



# LEDによる葉菜類の夜間補光 (簡易版)

農研機構 農村工学研究所  
農地基盤工学研究領域

筑波大学  
生命環境科学研究科

## 目次

- はじめに.....	2
- LED 照明の利点.....	5
- 研究成果.....	7
- LED 補光の手引き.....	11
- 今後の課題.....	15
- 引用文献.....	16

## はじめに



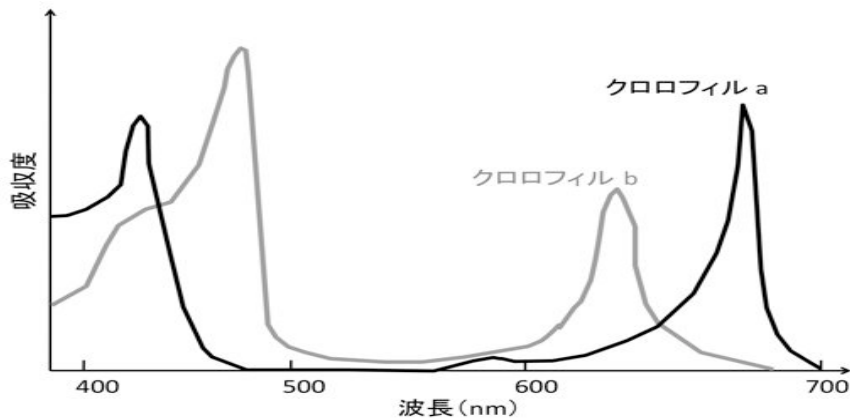
光は植物の生長に光量、光質、光周期という3つの要素から影響を与えます。

**光量** 日射の強度や光線量に相当し、季節によってその量は変化します。一般的に日射は、夏には最大量に、冬では最小量となります。植物が受ける日射が多いほど、光合成を介した作物の成長量も増大します。反対に日射量が減少するにつれ、光合成による同化産物量が減少し、作物の成長速度は低下します。このような日射は、露地でも温室でも、寒冷紗や遮光カーテンにより減少させることは可能であり、また反対に、作物体下への反射型マルチの設置や、人工照明による補光によって、作物体の受光量を増やすことも可能です。

**光質** 植物表面に達する光の色や波長分布特性のことを示します。太陽光はプリズムによって赤、オレンジ、黄色、緑、青、紺、紫といった色に分けられます。その中で、青色から赤色の波長域に相当する光放射は、植物の生長に最も影響を及ぼすと考えられています。

---

光合成で光エネルギーを吸収するクロロフィル（葉緑素）は可視光の波長をすべて同じように吸収するわけではありません。クロロフィル a<sub>1</sub> は植物にとって最も重要な光吸収体ですが、緑色光の波長域に関しては相対的に吸収程度が低くなります。このことが、クロロフィルが緑色をしている理由であり、また、多量のクロロフィルを含む、植物体の葉が緑色でもある理由となっています。

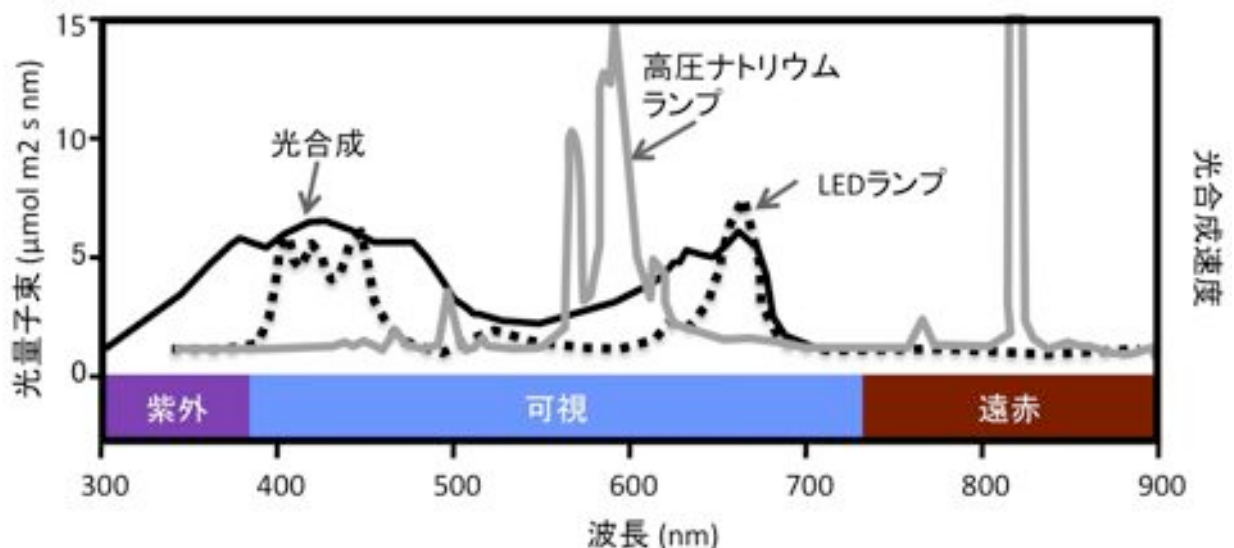


クロロフィルの光吸収特性

グラフに示したように、クロロフィルの光吸収特性は、430 と 662nm の波長で最大となります。可視光波長域における光合成効率もまた、クロロフィル a の吸収ピーク波長におおよそ一致しています。ただ、植物の光合成収量は、単純にクロロフィル a だけに頼っているわけではなく、クロロフィル a とは異なる波長を吸収する他の色素吸収体も影響しています。

### 植物はどんな光を必要とするか？

光合成有効放射（PPF）と呼ばれる光が、植物生長に不可欠です。PPF とは、植物の葉に含まれるクロロフィルが、光合成のエネルギーとして吸収できる波長である、400-700nm の波長域の光放射を表しています。



**光周期**：光周期とは、明期および暗期の周期を表します。今日、光周性をもつ植物の開花は、明期の長さではなく、暗期の長さによって左右されていることが判明しています。



施設園芸生産において、日射量は作物生産の制限要因となることがあります。安定かつ効率的な作物生産のためには、光強度や光質ならびに光周期を、それぞれ季節や日射の変動に応じて作物の要求に適したものに調整する必要があります。更に光は、温度や湿度、CO<sub>2</sub>のような他の環境要因と合わせて最適化されなければなりません。北欧や北米の高緯度地帯では、園芸作物の周年生産を確保するには人工光源による補光が不可欠となっています。一般的には、高圧ナトリウムランプ（上写真参照）を補光用の光源として使用します。しかしながら、このような人工照明は、電気エネルギーを大量に消費する一方、熱放射量が多く、作物体への近接照明に向きません。それに対して、株間への近接照明も可能な発光ダイオード（LED）などの新たな人工照明システムが開発されつつあります（ヘミング，2011年）。



わが国では、2000年代より、効率的な光源としてLEDを植物工場に導入する事例が出てきました。LEDは、従来の光源よりも電気エネルギーから光エネルギーへの変換効率が高く、冷却負荷も小さくなるので、照明と冷房の電力コストを削減することが期待されています（後藤，2012年）。

## LED 照明の利点

### 1. 対象となる光出力

発光ダイオード (LED) は、植物の形態形成に関わる光受容体であるフィトクロムが吸収する赤色光や遠赤色光などの特定波長域、あるいは葉の光合成作用波長域でもある赤色光や青色光をピーク波長として照射することが可能であり、作物生産の目的に合致した効率的な照明器具となる可能性を秘めています。

### < LED 照明の植物生長への3つの利用方法 >

1. 人工光型植物工場の主光源（光合成促進および形態形成制御）
2. 光合成促進のための補光光源
3. 花成誘導制御のための電照用光源

## 2. ランニングコスト

LED を光源として使用する主な利点は、商業温室での電気代の低削減という点にあります。すなわち LED は、熱放射が比較的少ない一方、植物の成長にとって不要な波長分布、すなわち非効率的なエネルギー負荷部分が少なく、植物が応答する特定の波長域だけを放射ことから、同じ生育効果を得るために必要な電気料金を低減させることが期待できます。

## 3. 連続照明

LED による照明は、熱放射が大きい光源と比較して、そのストレス的影響が小さいと考えられます。また、照射波長域を選択することにより、フィトクロムなどの光受容体を刺激して、形態的な変化を引き起こすリスクを低減することもできます。

## 4. 環境への利点

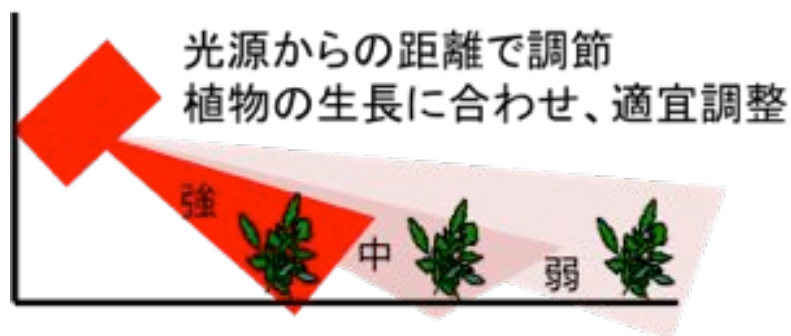
LED 照明は、低消費エネルギー光源への切り替えとなるので、環境にとっても利点があります。LED 光源の消費電力は小さいので、特に遠隔地における太陽光発電や風力発電での自己完結型のエネルギーシステム下での使用も可能でしょう。LED は、白熱電球よりもはるかに少ないエネルギーしか消費しないのでエネルギーコストの大幅な削減につながります。また製造面でも LED は、他の光源よりエネルギー消費が低いので、その利用は、さらに環境負荷を低減することにつながるでしょう。



シバサキ（株） 高出力赤色 LED （ピーク波長：660 nm）

## 研究成果

温室補光における、LED 補光は、注目を集めるテーマでもあります。本研究では、LED を使った終夜間照明により、低コストで作物の収量と品質を向上させる可能性について検討を行いました。ここでは、作物群落上部で、光合成有効放射束 (PPF, 400-700 nm) として、 $50\sim 300\ \mu\text{mol m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$  の光強度により夜間(17:00-7:00)連続的な照明を行いました。



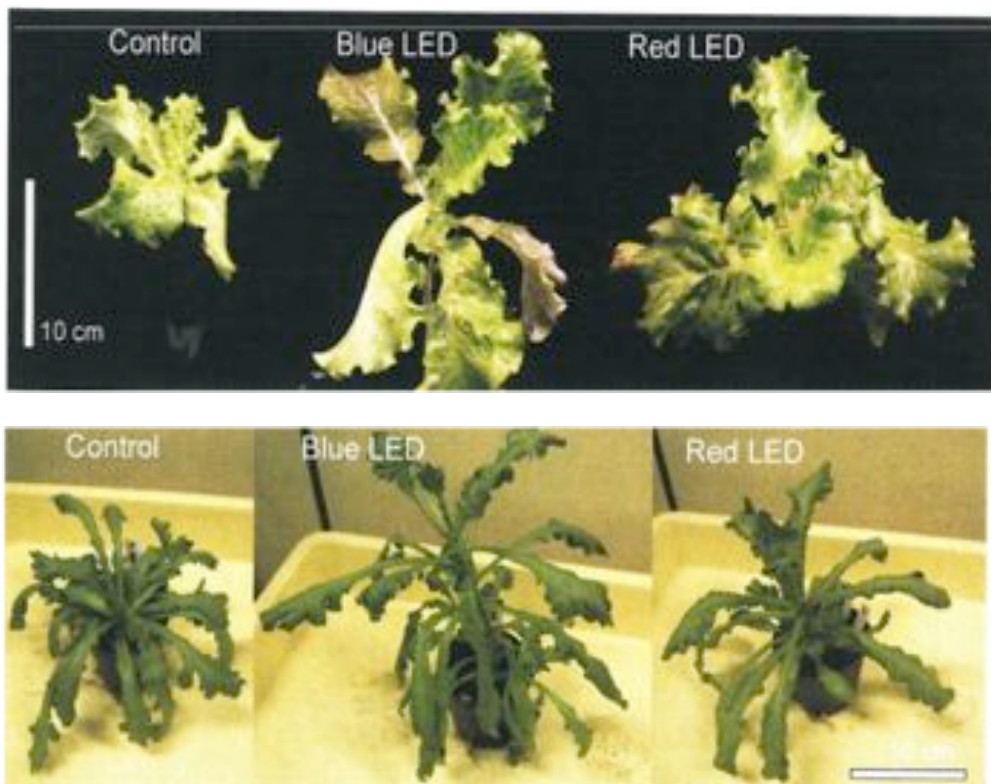
実験での LED 照射の様子

最初に、閉鎖型グロースチャンバーにおいて、異なる波長特性をもつ LED による終夜補光の影響を、葉菜類（レタス、シュンギク、チンゲンサイ、葉ネギ）各 3 品種について調べました。蛍光灯による照明を明期とし、10 時間点灯



しました。一方、夜間に相当する時間を 14 時間と設定した上で、終夜補光処理区については、群落上部で  $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  となるよう LED による照明を行ないました。いずれの作物も、本葉 4~6 枚から 3~5 週間実験処理を行いました。日中と夜間の気温はそれぞれ  $25^{\circ}\text{C}$  と  $20^{\circ}\text{C}$  としてそれぞれ一定としました。相対湿度は、日中と夜間とも 70% としました。

上記試験の結果、赤色光および青色光で補光したレタス上部の生鮮重は、補光しなかった対照区より大きく増加しました。赤色光および青色光はシュンギクでも同様の効果を示しました。しかしながら、青色光による夜間補光は、レタスやシュンギクの茎ならびに葉の伸長を促進し、形態的にやや徒長的な外観となりました (Sase et al., 2012)。



グロスチャンバーにおいて  
青色 LED (Blue LED), 赤色 LED (Red LED) による暗期中補光が  
レタス (上) とシュンギク (下) の生育に与える影響 (Control は無補光)

続いて、温室における夜間補光の周年栽培試験を実施しました。レタスとシュンギクについて、赤色 LED を使い、光強度別（50, 150, 300  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、以後それぞれ RL 区、RM 区、RH 区と表示する）に夜間補光の影響を評価しました。

年間を通して RH 条件の夜間補光下で成長したレタスの生体重と葉枚数は、無補光に比べて大きく増大しました。ただし、対照区では見られなかったチップバーンが RL、RM、RH いずれにおいても観察されました。



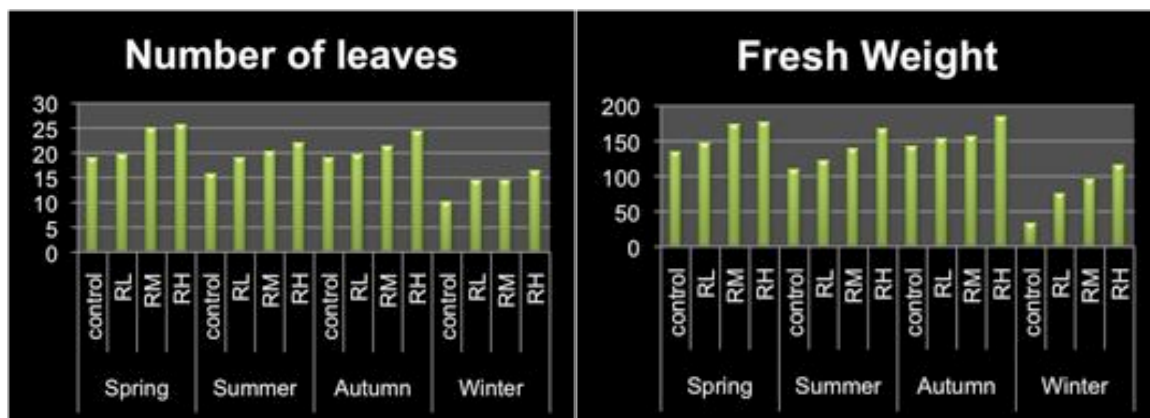
春作

夏作



秋作

冬作



1 株の葉数 (枚)

1 株の生体重 (g)

温室におけるレタスの夜間補光の周年栽培

左から 無補光 (CONTROL)、赤色 LED,  $50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  による補光 (RL)、 $150 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  による補光 (RM)、 $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  による補光 (RH)

シュンギクの場合、RH 条件の夜間補光下においてレタスと同様、生体重が増加しました。RM 区では、春と夏には終夜補光によって葉枚数が増加した一方、RH 区では秋と冬に葉枚数の増加が観察されました。



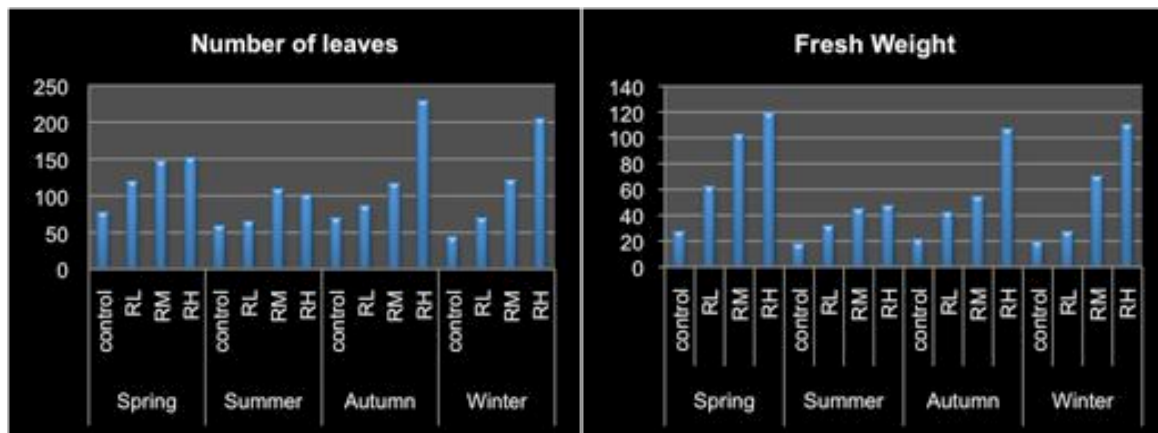
春作

夏作



秋作

冬作



1 株の葉数 (枚)

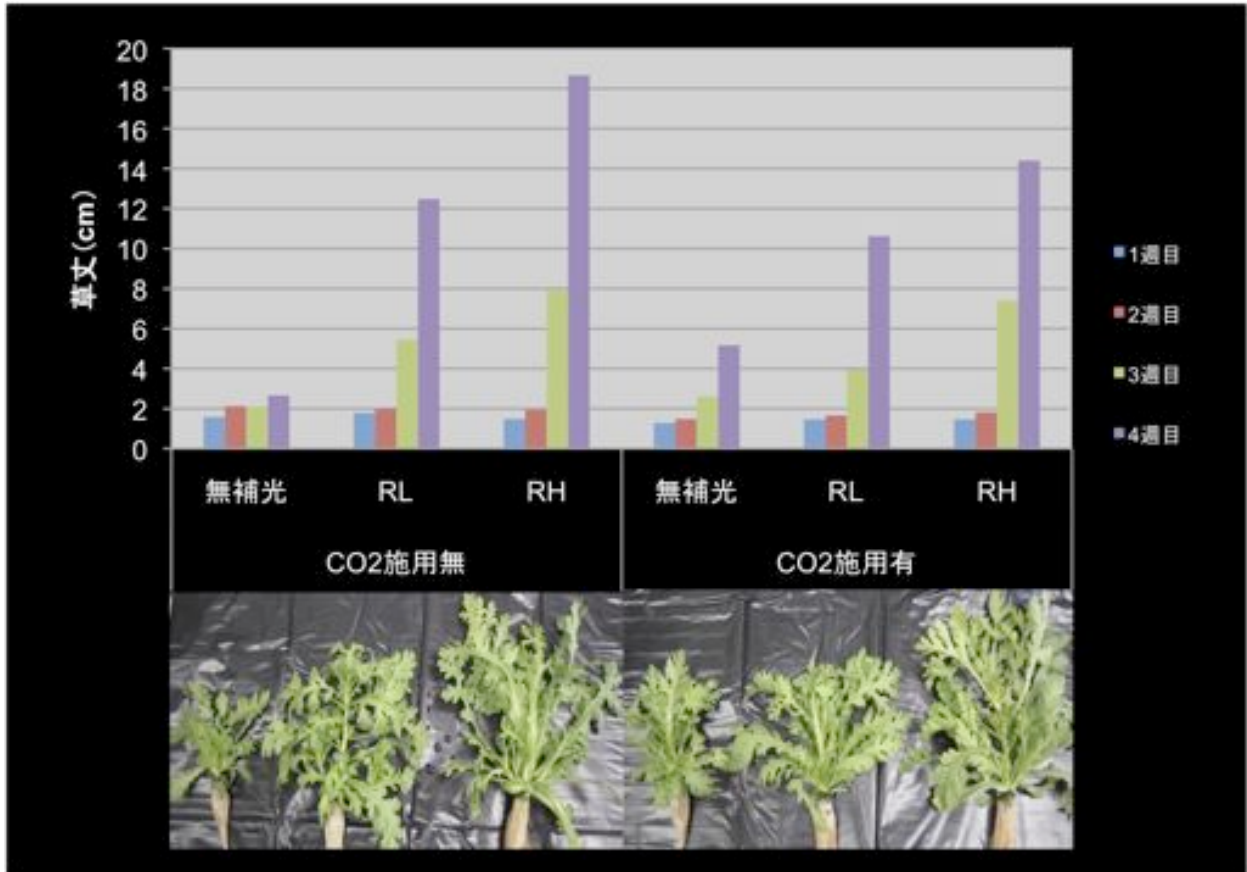
1 株の生体重 (g)

#### 温室におけるシュンギクの夜間補光の周年栽培

左から 無補光 (CONTROL)、赤色 LED,  $50\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  による補光 (RL)、 $150\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  による補光 (RM)、 $300\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  による補光 (RH)

2012 年冬期には、赤色 LED による夜間補光に加えて、補光中の  $\text{CO}_2$  施用処理効果をシュンギクで調査しました。夜間 (17:00-7:00) に  $\text{CO}_2$  施用を行ない、温室内  $\text{CO}_2$  濃度を  $1000\mu\text{l L}^{-1}\text{CO}_2$  に高めました。また同時に、100 あるいは  $300\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  の赤色光による夜間補光を実施しました。この

結果、CO<sub>2</sub> 施用の効果により、補光の生育促進効果が増加した一方、シュンギクの茎伸長が抑制され、やや植物体が矮化する傾向も示されました。



シュンギクの夜間補光中の CO<sub>2</sub> 施用処理

左から 無補光、赤色 LED, 100  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  による補光 (RL)、300  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  による補光 (RH)

## LED 夜間補光の手引き

以上の研究成果から、葉菜類の LED 夜間補光方法をまとめると以下ようになります。

### 1. どのタイプの LED を使えばいいか？

葉菜類の生体重増大を図る場合、赤色 LED (660nm) を使用するのが良いでしょう。青色や緑色でも無補光に比べれば生育促進効果はありますが、今回調査した結果では、

赤色光の生育促進効果が大きく、また徒長などの形態的な影響が少ないという評価となりました。また、赤色 LED は、比較的安価で入手しやすいのも利点です。

## 2. 照射強度は？

夜間補光の光量が大きいほど、収量増大効果も促進されます。シュンギク（‘大葉’，‘中葉’，‘株張り中葉’）ならびにレタス（‘グリーンウェーブ’，‘マノア’，‘レッドファルダー’）の両作物とも、照明強度に比例して生育は促進され、 $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ （PPF）では  $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  で照明した場合よりも 40%増加しました。しかし、急激な成長に伴いチップバーンの発生が見られることがあり、品質面に弊害が発生する場合がありますので、極端に高い光強度での照明や、チップバーンが発生しやすい夏季などには、その使用に注意が必要です。今回の試験結果より、赤色 LED による夜間補光については、PPF で  $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  前後を推奨します。

## 3. 補光時間は？

今回の研究は終夜間の補光を対象としたものです。葉菜類の場合は栽培期間が果菜類に比べて短く、栄養成長のみを生育対象とするため、終夜補光でも光周期リズムの変調による収量の低下は認められませんでした。

光強度を 2 倍とし補光時間を半分とした場合も、総受光量が終夜補光と同じなので、生育促進効果に違いはありませんでした。ただし、照明時間が短い場合、計算上の受光量が同じであっても、生育促進効果は、若干低下する傾向にあります。

#### 4. どの作目、品種を選べばいいか？

レタス、シュンギク、チンゲンサイや葉ネギのいずれの作目も、夜間補光による増収効果が期待できます。葉ネギの場合、‘九条太’で特に効果が大きく、 $50\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の青色光によって生体重は無補光の約 1.3 倍になりました。

#### 5. 期待される増収効果は？

レタスの場合、日射量が高い 5～9 月期は、無補光に対して夜間補光では、3 割から 5 割程度の重量増加となります。10～12 月期は、3 倍から 4 倍の増収が期待できます。

シュンギクの場合、夏期を除き概ね無補光の 4～6 倍程度の地上部生体重量の増加が見込めます。また、10～11 月や 12 月期は、日射量の減少に伴って無補光での生育速度が低下する一方、夜間補光では高い生育速度を示し、春から夏作時の無補光区におけるのと同程度の地上部生体重量を達成することができました。

#### 6. 期待される高品質化は？

アスコルビン酸に関しては、補光による有意な変化は観察されませんでした。一方、抗酸化機能が期待されているプリフェノール的一种であるクロロゲン酸については、レタスの場合、強光強度の補光であれば、通常  $6 \text{ mg } 100\text{gFW}^{-1}$  の含有量が 30%程度増加することが確認されました。

#### 7. 季節別の栽培管理の留意点

春) レタスの場合、春から夏にかけて、 $100\sim 300\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  の光強度による夜間補光が生育促進効果を発揮します。

夏) 生育促進効果は若干劣るものの、若葉におけるチップバーン発生を抑えるため、補光強度を弱めるなどの調整が必要です。

＜シュンギクの場合は、夏は補光の生育促進効果は、他の季節に比べて低下することにご留意下さい。＞

秋～冬) 春作同様に、 $100\sim 300\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$  の光強度による夜間補光が生育促進効果を発揮します。

## 8. チップバーンへの対処法

夏季の強日射時期については、補光強度を弱めると同時に、植物体に対して、循環扇による常時風速 70cm/s 程度の条件で送風することで、チップバーンを減らすことができます。夜間補光下においてももっとも激しくチップバーンが発生したシュンギクの場合でも、中光強度の補光において、実験では、チップバーンの発生を、送風が無い場合と比較して、送風処理によって半減させることができました。強光強度でも、送風により成長点付近で、2mm 以下の褐変が若干発生するまでに抑えることができました。



チップバーン発生の様子

## 9. さらなる増収アップ法 (CO<sub>2</sub>施用)

光-光合成曲線から、補光強度に比例してレタスやシュンギクの最大光合成速度の若干の低下が確認されました。すなわち、暗期中の終夜補光による光合成能力の低下は、過剰な光照射による光合成系への何らかの負荷がある可能性が考えられます。その分、夜間補光に 1000ppm 程度の CO<sub>2</sub> 施用を加えることで、レタスに関しては光合成能力および生育に改善が閉鎖型実験温室では確認されました。

実際の温室で検証したところ、レタスに関しては、弱光補光区では、CO<sub>2</sub> 無施用に比べて 12% 地上部生体重が増加しました。しかしながら、強光補光区では、CO<sub>2</sub> 施用の有無で生育促進効果に大きな違いは見られませんでした。また、レタスのアスコルビン酸含有量は CO<sub>2</sub> 施用により増加する傾向がありました。

シュンギクの場合は、補光に CO<sub>2</sub> 施用を加えることによって更に生育が促進され、葉枚数、地上部生体重、地上部乾物重が、CO<sub>2</sub> 無施用のものと比較し、増大する傾向がありました。

## LED 照明の将来と今後の課題

温室栽培に適した LED 補光技術が確立できれば、エネルギーの節約と収量の増加、高品質化に大きく貢献するでしょう。ここでは、葉菜類で得られた試験結果から得られた LED 補光技術を紹介させていただきました。しかしながら、安定的な商業生産の実現に向けて、補光時間や光強度の調整、昼間の遮光、植物体への送風、品種の選定など、



今後さらに検討していく必要があります。また、葉菜類に適した専用の LED 補光装置の開発，製造も望まれます。

## 引用文献

Arizona Cooperative Extension, College of Agriculture, The University of Arizona [homepage on the internet]. Arizona: MG Manual Reference Ch.1, pp. 30-33 [cited 2013 Sep 12]. Available from: <http://ag.arizona.edu/pubs/garden/mg/botany/environmental.html>

Mitchell, C., Both, A., Bourget, M., Burr, J., Kubota, C., Lopez, R., Morrow, R. and Runkle, E. 2012. LEDs: The Future of Greenhouse Lighting. *Chronica Horticulturae*. 52: 5-13.

Fukuda, N., Suzuki, K. and Ikeda, H. 2000. Effect of supplemental lighting from 23:00 to 7:00 on growth of vegetables cultured by NFT. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 69:76-83.

Goto, E. 2012. Plant Production in a Closed Plant Factory with Artificial Lighting. *Acta Hort.* 956: 37-49.

Hemming, S. 2011. Use of Natural and Artificial Light in Horticulture-Interaction of Plant and Technology. *Acta Hort.* 907: 25-35.

Sase, S., Mito, C., Okushima, L., Fukuda, N., Kanesaka, N., Sekiguchi, K., Odawara, N. 2012. Effect of overnight supplemental lighting with different spectral LEDs on the growth of some leafy vegetables. *Acta Hort.* 956: 328-334.

## LED による葉菜類の夜間補光（簡易版）

2013 年 10 月 21 日 初版 1 刷

農研機構 農村工学研究所 農地基盤工学研究領域 農業施設工学担当

筑波大学 生命環境科学研究科

著：福田 直也，ウィモンワット バンパティ（訳 奥島里美）

発行：〒305-8609 茨城県つくば市観音台 2-1-6 農研機構 農村工学研究所

印刷：佐藤印刷株式会社

本書に掲載した研究成果は、

農林水産省委託プロジェクト「生物の光応答メカニズムの解明と省エネルギー，コスト削減利用技術の開発」によって実施された「野菜等の光応答メカニズムの解明と省エネルギー，コスト削減利用技術の開発」のうち「LED を利用する葉菜類の補光栽培技術の開発」で得られた成果です。