

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* (第二報, ホタル飼育空間せせらぎの構築)

阿部 宣男¹・稲垣 照美²・干場 英弘³・穂積 訓⁴

¹〒175-0082 板橋区高島平 4-21-1 板橋区ホタル飼育施設

²〒316-8511 日立市中成沢町 4-12-1 茨城大学工学部機械工学科

³〒175-8571 板橋区高島平 1-9-1 大東文化大学第一高等学校

⁴〒316-8511 日立市中成沢町 4-12-1 茨城大学大学院理工学研究科 SVBL

Design and construction of a firefly ecosystem turned to natural recurrence of aquatic environment (II: construction of Seseragi, a breeding house for fireflies)

Norio Abe¹, Terumi Inagaki², Hidehiro Hoshiba³ and Satoshi Hozumi⁴

¹Itabashi Firefly Breeding Facility, Itabashi, Tokyo, 175-0082 Japan

²Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University,
4-12-1 Naka-narusawa, Hitachi, Ibaraki, 316-8511 Japan

³Daito Bunka University Dai-Ichi High School, Itabashi, Tokyo, 175-8571 Japan

⁴Satellite Venture Business Laboratory, Ibaraki University,
4-12-1 Naka-narusawa, Hitachi, Ibaraki, 316-8511 Japan

Abstract. This study describes a new method of breeding fireflies with a breeding house, Seseragi, mimicking the natural habitat of fireflies, and the results of successive reproduction for six generations from 1997 to 2002. For the breeding of fireflies, based on the observation of natural conditions of firefly habitats, some environments were carefully managed in Seseragi, such as the aquatic environment, soil environment, thermal environment and biological environment. In six years' breeding, over 80000 individuals were produced in Seseragi, which suggests that we have succeeded in constructing a favorable breeding-environment for fireflies.

Key words: Firefly, *Luciola cruciata*, aquatic environment, breeding method.

(要約)

本研究は、ホタルの自然環境への回帰に向けた飼育空間、「せせらぎ」の構築と、1997年から2002年までの6世代にわたる飼育の結果について報告する。ホタル飼育のために、野外におけるホタル生息地の諸条件に基づいて、せせらぎ内の水・土壌環境、気温、生物環境などを調整した。6年間の飼育を通して、せせらぎから8万匹以上の個体が誕生するなど、ホタルの飼育に適した手法・環境を構築することができた。

はじめに

ゲンジボタル (*Luciola cruciata* Motschulsky, 1854) は流水が豊かで、かつ多様な生態系が存在する河川に生息するなど、その生息には物理的・生物的環境が大きく影響する(遊磨, 1996; 小澤, 2000)。ホタルの生息に必要な物理的環境として、流水の他にもホタルが産卵するための基質(コケ類)や、蛹化の際に潜り込むための柔らかい土壌が必要である。また、生物的環境としては、ホタルを中心とした生態系が必要である。例えばホタルの餌となる巻貝(カワニナ)の生育には、その餌となる藻類が必要であり、藻類の生育には、その栄養分として魚類などの排泄物や生物の死骸などの有機物を分解するバクテリア類などが必要である。しかしながら、河川の開発や農薬の散布などによる生息可能な水圏の減少、護岸整備などによるホタルが蛹化できる土壌の減少などにより、都市郊外でもホタルの優雅な光の舞を見ることが出来なくなっている。さらに、ホタルの交尾行動は暗所で光による交信が必須条件であるため、街灯など夜間の灯りの増加はホタルの繁殖行動を阻害している可能性がある。以上のような要因が重なり、多くの地域でホタルの個体群が消失してきたと考えられる。

このような背景を踏まえて、絶滅が危惧されるホタルの生物群を維持・回復する活動が広く行われている(例えば、水と文化研究会, 2000 など)。これまで阿部ら(2000, 2001, 2002, 2004)は、ホタルが生息する上で適した水環境や土壌環境、温熱環境、動植物群との共生関係を調べるために、閉鎖型ミニ生態系を用いてホタルの生息環境を様々に変えて調査した。本研究では、より自然に近い条件での飼育環境を実現するために、「せせらぎ」と名付けたホタルの大量飼育空間(以下、せせらぎ)を造って、野外におけるホタル飼育の可能性を考察した。

材料と方法

本研究ではゲンジボタルの大量飼育を試みた。本研究での飼育には、供試材料として1989年に福島県大熊町から譲渡されたゲンジボタルの卵約300個と、ホタルの餌としてその同地域のカワニナ (*Semisulcospira libertina*) を使用した。当初、これらのホタルは板橋区温室植物園で飼育が試行され、順調に飼育が進んだことから1993年に現在のホタル飼育施設が開設された。現在(2006年3月)でも方法を改善しながら飼育活動を行っているが、ここでは、せせらぎにおいて飼育の方法が確立し、産卵・羽化する個体数が安定した1997年から2002年までの6年間のゲンジボタル(以下、ホタル)飼育の成果を報告したい。また、せせらぎでは同時にヘイケボタル (*L. lateralis* Motschulsky, 1860; 栃木県栗山村より1989年に採取)の飼育も行っているが、その成果は割愛する。

ホタルの生活史と生態環境の設計 ホタルの生活史は大きく4つに区分される(阿部ら, 2004): 卵期(6-7月)、幼虫期(7月-翌月)、蛹期(4-5月)、羽化・繁殖期(6月)。採餌・休息・繁殖などそれぞれのステージにおいて、ホタルの生息環境は異なる。卵は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て脱皮を繰り返す。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。蛹化後、約40日で羽化すると繁殖期となり、交尾後メスは水辺に産卵する。

こうした生活史を満たす生息環境を人工的に再現するために、ホタルを中心としたできるだけ自然条件に近い生態環境を設計した。まず、ホタルの生息に適した水環境は、以下に述べるように、弱アルカリ性の水質で、水中のアンモニアや亜硝酸性窒素やアンモニアなど有害な化学物質がごくわずかな状態である。

ホタルの幼虫やその餌となるカワニナの稚貝は、水中の有害な化学物質の量により死滅することもあるため、飼育水は有害物が極微量な状態に維持する必要がある。次に、蛹化に適した土壌環境は、ホタルが蛹期を過ごす上で、適度な湿り気を保ちながら水捌けの良い土壌であろう。そのために、植物がよく育ち、かつ土壌生物が生息できるような状態を目指した。個体の活動や発育に適した温熱環境として、ホタルの生活史に合致した季節の温度環境に近づけた。最後に、ホタルと共生する生物群については、単純化しつつ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、ホタルの天敵を排除した。

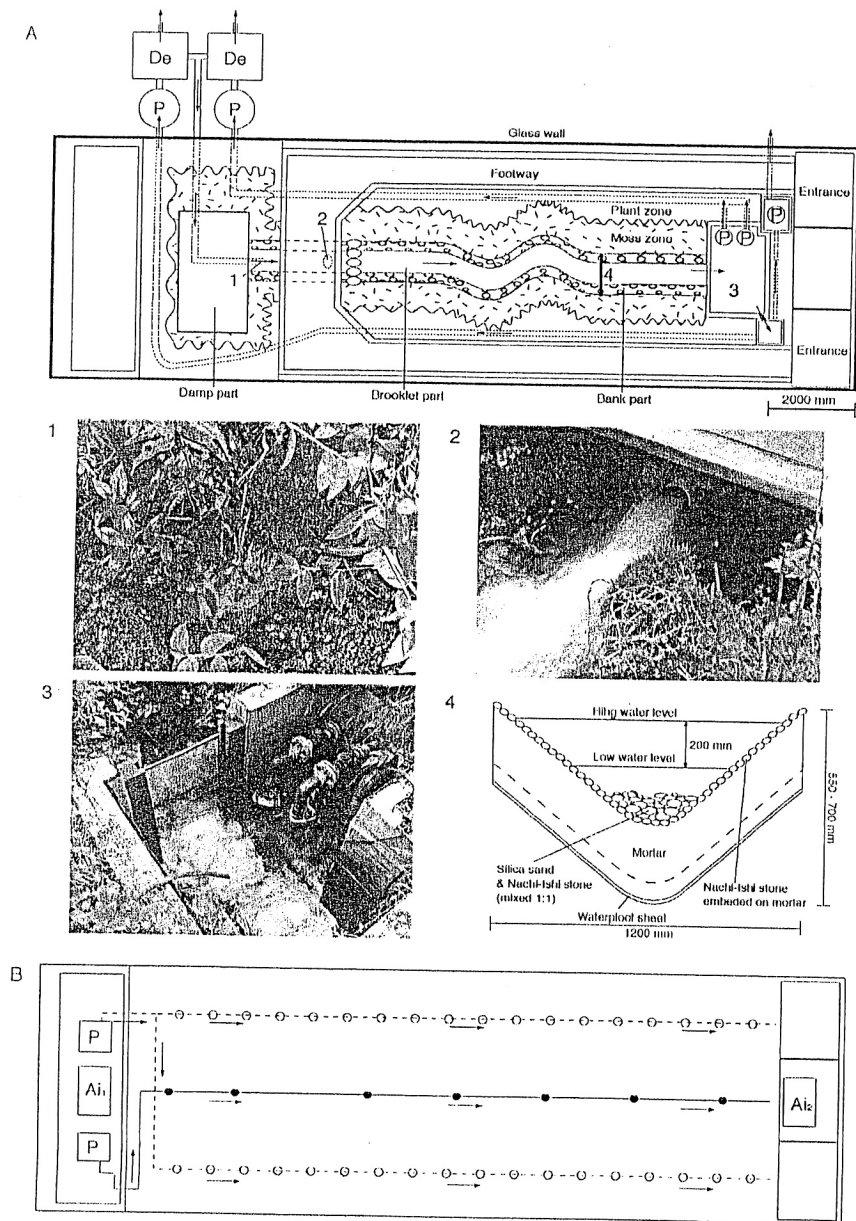
せせらぎ空間と飼育条件 本研究では、東京都板橋区エコポリスセンターホタル飼育施設内に、ホタル飼育空間「せせらぎ」を造った(幅5400mm, 奥行き21375mm, 最大高さ4099mm)。図1は、せせらぎの概略図を示す。せせらぎは大きく湿地部(図1A-1)、小川、土手からなり、屋根および周囲をガラス壁で覆っている。湿地部および土手では成虫が飛翔・産卵し、小川では幼虫が成長する。せせらぎ内部において、上記の環境を実現するために、以下のような施設の整備および管理を行った。

1. せせらぎの水環境 せせらぎの小川の水には、骨炭に2日つけて塩素を除去した水道水を用いた。小川の水深は平均約20-40cmで、上流から下流まで瀬や落ち込み・巻き込みに伴う深みなど変化に富んだ水深となるよう設計した(図1A)。小川の流速の制御は、屋外に設置した2台のポンプ(PONTOS717型, 二相100V, 吸込口径50mm, 吐出口径50mm, 吐出量300ℓ/min, 全揚程6.0m, 荏原製作所製)を使用して、電圧を調整しながら両方又は片方ずつに切り替えて運転した。せせらぎの小川の流速は、実際にホタルが生息する小川を想定して、流出口(図1A-2)で約40-50cm/s、直線部で約10-25cm/s、曲線部で約15-25cm/sと

なるようにした。特にホタルの幼虫が生息するせせらぎの直線部では、自然の状態を再現するために、4月中旬から11月中旬までは平均流速を15cm/s、11月中旬から翌年の3月中旬までは10cm/sに設定した。雪解けのある3月下旬や、9月、10月の台風シーズンには、直線部の流速をしばしば30cm/sに上昇させた。これは、増水による川底の浄化を兼ねている。その際、自然界同様、川底の沈殿物と一緒にホタル幼虫やカワニナが流されるため、ここでは循環ビッド(図1A-3)にステンレス製の網(3mmピッチ)を二重に重ねた受け皿を設置して、動物が濾過槽に流されないようにした。小川の水は、しばしば濾過槽などから排出して交換した。

次に、ホタルの幼虫が生息するせせらぎの小川の水質について述べる。まず、水質を管理するための指標として、野外で実際にホタルが生息している箇所の水質を調査した。各値の測定にはテトラキット(テトラ社)を用いて測定した。表1は山口県から福島県まで、10地点のホタルの生息地において水質を測定した結果である。表から、ホタル生息域の水質の特徴として、以下のことが示された: 1. 水質はほぼ中性に近い弱アルカリ性; 2. 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; 3. アンモニウム化合物が極微量あるいはほとんど存在しない。ここでは、測定された10地点の平均をホタル生息環境の基準水とする。

せせらぎにおいて、小川の水質を上記した値以内になるよう管理するために、濾過槽を用いて飼育水を浄化した。濾過槽(SC-5, 1080mm×830mm×760mm, 容量650ℓ, タカラ工業)を濾過ポンプ(单相100V, 吸込口径75mm, 吐出口径75mm, 吐出量26t/h, 全揚程4.0m, タカラ工業製GP-200型)とともにせせらぎ空間の外側にそれぞれ2台ずつ設置した(図1A)。それらを一台ずつ交互に運転することで、装置寿命の延命化や、一方が故障した際の安全装置とした。濾過槽の濾材には、塩化ビニ



ル、ナイロン、シェルフィルターを用いた。ホタルの飼育において、1から2齢の若齢幼虫期(8月から10月)の水質の変化、特にアンモニアの増加による死亡率は非常に高い。そのため、若齢幼虫が多い夏期には、特に頻繁な水質調整が必要になる。夏期に濾過装置で有害な化学物質が除去しきれないときは、水質調整剤(バイオコリンH3、バイタル、ステラスリン、テトラ社)を投入して水質を微調整した。ホタルの幼虫が2齢以降に成長すると、わずかな水質変動での死亡率は低下するため、水質調整剤の使用はほとんどなくなった。

降雨や噴霧は、室内の温度調整による温度の低下を補うとともに、ホタル成虫の葉上での水分摂取を容易にする。

2. せせらぎの降雨制御 ホタルの上陸や、羽化、産卵など一連の活動は、弱い降雨時あるいは降雨直後によく見られるなど、雨や気圧の変化に関係することが知られる(羽田, 1966)。また、ホタルは湿潤な環境を好むため、せせらぎ空間内でも湿度をより自然に近い状態にするために降雨や噴霧を行った。

3. せせらぎの土壤環境 図1A-4は、せせらぎの任意地点の断面形状を示す。小川の水底は、那智: 珪砂石を1:1の割合で混合した土壌を敷きつめた。混合した那智石は、濡れ縁面積を増大するとともに、ホタルの幼虫やカワニナの稚貝に生息場所を提供する。さらに、表面にはカワニナの餌となる苔等が多く付着し、カワニナの摂食や繁殖場ともなる。また、珪砂は水草の植え付けを補助している。せせらぎの土台にはモルタルを用い、土砂の流出を低減するために、表面に那智石を埋め込んだ。周囲の土手の高さは約300 mmで、黒土: 赤玉土: 富士砂を5:3:2の割合で混入して造成した。この組み合わせにより、水はけのよい土壤環境となるようだ。

降雨は、塩素を除去した水を、降雨ポンプ(N3-205SH, 単相100V, 吸込口径25mm, 吐出口径25mm, 吐出量24 l/min, 全揚程16m, 川本製作所)を通して、せせらぎ空間の屋根に張り巡らせたスプリンクラーから放水した(図1B)。また噴霧は、細霧ポンプ(MS-153型, 単相100V, 吸込口径15mm, 吐出口径15mm, 吐出量10 l/min, 全揚程8.1m, サンノー)を通してせせらぎの左右端に配管した36箇所ノズルから噴霧した。降雨や霧の発生を出来る限り自然条件に合わせるために、季節毎あるいは時間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た。こうした

4. せせらぎの温熱環境制御 周囲の気温はホタル成虫の活動に影響するとともに、温度が上昇しすぎると、成虫は過熱により死んでしまうことがある。せせらぎ空間はガラス壁で構成されているため、特に夏場の室内温度の制御は困難である。そこで、室内両端に冷房機2台(RP-5RH2+RCR-5H2, 法定冷凍能力2.00/2.40 t, 冷房能力11200/12500 kcal/h, 図1B, Ai1; RP-8RH2+RCR-8H2, 法定冷凍能力3.23/3.89 t, 冷房能力16000/18000 kcal/h, 図1B, Ai2)いずれも日立製作所)を設置した。これら冷房機には、集中コントローラ(PSC-3S, 日立製作所)を取り付け、せせらぎ空間の外部から

Fig. 1. Outline of "Seseragi". 1A means scheme of "Seseragi". The Seseragi is composed of three parts, i. e. damp part, brooklet part and bank part. The numbers in Fig. 1A agree with the pictures arranged below: 1, inlet of water into Seseragi; 2, regulator of water flow; 3, circulation pit; 4: cross section of a brooklet part. 1B means arrangement of sprinklers and water sprayers; ● and ○ mean sprinklers and water sprayers, respectively. Arrows mean the direction of water flow, and other abbreviations are as follows. De: filter tank of circulation water; P: pump; Ai: Air conditioner; Ai1: PR-5RH2+RCR-5H2; Ai2: PR-8RH2+RCR-8H2.

Table 1. Amount of chemical compounds seen in the 10 localities where firefly, *Lucifera cruciata*, was seen.

Location	pH	NH ₃ (mg/l)	NO ₂ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	GH (°dH)	COD (ppm)
Toyota*1	7.7	0	0.04	20	2	1
Kaminojo*2	7.5	0	0	10	3	1
Omiyanoue*2	7.5	0	0	25	4	3
Tenjoyugashima*2	6.8	0	0.02	5	2	1
Sashita*2	7.5	0	0.15	10	4	3
Kawatsu*2	7.3	0	0	25	3	1
Katsuura*3	8.2	0	0.08	10	6	2
Tsukuba*4	7.5	0	0.02	100	4	0
Shiobara*5	8.0	0	0.02	10	10	8
Urabandai*6	6.8	0	0.02	50	2	7
Mean	7.5	0	0.04	27	4	2.7

*1 Yamaguchi pref.; *2 Shizuoka pref.; *3 Chiba pref.;
*4 Ibaraki pref.; *5 Tochigi pref.; *6 Fukushima pref.

Table 2. Amount of chemical compounds seen in the Sesezagi and Ecological-aquarium (Eco Aq., in the Table; cited from Abe *et al.* (2004)).

Location	pH	NH ₃ (mg/l)	NO ₂ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	GH (°dH)	COD (ppm)
Sesezagi	7.8	<0.01	<0.01	<0.01	9.8	<1
Eco Aq.	7.7	<0.01	<0.01	<0.01	8.8	<1

Table 3. Number of firefly, *Lucifera cruciata* counted at each developmental stage from 1997 to 2002.

Year	Number of <i>Lucifera cruciata</i>			
	Egg	Larva	Pupa	Adult
1997	3163950	2845000	92417	14063
1998	2257128	2113800	94417	15246
1999	2788608	2641200	81093	12928
2000	1986188	1686500	81628	13180
2001	1749063	1577300	61561	14825
2002	1899612	1801860	54586	16522
Total	13844549	12665660	465702	86764

In this table, pupa means the number larvae landed.

温度調節が出来る。一方、これら冷房機を最大限稼働しても、夏期のせせらぎ内の温度は日射や周囲気温により大きく上昇する(室内温度: 地面から高さ2 mの位置で平均30°C, 上陸地面で平均28°C)。そこで、夏期は寒冷沙を天窓に設置してせせらぎへの日照量を調節し、室内温度を調整した。これにより、夏場に外気温が33°Cでも室内温度を平均26°Cに保つことができた。また、寒冷沙の使用は、外部の光が入るのを防いで、ホタルの繁殖行動の阻害

を減ずる上でも有効である。

前報(阿部ら, 2004)で示したように、ホタル幼虫の発育期間は、水温と深い関係がある。せせらぎにおいて、季節に応じて水温を管理するために、濾過槽の直前に2台の冷温水機(TKC2200C, 使用限度水量7500 l, 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, タカラ工業)を設置して、一年を通して水温がおよそ12-16°Cになるよう制御した(2月, 12.5°C; 4月, 13.5°C; 7月, 15.0°C; 8月, 16.0°C; 10月, 13.0°C; 12月, 11.5°C)。

5. せせらぎの共生動物群 最後に、上記の飼育環境に導入した生物について述べる。せせらぎに導入した生物は、野外でホタルが生息している数地点(秋田県本荘市, 福島県双葉郡大熊町, 静岡県川津町, 栃木県那須塩原, 徳島県三好郡池田町)で観察された生物群の一部である(阿部ら(2004)のTable 4を参照)。まず、植物を小川の水中から土手にかけて、それぞれの生息条件に応じた植帯域に導入した。以下に導入した生物の一例を示す。小川の水中には、クレンソノヤカズノゴケを、土手にはヨモギヤカヤ、シダ類などの植物のほかに、ホタル成虫の産卵地となるスギゴケやミズゴケを植えた。導入した動物は、水中にはホタルの幼虫やカワニナに加え、メダカやハゼ、ヌマエビを、土壌にはミミズやダンゴムシなどを導入した。

結果と考察

表2は、せせらぎ内の小川の水質検査結果を示す。せせらぎでは、アンモニアや亜硝酸性窒素の濃度などが極めて低く、水棲動物にとって有害な物質がほとんど存在しない。せせらぎの水質を生態水槽内の水質と比較したとき、それぞれの値に大きな違いはなかった。また野外でのホタル生息地の水質(基準水, 表1)

と比較したとき、せせらぎのアンモニアや亜硝酸性窒素は基準水とほぼ同じであった。また、他の物質についても各地点の差異に収まるものであった。一方、せせらぎでは基準水と比べてGH値がやや高いが、これはせせらぎの水に東京都の水道水を使用していることによると思われる。

表3は、せせらぎにおける1997年から2002年までの、ホタルの産卵数、孵化した幼虫の数、上陸した幼虫数および羽化した成虫の数を示す。表から、例年多数の産卵がなされ、それらが成長して多くの成虫が誕生したことが示される。それぞれの成長段階の年平均数は、以下の通りである; 卵, 2307424個; 幼虫, 2110943匹; さなぎ, 77617匹; 成虫, 14460匹。以上のように、6年間を通してのべ80000匹の成虫を誕生させるなど、多数のホタルが生息・繁殖できる諸環境を維持することができたといえる。このことは、本研究で調節した環境はホタルの生活史の許容範囲内にあることを裏付ける。

本研究の目的は、より自然に近い条件でのホタル飼育環境の構築である。ここでは、せせらぎの成果と前報の生態槽での飼育結果を比較する。異なる環境での結果を比較するために、両環境下での羽化数を飼育空間の基部の面積で標準化して、単位面積あたりの羽化数と羽化率を求めた。せせらぎにおける単位面積あたりの羽化数(年平均14460匹/基部面積5400 mm×17400 mm; エアコン・入り口部を除く)は、生態槽(1槽の平均222匹/基部面積800 mm×600 mm)と比べて約67%少なかった。また、羽化率(羽化数/孵化幼虫数)も生態槽の方が高かった(せせらぎ, 19% vs 生態槽, 54%)。これらの違いは、それぞれの飼育空間における、飼育者のケアの頻度の差によると思われる。空間的な規模の小さい生態槽においては、飼育者がホタルの生存のためにより細やかなケアを行うことができたのであろう。以上のことから、環境の変化が厳しく、かつ捕

食者が存在する自然条件において、ホタルの羽化率は、飼育者のケアがあるせせらぎよりもさらに低いものと思われる。

本研究のせせらぎは、野外の諸条件を元に作成した屋内の人工空間である。本研究の結果から、10 mほどの小川の水質を十分に管理して、その周辺の土壌、餌、共生動物群および光環境を整備すればホタルの生存・繁殖率が上昇し、ホタルが見られなくなった地域においても個体群の維持が人工的に可能となることが考えられる。しかしながら、野外条件では羽化率がせせらぎよりも低くなる可能性が示唆されたことから、今後は覆いのない屋外環境において人工的に循環させた水路での飼育を行うなど、より自然に近い条件で飼育を行う、野外におけるホタルに適した生息場所の改善・管理方法を検討する。

引用文献

- 阿部宣男・稲垣照美・廣瀬満・干場英弘・大平武久・安久正紘, 2002. 多機能バイオ用土を用いたホタル飼育と環境の改善. 日本感性工学会エコデザイン, ジャパンシンポジウム: 94-95.
- 阿部宣男・稲垣照美・干場英弘・穂積訓・大平武久, 2004. 水圏環境の自然回復に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倣と7世代継承の成果). 日本生物地理学会会報, 59: 83-91.
- 阿部宣男・稲垣照美・安久正紘・大平武久・干場英弘・浅井浩, 2000. 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」空間作りに関する研究. 2000 環境工学総合シンポジウム, 第10回環境工学総合シンポジウム2000 講演論文集: 277-278.
- 阿部宣男・大平武久・稲垣照美・朝日昭・干場英弘・安久正紘, 2001. 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」空間作りに関する研究(第2報 硝化菌によるアンモニア・亜硝酸分解過程). 2001 環境工学総合シンポジウム, 第11回環境工学総合シンポジウム2001 講演論文集: 324-325.

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

羽田弥太, 1966. ホタルの飼い方. インセクタリア
ム, 2 (7): 6-7.

水と文化研究会, 2000. みんなでホタルダス. 新
曜社.

小澤祥司, 2000. メダカが消える日-自然の再生

を目指して-. 岩波書店.

遊磨正秀, 1996. ホタルの水・人の水. 新評論.

(2006年4月20日 受理)