

緒 言

我が国の主要花きである切り花ギクは、国内での流通量が最も多い切り花であり、平成 24 年のキクの作付面積は 5,230 ha、出荷量は 15 億 9,500 万本である（農林水産省，2013b）。オオタバコガ *Helicoverpa armigera*（Hübner）やハスモンヨトウ *Spodoptera litura*（Fabricius）などのヤガ類（第 1 図）によるキクの被害額に関する正確な統計資料は見あたらないが、平成 6 年に広島県で記録されたヤガ類激発時のキクの被害率 60%（未発表）を、ヤガ類による被害が特に問題となる時期（7～10 月）の全国主要卸売市場における平成 20 年産の国内産切り花ギクの卸売価額 269 億円（農林水産省，2013a）に乗じて、わが国全体の被害額を算出した場合、その額は約 160 億円に及ぶものと試算され（石倉ら，2010）、これを早急に解決する必要がある。

害虫防除手段のうち、現在でもその主流である化学合成農薬の使用は、あらゆる農作物の生産において一定の成果を上げてきた。ところが、花き、野菜を問わず多くの種類の農作物を加害するオオタバコガおよびハスモンヨトウなどのヤガ類は、市販されている多くの化学合成農薬に対して薬剤抵抗性を獲得している（遠藤ら，2000；小野本ら，1996；染谷・清水，1997）とされ、防除が難しく、難防除害虫として扱われている。さらに、これらのヤガ類は夜行性であるために昼間は見つけにくいというのに、キクやカーネーションなどでは、幼虫が一度花蕾に潜り込んでしまうと、化学合成農薬がかかりにくいことも、防除を難しくしている原因となっている。このため、生産現場では化学合成農薬に替わる物理的防除法の確立が望まれており、その代替防除法（本田，2010）は、農作物に対して、より高い安全性を求めはじめた多くの消費者からも支持されつつある。現在は黄色蛍光灯を用いたヤガ類に対する防蛾灯の事例に見られるように、露地および施設栽培において、人工光源を利用した物理的な防除装置が開発され、その防除効果が報告されている（平間・松井，2007；本田，2010；伊澤ら，2000；石倉，2000；那波・向阪，1995；田澤，2001；内田，2002；八瀬ら，1997）。ヤガ類に対する夜間照明の利用（平間・松井，2007；本田，2010；伊澤ら，2000；那波・向阪，1995；田澤，



第 1-1 図 切り花ギクに甚大な被害を及ぼしているヤガ類

オオタバコガ (A 成虫, B 幼虫), ハスモンヨトウ (C 成虫, D 幼虫)

2012 ; 内田, 2002 ; 内田ら, 1978) は, 化学合成農薬の散布労力を軽減するとともに農薬の使用量を削減し, しかも, 薬剤抵抗性を有する害虫の出現を防止する環境配慮型の害虫防除法の 1 つでもある.

カーネーションやバラでは, 物理的防除法 (八瀬ら, 1997) として, 産卵のため圃場へ飛来するヤガ類の成虫に対して, 高い防除効果がある黄色蛍光灯による夜間照明の利用が進んでいる. 防蛾に黄色域の光が用いられるのは, 昆虫の誘引力が極めて弱いにもかかわらず明適応所要時間が短いことであり, 光照射による行動抑制に用いる光源として適しているという理由 (江村, 2003) による. オオタバコガおよびハスモンヨトウなどのヤガ類の防除における黄色蛍光灯による照明は, 具体的には, 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 (八瀬, 2003) があるとされている. しかし, 質的短日植物である秋ギクでは, その照明によって開花時期が著しく遅れることに加えて, 切り花形質が低下する (石倉ら, 2000 ; 山中ら, 1997) ため, 植物体に向けて光を照射するような利用はできなかった. さらに, 連続光である黄色蛍光灯の照明は, ヤガ類に「慣れ現象」を引き起こし, 防除効果が低下する恐れがあると指摘されている (平間ら, 2002 ; 2007 ; 平間・松井, 2007). 従って, 短日植物である切り花ギクの生産においても, キクの開花へ悪影響を及ぼさず, かつ, 持続性の高い防除効果が得られる条件を見いだすことができれば, 夜間照明を利用してヤガ類の被害を防ぐことが可能になると考えられる.

石倉・村上 (2006) は, Cathey・Borthwick (1961) による白熱電球を用いたサイクリックライティング関連実験に基づいて, 秋ギクの電照抑制栽培では, 赤色光を放射する発光ダイオード (Light Emitting Diode, 以下 LED と略記する) を用いた間欠照明によって明期と暗期を繰り返した場合, 明暗比率が異なることによって開花抑制効果に差があることを見いだした. 具体的には, 明期はすべて 1 秒とし, 0 (連続光), 1, 2, 5 および 9 秒の異なる暗期を設定して, 明期と暗期を繰り返す夜間照明を行った場合, 暗期の設定値が大きいほど開花への影響が小さくなることを確認した. このことは, 相対分光放射照度が異なるものの, 黄色光を用いる防蛾用の照明においても明暗比率 (時間構造) を調節することによって, 秋ギクの開花への影響を制御できる可能性を示唆している. なお, LED を光源として用いるのは, 特定波長を照射することに加えて, 一般的な LED の応答速度が $1 \mu\text{s}$ (10^{-6} 秒) 程度 (谷, 2000) と極めて速く, パルス光の照射に適しているためである.

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, 連続光に見える始める限界の頻度は, “ちらつき光の臨界融合頻度” (江口, 1995) と呼ばれている. 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 (江口, 1995 ; Nakagawa・Eguchi, 1994). つまり, ヤガ類に「慣れ現象」を起こさせることなく, 持続性の高い防除効果を得ることを目的として, 点滅光 (パルス光) 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を超えない周波数で照明する必要があると考えられる。これに基づいて、平間ら（2002）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される微弱な電圧（網膜電位：Electro-Retino Gram, 以下ERGと略記する）を解析し、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。なお、デューティー比とは、パルス光の有する時間構造である明期と暗期の比率を表しており、以下の式で示すことができる。

$$\text{デューティー比} = \frac{\text{明期}}{\text{明期} + \text{暗期}} \times 100$$

さらに、これに基づいて設定した明期と暗期がともに10 msのパルス光は、キャベツ圃場に侵入してくるヤガ類に対して高い防除効果を発揮する（平間ら, 2007）ことを明らかにしている。しかしながら、パルス光の明暗比率が1:1以外の場合、ヤガ類複眼への刺激力や、十分な刺激力を得るために必要となるパルス光の放射照度について検討した報告は見られない。また、黄色LEDを用いた防蛾用のパルス光と短日植物である切り花ギクの開花反応との関係を検討した報告は見られない。

そこで、本研究では、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防蛾照明技術の開発を目的として、「開花遅延の回避」と「防蛾効果の発現」という二律背反する課題を同時に解決するために必要となる照明条件を探索した。具体的には、まず第1章第1節において、人工光源を用いた従来の連続光について、防蛾に有効とされる黄色光を中心に、その他数種の光の波長および放射照度が切り花ギクの発蕾、開花および切り花形質に及ぼす影響を検討し、光の波長が有する開花抑制作用の強弱を明らかにしようと試みた。次に第2節では、ERG信号計測システムにより、オオタバコガおよびハスモンヨトウ成虫の複眼に対する黄色パルス光による刺激力を、異なる放射照度を設定して解析した。続く第3節では、ヤガ類の視覚特性の解析実験と同様な処理区を設定し、切り花の形状が異なる輪ギク、小ギクおよびスプレーギクの発蕾、開花および切り花形質に及ぼす黄色パルス光の影響を、数種の異なる品種を供試して調査した。加えて、一般照明用のLEDシーリングライトなどでは、すでに実用化されている効率的な調光技術であるPulse Width Modulation（パルス幅変調, 以下PWMと略記する）点灯下において発蕾に及ぼす影響を調査し、ギクの成長に合わせた節電管理実現の可能性を検討した。さらに、防蛾照明技術を具現化するLEDランプを圃場へ導入する際に想定される2つの点灯方式（同期および非同期点灯）による影響について調査した。続いて第2章においては、第1章で開発した防蛾照明技術について、実際に露地ギク栽培へ導入した場合の適用性を防蛾

効果と開花へ影響の両面から検証した。

なお、本研究においては、ある受光面でのスペクトロラジオメータによる分光放射照度の計測結果を用い、供試光源がどのような波長を、どのような割合で放射しているかを示した。このため、本稿で示される分光放射照度の計測結果に関する図中の縦軸は、「相対分光放射照度」と表記した。また、本研究において、論文中に特に記載のない場合の照射照度の測定には、400～800 nm の波長域の分光応答度がフラットレスポンスである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。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、パルス光の放射照度を測定できない。そこで、各実験での放射照度は供試した LED を一時的に連続点灯した状態で測定した。一方、黄色パルス光は、供試した LED を電子制御により短時間で繰り返し点滅させることで発生する。このときの点灯時間（明期）と消灯時間（暗期）を黄色パルス光の時間構造と定義し、本研究では明期／暗期として表記した。さらに、切り花ギクに関する調査では、蕾が視認できた日を発蕾日とした。また、輪ギクについては、開花のステージが「2」（フローリスト編集部, 1983）となった日を開花日とし、小ギクおよびスプレーギクについては、花房の中で開花が最も早い頭花の舌状花が開き始め、花芯が視認でき、開花のステージが「2」（フローリスト編集部, 1983）となった日を開花日とした。本研究では、ハウス内気温の管理など、自然に任せ、温風暖房機などによる制御を行わない場合を「なりゆきの温度管理」として表記した。

本報告は岡山大学に提出した学位論文である。

第1章 人工光に対する切り花ギクの開花反応特性およびヤガ類成虫の視覚特性

第1節 人工光に対する切り花ギクの開花反応特性

赤色光は、キクの開花抑制作用に優れる波長（Cathey・Borthwick, 1957；1964）とされている。このことから、近年では、キクの開花抑制を目的として使用されてきた白熱電球の代替光源の1つとして、赤色光を放射するキクの電照用 LED 電球が市販されている。ところが、赤色光は、ヤガ類成虫の複眼に対して刺激力が小さく（平間ら, 2002；藪, 1999）、ヤガ類成虫にとっては視認しにくい波長の1つとされている。このため、防蛾を目的とする照明においては、赤色光を利用することができない。

一方、オオタバコガおよびハスモンヨトウなどのヤガ類に対する夜間照明を利用した物理的防除法においては、580 nm 付近に最大波長を有する黄色蛍光灯による照明の有効性（田中ら, 1992；矢野, 1992；八瀬ら, 1996；1997）が報告されている。しかしながら、キクに対し、黄色光自体がどの程度の開花抑制作用を有するのかを、他の光の波長と比較検討した報告は少ない。