

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

誌名	植物環境工学
ISSN	18802028
著者名	石倉, 聡 後藤, 丹十郎 平間, 淳司 山下, 真一 野村, 昌史 尹, 丁梵
発行元	日本植物工場学会
巻/号	24巻4号
巻号補足	
掲載ページ	p. 244-251
発行年月	2012年12月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



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—

石倉 聡^{1,2}・後藤丹十郎^{1*}・平間淳司³・山下真一^{2**}・野村昌史⁴・尹 丁梵⁴

¹岡山大学大学院自然科学研究科 700-8530 岡山市北区津島中

²広島県立総合技術研究所農業技術センター 739-0151 広島県東広島市八本松町原

³金沢工業大学 光電磁場科学応用研究所 921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘

⁴千葉大学大学院園芸学研究科 271-8510 千葉県松戸市松戸

Development of an Insect Pest Control System using Pulsed Light from a Yellow-LED in the Production of Autumn-flowering Chrysanthemums —Investigation of an Appropriate Irradiance Range for the Production of Autumn-flowering Chrysanthemums—

Satoshi ISHIKURA^{1,2}, Tanjuro GOTO^{1*}, Junji HIRAMA³, Shinichi YAMASHITA^{2**},
Masashi NOMURA⁴ and Jungbeom YOON⁴

¹Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University, Tsushima-naka, Kita, Okayama 700-8530, Japan

²Hiroshima Prefectural Technology Research Institute, Agricultural Technology Research Center,
Hara, Hachihonmatsu, Higashihirosima, Hiroshima 739-0151, Japan

³Advanced Optical Electrical Magnetic Field Science Laboratory, Kanazawa Institute of Technology Ohgigaoka,
Nonoichimachi, Ishikawa 921-8501, Japan

⁴Graduate School of Horticulture, Chiba University Matsudo, Chiba 271-8510, Japan

Abstract

In order to develop an insect pest control device using pulsed light from a yellow LED, the dependency of the production of autumn-flowering chrysanthemums on the irradiance was investigated. The Electro-Retino Gram (ERG) signals of the compound eyes of *Helicoverpa armigera* and *Spodoptera litura* due to irradiation with pulsed yellow light with 20 ms pulse width and 100 ms period were determined over the irradiance range from 1 to 1000 mW m⁻². The ERG signals showed that these 2 types of noctuid moth continuously and reproducibly recognized pulsed illumination within the irradiance range from 1 to 100 mW m⁻². Therefore, the effects of the irradiance of pulsed light from a yellow LED (0, 20, 35 and 50 mW m⁻²) on flowering and the cut flower characteristics of the autumn-flowering chrysanthemum, 'Zimba', were determined. No significant differences were found in the number of days to flower budding or flowering, or the cut flower characteristics below 35 mW m⁻². However, the number of days to flowering and the cut flower length of plants

2012 年 3 月 29 日受付

2012 年 8 月 22 日受理

Corresponding author: Satoshi Ishikura

(s-ishikura82052@pref.hiroshima.

lg.jp)

*現在: 岡山大学大学院環境生命科学研究科

**現在: 広島県立総合技術研究所東部工業技術センター

exposed to 50 mW m^{-2} irradiance increased significantly compared to those exposed at other irradiances. Thus, no delay in flowering occurred below 35 mW m^{-2} irradiance and the maximum irradiance for which no delay occurred is between 35 and 50 mW m^{-2} .

Keywords: ERG-signal, flowering response, insect pest control, noctuid moths, pulsed lighting, yellow LED

1 はじめに

多くの野菜や花きに甚大な被害を及ぼすヤガ類であるオオタバコガ (*Helicoverpa armigera*) およびハスモンヨトウ (*Spodoptera litura*) の防除において、黄色蛍光灯が用いられるのは、これらのヤガ類成虫の飛来を防止して産卵を防ぐことにより、農作物へ直接的な被害を及ぼす次世代の幼虫を減少させる効果¹⁾があるためである。しかし、連続光である黄色蛍光灯の照明は、ヤガ類に「慣れ現象」を引き起こす恐れがあるため、平間ら²⁻⁴⁾は、照射光を点滅光として常時視認させることを発案した。この点滅により、照明に対する「慣れ現象」を防止し、持続性の高い防除効果を得ることを目的として、黄色パルス光の利用技術を検討している。

一般的な LED の応答速度は $1 \mu\text{s}$ (10^{-6} 秒) 程度⁵⁾と極めて速く、パルス光の照射に適した光源の一つであることが知られている。例えば、LED を用いて光の点滅する頻度を徐々に高めると、実際は点滅していても連続光に見える。このとき、連続光に見え始める限界の頻度は、「ちらつき光の臨界融合頻度」と呼ばれている⁶⁾。ちらつき光の臨界融合頻度を超える周波数で光を与えた場合、ヤガ類は光の点滅を視認できず、連続光として視認すると考えられている^{6,7)}。

平間ら²⁾は、ヤガ類成虫の光受容体である複眼に対し、AlGaInP 系の黄色 LED を用いてパルス光を照射した際に誘発する微弱な電圧 (網膜電位: Electro-Retino Gram, ERG) を解析し、明期と暗期との比率が 1:1 の場合、オオタバコガとハスモンヨトウが点滅光として視認できるのは、パルス光の時間構造である明期と暗期がともに約 10 ms (10^{-2} 秒) が限界であると報告している。

以上を踏まえ、著者らは、連続光の照射によって著しい開花遅延が発生する典型的な短日植物である切り花ギクの生産においても、開花遅延させることなく適用できる黄色パルス光による防蛾照明技術の開発を目指している。前報⁸⁾において、ERG 信号の応答特性の解析に基づき、オオタバコガおよびハスモンヨトウ成虫の防除にあたっては、同一の時間構造を有する黄色パルス光によって対応できる可能性が高いことを明らかにした。加えて、連続光では秋ギク (autumn-

flowering chrysanthemum) に著しい開花遅延が発生する放射照度 19 mW m^{-2} (約 10 lx) であっても、明期が 10 ms の場合、暗期を 50 ms 以上とすることで、'神馬' の開花遅延が回避できることを報告した。

一方、審良ら⁹⁾は、オオタバコガ成虫の視覚に対する黄色パルス光の刺激力は、ヤガ類の防除に有効な照度の下限值¹⁰⁻¹²⁾と報告されている放射照度が 1.2 mW m^{-2} (約 1 lx) の場合、明期 10 ms と比較して、明期 20 ms において大きい傾向にあると指摘している。また、尹ら^{13,14)}は、放射照度が 20 mW m^{-2} の場合、明期 20 ms /暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光によって、オオタバコガおよびハスモンヨトウ成虫の飛翔行動を効果的に抑制できると指摘している。

黄色パルス光を活用した防蛾照明技術を切り花ギクの圃場へ導入する場合、複数個の LED を実装したモジュールである光源の近くでは放射照度が大きく、離れば小さくなる。ヤガ類の防除に有効な放射照度の下限值 (1.2 mW m^{-2}) を圃場全体で確保できるよう LED を設置する場合、出力の小さい光源を多数配置すれば、圃場内を小さい放射照度でより均一に照明できるが、導入コストや、設置の作業労働性を考慮すると現実的ではない。導入コストを低く抑え、優れた作業性を実現するためには、たとえ圃場内に放射照度の差があっても、防蛾に有効で、なおかつキクに開花遅延させることなく適用できる放射照度の範囲を明確にする必要がある。

そこで、本研究は、ヤガ類成虫の飛翔行動抑制に効果的とされる明期 20 ms /暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光を、ヤガ類の複眼に異なる放射照度で照射し、ERG 信号を計測・解析することで刺激力を検証した。加えて、キクの発蕾、開花および切り花形質に及ぼす影響を検討し、前報⁸⁾では未解明であった実際栽培へも適用できる放射照度の範囲を特定しようと試みた。

2 材料および方法

2.1 ヤガ類の黄色パルス光に対する光追従性実験

(1) ERG 信号計測システム

前報⁸⁾と同様に、ヤガ類成虫の頸部に塩化銀膜を施した直径 $100 \mu\text{m}$ の銀針電極 (正極) を挿入し、直径 $10 \mu\text{m}$ のタングステン線針電極 (負極) を複眼の上部と下部に挿入

した。複眼に LED のパルス光を照射し、この際に誘発する微弱な ERG 信号を生体電位アンプ (BE-AMP-02: イーグルテクノロジー社製, CMRR: 80 dB 以上, S/N: 60 dB 以上, DC ~ 100 kHz (-3 dB)) で 1000 倍に増幅した。Low Pass Filter (遮断周波数 f_c : 800 Hz) を用いて、800 Hz より高い周波数の帯域を減衰させることでノイズを除去後、計測用 PC のサンプリング周波数を 2 kHz、計測時間は 15 s とし、DC から f_c の帯域までの ERG 信号を計測した。計測系全体をシールドボックス内に納め、さらに A 種接地工事を施して外来ノイズを除去した。

黄色パルス光を照射した場合に、ヤガ類成虫の複眼内で誘発した ERG におけるアンダーシュートの Bottom とオーバーシュートの Top との電位差を V_{BT} (Voltage of Bottom to Top) と定義した。その際、計測した順で便宜的に $V_{BT1} \sim 3$ とし、異なる放射照度で誘発した $V_{BT1} \sim 3$ の平均値を解析した。

なお、供試虫であるオオタバコガには、住化テクノサービスから購入した蛹を羽化させた成虫 10 頭 (オス: 5, メス: 5) を用いた。また、ハスモンヨトウは、石川県および高知県産の野外採集個体と、それを累代飼育して得られた成虫 16 頭 (オス: 10, メス: 6) を用いた。

(2) LED 光源制御とパルス光の明期における放射照度

供試光源の相対分光放射照度を Fig. 1 に示す。本研究では AlGaInP 系の黄色 LED ではなく、短波長カットフィルタを装着した状態でピーク発光波長が 571 nm の黄色蛍光

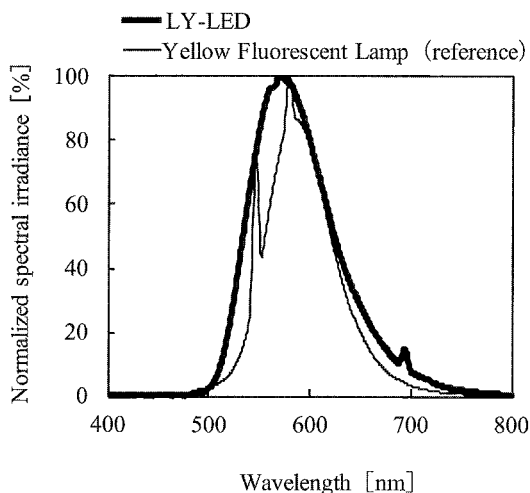


図 1 供試黄色 LED および黄色蛍光灯 (ナショナル社製 FL20S・Y-F) の相対分光放射照度

Fig. 1 Normalized spectral irradiance of yellow-LED light source used in the experiment compared with that of a yellow fluorescent lamp (National, co-made FL20S・Y-F)

LED (専用開発品: シャープ社製, 以後, LY-LED と略記する) を供試した。LY-LED には, Ba, O, Sr, Si および Eu (Europium) で構成される蛍光体を利用した一般照明用の白色 LED と同じ発光原理が用いられており, 従来の AlGaInP 系の黄色 LED と比較して発光効率が優れ, なおかつ防蟻用黄色蛍光灯に類似した相対分光放射照度を有する。

LY-LED は, 複眼頭頂部から 1.5 cm の高さに設置し, 所定の黄色パルス光を供試個体の複眼へ照射した。パルス光の時間構造である明期と暗期の設定は, ポケットコンピュータ (PC-G850 V: シャープ社製) で制御した。ただし, 針電極の挿入後, ERG 信号を安定させるため約 20 分間の暗状態を保ち, その後, 設定した各時間構造で, 一つの時間構造当たり約 10 s 照射し, ERG 信号を計測した。なお, 一つの時間構造から次の時間構造への移行にあたっては, 複眼の ERG 信号を安定させるため, 5 分間の連続した暗期を設けて暗適応させた。

黄色パルス光の時間構造は, 明期 20 ms/暗期 80 ms に設定した。放射照度は, 1, 10, 20, 50, 100, 300, 500 および 1000 mW m^{-2} の 8 水準とした。放射照度の測定には, スペクトロラジオメータ (センサ RW-3703-4 および本体 X1-1: Gigahertz-Optik 社製) を用いた。なお, 使用したスペクトロラジオメータは, 設定したパルス光の点滅速度に追従 (応答) できないため, 放射照度を測定できない。そこで, 各処理区とも, 一時的に連続点灯させた状態で, 所定の放射照度に初期設定してから, 実験を開始した。

2.2 秋ギクの発蕾, 開花および切り花形質に及ぼす黄色パルス光の影響

供試品種は秋ギクの '神馬' とし, なりゆき温度管理下のプラスチックハウス内の親株床および挿し芽床にて, 白熱電球 (K-RD100V75W, パナソニック社製) を用い, 22 ~ 2 時まで暗期中断を行って育苗した。2009 年 7 月 10 日に挿し芽し, 7 月 29 日に株間 12 cm, 条間 12 cm の 5 条 $\times$ 5 列で, なりゆき温度管理下のプラスチックハウス内の地床へ発根苗 25 株を定植し, 10 月 24 日 (87 日間) まで無摘心栽培した。なお, 地床は耕土深約 10 cm を沖積土: ピートモスを 3:1 (V/V) の割合で混合した培地で客土し, 定植 7 日後に窒素: リン酸: カリを 7:6:6 の割合で含んだ有機質複合肥料 (いい花つくり 766: 広島県製肥社製) を 25 株当たり 91 g 施与した。

光源の設置は前報⁸⁾と同様に, パネル中央に 24 個の LY-LED を実装したモジュールを発光面が下向きになるように配置した。所定の放射照度を確保するために, LY-LED モジュールから茎頂までの距離は, キクの成長に合わせて約 90 cm となるように, 定植 8 日後から実験終了まで毎週 1 回調整した。なお, キクの茎頂付近におけるパルス光の放射照度は, 便宜的に 20, 35 および 50 mW m^{-2} の 3 水準とした。また,

黄色パルス光の時間構造は、いずれも明期 20 ms/ 暗期 80 ms とし、対照として定植日以降を自然日長下で管理する無処理区を設定し、これら 4 区の栽培は、すべて同時期に実施した。実験期間中は、無処理区を除き、毎日 17:00 ~ 7:00 の時間帯において、所定の放射照度でパルス点灯した。各区の周縁部の 16 株を除く 9 株について、蕾が視認できた日を発蕾日、開花のステージが「2」¹⁵⁾ となった日を開花日とした。さらに、開花日には地際部で切り取って収穫し、切り花形質を調査した。

3 結果および考察

3.1 ヤガ類の黄色パルス光に対する光追従性実験

前報⁸⁾において、オオタバコガおよびハスモンヨトウ成虫の ERG 信号の応答特性は、性差に依存しないこと、複眼上部および下部において、ほぼ同様な挙動を呈することを明らかにした。本実験においても、ERG 信号波形の特徴は、個体間のばらつきは多少みられたものの、供試した全個体であるオオタバコガの 10 頭、ハスモンヨトウの 16 頭においても、それぞれの種類ではほぼ同様に観察されたため、複眼上部におけるデータのみを解析して考察した。

Fig. 2 にオオタバコガ成虫の複眼に誘発した代表的な ERG 信号波形を示した。放射照度が 20 mW m^{-2} (Fig. 2a)、 50 mW m^{-2} (Fig. 2b) および 300 mW m^{-2} (Fig. 2c) では、いずれも光照射直後から約 20 ms 遅れてアンダーシュートが観測され、常時安定した ERG 信号の繰返し波形を示しつつ、光点滅に十分追従した ERG 信号の振幅の変化も観測された。このことから、前報⁸⁾で示した明期 10 ms/ 暗期 10 ms の時間構造と比較して、本報の明期 20 ms/ 暗期 80 ms が、複眼への刺激力の安定性および持続性において優れると推察された。光点滅に追従した ERG 信号の振幅の変化は、設定したすべての放射照度で確認できた。このため、オオタバコガは、明期 20 ms/ 暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光を照射した場合、 $1 \sim 1000 \text{ mW m}^{-2}$ の放射照度域を点滅光として視認していると推察された。しかし、点線矢印で示したとおり、 20 mW m^{-2} (Fig. 2a) および 50 mW m^{-2} (Fig. 2b) の ERG 信号波形は、ピーク後に緩やかに減衰したのに対し、 300 mW m^{-2} (Fig. 2c) では、前述の遅延特性を示しつつアンダーシュートが観測された後、2 段階にわたって緩やかに上昇する特徴が見られた。この特徴は、放射照度 $300 \sim 1000 \text{ mW m}^{-2}$ でも同様に観察されたことから、オオタバコガのパルス光に対する視認性は、 100 mW m^{-2} 付近を境界として変化がはじまり、 300 mW m^{-2} 以上で変化が大きくなるものと考えられた。平間ら²⁾は、オオタバコガは放射照度が大きいほど速い点滅を視認しにくいことをすでに報告してい

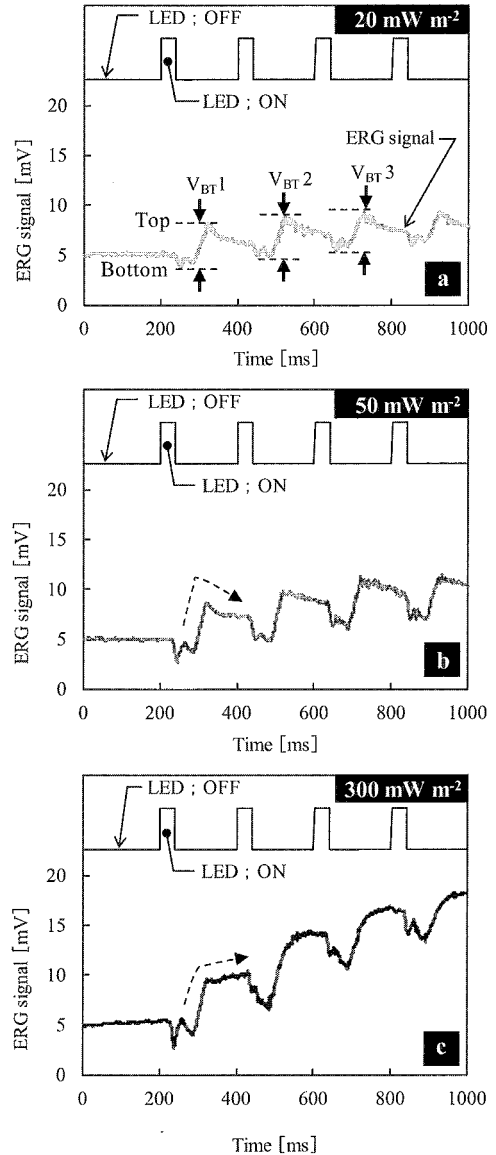


図 2 明期 20 ms の放射照度が 20 mW m^{-2} 、 50 mW m^{-2} または 300 mW m^{-2} のパルス光照射時のオオタバコガ (オス) の代表的な網膜電位 (ERG) の時間変化 (暗期は 80 ms)

Fig. 2 Typical ERG signal waveforms of *Helicoverpa armigera* (male) for irradiances of (a) 20 mW m^{-2} , (b) 50 mW m^{-2} and (c) 300 mW m^{-2} with 20 ms pulse widths (80 ms dark period)

る。

一方、前報⁸⁾において、放射照度が 1.2 mW m^{-2} で明期 10 ms/ 暗期 500 ms の時間構造を有する黄色パルス光の下では、ハスモンヨトウの ERG 信号波形は、オオタバコガと比較

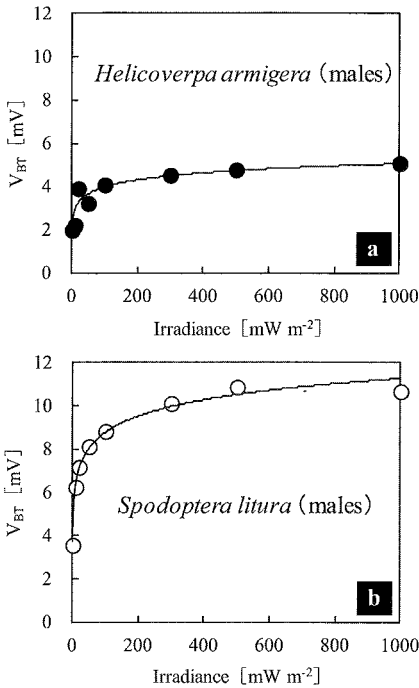


図3 明期 20 ms の黄色パルス光の放射照度がオオタバコガおよびハスモンヨトウ成虫の複眼内で誘発した網膜電位 (ERG) におけるアンダーシュートの Bottom とオーバーシュートの Top との電位差 (V_{BT}) に及ぼす影響 (暗期は 80 ms)

Fig. 3 Dependence of the potential difference between the bottom of the undershoot and the top of the overshoot of the ERG signal induced in the compound eyes of *Helicoverpa armigera* and *Spodoptera litura* on the irradiance of pulsed yellow light with 20 ms pulse widths (dark period of 80 ms)

して、ピーク後緩やかに減衰するという種に起因する特徴が見られることを明らかにした。本実験でも、明期 20 ms/ 暗期 80 ms の時間構造で放射照度が $1 \sim 100 \text{ mW m}^{-2}$ においては同様な特徴が見られたが、前報⁸⁾で示したとおり、ERG 信号波形の光照射終了直後の減衰スピードに若干の違いはあるものの、この範囲の放射照度のパルス光に対する ERG 信号の追従性は、当該 2 種のヤガ類に共通する特徴と考えられる。このため、当該 2 種のパルス光による防除において、少なくとも $1 \sim 100 \text{ mW m}^{-2}$ であれば、明期 20 ms/ 暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光を、点滅光として常時安定的、かつ持続的に視認させることができると考えられた。

Fig. 3a に、オオタバコガ成虫の複眼に対し、明期 20 ms/ 暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光を、異なる放射照度で照射した場合の V_{BT} の変化を示した。図中の

縦軸は、計測した順で便宜的に $V_{BT1} \sim 3$ とした場合のそれらの平均値、横軸は放射照度を示した。なお、 V_{BT} の値が大きいほど、光による刺激力は大きいとみなすことができる。 $V_{BT}: Y[\text{mV}]$ と放射照度: $X[\text{mW m}^{-2}]$ の関係は、 $Y = 0.4726 \log_e(X) + 1.7876$ の回帰式 ($r = 0.9351$, $n = 8$) で近似でき、 $1 \sim 1000 \text{ mW m}^{-2}$ の範囲で放射照度が大きいほど V_{BT} は増加した。このため、 $1 \sim 1000 \text{ mW m}^{-2}$ の範囲では放射照度が大きいほど刺激力も大きいと考えられた。しかしながら、 $100 \sim 1000 \text{ mW m}^{-2}$ の範囲における V_{BT} は 4 mV 前後であり、大きな差はなかったことから、この範囲の放射照度によるオオタバコガへの刺激力には、大きな差がないと考えられた。

Fig. 3b には、Fig. 3a と同様に、異なる放射照度におけるハスモンヨトウ成虫の V_{BT} の変化を示した。 $V_{BT}: Y[\text{mV}]$ と放射照度: $X[\text{mW m}^{-2}]$ の関係は、 $Y = 1.0811 \log_e(X) + 3.7566$ の回帰式 ($r = 0.9933$, $n = 8$) で近似でき、放射照度が大きいほど V_{BT} は増加した。このことから、 $1 \sim 1000 \text{ mW m}^{-2}$ の範囲では放射照度が大きいほど刺激力も大きいと考えられた。しかしながら、 $1 \sim 100 \text{ mW m}^{-2}$ では、それより大きい放射照度域と比較して、近似曲線の傾きが急であり、 1 mW m^{-2} 当たりの V_{BT} の増加量が大きかった。このため、ハスモンヨトウのパルス光による防除においては、わずかな放射照度の差によって刺激力が大きく変化する $1 \sim 100 \text{ mW m}^{-2}$ の放射照度域について、詳細に検討する必要があると考えられた。

3.2 秋ギクの発蕾、開花および切り花形質に及ぼす黄色パルス光の影響

Fig. 4 に、定植日からの発蕾所要日数および到花日数を示した。発蕾所要日数は、いずれの処理区においても、無処理区との間に有意な差 ($p < 0.05$) がなく、発蕾日の遅延は見られなかった。一方、到花日数は、20 および 35 mW m^{-2} 区と無処理区との間には有意な差 ($p < 0.05$) はなかったが、 50 mW m^{-2} 区は無処理区と比較して、到花日数が 3 日増加し、有意な差 ($p < 0.05$) が見られた。

Table 1 に、収穫時の切り花形質を示した。切り花長は、20 および 35 mW m^{-2} 区と無処理区との間には有意な差 ($p < 0.05$) はなかったが、 50 mW m^{-2} 区は無処理区と比較して 9 cm 大きく、有意な差 ($p < 0.05$) が見られた。その他の切り花形質は、いずれの処理区においても、無処理区との間に有意な差 ($p < 0.05$) はなく、花卉の展開異常も見られなかった。以上のことから、LY-LED による明期 20 ms/ 暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光を照射した場合、茎頂付近の放射照度が 35 mW m^{-2} 以下であれば、代表的な秋ギクである‘神馬’の発蕾や開花時期、切り花形質に影響を及ぼすことなく適用できること、 50 mW m^{-2} であっても、到花日数は数日増加するが切り花長を除く切り花形質には影響を及ぼさな

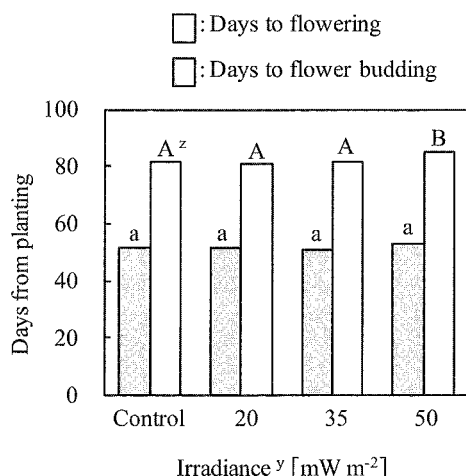


図4 明期 20 ms の黄色パルス光の放射照度が秋ギク‘神馬’の発蕾所要日数および到花日数に及ぼす影響（暗期は 80 ms）

^z 図中の同一英大文字間および同一英小文字間には Tukey の HSD 検定により 5% 水準で有意な差がないことを示す ($n = 9$)

^y 植物体の茎頂における放射照度を示す

Fig. 4 Effect of the irradiance of pulsed yellow light with 20 ms pulse width (dark period of 80 ms) on the number of days to flower budding and flowering of the autumn-flowering chrysanthemum, ‘Zimba’

^z The corresponding upper-case letters and the lower-case letters in the Figure show no significant difference at the 5% level by Tukey's HSD test ($n = 9$)

^y Irradiance at the apical meristem of the plants

いことが明らかとなった。ただし、実際栽培では、到花日数の数日の増加を許容するか否かは生産者によって異なるので、一斉収穫を望むのであれば、放射照度 35 mW m^{-2} 以下が

適切であろう。

黄色蛍光灯による連続光下において、秋ギク‘秀芳の力’では照射光の光合成有効量子束密度 (PPFD) が $0.01 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 増加することに開花が約 3 日遅れ¹⁶⁾、 $1.2 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (約 300 mW m^{-2}) 以上では未着蕾や不開花となり^{16,17)}、放射照度と開花遅延には密接な関係があることが報告されている。また、前報⁸⁾では、LY-LED を用い、放射照度を 19 mW m^{-2} として与えた連続光下では、無処理区と比較して‘神馬’の開花が 10 日遅延することを明らかにした。本実験では、連続光の処理区を設けなかったが、より大きい 35 mW m^{-2} の連続光下では 10 日以上、 50 mW m^{-2} では、それよりもさらに開花が遅延すると推察される。本実験により、LED の有する優れた応答速度に着目した黄色パルス光を用いることで、連続光では著しく開花が遅延してしまう放射照度であっても実際栽培へ十分に適用でき、前報⁸⁾では未解明であった放射照度の上限値が明らかとなった。圃場内に一定程度の放射照度の差があっても、開花遅延させることなく適用できることは、防蛾用の LED 光源装置の実用化にあたって、配光性等の諸性能を決定する上で有益な知見であると考えている。加えて、一つの LED モジュール（光源）の出力を一定程度高めた照明設計が可能となる。その結果、連続光を適用する場合と比較して、単位面積当たりが必要となる光源数を少なく設定できるので、導入コストの低減と、設置作業の軽減に大きく貢献できるものと考えている。

本実験は、キクの茎頂付近が所定の放射照度となるよう 1 週間毎に光源の高さを調整して、開花遅延させることなく適用できる上限値を求めた。実際栽培では、省力化の観点から、光源を手動で動かすことで放射照度を調整しなくても利用できることが望ましい。このため、固定光源を前提として、技術開発を進める必要がある。LED には調光が容易であるという特性があるが、本研究で得られた知見に基づいて適切

表 1 明期 20 ms の黄色パルス光の放射照度が秋ギク‘神馬’の切り花形質に及ぼす影響（暗期は 80 ms）

Table 1 Effect of the irradiance of pulsed yellow light with 20 ms pulse width (80 ms of dark period) on the cut-flower characteristics of the autumn-flowering chrysanthemum, ‘Zimba’

Irradiance ^z [mW m^{-2}]	Cut-flower				Numbers of		Abnormal flower
	Stem length [cm]	Fresh weight [g]	Node number	Neck length [cm]	Ray floret	Disk floret	
Control	110 a ^y	100 a	65 a	3.8 a	240 ab	80 a	None
20	113 a	103 a	63 a	4.0 a	231 a	67 a	None
35	110 a	99 a	62 a	3.9 a	234 a	89 a	None
50	119 b	108 a	65 a	4.3 a	260 b	62 a	None

^z 植物体の茎頂における放射照度を示す

^y 表中の同一カラム内の同一英小文字間には Tukey の HSD 検定により 5% 水準で有意差がないことを示す ($n = 9$)

^z Irradiance at the apical meristem of the plants

^y The corresponding lower-case letters of each column in the table are the same at the 5% level of significance by Tukey's HSD tests ($n = 9$)

に照明設計することで、放射照度をキクの成長に合わせて調整することなく利用できる防蛾用の LED 光源装置の開発は十分に可能であると考えている。例えば、計算では、現有の電照用防水ソケットケーブル (E26 対応) を用いて、地面からの高さと光源同士の間隔を一定とする固定光源として圃場導入した場合、キクの草丈に関わらず茎頂付近で下限 1 mW m^{-2} 、上限 35 mW m^{-2} の範囲の放射照度を確保できる見込みは高い。今後、そのような LED 光源装置を試作して現地実験を行い、実際の放射照度の分布や開花、切り花形質に及ぼす影響を詳細に検証する必要がある。

ヤガ類の飛翔行動抑制に効果的とされる明期 20 ms/暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光を適用する場合、前述のヤガ類の光追従性実験の結果に基づき、放射照度が 100 mW m^{-2} であっても、点滅光として常時安定的、かつ持続的に視認させることが可能と推察された。本実験で供試した‘神馬’の開花に影響しない放射照度の上限値は $35 \sim 50 \text{ mW m}^{-2}$ の範囲にあると推察された。このため、ヤガ類が点滅光として視認可能な放射照度と比較して、典型的な短日植物である切り花ギクへ適用できる放射照度の上限値は小さいことから、実際栽培での防蛾照明技術における放射照度の範囲は、キクに適用できる上限値以下に設定すればよいことが示された。今後は、照明に対する開花特性の異なる秋ギクおよび夏秋ギク品種についても上限値を検証する必要があると考えている。

摘 要

黄色 LED パルス光を用いたキクの害虫防除光源装置を開発するために、実際栽培において適用可能な放射照度の範囲を求めた。明期 20 ms/暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光をオオタバコガとハスモンヨトウの複眼に照射し、放射照度 $1 \sim 1000 \text{ mW m}^{-2}$ の範囲において ERG 信号波形を解析した。その結果、少なくとも $1 \sim 100 \text{ mW m}^{-2}$ であれば、両種ともに点滅光として常時安定的、かつ持続的に視認していることが明らかとなった。続いて、黄色パルス光の放射照度 ($0, 20, 35, 50 \text{ mW m}^{-2}$) が秋ギク‘神馬’の開花および切り花形質に及ぼす影響を調査した。 35 mW m^{-2} までの放射照度は、発蕾までの日数、開花までの日数および切り花形質に有意な影響を及ぼさなかった。しかし、 50 mW m^{-2} の放射照度で育てたキクは、他の処理区と比較して、開花までの日数が 3 日間増加し、切り花長が 9 cm 大きくなった。以上の結果から、適用できる放射照度の上限値は、放射照度が $35 \sim 50 \text{ mW m}^{-2}$ の範囲に存在し、少なくとも 35 mW m^{-2} であれば、開花遅延させることなく適用可能であることが明らかとなった。

謝 辞

本研究の一部は農林水産省「新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業」を活用し実施した。ここに記して謝意を表す。

引用文献

- 1) 八瀬順也. 黄色灯による害虫管理—花き, 野菜類のガ類を中心として—. 生態工学会企画委員会編集. 生態工学シンポジウム論文集. ポプラ社, 埼玉. 27-32. 2003.
- 2) 平間淳司, 荒永 誠, 中出智己, 宮本紀男, 藪 哲男, 伊澤宏毅. 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(5): 76-82. 2002.
- 3) 平間淳司, 関 憲一, 細谷直輝, 松井良雄. 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(1): 34-40. 2007.
- 4) 平間淳司, 松井良雄. 黄色 LED 光源を利用した物理的害虫防除—ヤガ類に対する有効性の検討—. 植物防疫. 61(9): 503-507. 2007.
- 5) 谷 善平. オプト・デバイス入門. 谷 善平編著. 新版オプト・デバイス応用ノウハウ. CQ 出版, 東京. 23. 2000.
- 6) 江口英輔. 複眼は何をどのように見ているか. 富永佳也編. 昆虫の脳を探る. 共立出版, 東京. 67-68. 1995.
- 7) Nakagawa T., Eguchi E. Difference in flicker fusion frequencies of the five spectral photoreceptor types in the swallowtail butterfly's compound eye. Zool Sci., 11: 759-762. 1994.
- 8) 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. 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(4): 167-174. 2010.
- 9) 審良昌紀, 三木良太, 平間淳司, 松井良雄, 得永嘉昭, 會澤康治, 石倉 聡. 黄色 LED を用いたパルス光による害虫防除装置の開発—切り花菊の開花阻害と防除効果との関係—. In: 日本生物環境工学会 2009 年福岡大会講演要旨. 福岡. 9月5日-8日. 10-11. 2009.
- 10) 内田正人, 福田博年, 宇田川英夫. ナシを加害する果実吸蛾類の生態と防除に関する研究. 鳥取県果樹試験場研究報告. 8: 1-29. 1978.
- 11) 那波邦彦, 向阪信一. 黄色蛍光灯によるスイートコーンのアワノメイガの被害軽減. 日本応用動物昆虫学会中国支部会報. 37: 19-24. 1995.
- 12) 八瀬順也, 山中正仁, 藤井 紘, 向阪信一. 黄色蛍光灯によるカーネーション, バラ, キクのタバコガ・ヨトウムシ類防除技術. 近畿中国農業研究. 93: 10-14. 1997.

- 13) 尹 丁梵, 野村昌史, 石倉 聡. LED 照明技術を利用したオオタバコガの飛翔行動抑制効果. In: 第 54 回日本応用動物昆虫学会大会講演要旨集. 千葉. 3 月 26 日-28 日. 196. 2010.
- 14) 尹 丁梵, 野村昌史, 石倉 聡, 山下真一. LED 照明技術を利用したハスモンヨトウの飛翔行動抑制効果. In: 第 55 回日本応用動物昆虫学会大会講演要旨集. 九州. 3 月 27 日-29 日. 213. 2011.
- 15) キク. フローリスト編集部編, 花の切り前. 誠文堂新光社, 東京. 4-18. 1983.
- 16) 石倉 聡, 福島啓吾, 那波邦彦. 防蛾用黄色蛍光灯による終夜照明が秋ギクの開花に及ぼす影響. 近畿中国農業研究. 100: 50-54. 2000.
- 17) 山中正仁, 八瀬順也, 宇田 明, 藤井 紘. 防蛾用黄色蛍光灯がカーネーションとキクの生長および開花に及ぼす影響. 近畿中国農業研究. 93: 71-75. 1997.