

令和 2 年 7 月 10 日現在

機関番号：23303

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K08149

研究課題名（和文）フリッカー光により誘起される昆虫の特異的行動の解析とそれに基づく低誘虫技術の検討

研究課題名（英文）Insect orientation behavior induced by flickering light and its utilization for reduced insect-attraction

研究代表者

弘中 満太郎（Hironaka, Mantaro）

石川県立大学・生物資源環境学部・准教授

研究者番号：70456565

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：正の走光性を示す昆虫がフリッカー光（点滅光）に対してどう反応するのかについては、これまで断片的にしか明らかになっていない。農業害虫であるチャバネアオカメムシに様々な波長のLED光を、周波数、デューティ比、変調深度を変えたフリッカー刺激として提示し、その複眼の電気生理学的特性と走光性行動の特徴を調べた。その結果、チャバネアオカメムシでは、特定の属性をもつフリッカー光で光源への正確な定位行動が阻害され、光源に近づきにくくなることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

昆虫が人工光源に誘引されることで引き起こされる経済的、衛生的、心理的な問題は大きい。また近年は、野生生物への人工光源の悪影響が、保全生物学上の公害としてクローズアップされている。そうした背景から、低誘虫性の人工光源がこれまでにいくつも開発されたが、それらはいずれも、波長の制御によるものである。本研究で明らかにしたフリッカー光による低誘虫現象は、波長の制御によらない、これまでにない低誘虫光源の可能性を示すものである。

研究成果の概要（英文）：Until now, little has been known about the response of phototactic insects to flickering artificial light. We experimentally presented LED lights of various wavelengths as flicker stimuli with different frequency, duty ratio, and modulation depth to a major agricultural pest, the brown-winged green bug *Plautia stali*, and investigated the electrophysiological characteristics of the compound eye and its phototactic behavior. As a result, we showed that the flickering light with certain attributes prevents accurate flight orientation to the light source in *P. stali*.

研究分野：応用昆虫学

キーワード：走光性 定位 点滅光 フリッカー光 臨界融合頻度 低誘虫

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

私たちが日常で感じることがあるように、点滅している光 (フリッカー光; flickering light) は、ある頻度閾値をもって連続的な定常光として知覚される。すなわち、光の点滅頻度が比較的低い場合には視覚系は明暗の時間的変化を弁別できるが、点滅頻度が高い場合にはその変化を弁別できず、一定の明るさの連続光と同じように知覚する。この状態になる境目の周波数を、臨海融合頻度、あるいは臨界融合周波数 (critical flicker frequency; CFF) という。ヒトの CFF は平均して 60 Hz (1/60 秒) ほどとされているが (Brundett, 1974)、昆虫の場合には種による違いが非常に大きいものの、電気生理学的な複眼の反応の測定により、飛翔性の昆虫では 200~400 Hz ほどと報告されている (Miall, 1978; Hammer et al., 2001)。蛍光灯や LED 光源などの人工光源は、そうした飛翔性昆虫を含む一部の動物には可視できる周波数でフリッカー (点滅) しているため (Inger et al., 2014)、それらの照明下ではその動物は、光の明暗がめまぐるしく切り替わる光環境に曝されている。しかし、フリッカー光がもたらす光環境が、動物の個体の行動や生理にどのような影響を与えているのか、フリッカー光の知覚の生物学的意義と進化メカニズムがどのようなものなのか、という基礎科学的問題は、光強度やスペクトル組成という光の他の属性による動物への影響に比べてほとんど明らかにされていない。

また、動物の行動がフリッカー光下と連続光下でどう異なるのか、という問題を明らかにすることは、応用動物学的観点からも極めて重要な意味をもつ。もしフリッカー光の行動に対する影響の特徴を理解できれば、フリッカー属性を制御することで行動を制御する光制御技術を開発したり、動物にとってより適切な光環境を提示したりすることが可能になる。

昆虫の多くの種は、光に対して定位しその近傍に接近するという正の走光性を示す (弘中・針山, 2014; 弘中, 2015)。その結果として、様々な種類の膨大な数の昆虫が、屋外の人工光源に誘引され、その周囲に集まって人に不快感を与えたり、死亡して保全生物学上の問題となったりする (Rich and Longcore, 2006)。こうした昆虫の走光性行動に対するフリッカー光の影響についてもほとんど研究がなされていない。そこで本研究では、強い走光性を示すチャバネアオカメムシ *Plautia stali* (カメムシ目: カメムシ科) をモデルとして、フリッカー光源に対する走光性行動の特徴を明らかにすると同時に、フリッカー光による走光性行動の攪乱に基づいた低誘虫技術の開発について検討した。

### 2. 研究の目的

フリッカー光に対する昆虫の行動に着目した先行研究の多くは、フリッカー光に昆虫が強く誘引されることを示している (例えば, Syms and Goodman, 1987; Chu et al., 2006)。しかし、そうした研究の多くは、1) 100 Hz 以下の低周波数について検討していない、2) 実験対象とした昆虫種の CFF を特定していない、3) デューティー比や変調深度などの周波数以外のフリッカー属性を検討していない、という問題を含んでいる。加えて近年、フリッカー光が昆虫を引き寄せにくいという、これまでとは反対の結果を示す野外実験も報告されている (Barroso et al., 2017)。こうした事実から、高誘虫が昆虫に普遍的なフリッカー光の効果であるかどうかは、現時点では疑問といえる。本研究課題では、難防除性の農業害虫であるチャバネアオカメムシにおいて、予備実験で観察されたフリッカー光に対する特異的行動とそれに伴うフリッカー光源への低誘虫現象を基盤に、本種をモデルとして、可視周波数の電気生理学的解析とフリッカー光の種々の属性に対する行動学的解析を行った。そしてそれらの結果に基づいて、フリッカー刺激を利用した新規の低誘虫技術の基礎となる知見を得ることを目的とした。

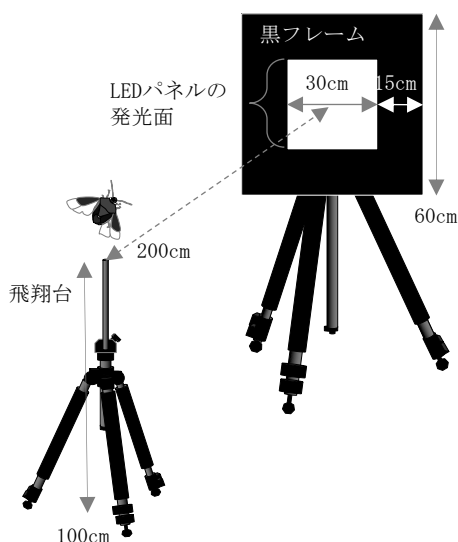


図1 室内でのLEDパネルへの誘引実験の模式図

### 3. 研究の方法

実験は2017年の5月から2019年の10月にかけて、浜松医科大学医学部の実験室および石川県立大学の実験室とその構内にて行った。静岡県浜松市および福岡県小郡市で採集したチャバネアオカメムシを実験材料として用いた。カメムシは小型のクリアプラスチックケース (16×12×6cm) にて水のみを与えて25°C、16L8Dの明暗条件にて実験まで飼育した。

(1) 電気生理学的実験は、フリッカー光に対する複眼の応答範囲を明らかにする目的で行った。まず、網膜電図法により、光強度応答曲線および分光感度曲線を得た。その後、紫外光 (ピーク波長 375 nm) および白色光 (460 nm, および 570 nm) で臨界融合周波数 (CFF) を特定した。

(2) 行動実験は、18時から24時の間に、温度約25°C、湿度約70%に調整した暗室にて行った。光の反射を避けるため、壁面、天井面、床面は低反射の黒色布で覆った。光源は紫外、青色 (ピーク波長 450 nm)、水色 (470 nm)、緑色 (525 nm)、橙色 (590 nm)、赤色 (630 nm)、および白色の各色の LED パネル型光源を用いた。1.0×10<sup>13</sup> photons·cm<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>

<sup>1</sup>に光強度を設定し、点滅周波数 (Hz)、デューティ比 (DR)、および変調深度 (MD) は、バイポーラ電源を用いて調整した。飛翔台の先端と同じ高さになるように、飛翔台から 2 m 離れた位置に LED パネルを 1 台 (図 1)、もしくは 2 台、設置した。暗順応したカメムシを飛翔台から自由飛翔させ、赤外線暗視システムをもつビデオカメラで撮影することで、飛翔の軌跡を追跡した。光源の発光面の周囲には 60×60 cm の黒布で覆われたフレームが取り付けられ、その枠内に到達した場合、光源に誘引されたと判断した。

(3) 野外実験は、室内実験にてチャバネアオカメムシで観察された飛翔攪乱とフリッカー光への低誘虫現象が、野外の他の昆虫に対してもみられるかどうかを確認するために行った。既存の直管型の白色 LED 光源を改造したものを実験光源として用いた。実験光源は、防水ケースに入れられ、120 cm の管状 LED の半分をアルミホイルで覆うことで、発光面の長さが 60 cm とされた。2 つの実験光源は、どちらも 50 Hz の矩形波で点滅させた。それに加えて、片方は DR=50%、MD=50% とし、もう一方を DR=25%、MD=75% とした。実験光源は大学構内の実験棟の壁面、高さは 3 m の位置に、光源間距離が 8 m となるように設置し、18:00 に点灯、21:00 に消灯した。また実験光源は光軸が地平面と水平になるように横向きに発光させた。発光面の前面に 30×80 cm の透明アクリルを設定し、その面を粘着シートで覆い、実験後に粘着シートに捕獲されている昆虫を実体顕微鏡で目ごとに分類し、カウントした。

#### 4. 研究成果

(1) 電気生理学の実験では、まず網膜電図法を用いてチャバネアオカメムシの複眼の光強度応答曲線および分光感度曲線を得た。チャバネアオカメムシは雌雄ともに 330 nm 以下から 650 nm までの波長帯を可視域としており、510 nm と 350 nm に反応のピークをもつ二峰形の分光感度曲線を示した。紫外、および白色の LED 光源に対する臨界融合周波数 (CFF) は、それぞれ平均 74 Hz と 86 Hz であった。いずれも顕著な性差は認められなかった。

(2) 行動実験でチャバネアオカメムシは、フリッカーの周波数に対して顕著な行動変化を示した。点滅させない連続光下 (0 Hz) では、紫外や白色の光源に対して 80% に近い誘引率を示し、他のピーク波長をもつ光源についても、50% 以上の誘引率が得られた。また 120 Hz や 240 Hz という周波数でも、連続光下と同様の高い誘引率を示した。一方で 30 Hz では、カメムシは光源側へ定位するものの、その誘引率は 10%~25% 程度まで低下した (図 2)。しかし、30 Hz で点滅する 7 種類の波長の光源のいずれに対しても、光源方向への定位傾向が認められた。これにより、フリッカー光により誘起される低誘虫現象は、忌避行動によるものではなく、定位阻害による可能性が高いことが推定された。そのことを支持するように、30 Hz の光源に対する定位では、明らかにその軌跡は曲がりくねり、幾つかの個体では、顕著な旋回飛翔が観察された (図 3)。しかし、240 Hz のフリッカー光下および 0 Hz の連続光下では、カメムシは比較的直線的に光源に飛翔した。

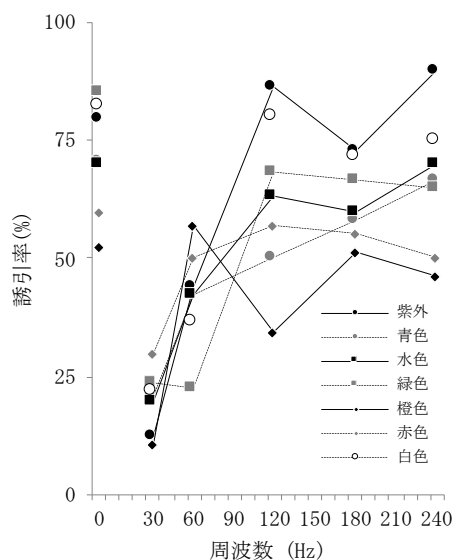


図2 異なる周波数で点滅させたLEDパネルに対するチャバネアオカメムシの誘引率

フリッカー光源と連続光源の選択実験では、カメムシは強く連続光源を選好した。白色 LED パネルを用いて行った 30 Hz のフリッカー光源と連続光源との選択実験では、100% の個体が連続光源を選好した。さらに、変調深度を 50% 程度まで落とすことで、人の視認性への影響を小さくした条件においても、カメムシの走光性行動が攪乱され、選好性が低下することを確認した。

フリッカー光の波長、光強度、デューティ比、変調深度を変えた場合の、走光性行動の変化を解析した。その結果、光強度に関しては、チャバネアオカメムシはその走光性行動で 10% の光強度の差を行動的に弁別しないが 50% の差を行動的に弁別すること、光強度が同じ融合したフリッカー光と非フリッカー光を行動的に弁別しないことが明らかになった。また、デューティ比が小さく、変調深度が大きいフリッカー光で誘引率が低くなることが認められた。さらに、紫外から赤色までを含んだ白色光源において光強度と変調深度を等しくした場合、緑色の波長帯を小さいデューティ比でフリッカーさせた場合に、低誘虫効果が高まった。

(3) 直管型の LED 光源と粘着シートを用いた屋外での捕獲試験により、フリッカー光の属性の制御がチャバネアオカメムシ以外の種においても低誘虫効果に影響を及ぼすことを明らかにした。波長、光強度、周波数 (50 Hz) を等しくした 2 つのフリッカー条件 (DR=50%、MD=50% と DR=25%、MD=75%) を比較したところ、捕獲された昆虫の 85% 以上をハエ目とハチ目の昆虫が占め、どちらの目でも、デューティ比が小さく、変調深度が大きい後者のフリッカー条件で捕獲されにくくなることが認められた。

臨海融合頻度以下の周波数のフリッカー光による正の走光性の攪乱現象，という今回の発見は，新しい低誘虫光源の開発につながる可能性がある．昆虫が人工光源に誘引されることで引き起こされる経済的，衛生的，あるいは心理的な問題は大きく，また近年は，野生生物への人工光源の悪影響が，保全生物学上の公害としてクローズアップされつつある (Rich and Longcore, 2006; Grubisic et al., 2018)．生態的光害と呼ばれる人工光による野生生物への悪影響の代表例は，道路照明や店舗照明などへの昆虫の強力な誘引である (Eisenbeis et al., 2009; Fox, 2013; Meyer and Sullivan, 2013)．そうした背景から，これまでに低誘虫性機能が付加された人工光源が開発されてきた．しかし，実用化された低誘虫性光源はどれも，昆虫の誘引を強く誘起する紫外域を中心とした短波長の除去によるものである (弘中, 2018)．また，これらの短波長を除去した人工光源にも，一定量の昆虫が集まる．それゆえ，光源に導入可能な新しい低誘虫技術の開発が待ち望まれている．本研究で明らかにした低周波数のフリッカー光による低誘虫現象は，これまでにない低誘虫技術として大きな可能性をもつと考えられる．

<引用文献>

- Barroso, A., I. Haifig, V. Janci, I. da Silva, C. Dietrich and A. M. Costa-Leonardo (2017) Effects of flickering light on the attraction of nocturnal insects. *Lighting Res. Technol.* 49: 100-110.
- Brundett, G.W. (1974) Human sensitivity to flicker. *Lighting Res. Technol.* 6: 127-143.
- Chu, C. C., T. Y. Chen and T. J. Henneberry (2006) Attractiveness of flickering and non-flickering cool white fluorescent light to *Culex quinquefasciatus* (Diptera: Culicidae), *Musca domestica* (Diptera: Muscidae) and *Pectinophora gossypiella* (Lepidoptera: Gelechiidae) adults, and *Acheta domesticus* (Orthoptera: Gryllidae) and *Periplaneta americana* (Blattodea: Blattidae) nymphs. *Southwest. Entomol.* 31: 77-81.
- Eisenbeis, G. and A. Hänel (2009) Light pollution and the impact of artificial night lighting on insects. In *Ecology of Cities and Towns: A Comparative Approach* (M. McDonnell, A. Hahs and J. Breuste, eds.) Cambridge University Press, New York, pp. 243-263.
- Fox, R. (2013) The decline of moths in Great Britain: a review of possible causes. *Insect Conserv. Diver.* 6: 5-19.
- Grubisic, M., R. H. A. van Grunsven, C. C. M. Kyba, A. Manfrin and F. Hölker (2018) Insect declines and agroecosystems: does light pollution matter? *Ann. Appl. Biol.* 173: 180-189.
- Hammer, D. X., H. Schmitz, A. Schmitz, H. G. Rylander 3rd and A. J. Welch (2001) Sensitivity threshold and response characteristics of infrared detection in the beetle *Melanophila acuminata* (Coleoptera: Buprestidae). *Comp. Biochem. Physiol. A Mol. Integr. Physiol.* 128: 805-819.
- 弘中満太郎 (2015) 灯りに集まる昆虫はどこをめざしているのか. *昆虫科学読本：虫の目で見た驚きの世界* (日本昆虫科学連合 編). 東海大学出版部, 神奈川, pp. 15-28.
- 弘中満太郎 (2018) 昆虫走光性の理解に基づいた新たな低誘虫光源の必要性. *照明学会誌* 102(11): 488-491.
- 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.
- Inger, R., J. Bennie, T. W. Davies and K. J. Gaston (2014) Potential biological and ecological effects of flickering artificial light. *PLoS ONE* 9: e98631.
- Meyer, L. A. and S. M. P. Sullivan (2013) Bright lights, big city: influences of ecological light pollution on reciprocal stream-riparian invertebrate fluxes. *Ecol. Appl.* 23: 1322-1330.
- Miall, R. C. (1978) The flicker fusion frequencies of six laboratory insects, and the response of the compound eye to mains fluorescent 'ripple'. *Physiol. Entomol.* 3: 99-106.
- Rich, C. and T. Longcore (2006) *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*, Island Press, Washington DC. 458 pp.
- Syms, P. R. and L. J. Goodman (1987) The effect of flickering U-V light output on the attractiveness of an insect electrocutor trap to the house-fly, *Musca domestica*. *Entomol. Exp. Appl.* 43: 81-85.

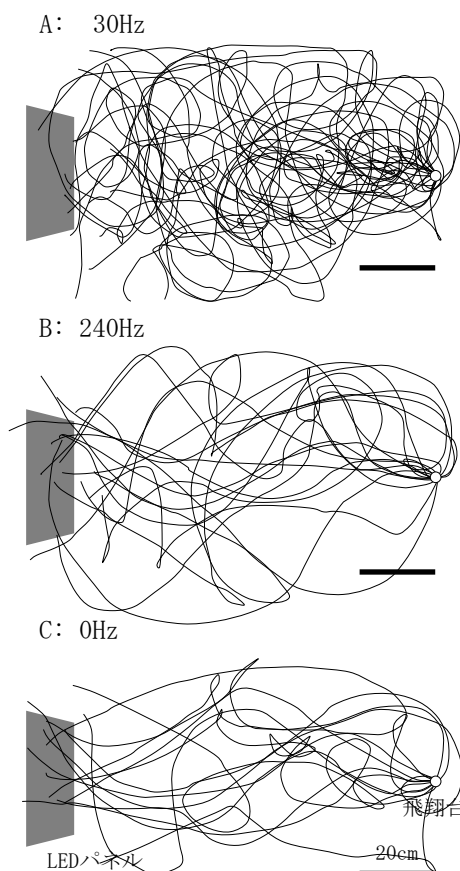


図3 異なる周波数で点滅させたLEDパネルに対するチャバネアオカメムシの飛翔軌跡

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 窪田宣和・弘中満太郎	4. 巻 258
2. 論文標題 アサギマダラは白色タオルを同種と誤認しているか？	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 やどりが	6. 最初と最後の頁 15-19
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 弘中満太郎	4. 巻 102
2. 論文標題 昆虫走光性の理解に基づいた新たな低誘虫光源の必要性	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 照明学会誌	6. 最初と最後の頁 488-491
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 橋爪賢司・弘中満太郎	4. 巻 68
2. 論文標題 石川県におけるイナゴ類の分布とその群飛行動	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 北陸病害虫研究会報	6. 最初と最後の頁 21-30
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 弘中満太郎	4. 巻 54
2. 論文標題 カメムシ類の視覚を利用した定位行動	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 昆虫と自然	6. 最初と最後の頁 16-19
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 弘中満太郎
2. 発表標題 光源を点滅させることで虫を集めにくくする：フリッカー光を用いた新規低誘虫技術
3. 学会等名 イノベーション・ジャパン2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 弘中満太郎
2. 発表標題 視覚的エッジやフリッカーを利用した高誘虫および低誘虫ランプの開発
3. 学会等名 平成29年度照明学会全国大会光放射応用分科会主催シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 弘中満太郎
2. 発表標題 昆虫の光に対する多様な反応と人工光を利用した行動制御
3. 学会等名 都市有害生物管理学会第39回大会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 弘中満太郎・今西那珠奈・森田俊哉・南條宏太・針山孝彦
2. 発表標題 フリッカー光によるチャバネアオカメムシの走光性行動の攪乱
3. 学会等名 第62回日本応用動物昆虫学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 弘中満太郎
2. 発表標題 飛蛾の火に赴くが如し：昆虫走光性の行動メカニズム
3. 学会等名 本蛾類学会2020年総会・研究発表会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤原昌敬・笠井柁希・島田真彦・弘中満太郎
2. 発表標題 街灯に飛来したタガメは光によって行動が束縛される
3. 学会等名 第72回北陸病害虫研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 弘中満太郎・藤原昌敬・笠井柁希・島田真彦
2. 発表標題 人工光源に誘引された虫のその後：誘引光源下でみられたタガメの光行動抑制
3. 学会等名 第64回日本応用動物昆虫学会大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 低誘虫発光装置，表示装置，低誘虫発光方法及び表示方法	発明者 弘中満太郎	権利者 浜松医科大学， 石川県立大学
産業財産権の種類、番号 特許、2017-164336	出願年 2017年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----