

短 報

LED ランプと蛍光管ランプに対する水路から発生する水生昆虫類の走光性 —ユスリカ類に注目して

平林公男¹⁾・東野真²⁾・谷口彬雄³⁾・山本優⁴⁾

1) 信州大学 学術研究院 理工学域 繊維学系

2) セキシン電機株式会社

3) 信州大学

4) 山口県下関市

(受領 2016 年 6 月 19 日 ; 受理 2016 年 8 月 19 日)

Field research on phototaxis of aquatic insects from a small canal by light emitting diode and fluorescent lamps. —focus on response of adult chironomid midges. Kimio Hirabayashi¹⁾, Makoto Higashino²⁾, Yoshio Taniguchi³⁾, Masaru Yamamoto⁴⁾
¹⁾Institute of Textile and Science, School of Science and Technology, Academic Assembly, Shinshu University, 3-15-1 Tokida, Ueda, Nagano 386-8567, Japan. ²⁾Sekishin Denki Co, Ltd. ³⁾Shinshu University. ⁴⁾Shimonoseki City, Yamaguchi Prefecture.

Abstract

The attraction of nuisance adult aquatic insects to different wavelengths of light was studied using light traps from August 15 to 24 (9 nights), 2011. The effects of continuous emission of six different light wavelengths were studied using light emitting diodes (LED) lamps (white, green, red, blue and UV), and a 6-W white fluorescent lamp (6W-FL). More than 6,000 individual aquatic insects were collected during the investigation period. Three orders of insects were collected using the LED and 6W-FL lamps, and the most abundant taxon was Chironomidae. The 6W-FL lamp attracted 2–6 times more insects than the white LED lamp. A pulsed-LED lamp attracted only half as many insects as the continuous emission white LED lamp. These results indicate that manipulation of light wavelength may allow development of an integrated strategy to control adult aquatic insects.

Key words : aquatic insect, chironomid midge,

phototaxis, LED lamp, pulsed-LED lamp, species composition.

はじめに

水生昆虫類は生活環の全部、あるいはその一部を水中で生活する昆虫類を指すが(河合・谷田, 2005), 水質汚濁の進んだ水辺周辺域では, 季節的に異常多発現象が確認され, 周辺住民からは不快生物として嫌われている(例えば, 関根ら, 2013; 宇治市トビケラ対策検討関係者会議, 2014). 特に, ユスリカ類については, 日本でも数多くの報告例がある(近藤ら, 2001). 富栄養化した河川や湖の周辺域で成虫の大量発生が社会問題化しており, その対策は急務である(Tabaru *et al.*, 1987). ユスリカ対策としては, 発生場所が比較的狭い所であれば, 薬剤を用いた化学的防除が一般的であるが, 自然湖沼や河川といった広い水域が発生場所である場合には, コストや他生物への影響, 薬剤耐性獲得の問題などから, 光や音などを利用した物理的な防除対策や, 天敵生物を利用した生物学的対策が試みられてきた(平林・沖野, 1999). 中でも, 物理的防除対策, 特に光による飛来成虫量の制御では, 成功した事例もいくつかあり (Ali *et al.*, 1984; 1986 など), 有力な対策の一つとなっている. 光による防除法には, 成虫を集中的に光源へ誘引させるものと, 逆に光源から忌避させるものとに大別できる. 一般的に, 灯火に誘引される昆虫類は 300–400 nm の短波長によく誘引され, 600 nm のような長波長には誘引されにくいことが知られている(小山, 1969). 一方で, 上記のような波長(光質)のみで飛来量が決まっているわけではなく, 光量に依存して誘引される昆虫類も数多い(弘中・針山, 2014).

LED (Light-Emitting Diode) 光源ランプは, 光源から放出される波長を制御することが比較的容易であるため, ある一定の輝度を確保しながら特定の波長を追加したり, 削除したりすることが可能である(小谷, 2010; LED 照明推進協議会, 2006). たとえば, 多くの昆虫類が誘引される近紫外光(350 nm 付近の短波長)領域の波長をカットすることも容易で, カットされた LED ランプは一般的に昆虫類を誘引しにくい光源としてよく知られている(例えば山田, 2011). このため, 昆虫類が多数飛来する街路灯や道路照明灯, 常夜灯などに, 防虫灯として今後, ますま期待されるところである(小紫, 2010; LED 照明推進協議会, 2006). ところが, 近年, 河川中流域に大量に生息するカゲロウ類やユスリカ類の中には, これまでの蛍光管と同程度に高輝度

LED 光源に大量に誘引されものがいることが報告されている (Hirabayashi *et al.*, 1993) . これは、これらの水生昆虫類が、波長(光質)よりも、強光(光量)に影響されて群飛を行うためではないかと推測される. 今後、我が国における LED 光源の街路灯などへの普及拡大に伴い、光量を落とさずに、昆虫類が誘引されにくい LED 光源の開発が極めて重要となってくる(平間, 2005).

本研究では、河川より羽化し、人家に大量飛来する水生昆虫類の成虫を対象として、これまで広く用いられてきている蛍光管ランプ (6W-FL ; 電源と同じ周波数-60Hz-での点滅) と、近年、急速に普及しはじめている LED ランプとを用いて、昆虫類による走光性の違いを明らかにすることを目的とした. 本報告では、6W-FL と同じエネルギー放出量である波長の異なる LED ランプを 4 種類 (Green ランプ, White ランプ, Red ランプ, Blue ランプの連続光) 準備し、ランプ毎にどのような水生昆虫類が誘引されるのかを検討した. また、365 nm の波長を特異的に放つ UV LED ランプ(放出エネルギー量は 6W-FL の 1/5) も併せて調査光源に加えた. ユスリカ類については種毎に誘引されやすい波長ランプを検討した. さらに、波長を一定にして、LED ランプの特性でもある光源の点滅(パルス)条件における水生昆虫類成虫の走光性についても White ランプを用いて検討した.

方 法

1. 調査地点の概要

千曲川中流域は付着藻類の現存量が高く、これを餌とする水生昆虫類が数多く生息している (Hirabayashi *et al.*, 2004). 本研究は、千曲川本流から農業用水として一部河川水を取水し、長野県上田市南西部へ農業用水として運ぶ桝網用水路(水質は千曲川とほぼ同様. COD は 3.5–4.1mg/l ; 上田市, 1999) で行った (Fig.1). 調査地点は、JR 上田駅より西方に約 600 m の場所に位置し、夜間遅くまで営業する店舗(書店)敷地内において行った. この店舗駐車場のすぐ脇(店舗から約 15m)を、用水が流れている (Fig.1). Hirabayashi and Zukeran (2012)によると、本店舗への飛来水生昆虫類は 6 月から 8 月の夕方から夜間(21:00 ごろまで)にかけて極めて多い事が報告されており、その発生源は本店舗駐車場横の桝網用水であることが確認されている. 店舗周辺は、水路と平行して南側に、しなの鉄道と長野新幹線の線路が位置している(店舗より約 20 m 離れた所). 用水路は、上田駅周辺から本店舗の駐車場までは、部分的に暗渠となっており、本店舗の駐車場より下流側が開渠区間となっている. 水路幅は約 3 m で、深さは約 5 m ある. 調査期間中は、水深約 20–30cm 程度の河

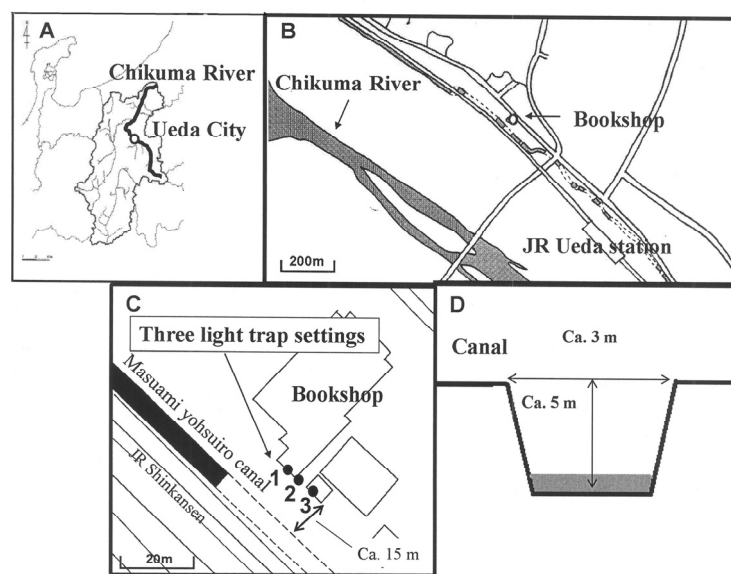


Fig. 1 Map of the studied area A: Chikuma River and Ueda City in Nagano Prefecture, Japan, B: Summary and surroundings of sampling station, C: Location of sampling positions (1, 2 and 3), D: Structure of Masumi-yohsuiro canal

川水が流れていた。

2. 調査方法

調査は 2011 年 8 月 15 日（設置）から 8 月 24 日（撤収）までの 10 日間（9 夜）行った。枳網用水路沿いの店舗駐車場隅に（用水からおおよそ 15 m）に合計 3 機の野沢式ライトトラップ（NH-5 型、野沢（株）；採集された昆虫類が傷まないように New Jersey 型ライトトラップ（馬場・平嶋, 1991）の吸引ファンを採集籠の下部に取り付けた改良型）を用水路と平行して 5 m 間隔で設置し、用水から発生してくる水生昆虫類を毎日捕獲した。なお、本実験では、野沢式ライトトラップの光源部分（通常は Black Light: BL 350 nm に波長のピークをもつ蛍光管）を LED ランプまたは 6W-FL ランプに取り換えて使用した。用水路からの成虫発生量が日々異なることが予想されたために、3 機のトラップのうち、必ず 1 台はコントロールとして LED White ランプを設置した。以降の水生昆虫類の捕獲データは、この LED White ランプで捕獲された個体数を基準として、他の 2 台のトラップで捕獲された昆虫類の捕獲個体数を相対的に評価した。トラップ 3 基は、地上約 1.5 m の位置に約 5 m 間隔で配置した。なお、2011 年 6 月 24 日～7 月 2 日まで、同地点同トラップ設置場所において予備調査を行っている。全 3 基トラップに同一の光源（FL または BL）を設置し、場所による違いを検討した。その結果、特に捕獲しやすい場所、捕獲されにくい場所は無いことを確認している。調査期間中は毎日、全てのトラップの電源と光源を 16:00 にタイマーで作動させ、翌朝、7:30 から 8:30 の間に捕獲された昆虫類全てを回収した。回収した昆虫類は直ちに実験室に持ち帰り、肉眼で種類ごとに分類し、必要に応じて、実体顕微鏡などを用いて、形態学的特徴を基にユスリカ科、ガガンボ科、その他のハエ目、カゲロウ目、トビケラ目に分類した。ユスリカ類については、ランプ毎に、調査期間内で最も捕獲個体数の多かった日の試料について、全ての種（雄成虫）を Wiederholm (1989), Sasa and Kikuchi (1995), Langton and Pinder (2007) の検索表を用いて同定した。なお、雌成虫については、雄成虫の検索表に準じて、同定を行った。

3. 調査期間中の環境要因

水生昆虫類の飛翔条件に大きく影響を与えると思われる環境要因として、河川水温や気温、降水量などが考えられた。本研究では、調査期間内で、サンプル回収時の用水路内を流れる河川水の水温（サーモメータ：日本電子）を毎回測定した。また、日平均気温、日最高気温、日最低気温、日降水量については気象庁 HP

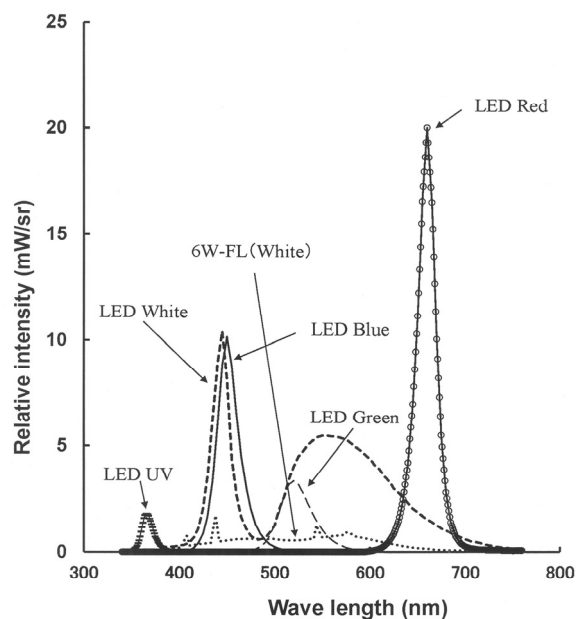


Fig. 2 Relative spectral distribution of the six light sources used in light attraction experiments.

Source: Technical Data from Sekishin-denki Co, Ltd.

(<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>)より、上田市の気象データを引用して用いた。

4. 調査に使用した LED 発光装置

調査に使用した LED 発光装置（セキシン電機株式会社）は、電流を制御することによって LED ランプの発光エネルギーの調節ができるほか、一定間隔で LED ランプの点滅が可能である。本研究では、以下の 2 つの野外実験を試みた。

1) LED ランプから連続放射される波長の違いによる水生昆虫類成虫の走光性（実験 1）（8 月 15 日設置～8 月 21 日撤収の 6 夜）

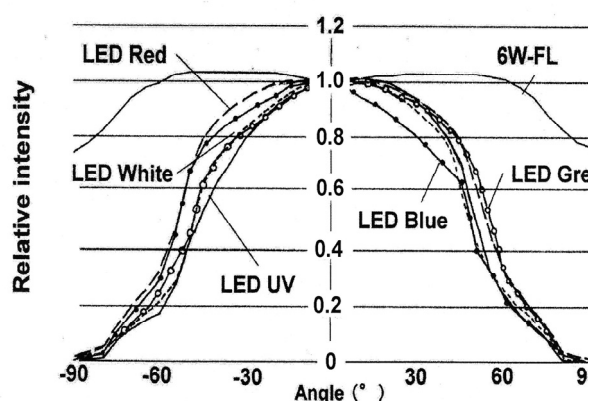
本実験では、以下の 5 つの連続放射光を発する LED ランプと 6W の白色蛍光管ランプを誘引光源として利用した。(1) LED White ランプ：放つ光の波長のピークが 450 と 550 nm の 2 つにある：コントロール、(2) LED Blue ランプ：445 nm に波長のピークがある、(3) LED Green ランプ：520 nm に波長のピークがある、(4) LED Red ランプ：660 nm に波長のピークがある、(5) LED UV ランプ：紫外域の 365 nm に波長のピークがある、5 つのタイプのランプを誘引源として付設した。Table 1 に、調査日毎の光源の組み合わせと設置地点を示した。地点 2 には白色の連続放射光を放つ LED ランプをコント

Table 1. Different combinations of light wavelength (consecutive emission light) / pulsed-light at three traps, each day in the field trials.

| Date | White | Blue | Green | Red | UV | 6W-FL | W-P1 | W-P3 | W-P5 | Examination |
|---------|-------|------|-------|-----|----|-------|------|------|------|-------------|
| Aug. 16 | 2 | | | 1* | | 3 | | | | Exam. 1 |
| 17 | 2 | 1* | | | | 3* | | | | " |
| 18 | 2 | | 1* | | | 3 | | | | " |
| 19 | 2 | | | 1 | 3* | | | | | " |
| 20 | 2 | 1 | | | 3 | | | | | " |
| 21 | 2 | | 1 | | 3 | | | | | " |
| 22 | 2 | | | | | | 1 | | 3 | Exam. 2 |
| 23 | 2* | | | | | | 3 | 1 | | " |
| 24 | 2 | | | | | | 1 | 3 | | " |

Number shows the light trap position (see Figure 1C). At position 2, the trap with a consecutive emission white LED light lamp

* shows we counted chironomid samples.

**Fig. 3** Luminous intensity distribution curve of six light sources used in light attraction experiments.

Source: Technical Data from Sekishin-denki Co, Ltd.

ロールとして固定して設置したことを意味する。*印は、ユスリカ類を計測した試料を示す。Fig.2 には、付設した5つのLEDランプと6W-FLランプの光軸上の発光スペクトルを示した。横軸に波長、縦軸に各波長における光の放射強度 (mW/sr: ミリワット/ステラジアン) を示した (セキシデン電気技術データ)。本チャートでは、エネルギーピークをわかりやすくするために、放射強度は合わせていない。しかし、実験では、各LEDランプのエネルギー放射強度 (mW/sr) を 150 mW/sr (放出エネルギー量が6WのFLランプの放射エネルギー量と同じになるような条件) で統一した。ただし、UVランプは技術的に放射強度を150 mW/srに上げることが不可能であったため、本実験では30 mW/srの放射強度(1/5)で行った。Fig.3 には、実験で使用したLEDランプの配光特性を示した (セキシデン電気技術データ)。横軸に正面を0°とした時の角度(°)、縦軸に光源を1としたときの光の相対強度を表している。プラス方向が光源に向かって右側、マイナス方向が光源に向かって左側とみることができる。6WのFLランプでは、180°光が拡散するのにに対して、LEDランプは±60°で、

すでに半分以下のエネルギー量となり、±90°では0となってしまうことがわかる。LEDランプにはこのような配光特性があるために、実験期間中、光軸は常に水路側に向けて固定することとした。また本実験において、LEDランプの配置により、ランプ間で、お互いに捕獲数に影響を及ぼし合う可能性については、トラップ間で5mの間隔を確保して設置していること、LEDランプが上記配光特性を示すことなどから、ほとんど影響は無いものと考えられる。ただし、6Wの白色蛍光管(6W-FL)については、広く光が拡散する配光特性をもっているため、地点を固定し(本実験では3)、実験を行った。LEDのUVについても、他の光源とエネルギー量が異なるため、上記同様、地点を固定し(本実験では3)、実験を行った。調査期間中における各ランプの調査繰り返し回数は、White(コントロール; 基準)が6回、Redが2回、6W-FLが3回、Blueが2回、Greenが2回、UVが3回であった。

2) LED White ランプを用いた連続放射光源と点滅光源に対する水生昆虫類成虫の走光性 (実験 2) (8月21日

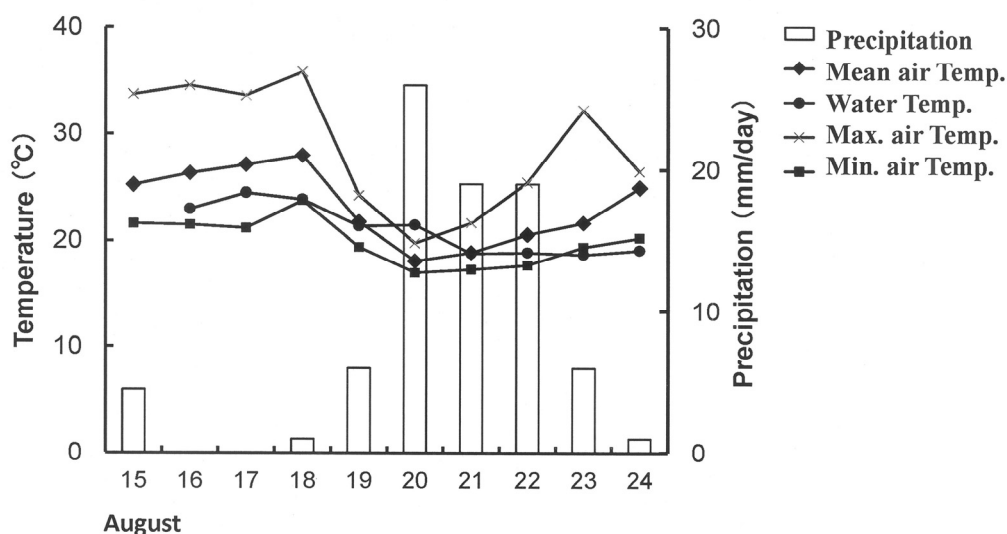


Fig. 4 Environmental factors, water temperature, daily mean/maximum/minimum air temperature, precipitation during the investigation period (August 15-24, 2011)

設置—8月24日撤収の3夜)

光源の点滅の有無と水生昆虫類成虫の走光性との関係を調べるために、LEDのWhiteランプを用いて調査を行った。点滅をしないもの(連続放射)と、点滅(Pulse光)するものとを組み合わせ、野外実験を行った。点滅の間隔は、0.1秒間隔(以下P1)、0.5秒間隔(P3)、1秒間隔(P5)の3パターンを準備した。調査期間中における各点滅頻度の調査繰り返し回数は、White(基準;連続放射)が3回、P1が3回、P3が2回、P5が1回であった。

結果と考察

1. 調査期間中の環境要因

Fig.4に調査期間中の環境要因を示した。2011年8月15日～8月24日の調査において、サンプル回収時の柵網用水の平均水温は $21.2 \pm 2.2^\circ\text{C}$ であった。調査期間中の平均最高気温は $28.1 \pm 6.0^\circ\text{C}$ で、平均最低気温は $19.7 \pm 2.2^\circ\text{C}$ 、日平均気温は $23.1 \pm 3.6^\circ\text{C}$ であった。調査期間中の平均降水量は $8.7 \pm 10.0\text{ mm}$ で8月20日に26 mm/日、8月21日、22日に19 mm/日の降水量があった。

2. 調査期間中に捕獲された水生昆虫類

調査期間中(2013年8月15日～8月24日)に、日々3台のライトトラップに集まった柵網用水路から飛来した水生昆虫類の成虫数は、合計で6,011個体であつた。

た。調査期間の後半(20日～22日)は、降雨の影響もあり、気温も水温も下がったため、用水からの水生昆虫類の発生数が前半にと比べて相対的に少なくなっていた。したがって、日の異なる光源間での捕獲数の比較においては、LEDのWhiteで捕獲された数に対する相対捕獲数で評価を行った。基準としたLEDのWhiteランプに集まった水生昆虫類の成虫は、全体で1,433個体、1日平均 159 ± 137 個体であった(最大は8月23日の476個体/日、最小は8月21日の31個体/日)。内訳は、カゲロウ目が合計で117個体(平均 13.0 ± 10.3 個体/日:8.2%)、トビケラ目142個体(15.8 ± 10.3 個体/日:9.9%)、ユスリカ科1,102個体(122.4 ± 122.6 個体/日:76.9%)、ガガンボ科26個体(全てウスバガガンボ属 *Antocha* spp.で 2.9 ± 2.8 個体/日:1.8%)、その他の昆虫類46個体(5.1 ± 5.8 個体/日:3.2%)であった。以上のことから、ユスリカ類が全体の約8割近くを占めた。

3. LEDランプから連続放射される波長の違いによる水生昆虫類成虫の走光性(実験1)の結果

1) 主な水生昆虫類のランプ別捕獲個体数

Fig.5に、各調査日において、全てのランプの組み合わせで必ず設置していたLEDのWhiteランプに捕獲された水生昆虫類成虫の個体数を100とした時の他のランプの相対捕獲割合を示した。LEDのWhiteと6W-FLとを比較してみると、どの昆虫類においても6W-FLの方が数倍から数十倍の捕獲数となっていた。各ランプ

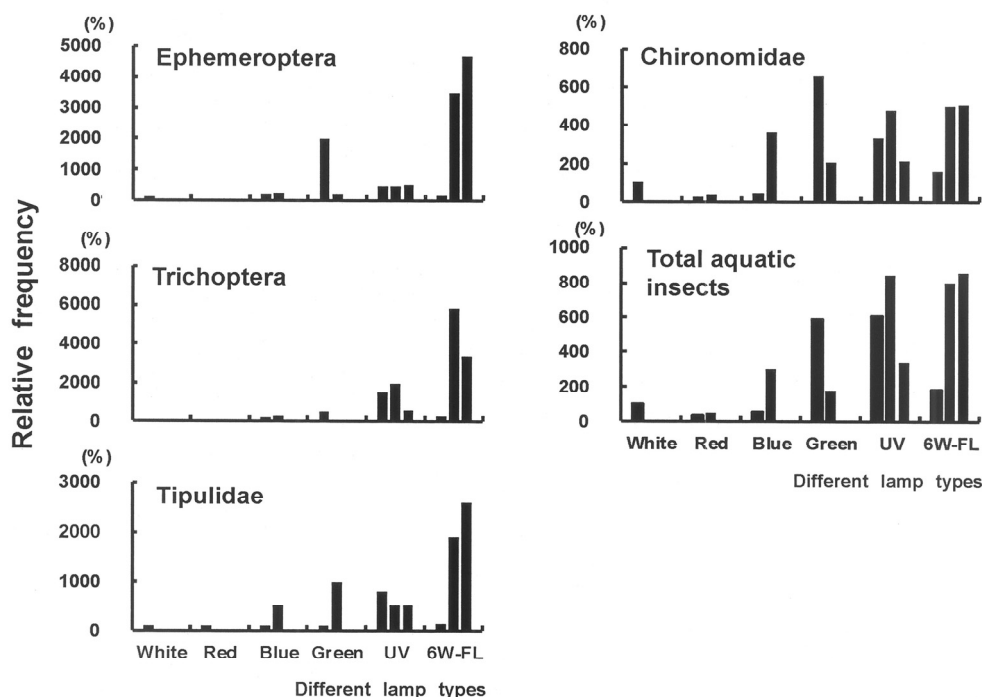


Fig. 5 Attraction of adult aquatic insect to five different LED lamps (continuous emission light) and 6W-Fluorescent lamp in the field (Experiment 1).

とも、日によるデータのばらつきが大きい、特にカゲロウ目、トビケラ目、ガガンボ科は、6W-FL ランプによく集まる傾向が明らかとなった。この理由としては、LED ランプの配光特性（光の方向性が1方向であり、周囲に広がりにくい）が、大きく影響しているものと考えられた。また、UV ランプ（本実験では、エネルギー量 1/5）においても、いずれの分類群で捕獲数、が相対的に多い傾向にあった。一方、ユスリカ類は、Red ランプ以外で、基準の White ランプよりも、6W-FL や他の波長の LED ランプの方が、2–6 倍の捕獲数となっていた。水生昆虫類全体としては、ユスリカ類の捕獲数が全体の約 80% 近くを占めるので、ユスリカ類の傾向とほぼ似たパターンを示した。

LED ランプ間での比較では、どの分類群でも UV に多くの個体が集まったが、Red はほとんど集まらず、逆に Green はユスリカ類やガガンボ類が数多く集まる傾向が示された。ただし、野外実験の繰り返し回数が少ないために、統計的な検討を試みることは出来ていない。

2) 各光源で捕獲されたユスリカ成虫の種類別組成

調査期間中に、各ランプで最も多くのユスリカ個体を捕獲した日（Table 1 の*印）の種類組成を Table 2

に示した。全体で 1,241 個体を同定し、ランプ毎の捕獲個体数では Green (413 個体/日) > 6W-FL (336 個体/日) > White (329 個体/日) > UV (106 個体/日) > Blue (32 個体/日) > Red (25 個体/日) の順であった。全体で 3 亜科 23 属 46 種のユスリカ類を同定することができた。最も多くの種を捕獲出来たのは Green で、3 亜科 18 属 31 種、次いで 6W-FL では 3 亜科 13 属 28 種、White で 3 亜科 11 属 23 種、UV が 3 亜科 12 属 19 種、Red が 2 亜科 7 属 14 種、最も少なかったのが Blue で 2 亜科 4 属 5 種であった。Green は、エリユスリカ亜科の捕獲される割合が高く、全体の 36% を本亜科の種で占めていた。他のランプでは、ユスリカ亜科の占める割合が高く、70–80% を占めていた。LED の White と 6W-FL とで捕獲されたユスリカ類の種組成を比較してみると、LED の White が合計で 23 種、6W-FL が 28 種であった。そのうち、共通種が 16 種、LED だけで捕獲されているものが 7 種、FL のみで捕獲されているものが 12 種であった。全てのランプにおいて、対象としているランプのみに捕獲された種数の多い順に並べると、Green (6 種) > FL (3 種) > UV = White (1 種) > Red = Blue (0 種) であった。また、Blue と Red では、モンユスリカ亜科は 1 個体も捕獲されなかった。この理由については不明である。各光源における優占種は、Red を除いてヒゲユス

Table 2. List of Chironomid fauna collected at light traps with LED lamps of five different wavelengths and 6W-Fluorescent lamp in the field trials in 2011.

| Chironomid fauna | LED White | LED Red | LED Blue | LED Green | 6W-FL | LED UV |
|---|-------------|-----------|----------|-------------|-------------|------------|
| | Aug. 23 | Aug. 16 | Aug. 17 | Aug. 18 | Aug. 17 | Aug. 19 |
| Total capture number (♂, ♀) | | | | | | |
| Orthocladinae | | | | | | |
| <i>Cardiocladius fuscus</i> (Zetterstedt, 1850) | | | | 1(0.1) | 3(0.3) | 1(0.1) |
| <i>Corynoneura lobata</i> Edwards, 1924 | | | | 1(1.0) | | |
| <i>Cricotopus bicinctus</i> (Meigen, 1818) | 2(1.1) | 1(1.0) | 1(0.1) | 7(5.2) | 10(6.4) | 4(2.2) |
| <i>Cricotopus bimaculatus</i> Tokunaga, 1936 | 1(0.1) | | | 1(1.0) | | |
| <i>Cricotopus metathibialis</i> Tokunaga, 1936 | | | | | 1(1.0) | 2(2.0) |
| <i>Cricotopus triannulatus</i> (Macquart, 1826) | 4(1.3) | 5(4.1) | | 11(11.0) | 11(7.4) | 9(5.4) |
| <i>Cricotopus trifasciatus</i> (Meigen in Panzer, 1813) | | 1(0.1) | | 5(1.4) | 1(0.1) | 2(1.1) |
| <i>Parameritocnemus sylvanus</i> (Kieffer, 1924) | | | | | 1(1.0) | |
| <i>Parameritocnemus</i> sp. | | | | 1(0.1) | | |
| <i>Rheocricotopus chalybeatus</i> (Edwards, 1929) | 2(1.1) | | | 1(0.1) | | |
| <i>Synorthocladus semivirens</i> (Kieffer, 1909) | | | | 2(2.0) | | |
| <i>Thienemanniella oyebedlata</i> Sasa, Kawai et Ueno, 1988 | | | | 1(1.0) | | 1(1.0) |
| <i>Thienemanniella</i> sp. | | 2(2.0) | | | | |
| <i>Tvetenia calveceus</i> (Edwards, 1929) | | | | 1(1.0) | | |
| Chironominiinae | | | | | | |
| <i>Chironomus kienensis</i> Tokunaga, 1936 | 17(0.17) | 1(0.1) | | 1(0.1) | 3(1.2) | 1(0.1) |
| <i>Chironomus yoshinatsui</i> Martin et Sublette, 1976 | | | | | 1(0.1) | |
| <i>Cladophetia edwardsi</i> (Kruzezman, 1932) | | | | 1(1.0) | | 4(0.4) |
| <i>Cladoanytarsus vandervulpi</i> (Edwards, 1929) | | | | 8(8.0) | 17(17.0) | |
| <i>Cryptochironomus albifasciatus</i> (Saeger, 1921) | | 1(1.0) | | | 1(0.1) | |
| <i>Dicrotendipes nigrocephalicus</i> Nitsuma, 1995 | | | | | | 2(0.2) |
| <i>Microtendipes</i> sp. | | | | 1(0.1) | | 1(0.1) |
| <i>Neozarelia bicolorata</i> (Tokunaga, 1938) | 1(1.0) | 5(1.4) | | 2(2.0) | 3(3.0) | 2(2.0) |
| <i>Polypedium (Cerobregma) kamoterium</i> Sasa, 1989 | 21(12.9) | 1(0.1) | | 7(5.2) | 11(5.6) | |
| <i>Polypedium (Pennapedium) convexum</i> Johansen, 1932 | 1(1.0) | | | | | |
| <i>Polypedium (Polypedium) benokiense</i> Sasa et Hasegawa, 1988 | | 1(1.0) | | 2(1.1) | 1(0.1) | |
| <i>Polypedium (Polypedium) kyotoense</i> (Tokunaga, 1838) | 2(1.1) | | | 2(0.2) | 1(0.1) | 1(1.0) |
| <i>Polypedium (Polypedium) nubifer</i> (Skuse, 1889) | 3(1.2) | 1(0.1) | | 1(0.1) | | |
| <i>Polypedium (Polypedium) pedestre</i> (Meigen, 1860) | | | | 1(1.0) | | |
| <i>Polypedium (Polypedium) tamaharaki</i> Sasa, 1983 | | | | 1(1.0) | | |
| <i>Polypedium (Polypedium) teichicolor</i> Nitsuma, 1991 | 2(1.1) | | | | 1(1.0) | |
| <i>Polypedium (Tripodura) asoprimum</i> Sasa et Suzuki, 1991 | | | | | 2(0.2) | |
| <i>Polypedium (Tripodura) japonicum</i> (Tokunaga, 1938) | 7(0.7) | 1(0.1) | | 4(0.4) | 7(2.5) | |
| <i>Polypedium (Tripodura) scalanum</i> (Shrank, 1803) | 1(1.0) | | | 5(1.4) | 4(0.4) | |
| <i>Polypedium (Tripodura) tamahinoense</i> Sasa et Ichimori, 1983 | 2(1.1) | 2(1.1) | 1(0.1) | 5(1.4) | 11(5.6) | 2(1.1) |
| <i>Polypedium (Tripodura) unifascium</i> (Tokunaga, 1938) | 2(0.2) | | | 9(4.5) | 12(10.2) | 2(2.0) |
| <i>Polypedium (Uresipedium) cultellatum</i> Goetghebuer, 1931 | 3(1.2) | 2(1.1) | | | | 1(0.1) |
| <i>Polypedium (Uresipedium) paraviceps</i> Nitsuma, 1992 | | | | | 4(1.3) | |
| <i>Polypedium</i> sp. | | | | | 1(0.1) | |
| <i>Rheotanytarsus penapodus</i> (Kieffer, 1909) | 1(1.0) | | | | | |
| <i>Tanytarsus ocellatus</i> Johansen, 1932 | 1(1.0) | 1(0.1) | 1(1.0) | 10(10.0) | 6(6.0) | 5(5.0) |
| <i>Tanytarsus oyumai</i> Sasa, 1979 | 3(1.2) | 1(1.0) | 1(1.0) | 8(2.6) | 2(0.2) | 2(1.1) |
| <i>Tanytarsini</i> spp. | 25(0.250) | | 28(0.28) | 311(0.311) | 21(6.0216) | 60(0.60) |
| Tanytarsinae | | | | | | |
| <i>Abiaesmyia montiformis</i> Fittkau, 1962 | 1(0.1) | | | 1(0.1) | 3(0.3) | |
| <i>Conchapelopia japonica</i> (Tokunaga, 1937) | | | | | 1(1.0) | |
| <i>Procladius choreus</i> (Meigen, 1804) | 1(0.1) | | | | 1(0.1) | 4(0.4) |
| <i>Rheopelopia joganflava</i> (Sasa et Okazawa, 1991) | 1(0.1) | | | 1(0.1) | | |
| Total Individual No. (♂, ♀) | 329(26.303) | 25(12.13) | 32(2.30) | 413(50.363) | 336(67.269) | 106(23.83) |
| Total Number of genera and species | 11G 23S | 7G 14S | 4G 5S | 18G 31S | 13G 28S | 12G 19S |

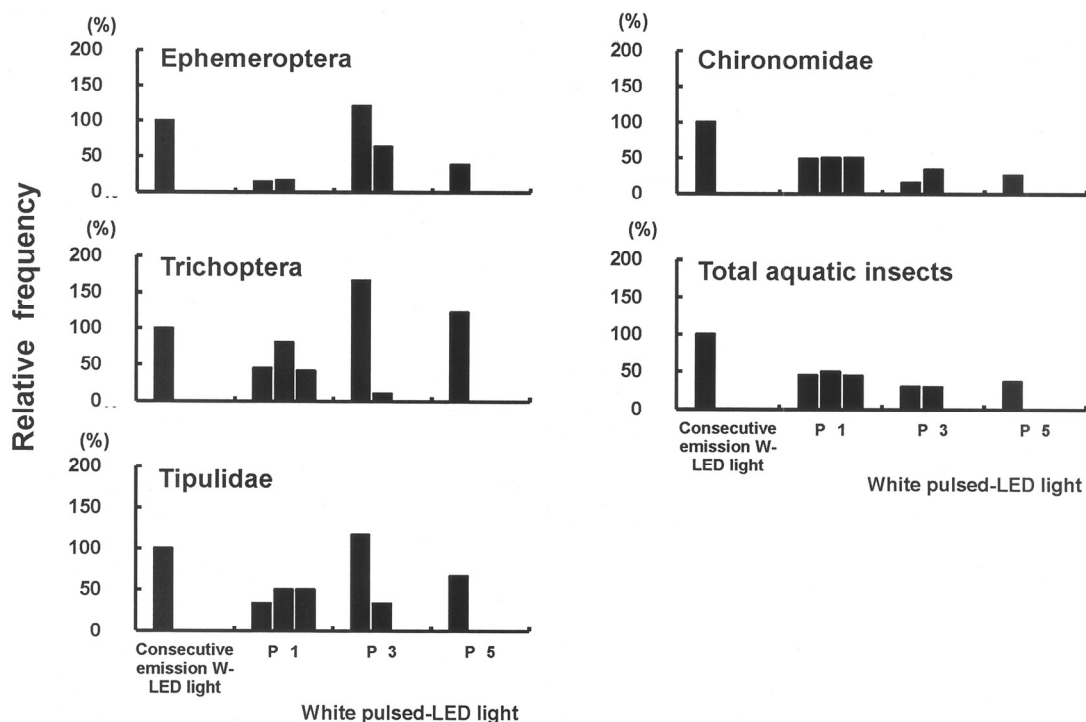


Fig. 6 Attraction of adult aquatic insects to white pulsed-LED lamp (P1, P3 and P5) and continuous emission white LED lamp (Experiment 2).

リカ族 *Tanytarsini* spp. であり (全て♀), Blue では全体の 87.5% (28 個体) と最も多く, 次いで White で 76.0% (250 個体), Green で 75.3% (311 個体), 6W-FL で 64.3% (216 個体), UV では 56.6% (60 個体) で, いずれも 50% 以上を占めた. 一方, Red ではナカオビツヤユスリカ *Cricotopus triannulatus* (Macauart) とフトオヒゲユスリカ *Neozavrelia bicolioocula* (Tokunaga) が 20.0% (それぞれ 5 個体) 占めた. 河合ら (2011) は, 単一のエネルギーピークを示す 6 種の LED ランプに誘引されるユスリカ類を種毎に調査したが, 種により誘引される波長ランプが異なることを示唆している. 本研究においては, 6W-FL を含む全てのランプに共通して捕獲された種はわずか 3 種で, ユスリカ亜科のニセヒロオビハモンユスリカ *Polypedilum tamahinoense* Sasa et Ichimori と, ヒメナガレヒゲユスリカ *Tanytarsus oscillans* Johannsen, エリユスリカ亜科のフタスジツヤユスリカ *Cricotopus bicinctus* (Meigen) であった. 以上のことから, ユスリカ類では種毎に誘引される波長が異なることが示唆される.

4. LED White ランプを用いた連続放射光源と点滅光源に対する水生昆虫類成虫の走光性 (実験 2) の結果

Fig.6 に, 基準とした White ランプ (連続照射光源) に捕獲された水生昆虫類の個体数を 100 としたときの

点滅条件 (P1, P3, P5) の White ランプの相対捕獲割合を調査日毎に示した. 水生昆虫類全体で見ると, 点滅の頻度を問わず, 点滅させた方が, 連続照射よりも飛来個体数が 40% 程度まで減少することが明らかとなった. また, 捕獲個体数に占める割合の高いユスリカ類についても, 同様な傾向が確認された. 一方, カゲロウ目, トビケラ目, ガガンボ科では, ユスリカ科とは傾向が異なり, 連続照射よりも, 0.5 秒間隔 (P3), 1 秒間隔 (P5) の方が, 捕獲個体数が多い場合が多く, 今後, さらなるデータの蓄積が必要である.

近年, LED のパルス光を用いた農業害虫防除に関する応用研究が, いくつか報告されている. 平間ら (2002) は, LED 光源を用いた害虫防除装置の開発のために, ハスモンヨトウ *Spodoptera litura* (Fabricius) やオオタバコガ *Helicoverpa armigera* (Hubner) などのヤガ類や半翅目であるチャバネアオカメムシ *Plautia stali* (Scott) を用いて光波長依存特性やパルス光による周波数応答特性などの基礎的な知見を集積している. さらに平間ら (2007) は, 黄色 LED 光源を用いて, ヤガ類の行動観察を行っており, 点灯区と無点灯区では, 点灯区の方が 1/7-1/8 の被害が低減することを報告している. また, 連続照射よりもパルス光やゆらぎ光として照射した方がコスト面からも効果が大きいことを示唆している. 久保田ら (2004) は, LED 光源の点滅刺激に早くから注

目し、夜行性害虫の明順応（明反応）に及ぼす影響について言及し、照度分布などを報告している。尹ら（2012a）は、黄色 LED 照射条件下におけるオオタバコガの夜間飛翔行動を解析し、LED 夜間照射の波長及び照度が飛翔活性に影響を及ぼしていることを明らかにした。さらに、尹ら（2012b）は、黄色 LED 点滅光が、オオタバコガの飛翔を抑制することも報告している。石倉ら（2010；2012；2015）は、黄色 LED パルス光を利用して、秋ギクの害虫（ヤガ類；ハスモンヨトウ、オオタバコガ）に対する防除装置を開発し、終夜パルス点灯させることで物理的防除に成功している。本研究においては黄色光については全く調査しておらず、今後、黄色 LED 光源を用いて、水生昆虫類の走光性についても実験を行いたい。

本研究の結果より、パルスの与え方により、水生昆虫類の誘引個体数に差が出ることが示唆された。点滅させた方が、連続照射よりも飛来個体数が 40%程度まで減少することが明らかとなった。藪ら（2014）は、点滅緑色光により、オオタバコガとヨトウガの活動が抑制されることを報告している。本研究で用いた光源も各波長のランプを一定間隔で点滅させることが可能であるため、今後、様々な実験条件下で、水生昆虫類の走光性について、調査を行って行きたい。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、信州大学繊維学部武舎哲也氏、瑞慶覧光氏、西村歩樹氏にお世話になった。実験装置である LED コントローラは、セキシン電機の技術部の皆様に開発・改良をお願いし、快く作成をしていただいた。国土交通省北陸地方整備局千曲川河川事務所の皆様、千曲川河川生態グループの皆様にも調査にご協力を頂いた。ここに深謝申し上る。なお、本研究の一部は、2011 年度河川環境管理財団（現在：公益財団法人河川財団）から援助を受けて行われたものである。心よりお礼を申し上げる。

引用文献

- Ali, A., S. R. Stafford, R. C. Fowler and B. H. Stanley (1984) Attraction of adult Chironomidae (Diptera) to incandescent light under laboratory conditions. *Environ. Entomol.* 13: 1004-1009.
- Ali, A., B. H. Stanley and P. K. Chaudhuri (1986) Attraction of some adult midges (Diptera :

- Chironomidae) of Florida to artificial light in the field. *Fla. Entomol.* 69: 644-650.
- 馬場金太郎・平嶋義宏 (1991) 新版昆虫採集学. 九州大学出版会, 福岡.
- Hirabayashi, K., G. Kimura and Y. Fukunaga (2004) Distribution pattern of aquatic insects in the upper and middle reaches of the Chikuma River in Central Japan. *Korean J. Limnol.* 37: 394-399.
- Hirabayashi, K., R. Nakazato, A. Ohara and T. Okino (1993) A study on phototaxis for adult Chironomidae (Diptera) by artificial light in Lake Suwa: Response of adult chironomid midges to near ultraviolet and visible light. *Jpn. J. Sanit. Zool.* 44: 33-39.
- 平林公男・沖野外輝夫 (1999) 富栄養湖におけるユスリカ成虫大発生メカニズムとその防除対策. 水環境学会誌 22: 359-364.
- Hirabayashi, K. and H. Zukeran (2012) Massive flights of disruptive aquatic insects from a canal, in Ueda City, Nagano, Japan. The 15th International Symposium on River and Lake Environments. Program & Abstract, P-9.
- 平間淳司 (2005) LED による農業害虫防除. 照明学会全国大会講演論文集 38: 319-320.
- 平間淳司・荒永 誠・中出智己・宮本紀男・藪 哲男・伊澤宏毅 (2002) 超高輝度型の発光ダイオード (LED) によるヤガ・カメムシ類の防除装置の開発—光刺激の波長およびパルス光の網膜電位 (ERG 信号) 応答特性—. 農業機械学会誌 64: 76-82.
- 平間淳司・関 憲一・細谷直輝・松井良雄 (2007) 黄色 LED 光源を用いた物理的害虫防除装置の試作—ヤガ類の行動観察結果—. 植物環境工学 19: 34-40.
- 弘中満太郎・針山孝彦 (2014) 昆虫が光に集まる多様なメカニズム. 応動昆 58: 93-109.
- 石倉聡・後藤丹十郎・平間淳司・山下真一・野村昌史・尹丁梵 (2012) 黄色 LED パルス光を用いた秋ギクの害虫防除光源装置の開発—秋ギク生産に適用可能な放射照度の範囲の特定—. 植物環境工学 24: 244-251.
- 石倉 聡・平間淳司・野村昌史・山下真一・東浦 優・岩井豊通・二井清友・山中正仁 (2010) 黄色 LED パルス光を用いた秋ギクの害虫防除光源装置の開発—開花の遅延を回避できる光照射技術—. 植物環境工学 22: 167-174.
- 石倉 聡・星野 滋・杉本仁志 (2015) LED ランプを用いた電灯照明によるヤガ類の防除技術—露地アスパラガス栽培でのハスモンヨトウによる被害

- 低減効果に及ぼす黄色パルス光の照射方向の影響
一. 植物環境工学 27: 195-203.
- 河合幸一郎・渡部太雅・今林博道 (2011) ユスリカ成虫の走光性に関する野外研究. 衛生動物 62 (Supplement): 82.
- 河合禎次・谷田一三 (2005) 日本産水生昆虫 科・属・種への検索. 東海大学出版会, 東京.
- 近藤繁生・平林公男・岩熊敏夫・上野隆平 (2001) ユスリカの世界. 培風館, 東京.
- 小紫正樹 (2010) LED 照明の現状と将来. 日本照明学会誌 94: 220-223.
- 小谷朋子 (2010) LED のあかりー照明ソフトの観点から. 日本照明学会誌 94: 342-344.
- 小山長雄 (1969) こん虫の光に対する反応ーとくに定位運動に関連して. 日本照明学会誌 53: 94-97.
- 久保田 豊・塚本勝孝・真野 稔・柴尾 学・田中 寛 (2004) パルス発光式 LED 黄色灯の照度分布. 関西病虫研報 46: 105-106.
- Langton, P. H. and Pinder, L. C. V. (2007) Key to the adult male Chironomidae of Britain and Ireland. Vol. 1 Introductory text, keys, references checklist and index, Vol. 2 Illustrations of the hypopygia Freshwater Biological Association Scientific Publication, 64: Vol. 1 1-239, Vol. 2 1-168.
- LED 照明推進協議会 (2006) LED 照明ハンドブック. オーム社, 東京.
- Sasa, M. and M. Kikuchi (1995) *Chironomidae (Diptera) of Japan*. University of Tokyo Press, Tokyo.
- 関根一希・末吉正尚・東城幸治 (2013) 千曲川における大量発生昆虫オオシロカゲロウの流程分布. 陸水学雑誌 74: 73-84.
- Tabaru Y, K. Moriya A. Ali (1987) Nuisance midges (Diptera: Chironomidae) and their control in Japan. *J. Am. Mosq. Cont. Assoc.* 3: 45-48.
- 上田市 (1999) 上田の気象と川や湖-上田市誌自然編(2). 上田市, 上田.
- 宇治市トビケラ対策検討関係者会議 (2014) 宇治川に発生するトビケラに関する報告書. 宇治市, 宇治.
- Wiederholm, T. (1989) Chironomidae of the Holarctic region. Keys and Diagnoses. Part 3. Adults. *Entomol. Scand.* 34: 1-532.
- 藪 哲男・宮下奈緒・植松 繁・岩桑基博・蟻川謙太郎 (2014) 点滅緑色光によるオオタバコガとヨトウガの活動抑制と複眼分光感度. 応動昆 58: 211-216.
- 山田真 (2011) 人工光を用いた植物の病害・害虫防除技術. 日本照明学会誌 95: 211-215.
- 尹 丁梵・野村昌史・石倉 聡 (2012a) 異なる波長の黄色 LED 照射条件下におけるオオタバコガの夜間飛翔行動の解析. 応動昆 56: 103-110.
- 尹 丁梵・野村昌史・石倉 聡 (2012b) 黄色 LED 点滅光によるオオタバコガの飛翔抑制. 応動昆 56: 151-156.