

いた暗期中断では、畝面における放射照度を概ね $170 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上に大きくする必要があったが、終夜照明した場合は、概ね $80 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上を確保すれば十分であった。

大規模な電照栽培において、電気設備容量がしばしば問題になる。電照における電気設備容量とは、電照を行っている圃場において、同時に使用できる電流量（アンペア数）を指す。電気設備容量が大きいと、それに対応する送電設備が必要となる。また、電力会社により、電気設備容量ごとに電気基本料金が定められており、電気設備容量が大きいほど、電気基本料金は高くなる。終夜照明では、暗期中断の3倍以上の照明時間が必要であるが、開花抑制に必要となる放射照度の下限値は、本実験の結果から暗期中断のほぼ半分であった。このため、LY-LEDによる終夜照明を採用することで必要となる時間当たりの電気設備容量も暗期中断のほぼ半分でよく、送電設備の軽装化と電気基本料金の低減に大きく貢献できるものと期待している。

一方、典型的な短日植物である切り花ギクの生産においても適用できるヤガ類の光防除技術の開発にあたっては、防除効果の発現と、開花遅延の回避という二律背反する課題を同時に解決する必要がある。石倉ら（1998）は、キクに対する開花抑制作用は、カラー蛍光灯を用いた場合、黄色光と比較して、緑色光で小さいことを指摘した。また、山中ら（2006）は、ピーク発光波長が $520 \sim 540 \text{ nm}$ の緑色蛍光灯を用いて、9月咲きギク栽培における防蛾効果と開花への影響を検討し、照度が $0.2 \sim 6.4 \text{ lx}$ の範囲でオオタバコガによる被害が見られなかったこと、加えて輪ギク‘松本城’の花蕾径と照度の間に負の相関関係（ $r = 0.777$, 5%水準で有意）があり、 6.4 lx （約 $12 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ ）では開花がやや遅延したことを報告している。緑、黄緑および黄色光のうち、防蛾効果が最も優れるのはどの光であるかを示した報告は見あたらないが、照射光自体が有する開花抑制作用が小さいという点においては、黄緑および黄色光と比較して、緑色光が、より適していると考えられる。しかしながら、緑色光の有する開花抑制作用が小さいことは、「防蛾と開花抑制の2つを単一の光源で実現する」という観点からは適切とはいえない。

第2節 人工光に対するオオタバコガおよびハスモンヨトウ成虫の視覚特性

連続光である黄色蛍光灯の照明は、照明に対する「慣れ現象」をヤガ類に引き起こし、防除効果が低下する恐れがあるため、平間ら（2002；2007）は、照射光を点滅光として常時視認させる防蛾照明技術を発案した。点滅光として常時視認させるためには、ちらつき光の臨界融合頻度（江口，1995）を超えない周波数で照明する必要がある。平間ら（2002）は、デューティー比が50%に相当する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）が限界であることを報告した。これを受けて、審良ら（2009）は、 10 ms および 20 ms の2水準の明期を設定し、ERG信号計測システムにより、オオタバコガ成虫の視覚に対する黄色パル

ス光の刺激力を解析した。その結果、防蛾に有効な照度の下限値（那波・向阪，1995；内田ら，1978；八瀬ら，1997）と報告されている 1 lx （約 $1.2 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ ）の場合，明期 10 ms と比較して，明期 20 ms において刺激力が大きい傾向にあったと指摘している。また，尹ら（2010；2011；2012）は，放射照度が $20 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ 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たと指摘・報告している。しかしながら，これらの知見においては， $20 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ より高い放射照度域での反応について，十分に検討されていない。

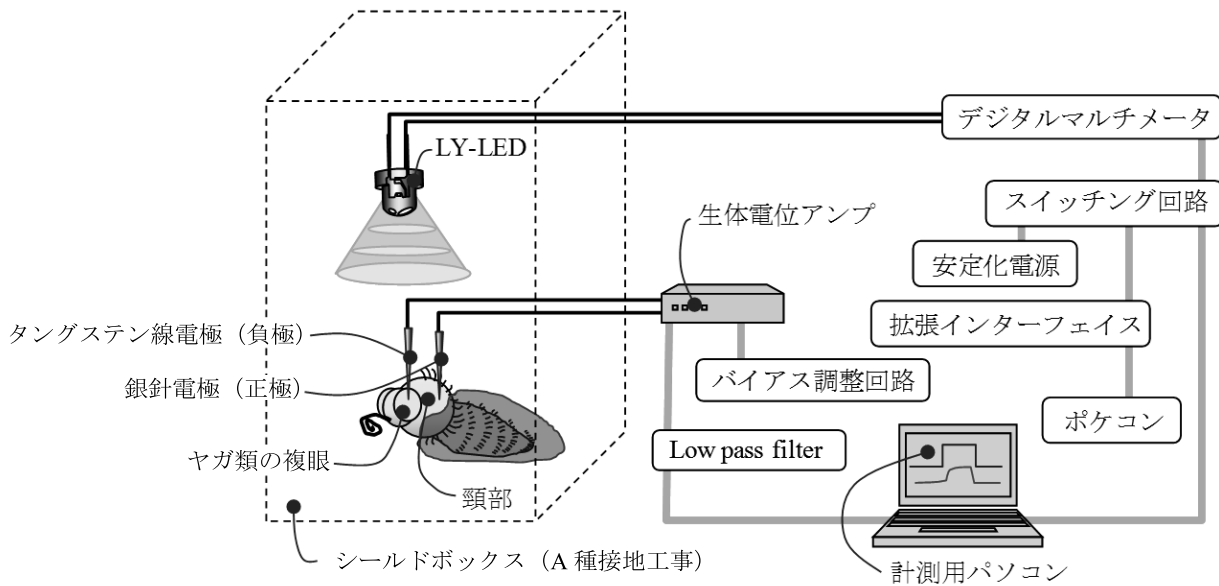
そこで，本節では，当該2種のヤガ類成虫の複眼へ，前述の明期 20 ms ／暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光を， $20 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ より高い放射照度で照射した場合の刺激力について，ERG 信号計測システムを用いて解析した。

1 材料および方法

ERG 信号計測システム

第 1-15 図に，ERG 信号計測システムの模式図を示す。ヤガ類成虫の複眼に光を照射すると，複眼内部で微弱な電圧である ERG が発生する。この電圧を増幅して解析することによって，ヤガ類成虫が照射光を強く認識しているか否かを判定することができる。これが ERG 信号計測システムの原理である。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で野外より採集した個体と，それらを 3 世代程度累代飼育して得られた成虫 16 頭（オス：10，メス：6）を用いた。



第 1-15 図 ERG 信号計測システムの模式図

LY-LED の制御とパルス光の明期における放射照度

供試光源には、第 1 節第 2 項で用いた LY-LED (第 1-6 図) を用いた。複眼頭頂部から 1.5 cm の高さに LY-LED を設置し、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、1 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、1 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。

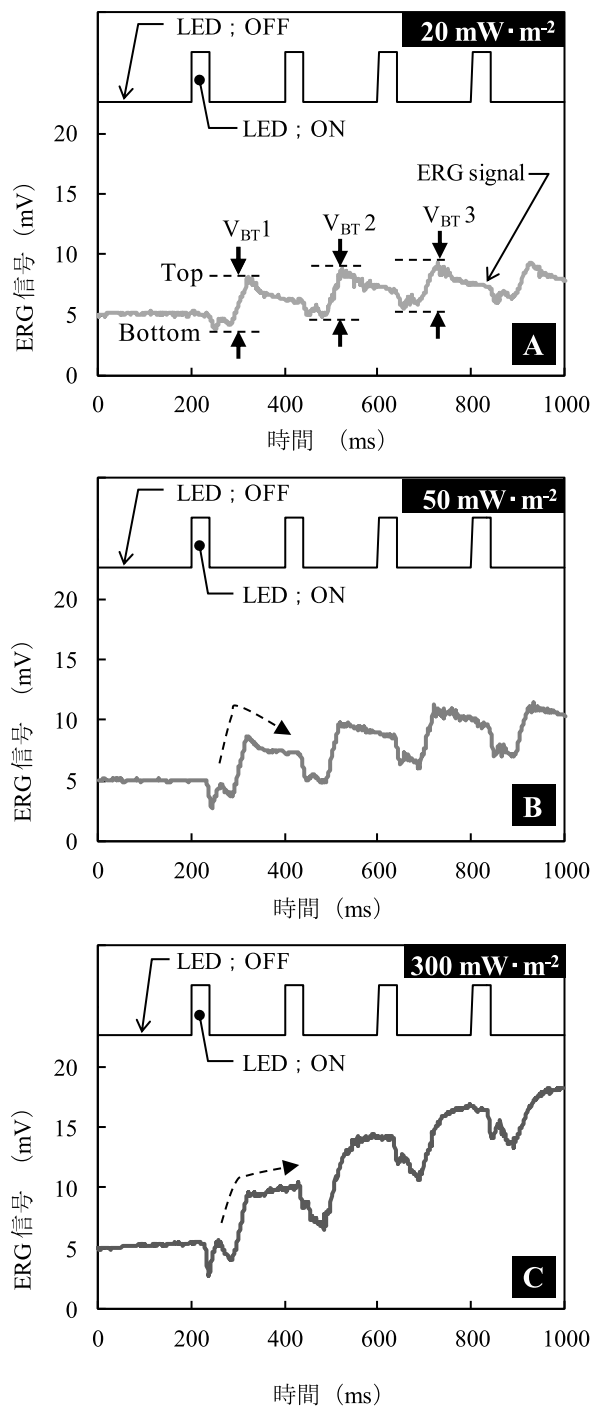
黄色パルス光の時間構造は、明期 20 ms / 暗期 80 ms に設定した。放射照度は、1, 10, 20, 50, 100, 300, 500 および 1000 $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$ の 8 水準とした。

2 結 果

黄色パルス光の放射照度と網膜電位 (ERG) 信号波形の経時的変化

第 1-16 図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 $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$ (第 1-16 図 A), 50 $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$ (第 1-16 図 B) および 300 $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$ (第 1-16 図 C) 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た。光点減に追従した 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。しかし、点線矢印で示したとおり、20 $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$ (第 1-16 図 A) および 50 $\text{mW} \cdot$

m^2 (第 1-16 図 B) の ERG 信号波形は、ピーク後に緩やかに減衰したのに対し、 $300 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ (第 1-16 図 C) 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。

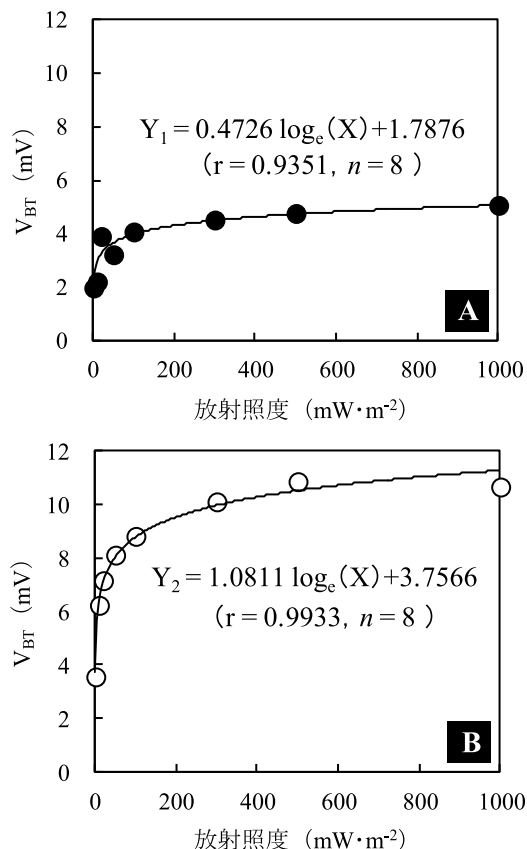


第 1-16 図 明期 20 ms/暗期 80 ms の時間構造を有する黄色パルス光の放射照度がオオタバコガ成虫 (オス) の ERG 信号の経時的変化に及ぼす影響

放射照度と ERG におけるアンダーシュートとオーバーシュートの電位差

第 1-17 図 A 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} の値が大きいくほど、光による刺激力は大きいとみなすことができる。放射照度と V_{BT} との関係における種間差を定量することを意図して回帰式を推定した。 $V_{BT} : Y_1$ (mV) と放射照度 : X ($mW \cdot m^{-2}$) の関係は、第 1-17 図 A に示した対数回帰式で近似でき、 $1 \sim 1000 mW \cdot m^{-2}$ の範囲で放射照度が大きいくほど V_{BT} は増加した。

第 1-17 図 B には、第 1-17 図 A 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。 $V_{BT} : Y_2$ (mV) と放射照度 : X ($mW \cdot m^{-2}$) の関係は、第 1-17 図 B に示した対数回帰式で近似でき、 $1 \sim 1000 mW \cdot m^{-2}$ の範囲で放射照度が大きいくほど V_{BT} は増加した。



第 1-17 図 明期 20 ms/暗期 80 ms の時間構造を有する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 ERG 信号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

A オオタバコガ成虫 (オス), B ハスモンヨトウ成虫 (オス)

3 考 察

オオタバコガ成虫の複眼に誘発した ERG 信号波形は、放射照度が $20 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ (第 1-16 図 A), $50 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ (第 1-16 図 B) および $300 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ (第 1-16 図 C) において、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、石倉ら (2010) が示した明期 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。また、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とから、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、 $1\sim 1000 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ 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。 $300 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ (第 1-16 図 C) では、点線矢印で示したとおり、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観察されたが、この特徴は、放射照度 $300\sim 1000 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ 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、 $100 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ 付近を境界として変化がはじまり、 $300 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ 以上で変化が大きくなるものと考えられた。平間ら (2002) 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る。

一方、石倉ら (2010) は、放射照度が $1.2 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ 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 $1\sim 100 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ においては同様な特徴が見られたが、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 $1\sim 100 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ 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。

第 1-17 図に示したとおり、オオタバコガおよびハスモンヨトウ成虫においては、 $1\sim 1000 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ の範囲で放射照度が大きいほど V_{BT} は増加したため、これら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、 $100\sim 1000 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ の範囲における V_{BT} は、オオタバコガでは 4 mV 前後であり、大きな差は見られなかったことから、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。一方、ハスモンヨトウについても、 $1\sim 100 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ では、それより大きい放射照度域と比較して、対数回帰式の傾きが大であり、 $1 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ 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 $1\sim 100 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ 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。