

実エンドウの開花促進に適した光の波長，光源および電照時間帯

川西孝秀・小谷真主¹・堀端 章²・松本比呂起³・楠 茂樹⁴

和歌山県農業試験場暖地園芸センター

Suitable Light Wavelength, Light source and timing of Lighting for Floral Induction in Pea (*Pisum sativum* L.)

Takahide Kawanishi, Masayuki Kotani, Akira Horibata, Hiroki matsumoto and Shigeki Kusu

Horticultural Experiment Center, Wakayama Agricultural Experiment Station

緒 言

和歌山県では，温暖な気候を利用し，実エンドウ (*Pisum Sativum* L.) の冬季ハウス栽培が行われている (藤岡, 2000a). 主要品種である ‘きしゅううすい’ は，秋まきハウス冬春どり作型において，着花節位が 25~30 節程度と高節位となり収穫開始時期が遅くなるため，地域によって催芽種子の冷蔵処理や幼苗期に電照を行う長日処理などの開花促進技術が導入されている (藤岡, 2000b).

現在，電照用の光源としては白熱電球が広く利用されているが (米村, 1993)，白熱電球は消費電力が大きく，近年省エネルギーの観点から，家庭用照明など一般利用の光源として白熱電球の製造・販売が縮小傾向にある (NEDO 研究評価広報部, 2009). このため，農業用に用いられている白熱電球についても，その影響は必至と考えられ，代替光源の選定が必要である. すでにキク等では，電照用光源として電球型蛍光灯等省エネ型光源の利用が進んでいる (郡山, 2014). また近年，発光ダイオード (以下，LED) 等の新光源の開発も急速に進んでいる (詠田, 2010). LED はより省電力であるとともに特定の波長の光を発することが可能であり，より効率的な生育・開花調節が期待されることから，白熱電球の代替光源として有望である.

電照栽培は，植物が特定の波長の光をシグナルとして捉え，花芽分化の光形態形成に役立っている反応を活用したものであり，主に短日植物では開花抑制，長日植物では開花促進等の開花制御を目的に利用されている (今西, 1995 ; 米村, 1993). 近年，花き類では，多品目で網羅的な光質応答反応の研究が進んでおり，品目によりその応答反応が異なることが報告されている (新井・大石, 2010 ; 浜本ら, 2003 ; 宮前ら, 2016). 白熱電球は，光形態形成に有効とされる青色光から遠赤色光を含む様々な波長域の光を発し，特に赤色光および遠赤色光の割合が高い. しかし，蛍光灯や LED では，分光放射特性が白熱電球と大きく異なる (浜本・山崎, 2013) ことから，エンドウにおいて開花促進に十分な効果が得られるかは不明である.

そこで本研究では，実エンドウ ‘きしゅううすい’ について，青色光から遠赤色光までの各波長

¹現在：農業環境・鳥獣害対策室

²近畿大学生物理工学部

³現在：日高振興局農業振興課

⁴現在：海草振興局農業振興課

域のLEDによる光照射が開花に及ぼす影響を調査し、開花促進に有効な波長や光量を明らかにするとともに、市販光源を用いて、開花促進効果の確認を行った。

材料および方法

すべての試験において、実エンドウ‘きしゅううすい’を供試した。また、試験1は近畿大学生物理工学部（紀の川市西三谷）で行い、その他は暖地園芸センター内で行った。

試験1. 異なる波長の光照射が開花に及ぼす影響

2011年10月14日に菜園プランターへ8粒播種し、間引き後4株で主枝1本仕立てとした。培養土には、与作N-15(ジェイカムアグリ株式会社)を30kg、システムソイル102(イワタニアグリグリーン株式会社)を50Lおよびバーク堆肥(田辺港輸入木材協同組合)を20kg混合したものを使用した。

試験区として、電照に用いる光を①遠赤色光(波長735nm)、②赤色光(660nm)、③黄色光(590nm)、④緑色光(525nm)、⑤青色光(450nm)とし、各光源は、LED-ON社製砲弾型LEDを利用した。光源は地表面から1mの高さに設置し、光量は、光源ごとに地表面における光量子束密度(以下、PFD)を① $1\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、② $0.01\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の2水準として、無処理と併せて計11処理区とした。光量の調整は、使用するLEDの個数と定電流ダイオードによる電流の制限により行った。PFDの測定は、オーシャンフォトニクス株式会社製「ファイバマルチチャンネル分光器USB4000」に視野角 180° の「コサインコレクタCC-3」を取り付けて行った。設定したPFDは値が小さく、測定器での計測値が不安定であったため、 $1\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の区は、光源下50cmで測定し、4で割って算出、 $0.01\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の区は、光源下10cmで測定し、100で割って算出した。なおこの計算は、光量が光源からの距離の2乗に反比例することに基づく。PFDの実測値(理論値)を第1表に示した。1区あたり2プランター8個体とし、各区とも播種直後から調査終了まで終夜照射(17:00～翌7:00)を行った。調査項目は各区の開花日とした。

第1表 各処理区の光量測定値

光量【PFD】	光源色 ^z	波長 (nm)	地表面におけるPFD ^y ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
$1\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	遠赤色	735	1.29
	赤色	660	1.04
	黄色	590	1.00
	緑色	525	1.20
	青色	450	1.16
$0.01\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	遠赤色	735	0.01030
	赤色	660	0.00914
	黄色	590	0.00946
	緑色	525	0.00930
	青色	450	0.00914

^z 各光源は、LED-ON社製砲弾型LEDを利用した。

^y 各区、光源から地表面までの距離を1mとし、使用するLEDの個数および定電流ダイオードによる電流の制限により発光量を調整した。

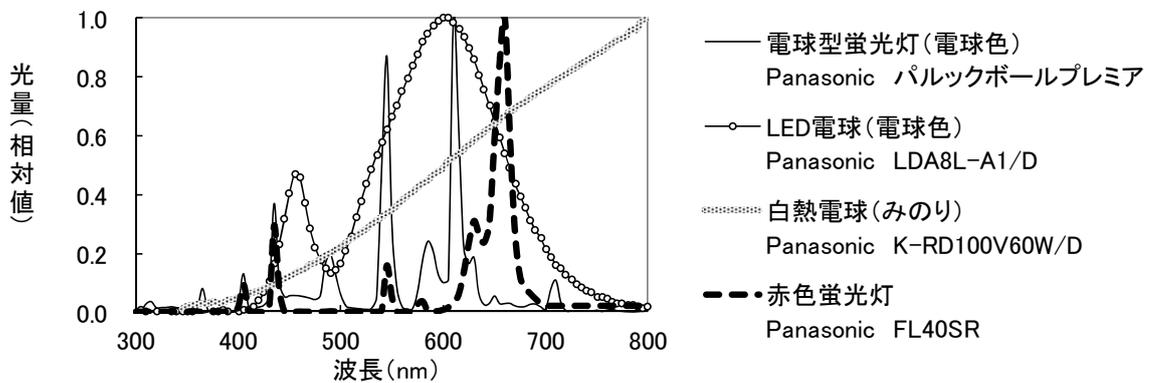
試験2. R:FR比が開花に及ぼす影響

雨よけビニルハウス内において、2012年5月22日に容量25Lポリポットへ培養土(タキイセル培土:システムソイル102:バーク堆肥=2:2:1)を20L充填し、8粒播種して主枝1本、あんどん仕立てで栽培した。電照の光源として、日本医化器械製作所製の「3in1LED照明ユニット」をポットの地際から1.5mの高さに設置し、5～10葉期(地中の不完全葉を含んだ数値)に電照を行った。試験区として、光源の赤色光(R, 660nm)および遠赤色光(FR, 735nm)の合計光量をポット地際にお

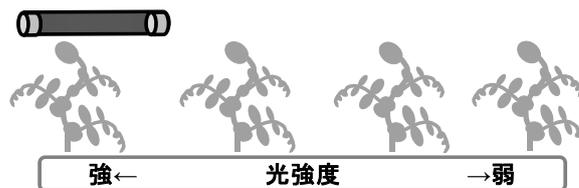
ける PFD; $1 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ となるよう調整し, ①R:FR=3:1【R; $0.75 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, FR; $0.25 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 】, ②R:FR=1:3【R; $0.25 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, FR; $0.75 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 】, ③無処理の 3 水準を設定した. 1 区 1 ポット 8 個体を供試した. なお, 慣行のハウス栽培では 9 月播種であるが, 本試験の実施時期が 5~6 月で長日条件であったため, 各区とも, 17:00~翌 9:00 にシェードを行い短日条件とした上で, 電照区は, シェード内で終夜照射した. 施肥は, 週 1 回液肥 (OKF-2, 500 倍液を 4L/ポット) を施与した. 調査項目は, 電照終了時の節数, 草丈および第 1 花房着生節位とした. なお, PFD は, LI-COR 社製「LI-1400」および R/FR センサー「SKR110」を用いて測定した.

試験 3. 市販光源による電照が開花に及ぼす影響

2009 年 9 月 24 日に畝幅 160cm, 播種穴間隔 20cm として, 1 穴あたり 3 粒を播種した. 電照光源として, 白熱電球より消費電力の少ない電球型蛍光灯および LED 電球のうち, 試験 1 においてエンドウの開花促進に有効と考えられた黄色~赤色光を多く含む電球色タイプのもの, ならびに赤色光を多く含む赤色蛍光灯を供試し, 試験区は, ①白熱電球, ②電球型蛍光灯 (電球色), ③LED 電球 (電球色), ④赤色蛍光灯, ⑤無処理の計 5 水準とした. 無処理区以外は, 5~10 葉期 (10 月 1 日~10 月 15 日) に 16 時間日長となるよう 17:30~22:00 の 4.5 時間, 光照射を実施した. 光源の詳細は第 1 図に示した. 光源直下の地表面で光合成有効光量子束密度 (以下, PPF) が $1.0 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ となるよう光源を設置し, 光源からの距離で光強度の勾配を設定した (第 2 図). PPF は, 光合成に有効な 400~700nm の光のみを表す単位であり, 遠赤色光は除外されるため, 植物の形態形成との関係を調査するには不向きで, 特に 700nm 以上の光を多く含む白熱電球の計測には不適切であるが, 便宜上, PPF で統一した. なお, 長日処理期間中は, 光源から植物体までの距離が一定となるよう, 植物体を地面に沿わせて仕立てた. 施肥は OKF-2 の 500 倍液を週 1 回施与し, 11 月 25 日に施設のビニル被覆を行って, 日最低気温を 5°C 以上に維持して栽培した. なお, PPF は, LI-COR 社製「LI-250A」を用いて測定した.



第 1 図 試験 3 に供試した光源の分光放射特性
(各光源のエネルギーの最大値を 1 とした相対値)



第 2 図 光強度の設定模式図

試験4. 光照射の時間帯が開花に及ぼす影響

2012年5月22日に、20Lポリポットへ8粒播種し、主枝1本であんどん仕立てとした。白熱電球(みのり電球60W)を使用し、電照時間帯を①18:00-20:00, ②20:30-22:30, ③23:00-1:00, ④1:30-3:30, ⑤4:00-6:00, ⑥18:00-6:00(終夜照明), ⑦無処理の7水準とした。1区, 1ポット8個体とした。なお, 試験2と同様に, 本試験の実施時期が5~6月で長日条件であったため, 各区とも, 17:00-翌9:00にシェードを行い短日条件とした上で, 無処理区以外は17:00-18:00および6:00-9:00に白熱電球を照射して12時間日長を基準とし, 2時間の電照を行った。電照は, 1区につき白熱電球1球をポットの地際から高さ1.5mに設置し, 5~10葉期に行った。なお, 栽培は雨よけビニルハウス内で行い, 週1回OKF-2の500倍液を4L/ポット施与した。調査項目は, 電照終了時の節数および草丈, 第1花房着生節位とした。

試験5. 暗期中断における光照射時間の長さが開花に及ぼす影響

2009年9月24日に畝幅160cm, 播種穴間隔20cm, 1穴あたり4粒を播種した。23:45を暗期の中央とし, 試験区として, 暗期中断の時間を①4時間(21:45~1:45), ②2時間(22:45~0:45), ③1時間(23:15~0:15)の3水準設定し, ④日長延長(16時間), ⑤無処理を加えた計5処理区とした。光源直下における地表面の光強度が20 lux (PPFD: $0.37 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)となるよう白熱電球(みのり電球60W)を設置し, 5~10葉期(10月1日~10月15日)に各処理を実施した。施設のビニル被覆は11月25日に実施し, 日最低気温を 5°C 以上に維持して栽培した。調査項目は, 草丈, 節数, 第1花開花までの日数, 第1花房着生節位および第1, 2花房の着花数とした。

試験6. 市販光源の暗期中断処理による開花促進

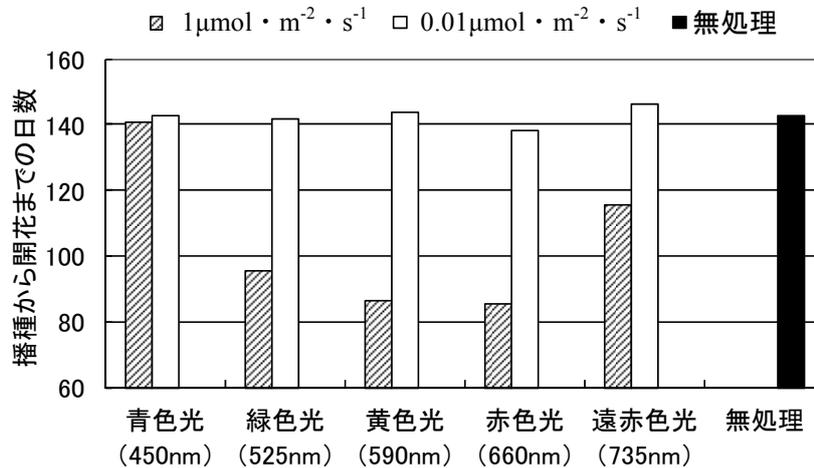
ハウス内に, 畝幅150cmのうねを設け, 2012年9月28日に播種穴間隔20cm, 1条で4粒播種3本仕立て, 側枝は12月末まで除去, その後放任で栽培した。

試験区として, 開花促進処理について①電球色電球型蛍光灯, 暗期中断3時間 22:30~1:30(以下, 蛍光灯NB-3h区), ②白熱電球, 暗期中断3時間(以下, 白熱電球NB-3h区), ③白熱電球, 終夜電照 18:00~6:00(以下, 慣行電照区), ④種子冷蔵(以下, 慣行冷蔵区; 吸水種子を室温で1.5日おいて催芽させ, 2°C で20日間冷蔵), ⑤無処理の5処理区を設定し, 5~10葉期に各処理を実施した。①の光源は, Panasonic製「パルックボールプレミア EFA15EL/10HS/2K」, ②および③の光源は, 「みのり電球75W」を用いた。光源は, 各試験区中央の地上2mの高さに1球設置し, 1区2.4m \times 2反復で栽培した。施肥は, 基肥 N-12kg/10a (FTE入り豆元肥 N:P₂O₅:K₂O=6:8:6), 追肥 N-6kg/10a (千代田化成 N:P₂O₅:K₂O=15:14:9) \times 3回(開花始め, 収穫始め, 収穫盛期)を施与した。ハウスのビニール被覆は11月20日に行い, 日最低気温を 5°C 以上に維持して栽培した。調査項目は, 第1花房着生節位, 第1花開花日, 着莢数, 収量, 莢品質とした。

結 果

試験 1. 異なる波長の光照射が開花に及ぼす影響

PFD $1\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ では、緑色光～遠赤色光（波長 525～735nm）の照射で開花が促進され、黄色～赤色光（波長 590～660nm）で最も効果が高かった。青色光の照射では、開花促進効果が認められなかった（第 3 図）。一方、PFD $0.01\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ では、どの波長でも開花促進効果が認められなかった。



第 3 図 異なる波長の光照射が実エンドウ ‘きしゅうすい’ の開花に及ぼす影響

2011 年 10 月 14 日播種，播種直後から調査終了まで終夜照射（17:00～翌 7:00）

試験 2. R:FR 比が開花に及ぼす影響

電照終了時の節数は、すべての区で約 10 節となり、有意な差は認められなかった（第 2 表）。草丈は、光源の R:FR 比にかかわらず、電照を行うと無処理と比べて有意に長くなり、R:FR 比による有意な差は認められなかった。第 1 花房着生節位は、光源の R:FR 比にかかわらず、電照を行うと無処理と比べて有意に低くなり、R:FR 比による差は認められなかった。

第 2 表 R:FR 比が異なる光照射が実エンドウ ‘きしゅうすい’ の生育および着花に及ぼす影響

光源の R:FR 比 ^z	光量【PFD】 ^y ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)		照射終了時の生育		第 1 花房 着生節位 ^x (節)
	R (660nm)	FR (735nm)	節数 ^x (節)	草丈 (cm)	
3:1	0.75	0.25	10.5 a ^w	45.6 b	19.5 a
1:3	0.25	0.75	10.0 a	48.0 b	18.8 a
無処理	0	0	10.1 a	36.4 a	23.5 b

2012年5月22日播種

すべての区は、17:00～9:00 にシェードを行った

光照射は、5～10葉期（地中の不完全葉を含む）に、終夜（17:00～9:00）実施した

^z 光源には、日本医化器械製作所製の「3in1LED照明ユニット」を用い、R: 660nm, FR: 735nm の波長の光を、ポットの地表面で合計 PFD $1\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ となるように照射した

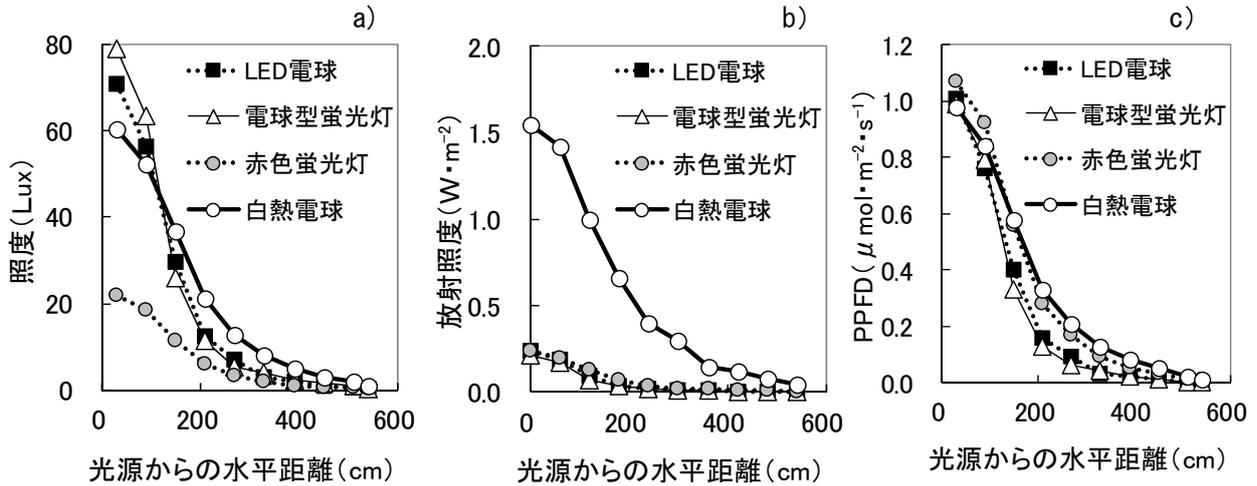
^y 光量は、LI-COR社製「LI-1400」および「R/FR sensor SKR110」で測定した

^x 地中の不完全葉も含んだ数値

^w Scheffe検定により、異なるアルファベット文字間に5%水準で有意差あり

試験3. 市販光源による電照が開花に及ぼす影響

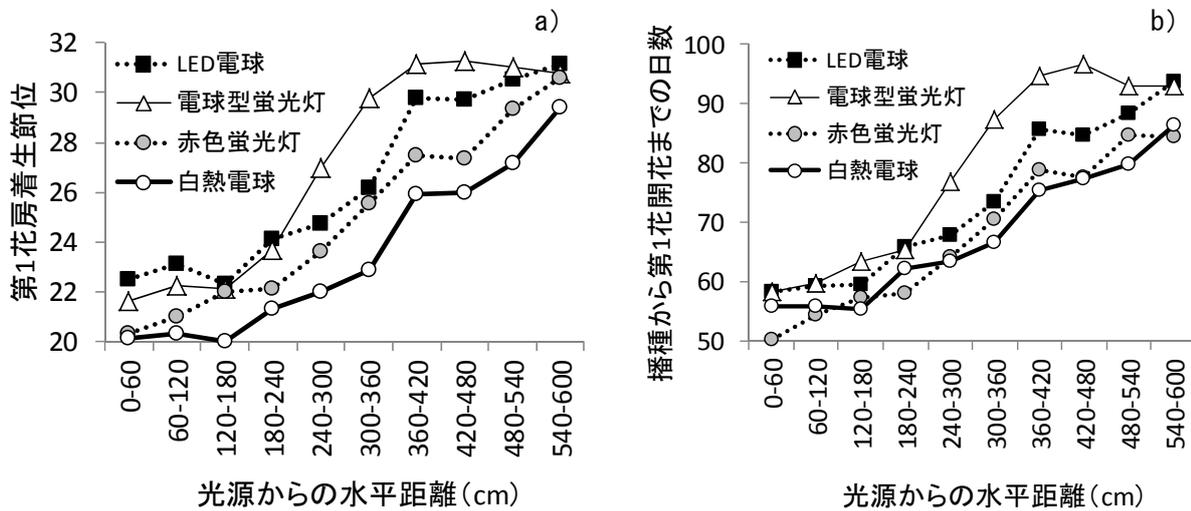
各光源からの距離と光強度との関係を第4図に示した. 光源直下のPPFDを約 $1\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ に統一した光源直下において, 赤色蛍光灯では, 他の光源と比較して顕著に照度が低く, 白熱電球では放射照度が著しく高くなった. 光源からの距離と着花および開花の関係を第5図に示した. この結果, 光源からのどの距離においても白熱電球で最も第1花房着生節位が低くなる傾向が認められた. ただし, 開花までに要した日数は, ほぼすべての距離において白熱電球と赤色蛍光灯とでほぼ同等となった. 第4図および第5図の結果から, 各光源の光強度と開花促進効果との関係を第6図に示した.



第4図 各光源からの水平距離と光強度 a) 照度, b) 放射照度, c) PPFD

光源直下の地表面におけるPPFDを約 $1\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ となるよう高さを調節

各光源の設置高は以下のとおり. 赤色蛍光灯については発光部分の2/5を遮光した
 白熱電球 ; 160cm, LED電球 ; 145cm, 電球色蛍光灯 ; 92cm, 赤色蛍光灯 ; 200cm,



第5図 各光源からの水平距離が実エンドウ‘きしゅうすい’の着花および開花に及ぼす影響

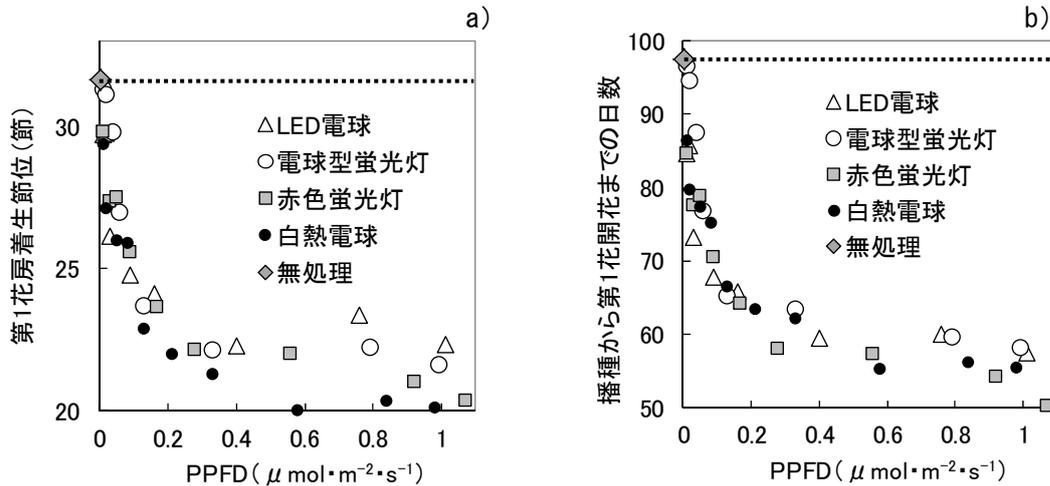
a) 第1花房着生節位, b) 播種から第1花開花までの日数

2009年12月24日播種, 5~10葉期に16時間日長となるよう17:30~22:00に光照射
 光源の設置法は, 第4図に同じ

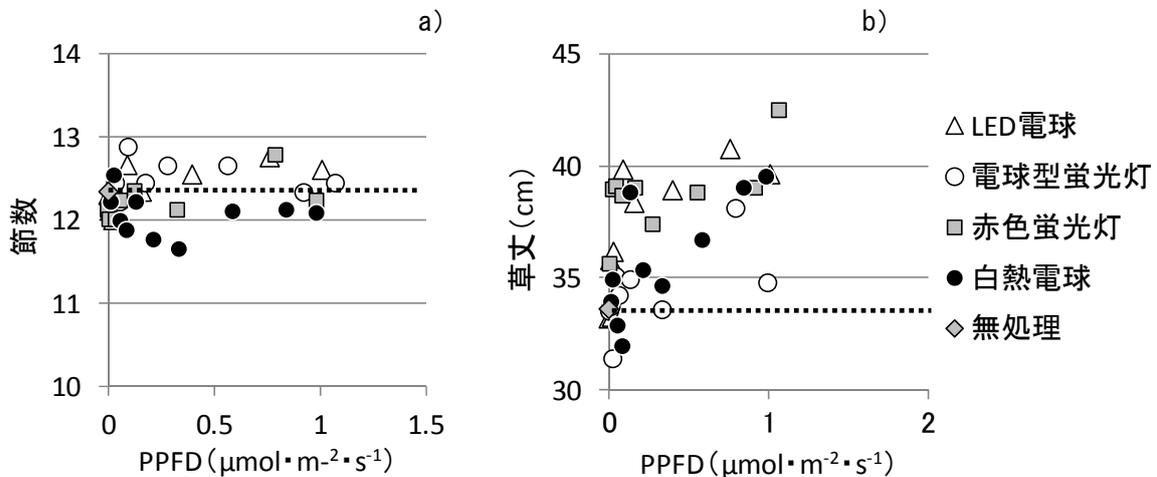
隣接する播種穴3つ分の株の平均値をプロットした

いずれの光源でも光照射により第1花房着生節位は低下し（第6図 a）、開花までの日数も短くなった（第6図 b）。第1花房着生節位は、光源の種類によらず、PPFD $0.4\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下では、光強度が大きいほど低下し、 $0.4\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上で23節以下となった。第1花開花までの日数は、光源の種類にかかわらず、PPFD $0.5\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下では、光強度が大きいほど減少し、 $0.5\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上では60日未満とった。

生育について、節数は、光源の種類や光強度の影響を受けず、草丈は、光源の種類にかかわらず、光強度が強いほど高くなる傾向が認められた（第7図）。



第6図 市販光源を用いた電照が実エンドウ‘きしゅうすい’の着花・開花に及ぼす影響
a) 第1花房着生節位, b) 播種から第1花開花までの日数
播種日および光照射条件は第5図に同じ



第7図 市販光源を用いた電照が実エンドウ‘きしゅうすい’の生育に及ぼす影響
a) 節数, b) 草丈
播種日および光照射条件は第5図に同じ

試験4. 光照射の時間帯が開花に及ぼす影響

第1花房着生節位は、電照を行ったすべての区で無処理区と比べて有意に低くなり、終夜照射区で最も低節位から着花した（第3表）。また、照射時間帯が暗期の中央に近づくほど、低節位から着花する傾向が認められた。

電照終了時の節数は、すべての区で約10節となり、有意な差は認められなかった(第3表)。電照終了時の草丈および節間長は、電照を行ったすべての区で無処理区と比べて有意に長くなった。電照を行った各区は、処理区間に有意な差が認められなかった。

第3表 光照射の時間帯が実エンドウ‘きしゅうすい’の生育および着花に及ぼす影響

光源	照射時間 (h)	照射時間帯	電照終了時の生育			第1花房 着生節位 ^z (節)
			節数 ^z (節)	草丈 (cm)	節間長 ^y (cm)	
白熱電球	12 (終夜照射)	18:00 ~ 6:00	10.4 a ^x	50.1 b	4.9 b	18.3 a
		18:00 ~ 20:00	9.9 a	45.4 b	4.6 b	21.8 d
		20:30 ~ 22:30	10.1 a	47.6 b	4.7 b	20.1 c
		23:00 ~ 1:00	9.9 a	46.5 b	4.7 b	19.1 ab
		1:30 ~ 3:30	10.3 a	46.8 b	4.6 b	20.0 bc
		4:00 ~ 6:00	10.0 a	44.4 b	4.4 b	21.8 d
無処理	0	—	10.1 a	36.4 a	3.6 a	23.5 e

2012年5月22日播種

すべての区は、17:00~翌9:00にシェードを行い、無処理区以外は、シェード内で、17:00~18:00および6:00~9:00に白熱電球を用いて電照を行い、12時間日長とした上で、各処理の電照を行った各区の電照処理は、5~10葉期(地中の不完全葉を含む)に実施した

^z 地中の不完全葉を含んだ数値

^y 節間長=草丈÷節数 とした

^x Scheffe検定により、異なるアルファベット文字間に5%水準で有意差あり

試験5. 暗期中断における光照射時間の長さが開花に及ぼす影響

第1花開花までの日数は、4時間の暗期中断が最も短く、次いで日長延長(16時間日長)、2時間の暗期中断、1時間の暗期中断、無処理の順となった(第4表)。第1花房着生節位は、4時間の暗期中断で最も小さく、次いで日長延長および2時間の暗期中断、1時間の暗期中断、無処理の順となった。第1および第2花房の着花数は、第1花房着生節位が低く、開花促進効果が高い区ほど少なくなる傾向が認められた。各処理終了時の草丈は、光照射時間が長いほど高くなり、各処理終了時の節数は、試験区間で顕著な差は認められなかった(第5表)。

第4表 暗期中断における光照射時間が着花および開花に及ぼす影響

開花促進処理 ^z	光照射時間 ^y (h)	播種から第1花 開花までの日数 (日)	第1花房 着生節位 ^x (節)	1花房あたりの着花数 (花)	
				第1花房	第2花房
暗期中断	4	57.8 a ^w	20.9 a	1.8 a	1.5 a
	2	65.9 c	23.0 b	1.8 ab	1.9 bc
	1	75.1 d	25.6 c	1.9 ab	1.8 ab
日長延長	4.5	62.2 b	22.3 b	1.8 ab	1.7 ab
無処理	0	89.5 e	29.1 d	2.0 b	2.0 c

2009年9月24日播種

^z 光源には白熱電球(Panasonic製のみり電球60W)を使用

^y 暗期中断は、23:45を暗期の中央として光照射。日長延長は、日没前からの光照射

^x 地中の不完全葉を含んだ数値

^w Tukeyの多重検定により、異なるアルファベット文字間に5%水準で有意差あり

第5表 暗期中断における光照射時間が実エンドウ‘きしゅうすい’の生育に及ぼす影響

開花促進処理	光照射時間 (h)	草丈 (cm)	節数 ^z (節)
暗期中断	4	47.0 cd ^y	12.7 a
	2	44.8 c	12.9 a
	1	40.3 b	12.7 a
日長延長	4.5	47.7 d	12.6 a
無処理	0	36.7 a	12.5 a

播種日および光照射条件は、第4表と同じ

^z 地中の不完全葉を含んだ数値

^y Tukeyの多重検定により、異なるアルファベット文字間に5%水準で有意差あり

試験 6. 市販光源の暗期中断による開花促進

第1花房着生節位は、蛍光灯 NB-3h 区および白熱電球 NB-3h 区ともに、慣行電照区や慣行冷蔵区とほぼ同等となり、無処理区と比べて有意に低くなった（第6表）。第1花開花日は、慣行電照区で最も早く、次いで慣行冷蔵区、蛍光灯 NB-3h 区、白熱電球 NB-3h 区となったが、その差は5日以内であった。また、すべての開花促進区で無処理区と比べて、約3週間開花日数が短くなった。1節あたりの着莢数は、10段以下では、慣行電照区で最も少なく、次いで慣行冷蔵区<両NB-3h区<無処理区の順となった。無処理区を除いたすべての区で11~15段の着莢数が最も多く、以降は節位が高いほど着莢数が減少し、処理区間に顕著な差は認められなかった。総収量は、慣行電照区で約2500kg/10a、その他の区で2200~2400kg/10aとなった（第7表）。時期別にみると、1~2月は慣行電照区が最も多く、次いで慣行冷蔵区>両NB-3h区の順となった。3月は両NB-3h区>慣行電照区>慣行冷蔵区となり、4月は慣行電照区>慣行冷蔵区>蛍光灯NB-3h区>白熱電球NB-3h区の順となった。L莢率は、すべての区で3月に80%以上と高く、4月に低下した（第8表）。栽培期間中の平均では、慣行電照区で最も高く、次いで慣行冷蔵区、両NB-3h区の順となった。

第6表 市販光源を利用した暗期中断が開花および着莢に及ぼす影響

処理区 ^z	第1花房 着生節位 ^y (節)	第1花 開花日 (月/日)	節位別の1節あたり着莢数 (莢/節)							収穫 段数 (節)	1株の 収穫莢数 (莢/株)
			21~ ~20節	26~ 25節	31~ 30節	36~ 35節	41~ 40節	45節	平均		
蛍光灯NB-3h区	21.1 a ^x	11/28	1.2	1.8	1.6	1.9	1.1	0.5	1.4	20.0	33.3
白熱電球NB-3h区	21.1 a	11/30	1.5	1.8	1.5	1.8	1.1	0.4	1.3	21.4	32.1
慣行電照区	20.4 a	11/25	1.0	1.1	1.2	1.6	1.1	0.5	1.1	22.2	26.9
慣行冷蔵区	20.8 a	11/26	1.4	1.5	1.3	1.6	1.1	0.5	1.2	21.5	29.8
無処理	25.5 b	12/19	0.0	2.0	2.0	2.0	1.6	1.0	1.7	20.5	35.7

2012年9月28日播種、n=20

^z 光源はいずれもPanasonic製で、電球型蛍光灯は「パルックボールプレミア EFA15EL/10HS/2K」、白熱電球は「みのり電球 75型」を使用し、地表から2mの高さに、2m間隔で設置した

「NB-3h」は 22:00~2:00 の暗期中断 3時間照射した

慣行電照区は白熱電球で終夜照射、慣行冷蔵区は催芽種子を2℃で20日冷蔵処理した後に播種

^y 土中の不完全葉を含んだ数値

^x Tukeyの多重検定により、異なるアルファベット文字間に5%水準で有意差あり

第7表 市販光源を利用した暗期中断が時期別収量に及ぼす影響

処理区	時期別収量 (kg/10a)										総収量 (kg/10a)		
	1月			2月			3月			4月			
	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬			
蛍光灯NB-3h区	0	163	137	297	349	818	183	208	169	63	2,386		
白熱電球NB-3h区	0	155	90	335	317	821	179	200	145	51	2,293		
慣行電照区	5	297	91	305	280	800	199	267	203	87	2,535		
慣行冷蔵区	7	269	104	284	257	698	220	214	180	96	2,328		

播種日および光照射条件は第6表に同じ

第8表 市販光源を利用した暗期中断が莢品質に及ぼす影響

処理区	L莢率 ² の推移 (%)										平均		
	1月			2月			3月			4月			
	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬			
蛍光灯NB-3h区	—	60	79	68	87	84	91	64	46	51	76		
白熱電球NB-3h区	—	58	72	71	94	83	83	74	54	42	77		
慣行電照区	86	91	88	86	88	95	90	64	37	43	82		
慣行冷蔵区	82	76	92	80	88	93	87	60	49	46	80		

播種日および光照射条件は第6表に同じ

² 重量割合。正常肥大子実が4粒以上で、極端な欠粒のない莢をL莢とした

考 察

実エンドウ‘きしゅうすい’の開花促進に有効な波長を検討したところ、緑色光～遠赤色光（波長 525～735nm）で開花促進が認められ、特に黄色光～赤色光（波長 590～660nm）で効果が高かった（第3図）。宮前ら（2016）は、花きの多品目を対象に光質と花成との関係を調査し、それらの品目を①赤色光を中心に黄色光または緑色光にかけて開花が抑制されるもの、②赤色光を中心に黄色光または緑色光にかけて開花が促進されるもの、③遠赤色光を中心に赤色光または黄色光にかけて開花が促進されるもの、④光照射の影響が確認できないもの4つのタイプに分類している。エンドウに関しては、これらのうち②赤色光を中心に開花促進効果が認められるタイプに属するものと考えられる。

一方、植物の花成誘導には、光受容体（色素タンパク質）の関与が知られている（テイツ・ガイザー, 2004）。そのうち、フィトクロムは、主に R 光と FR 光に反応し、R 光を受けて不活性な Pr 型（以下、Pr）から活性型の Pfr 型（以下、Pfr）に、また FR 光を受けて Pfr から Pr にと、可逆的に変化する（Sager ら, 1988）。短日植物では、花成に対して、この Pr-Pfr の可逆反応の関与が示唆されているが、長日植物では、より複雑であるといわれている（テイツ・ガイザー, 2004）。本研究において、R:FR 比と開花との関係を調査したところ、‘きしゅうすい’では、光源の R:FR 比にかかわらず、電照を行うと着花節位の低下が認められ、R:FR 比による差は認められなかった（第2表）。一方、同じく相対的長日植物に分類されているトルコギキョウでは、白熱電球など R:FR 比の低い光により促進され、蛍光灯などの R:FR 比が高い光では開花が遅れる（佐藤ら, 2009; Yamada ら, 2008）。シュッコンカスミソウ（島ら, 2012）やストック（宮前ら, 2015）では、品種によって、R 光と FR 光の両方を含んだ光源でより開花が促進され、ストックでは R:FR 比が低い場合に最も

強く花成が促進されることが報告されている。モデル植物で長日植物のシロイヌナズナでは、Pfr が生理反応を引き起こし、Pr になるとその作用を打ち消すことができるフィトクロム B (PhyB) と、Pr-Pfr の可逆反応がほとんどみられず、FR 光で反応を打ち消すことができないフィトクロム A (PhyA) が存在すること (Shinomura ら, 1996), また花成誘導に PhyB が関与していること (Mockler ら, 1999) が報告されている。エンドウでは、PhyA および PhyB の欠損変異体を用いた実験が行われ、PhyA は開花促進的に、PhyB は開花抑制的に機能していることが報告されている (Weller ら, 1997・2001)。さらに PhyA を介して複数種の FT 相同遺伝子 (フロリゲン) の相互作用により花成誘導がなされるモデルが提唱されている (Weller・Ortega, 2015)。これらのことから、エンドウ・きしゅうすいの電照による開花促進に関しては、主に PhyA が関与し、R:FR 比は大きく影響しないものと考えられる。

また、先述のように、‘きしゅうすい’では、特に黄色光～赤色光 (波長 590～660nm) で開花促進が高かった (第 3 図)。宮前 (2016) が、赤色光を中心に黄色光または緑色光にかけて開花が促進されると分類した品目の 1 つであるルドベキアは、新井・大石 (2011) の報告では、521～642nm の波長域の光で最も開花が促進されている。短日植物のキクでも、600～640nm の波長域で最も開花を抑制したとの報告があり (大石ら, 2010)、これらは、Pr の吸収ピークである 660nm 前後よりも短波長域である。住友ら (2010) は、この現象について、緑色植物ではクロロフィルやカロテノイドなどの色素による隠蔽効果により、フィトクロムの吸収ピークが短波長側へゆがむことを指摘している。これらのことから、エンドウでも、最も開花促進効果が高い光は、660nm よりもやや短波長域であることが推察される。

次に、消費電力の小さい省エネ光源として、市販されている蛍光灯および LED 電球のうち、エンドウの開花促進に有効と考えられた黄色～赤色光を多く含む光源を用いて、開花促進効果の確認と各光源の光量の検討を行った。その結果、いずれの光源でも、第 1 花開花節位の低下と開花の早期化が認められ、PPFD が $0.5\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 程度以上で、一定の開花促進効果が得られることが示唆された (第 6 図)。現在、家庭用光源は、電球型蛍光灯および LED 電球ともに、主に人間の光の見え方から、昼光色、昼白色、電球色の 3 タイプが市販されている。それぞれ順に波長の短い光が少なくなり、波長の長い光が多くなる傾向にあり、電球色のタイプが最も黄色～赤色光を多く含んでいる。本研究では、各タイプの光源を利用した試験を行っていないが、おそらくすべてのタイプで開花促進効果はあり、電球色タイプで効果が高いものと推測される。スターチスでは、これら 3 つのタイプの光源を用いて電照を行った結果、昼白色で最も切り花本数が増加することが報告されている (伊藤, 2015)。この要因は、スターチスの栽培では初期に株養生のため花茎を切除すること、また赤色光で開花促進効果が高いが、青色光で切り花品質の向上が認められ (島ら, 2011)、これらの混合光の照射が適していることが考えられる。各タイプの光源に対する生育への影響に関しては、スターチスの事例もあることから、エンドウでの反応は不明であるが、実エンドウの開花促進のための電照は、10～14 日と短期間であり、光源の差による大きな影響はないものと推察される。

一方、電照の時間帯については、現在の栽培指針では、16 時間日長とされているが (和歌山県農林水産部, 2002)、主に日高川町では日没から深夜 2 時までの電照 (日長延長・20 時間日長)、みなべ町では終夜電照が行われている場合が多い。佐田ら (1989) は、24 時間日長で開花促進効果は最も高く、20 時間日長ではやや劣るもののほぼ同等、16 時間日長では、無処理より開花は促進されるものの、24 時間日長と比べると明らかに効果が劣ることを報告している。ただし、24 時間日長では、草勢が弱りやすく、推奨できないとしている。本研究では、従来の光源である白熱電球のみの試験

結果であるが、試験4および5の結果から暗期の中央ほど開花促進効果が高いことが示唆され、深夜4時間の暗期中断で終夜照射とほぼ同等の効果が得られた(第3,4表)。ただし、キクでは、これまで暗期の中心が最も電照による花芽分化抑制効果が高いと考えられていたのに対し、近年、効果の高い時間帯は暗期の中心ではなく、暗期開始からの経過時間が影響していることが報告されている(白山ら,2013)。キクは短日植物であり、エンドウとは異なると考えられるが、エンドウでも日没時刻によって、開花促進効果が高い時間帯が異なる可能性も考えられる。また、堀端ら(2011)は、‘きしゅうすい’について10月~1月にかけて、赤色LEDで深夜2時間の暗期中断を行った結果、10月~12月にかけて第1花房着生節位は上昇し、12月と1月ではほぼ同等となることを報告している。これは自然日長が10月から12月にかけて短くなることに起因していると考えられ、このことから、暗期中断では、自然日長が短い条件では効果が低下し、照射時間の延長等が必要となる可能性がある。ただし、現在の‘きしゅうすい’の秋まきハウス冬春どり作型のほとんどの産地では、9月~10月上旬播種であり、試験6において、一般的な9月播種で、暗期の中心での電照により、終夜照射とほぼ同等の開花促進効果が得られていることから(第6表)、暗期中央3~4時間の照射で実用上問題ないと考えられる。

試験6では、試験1において開花促進に効果が高いと考えられた黄色~赤色光を含む電球色の電球型蛍光灯およびLED電球等を用いて、暗期中断の効果を確認するとともに収量性について検討した。その結果、電球型蛍光灯で深夜3時間の暗期中断を行うことで、慣行の開花促進処理である白熱電球の終夜照射や種子冷蔵と比べて、やや効果は劣るものの、ほぼ同等の収量が得られた(第7表)。Wellerら(2001)は、白熱電球と蛍光灯とで $10\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の1時間の暗期中断で開花促進効果を認めている。電球型蛍光灯は、既存のソケットを利用して使用できることから、生産現場においても、すぐに利用できるものと考えられる。光量に関しては、佐田ら(1989)は、白熱電球を用いた試験で、十分な開花促進効果を得るためには、照度が20lux以上必要であり、同報告において16~30luxでは、30~60luxと比較して、着花節位の差は1節未満であるがややバラツキが多く、2日程度開花が遅れる傾向がみられるとしている。現在、生産現場では75~100Wの白熱電球を10aあたり30~40個点灯して電照が行われていることが多い。試験3において各光源の光量と開花促進効果の試験結果から、電球型蛍光灯で光源直下のPPFDを高さ160cmに設置した白熱電球と同等とするには高さ90cmで設置する必要があったこと、また白熱電球とほぼ同等の開花促進効果が得られたのは、光源からの水平距離で約2.4mまでで、3mを超えると電球型蛍光灯でやや効果が劣ったことなどから、本試験で供試した電球型蛍光灯を慣行と同様に配置すると、やや効果が劣る可能性がある。さらに、実エンドウの秋まきハウス冬春どり作型において、電照期間は10日前後と短期間であるものの、その期間は、ハウスのビニル被覆を行っていない時期であり、風雨にさらされることから、光源の耐候性についても検討する必要がある。これらのことから、白熱電球の代替として、電球型蛍光灯やLED電球も開花促進効果は認められるものの、今後の導入にあたっては、実際栽培の状況に合わせて対応することが必要と考えられた。

現在、国内での白熱電球の製造はほぼ中止されているが、国外では生産が続いており、入手は可能である。実エンドウの電照は、短期間であるため、電球の消耗は少なく消費電力も小さいこと、また省エネ光源は白熱電球と比べて未だ価格が割高であることなどから、すぐに省エネ型光源に切り替える必要はないものと考えられる。現状では、白熱電球を利用する場合、暗期中断が適していると考えられる。今後、省エネ光源の開発および普及がさらに進み、現地への導入を行う場合、必要な光量やコスト等を精査していく必要がある。

摘 要

実エンドウ‘きしゅうすい’の秋まきハウス冬春どり作型における開花促進のための電照方法について検討した。

1. 緑色光～遠赤色光（波長 525～735nm）の夜間照射で開花が促進され、特に黄色～赤色光（波長 590～660nm）で促進効果が高い。
2. R:FR 比による開花促進効果への影響は小さい。
3. 赤色光を含む市販の電球色の電球型蛍光灯や LED 電球でも開花促進効果は認められ、PPFD 約 $0.5\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$ 以上でほぼ一定の効果が得られる。
4. 光照射の時間帯は暗期中央で効果が高く、深夜 4 時間の暗期中断で終夜電照とほぼ同等となる。
5. 電球色の電球型蛍光灯を深夜 3 時間照射することで、白熱電球の終夜照射とほぼ同等の開花促進効果が得られ、収量もほぼ同等となる。

謝辞

本報告は 2009～2011 年度の戦略的研究開発プラン事業「実エンドウの生理機能の解明による高品質・多収生産技術開発」および 2012 年度の県単事業「暖地特産花き・野菜の安定生産技術開発」の一環として実施した試験の一部をとりまとめたものである。本研究を実施するにあたり、多大のご助言およびご協力をいただきました暖地園芸センターの연구원や専門技術員である又曾正一氏、玉置義人氏、さらに栽培および調査等を補助して下さったアルバイト職員の中村広行氏、鈴木善雄氏、柏木京子氏、谷口秀子氏、ほか皆様に厚くお礼申し上げます。

引用文献

- 新井聡・大石一史. 2011. 夜間の各種単波長の LED 照明が数種の鉢物の生育に及ぼす影響. 愛知農総試研報. 43: 41-53.
- 藤岡唯志. 2000a. 作型と品種の取り入れ方. p. 基 71-76. 農業技術大系. 野菜編 10 (マメ類・イモ類・レンコン). 農文協. 東京.
- 藤岡唯志. 2000b. 開花促進. p. 基 99-103. 農業技術大系. 野菜編 10 (マメ類・イモ類・レンコン). 農文協. 東京.
- 白山竜次・郡山啓作. 2013. キクの電照栽培における暗期中断電照時間帯が花芽分化抑制に及ぼす影響. 園学研. 12: 427-432.
- 浜本浩・山崎敬亮. 2013. 各種人工光源ランプの光質. 植物環境工学. 25: 142-145.
- 浜本浩・島地英夫・東出忠桐. 2003. 各色 LED による暗期中断処理に対する園芸植物の出蕾と抽だいたい反応. 農業気象. 59: 103-110.
- 堀端 章・小谷真主・加藤恒雄・伊東卓爾・楠 茂樹・神藤 宏・谷口輝樹・渡辺俊明・松本俊郎. 2011. 作物生産における太陽エネルギーの分割利用—赤色 LED による暗期中断が中性植物エンドウの花成に及ぼす影響—. 太陽/風力エネルギー講演論文集, 333-336.
- 今西英雄. 1995. 花き園芸. 文永堂出版株式会社. 東京. 10-65.
- 伊藤吉成. 2015. スターチスの電照栽培における赤色光と青色光の混合比率並びに市販光源の選定について. 和歌山県 JA 花き情報. 328: 3-4.

- L.テイツ・E.ガイザー. 2004. 花成の調節. P. 567-600. 植物生理学 第3版. 培風館. 東京.
- 宮前治加. 2016. 電照栽培における光質が花き類の開花に及ぼす影響. 和歌山県 JA 花き情報. 335: 4-6.
- 宮前治加・島浩二・西谷年生・山田真・石渡正紀・住友克彦・久松完. 2015. 終夜照射における赤から遠赤色光領域の波長分布がストックの伸長成長および開花に及ぼす影響. 園学研. 14: 371-379.
- Mockler, T. C., H. Guo, H. Yang, H. Duong and C. Lin. 1999. Antagonistic actions of Arabidopsis cryptochromes and phytochrome B in the regulation of floral induction. *Development*. 126: 2073-2082.
- 詠田浩明. 2010. 技術解説-LED 電球. シャープ技報. 109: 17-20.
- NEDO 研究評価広報部. 2009. 省エネルギー特集-照明器具-段階的廃止の対象となる電球と廃止の実施時期について (EU) . NEDO 海外レポート : 1046: 3-8.
- 大石一史・新井聡・犬伏加恵・中村恵章. 2010. キクの花芽分化抑制に有効な LED の波長, および花芽分化抑制効果に及ぼす日射量の影響. 園学研. (別 2) : 545.
- 佐田明和・藤岡唯志・西森裕夫. 1989. ハウスエンドウの開花促進に関する研究 (第 3 報) 電照処理の時間及び照度が生育, 開花に及ぼす影響. 和歌山農試研報. 13: 1-6.
- Sager, J.C., W. O. Smith, J. L. Edwards and K. L. Cyr. 1988. Photosynthetic efficiency and phytochrome photoequilibria. determination using spectral data. *Transactions of the ASAE*. 31: 1882-1889.
- 佐藤武義・工藤則子・森山巖興・大川 秀樹・金山喜則・金浜 耕基. 2009. トルコギキョウの秋冬出し作型における遠赤色光電球形蛍光灯を利用した日長延長による開花促進. 園芸学研究. 8: 327-334.
- 島浩二・宮前治加・川西孝秀・山田真・石渡正紀・久松完. 2011. 異なる光質による光照射がスターチス・シヌアータの生育および開花に及ぼす影響. 園学研. 10 (別 2) : 553.
- Shinomura, T., A. Nagatani, H. Hanzawa, M. Kubota, M. Watanabe, and M. Furuya. 1996. Action spectra for phytochrome A- and B-specific photoinduction of seed germination in *Arabidopsis thaliana*. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 93: 8129-8133.
- 住友克彦・樋口洋平・小田篤・青木献・山田真・石渡正紀・鳴海貴子・深井誠一・久松完. 2010. キク花成の暗期中断反応におけるフィトクロムの関与および分光感度. 園学研. 9 (別 2) : 286.
- 塚田晃久・小林隆・長瀬嘉適. 1982. トルコギキョウの生理的特性と栽培に関する研究 (第 2 報) 生育・開花に及ぼす温度, 日長の影響. 長野野菜花き試研報. 2: 77-88.
- 和歌山県農林水産部. 2002. 野菜栽培指針.
- Weller, J. L., I. C. Murfet, and J. B. Reid. 1997. Pea Mutants with Reduced Sensitivity to Far-Red Light Define an Important Role for Phytochrome A in Day-Length Detection. *Plant Physiol.*, 114, 1225-1236.
- Weller, J. L., N. Beauchamp, L. H. J. Kerckhoffs, J. D. Platten and J. B. Reid. 2001. Interaction of phytochromes A and B in the control of de-etiolation and flowering in pea. *Plant J*. 26, 283-294.
- Weller, J. L. and R. Ortega. 2015. Genetic control of flowering time in legumes. *Front. Plant Sci*. 6: 207.
- Yamada, A., T. Tanigawa, T. Suyama, T. Matsuno and T. Kunitake. 2008. Night break treatment using different light sources promotes or delays growth and flowering of *Eusfoma grandiflorum* (Raf.) Shinn. *J. Japan. Soc. Hort. Sci*. 77: 69-74.
- 米村浩次. 1993. 長日処理. p. 147-153. 農業技術大系. 花き編 1 (生長・開花とその調節). 農文協. 東京.