

人工光型植物工場における赤青LEDと蛍光灯使用時の植物成長および消費電力の評価

誌名	植物環境工学
ISSN	18802028
著者名	大竹, 範子 米田, 正 鈴木, 廣志
発行元	日本植物工場学会
巻/号	27巻4号
巻号補足	
掲載ページ	p. 213-218
発行年月	2015年12月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



人工光型植物工場における赤青 LED と蛍光灯使用時の 植物成長および消費電力の評価

大竹範子・米田 正・鈴木廣志

昭和電工株式会社事業開発センターグリーンイノベーションプロジェクト
105-8518 東京都港区芝大門 1-13-9

Comparison of Plant Growth and Electrical Power Consumption between Red/Blue LED and Fluorescent Lamp in a Plant Factory

Noriko OHTAKE, Tadashi YONEDA, Hiroshi SUZUKI

*Green Innovation Project, Business Development Center, Showa Denko K. K.,
Shiba Daimon 1-13-9, Minato-ku, Tokyo 105-8518, JAPAN*

Abstract

The effects of red and blue light-emitting diode (LED) irradiation patterns and time on the growth of leaf lettuce in a plant factory were investigated. During the same cultivation period, fresh weight was statistically higher for alternative red and blue LED irradiation (SHIGYO™ method) than for the other two treatments: simultaneous red and blue LED irradiation and fluorescent lamp irradiation. The SHIGYO method was effective for the light-dark cycle (LD) 16:8 h, and for continuous irradiation (24 h light). Due to increased plant growth rates, the SHIGYO method decreased the time taken to reach harvest, therefore, increasing the number of harvests per year. The electrical power consumption for growth per plant unit using LEDs was less than that for fluorescent lamps. These findings are expected to contribute to increased productivity in plant factories.

Keywords: artificial lighting, light emitting diodes, fluorescent lamp, plant factory

緒 言

近年、完全人工光型の植物工場が増えており、中でも LED を光源とした植物工場は低電力コストのため着目されている^{1,2)}。鋭い波長スペクトルを有し、自在に色を変えられる LED を植物栽培に使用する場合、青色（光形態形成）と赤色（光合成）をベースとする光質が高効率で良いと考えられる³⁾。これまでに、赤色・青色 LED を使用し、これらを交

互に照射することによってリーフレタスの生育が促進される現象（SHIGYO™ 法）が報告され、植物工場への応用が期待されている⁴⁾。SHIGYO 法は赤色光（R）と青色光（B）とを各々個別に 1 時間以上 48 時間以内の照射時間で交互連続に繰り返し照射する方法である。R/B 比、光強度、明暗周期は植物に応じて適した任意の条件に設定することができる。

他方、光環境制御の一要因として、照射時間（明期 / 暗期の設定時間）は植物成長に大きな影響を与えている。照射時間に関しては、いつでも作業できる・結露しない等の理由から 24 時間連続照射がオペレーション的に良いと考えられるが、現状では空調コストの問題から暗期を設けている工場がほとんどである。また、現在の植物工場における葉菜類の生産コストに電気代が占める割合は約 20 ~ 25 % であり^{5,6)}、その削減も急務とされている。

2015 年 3 月 10 日受付

2015 年 7 月 14 日受理

Corresponding author: Noriko Ohtake
(ohtake.noriko.xhtvm@showa
denko.com)

そこで本稿では、赤青の色と時間の照射パターンを変えることで、植物工場生産における赤青 LED 交互連続照射法 (SHIGYO 法) の生育促進効果および照射時間の効果を確認した。さらに、蛍光灯を使用した栽培法と消費電力量を比較することで、LED を使用した植物栽培における電気代のコストダウン効果についても検討を行った。

材料および方法

供試植物はリーフレタス (*Lactuca sativa* var. *crispa* 'レッドファイヤー' タキイ種苗) とした。種子をウレタンスポンジに播種して1日間暗処理し、播種後8～10日目まで昼白色蛍光灯 (FHF32-EX-N-H, パナソニック (株), 以下 FL. 光合成有効光量子束密度 (PPFD, P) $120 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 下で育苗した。その後、水耕装置 (TAPS-1SW, エスバックミック (株)) へ株間 15 cm で1試験区あたり16株を定植した。Table 1 に各試験における光照射条件を示す。日積算光量 (DLI) は試験1, 2の全ての試験区および対照区で一定とした。これまでの研究から、リーフレタスの SHIGYO 法栽培では照射時間を R12 時間 B12 時間とするのが最も効果的なこ

とがわかっている^{7,8)}。そこで、試験1および2において試験区には12時間ごとのRB交互照射区 (SHIGYO 法区, S 区) を設定した。予備実験でRB同時照射にてレッドファイヤーの最適 R/B 比は3であることを確認した (データ略)。そこで照射時間と R/B 比を変えずに DLI を対照区と一致させるため、S 区では R の光強度が B の3倍になるよう設定した。試験1の対照区は一般的な植物工場で採用されている明暗周期 (明期 16 時間, 暗期 8 時間) を採用し、RB 同時照射区 (RB16 区) および蛍光灯照射区 (FL16 区) とした。試験2については対照区の照射時間を24時間とし、RB 同時照射区 (RB24 区), および蛍光灯照射区 (FL24 区) を設定した。光源には直管型 LED ランプ (SHIGYO® 灯 RRB, 品番: UL0005#02, LED チップ B: GA2PT450G, R: HRP-350F, 昭和電工 (株), 発光効率 B: $1.14 \mu\text{mol s}^{-1} \text{W}^{-1}$ R: $1.62 \mu\text{mol s}^{-1} \text{W}^{-1}$, ピーク波長 B: 450 nm R: 660 nm, Fig. 1) を使用し, Table 1 の光環境条件で育成した。蛍光灯照射区の光源には FL を光強度に併せて4～6本使用した。気温は 23°C 一定, 相対湿度は 70 %, CO_2 濃度は 1000 ppm とし, 培養液は大塚 A 処方 (EC: 2.1 dS m^{-1} , pH: 6.0–6.5) で栽培を行った。播種後22日目および

Table 1 Detailed lighting conditions for each experiment.

Experiment number	Treatment code	PPFD ^z		LED Irradiation pattern	Irradiation time	DLI ^y
		R	B			
Exp. 1	S	120	40	alternative	R12h, B12h	6.9
	RB16	90	30	simultaneous	16h	6.9
	FL16	120		—	16h	6.9
Exp. 2	S	120	40	alternative	R12h, B12h	6.9
	RB24	60	20	simultaneous	24h	6.9
	FL24	80		—	24h	6.9

z: Photosynthetic photon flux density on the cultivation panel ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

y: Daily light integral ($\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$).

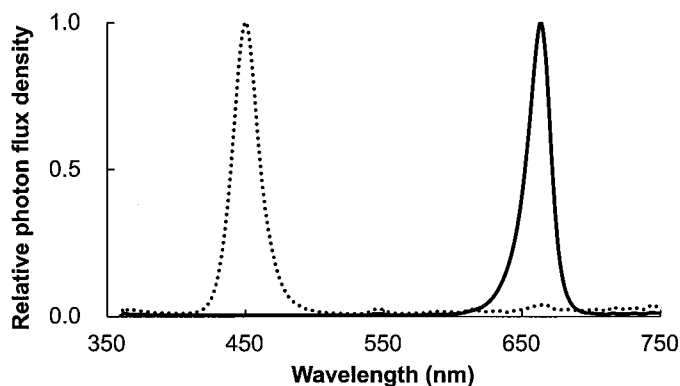


Fig. 1 Spectral curve of red and blue LEDs of Showa Denko K.K. Red and blue LEDs are dimmable individually.

32日目に可食部生体重を測定 ($n=6$) した。試験1の対照区 (FL16 および RB16) は比較のために播種後 35 日目まで栽培を行い、同様に可食部生体重を測定 ($n=3$) した。測定の際は全ての株を大きさの順に並べ、一番小さいものを除いた中央の大きさの株から大きい方と小さい方に均等の間隔で選抜した。統計処理にはエクセル統計 2012 ((株) 社会情報サービス) を使用し、Tukey-Kramer 法による多重比較検定を行った。

PPFD 測定には光量子計 (LI-250A, LI-COR) を使用した。ランプは 6 本を 9 cm 間隔で設置し、周囲を反射板で覆って測定を行った。ランプから 30 cm 下の栽培パネル面にセンサーを置いて 16ヶ所測定した平均値 (標準偏差は 10 % 以内) を PPFD の値とし、ランプを調光して Table 1 の条件に設定した。消費電力 (L) の測定にはクランプ電力チェッカー (CW10, 横河メータ&インスツルメンツ (株)) を使用し、蛍光灯 (安定器含む) および LED (内蔵電源ユニット含む) ランプに供給される交流電源ラインの消費電力を測定した。ランプの調光により PPFD を 0 から最大値まで変化させた時のそれぞれの L の瞬間値をプロットし、近似直線の傾きから消費電力あたりの光合成有効光量子束密度 (P/L) を計算した。

結果と考察

1. 試験 1

播種後 32 日目のリーフレタスの写真を Fig. 2 に示した。対照区と比較して、明らかに S 区のレタスのサイズが大きい様子が観察された。播種後 32 日目の可食部生体重 (Fig. 3a) は、S 区を 100 % とすると、RB 区 67 %, FL 区 50 % となった。すなわち、S 区は FL 区の 2.0 倍、RB 区の 1.5 倍となり、SHIGYO 法による生育促進効果を確認した。

2. 試験 2

Fig. 3b に、24 時間照射同士の栽培を比較した結果を示す。播種後 32 日目の可食部生体重は、S 区を 100 % とすると、RB 区 79 %, FL 区 72 % となった。すなわち、S 区は FL 区の 1.4 倍、RB 区の 1.3 倍となり、試験1より差は縮まったものの、SHIGYO 法による生育促進効果を確認できた。連続光照射を続けると品種によってはクロロシス等の生理障害がおこる場合もあるが、レタスは連続光耐性が高く、日長延長による生育促進効果の方が大きいと言われている⁹⁾。本試験においても、16 時間照射に比べて 24 時間照射の方が対照区を含めて生体重が大きくなったため、過去の報告を支持する結果となった。また、近年レッドファイヤー以外の品種に対する R と B の交互照射の効果についても報告されてきている。久

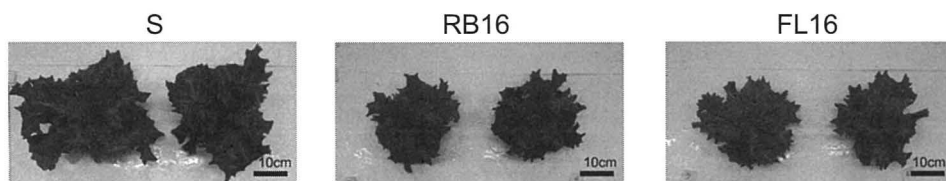


Fig. 2 Lettuces grown for 32 days under each of the treatment from Exp.1.

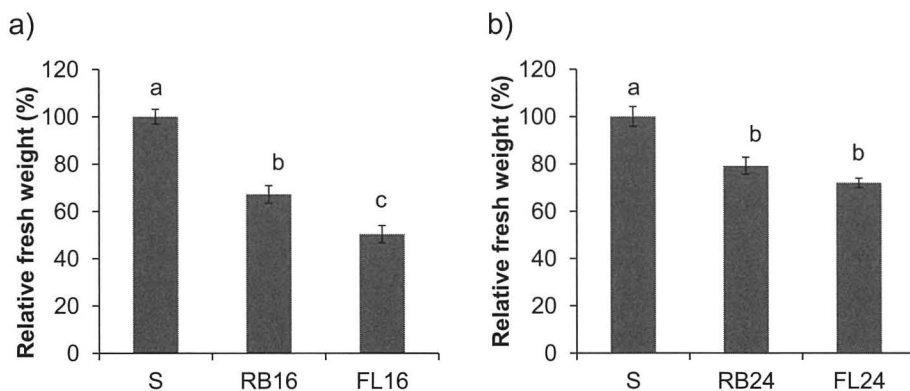


Fig. 3 The relationship between light condition and fresh weight: a) Exp.1, b) Exp.2. Data are presented as mean $\pm$ standard error. Different letters indicate the significance level of 0.05 performed by Tukey-Kramer's test ($n=6$).

Table 2 Effect of shortening the days before harvest.

Treatment	Days from sowing to harvest(d)	Days from planting to harvest(d)	Relative cultivation period after planting(%)
S	32	24	70
RB16	36	28	82
FL16	42	34	100

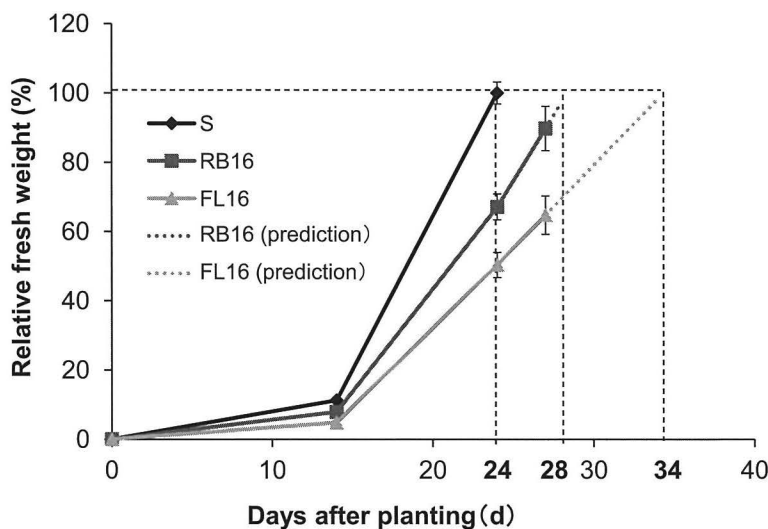
Table 3 Comparison of electrical power consumption under each light condition.

Unit	PPFD ^z		P/L ^y		Irradiation time h	Cultivation period after planting d	Relative fresh weight %	Electrical power consumption		Electrical power consumption per unit plant ^x	
	R	B	R	B				kWh	%	kWh plant ⁻¹	%
S	120	40	2.9	2.0	R12, B12	24	100	17.3	56	19	28
RB16	90	30	2.9	2.0	16	24	67	17.3	56	29	42
FL16	120		1.5		16	24	50	30.7	100	68	100

z: Photosynthetic photon flux density on the cultivation panel.

y: Photosynthetic photon flux density per unit electrical power. The values were calculated using results of Fig. 5.

x: Assumed 100 g of fresh weight per plant.

**Fig. 4** Growth curve after planting. The harvest date of RB16 and FL16 were estimated by extrapolation at the end of the known growth data.

野ら¹⁰⁾の報告では、グリーンウェーブに対してRとBの照射時間をずらして栽培した場合、RとBを同時に照射するよりも交互照射の方が生体重量大となることを示している。ただし、完全な連続照射ではなくわずかに暗期を設けた方が生育促進の度合いが高まることも書かれており、引き続き品種の違いに対するSHIGYO法の適用や照射パターンの最適化が求められている。地子ら¹¹⁾は、RとBのLED光の照射パターンを変えてコスレタスを栽培した際、同じDLI条件下でも青色光

単独照射の時間帯が存在すると形態に顕著な差がみられることを報告している。これはフィトクロムの作用によると考えられており、光質を変えることによる植物の形態コントロールへの可能性が示唆されている。本研究においてもRとBそれぞれの単色光照射時のレタスの形態の違いが観察されており、SHIGYO法の生育促進における一要因と考えられる。

3. 生育日数短縮の効果

播種後8日目で定植した場合の、定植後の成長曲線を

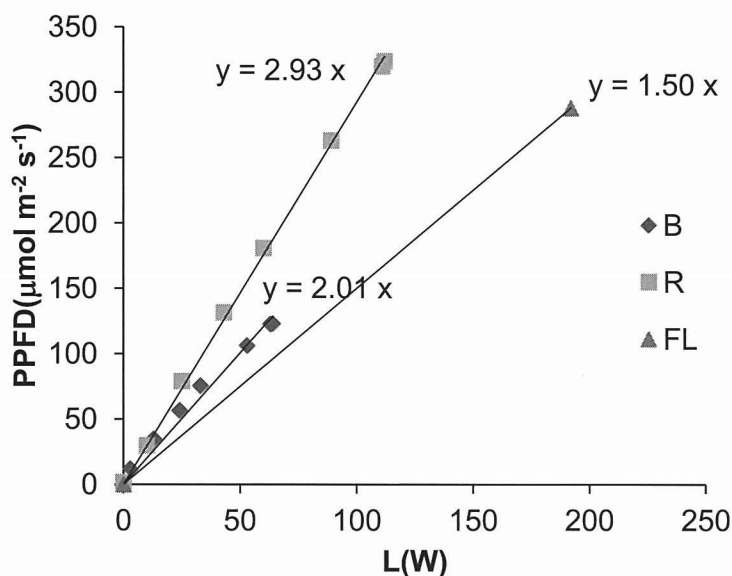


Fig. 5 Relationship between PPFD and electrical power. Linear approximations of each light condition are shown.

Fig. 4 に示す。S 区の収穫日（播種後 32 日目）の可食部生体重に対し、播種後 32 ～ 35 日目における RB 区、FL 区の測定データを直線外挿することにより、それぞれの対照区における収穫日を予測した。その結果、RB 区は播種後 36 日、FL 区は播種後 42 日と推定された。すなわち定植後日数としては S 区 24 日、RB 区 28 日、FL 区 34 日となる（Table 2）。ここから、S 区では定植後栽培日数の 30 %削減により、年間栽培回数を最大 42 %増大できると試算できる。

4. 消費電力量について

最後に、Table 3 に蛍光灯および LED を使用した際の消費電力量を示す。ここでは実際の栽培環境における光の照射量と消費電力の関係を比較するために、消費電力あたりの光合成有効量子束密度（P/L）というパラメータを使用した。これにより蛍光灯と LED という異なる灯具間の照射光量と消費電力を比較することが可能となる。栽培環境における実測値から計算すると、蛍光灯の P/L が $1.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{W}^{-1}$ であったのに対して、昭和電工（株）製 LED では、赤が $2.9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{W}^{-1}$ 、青が $2.0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{W}^{-1}$ であった（Fig. 5）。ここから定植後の栽培期間を通した消費電力量を計算すると、FL 区が 30.7 kWh に対して S 区および RB 区は 17.3 kWh となった。さらに、1 株（100 g）あたりの消費電力量を試算すると FL 区が $68 \text{ kWh plant}^{-1}$ に対して RB 区は $29 \text{ kWh plant}^{-1}$ 、S 区は $19 \text{ kWh plant}^{-1}$ となり、SHIGYO 法によりかなりの電気代削減効果が見込めることが示唆された。

摘 要

植物工場のリーフレタス生産における赤青 LED 交互連続照射法（SHIGYOTM 法）の生育促進効果および照射時間の効果を評価した。一般的な明暗周期（明期 16 時間、暗期 8 時間）だけでなく、24 時間連続照射の対照区（赤青 LED 同時照射区、蛍光灯照射区）と比較しても、同じ栽培期間あたりの SHIGYO 法区の可食部生体重が有意に大となり、生育が促進されることがわかった。さらに SHIGYO 法では収穫サイズになるまでの生育日数短縮効果により年間栽培回数を増大できる。LED と蛍光灯の消費電力の比較から、植物栽培において LED を使用すると 1 株あたりの消費電力量が低いことがわかった。これらの結果は、今後より効率的な植物工場運営に貢献できるものと期待される。

謝 辞

本研究の遂行にあたりご協力頂いた山口大学農学部 執行正義教授、千葉大学大学院園芸学研究科 後藤英司教授ならびに彦坂晶子准教授に心より謝意を表す。

引用文献

- 1) Watanabe H. Light-controlled plant cultivation

- system in Japan –development of a vegetable factory using LEDs as a light source for plants. *Atca. Hortic.* 907: 37–44. 2011.
- 2) Goto E. Plant production in a closed plant factory with artificial lighting. *Atca. Hortic.* 956: 37–49. 2012.
 - 3) 後藤英司. LED の植物育成分野への応用 (<特集> LED 照明の実際). *照明学会誌*. 89: 142–144. 2005.
 - 4) 下川陽大, 荒博則, 殿岡裕樹, 山内直樹, 執行正義. 赤色および青色 LED の交互照射がリーフレタスの生育に及ぼす影響について. *園芸学研究*. 12 (別冊 1): 155. 2013.
 - 5) 高辻正基. 完全制御型植物工場のコストダウン手法. *日刊工業新聞社*. 1–133. 2012.
 - 6) 古在豊樹. 人工光型植物工場の進歩と発展方向. *日本農学アカデミー会報*. 21: 3–18. 2014.
 - 7) Shimokawa A, Tonooka Y, Matsumoto M, Ara H, Suzuki H, Yamauchi N, Shigyo M. Effect of alternating red and blue light irradiation generated by light emitting diodes on the growth of leaf lettuce. *bioRxiv*. 2014. (<http://dx.doi.org/10.1101/003103>).
 - 8) 大竹範子, 米田正, 鈴木廣志, 執行正義, 古山真一, 彦坂晶子, 後藤英司. 赤青 LED 光の交互連続照射条件下で育成したリーフレタスの成長解析. *園芸学研究*. 13 (別冊 2): 187. 2014.
 - 9) 畑直樹, 榊田正治, 小林昭雄, 村中俊哉, 岡澤敦司, 村上賢治. 閉鎖型植物工場における連続光の利用 (第 2 報) 連続光下におけるキク科・その他作物の生育様相ならびに障害発生. *植物環境工学*. 23: 127–136. 2011.
 - 10) 久野裕一郎, 清水浩, 中嶋洋, 宮坂寿郎, 大土井克明. 赤色光と青色光の照射パターンおよび光質の違いによる葉菜類の生長への影響. In: *日本生物環境工学会 2014 年東京大会 講演要旨*. 東京. 9 月 8 日–11 日. 50–51. 2014.
 - 11) 地子智浩, 松田怜, 富士原和宏. 分光光量子束密度の周期的な変化がコスレタスの成長および形態に及ぼす影響. In: *日本生物環境工学会 2014 年東京大会 講演要旨*. 東京. 9 月 8 日–11 日. 78–79. 2014.