固体光源を用いた植物工場

村瀬 治比古

大阪府立大学 (〒599-8531 大阪府堺市中区学園町1-1)

Application of Solid State Lighting Sources in Plant Factory

Haruhiko MURASE

Osaka Prefecture University, 1-1 Gakuencho, Sakai-shi, Osaka 599-8531

(Received January 24, 2011)

Essential resource elements in crop production are light, water, carbon dioxide and fertilizer. Optimum design for air-conditioning and lightings in plant factory system is required to realize the economical operation of plant factory because most energy consuming elements of plant factory system are air-conditioning and lightings. In this sense application of solid state lighting sources such as LED in plant factory system have been promoted to expect some reduction of running cost in lighting. Research work of solid state laser application in plant factory has just started recently at Osaka Prefecture University Plant Factory Research Center. The latest development of laser application research in plant factory will be reported in this article.

Key Words: Laser, LED, Photosynthesis, Photoresponse, Laser scan

1. はじめに

植物工場の定義は、施設内で植物の生育環境(光, 温度, 湿度, 二酸化炭素濃度, 養分, 水分等)を制御して栽培を行う施設園芸のうち, 環境及び生育のモニタリングを基礎として, 高度な環境制御と生育予測を行うことにより, 野菜等の植物の周年・計画生産が可能な栽培施設とされている[†]。また, 次の2つのタイプに区別している。

- a. 「完全人工光型植物工場」: 閉鎖環境で太陽光を使わずに環境を制御して植物の周年・計画生産を行う施設。
- b. 「太陽光利用型植物工場」: 温室等の半閉鎖環境で太陽光の利用を基本として, 雨天・曇天時の補光や夏季の高温抑制技術等により周年・計画生産を行う施設。

植物工場は自然環境にあまり左右されずに狭い土地で作物を大量生産できるという特徴を有している。これは水耕栽培と高度環境制御の組み合わせによって達成できる。ただ, 太陽光利用型と完全制御型とはかなり考え方が違う。太陽光利用型は施設園芸の水耕栽培の技術的延長上にある。施設園芸は露地栽培の冬の問題を解決す

るために登場した。しかし, 逆に夏は, ガラスハウスなどの施設内が高温になりすぎて一般に栽培が困難になる。この夏を克服することは, 日本のような高温多湿のところでは容易ではない。太陽光利用型植物工場は寒冷な北欧やアメリカの乾燥地帯で成立しやすい。夏に遮光程度で暑さを和らげたり, 安価な蒸発冷房が使えるからである。

一方, 完全制御型植物工場では人工照明を使い, 主要な環境条件をほぼ完全に人為的にコントロールする。四季の変化や立地条件を問わない生産ができるという意味で理想的な植物工場であり「動く農業」とも言われる。また土地生産性もきわめて高くなり, 露地栽培の数十倍から百倍に達する。しかし一般に高い初期投資, および高い電気代等の問題もある。植物工場の最大の意義は, 自然環境にあまり左右されない生産が可能ということと, 土地制約からの解放である。その他に無農薬栽培ができる, 連作障害がない, 自動化・省力化が可能である, 作業環境が良好であるなどの利点を有する。したがってわが国のように土地の狭い国や, 自然環境の厳しい地域で重要な食料生産技術といえる。

[†]「農商工連携研究会植物工場研究会ワーキンググループ報告書, 2009」: URL: http://www.maff.go.jp/seisan/plant_factory/p_working_group/index.htmlおよびURL: <http://www.meti.go.jp/press/20090424004/20090424004-3.pdf>

2. 植物の光反応

植物の光反応は、光合成と光形態形成に分かれる。光合成は、光エネルギーにより無機物から有機物を合成する反応である。光形態形成は、光を信号として利用する形態的な反応で種子発芽、花芽形成、葉の形成、気孔開閉、葉緑体運動、光屈性などである。

植物に影響を及ぼす主な光環境の要素として、光質（波長など）、光強度、日長（または明期）がある。光質は、光強度と異なり質的な光情報として植物に作用して、さまざまな形態形成反応とそれに伴う発育に影響を及ぼしている。

植物の光反応で最も重要な光合成において植物が利用する波長域(400~700 nm)が限られている(Fig. 1)。波長域(400~700 nm)は可視光域にはほぼ一致しているが、この領域の光を特に光合成有効放射と呼ぶ。光合成の光化学反応量は、この波長域の光子数に比例するため、光合成に有効な光量の指標には放射束ではなく光合成有効光子束(PPF: Photosynthetic Photon Flux)を使用する。この波長域の光は、光合成反応だけでなく光形態形成反応にも影響する。また、光質の特徴を説明するためにこの波長域を青色光(400~500 nm)、緑色光(500~600 nm)、赤色光(600~700 nm)の3波長域に分けることが多い。

光質は植物の生長に大きく影響し、その波長域は約300 nm~800 nmである。800 nm以上の赤外線は熱として作用するが波長依存性の反応はないといわれている。そのため、光質と植物生育の関係では300 nm~800 nmの波長域が重要とされる。また、紫外線の影響も大きく、特にUV-A(315~400 nm)とUV-B(280~315 nm)は数種類の形態形成反応を引き起こすことが知られている。可視光域で赤外線に隣接する700~800 nmの波長帯を遠赤色光(FR)と呼ぶ。近赤外光という呼び方もあるが、光生物学分野では遠赤色光を使用している。この波長域の光は光形態形成反応を引き起こすため、800 nm以上の赤外線と区別している。また、植物の緑色葉の波長特性は、青色光(400~500 nm)と赤色光(600~700 nm)の吸収率が高く、緑色光(500~600 nm)は透過と反射が多く、吸収率は低い。

3. 光受容体

植物には、光質を感受する物質、すなわち光受容体が

Fig. 1 Spectrum effective to photosynthesis.

複数存在する。主な光受容体として、赤色光および遠赤色光の受容体であるフィトクロム、青色光(UV-A)の受容体であるクリプトクロムおよびフォトトロピンがある¹⁾。フィトクロムは色素タンパク質で、主な吸収帯は赤色光であるが、青色光も吸収する。日長計測、光周性の調節、日陰の認識などの役割を担っている。フィトクロムの反応には、非常に少ない光量($10^{-1} \sim 10^{-2} \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$)で飽和する超低光量反応と、生育光のレベル($\sim 10^{-3} \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$)の光量で反応し、飽和する低光量反応がある。

フィトクロムは複数種存在し、超低光量反応と低光量反応には異なるフィトクロムが関与する。クリプトクロムとフォトトロピンは青色光からUV-Aの波長域を感知する色素タンパク質で、一般には赤色光受容体と呼ばれる。クリプトクロムやフォトトロピンも複数種が特定されている。光屈性や気孔の開閉などの作用に関わることが知られている。植物の器官、組織において、光受容体が感知したシグナルを伝達する実体としては、植物ホルモンが代表的である。光受容体の光シグナルの受容から、ホルモンなどによるシグナルの伝達、および関係する遺伝子発現に至る過程を光シグナル伝達系という。

4. 光強度と光合成速度

植物の呼吸とみかけの光合成速度(CO_2 の同化速度)との関係を図示したものは、光-光合成曲線と呼ばれる(Fig. 2)。暗黒下で見かけの光合成速度値はマイナスであり、その値は呼吸による CO_2 の放出速度を示している。光の強さが増すと、光合成による CO_2 の吸収と呼吸による CO_2 の放出が均衡して見かけ上光合成速度がゼロになる点(その光強度を光補償点という)に達する。さらに光強度が増すと、光合成速度は増加するが、やがて飽和し光強度に関係なく一定となる。このときの光強度を光飽和点あるいは飽和光強度、その光合成速度を飽和光合成速度と呼んでいる。光強度と光合成速度との関係には種間差がみられ、陽生植物(日差しを好み、直射日光下でよく生育するが、日陰ではうまく生育しない植物。日陰や弱光の室内では徒長し花が咲かなかったり、色が悪くなったりする。ヒマワリ、アサガオ、サルビア、バラ、ハイビスカスなど)と陰生植物(日陰や日差しの弱い場所を好む植物で直射日光下では葉が黄色くなったり葉

Fig. 2 Influence of light intensity to CO_2 exchange rate.

やけを起こし、枯れることもある。シダ類やセントポーリア、アナナス、ポトス、クンシランなど)との違いや、C3植物(イネやコムギなどの主要作物の他大多数の植物)、C4植物(強光、高温、低CO₂濃度および乾燥など厳しい環境下においても光合成を行うことができる植物でトウモロコシや雑穀など)との違いが大きい。陰性植物は、陽生植物より光補償点と光飽和点が低く、飽和光合成速度も低い。C3植物のみかけの光合成速度は最大日射の1/2~1/3の光強度で飽和するのに対し、C4植物のそれは最大日射量まで増加し続ける。このような光強度に対する植物の生理反応が作物栽培法や栄養診断と直接に関連することがある。これには、まず光-光合成曲線の測定から対象作物の光合成の特徴を知っておくことが重要である。植物工場の光源設計にはこの知見が不可欠である。

5. 植物工場に用いる光源

植物工場において植物育成用として実際に用いられている光源および今後利用の可能性がある光源をFig. 3に示す。主な用途は、植物工場用、施設園芸用、観賞植物用などで、利用目的としては、植物生産の主光源(光合成用:植物工場、試験研究用)と補助光源(形態形成・品質改善用:電照、着色促進、補光用等)に分類される。植物工場に使用されている植物育成用光源としては完全閉鎖型および太陽光併用型いずれもHIDランプ[高輝度放電ランプ: High Intensity Discharge Lamp(メタルハライドランプ、高圧ナトリウムランプなど)]が主流であったが今日では完全閉鎖型施設において蛍光ランプやLED(発光ダイオード)ランプで近接照射する方法が多く用いられている。これは、光源から放射される熱線の強度に起因する。HIDランプでは入力エネルギーの約50~70%が熱放射となり植物に放射熱により障害を与える可能性がある。それに対して、蛍光灯では熱放射は30%程度であり作物に光源を接近させて照明することが可能であ

る。これにより多段栽培を可能にし、垂直方向の空間利用効率を高めた植物工場が実現できる。さらに、単色性を特徴とするLEDでは熱放射はほぼ0%でありさらなる近接照明が可能になる。したがって、低輝度ランプで高照度が得られる(Fig. 4)。

6. 植物の短時間光応答

固体光源はその特徴として高速間欠点灯が可能である。間欠照明(パルス照射)によって10 ms程度の暗期をとれば、強光を植物に照射しても光飽和が起らず、連続光に比べて光合成の効率が高まる可能性があることが報告されている²⁾。白色LEDを用いて、サラダナでパルス照射実験を行った実験がある。光量を一定にして2 μ sから10 msまでいろいろな周期で栽培してみると、周期

Fig. 4 A Techno-Display Model of Plant Factory sponsored by Osaka Prefecture University was exhibited at the Shanghai World Expo 2010. A lighting source of surface mount LED (660 nm) was equipped. An automated trans-planter and an intelligent hydroponic system were devised.

Fig. 3 Classification of light source.

10 msの場合を除いて全体的に単位光量当たりの相対生長率(一日に重量として生長する割合), 光合成速度とも連続光にくらべてかなり増大し, 特に周期400 μ s(パルス幅200 μ s)の間欠光でサラダナの生長が顕著であった(Fig. 5). この場合, 連続光に比べて生長率, 光合成速度とも20~25%の増大が見られた. さらに明暗比を1:2にすると生長率はさらに増大した. 同様な結果は赤色LEDをレッドファイアー(リーフレタス的一种)にパルス照射した場合にも得られた.

7. 植物工場におけるLEDの利用

LEDは①長寿命, ②単色光, ③小型軽量, ④近接照明, ⑤省エネルギー, ⑥簡単点灯などの特徴があり, 人工光型植物工場への適用が有望視されている. 特に④近接照明が可能という特徴は工場内において多段栽培を行う上で空間利用効率を最大限に高めることが可能で, さらに①長寿命であるという特徴によりその狭小空間におけるランプ交換の頻度を著しく低くできる. その他, 一般照明や液晶バックライトなどLEDの適用範囲が拡大しており, 性能の向上と生産量増大に伴う低価格化が進んでいる. 近年, 高輝度白色LEDの低価格化が進み, 40000~50000時間といわれる長寿命が期待され一般照明用として普及し始めた. 3波長蛍光体白色LEDでは平均演色評価数が86~90という高演色性LEDもあり, 蛍光

Fig. 5 Watanabe et al. reported that the growth rate of lettuce was influenced by the pulse width.

灯に代わる植物工場の省エネルギー光源として今後用いられる可能性が十分にある.

光合成に有効とされる660 nmのLEDについてランプ効率80 lm/Wで発光出力11 mWという4元系(InGaAlP)のLEDチップが量産化され植物工場への応用の可能性が一気に高まった³⁾. 大阪府立大学植物工場研究センターなど多くの植物工場実証施設に実装されている. 植物の2次代謝物質の生産性は環境に依存する. 光は環境の重要な要素であり, 光を制御することで有用な2次代謝物質を植物に産生させ, いわゆる機能性(抗酸化力, 免疫力)作物を栽培することができる. LEDは単色光を得るのが容易であることから, 人工光型植物工場ならではの波長選択による高効率光合成(Fig. 6)を実現できるだけではなく, 機能性作物の栽培を目指す上でも欠かせない光源となることが予想される. 目標は, LEDで任意の光質を作って植物種ごと, さらに, 生育ステージごとにその光質を最適制御し, 作物では栄養成分をコントロール, 花卉においては開花時期を自在にコントロールするなどの生育制御を実現することである. Fig. 7は育成する植物の特性に合わせて, 赤, 青, 緑の3色のLEDを適切な比率で樹脂製直管に封入した光源を配した植物工場である.

8. レーザーによる植物栽培実験

1994年, 高辻らにより「レーザー植物工場」⁴⁾が提案さ

Fig. 6 Surface mounted red LED lighting source with water cooling system for lettuce plant production. (Cosmo Plant Co. Ltd.)

Fig. 7 LED lighting source was designed for the greening-moss production in plant factory. Number of RGB bullet-type LEDs molded on a narrow strip of printed circuit board were sealed in a water-tight plastic tube.

Fig. 8 Many pieces of red laser diode were used to perform a lighting source for lettuce production in a practical plant factory operation.

れてから久しいが、彼らの予測通り655 nm100 mWの半導体レーザー(LD)が1個250円で市販されている。このような状況の中で植物工場におけるLD利用に関する取り組みも行われている。グロースチャンバーの実験から実用サイズの栽培棚を用いた実験も行われる状況である。Fig. 8は、赤色LDを面実装した光源でレタスの育成実験を行っている様子を示している。

植物工場の光源を単に蛍光灯から固体光源に代えるだけでは、固体光源の特徴を最大限に活用しているとはいえない。固体レーザーはほぼ点光源であることからコリメートレンズを介しておおよそ平行光を得ることが可能で、植物工場における栽培環境を想定すると光源と照射面との距離が変化してもレーザービームのスポット径の変化が微小なため照度の変化も微少である。また、第6節で述べたように植物は短時間光応答を行うことが知られている。これらの特徴を考えて植物工場の光源としてLDをより効果的に利用しようとする試みもある。

高効率・高出力で高速パルス発振が可能なレーザー光源を必要領域内に限って走査しながら照射して植物育成に用いた場合には光源出力や空調負荷の低減により更なる植物工場の省エネルギー化が期待できる。今日行われている人工光による作物栽培では作付面に対して照明が施されているため、光が不要な作物株間にも光が及び無駄が生ずる。この課題については、走査型レーザー光源を用いることで、それぞれの位置と大きさなどを予め把握することで作物株のみを照明の対象とすることが可能である。このような観点からRGBの3色のLDを組み合わせた走査方式のレーザー光源を用いた植物育成の検討が行われている⁵⁾。

走査型3波長レーザー照明システムはFig. 9に示すように出力50~100 mWのR, G, BのLDからのレーザー光を同軸に配置し、偏向ミラーでレーザー光を走査する。従来の単色光源を並べた混色に比べて同軸で混色を行うことができるため照射場所による色斑の問題が全く発生しない特長がある。用いたレーザー照明システムのR, G, BのLDはそれぞれFig. 10に示す発光スペクトルであり、LDの出力は個別に256階調の制御が可能であるため様々な光源色を生成することが可能である。また、水平方向18 kHz、垂直方向60 Hzの走査型照明であるために照射範囲を任意にコントロールすることができ、たとえば、

Fig. 9 A schematic diagram of the lighting source devised with RGB laser scanning system.

Fig. 10 Spectrum of RGB laser lighting source in use.

Fig. 11に示すように照射面の左半分を白色、右半分を赤色に照射するなど可能である。

光照射開始後4日目までの育成状況をFig. 12にまとめる。レーザー照射により栽培した葉ダイコンは蛍光灯照射により栽培したものと同様に葉や茎が濃い緑色となっており、暗期に比べて走査型のレーザー照射でも光合成が行われていることが確認された。今回用いたレーザー光源の変調速度は25 MHz程度と高速であり、数10 nsの短パルス光に植物が応答し、光合成が行われたものと考えられる。このような走査型照明は白熱球や蛍光灯、

Fig. 11 A seen of laser lighting over plants.

Lighting Condition	Days after germination		
	1st Day	2nd Day	4th Day
Dark			
Fluorescent Lamp			
Laser (RGB)			

Fig. 12 Difference in growth with radish sprout depending on lighting conditions.

LEDのように植物が植えられている領域全体を照射するのではなく、Fig. 13に示したように画像処理用のカメラと組み合わせて光合成に関係する部分のみを照射することにより、より高度な植物工場内での省エネルギーを実現することも可能である。また、将来における可能性として、植物の一部分(生長点など)を特定し、加温のためにレーザー照射することで生長コントロールを行う、あるいは、病斑を検出しレーザーで殺菌処理を行うなど様々な応用が考えられる。

9. おわりに

人工光型植物工場においては光源効率が最重要課題である。発光効率および電力効率においてより優れた光源が求められる。作物によって必要光量および光質が把握できているので、その範囲で初期コスト、ランプ寿命、管理コストなどを総合的に考慮して光源が決まる。固体レーザーは多くの光源の中でも光源効率やコストの面でもユニークな特徴があり、最終的なコスト判断でそのユ

Fig. 13 Imaging technology can be utilized to develop more precise lighting system with laser scan technology.

ニークな特徴が寄与する部分が大きいため今後の発展が期待される。

地球温暖化、気候変動、環境汚染、少子高齢化、TPP (Trans Pacific Partnership) など食料を取り巻く環境が益々その混迷度を増している中で、今なら唯一わが国独自の新しい技術である植物工場をさらに洗練し世界に発信することが可能である。それがわが国の全産業活性化への一助となることは明白である。戦略的にも現在の農業を守ることは必要であろう。しかし、同時に植物工場のように多様な社会経済的産業要素を持つ新しい技術も戦略的に推進する必要がある。

植物生産における主要な要素は、光、水、二酸化炭素、および肥料である。植物工場においては、照明と空調が最もエネルギーを必要とする部分であることから、それらの最適化を図ることが植物工場システムの普及拡大を図る上で急務である。植物工場における固体光源の活用は植物工場システム全体の最適化に大きく貢献する。大阪府立大学の植物工場研究センターでは産学官連携を強化し、光源に関する新技術の開発やその実用化研究を行うため多くのプロジェクトが実施され、その成果に期待が集まっている。

参考文献

- 1) 竹田 淳子：光シグナルトランスダクション，蓮沼 仰嗣ほか共編(Springer-Verlag, Tokyo, 1999) 55.
- 2) 渡辺 博之，田中 史宏，吉野 徹：日本植物工場学会平成7年度大会要旨集(1995) 19.
- 3) 鈴木 廣志：植物工場大全，日経BP社(2010) 46.
- 4) 高辻 正基，山中 正貨：植物工場学会誌 6 (1994) 184.
- 5) 前田 重雄，他：日本生物環境工学会2010年大会講演要旨(2010) 68.