

**キクの電照抑制栽培に用いる白熱電球代替光源としての
電球形蛍光灯およびLEDの光エネルギー特性と開花抑制効果**

石倉 聡・梶原真二・原田秀人・福島啓吾

**The Spectral Distribution Characteristic and Flower Inhibition
by Fluorescent Light Bulb and LEDs as Substitute
for Incandescent lamp in Light Culture of Chrysanthemum**

Satoshi ISHIKURA, Shinji KAJIHARA, Hideto HARADA and Keigo FUKUSHIMA

広島県立総合技術研究所農業技術センター
研究報告 第84号別刷

平成21年7月

Reprinted from

Bulletion of the Hiroshima Prefectural Technology Research
Institute Agricultural Technology Research Center No. 84

July, 2009

キクの電照抑制栽培に用いる白熱電球代替光源としての電球形蛍光灯およびLEDの光エネルギー特性と開花抑制効果

石倉 聡・梶原真二・原田秀人・福島啓吾

キーワード：キク，電照，白熱電球，代替光源，蛍光灯，発光ダイオード

経済産業省は2008年4月に地球温暖化防止対策の一環として白熱電球製造販売停止計画を発表し、同年7月の洞爺湖サミットでは、電機メーカーなどに対して2012年までに白熱電球の国内での製造・販売を自主的に中止するよう要請する方針を示した。この白熱電球製造販売停止計画には、消費電力が大きくエネルギー利用効率が悪い白熱電球から、白熱電球と比較して消費電力が小さく長持ちする蛍光灯への切り替えを促す狙いがある。この方針の主なターゲットは家庭用やオフィス用などの光源であるが、これまで白熱電球の利用が当然であったキクの電照抑制栽培においてもその影響は必至であり、代替光源の選定および性能評価は急務である。

日本で初めてキクの電照抑制栽培が試みられたのは1937年であり、1950年代以降には全国へ普及拡大された(川田ら, 1996)、広島県内でも、江田島市や庄原市などのキク産地において、広く取り組まれている。

キクの開花抑制を目的とする長日処理では、赤色光の効果が強く、その働きを打ち消す作用がある遠赤色光を多く含む白熱電球よりも、その少ない蛍光灯の光が有効とされている(Borthwick・Cathey 1962, 小西ら, 1988)。しかし、キクの電照用光源としては、当初から現在まで白熱電球が利用され続けてきた。これは、船越(1989)が指摘しているとおり、白熱電球ほど安価で取り扱いやすく、簡単に入手できる手頃な光源が他になかったためと考えられる。

これまでに、キクの電照用光源として蛍光灯の利用が研究されている。農電研究所(小川・蓑原, 1972)では赤色および青色蛍光灯を用いて、香川農試(木村, 1976)では分光分布の異なる数種類の蛍光灯を用いてキクの開花抑制効果に関する研究を行っており、赤色、黄色およ

び昼光色蛍光灯の有効性が報告されている。さらに、従来の直管形と比較して圃場への設置作業が容易な電球形蛍光灯が2000年に発売されたが、重量が白熱電球の約4倍と大きかったため支持具を増やすか、あるいは強化する必要があった上、価格が白熱電球の約5~7倍と高価であったために、普及が進まなかった。

近年では、発光ダイオード(LED)も注目されており、一般照明用として、徐々にではあるが利用拡大されつつある。一般にLEDで出力される放射スペクトルの半値幅は他の植物栽培用光源と比較して小さいことが知られており(渡邊, 2006)、開花抑制に有効な波長のみを効率的に照射することができるため、キクの電照用光源として利用できると考えられるが、詳細に検討した報告は見られない。

キクの電照抑制栽培用代替光源の選定と評価にあたっては、光源間で分光分布が大きく異なるため、波長依存性の小さい測定機器を用いて光環境の評価を行う必要がでてきた。一般に、植物の光合成反応に関係する光環境の評価にあたっては、光量子計による400~700nm域の光量子束密度の測定値が用いられている。しかし、光形態形成反応の一つであるキクの開花反応に関係する光環境を適切に計測できる測定機器はまだ開発されていない。ところが、400~800nmの波長域の分光応答度がフラットレスポンスである放射照度計を用いれば、少なくとも、分光分布の異なる光源間の光エネルギーを定量評価できるものと考えられる。

そこで、本報では、キクの電照抑制栽培用白熱灯代替光源を探求するため、白熱電球、電球形蛍光灯、赤色LEDおよび白色LEDの光エネルギー特性を分光放射計で調査した。さらに、これらの光源を供試し、放射照度計を用いてキクに対する開花抑制効果を詳細に検討した。

本報告の一部は、2006年の園芸学会秋季大会および2007年の園芸学会中四国支部大会において発表した。

平成21年6月3日受理

材料および方法

実験1. 供試光源の分光分布の測定

実験は広島県立総合技術研究所農業技術センターの花き調査室内で夜間に行った。白熱電球（松下電器(株)，電照用電球のみり：K-RD100V75W）を対照として，電球形蛍光灯（東芝ライテック(株)，電照菊用ネオボールZ：EFG21EL KIKU），赤色LED（鳥取三洋電機(株)，SLP-838A-37S1）および白色LED（MARUWA SHOMEI, LUSTER μ ）を供試し，点灯から2時間経過した後，分光放射計（GER1500, Spectra Vista Corporation）を用いて，供試光源の分光分布を測定した。

実験2. 蛍光灯と白熱電球による発蕾抑制効果の比較

実験は広島県立総合技術研究所農業技術センターのプラスチックハウス内で秋ギク‘神馬’を供試して行った。実験開始前の花芽分化を防止するため，親株床および挿し芽床では，白熱電球を用いて深夜4時間（22～2時）の暗期中断を行った。2005年10月5日に挿し芽した苗を10月20日に幅80cmの畝へ株間7.5cm×条間45cmの2条で定植し，無摘心栽培した。本圃では100m²当たり化成肥料7-6-6（N-P₂O₅-K₂O）を18.6kgおよび炭酸カルシウム10kgを全量基肥として施与した。実験期間中のハウス内気温は，最低15℃以上となるよう加温した。

処理区として電球形蛍光灯（実験1と同じ，100V21W×3球）および白熱電球（実験1と同じ，100V75W×5球）を供試した2区を設け，畝端の高さ約180cmの位置に供試光源を下向きに設置した（図1）。放射照度の設定位置を定植前の畝面とし，各光源の点灯から2時間経過した後，放射照度計（ディテクター：RW-3703, Gigahertz-Optic社）を用いて設定した。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勾配を設け，照明時における畝面での水平面放射照度0～300mW・m⁻²を確保しつつ，定植日の10月20日から12月2日までの43日間，深夜4時間（22～2時）の暗期中断を行った。‘神馬’の慣行の無摘心栽培では，暗期中断終了時に，茎長が短い個体でも約55cmあれば，開花時に90cm以上の切り花長が確保できる。このため，本実験においても暗期中断の終了は，放射照度を最も大きく設定した300mW・m⁻²付近における個体のうち，小さいものの茎長が約55cmを確保できた時点を目安として決定した。夜間は処理区間を遮光シートで仕切ることによって照射光が干渉しないようにした。

生長点を直上から観察し，蕾が視認できた日を発蕾日とした。本圃において，暗期中断を終了してから発蕾日

までの日数（以下，発蕾所要日数とする。）を開花抑制効果の指標とした。

実験3. 赤色LED，白色LEDおよび白熱電球による発蕾抑制効果の比較

実験場所，供試品種，育苗，栽植，施肥および温度管理等の条件は，実験2に準じて行い，2006年11月5日に挿し芽した苗を，11月25日に定植した。

白熱電球（実験1と同じ，100V75W×3球）を対照に，赤色LED（実験1と同じ，450個）および白色LED（実験1と同じ，3機）の2区を設け，畝端の高さ約180cmの位置に供試光源を設置した（図1および図2）。このとき，LEDを実装したパネルの仰角は約50度とした。放射照度の設定は，実験2と同様な方法で行い，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勾配を設け，照明時における畝面での水平面放射照度0～300mW・m⁻²を確保しつつ，定植日の11月25日から2007年1月16日までの52日間，深夜4時間（22～2時）の暗期中断を行った。暗期中断の終了は，実験2と同様な目安で決定した。なお，実験3では，実験2と比較して寡日照期での作型となったため，定植から暗期中断終了までの日数を実験2より10日増やすことで暗期中断終了時の茎長を確保した。夜間は処理区間を遮光シートで仕切ることによって照射光が干渉しないようにした。

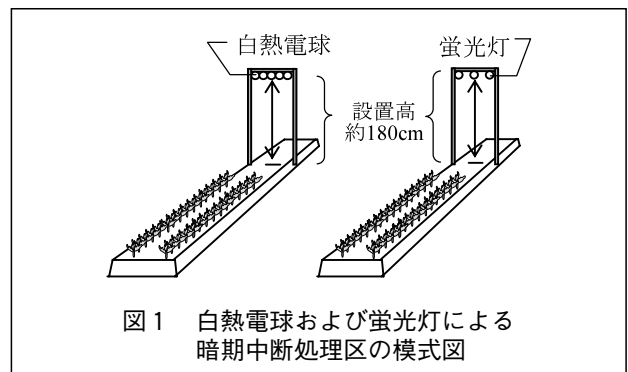


図1 白熱電球および蛍光灯による暗期中断処理区の模式図

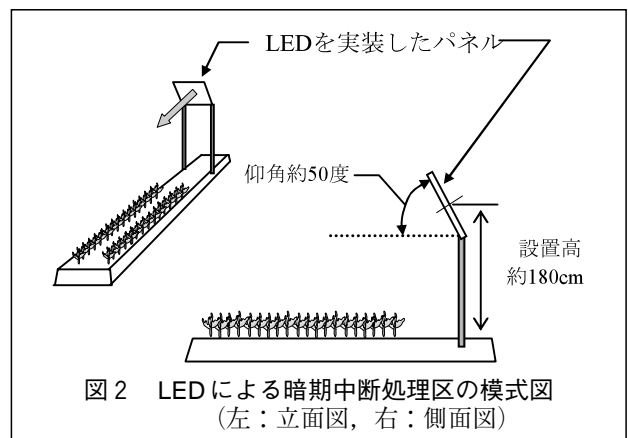


図2 LEDによる暗期中断処理区の模式図
(左：立面図，右：側面図)

結 果

実験 1. 供試光源の分光分布の測定

対照の白熱電球は、幅広い波長域の光が放射されており、400～800nm域では長い波長ほど分光エネルギー比が大きかった（図3および図4）。供試した電球形蛍光灯は、430～440nm、550nmおよび610nmの三つの波長にピークが見られた（図3）。赤色LEDは他の光源と比較して放射されている光の波長域が最も狭く、660nmに最大のピークが見られた（図4）。白色LEDは赤色LEDと比較して幅広い波長域の光が放射されており、445nmに最大のピークが、550nm付近に次のピークが見られた（図4）。

実験 2. 蛍光灯と白熱電球による発蕾抑制効果の比較

本圃において暗期中断を終了した2005年12月2日からの発蕾所要日数は、蛍光灯および白熱電球区ではともに、ある放射照度域では、放射照度が高いほど増加し、その放射照度域を越えると、放射照度に関わらず発蕾所要日数が一定となる同様なパターンが見られた（図5）。放射照度に関わらず発蕾所要日数が一定となる放射照度域の下限値は、対照である白熱電球区と比較して、蛍光灯区で小さかった。発蕾所要日数：Y（日）と畝面における水平面放射照度：X（ $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ ）との関係は、蛍光灯区の7～137 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ の範囲で $Y = 13.92\text{Ln}(X) - 46.41$ の回帰式（ $r = 0.945$, $n = 181$ ）に近似し、放射照度が大きいほど発蕾所要日数は増加した。また、この回帰式ではXが127 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ のとき、Yは21日となり、127～300 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ で、ほぼ一定の21日となった。白熱電球区では、29～199 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ の範囲で $Y = 21.51\text{Ln}(X) - 90.86$ の回帰式（ $r = 0.957$, $n = 119$ ）に近似し、発蕾所要日数は放射照度が大きいほど増加した（図5）。また、この回帰式ではXが182 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ のときYは21日となり、182～300 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ でほぼ一定の21日となった。

実験 3. 赤色LED、白色LEDおよび白熱電球による発蕾抑制効果の比較

本圃において暗期中断を終了した2007年1月16日からの発蕾所要日数は、いずれの処理区でも、ある放射照度域では放射照度が高いほど増加し、その放射照度域を越えると放射照度に関わらず発蕾所要日数が一定となる同様なパターンが見られた（図6）。放射照度に関わらず発蕾所要日数が一定となる放射照度域の下限値は、赤色LED区が最も小さく、次いで白色LED区となり、対

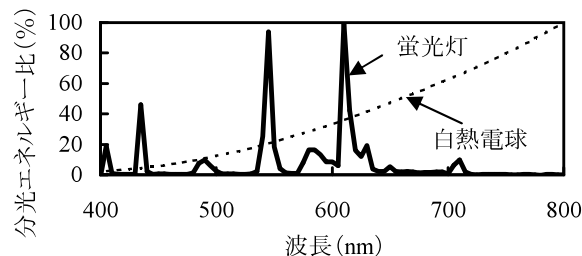


図3 白熱電球および蛍光灯の分光分布

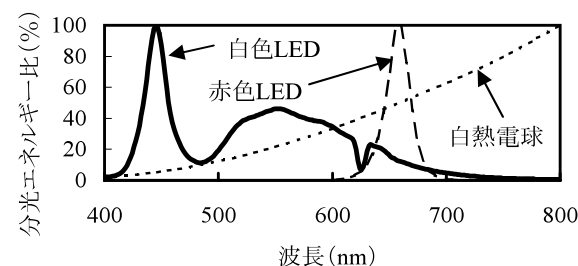


図4 白熱電球、赤色LEDおよび白色LEDの分光分布

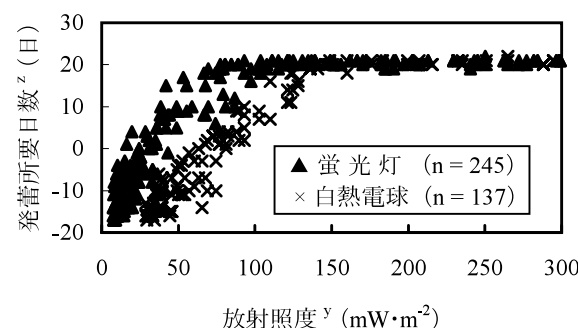


図5 放射照度と発蕾所要日数との関係

^z 暗期中断を終了した12月2日から発蕾日までの所要日数、12月2日以前に発蕾した場合はマイナス表示

^y 畝面における照明時の水平面放射照度

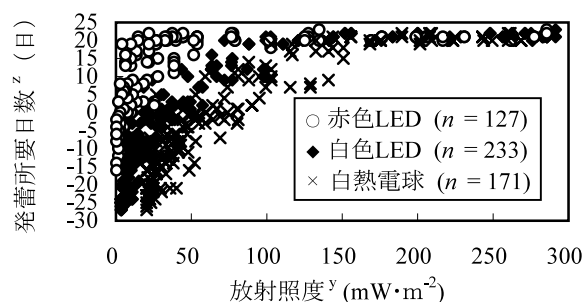


図6 放射照度と発蕾所要日数との関係

^z 暗期中断を終了した1月16日から発蕾日までの所要日数、1月16日以前に発蕾した場合はマイナス表示

^y 畝面における照明時の水平面放射照度

照である白熱電球区が最も大きかった。発蕾所要日数：Y (日) と畝面における水平面放射照度：X ($\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$) との関係は、赤色LED区の1～79 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ の範囲で $Y = 6.63\text{Ln}(X) - 6.51$ の回帰式 ($r = 0.857, n = 95$) に近似し、放射照度が大きいほど増加した (図6)。また、この回帰式ではXが64 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ のとき、Yは21日となり、64～300 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ の範囲で、ほぼ一定の21日となった。

白色LED区では、3～200 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ で $Y = 11.43\text{Ln}(X) - 38.06$ の回帰式 ($r = 0.924, n = 205$) に近似し、放射照度が大きいほど増加した (図6)。また、この回帰式ではXが176 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ のとき、Yは21日となり、176～300 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ の範囲で、ほぼ一定の21日となった。

白熱電球区では、20～202 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ の範囲で $Y = 18.8\text{Ln}(X) - 77.44$ の回帰式 ($r = 0.927, n = 155$) に近似し、放射照度が大きいほど増加した (図6)。また、この回帰式ではXが189 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ のとき、Yは21日となり、189～300 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ の範囲で、ほぼ一定の21日となった。

考 察

キクの電照抑制栽培が始まった当初は、かなり低照度で電照が行われていたが、その後は現在に至るまで「白熱電球で50lx」が一つの基準値とされてきた (木村, 1974; 米村, 1993)。そして、多くの場合、電照時の光環境の評価は照度を基準として行われてきた。

照度の測定に用いられる照度計は、分光応答度を人間の視感に近似させた計測機器である (中川, 1992)。従って、人間の視感とは異なる分光作用特性をもつキクの開花反応など植物の光形態形成反応の評価には、本来、使用すべきではないと考えられる。これまで照度が使われてきたのはその評価に使用できる適当な計測機器がなかったことや、キクの電照光源は白熱電球がもっぱら使用されてきたため、光源の分光分布を考慮する必要がなく、パワーレベルのみで比較すればよかったためと考えられる。キクの電照抑制栽培において白熱電球の代替光源の選定と評価にあたって、前述した放射照度計を用いれば、少なくとも、分光分布の異なる光源間の光エネルギーを定量評価できるものと考えられる。

実験1の結果、供試した光源の違いにより分光分布は全く異なった。すなわち、白熱電球では波長が長くなるにともない分光パワーは次第に増加したのに対し、電球形蛍光灯では青、緑および赤色光域に顕著な三つのピー

クが見られた。赤色LEDでは、その他の供試光源と比較して放射スペクトルの半値幅が最も狭く、赤色光域に顕著なピークが見られた。白色LEDでは赤色LEDと比較して幅広い波長域の光が放射されており、青色光域に最大のピークがあり、黄緑色光域を中心とするなだらかなピークが見られた。

実験2ならびに実験3の結果、本圃での暗期中断を終了してからの発蕾所要日数は、いずれの光源においても、光源の種類ごとにある値を超える放射照度の下ではほぼ一定となり、一定強度以上の放射照度の下では十分な発蕾抑制効果が得られることが明らかとなった。その値は、赤色LEDが最も小さく64 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ となり、次いで電球形蛍光灯が127 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ 、白色LEDが176 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ であり、白熱電球では最も大きく182～189 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ の範囲であった。

キクの開花抑制を目的として暗期中断をおこなう場合、赤色吸収型フィトクロム (Pr) の吸収波長である赤色光の効果が高いことが知られている (H. M. Cathey and H. A. Borthwick, 1957; H. M. Cathey and H. A. Borthwick, 1964)。赤色LEDはヒトの視感度を基準とした照明効率 (lm/W) でみた場合、効率の悪い光源であるが、ほとんどすべての放射エネルギーが600～700nmの赤色光領域に含まれていることから、この波長域への変換効率としては非常に優れている (図4)。本実験において、赤色LEDで最も小さい放射照度の下で発蕾抑制できたのは赤色光のエネルギー量が多かったためであろう。いずれの光源も、白熱電球と比較して、低い放射照度でもキクの発蕾抑制が認められた。白熱電球は赤色光の開花抑制効果を打ち消すとされる遠赤色光 (700～800nm) を多く放射しており、しかも、前述した放射照度計で測定した場合、白熱電球の放射照度の大部分は遠赤色光によって構成されていると言える。一方、白色LEDは遠赤色光をわずかししか放射していない。白熱電球より赤色光の割合が少ない白色LEDでも低い放射照度で開花が抑制できたのは、このためであろう。

これまでキクの電照抑制栽培での基準とされてきた白熱電球の50lxは、放射照度計および照度計による実測値をもとに算出すると、約360 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ に相当する。本実験では、白熱電球の場合、これまでの基準の約2分の1である182～189 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ でも、発蕾を抑制できた。これまでに、キクの発蕾が抑えられる照度については品種間差異が大きく、敏感な品種では3lxでも抑制できるが、鈍感な品種では90lx以上確保しないと抑制できない (岡田, 1963) という報告がある。

また、実際の栽培で明るさを設定する際は、高密度の栽植条件下での確実な開花抑制と斉一な生育が要求される上、照度に対する反応が異なる多様な品種が栽培されていることも考慮する必要がある（米村，1993）。本実験では、一般的な栽植密度と比べてやや粗植であり、品種についても代表的な一つの品種を供試したのみであった。このことから、今後は、高密度の栽植条件下や、開花反応が異なる多くの品種を供試した検討が必要であろう。

一般に、LEDは他の光源と比較すると指向角が狭いので、圃場全体を照明するためにはランプ形状および配光性の改善が必要となる。また、紫外線への被爆、温湿度の変化、化学合成農薬への被爆等、圃場での使用に耐えうる種々の性能が要求される。しかしながら、LEDは低消費電力である上、蛍光灯のように水銀が使用されていないので21世紀にふさわしい環境配慮型の光源となり得る。また、本報では面状に実装されたLEDを使用したのが、小型堅牢で軽量であるという本来の特徴を活かせば、脱着が容易で作業性に優れた光源として利用可能である。白色LEDは、赤色LEDと比較して発蕾抑制効果が劣ったが、照明器具として市場規模が赤色LEDを遙かに凌駕するものであることを考慮すると、今後の発展性が最も大きい光源であると言える。

電機メーカーなどの企業努力により、より一層の高性能化および低価格化が実現され、一定の経済性が確保されれば、これらの光源、特にLEDは、十分に白熱電球の代替光源となりうると結論される。

摘 要

キクの花芽分化抑制について、白熱電球の代替が可能と考えられる電球形蛍光灯、赤色LEDおよび白色LEDの三種類の光源を供試し、分光放射計で光エネルギー特性を調査した。さらにこれらの光源を供試して、発蕾所要日数を指標として‘神馬’の開花抑制効果を検討した。

光源の違いにより分光分布は全く異なった。電球形蛍光灯では青、緑および赤色光域に顕著な三つのピークが見られた。赤色LEDでは放射スペクトルの半値幅が最も狭く赤色光域に顕著なピークが見られた。白色LEDでは青色光域に最大のピークがあり、その他に黄緑色光域を中心とするなだらかなピークが見られた。

十分な開花抑制効果が得られた放射照度の下限値は、赤色LEDが最も小さく $64\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ 、次いで電球形蛍光灯が $127\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ 、白色LEDが $176\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ となり、白熱電球の $182\sim 189\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ と比較して、低い放射照度

の下でも利用可能であることが明らかとなった。

以上の結果より、これらの三種類の光源は、いずれも、白熱電球の代替光源となりうると考えられた。

謝 辞

本報告の校閲にあたり、国立大学法人岡山大学大学院自然科学研究科准教授の後藤丹十郎博士には懇切なご指導を頂いた。また、本研究の実施にあたり、当センターの勝谷範敏博士、齋藤廣司氏および花き担当の職員諸氏に多大なご協力を頂いた。ここに記して深く感謝の意を表す。

引用文献

- 船越桂市. 1989. 切り花栽培の新技术 改訂キク上巻. 誠文堂新光社. pp. 30-32.
- H. A. Borthwick. and H. M. Cathey. 1962. Role of phytochrome in control of flowering of chrysanthemum. Bot. Gaz. 123(3): 155-162.
- H. M. Cathey and H. A. Borthwick. 1957. Photoreversibility of floral initiation in chrysanthemum. Bot. Gaz. 119: 71-76.
- H. M. Cathey and H.A.Borthwick. 1964. Significance of dark reversion of phytochrome in flowering of *Chrysanthemum morifolium*. Bot. Gaz. 125 (4): 232-236.
- 川田穰一・遠藤 久・望月龍也・関山哲雄. 1996. 新しい花き・野菜・果樹づくり 電照・補光栽培の実用技術. 社団法人農業電化協会. pp. 18-19.
- 木村喜久夫. 1974. 施設ギクの周年切り花生産. 誠文堂新光社. pp. 131-132.
- 木村喜久夫. 1976. キクの電照抑制栽培におけるけい光ランプの効果. 香川県農業試験場報告. 28 : 11-14.
- 小西国義・今西英雄・五井正憲. 花卉の開花調節. 養賢堂. pp. 53.
- 中川靖夫. 1992. 光バイオインダストリー 光応用による生物反応の制御. オーム社. pp. 174.
- 小川 正・蓑原善和. 1972. キクの開花抑制に対する赤色・青色光の効果. 農電研シリーズ5. pp. 24-25.
- 岡田正順. 1963. 菊の花芽分化および開花に関する研究. 東京教育大学農学部紀要. 9 : 87-97.
- 渡邊博之. 2006. 時代を先取りする先端技術LEDの農林水産分野への応用. 社団法人農業電化協会. pp. 63-74.
- 米村浩次. 1993. 農業技術大系 花卉編1. 農山漁村文化協会. pp. 149.

The Spectral Distribution Characteristic and Flower Inhibition by Fluorescent Light Bulb and LEDs as Substitute for Incandescent lamp in Light Culture of Chrysanthemum

Satoshi ISHIKURA, Shinji KAJIHARA, Hideto HARADA and Keigo FUKUSHIMA

Summary

The spectral distribution of three lamps, fluorescent light bulb, red-LED and white-LED as substitute for incandescent lamp was analyzed by spectroradiometer. And the effect of three lamps was studied on the control of flowering *Chrysanthemum* cv. 'Jinba' in light culture by irradiancemeter.

The spectral distribution was different on each lamps. The fluorescent light bulb showed remarkable three peaks on the range of blue, green and red beam. The red-LED showed remarkable peak on the range of red beam and narrow viewing half angle. The white-LED showed maximum peak on the range of blue beam, and gradual peak on the range of green beam.

The minimum irradiance enough for flower inhibition was the smallest in the red-LED at $64\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$, the second was in the fluorescent light bulb at $127\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$, the third was in the white-LED at $176\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$. It was the biggest in the incandescent lamp at $182\text{-}189\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$.

It is considered that the fluorescent light bulb, the red-LED and the white-LED can be substitute for the incandescent lamp.

Key words : Chrysanthemum, Light culture, Incandescent lamp, Substitute lamp, Fluorescent lamp, LED