

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。

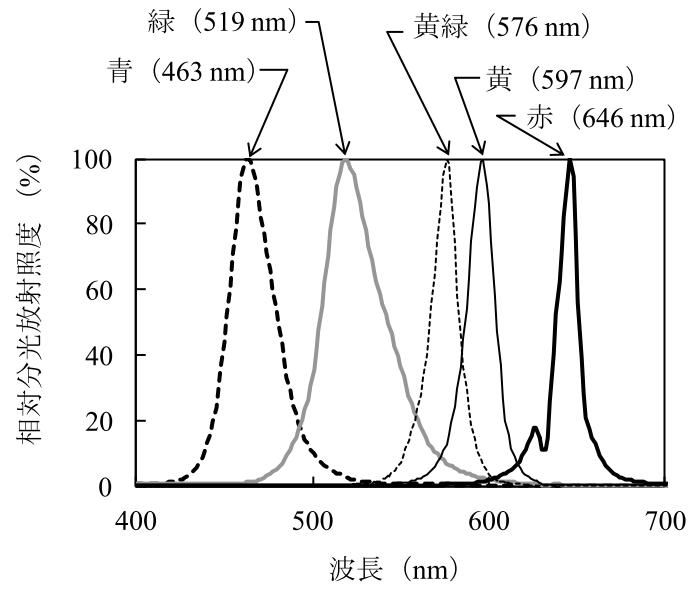
そこで、本節では、LED を含む相対分光放射照度の異なる各種光源を供試してキクを夜間照明した場合の影響について検討した。

## 第1項 光質に対する開花反応特性 (LED)

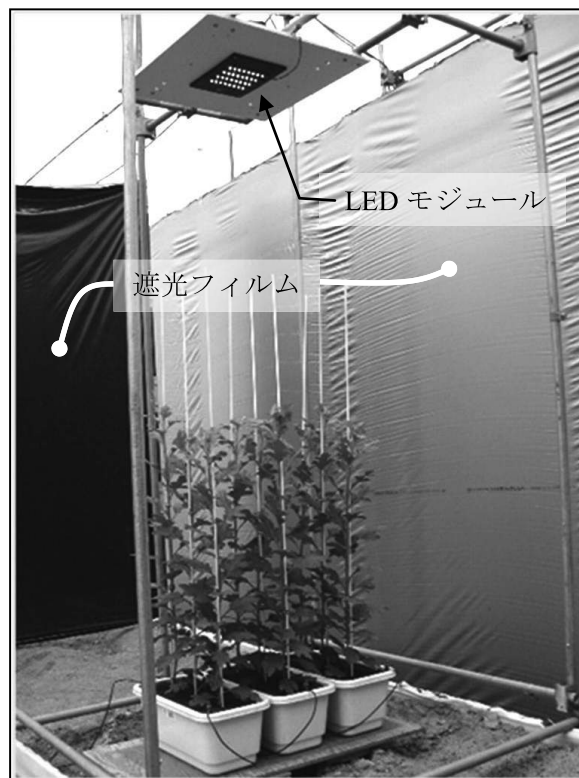
プリズムを使用しても、それ以上分光できない光は、単色光と呼ばれている。本項では、単色光に近い光を放射でき、なおかつ、異なる相対分光放射照度を有する5種類のLEDを、黄色LEDを中心として選定した。次に、キクに対し、黄色光の有する開花抑制作用が、他の波長の光と比較して、どの程度であるかを明らかにするため、選定したLEDを用いて、波長とその放射照度が発蕾、開花および切り花形質に及ぼす影響を比較調査した。

### 1 材料および方法

秋ギク「神馬」を2007年10月30日に挿し芽し、11月20日に容量6.2 liter(D 15 cm×W 32 cm ×H 13 cm)のプランターへ3株ずつ定植し、日最低気温が15℃を下回らないように管理したプラスチックハウス内で無摘心栽培した。培地は、沖積土：ピートモスを3：1 (V/V) で混合して作成し、定植7日後に窒素：リン酸：カリが7：6：6の有機質複合肥料(いい花つくろう766, 広島県製肥社製)を1プランター当たり9g施与した。供試光源の相対分光放射照度を第1-2図に示した。供試光源には、463(青色)、519(緑色)、576(黄緑色)、597(黄色)および646 nm(赤色)をピーク発光波長とする5種類のLEDを実装したLEDモジュール(以下、モジュールと略記する)を用いた。各モジュールは、45 cm × 45 cmのパネル中央に、発光面が下向きになるように固定し、キク供試個体上に設置した(第1-3図)。キクの茎頂付近における放射照度は、便宜的に10, 50 および100 mW・m<sup>-2</sup>の3水準とした。キクの成長に合わせ、LEDモジュールから茎頂までの距離が約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、所定の放射照度を確保した。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、各処理区はピーク発光波長と放射照度を組み合わせた15処理区とした。区制は1区3プランターで3反復とした。実験期間中は、無処理区を除き、定植日から2008年1月7日までの48日間、毎日22:00~2:00に暗期中断を行い、1月7日以降は、自然日長下で管理した。なお、夜間は、各処理区間を遮光フィルムで仕切ることで照射光の干渉を防止した。発蕾日および開花日を調査し、長日処理終了日から発蕾日および開花日までの日数を、それぞれ発蕾所要日数および到花日数とした。また、開花日に地際から採花し、切り花形質を調査した。



第 1-2 図 実験に供試した 5 種類の LED の相対分光放射照度  
( ) 内はピーク発光波長を示す



第 1-3 図 容量 6.2L のプランターに植え付けられた秋ギク‘神馬’と  
45 cm × 45 cm のパネル中央に固定された LED モジュール

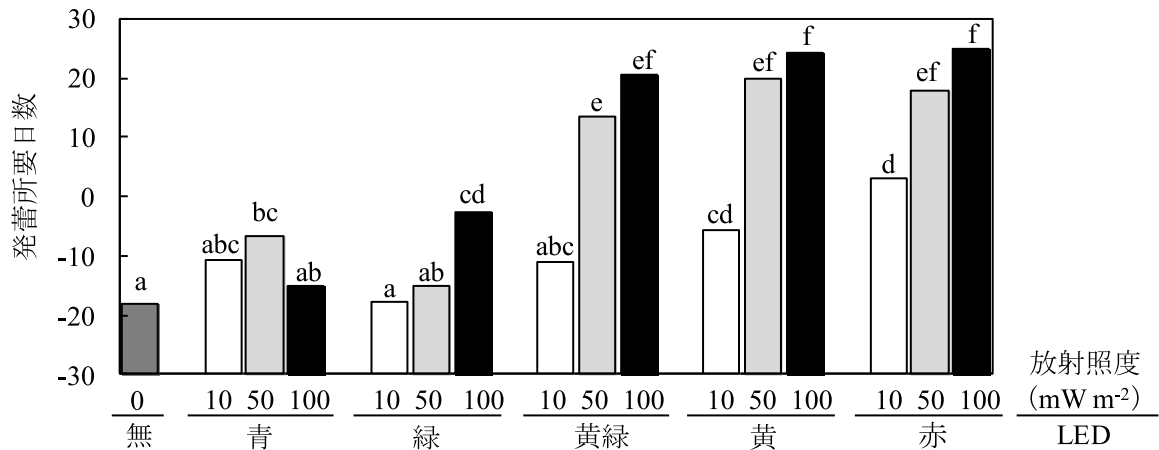
## 2 結 果

供試光源を用いて異なる放射照度下で暗期中断した場合の秋ギク‘神馬’の発蕾所要日数を第 1-4 図に、供試光源による暗期中断の終了日から 8 日後の  $10 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  区における生育状況を第 1-5 図に示した。発蕾所要日数は、青色光を照射すると、無処理と同様に、すべての処理区で放射照度に関わらず 0 日未満となった。緑色光を照射すると、いずれの放射照度においても 0 日未満となったが、放射照度が大きい区ほど発蕾所要日数は増加する傾向が見られた。黄緑色光を照射すると、 $10 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  区のみ 0 日未満となったが、 $50 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  区で 14 日、 $100 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  区では 21 日となった。黄色光を照射すると、 $10 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  区では 0 日未満となったが、 $50 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  区で 20 日、 $100 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  区では 24 日となった。赤色光を照射すると、すべての処理区で 0 日より大きくなり、 $10 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  区で 3 日、 $50 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  区で 18 日、 $100 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  区では 25 日となった。

第 1-1 表に、異なる波長および放射照度で暗期中断した場合の秋ギク‘神馬’の切り花形質を示した。切り花長は、青色光照射では、無処理区と同様に、放射照度に関わらず 90 cm 未満となった。緑色光照射では、いずれの放射照度においても 90 cm 未満となったが、放射照度が大きいほど切り花長が増加する傾向が見られた。黄緑色光照射では、 $10 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  区のみ 90 cm 未満となったが、 $50 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  区で 103 cm、 $100 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  区では 110 cm となった。黄色光照射では、 $10 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  区で 90 cm 未満となったが、 $50 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  区で 107 cm、 $100 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  区では 112 cm となった。赤色光照射では、 $10 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  区で 90 cm 未満となったが、 $50 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  区で 110 cm、 $100 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  区では 115 cm となった。切り花重および切り花節数は、切り花長とほぼ同様な傾向を示した。やなぎ葉数は、いずれも 1.3~2.3 枚となり、処理区間に有意な差が見られなかった。花首長は、黄緑色光照射の  $100 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  区で 1.7 cm、黄色および赤色光照射の 50 および  $100 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  区では 1.3~1.7 cm となり、無処理区の 3.9 cm と比較して、有意に小さかったが、他の処理区と無処理区との間には有意な差は見られなかった。花弁の展開異常は、いずれの区においても見られなかった。

## 3 考 察

石倉ら (2009) は、白熱電球を用いた研究において、十分な放射照度を確保しつつ、秋ギク‘神馬’に対して 22:00~2:00 の暗期中断を行った場合、暗期中断終了日からの発蕾所要日数が 20 日前後となることを確認している。黄緑、黄および赤色 LED を用いた放射照度 50 および  $100 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  において、白熱電球で十分な放射照度を確保しつつ暗期中断を行った場合とほぼ同様に、発蕾所要日数が 18~25 日となった。特に、同一の放射照度で比較した場合、防蛾、あるいは開花抑制の観点から重要と考えられる黄緑、黄および赤色光照射の発蕾所要日数には、放射照度を最も低く設定した  $10 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  において有意な差が見られたものの、50 お



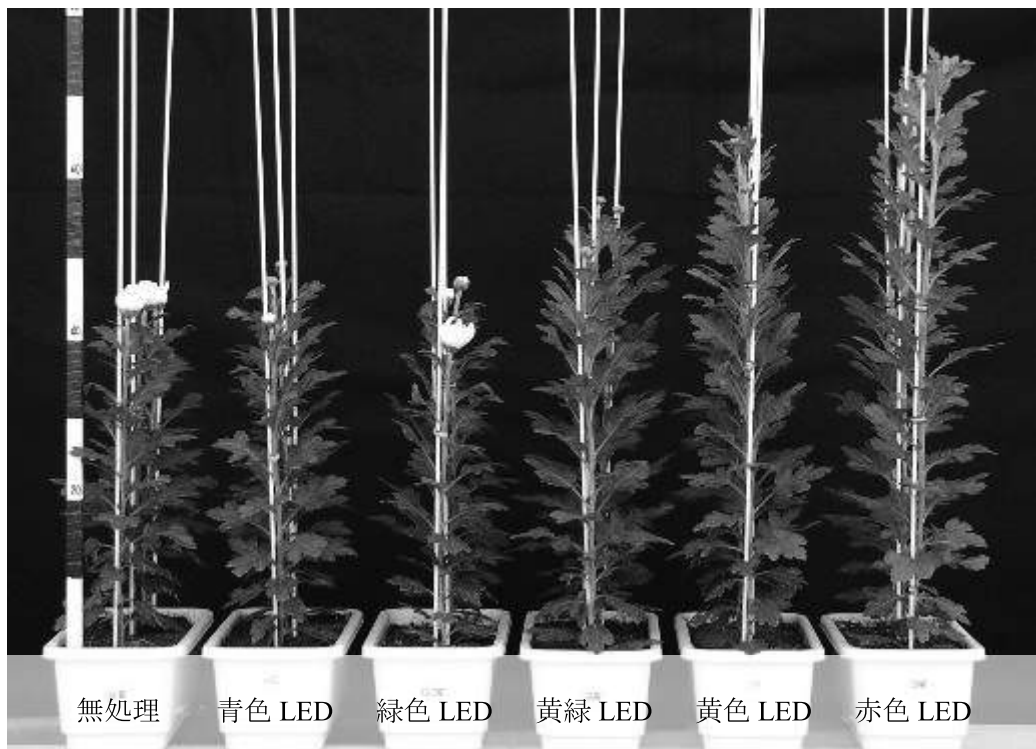
第 1-4 図 異なる相対分光放射照度を有する 5 種類の LED を用いた暗期中断時の放射照度が秋ギク ‘神馬’ の発蕾所要日数に及ぼす影響

発蕾所要日数は、暗期中断を終了した 2008 年 1 月 7 日から発蕾日までの日数を示し、1 月 7 日より前に発蕾した場合はマイナス値で示す

図中の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 ( $n = 3$ )

放射照度は各種 LED 点灯時のキク茎頂付近における値を示す

図中の左下の「 $\frac{0}{\text{無}}$ 」は定植後に自然日長下で管理した無処理区を示す



第 1-5 図 異なる相対分光放射照度を有する 5 種類の LED を用いた暗期中断の終了日から 8 日後の 10 mW·m<sup>-2</sup>における秋ギク ‘神馬’ の生育状況

第1-1表 異なる相対分光放射照度を有する5種類のLEDを用いた暗期中断が  
秋ギク‘神馬’の切り花形質に及ぼす影響

LED	放射照度 <sup>z</sup> (mW・m <sup>-2</sup> )	切り花長 (cm)	切り花重 (g)	切り花 節数	やなぎ 葉数	花首長 (cm)	花弁の 展開異常
無処理	0	45 a <sup>y</sup>	41 a	30 a	1.8 a	3.9 cd	無
青	10	48 a	47 abc	33 ab	1.8 a	3.0 abcd	無
	50	55 ab	52 abcd	37 bc	1.7 a	2.7 abcd	無
	100	46 a	46 abc	31 ab	1.9 a	3.7 cd	無
緑	10	44 a	42 ab	29 a	1.8 a	3.2 bcd	無
	50	53 a	48 abc	32 ab	2.2 a	4.6 d	無
	100	75 c	58 cde	41 cd	2.2 a	3.8 cd	無
黄緑	10	56 ab	54 bcde	35 abc	2.2 a	4.1 cd	無
	50	103 d	78 fg	54 e	1.8 a	2.4 abc	無
	100	110 d	81 g	57 e	1.6 a	1.7 ab	無
黄	10	68 bc	61 de	40 cd	2.3 a	3.8 cd	無
	50	107 d	77 fg	57 e	1.7 a	1.6 ab	無
	100	112 d	82 g	59 e	1.3 a	1.5 ab	無
赤	10	82 c	66 ef	45 d	1.9 a	3.0 abcd	無
	50	110 d	79 g	56 e	1.6 a	1.3 a	無
	100	115 d	82 g	59 e	1.6 a	1.7 ab	無

<sup>z</sup>LED点灯時のキク茎頂付近における放射照度を示す

<sup>y</sup>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%水準で有意な差がないことを示す (n=3)

よび  $100 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$  では有意な差が見られなかった。また、切り花長、切り花重および切り花節数についても有意な差が見られなかった。このことは、これら3種類のLEDが放射する光は、秋ギク‘神馬’に対して、少なくとも  $50 \sim 100 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$  の放射照度域において、ほぼ同等の発蕾抑制効果を有しており、切り花形質に及ぼす影響についても差はないことを示している。従って、576,あるいは597 nmにピーク発光波長を有する黄緑色および黄色光は、優れた開花抑制作用を有するとされる赤色光 (Cathey・Borthwick, 1957; 1964) と同様に、‘神馬’の開花時期を計画的に遅らせるために適した光であると考えられた。しかしながら、防蛾用照明として、黄緑色および黄色光をキク栽培に適用する場合は、与える放射照度を低く抑えるなど、これらの波長の光自体が有する優れた開花抑制作用を抑えるために、何らかの工夫が必要であることが示唆された。

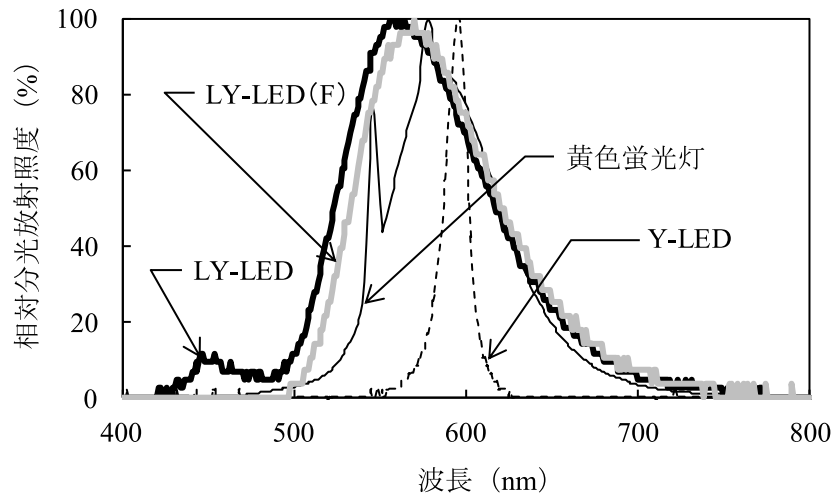
## 第2項 黄色蛍光灯と黄色蛍光LEDとの比較

前項では、単色光に近い光を放射でき、なおかつ、異なる相対分光放射照度を有する5種類のLEDを用いて、狭い波長域の光の波長とその放射照度が秋ギク‘神馬’の発蕾、開花および切り花形質に及ぼす影響を明らかにした。しかし、黄色光を放射する光源のうち、防蛾灯として利用可能な市販光源には、黄色蛍光灯のように単色光としての黄色光以外にも広い範囲の波長の光を放射する光源が多い。そこで、本項では、実際のキク栽培への適用を想定し、黄色光を放射する主要な市販光源、加えて、発光効率に優れる黄色蛍光LED (専用開発品、シャープ社製、以下LY-LEDと略記する) を用いて終夜照明を行い、秋ギクの発蕾、開花および切り花形質に及ぼす影響を検討した。

### 1 材料および方法

#### 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

秋ギク‘秀芳の力’を1998年7月20日に挿し芽し、8月4日に株間6 cm × 条間48 cmの2条で地床へ定植、8月18日に摘心して2本仕立てとし、日最低気温が18°Cを下回らないように管理したビニルハウス内で栽培した。施肥は、前項と同じ有機質複合肥料を  $14.3 \text{ kg} / 100 \text{ m}^2$  を全層基肥として施用した。供試光源の相対分光放射照度を第1-6図に示した。供試光源には、580 nm付近にピーク発光波長を有する黄色蛍光灯 (FL20S・Y-F, パナソニック社製) を用い、畝端の高さ1.8 mの位置に畝の長辺方向と直角で、なおかつ畝面と水平になるように1灯を固定した。供試光源点灯時の光合成有効光量子束密度 (Photosynthetic Photon Flux Density, 以下PPFDと略記する) の設定位置は、定植前の畝面とした。供試光源からの距離によって、畝の



第 1-6 図 実験に供試した黄色蛍光灯, AlGaInP 系の Y-LED, LY-LED および短波長をカットした LY-LED (F) の相対分光放射照度

長辺方向に PPFd の差を設け, 供試光源点灯時の畝面における PPFd を  $0.01 \sim 0.36 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  とした. PPFd の測定には, 光量子計 (センサ LI-190SA および本体 LI-189, LI-COR 社製) を用い, 所定の PPFd を設定した. 供試光源による照明は, 摘心日の 8 月 18 日から 11 月 26 日までの 100 日間, 毎日 17:00~7:00 に実施し, 第 1 節第 1 項に準じて開花日を調査して, 摘心日から開花日までの日数を到花日数とした. なお, 定植日から摘心日までは, 白熱電球による深夜 4 時間 (22:00~2:00) の暗期中断を行った.

#### 異なる相対分光放射照度を有する黄色 LED を用いた終夜照明が秋ギクの開花に及ぼす影響

秋ギク ‘神馬’ を 2008 年 9 月 5 日に挿し芽し, 9 月 23 日に容量 6.2 liter (D 15 cm × W 32 cm × H 13 cm) のプランターへ 3 株ずつ定植し, 日最低気温が  $15^{\circ}\text{C}$  を下回らないように管理したプラスチックハウス内で無摘心栽培した. 培地および施肥は第 1 節第 1 項に準じて行った. 供試光源には, ピーク発光波長を 597 nm とする AlGaInP 系の黄色 LED (LED 形式 GM5ZV01200A, シャープ社製, 以下 Y-LED と略記する), 450 nm 付近 + 570 nm 付近とする LY-LED, LY-LED に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 560 nm 付近となる LED (以下 LY-LED (F) と略記する) のチップをそれぞれ 24 個ずつ実装した 3 種類の LED モジュールと, 参考として黄色蛍光灯 (FL20S・Y-F, パナソニック社製) を用いた (第 1-6 図). 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, なおかつ防蛾用の黄色蛍光灯に類似した相対分光放射照度を有する. 各 LED モジュールは, 45 cm × 45 cm のパネル中央に発光面が下向きになるように固定し, 黄色蛍光灯は, プランターの長辺方向および培地表面と平行になるように固定して, キク供試個体上に設置した. なお, 黄色蛍光灯は, 市販のパンチングアルミ板 (HA594P, Hikari ユニ



ホビー社製) で被覆することで減光し用いた。キクの茎頂付近における放射照度は、便宜的に 5, 9 および 19  $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$  の 3 水準とした。また、第 1 節第 1 項の方法に準じ、所定の放射照度を確保し、照射光の干渉を防止した。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た。区制は 1 区 3 プランターで 3 反復とした。実験期間中は、無処理区を除き、定植日から 2008 年 12 月 2 日までの 70 日間、毎日 16:30～7:30 に終夜照明し、第 1 節第 1 項に準じ開花日を調査して、定植日から開花日までの日数を到花日数とした。

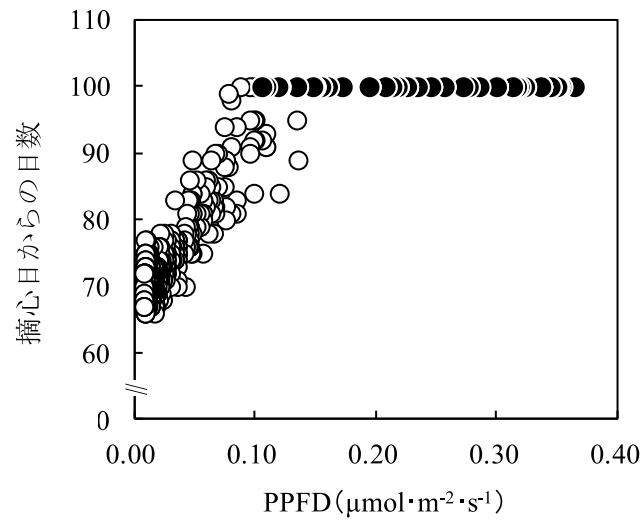
## 2 結 果

### 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

第 1-7 図に黄色蛍光灯を用いた終夜照明下の畝面における PPF<sub>D</sub> と‘秀芳の力’の開花との関係を、第 1-8 図、第 1-9 図および第 1-10 図に終夜照明下の畝面 PPF<sub>D</sub> と、到花日数、切り花長および切り花節数の関係をそれぞれ示した。PPFD が 0.01～0.10  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  の範囲ですべての枝が開花し、0.11～0.14  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  では開花枝と不開花枝が混在し、0.15～0.36  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  ではすべて不開花枝となった。放射照度と、到花日数、切り花長および切り花節数との関係を定量することを意図して回帰直線を推定した。到花日数  $Y_1$  (日)、切り花長  $Y_2$  (cm) および切り花節数  $Y_3$  と茎頂付近の放射照度  $X$  ( $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ ) の関係は、それぞれ第 1-8 図、第 1-9 図および第 1-10 図に示した一次回帰式で近似できた。PPFD が 0.01～0.10  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  の範囲において、PPFD が高いほど到花日数、切り花長および切り花節数が増加する傾向が見られた。具体的には、0.01  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (2.6  $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$  相当) 当たり to 花日数が 2.6 日、切り花長が 3.9 cm、切り花節数が 1.5 節、それぞれ増加した。

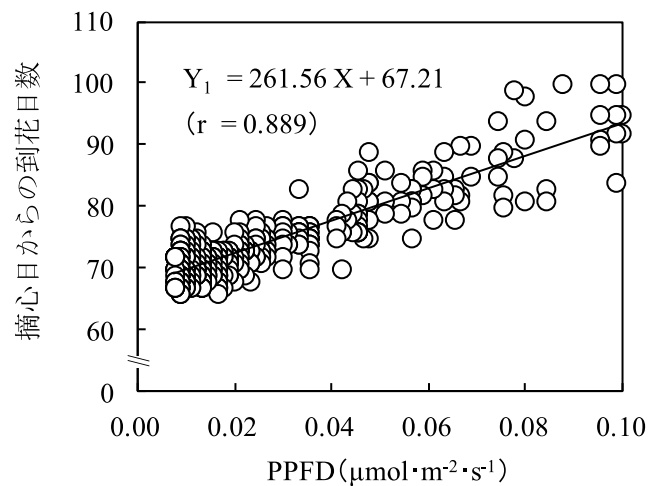
### 異なる相対分光放射照度を有する黄色 LED を用いた終夜照明が秋ギクの開花に及ぼす影響

異なる相対分光放射照度を有する黄色 LED を用いた終夜照明下の放射照度と秋ギク‘神馬’の到花日数との関係を第 1-11 図に、定植 48 日後の生育状況を第 1-12 図に示した。定植日からの到花日数は、無処理区の 50 日と比較して、黄色蛍光灯および Y-LED の 9 および 19  $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$  区が 56～66 日、LY-LED および LY-LED (F) の 19  $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$  区が 61～64 日となり有意に大きかった。同一の光源内では、5 および 9  $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$  間に有意な差はなかったが、放射照度が高いほど到花日数は大きくなる傾向が見られた。一方、同一の放射照度で比較すると、光源の種類にかかわらず、到花日数に有意な差は見られなかった。

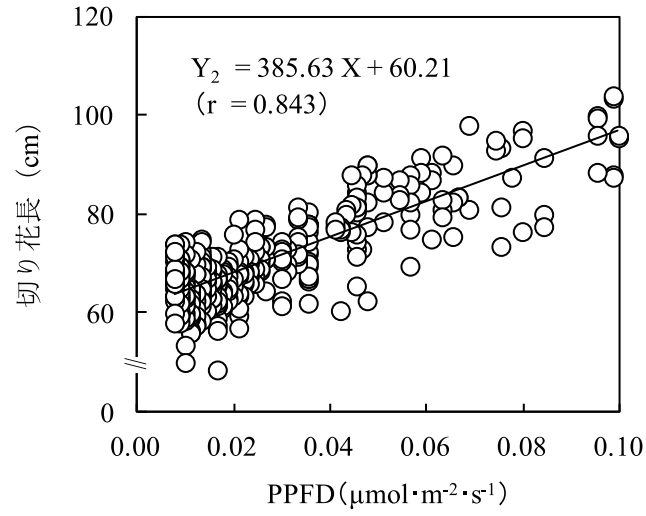


第 1-7 図 黄色蛍光灯を用いた終夜照明下の畝面における PPFD が秋ギク ‘秀芳の力’ の開花に及ぼす影響

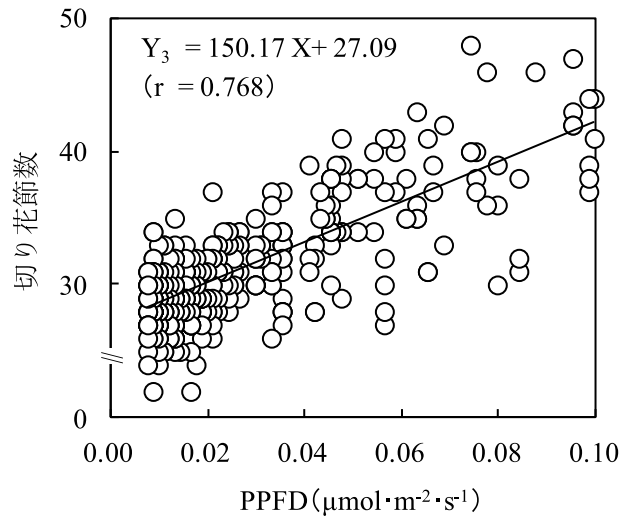
- は摘心日から 100 日までに開花した枝の到花日数を示す
- は摘心日から 100 日時点で不開花であった枝を示す



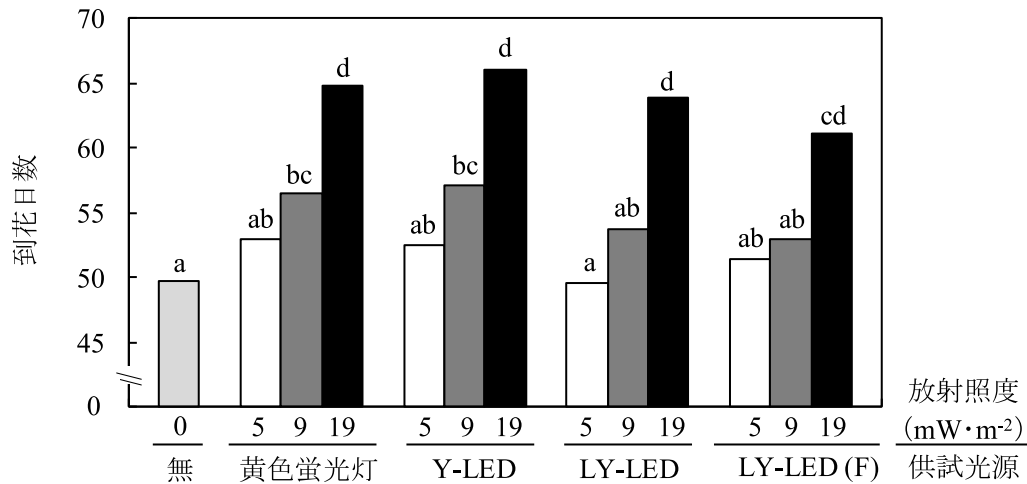
第 1-8 図 黄色蛍光灯を用いた終夜照明下の畝面 PPFD と秋ギク ‘秀芳の力’ の到花日数の関係



第 1-9 図 黄色蛍光灯を用いた終夜照明下の畝面 PPFD と秋ギク ‘秀芳の力’ の切り花長の関係



第 1-10 図 黄色蛍光灯を用いた終夜照明下の畝面 PPFD と秋ギク ‘秀芳の力’ の切り花節数の関係



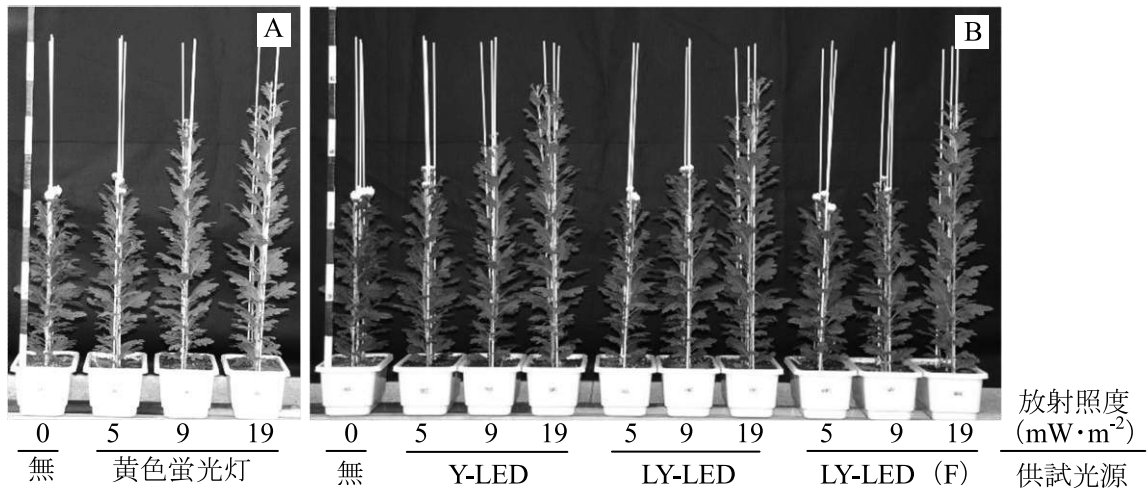
第1-11図 異なる相対分光放射照度を有する黄色LEDを用いた終夜照明下の放射照度が秋ギク‘神馬’の到花日数に及ぼす影響

到花日数は2008年9月23日の定植日から開花日までの日数を示す

図中の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 ( $n=3$ )

放射照度は供試光源点灯時のキク茎頂付近における値を示す

図中の左下の「 $\frac{0}{無}$ 」は定植後に自然日長下で管理した無処理区を示す



第1-12図 異なる相対分光放射照度を有する黄色LEDを用いた終夜照明下の放射照度が秋ギク‘神馬’の生育状況に及ぼす影響 (定植48日後)

A 無処理および黄色蛍光灯, B 無処理および3種類の黄色LED

### 3 考 察

黄色蛍光灯による終夜照明を摘心日から継続した場合、畝面での PPFD の高低差によって、秋ギク‘秀芳の力’が開花する範囲としない範囲が存在し、また、開花する枝としない枝が混在する範囲が存在することが明らかとなった。‘秀芳の力’では、 $0.11\sim 0.14\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $27\sim 35\ \text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ 相当)を境として、PPFD が小さいと開花し、大きいと開花しなかった。開花した範囲では、摘心日からの到花日数、切り花長および切り花節数は PPFD に比例して増加した。しかしながら、白熱電球を用いた電照に対する開花反応は品種により異なる(岡田, 1963)とされているので、黄色光を用いる防蛾用照明においても、品種適応性について検討する必要がある。

黄色蛍光灯は、580 nm 付近にピーク発光波長を有しているが、600 nm 以上の波長も放射している(第 1-6 図)。第 1 項では、597 nm 付近をピーク発光波長とする単色光に近い黄色光によっても、秋ギク‘神馬’の開花が強く抑制されることが明らかとなった。また、低圧ナトリウムランプ(NX35, パナソニック社製)を用いた 589 nm 付近の単波長の照射によっても、 $0.06\sim 0.08\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $15\sim 20\ \text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ 相当)を境として、PPFD が大きいと秋ギク‘セイローザ’の開花が強く抑制される(石倉ら, 2000)ことを確認している。このことから、黄色蛍光灯の照明による開花抑制は、黄色蛍光灯の放射する光の波長のうち、開花抑制作用が強いとされる 600~700 nm の R 光(洞口ら, 1997)に加えて、580 nm 付近の波長も深く関与していると考えられた。従って、市販の黄色蛍光灯に何らかの改良を施すことで R 光を除去できても、秋ギクの開花への影響を軽減することは難しいと考えられる。

本項において、実際のキク栽培への適用を想定し、黄色光を放射する主要な市販光源である黄色蛍光灯、AlGaInP 系の Y-LED、発光効率に優れる LY-LED および LY-LED (F) を用いて終夜照明を行ったところ、キクの茎頂付近において設定した放射照度 5, 9 および  $19\ \text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ において、同一の放射照度で比較した場合、光源にかかわらず、秋ギク‘神馬’の到花日数に有意な影響を及ぼさないことが明らかとなった。第 1 節第 2 項で供試した LY-LED は、既存の AlGaInP 系の黄色 LED と比較して、半値幅が広く、防蛾と開花抑制で重要と考えられる黄緑、黄および赤色光のすべてを放射でき、しかも発光効率においても優れている。さらに、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発光原理が用いられていることなど、すでに市販されている一般照明用の白色 LED と共通した部分が多い。このため、光源の実用化にあたっては、先行する一般照明用の白色 LED で採用されている技術との共通化や量産効果により、「適正な価格の商品」を利用者に提供できる可能性は高い。LY-LED は、蛍光体の励起光として、450 nm 付近にピーク発光波長を有する青色光が使われており、LY-LED の放射光全体からすると、わずかな割合であるが青色光を放射している(第 1-6 図)。第 1 節第 1 項において、463 nm 付近にピーク発光波長を有する青色光は、

他の光の波長と比較して、秋ギクの開花に大きな影響を及ぼさないことを確認している。しかしながら、450 nm 付近の波長は、昆虫が好んで集まるとされる 300~500 nm の波長域（河本，1992）内にあるので、昆虫の行動学の観点からは注意が必要と考えられる。このため、現実性を追求するならば、短波長カットフィルタにより蛍光体の励起光である青色光を除去することが望ましい。ただし、短波長カットフィルタは青色光以外の波長の光も減衰させてしまうこと、さらに高コストとなるなどの課題もあり、実用化にあたっては、これらを総合的に判断し、適切に対応する必要があると考えている。

以上のことから、秋ギク栽培において、防蛾を目的として黄色光を連続照明として利用する場合は、開花への影響を考慮すると、照明下の PPFD、あるいは放射照度に大きく制約を受けることが判明した。このため、実際の利用にあたっては、照明下における PPFD、あるいは放射照度を、開花可能で商品価値を損ねない範囲に留め、生育状況に応じて、均一に調節する必要があると考えられた。

現在、市販されている黄色蛍光灯は、その構造上の特性のために、電圧の制御などによって放射する光の強さを自在に調整することは難しい。また、電照栽培で一般的に用いられている白熱電球などと比較して、光源自体が大きいので、圃場では固定して使用せざるを得ない。従って、黄色蛍光灯を用いる場合は、キクの成長に応じて、PPFD、あるいは放射照度を精密に調整することは実際上、困難と考えられる。

### 第 3 項 白熱電球と同等の開花抑制作用が得られる放射照度

2009 年 5 月までは、1 球 10,000 円の LED 電球に代表されるように、「LED 製品は高価」という印象が強かった。しかし、2009 年 6 月に 1 球 4,000 円代の LED 電球が市場投入されるなど、一般照明用の白色 LED の性能（明るさ）向上や量産効果により、低価格化が進んでおり、現在は、1 球 1,000 円を下回る LED 電球も市販されるようになった。この傾向は今後もしばらくは続くものと考えられる。前項で供試した LY-LED には、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、一般照明用の白色 LED の発展に伴い、LY-LED についても、更なる性能向上と低価格化が期待できる。

第 1 節第 1 項では、黄緑色および黄色光は、優れた開花抑制作用を有するとされる赤色光（Cathey・Borthwick, 1957 ; 1964）と同様に、‘神馬’の開花時期を計画的に遅らせるために適した光であることを明らかにした。また、第 1 節第 2 項では、秋ギクの開花は、黄色光を連続照明として利用する場合、照明下の PPFD、あるいは放射照度に大きく制約を受けることを明らかにした。

白熱電球を光源とする電照に対し、キクが示す開花反応は品種によって異なる（岡田，1963）が、「白熱電球で 50 lx (360 mW・m<sup>2</sup> 相当)」は、キクの電照抑制栽培のための 1 つの基準（木村，1974 ; 米村，1993）とされている。石倉ら（2009）も、白熱電球を用いた深夜 4 時間の暗期中断を行った場合、十分な発蕾抑制効

果を得るために必要となる畝面での放射照度の下限値は、秋ギク‘神馬’では、 $182\sim 189\text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ であることを確認している。一方、防蛾に有効な最低照度は $1\sim 2\text{ lx}$  ( $1.2\sim 3.2\text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ 相当)以上とされおり(内田ら, 1978; 藪, 1999), 防蛾に有効とされる下限値は、放射照度に換算すると電照抑制栽培のための基準の $113\sim 300$ 分の1と低い。

一般に、LEDは明るさ(放射照度)の調節が容易な光源とされている(後藤, 2006)。LY-LEDは、将来的には、適切な放射照度に調光しつつ用いることで、キクの防蛾と計画的な開花抑制の2つの目的を、単一の光源として同時に、あるいは使い分けて達成できる可能性は高いと考えている。

そこで、本項では、防蛾用のみならず開花抑制用光源としての利用も考えられるLY-LEDを供試し、秋ギクを電照抑制栽培する場合に、白熱電球と同等の開花抑制作用を得るために必要となる放射照度を検討した。

## 1 材料および方法

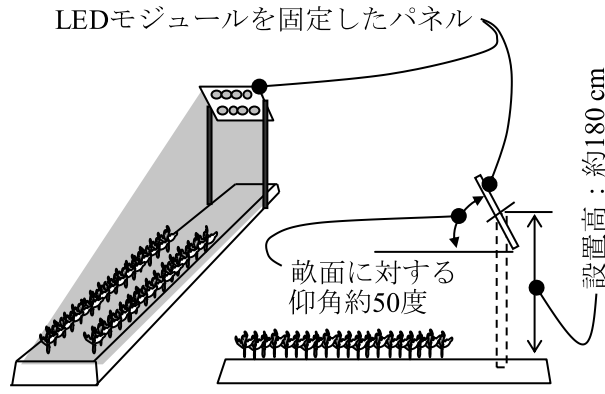
### LY-LEDを用いた夜間照明が秋ギク‘神馬’の発蕾および切り花形質に及ぼす影響

秋ギク‘神馬’を2010年9月12日に挿し芽し、10月2日に株間 $7.5\text{ cm}$  × 条間 $45\text{ cm}$ の2条で地床へ定植して、日最低気温が $15^{\circ}\text{C}$ を下回らないように管理したプラスチックハウス内で無摘心栽培した。本圃では、第1節第1項と同じ有機質複合肥料 $18.6\text{ kg}/100\text{ m}^2$ と、炭酸カルシウム $10\text{ kg}/100\text{ m}^2$ を全量基肥として施与した。供試光源には、第1節第2項と同じLY-LEDを実装したモジュールを用いた(第1-6図)。なお、本項では、第1節第2項の結果に基づいて、短波長カットフィルタを装着しない状態で用いた。処理区には、所定の放射照度を確保した連続光による照明を行い、照明時間帯を $22:00\sim 2:00$ とする暗期中断区と、 $16:30\sim 7:30$ とする終夜照明区の2区を設けた。供試光源は、第1-13図に示すように、畝端の高さ約 $180\text{ cm}$ の位置に設置し、モジュールを固定したパネルの畝面に対する仰角を約 $50^{\circ}$ とした。放射照度の設定位置は、定植前の畝面とした。供試光源からの距離によって、畝の長辺方向に放射照度の差を設け、照明時における畝面での水平面放射照度は $3\sim 260\text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ を確保しつつ、定植日から11月12日までの41日間毎日照明し、その後は自然日長下で管理した。第1節第1項に準じ、発蕾日を調査し、長日処理終了日から発蕾日までの日数を発蕾所要日数とした。

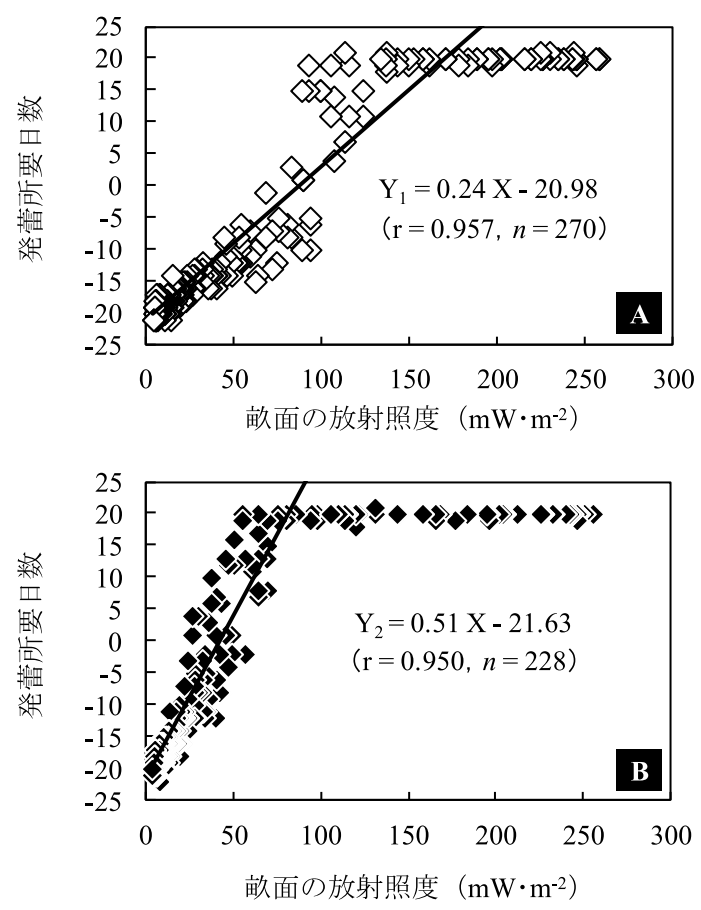
## 2 結 果

### LY-LEDを用いた夜間照明が秋ギク‘神馬’の発蕾および切り花形質に及ぼす影響

第1-14図に、日長処理ごとの畝面における放射照度と秋ギク‘神馬’の発蕾所要日数との関係を示した。



第 1-13 図 処理の模式図



第 1-14 図 LY-LED を用いた夜間照明下の放射照度が秋ギク ‘神馬’ の発蓄所要日数に及ぼす影響

A 暗期中断区, B 終夜照明区

発蓄所要日数は夜間照明終了日の 11 月 12 日から発蓄日までの日数を示し, 11 月 12 日より前に発蓄した場合はマイナス値で示す



夜間照明終了日からの発蕾所要日数は、両処理区ともに特定の放射照度域では放射照度が大きいほど増加し、それを越えると、放射照度に関わらず、一定となる同様なパターンが見られた。放射照度と発蕾所要日数との関係における日長処理の影響を定量することを意図して回帰式を推定した。放射照度に比例して発蕾所要日数の増加が見られた放射照度域では、暗期中断区における発蕾所要日数  $Y_1$  (日) と畝面における放射照度  $X$  ( $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ ) の関係は、第 1-14 図 A に示した一次回帰式で近似できた。この一次回帰式では  $X$  が  $170 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  のとき、 $Y_1$  は 20 日となり、 $170\sim 260 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  の範囲で、ほぼ一定の 20 日となった。同様に、終夜照明区における発蕾所要日数  $Y_2$  (日) と茎頂付近の放射照度  $X$  ( $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ ) の関係は、第 1-14 図 B に示した一次回帰式で近似できた。この一次回帰式では  $X$  が  $81 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  のとき、 $Y_2$  は 20 日となり、 $81\sim 260 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  の範囲で、ほぼ一定の 20 日となった。なお、これら 2 つの一次回帰式は、それぞれの相関係数  $r$  が最大となることを前提に推定した。

第 1-2 表に、LY-LED を用いた照明時間が秋ギク‘神馬’の切り花形質に及ぼす影響について示した。切り花長、切り花節数および花首長には、処理区間に有意な差が見られたものの、大きな影響は見られなかった。やなぎ葉数は、処理区間に有意な差が見られず、暗期中断区で 1.3 枚、終夜照明区では 1.4 枚となった。また、花卉の展開異常は、いずれの処理区においても見られなかった。

第 1-2 表 LY-LED を用いた夜間照明が秋ギク‘神馬’の切り花形質に及ぼす影響

処理区	切り花長 (cm)	切り花節数	やなぎ 葉数	花首長 (cm)	花卉の 展開異常
暗期中断	124	62	1.4	2.3	無
終夜照明	122	60	1.4	2.0	無
有意性	** <sup>z</sup>	**	NS	*	-

<sup>z</sup>t検定により\*\*は1%、\*は5%水準で有意な差があり、NSは有意な差がないことを示す  
( $n = 40$ )

畝面での放射照度： $170\sim 260 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$

### 3 考 察

黄色光による防蛾効果は終夜照明下で最大（八瀬，2004）となる。しかし、第 1 節第 1 項は 4 時間の暗期中断の結果であるので、第 1 節第 3 項では LY-LED 光による暗期中断と終夜照明による影響を比較調査した。秋ギク‘神馬’を供試した場合、やなぎ葉数を除く切り花形質に有意な差が見られたものの、大きな影響がないことが明らかとなった。白熱電球と同等の開花抑制作用（発蕾抑制作用）を得るためには、LY-LED を用

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、 $6.4 \text{ lx}$ （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  $10 \text{ ms}$ （ $10^{-2}$ 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、 $10 \text{ ms}$  および  $20 \text{ ms}$  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