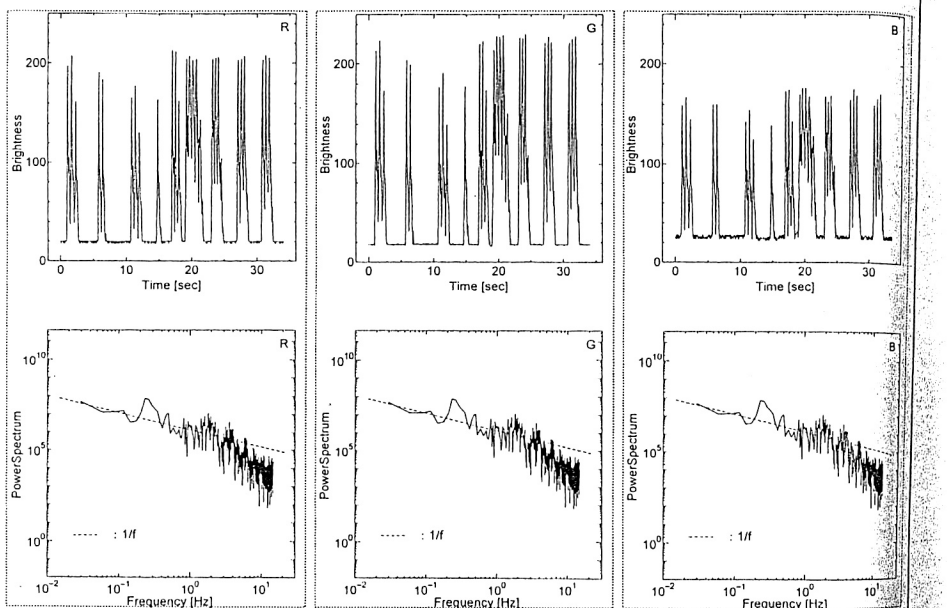


Fig.4-48 Luminance Information of *R*, *G*, *B* Components (Heike Firefly)

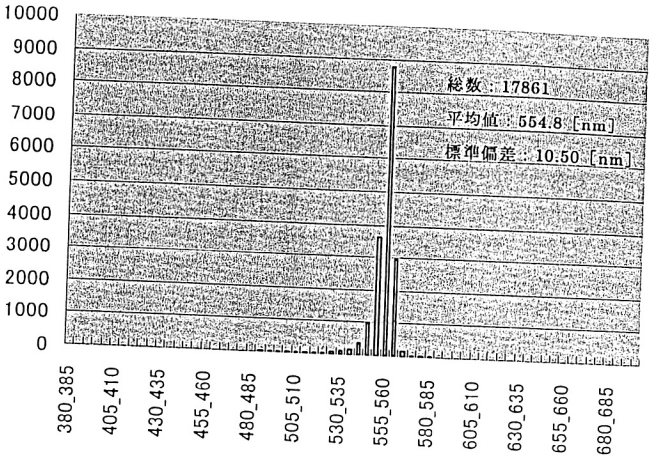


Fig.4-49 Hue Distribution (Genji Firefly)

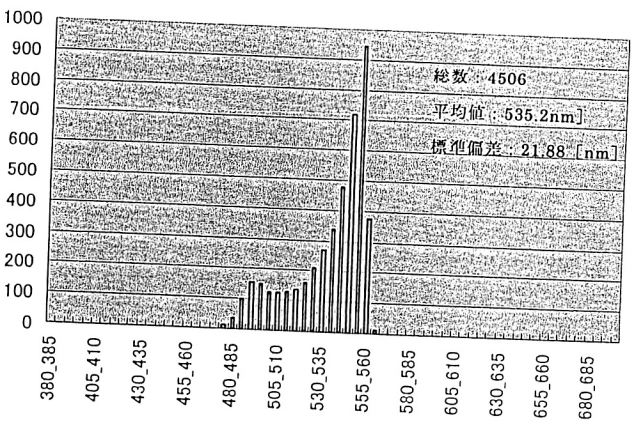


Fig.4-50 Hue Distribution (Heike Firefly)

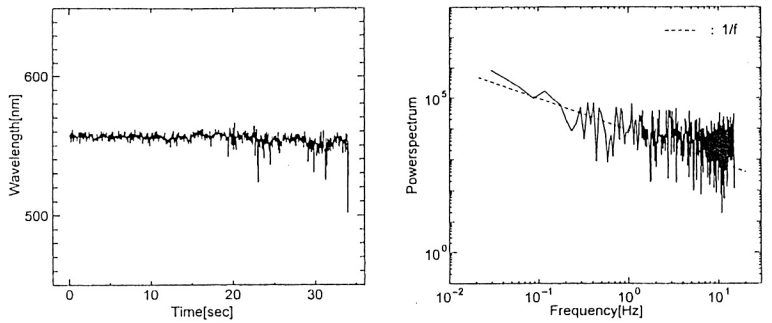


Fig.4-51 Hue Fluctuation and Power Spectrum (Genji Firefly)

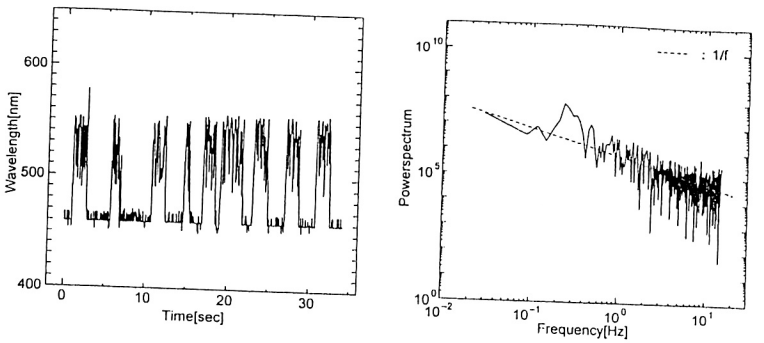


Fig.4-52 Hue Fluctuation and Power Spectrum (Heike Firefly)

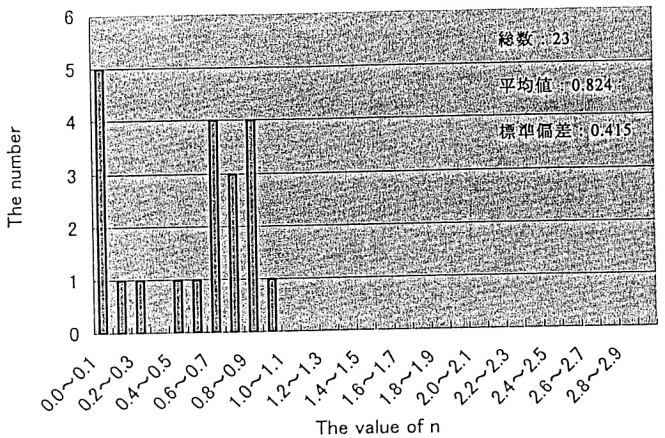


Fig.4-53 *n* Value of Hue Fluctuation (Genji Firefly)

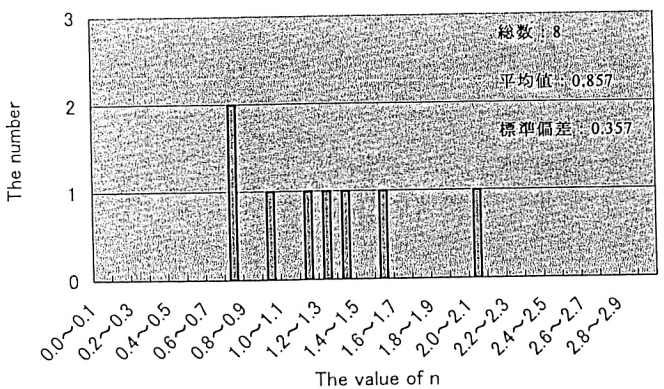


Fig.4-54 *n* Value of Hue Fluctuation (Heike Firefly)

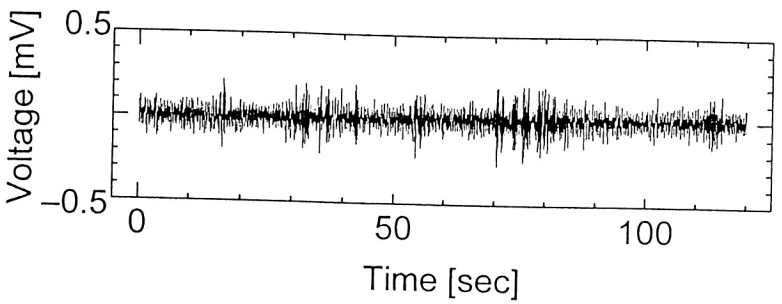


Fig.4-55 Transient Voltage in Electroencephalogram

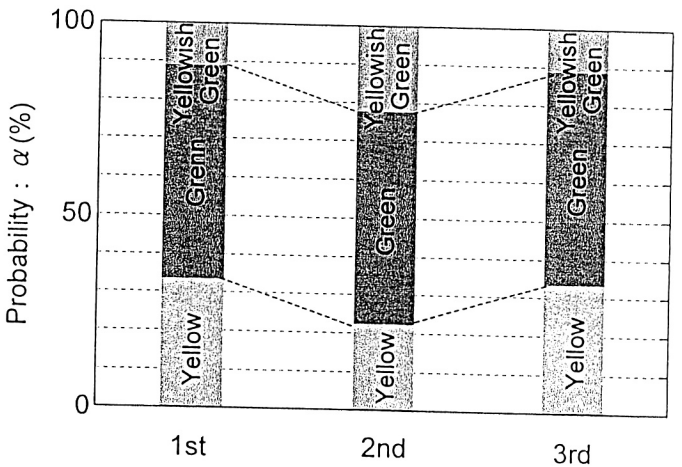


Fig.4-56 The Result of EEG (α rhythm)

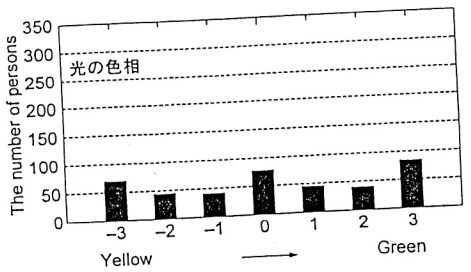


Fig.4-57　The Color Phase of the Light (Genji Firefly)

Table4-1　Totaling Results of the Questionnaire

きれい	：ロマンチック・かわいい・きらきら・宝石・魅了
懐かしい	：故郷・昔・思い出・卒業・田舎
はかない	：弱い・小さい・切ない・ほのかな・かわいそう
環境	：清流・水田・川・草むら・水辺
色	：黄・緑・黄緑・青白い・オレンジ

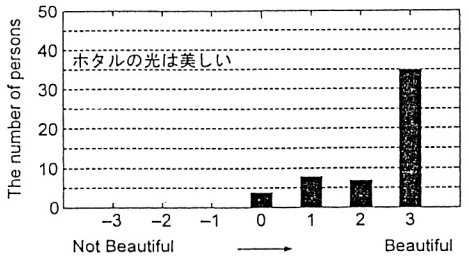


Fig.4-58 The Feeling to the Light of Firefly (Virtual Firefly Illumination System)

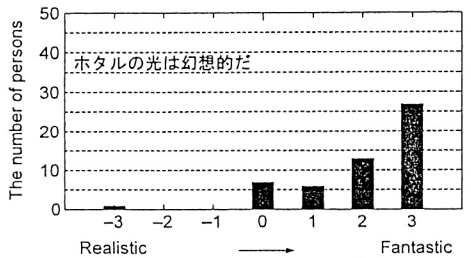


Fig.4-59 The Feeling to the Light of Firefly (Virtual Firefly Illumination System)

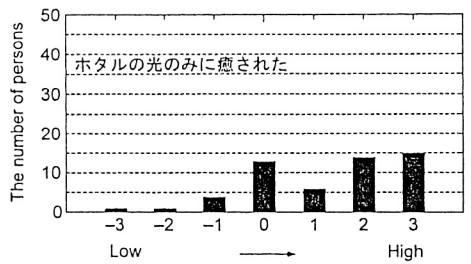


Fig.4-60 The Healing Effect Due to Only the Light of Firefly

(Virtual Firefly Illumination System)

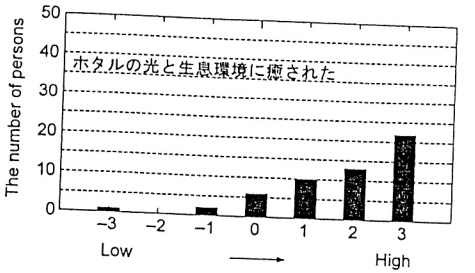


Fig.4-61 The Healing Effect Due to the Whole Environment

(Virtual Firefly Illumination System)

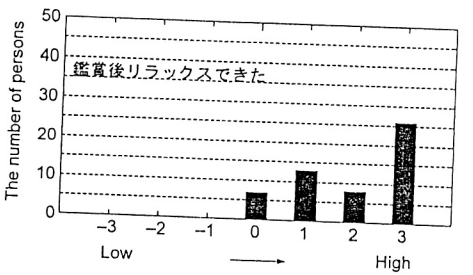


Fig.4-62 The Healing Effect Due to the Appreciation

(Virtual Firefly Illumination System)

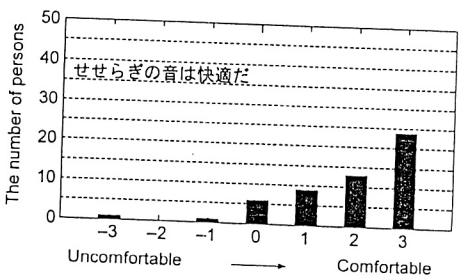


Fig.4-63 The Comfortable Sounds of Stream (Virtual Firefly Illumination System)

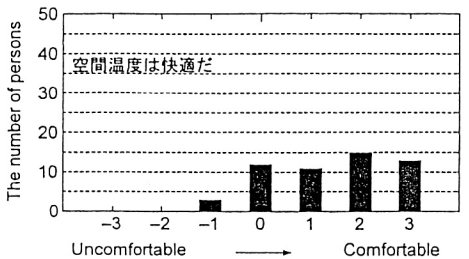


Fig.4-64 The Comfortable Ambient Temperature

(Virtual Firefly Illumination System)

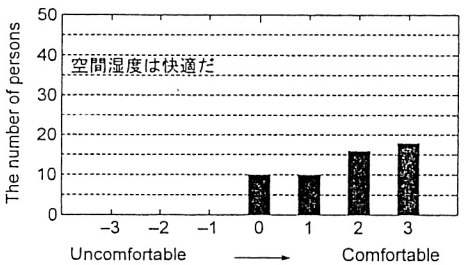


Fig.4-65 The Comfortable Ambient Moisture

(Virtual Firefly Illumination System)

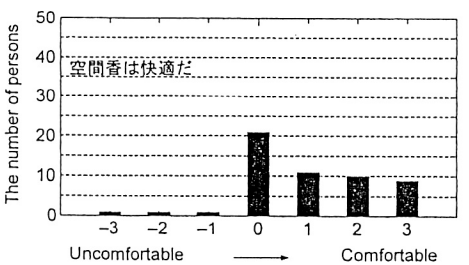


Fig.4-66 The Comfortable Ambient Perfume (Virtual Firefly Illumination System)

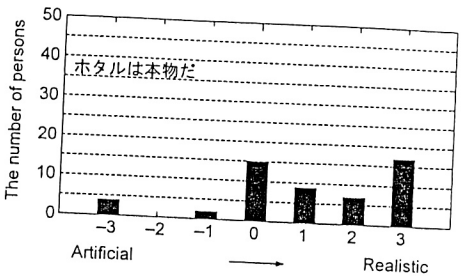


Fig.4-67 The Feeling to the Light of Artificial Firefly
(Virtual Firefly Illumination System)

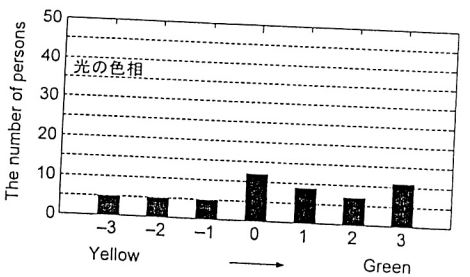


Fig.4-68 The Color Phase of the Light (Virtual Firefly Illumination System)

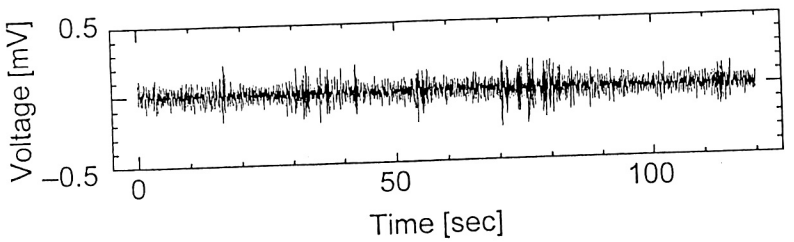


Fig.4-69 Transient Voltage in Electroencephalogram

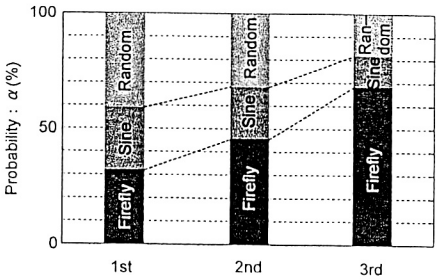


Fig4-70 The Result of EEG (α rhythm)

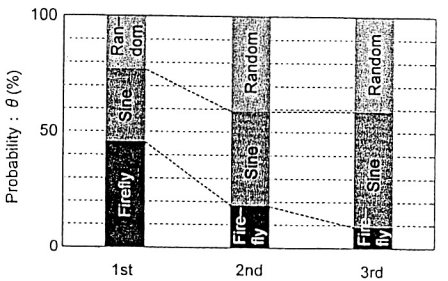


Fig.4-71 The Result of EEG (θ rhythm)

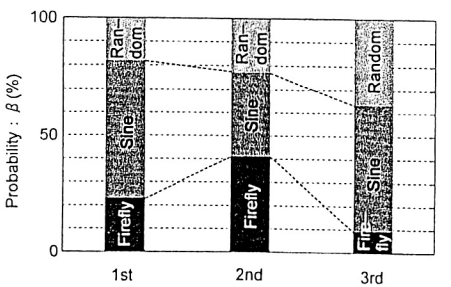


Fig.4-72 The Result of EEG (β rhythm)

Table 4-2 Number of firefly larvae landed on the bank and adult emerged in an ecologically-balanced aquarium for seven years.

	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
Larvae landed (A)	425	756	382	594	148	383	161
Adult emerged (B)	258	569	97	227	75	219	107
Rate of emergence (%) (B / A ×100)	61	75	25	38	51	57	66

Table 4-3 Number of "Genji Hotaru" (Luciora) and "Heike Hotaru" (Luciora) individuals counted at each stage from 1989 to 2002. In this table, pupa means the number of landing larvae.

Year	Luciora ss				Luciora ss			
	Egg	Larva	Pupa	Adult	Egg	Larva	Pupa	Adult
1997	3163950	2845000	92417	14063	407000	380000	68089	15307
1998	2257128	2113800	94417	15246	242972	218050	70964	25801
1999	2788608	2641200	81093	12928	415272	407050	59899	18565
2000	1986188	1686500	81628	13180	224206	205200	78282	20908
2001	1749063	1577300	61561	14825	165058	152250	66949	21285
2002	1899612	1801860	54586	16522	226536	212850	54761	19061

Table 4-4 Values of chemical compounds in the water inhabited by fireflies

Location	PH	NH_4^+ (mg/l)	NO_2^- (mg/l)	NO_3^- (mg/l)	CO_2 (mg/l)	GH (°dH)	KH (°dH)	COD (ppm)
Toyota*1	7.7	<0.1	0.04	20	3	2	2	1
Kaminojo*2	7.5	<0.1	<0.1	10	6	3	3	1
Omiyanoue*2	7.5	<0.1	<0.1	25	6	4	3	3
Amagiyugashima*2	6.8	<0.1	0.02	5	40	2	2	1
Sashita*2	7.5	<0.1	0.15	10	6	4	2	3
Kawatsu*3	7.3	<0.1	<0.1	25	6	3	2	1
Katsuura*4	8.2	<0.1	0.08	10	4	6	4	2
Tsukuba*5	7.5	<0.1	0.02	100	6	4	3	0
Nasshiobara*6	8.0	<0.1	0.02	10	10	10	10	8
Urabandai*7	6.8	<0.1	0.02	50	6	2	2	7
Mean	7.5	<0.1	0.04	27	9.3	4	3.3	2.7

*1 Yamaguchu pref.; *2 South-Izu, Shizuoka pref.; 3* Izu, Shizuoka pref.; *4 Chiba pref.; *5 Ibaraki pref.; *6 Tochigi pref.; *7 Fukushima pref.

Table 4-5. Values of NO_2^- and NO_3^- in the water environment non-inhabited by fireflies. It is possible that firefly has lived at the point of Group A and it is not possible at Group B.

	Group A		Group B				
	Water path A	Water path B	Brook	Well A	Well B	Pond A	Pond B
NO_2^-	0.02	0.25	0.02	0.0	0.01	0.02	0.20
NO_3^-	15.0	10.0	0.0	25.0	70.0	0.0	300.0

Water paths were made for farming; Brook was made in a park and had no visible animals; Both of Well and Pond were artificially constructed.

Table 4-6 Changes of NO_2^- in two ecologically-balanced aquarium (Aqu. A and Aqu. B) measured from 5 May to 2 Aug, 2001

	5 May	27 May	1 Jun.	3 Jun.	7 Jun.	11 Jun.	17 Jun.	25 Jun.	1 Jul.	8 Jul.	16 Jul.	23 Jul.	2 Aug.
Aqu A	0.00	0.15	0.12	0.12	0.10	0.08	0.06	0.06	0.04	0.03	0.10	0.13	0.12
Aqu B	0.00	0.06	0.02	0.02	0.00	0.02	0.05	0.02	0.00	0.00	0.08	0.12	0.08

Table 4-7 Changes of the NH_4^+ concentration (mg/l). At a start of the experiment (Hour = 0), the value of NH_4^+ was 5.0 mg/l in each trial. Treated and non-treated mans whether the filter was equipped a fauna of bacterium or not. Si, Co and Bo means silica sand, coral sand and bone charcoal, respectively. Filter was not used in a control trial.

	Hours from the experiment had started												
	3	6	12	24	48	72	96	120	144	168	192	216	240
Treated													
Si+Co+Bo	5.0	5.0	4.5	1.5	0.0								
Si	5.0	5.0	4.5	3.5	2.5	1.5	0.0						
Co	5.0	4.5	4.0	0.5	0.0								
Bo	5.0	5.0	4.5	3.5	0.0								
Non-treated													
Si+Co+Bo	5.0	5.0	5.0	5.0	4.5	3.5	3.0	3.5	3.0	3.0	2.0	2.0	2.0
Si	5.0	5.0	5.0	4.0	4.0	3.5	2.5	2.5	2.5	1.5	0.0		
Co	5.5	5.5	5.5	5.0	5.0	5.0	3.5	4.5	4.0	3.5	4.0	3.5	3.5
Bo	5.5	5.5	5.5	5.0	5.0	5.0	3.5	4.5	4.5	4.0	4.5	4.5	4.5
Control	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0

Table4-8 Changes of the NO_2^- concentration (mg/l). At a start of the experiment (9 Feb.), the value of NO_2^- was 0.20 mg/l in each trial. Treated and non-treated mans whether the filter was equipped a fauna of bacterium or not. Si, Co and Bo means silica sand, coral sand and bone charcoal, respectively. Filter was not used in a control trial.

	Date										
	10 Feb.	12 Feb.	14 Feb.	17 Feb.	19 Feb.	22 Feb.	24 Feb.	26 Feb.	4 Mar.	7 Mar.	9 Mar.
Treated											
Si+Co+Bo	0.15	0.17	0.30	0.35	0.40	0.50	0.50	0.40	0.06	0.02	0.04
Si	0.20	0.13	0.12	0.20	0.60	0.40	0.08	0.10	0.08	0.02	0.02
Non-treated											
Si+Co+Bo	0.70	0.60	0.80	1.00	0.90	1.00	1.00	0.90	0.90	1.00	0.90
Si	0.25	0.25	0.30	0.30	0.40	0.40	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40
Bo	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Control	0.20	0.20	0.30	0.30	0.30	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35

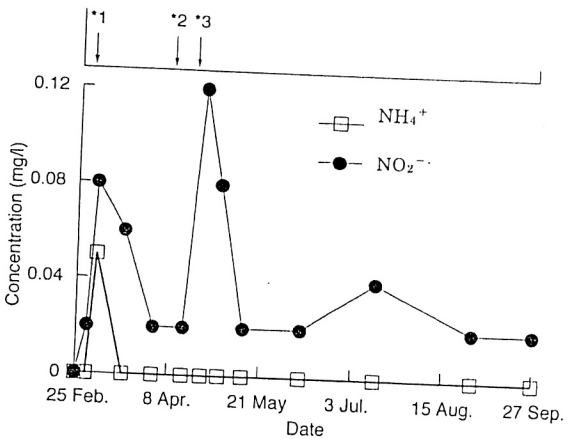


Fig 4-73 Changes of concentration of NH_4^+ and NO_2^-.
*1: 50 of marsh snails and 20 of cyprinodonts were introduced.
*2: 15 of firefly larvae were introduced.
*3: 100 of marsh snails and 20 of cyprinodonts were introduced.

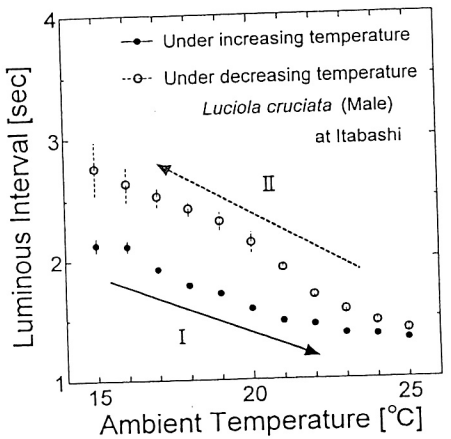


Fig4-74 Luminous Interval for Light Emission Pattern of *Luciola cruciata* (Male)

表 4-9 温度上昇→温度下降させた時の各温度におけるゲンジボタル（雄）の明滅間隔（板橋）

温度	個体数	データ数	平均	標準偏差
15	14	191	2.13	0.40
16	15	161	2.12	0.28
17	12	208	1.92	0.18
18	14	215	1.78	0.20
19	14	259	1.71	1.71
20	12	237	1.59	0.24
21	11	237	1.48	0.16
22	12	252	1.45	0.18
23	11	261	1.38	0.16
24	9	213	1.36	0.16
25	7	165	1.33	0.16
15	3	34	2.76	0.62
16	3	35	2.63	0.43
17	5	55	2.53	0.31
18	5	59	2.42	0.23
19	3	41	2.32	0.22
20	5	73	2.14	0.37
21	5	82	1.93	0.16
22	9	159	1.70	0.17
23	8	163	1.57	0.13
24	8	176	1.47	0.23
25	9	202	1.41	0.20

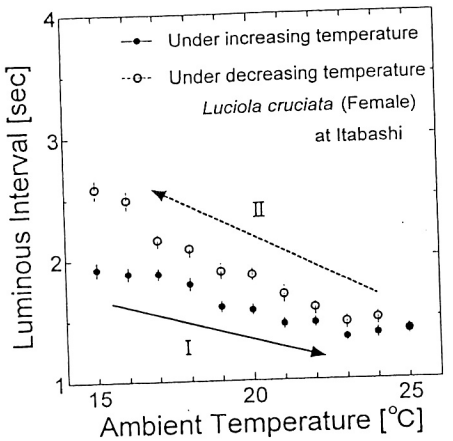


Fig4-75 Luminous Interval for Light Emission Pattern of *Luciola cruciata* (Female)

表 4-10 温度上昇→温度下降させた時の各温度におけるゲンジボタル（雌）の明滅間隔（板橋）

温度	個体数	データ数	平均	標準偏差
15	13	212	1.92	0.44
16	13	212	1.88	0.40
17	14	201	1.88	0.34
18	10	181	1.79	0.35
19	10	199	1.61	0.31
20	12	244	1.58	0.34
21	11	241	1.46	0.33
22	7	153	1.46	0.26
23	10	212	1.35	0.26
24	10	208	1.37	0.32
25	5	116	1.40	0.23
15	7	85	2.59	0.37
16	9	113	2.49	0.40
17	10	147	2.16	0.37
18	9	135	2.09	0.37
19	9	148	1.90	0.40
20	8	136	1.87	0.30
21	8	151	1.70	0.42
22	8	155	1.59	0.39
23	8	173	1.47	0.39
24	7	148	1.50	0.35
25	8	183	1.40	0.29

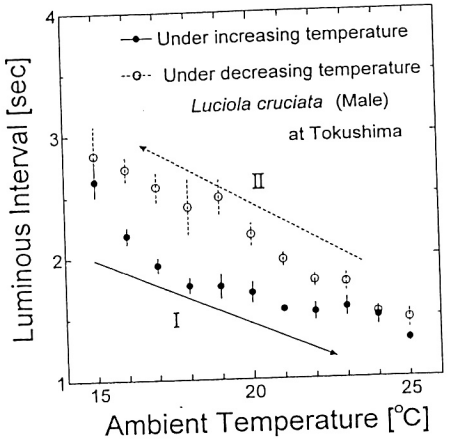


Fig4-76 Luminous Interval for Light Emission Pattern of *Luciola cruciata* (Male)

表 4-11 温度上昇→温度下降させた時の各温度におけるゲンジボタル（雄）の明滅間隔（徳島）

温度	個体数	データ数	平均	標準偏差
15	3	34	2.63	0.35
16	4	59	2.18	0.25
17	3	50	1.94	0.21
18	4	70	1.77	0.26
19	5	86	1.76	0.46
20	6	113	1.70	0.45
21	7	146	1.57	0.34
22	8	167	1.54	0.43
23	6	124	1.58	0.41
24	7	150	1.50	0.46
25	6	144	1.31	0.21
15	1	11	2.84	0.36
16	2	23	2.72	0.23
17	3	37	2.58	0.37
18	3	39	2.41	0.70
19	3	38	2.49	0.42
20	1	15	2.18	0.16
21	3	50	1.97	0.20
22	3	50	1.80	0.21
23	3	74	1.78	0.32
24	4	85	1.53	0.29
25	5	113	1.48	0.45

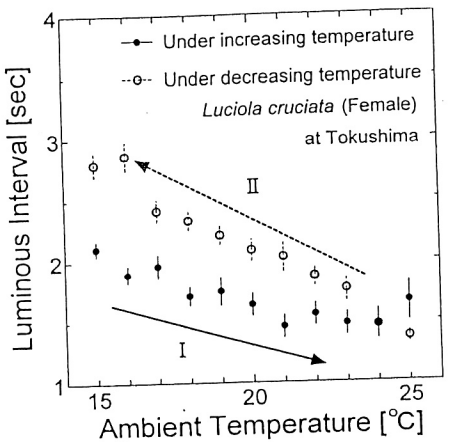


Fig4-77 Luminous Interval for Light Emission Pattern of *Luciola cruciata* (Female)

表 4-12 温度上昇→温度下降させた時の各温度におけるゲンジボタル（雌）の明滅間隔（徳島）

温度	個体数	データ数	平均	標準偏差
15	10	153	2.11	0.37
16	6	101	1.90	0.35
17	7	112	1.97	0.50
18	6	108	1.72	0.41
19	6	103	1.76	0.59
20	6	115	1.64	0.49
21	5	102	1.46	0.46
22	6	122	1.56	0.50
23	5	109	1.48	0.49
24	3	31	1.47	0.74
25	2	13	1.66	0.27
15	6	64	2.79	0.38
16	6	61	2.87	0.44
17	6	69	2.42	0.36
18	7	91	2.34	0.35
19	6	83	2.22	0.35
20	6	76	2.09	0.39
21	6	82	2.03	0.55
22	6	101	1.87	0.41
23	7	105	1.77	0.53
24	8	172	1.47	0.40
25	8	182	1.37	0.32

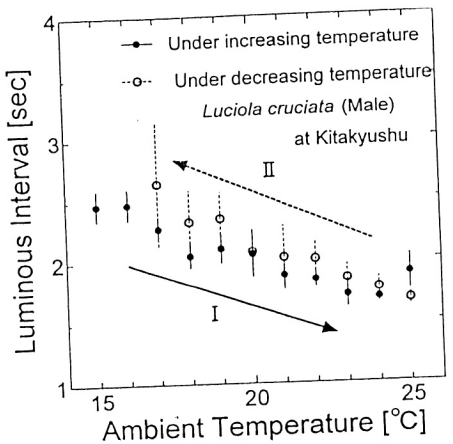


Fig4-78 Luminous Interval for Light Emission Pattern of *Luciola cruciata* (Male)

表 4-13 温度上昇→温度下降させた時の各温度におけるゲンジボタル（雄）の明滅間隔（北九州）

温度	個体数	データ数	平均	標準偏差
15	5	60	2.46	0.47
16	3	36	2.47	0.36
17	3	42	2.27	0.21
18	3	41	2.05	0.30
19	3	45	2.11	0.38
20	1	16	2.05	0.34
21	2	31	1.88	0.23
22	3	51	1.84	0.22
23	1	19	1.71	0.20
24	1	19	1.69	0.07
25	1	15	1.89	0.26
17	1	11	2.64	0.75
18	2	12	2.33	0.34
19	1	13	2.35	0.53
20	1	16	2.08	0.33
21	1	13	2.02	0.43
22	3	34	2.01	0.40
23	3	43	1.85	0.37
24	3	56	1.77	0.34
25	5	96	1.67	0.23

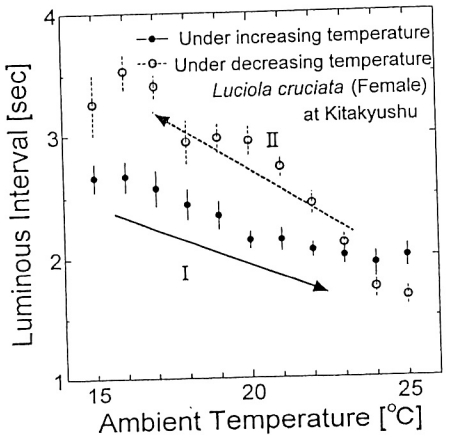


Fig4-79 Luminous Interval for Light Emission Pattern of *Luciola* cruciata (Female)

表 4-14 温度上昇→温度下降させた時の各温度におけるゲンジボタル（雌）の明滅間隔（北九州）

温度	個体数	データ数	平均	標準偏差
15	6	72	2.66	0.48
16	4	44	2.67	0.40
17	4	44	2.57	0.47
18	5	63	2.44	0.48
19	5	67	2.35	0.45
20	5	71	2.15	0.31
21	6	88	2.15	0.43
22	5	75	2.06	0.26
23	6	92	2.01	0.34
24	6	97	1.95	0.47
25	3	45	2.00	0.31
15	4	18	3.26	0.52
16	3	17	3.53	0.29
17	7	52	3.41	0.33
18	6	51	2.95	0.63
19	5	47	2.98	0.42
20	5	51	2.95	0.41
21	5	58	2.74	0.30
22	6	87	2.44	0.41
23	5	92	2.11	0.36
24	4	71	1.74	0.39
25	5	96	1.67	0.36

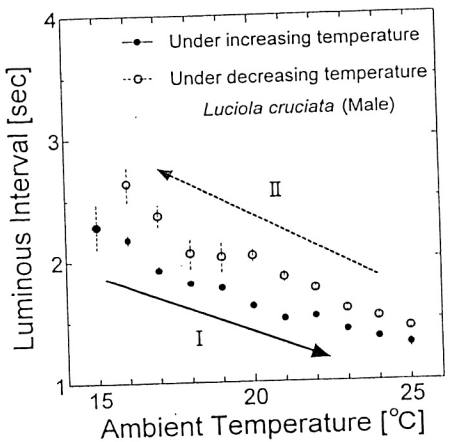


Fig4-80 Luminous Interval for Light Emission Pattern of *Luciola cruciata* (Male)

表 4-15 温度上昇→温度下降させた時の各温度におけるゲンジボタル（雄）の明滅間隔

温度	個体数	データ数	平均	標準偏差
15	27	353	2.28	0.48
16	21	241	2.17	0.32
17	20	340	1.92	0.27
18	20	312	1.81	0.23
19	19	341	1.77	0.28
20	16	305	1.62	0.27
21	16	310	1.51	0.21
22	20	386	1.53	0.24
23	15	335	1.42	0.22
24	11	261	1.36	0.20
25	9	215	1.30	0.28
15	5	68	2.28	0.75
16	3	35	2.63	0.43
17	8	97	2.37	0.44
18	8	114	2.06	0.67
19	5	76	2.03	0.53
20	10	156	2.03	0.32
21	9	151	1.86	0.28
22	16	256	1.76	0.26
23	18	342	1.59	0.25
24	16	336	1.52	0.29
25	24	534	1.44	0.27

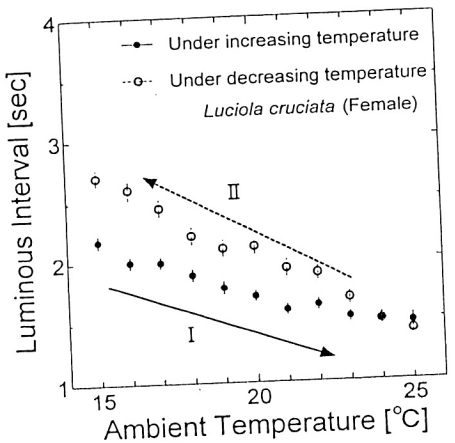


Fig4-81 Luminous Interval for Light Emission Pattern of *Luciola cruciata* (Female)

表 4-16 温度上昇→温度下降させた時の各温度におけるゲンジボタル（雌）の明滅間隔（板橋）

温度	個体数	データ数	平均	標準偏差
15	33	474	2.18	0.56
16	24	372	2.00	0.47
17	26	372	2.00	0.46
18	22	368	1.89	0.46
19	22	388	1.78	0.51
20	25	462	1.70	0.45
21	23	455	1.59	0.47
22	18	350	1.62	0.43
23	22	436	1.52	0.43
24	20	403	1.50	0.47
25	11	208	1.48	0.41
15	18	181	2.70	0.44
16	19	209	2.60	0.60
17	24	283	2.45	0.59
18	23	305	2.22	0.61
19	21	302	2.11	0.58
20	20	283	2.12	0.54
21	21	332	1.93	0.64
22	22	375	1.89	0.54
23	22	416	1.68	0.55
24	21	439	1.50	0.44
25	26	573	1.41	0.36

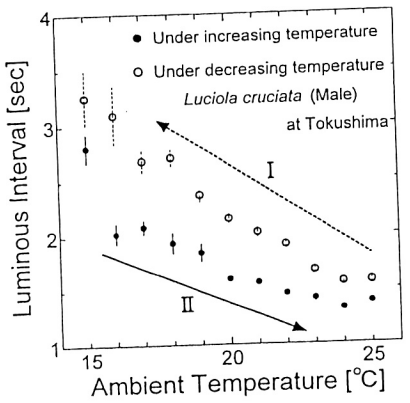


Fig4-82 Luminous Interval for Light Emission Pattern of *Luciola cruciata* (Male) at Tokushima

表 4-17 温度下降→温度上昇させた時の各温度におけるゲンジボタル（雄）の明滅間隔（徳島）

温度	個体数	データ数	平均	標準偏差
15	4	29	3.26	0.63
16	6	42	3.10	0.84
17	12	54	2.68	0.36
18	10	82	2.71	0.33
19	8	66	2.37	0.25
20	8	55	2.15	0.16
21	12	92	2.03	0.22
22	9	95	1.91	0.16
23	18	184	1.67	0.22
24	16	224	1.56	0.15
25	11	145	1.57	0.22
15	62	181	2.80	0.44
16	64	209	2.02	0.60
17	83	283	2.08	0.59
18	56	305	1.94	0.61
19	68	302	1.85	0.58
20	70	283	1.60	0.54
21	69	332	1.57	0.64
22	92	375	1.46	0.54
23	94	416	1.42	0.55
24	151	439	1.32	0.44
25	151	573	1.38	0.36

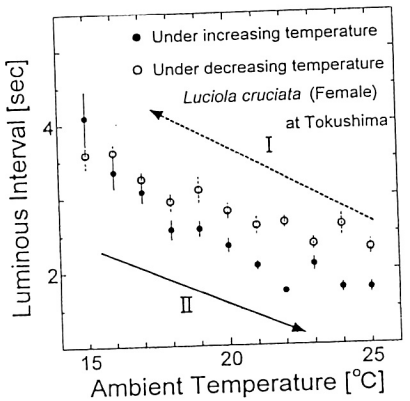


Fig4-83 Luminous Interval for Light Emission Pattern of *Luciola cruciata* (Female) at Tokushima

表 4-18 温度下降→温度上昇させた時の各温度におけるゲンジボタル（雌）の明滅間隔（徳島）

温度	個体数	データ数	平均	標準偏差
15	10	63	3.59	0.75
16	12	79	3.61	0.48
17	10	70	3.25	0.54
18	14	106	2.94	0.65
19	10	59	3.10	0.66
20	12	118	2.81	0.56
21	13	123	2.61	0.63
22	14	110	2.64	0.41
23	18	135	2.35	0.47
24	10	98	2.60	0.72
25	10	89	2.29	0.47
15	5	26	4.1	0.87
16	6	31	3.35	0.58
17	9	69	3.08	0.61
18	10	72	2.56	0.55
19	12	90	2.57	0.48
20	10	84	2.35	0.42
21	9	86	2.07	0.29
22	12	103	1.73	0.19
23	8	99	2.08	0.43
24	11	86	1.76	0.30
25	8	100	1.76	0.36

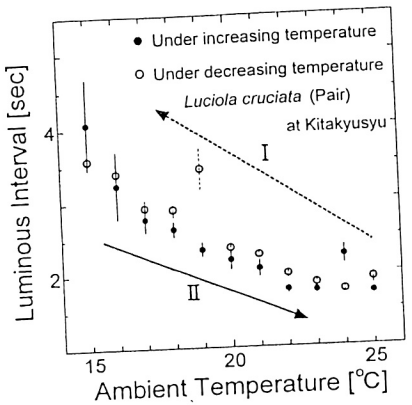


Fig4-84 Luminous Interval for Light Emission Pattern of *Luciola cruciata* (Pair) at Kitakyusyu

表 4-19 温度下降→温度上昇させた時の各温度におけるゲンジボタル（ペア）の明滅間隔（北九州）

温度	個体数	データ数	平均	標準偏差
15	4	23	3.58	0.14
16	2	16	3.39	0.59
17	3	21	2.92	0.26
18	4	18	2.89	0.19
19	3	13	3.44	0.46
20	4	30	2.37	0.17
21	3	18	2.26	0.10
22	3	27	1.99	0.16
23	4	26	1.86	0.13
24	3	22	1.76	0.09
25	3	31	1.91	0.26
15	1	7	4.07	0.66
16	1	4	3.23	0.28
17	2	19	2.77	0.36
18	1	24	2.63	0.24
19	3	34	2.34	0.28
20	2	26	2.20	0.32
21	2	20	2.07	0.24
22	4	61	1.77	0.21
23	2	34	1.75	0.14
24	2	27	2.24	0.32
25	4	48	1.72	0.15

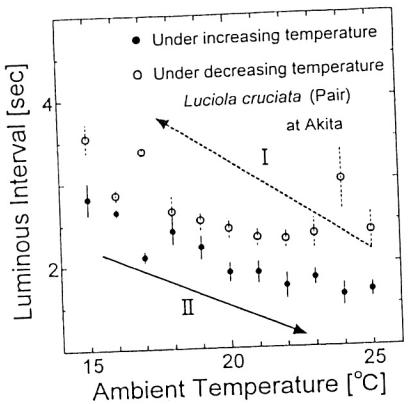


Fig4-85 Luminous Interval for Light Emission Pattern of *Luciola cruciata* (Pair) at Akita

表 4-20 温度下降→温度上昇させた時の各温度におけるゲンジボタル(ペア)の明滅間隔（秋田）

温度	個体数	データ数	平均	標準偏差
15	7	57	3.55	0.66
16	7	52	2.86	0.25
17	5	22	3.38	0.10
18	6	52	2.65	0.65
19	6	66	2.54	0.46
20	7	74	2.43	0.50
21	5	61	2.32	0.41
22	4	54	2.30	0.41
23	5	54	2.35	0.63
24	2	19	3.00	0.74
25	1	10	2.38	0.30
15	2	21	2.82	0.43
16	2	18	2.65	0.10
17	5	40	2.10	0.21
18	4	37	2.41	0.47
19	4	43	2.22	0.46
20	5	61	1.91	0.45
21	4	49	1.90	0.45
22	4	54	1.73	0.54
23	4	50	1.82	0.33
24	3	42	1.61	0.42
25	3	53	1.66	0.311

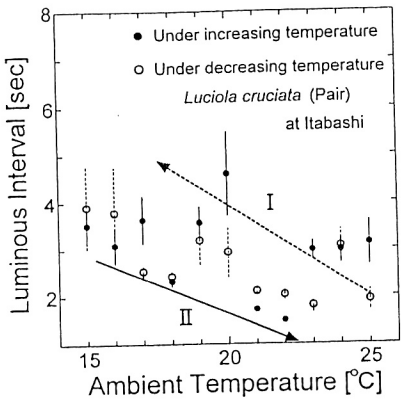


Fig4-86 Luminous Interval for Light Emission Pattern of *Luciola cruciata* (Pair) at Itabashi

表 4-21 温度上昇→温度下降させた時の各温度におけるゲンジケボタル（ペア）の明滅間隔（板橋）

温度		個体数	データ数	平均	標準偏差
↑	15	3	19	3.91	1.83
	16	2	17	3.79	1.87
	18	4	23	2.43	0.34
	21	4	22	2.11	0.12
	22	3	31	2.03	0.27
	23	4	36	1.80	0.44
↓	15	3	16	3.52	0.57
	16	4	20	3.09	0.81
	18	3	20	2.32	0.22
	21	2	18	1.72	0.11
	22	4	45	1.49	0.21

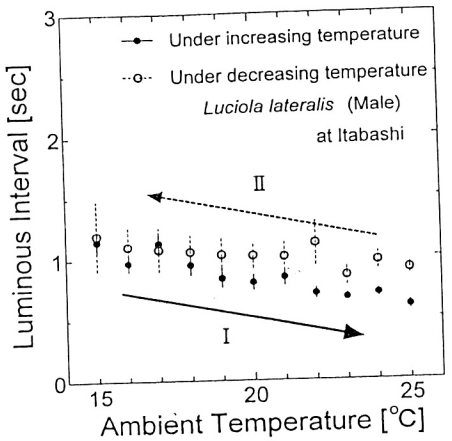


Fig4-87 Luminous Interval for Light Emission Pattern of *Luciola lateralis* (Male)

表 4-22 温度上昇→温度下降させた時の各温度におけるヘイケボタル（雄）の明滅間隔（板橋）

温度	個体数	データ数	平均	標準偏差
15	15	405	1.14	0.04
16	13	392	0.97	0.03
17	12	333	1.13	0.04
18	9	275	0.95	0.04
19	6	226	0.84	0.04
20	10	367	0.8	0.03
21	10	360	0.84	0.03
22	10	445	0.71	0.02
23	12	566	0.67	0.02
24	12	536	0.7	0.02
25	5	275	0.6	0.02
15	2	53	1.2	0.14
16	3	78	1.1	0.08
17	1	30	1.08	0.09
18	3	104	1.06	0.07
19	5	111	1.03	0.07
20	5	152	1.02	0.05
21	6	170	1.01	0.06
22	3	88	1.12	0.09
23	6	253	0.85	0.04
24	10	317	0.97	0.04
25	15	519	0.9	0.02

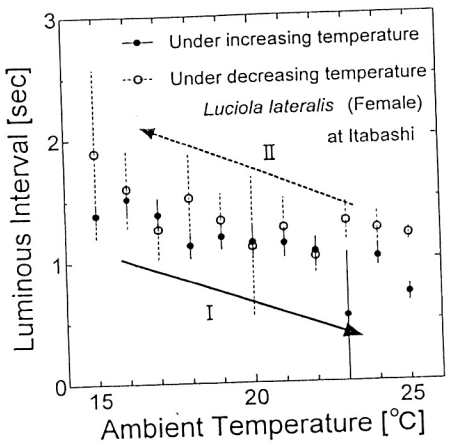


Fig4-88 Luminous Interval for Light Emission Pattern of *Luciola lateralis* (Female)

表 4-23 温度上昇→温度下降させた時の各温度におけるヘイケボタル（雌）の明滅間隔（板橋）

温度	個体数	データ数	平均	標準偏差
15	11	258	1.38	0.03
16	8	162	1.51	0.06
17	5	116	1.38	0.07
18	6	159	1.13	0.05
19	7	183	1.20	0.05
20	4	114	1.15	0.06
21	5	135	1.14	0.06
22	5	140	1.07	0.06
23	4	155	0.54	0.26
24	6	166	1.02	0.04
25	4	180	0.72	0.03
15	1	10	1.89	0.30
16	3	78	1.60	0.16
17	2	50	1.26	0.12
18	3	47	1.52	0.18
19	4	96	1.33	0.11
20	1	22	1.11	0.27
21	3	58	1.27	0.12
22	4	124	1.03	0.07
23	5	118	1.31	0.08
24	6	141	1.25	0.07
25	9	239	1.20	0.03

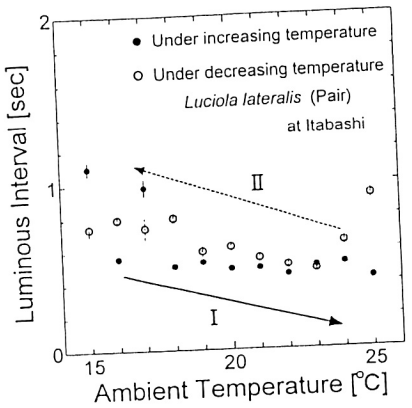


Fig4-89 Luminous Interval for Light Emission Pattern of *Luciola lateralis* (Pair) at Itabashi

表 4-24 温度上昇→温度下降させた時の各温度におけるヘイケボタル(ペア)の明滅間隔（板橋）

温度	個体数	データ数	平均	標準偏差
15	6	79	0.81	0.15
16	4	46	1.63	1.12
17	10	79	0.93	0.23
18	6	55	0.77	0.10
19	7	128	1.33	0.80
20	12	112	0.62	0.12
21	12	115	0.64	0.12
22	14	131	0.57	0.07
23	13	99	0.53	0.07
24	16	178	0.48	0.07
25	11	98	0.46	0.07
15	2	29	2.26	1.32
16	6	114	1.68	0.93
17	6	83	0.60	0.09
18	9	116	0.54	0.08
19	5	73	0.48	0.06
20	13	261	0.48	0.08
21	9	211	0.46	0.07
22	11	138	0.47	0.09
23	12	261	0.49	0.11
24	22	660	0.48	0.10
25	23	808	0.51	0.13

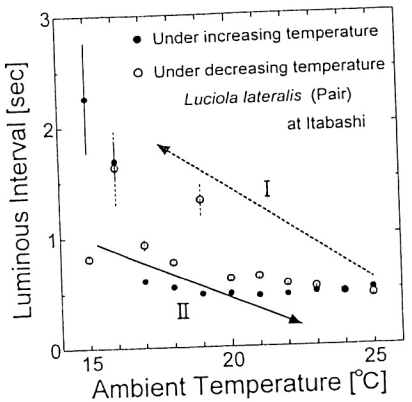


Fig 4-90 Luminous Interval for Light Emission Pattern of *Luciola lateralis* (Pair) at Itabashi

表 4-25 温度下降→温度上昇させた時の各温度におけるヘイケボタル（ペア）の明滅間隔（板橋）

温度	個体数	データ数	平均	標準偏差
15	6	79	0.81	0.15
16	4	46	1.63	1.12
17	10	79	0.93	0.23
18	6	55	0.77	0.10
19	7	128	1.33	0.80
20	12	112	0.62	0.12
21	12	115	0.64	0.12
22	14	131	0.57	0.07
23	13	99	0.53	0.07
24	16	178	0.48	0.07
25	11	98	0.46	0.07
15	2	29	2.26	1.32
16	6	114	1.68	0.93
17	6	83	0.60	0.09
18	9	116	0.54	0.08
19	5	73	0.48	0.06
20	13	261	0.48	0.08
21	9	211	0.46	0.07
22	11	138	0.47	0.09
23	12	261	0.49	0.11
24	22	660	0.48	0.10
25	23	808	0.51	0.13

5. 応用

5.1. 福祉応用について

21 世紀は,環境・福祉・情報そしてバイオテクノロジーの時代と言われている.特に生物から得られる情報を駆使した工学は,遺伝子工学に基づいた医療分野だけではなく,機能・エネルギーの高効率化や人に優しい福祉・環境空間を創造するのにも有効となり得る.本研究では,人やホタルなどの生物生態情報を解析することにより,新たに工学・生物学・医学などを融合させ,図 4-76 に示すような人々の生活に密着した快適空間の実現を目指している.

例えば,ホタルの発光パターンやゆらぎを解析し,それが人の精神に及ぼす影響を考察することにより,ホスピスや福祉施設などへ向けて癒し空間を提供できるであろう.すなわち,生態系を模した癒し庭園内にバーチャルホタルイルミネーションシステムを設置し,春夏秋冬の四季を通じて場所を選ばず癒しの場を提案することができる.これは,余命間もないホスピスの住人や遠出の不可能な老人施設の住人にとって重要な要件であろう.本研究では,ホタルを利用した福祉空間創造への応用の一環として,平成 12 年 11 月にバーチャルホタルイルミネーションシステムによる秋ボタル鑑賞会を,茨城県水戸市にある老人ケア施設のローズヴィラ水戸において実施した.図 4-77 は,その時に行った官能評価結果の一例である.なお,様々な年齢階層の意見サンプル総数は,約 20 人である.図 4-30, 4-40, 4-63 と同様に,90 [%]以上の被験者がホタルを含めその空間全体に癒しを感じていることがわかる.

一方,情緒・環境教育へ向けた教材を開発し,理工学離れ,環境問題,ストレス社会に対する改善策を提案できるであろう.すなわち,ホタル館など教育的施設内にホタルを中心とした人工的な生態ジオラマを創設し,四季を通じてホタルに触れ合う場を提供することもできる.

5.2. ホタル生態系の新提案

筆者は，板橋区ホタル飼育施設において，一連のホタル飼育に関する実験・体験を通して「ホタルが生息できる環境作り」に関する技術情報を独自の飼育理念の元に構築してきた．ここで培われてきたホタルの環境は「ホタルのみならず，そこに生息するすべての生物と水や土壌などの生態系バランスが釣り合った“回復すべき”環境のモデルである」と考える．現在では，この環境モデルは，日本各地のより広い解放空間で実用化されつつあり，顕著な実績をあげている．しかしながら，大都市中心部でなくても，ホタルが生息できる環境が「求めるべき環境」であり，ホタルの存在が環境のシンボルとなっている今日，地方都市など，生態系がある程度回復可能な部分が残っている地域では，護岸工事のやり直しや，水系の浄化とその周辺の土壌の入れ替えなどを行うなど，過去に多くの「ホタル復活の試み」が行われてきた．ホタル飼育施設でも，独自に構築してきた飼育技術情報を応用して，日本各地の依頼を受けてその地域の水の流れや水の質，その付近の土壌環境の調整をしたところ，場所は限定されてはいるものの，より広い解放空間や，河川の一部その他でホタルが飛び，大きな成果を上げている．これを起点として啓蒙活動を展開し，生態系のバランスが適切に保たれた環境が地域全体に拡大してゆくことを期待している．各地域の教育機関では，「ホタルが生息していた私達町の昔の環境」を啓蒙・具現化するために，ホタル飼育施設の技術により生態水槽やせせらぎを各地の教育館などに設置し，「地元の（ホタル生態）環境教育施設」として活用されることを願っている．

一方，多くの大都市中心部とその周辺では，ホタルが生息していた環境はすでに皆無に近い状況である．かつてあった生態系は，ビルや舗装された道路などにより完全に破壊されており，それを回復するのは不可能に近い．このような状況では，地域の生態系の復活を念頭に置いた「ホタル復活への挑戦」は困難である．板橋区ホタル飼育施設独自の飼育技術は，全く破壊された環境にも限定空間においてホタルが生息できる環境を人工的に作り出すことが出来る唯一の画期的な成功例であることから，大

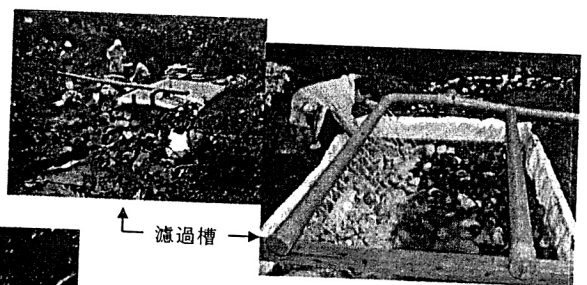
都市中心部で「特定・限定空間のホタル生態系の展示」を試み，そこを訪れる人々への心の癒し空間や，環境を考えるための啓蒙機関として価値ある空間を提供することができると考える．たとえば，大都市のビルの一角に生態水槽や，せせらぎ空間を設置すると多くの人々が憩うことができ，大切な施設となりうる．さらに，ホタル成虫が出ていないときは，その展示場を“バーチャルホタルイルミネーティングルーム”とし，年間を通してホタルに限りなく近い光りを提供することで安らぎを与え，同時に環境啓蒙の場所にすることができる．

このような理念に基づき「ホタルの生態系の新提案」を実現させるため，活動の一環として，ホタルについての講演を行い，ホタルについて知ってもらうと同時に，その大切さを訴えてきた．また，ホタルの再生やバーチャルホタルイルミネーション展示などを各地で積極的に展開している．実際に現地に出向き，調査や指導を行い，依頼を受けてホタルの水路「せせらぎ」の新設にも取り組んでいる．「せせらぎ」の構築に関しては，設計・濾材の選定から施工まで総指導と現場での作業を行っている。その実践的な作業現場を主要例の写真とともに図 5-1〜5-5 に示した．「せせらぎ」を設立するホタル再生の例は，2004 年の鎌倉鶴岡八幡宮［図 5-1，5-2］，2003 年の北海道十勝モール温泉［図 5-5］などがあげられる．山口県豊田ホタルの里ミュージアム［図 5-3，5-4］では，ホタルの生態水槽やバーチャルホタルイルミネーションが展示されており，一年を通してホタルを体感できる施設になっている．ここにあげた例はごく一部であり，表 5-1 に 2001 年 4 月から 2004 年 8 月までの技術指導を中心とした活動を一覧にして示した．ホタルを身近に体験できるこれらの活動が，ホタルに対する意識や関心を高め，ホタルの再生へつながること，さらに癒しの空間や教育の場として広く活用されることを願っている．

鶴岡八幡宮

2004 年 2 月 12 日　視察
—施工前—

濾材及び資材 1146 袋



水量調節管（出口）

Fig 5-1 鎌倉 鶴岡八幡宮(1)
2004 年 3 月 1 日 ホタル水路新設工事

Fig 5-2 鎌倉 鶴岡八幡宮(2)

2004 年 3 月 1 日 ホタル水路新設工事と 3 月 13 日放流式

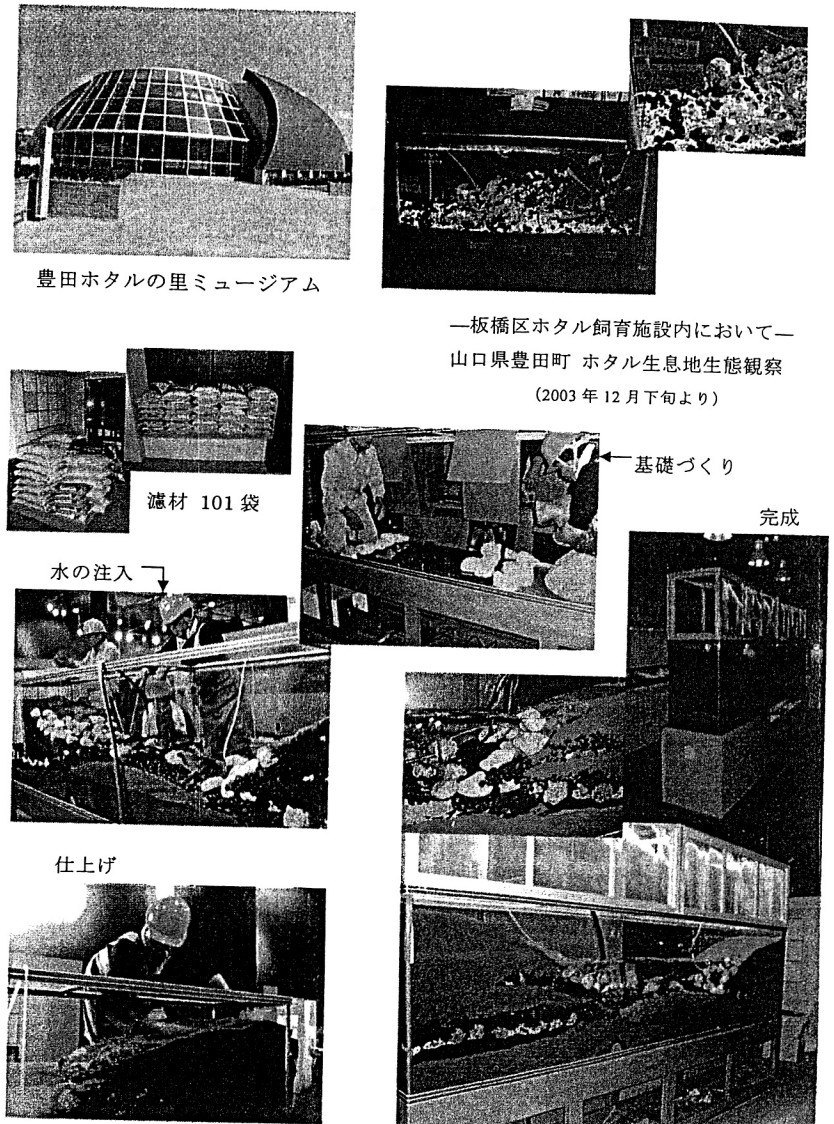


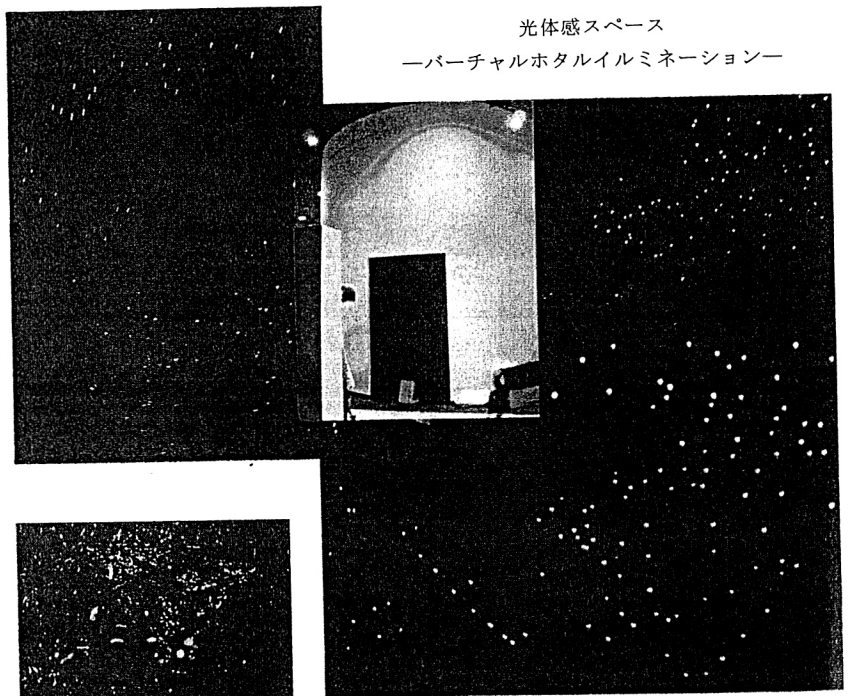
Fig 5-3 山口県 豊田ホタルの里ミュージアム(1)

2004 年 3 月 15 日ホタル生態槽製作

LED 設置

LED 吊り下げ作業

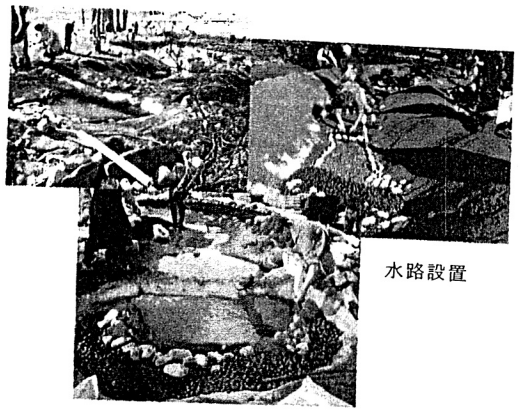
光体感スペース
—バーチャルホタルイルミネーション—



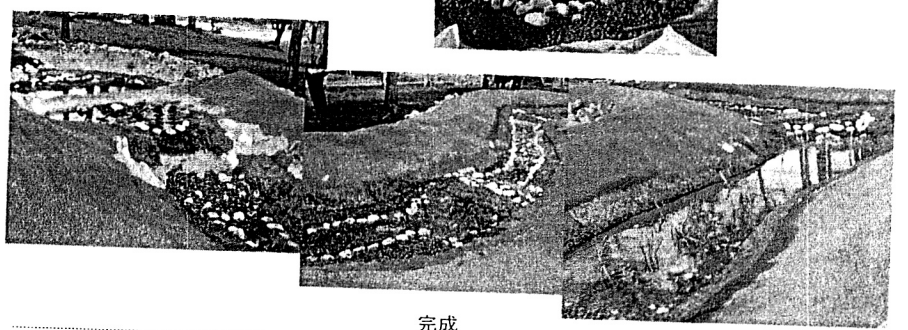
板橋区ホタル飼育施設
ホタル乱舞の様子

Fig 5-4 山口県 豊田ホタルの里ミュージアム(2)
2004 年 3 月 16 日
—バーチャルホタルイルミネーションシステム—

十勝が丘公園



水路設置



完成

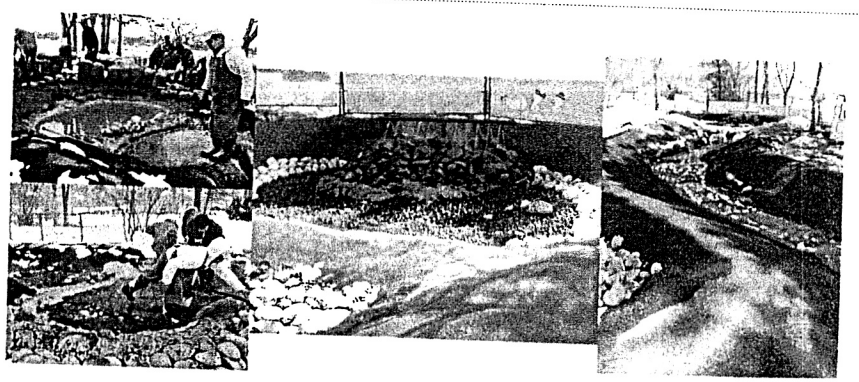


Fig 5-5 北海道音更町 十勝が丘公園 十勝川モール温泉せせらぎ
2003 年 11 月 16･17 日:水路新設
2004 年 3 月 4･5 日:濾過水路及び上陸地追加

表 5-1 技術指導一覧（2001 年 4 月～2004 年 8 月）

「作業項目・内容」及び「阿部宣男の役割」

日付	場所	作業項目・内容及び役割
2001 年 4 月 4 日	栃木県栗山村「黒部ホタルの棲む小川」	「せせらぎ」設計・完成まで総指導
4 月 7 日	秋田県本荘市石沢小学校「ホタルの流れ」	〃
4 月 9 日	埼玉県寄居町「ホタル復活事業」	現地調査・指導
4 月 11 日	東京都稲城市「ホタル復活事業」	〃
4 月 20 日	神奈川県川崎市王禅寺東京電力「ホタル保存事業」	現地調査と「せせらぎ」創り総指導
4 月 22 日	栃木県栗山村「黒部ホタルの棲む小川」	「せせらぎ」設計・完成まで総指導
4 月 30 日	岩手大学「自然のホタル保全事業」	現地調査・指導
5 月 14 日	東京都板橋区立志村第六小学校「学校ビオトープ」	〃
5 月 24 日	長野県上田市「上田の自然とホタル」	現地調査
7 月 4 日	東京都三鷹市「三鷹ホタル復活事業」	〃
7 月 9 日	国立科学博物館つくば植物研究センター「ホタル復活事業」	〃
7 月 10 日	大阪府富田林市「ホタル復活事業」	現地調査と「せせらぎ」創り総指導
7 月 15 日	埼玉県新座市「野火止用水にホタルを呼び戻す」	〃
7 月 16 日	埼玉県新座市「野火止用水にホタルを呼び戻す」	〃
7 月 20 日	青森県岩木町「ホタル復活事業」	現地調査
7 月 28 日	福島県勿来町「ホタル復活事業」	現地調査・指導
8 月 7 日	千葉県浦安市「ホタル生態展示」	〃
8 月 9 日	栃木県栗山村「ホタル里帰り事業」	〃
9 月 11 日	石川県「ホタル復活事業」	現地調査
9 月 17 日	大阪府富田林市汐油研修センター「ホタル復活事業」	現地調査と「せせらぎ」創り総指導
9 月 18 日	石川県金沢市「ホタル復活事業」	現地調査
2001 年 9 月 25 日	茨城県つくば市「ゆかりの森ホタル復活事業」	現地調査と「せせらぎ」創り総指導
10 月 4 日	千葉県柏市「ホタル復活事業」	現地調査
10 月 6 日	埼玉県新座市「ホタル復活事業」	現地調査と「せせらぎ」創り総指導
10 月 25 日	富山県高岡市「ホタル復活事業」	現地調査
11 月 9 日	北九州市「ほたる館建設事業」	現地調査と「せせらぎ」創り総指導
11 月 13 日	東京都豊島区立駒込中学校「ホタル再生事業」	現地調査
11 月 22 日	静岡県伊豆長岡町「ホタル復活事業」	現地調査と「せせらぎ」創り総指導
11 月 23 日	埼玉県朝霞市「ホタル復活事業」	〃
11 月 30 日	石川県教育センター「ホタル復活事業」	現地調査
12 月 10 日	徳島県三好郡池田町立中学校「ホタルの棲む小川」	現地調査と「せせらぎ」創り総指導
12 月 11 日	北九州市建設局「ほたる館」建設事業	〃
12 月 18 日	千葉県習志野市「ホタル復活事業」	現地調査
12 月 19 日	埼玉県朝霞市「ホタル復活事業」	現地調査と「せせらぎ」創り総指導
12 月 20 日	神奈川県川崎市王禅寺東京電力「ホタル保存事業」	「せせらぎ」設計・完成まで総指導
12 月 25 日	山口県豊田町「ほたる館建設事業」	現地調査と「せせらぎ」創り総指導
2002 年 1 月 8 日	朝霞市公園課「滝の根公園ホタル復活」	〃
1 月 9 日	新座市「野火止ホタル復活」	〃
1 月 22 日	福島県いわき市「いわきのホタル復活」	現地調査
1 月 24 日	埼玉県新座市「新座市ホタル復活」	「せせらぎ」設計・完成まで総指導
1 月 25 日	北九州市「ホタル館建設」	〃
1 月 27 日	静岡県伊豆長岡「ホタル伊豆長岡復活」	〃
2 月 11 日	千葉県佐原市「佐原ホタル復活」	現地調査
2 月 22 日	北海道函館市「函館のホタルについて」	〃
3 月 1 日	石川県石川動物園「ホタル復活」	〃

2002年 3月 6日	北九州市ホタルの会「ホタル館建設」	「せせらぎ」設計・完成まで総指導
3月11日	北九州市「ホタル生態水槽」制作	〃
3月12日	〃	〃
3月17日	鹿島建設環境事業部「ホタルの里作り」	現地調査
3月30日	栃木県矢板市「ホタルの里作り」	〃
4月 4日	徳島県池田中学「ホタルの棲む小川」	「せせらぎ」設計・完成まで総指導
4月12日	北九州市「ホタル生態水槽」点検検査	—
4月18日	東京都多摩市・町田「ホタル再生事業」	現地調査
4月19日	埼玉県朝霞市「滝の根公園ホタル復活」	「せせらぎ」設計・完成まで総指導
4月20日	栃木県小山市「ホタル復活事業」	現地調査
4月26日	茨城県つくば市「ゆかりの森昆虫館ホタル復活」	「せせらぎ」設計・完成まで総指導
5月13日	静岡県天城湯ヶ島「出会い橋ホタル活性化」	〃
5月14日	埼玉県朝霞市「滝の根公園ホタル復活」	〃
5月25日	獨協中高等学校「ホタルについて」	〃
6月 3日	徳島県池田町「ホタル再生事業」	〃
6月 4日	北九州市「ホタル生態水槽」点検	—
6月12日	茨城県つくば市「ゆかりの森昆虫館ホタル復活」	現地調査と「せせらぎ」創り総指導
6月14日	東京医科歯科大学「ホタルと人間」	現地調査
6月17日	鹿島建設「ホタルの光の意味」	〃
6月21日	全国生ゴミネットワーク「ホタルと環境」	〃
6月26日	鹿島建設「ホタルの光の意味2」	〃
6月29日	福島県大熊町商工課「ホタル復活」	〃
7月 1日	福島県裏磐梯「アカベコ」「ホタル生態水槽」制作	—
7月 6日	秋田県本荘市石沢小学校「2002年ホタルの夕べ」	—

2002年 7月13日	新潟県糸魚川市糸魚川浄化センター「ホタル復活事業」	「せせらぎ」設計・完成まで総指導
8月12日	環境省	
8月15日	埼玉県朝霞市「滝の根公園」ホタル復活	「せせらぎ」設計・完成まで総指導
8月22日	埼玉県朝霞市「滝の根公園」ホタルの流れ制作	〃
8月24日	埼玉県朝霞市「滝の根公園」ホタルの流れ制作	〃
8月28日	埼玉県朝霞市「滝の根公園」ホタルの放流式典	〃
8月29日	埼玉県新座市「野火止用水ホタル復活」	〃
	東京都福生市「ホタル復活」	〃
	栃木県小山市「ホタル復活」	〃
8月31日	エコポリホタル夏祭り	—
9月 2日	新座市 野火止ホタル復活	「せせらぎ」設計・完成まで総指導
9月 3日	東京ほたるの会幹事会	現地調査
9月 4日	東京都日野市	〃
9月 6日	福島県いわき市「ホタル復活事業」	〃
9月 9日	川崎市王禅寺「ホタル復活事業」	「せせらぎ」設計・完成まで総指導
9月11日	栃木県栃木市「ホタル復活事業」	現地調査
9月13日	ホテルニューオータニ「ホタル復活事業」	現地調査と「せせらぎ」創り総指導
9月24日	ホテルニューオータニ「ホタル復活事業」	〃
9月25日	千葉県富里市「富里市内ホタル復活事業」	〃
9月26日	東京都福生市「福生ほたる公園再生事業」	〃
9月28日	ホテルニューオータニ「ホタル復活事業」	〃
10月 6日	東京都福生市「福生ほたる公園再生事業」	〃
10月 7日	新座市「野火止ホタル復活事業」	〃
10月18日	豊島区千川中学校「ホタルの生態」	現地調査

2002年 10月19日	茨城県つくば市「ホタル復活事業」	「せせらぎ」設計・完成まで総指導
10月21日	ホテルニューオータニ「ホタル復活事業」	〃
10月22日	栃木県栗山村「湯西川温泉ホタル復活事業」	〃
10月24日	石川県金沢市「ホタル復活について」	〃
11月 1日	埼玉県新座市「野火止ホタル復活」	〃
11月 4日	川崎市王禅寺「ホタル復活事業」	〃
11月 6日	新宿区立江戸川小学校「ホタル再生事業」	現地調査と「せせらぎ」創り総指導
	埼玉県新座市「野火止ホタル復活」	〃
11月13日	山梨県下部町「ホタル復活事業」	現地調査
	埼玉県大井町「ホタル復活事業」	〃
11月15日	御殿場市「ホタル復活事業」	〃
11月23日	秋田県本荘市石沢小学校「ホタル復活事業」	「せせらぎ」設計・完成まで総指導
11月25日	御殿場市「ホタル復活事業」	現地調査
11月27日	日本大学付属高等学校「ホタル復活事業」	「せせらぎ」設計・完成まで総指導
12月 3日	山口県豊田町「ホタル館建設事業」	〃
12月11日	東京都福生市「福生ほたる公園再生事業」	〃
12月13日	埼玉県朝霞市「滝の根公園ホタル復活」	〃
	埼玉県新座市「野火止ホタル復活事業」	〃
	藤沢市大清水浄化センター「ホタル復活事業」	現地調査
12月22日	横浜市「ホタル復活事業」	〃
12月29日	横浜市「ホタル復活事業」	〃
2003年 1月13日	東京都田園調布「ホタル復活事業」	現地調査と「せせらぎ」創り総指導
1月23日	東京都福生市「ホタル復活事業」	〃
1月26日	横浜市「ホタル復活事業」	現地調査

2003年 2月 2日	東京都田園調布「ホタル復活事業」	現地調査と「せせらぎ」創り総指導
2月21日	東京都練馬区「ホタル復活事業」	〃
2月20日	川崎市王禅寺「ホタル復活事業」	〃
3月 1日	東京都福生市「ホタル復活事業」	〃
3月 2日	東京都練馬区「ホタル復活事業」	〃
3月 7日	東京都福生市「ホタル復活事業」	〃
3月 9日	埼玉県新座市「ホタル復活事業」	〃
	東京都練馬区「ホタル復活事業」	〃
3月13日	東京都福生市「ホタル復活事業」	〃
	埼玉県日高市「ホタル復活事業」	現地調査
3月14日	日大一高「ホタル復活事業」	〃
3月23日	静岡県伊豆長岡「ホタル復活事業」	「せせらぎ」設計・完成まで総指導
3月24日	〃	〃
	川崎市王禅寺「ホタル復活事業」	〃
3月28日	東京都福生市「ホタル復活事業」	〃
	埼玉県日高市「ホタル復活事業」	現地調査
3月29日	東京都田園調布「ホタル復活事業」	「せせらぎ」設計・完成まで総指導
3月30日	大阪府富田林市「ホタル復活事業」	〃
3月31日	〃	〃
4月 4日	東京都後楽園「ホタル復活事業」	「せせらぎ」設計
4月 6日	横浜市金沢八景「ホタル復活事業」	現地調査
4月 8日	茨城県ゆかりの森昆虫館「ホタル復活事業」	「せせらぎ」設計・完成まで総指導
4月16日	箱根小涌園「ホタル復活事業」	現地調査と設計
4月20日	新潟県入広瀬村「ホタル復活事業」	現地調査

2003年 4月21日	新潟県入広瀬村「ホタル復活事業」	「せせらぎ」設計・完成まで総指導
4月23日	大阪府富田林市「ホタル復活事業」	現地調査と「せせらぎ」創り総指導
4月26日	埼玉県朝霞市「ホタル復活事業」	〃
5月 1日	東京都福生市「ホタル復活事業」	〃
5月 3日	東京都養育院「ホタル復活事業」	〃
5月 4日	新宿区おとめ山公園・大隈庭園「ホタル復活事業」	現地調査
5月 6日	新潟県糸魚川「ホタル復活事業」	「せせらぎ」設計・完成まで総指導
5月13日	箱根小涌園「ホタル復活事業」	〃
5月29日	新潟県糸魚川「ホタル復活事業」	〃
6月12日	東京都福生市「ホタル復活事業」	〃
	千代田区清水谷公園「ホタル復活事業」	現地調査
6月15日	横浜市青葉区「ホタル復活事業」	〃
7月10日	石川県金沢市「ホタル復活事業」	〃
7月14日	福島県ダッシュ村「ホタル復活事業」	「せせらぎ」設計・完成まで総指導
8月14日	茨城県つくば市 昆虫の森「ホタル復活事業」	〃
8月16日	千葉県流山市「ホタル復活事業」	現地調査
8月22日	茨城県牛久市「ホタル復活事業」	〃
8月25日	箱根小涌園「ホタル復活事業」	「せせらぎ」設計・完成まで総指導
8月30日	千葉県流山市「ホタル復活事業」	現地調査
9月 5日	茨城県常陸大宮町「ホタル復活事業」	現地調査と「せせらぎ」創り総指導
9月 8日	栃木県那須町「ホタル復活事業」	〃
9月15日	茨城県常陸大宮町「ホタル復活事業」	〃
9月27日	栃木県那須町「ホタル復活事業」	〃
10月 3日	聖学院大学「ホタル復活事業」	現地調査と「せせらぎ」創り総指導

2003年 10月18日	東京都練馬区「ホタル復活事業」	現地調査と「せせらぎ」創り総指導
10月22日	神奈川県横浜市「ホタル復活事業」	〃
10月24日	茨城県つくば市 昆虫の森「ホタル復活事業」	〃
10月26日	北海道音更町「ホタル復活事業」	〃
10月27日	〃	〃
11月 7日	東京都 史上最大商店街まつり「ホタル復活事業」	「せせらぎ」設計・完成まで総指導
11月16日	北海道音更町「ホタル復活事業」	〃
11月17日	〃	〃
11月19日	山梨県昭和町「ホタル復活事業」	現地調査
12月 5日	山口県豊田町「ホタル生態水槽設置協議会」	「せせらぎ」設計
12月 6日	〃	〃
2004年 1月22日	聖学院大学「ホタル復活事業」	「せせらぎ」設計・完成まで総指導
1月27日	埼玉県朝霞市「滝の根公園」	〃
2月 4日	箱根小涌園「ホタル復活事業」	〃
2月12日	鎌倉市鶴岡八幡宮「ホタル復活事業」	現地調査
2月17日	埼玉県朝霞市「滝の根公園」ホタル水路水漏れ補修	—
2月15日	北海道音更町「ホタル生態水槽設置」	—
2月19日	埼玉県朝霞市「滝の根公園」ホタル水路水漏れ補修	—
3月 1日	鎌倉市鶴岡八幡宮「ホタル復活事業」	「せせらぎ」設計・完成まで総指導
3月 8日	広島県三原市鶴見曹達塩化鉄流出事故で	—
	ホタル水路への影響調査	—
3月13日	鎌倉市鶴岡八幡宮「ホタル復活事業」	「せせらぎ」設計・完成まで総指導
3月15日	山口県豊田町「ホタル生態水槽設置」	〃
3月16日	〃	〃

2004年 3月23日	飯田橋東京大神宮「ホタル復活事業」	「せせらぎ」設計・完成まで総指導
3月29日	鎌倉市鶴岡八幡宮「ホタル復活事業」	〃
4月 2日	埼玉県朝霞市「滝の根公園」ホタル水路水漏れ補修	ホタル水路水漏れ補修
4月 4日	北海道音更町「ホタル生態水槽設置」	「ホタル生態水槽」設置
4月 5日	〃	「せせらぎ」設計・完成まで総指導
4月 6日	飯田橋東京大神宮「ホタル復活事業」	現地調査
4月 8日	目白椿山荘「ホタル復活事業」	「せせらぎ」設計・完成まで総指導
4月12日	鎌倉市鶴岡八幡宮「ホタル復活事業」	〃
4月13日	新潟県糸魚川「ホタル復活事業」	〃
4月17日	板橋区北郵便局内「ホタル生態水槽」	〃
4月24日	聖学院大学「ホタル復活事業」	〃
4月25日	埼玉県新座市「ホタル復活事業」	〃
4月26日	飯田橋東京大神宮「ホタル復活事業」	〃
5月 2日	聖学院大学「ホタル復活事業」	〃
5月10日	静岡県伊豆長岡「ホタルの流れ調査」	〃
5月24日	文京区立新江戸川公園「ヘイケボタル生息環境調査」	—
5月31日	聖学院大学「ホタル復活事業」	「せせらぎ」設計・完成まで総指導
6月12日	鎌倉市鶴岡八幡宮「ほたる祭」	—
6月28日	埼玉県戸田第二小学校 「ホタル復活事業」	現地調査と「せせらぎ」創り総指導
	埼玉県朝霞市「滝の根公園」ホタル舎生態調査	—
7月 5日	東京都荒川区「ホタル復活事業」	現地調査と「せせらぎ」創り総指導
	聖学院大学「ホタルの流れ」ｹﾞﾝｼﾞ・ﾍｲｹ羽化確認	—
7月 8日	神奈川県秦野中井「ほたるの里 ホタル生態調査」	現地調査
7月26日	新潟県糸魚川「ホタル水路」建設に向けて	現地調査

6. 結 言

本研究は,図 6-1 に示されるような「ホタルの光と人の感性」,「ホタルを援用した癒し空間の創成」及び「ホタル飼育の科学」の 3 つの大きな論旨から構成されている.「ホタル飼育の科学」によって構築された生態槽とホタルを含めた水圏環境“せせらぎ”が,人の感性に及ぼす影響について「ホタルの光と人の感性」で実験的検討を加えた.ホタルの光や発光パターンを解析し,人の感性にホタルそのものがまたせせらぎ空間がどのような効果を与えるのか精査した.また,バーチャルホタルイルミネーションシステムの開発と応用にも取り組んだ.最終的に,この両面から総合的に「ホタルを援用した癒し空間の創成」を目指した.以下に,それぞれに得られた結果を述べる.

Ⅰ.「ホタル飼育の科学」

水圏環境の自然回帰へ向けた閉鎖型ミニホタル生態系による模擬と 7 世代継承の成果について述べたものである.提案した生態槽と飼育の科学は,過去 7 年間の生態及び 10 年間の生息環境に関する研究により独自に創造したものである.研究は,水,土壌,温度,気圧や湿度などの環境要素,バクテリア及び共生生物などの多義に亘り,水生昆虫や水生植物育成の経験を基礎にして展開した.その結果,以下のようなことが明らかになった.

(1) 最適な水とは,溶存酸素量が常に飽和状態のまま一定の水質を保ち,ホタル以外にも多様な動植物が安定して生息でき,有機物を分解する好気性バクテリアが充分に存在し続けられる水である.さらに,木炭や骨炭などを用いて水質を弱アルカリ性に保っていなければならない.

(2) 最適な土壌とは,栄養素に富んで植物がよく育ち,土壌生物が生息でき,微生物による分解活動も盛んで,土壌はいつも浄化されて,カビなどが発生しない弱アルカリ性を保った土壌である.さらに,その土壌は,適度な湿り気を保ちながら水捌け

も良くなければならない．これらは，上陸，蛹化及び羽化の必要条件であるだけではなく，ホタルの活動のし易さをも考慮した結果である．一方，土壌は，水質の浄化・再生への大きな役割も同時に担っており，様々な汚れを吸収・浄化するとともに，水の硬度やpHを維持するためのミネラル補給の役割も果たさなくてはならない．

（3）最適な温熱環境とは，出来る限りホタル生息地域の四季や風土に合致しているとともに，自然の摂理に反しない環境のことである．これは，ホタルがその長い進化の過程で様々な気温・湿度・日照・気圧などの自然条件の中を生き抜くことで獲得してきた形質を持つからである．したがって，ホタルの飼育に際しては，これを考慮に入れた温熱環境を実現することに最大限の注意を払わなければならない．

（4）生態槽に最適な動植物の検討とは，ホタル生息地域周辺の動植物相と出来る限り合致させることである．ホタルに最適な水や土壌環境を実現する上でも，菌・細菌類から魚類までに至る広範囲な生態系が達成されていることが重要である．

また，本研究では，提案したホタル生態槽をスケールアップした循環型ホタル生態系（人工のせせらぎ空間）の構築へと研究の次元をステップアップさせた．すなわち，環境保全へ向けたせせらぎ空間へのホタル生態系接続と近年 12 世代継承の成果について述べた．提案したホタルのせせらぎと飼育の方法は，板橋区ホタル施設において過去16年間のホタルの生態及び生息環境に関する研究により独自に生み出し，定着させたものである．これは，地域生態保全技術の向上，ホスピスを始めとした福祉施設などへのホタル生態系の導入，福祉施設に隣接するビオトープの創設，都市型快適環境の創造と二酸化炭素の削減，情操・環境教育への指針作りなどへ本研究の成果を進展させるためでもある．したがって，創成したせせらぎ空間は，ホタルの一生や多種多様な生態系を観察・学習することができる施設でもある．すなわち，良好な自然環境の象徴的な存在であるホタルを中軸として，「見る」（一般公開）→「考える」（生態環境の学習）→「行動する」（自然保護活動）場である．ここでは，大人に郷愁や癒しを誘い，子供に自然環境を意識させる，情緒・環境教育を実践できるであろう．

さらに，本研究では，より快適なホタルの水創りに向けて，バクテリアによるアンモニア・亜硝酸分解プロセスの詳細について考察した．その結果，以下のようなことが明らかとなった．

Ⅱ．「ホタルの光と人の感性」

ホタルの光の不思議と人の感性についても実験的な検討を加えた.その結果,以下のようなことが明らかとなった.

（5）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.

（6）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.

（7）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.

（8）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.

（9）官能評価法による感性解析より,ホタルとその生態系に対する癒しやリラックス効果が明らかとなった.

（10）官能評価法による感性解析や脳波解析を通じて,新たに開発したバーチャルホタルイルミネーションシステムもホタルを鑑賞するのと同様の効果があることが明らかとなった.すなわち,本システムは,天然のホタルを模擬した光を提供することができる.

（11）脳波解析結果より,ホタルの発光パターンが正弦波や乱数の発光パターンに比べて,最もα波を誘発することが分かった.

（12）バーチャルホタルイルミネーションシステムは,人工ミニ生態系とともに福祉空間創造への応用が充分期待できる.

（13）ホタルの光の色相変動にも,1/fゆらぎが存在し,癒し効果の存在する可能性が高い.

（１４）ホタルの光には,色相心理的意味合いからも,癒し効果の存在する可能性が高い.

（１５）人は,黄から緑にかけての色相帯であればホタルの光の色と感じる可能性が高い.

Ⅲ.「ホタルを援用した癒し空間の創成」

将来的には，提案したホタルのせせらぎ空間をスケールアップし，地域生態保全技術の向上，ホスピスを始めとした福祉施設などへのせせらぎの応用，福祉施設に隣接するビオトープの創設及び情緒・環境教育への指針作りなどへ進展させて行きたい．本研究の成果に基づいて，いつの日にか自然の環境ありのままの姿でホタルが乱舞する光景を都市近郊のあちこちで見掛けることを期待している．

I.「ホタル飼育の科学」

- ホタルに最適な環境を検討し,飼育技術を確立.
- この飼育技術を応用して,ホタル生態槽を作成.
- さらにスケールアップしたせせらぎ空間を構築するまだに至る.

II.「ホタルの光と人の感性」

- ホタルの発光現象・光には,人の感性に共鳴すると言われている *1/f* 揺らぎ現象が存在.
- 脳波解析結果より,ホタルの発光パターンがα波を誘発する.
- ホタルとその生態系に対する癒しやリラックス効果が明らか.
- バーチャルホタルイルミネーションシステムにも同様の効果がある.

III.「ホタルを援用した癒し空間の創成」

- 地域生態保全技術の向上,ホスピスを始めとした福祉施設などへのホタル生態系の導入.
- 福祉施設に隣接するビオトープの創設,都市型快適環境の創造と二酸化炭素の削減,情操・環境教育への応用.

Fig. 6-1 本研究における 3 論旨のまとめ

参考文献

阿部宣男ほか５名：「ゲンジボタル大量発生に向けた多様な微生物による「せせらぎ」空間造りに関する研究」,日本機械学会,第 10 回環境工学総合シンポジウム 2000 講演論文集, pp.227-278, 2000

阿部宣男ほか５名：「ゲンジボタル大量発生に向けた多様な微生物による「せせらぎ」空間造りに関する研究（第２報硝化菌によるアンモニア・亜硝酸分解過程)」，日本機械会,第 11 回環境工学総合シンポジウム 2001 講演論文集, pp.324－355, 2001

阿部宣男他５名,エコデザイン 2002 ジャパンシンポ講論集, p.94-95, 2002

阿部宜男他４名：ホタルの光と人の感性について—発光現象のゆらぎ特性—，日本感性工学会研究論文集，第３巻１号（通号５号）pp.35-44, 2003

阿部宣男ほか４名：ホタルの光と人の感性について - 感性情報計測と福祉応用，日本感性工学会和文誌論文集，第３巻２号（通号６号）pp.41－50, 2003

阿部宣男他４名，水圏環境の自然回帰へ向けたホタル生態系の設計と構築（第一報，閉鎖型ミニ生態系による模擬と 7 世代継承の成果)，日本生物地理学会，第 59 巻，pp.75-81, 2004

阿部宣男他４名，ゲンジボタルの発光パターンに及ぼす温度環境の影響 (地理的偏差による２型分布に対する考察として)，日本生物地理学会，第 59 巻, pp.83-91, 2004

安久正紘他３名：ゆらぎ現象の工学的応用について，応用物理学会，第 61 巻７号, 1992

Biggley,W.H., J.E.Llyod and H.H.Seliger: The spectral distribution of firefly light. Ⅱ., J. Gen. Physiol, vol.50, pp.1681-1692, 1967

Buck, J.B. : Studies in the firefly. Ⅱ. The signal system and color vision in *Photinus greeni*, Physiological Zoology, vol.10, pp.412-419, 1937

Buck,J. and E.Buck : Toward a functional interpretation of synchronous flashing by fireflies, Am.Nat., vol.112, pp.471-492, 1978

Buck,J. and J.E.Case : Flash control and female dialog repertory in the firefly in *Photinus greeni*, Biological Bulletin, vol.170, pp.176-197, 1986

Case, J.E. : Vision and mating behavior in fireflies. In: Lewis, T. (Ed.) Insect communication, Royal Entomological Society of London, London, pp.195-222, 1984

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

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

CIE/IEC : International Lighting Vocabulary, 4th ed., CIE, Publ., No.17.4, 1987

Cook,R.D. : Larval and adult emission spectra of bioluminescence in three European firefly species, Photochemistry and Photobiology, vol.79(4), pp.339-342, 2004

DeLuca,M. : Firefly luciferase, Adv. Enzymol., vol.44, pp.37-68, 1976

Green,A.A. and W.D. McElroy : Crystalline firefly luciferase, Biochim. Biophys. Acta, vol. 20(1), pp.170-176, 1956

荻野昭：多摩動物公園のホタル飼育－24 年目の苦闘－，インセクタリウム，vol.34(5), pp.48-50, 1977

荻野昭：昆虫園におけるホタル飼育，インセクタリウム, vol.15(6), pp.20-27, 1978

荻野昭：ホタルを飼育して 40 年，日本ホタルの会　第 10 回シンポジウム, 2001

橋口住久：低周波ノイズー *1/f* ゆらぎとその測定法,朝倉書店, pp.1-8, 1991

日野幹雄：スペクトル解析,朝倉書店, 1997

ホタル百科事典：http://members.jcom.home.ne.jp/hotaru-net/hotaru/hajime.html, 2004

福垣照美ほか４名：ホタルの発光パターンにおける *1/f"* ゆらぎ現象と癒し効果，日本機械学会論文集 C 編，第 67 巻 657 号, pp.365-372, 2001

石山陽事：脳波と夢,コロナ社, pp.6-10, 1994

嘉田由紀子,生活世界の環境学,農文協, 1997

小林　光夫：色再現・色管理・色の見え,日本色彩学会誌 26 巻１号, pp.18-29, 2002

近藤次郎，環境科学読本，東洋経済新報社, 1984

Lall,A.B. and K.M. Worthy : Action spectra of female's response in the firefly *Photinus phralis* (Coleoptera: Lampyridae): evidence for an achromatic detection of the bioluminescent optional signal, Jornal of Insect Physiology, vol.46, pp.956-968, 2000

Llyod,J.E : Studies on the flash communication system in Photinus fireflies, Misc.Pub.zool. Univ.Mich., vol.130, pp.1-95, 1966

Llyod,J.E. : Flashes, behavior and additional species of nearctic *Photinus* fireflies (Coleoptera: Lampyridae), Coleoptera Bulletin, vol.23, pp.29-40, 1969

Llyod, J.E. : Bioluminescent communication in insect, Ann.Rev.Ent., vol.16, pp.97-122, 1971

Llyod,J.E. : A firefly inhabitant of constal reefs in New Guinea (Coleoptera: Lampyridae), Biotropica, vol.5, pp.168-174, 1973

大場信義：数種の日本産ホタル類の発光パターンと習性,横須賀市博物館研究報告, Vol.26, pp.21－31, 1979

Ohba, N. : Studies on the communication system of Japanese fireflies, Sci. Rept. Yokosuka City Mus., vol.30, pp.1-62, plus.pp.1-6, 1983

Ohba, N. : Synchronous flashing in the Japanese firefly, *Luciola cruciata* (Coleoptera: Lampyridae), Sci. Rept. Yokosuka City Mus., vol.32, pp.23-32, plus.pp.8, 1984

大場信義：ホタルのコミュニケーション, 東海大学出版, 1986

大場信義：ゲンジボタル, 文一総合出版, 1988

大場信義：ゲンジボタルの遺伝子東西で異なる, 遺伝, vol.45(10), pp.8-9, 1991

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,横須賀市博物館研究報告, Vol.43, pp.17－24, 1995

大場信義：ゲンジボタルの外部形態と発光パターンの地理的変異, 全国ホタル研究大会誌, vol.35, pp.19-22, 2001

大場信義：ゲンジボタルの外部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, vol.48, pp.45-89, 2001

Ohmiya Y., N.Ohba, H.Toh and F.I.Tduji : Cloning, expression and sequence analysis of cDNA for the luciferases from the Japanese fireflyies, *Pyrocoelia miyako* and *Hotaria parvula*, Photochemistry and Photobiology, vol.62(2), pp.309-313, 1995

小野公男：ホタルの人工餌について, 全国ホタル研究会誌, vol.26, pp. 24, 1993

大阪カラーワーク協会 ：http://www005.upp.so-net.ne.jp/fumoto /, 2003

大田登：色再現工学の基礎,コロナ社, pp.6-16,1994

小澤祥司,メダカが消える日 ―自然の再生をめざして―, 岩波書店, 2000

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

Mast, S.O. : Behavior of the firefly (*Photinus pyralis*) with special reference to the problem of orientation, Jornal of Animal Behavior, vol.2, pp.256-272, 1912

Masuda, T., H.Tatsumi and E.Nakano : Cloning and sequence analysis of cDNA for luciferase of a Japanese firefly, *Luciola cruciata*, Gene, vol.77, pp.265-270, 1989

McElroy,W.D., H.H.Seliger and E.H.White : Mechanism of bioluminescence, chemiluminescence and enzyme function in the oxidation of firefly luciferin, Photochem. Photobiol., vol.10, pp.153-170, 1969

水と文化研究会,みんなでホタルダス,新曜社, 2000

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

長町三生：感性工学,海文堂出版, pp.22－23, 1989

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, 1997

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, 1999

日本工業標準調査会：色の表示方法-XYZ 表色系及び $X_{10}Y_{10}Z_{10}$, JIS Z 8701, 日本規格協会, 1999

日本色彩学会：新編　色彩科学ハンドブック,東京大学出版会, pp.89-109, pp.1137-1142, 1998

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

斉藤兆吉：ウェーブレット変換の基礎と応用,朝倉書店, 1998

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

自然環境復元研究会編,水辺ビオトープ,信山社サイテック, 1994

笹井昭一：ゲンジボタル明滅周期と気温について，全国ホタル研究大会誌，vol.32, pp.22-25, 1999

Seliger,H.H. and W.D.McElroy : The colors of firefly bioluminescence: enzyme configuration and species specificity, Proc. Natl. Aca. Soi. USA, vol.52, pp.75-81, 1964

Seliger,H.H., J.B.Buck, W.G.Fastie and W.D.McElroy : The spectral distribution of firefly light, J.Gen. Physiol, vol.48, pp.95-104, 1964

Seliger,H.H., J.B.Buck, W.G.Fastie and W.D.McElroy : The spectral distribution of firefly light, J.Gen. Physiol, vol.48, pp.95-104, 1964

末永蒼生：事典　色彩自由自在,晶文社, 42-49, 1994

鈴木浩文：多摩地域におけるゲンジボタル集団の遺伝的多様性と保全対策,東京ホタル会議報告書, 1999

Suzuki,H., Y.Sato, S.Fujiyama and N.Ohba : Allozymic differentiation between two ecological types of flashing behavior in the Japanese firefly, *Luciola cruciata*, J.Ent., vol.64(3), pp.682-691, 1996

鈴木浩文，佐藤安志，大場信義：ミトコンドリア DNA からみたゲンジボタル集団の遺伝的な変異と分化，全国ホタル研究大会誌, vol.33, pp.30-34, 2000

高安秀樹：フラクタル,朝倉書店, 1986

高安秀樹：フラクタル科学,朝倉書店, 1995

武部寛，吉川貴浩，井出幸介，窪田康男，草桶秀夫：遺伝子から見たゲンジボタルの地理的分布，全国ホタル研究大会誌, vol.33, pp.27-29, 2000

Tatsumi,H., N.Kajiyama and E.Nakano : Molecular cloning and expression in *Escherichia coli* of a cDNA clone encoding luciferase of a firefly, *Luciola lateralis*, Biocheim.Biophys. Acta, vol.1131, pp.161-165, 1992

The International Electrotechnical Commission : IEC 61966-2-1Ed.1.0.-Bilingual Multimedia Systems and Equipment-Part2-1 : Default RGB colour space-sRGB, IEC, 1999

White,E.H., E.Rapaport, H.H.Seliger and T.A.Hopkins : The chemi and bioluminescence of firefly luciferin: an efficient chemical production of electronically excited states, Bioorganic Chem., vol.1, 9 pp.2-122, 1971

Worthy,K.W., A.B.Lall : Action spctrum of the female response in firefly *Photinus phralis* (Coleoptera: Lampyridae), Society for Neuroscience Abstracts, vol.22(2), pp.1145, Abstract no. 452.20, 1996

矢島稔：ホタルの日周活動と発光信号－ゲンジボタルの場合,インセクタリウム, vol.15(6), pp.12-19, 1978

遊磨正秀,ホタルの水・人の水,新評論, 1996

遊磨正英，後藤好正：文化昆虫ホタル－古典の中から－，全国ホタル研究大会誌, vol.32, pp.10-17, 1999

ゆらぎ現象研究会（編集：武者利光）：ゆらぎの科学, Vol.1－10，森北出版, 1991－2000