植物生産効率化のための光放射利用

Application of Optical Radiant Technology for the High Efficient Plant Production.

専門会員 洞口 公俊
Kimitoshi Horaguchi

正会員 村上 克介
Katsusuke Murakami

専門会員 向 阪 信 一
Shinichi Kohnaka

キーワード：光合成，光形態形成，光合成有効放射，植物用光源，植物工場，育苗工場

1. 植物成育と光放射

光放射（以下，光と記す）は植物成育における支配的環境要因の一つである。植物成育に対する光の関与は大別して，光エネルギーとして作用する光合成と信号（刺激）として作用する光形態形成がある。

光合成はクロロフィルの存在下で光エネルギーを利用してCO₂とH₂Oから有機物を合成し，O₂を放出する作用である。その効果の評価は光合成有効放射（PAR, Photosynthetically Active Radiation）と呼ばれる400～700nmの波長帯域に含まれる光合成有効光子束（PPF, Photosynthetic Photon Flux）で行なうことが

図1 植物の各種光反応および光量子感度の分光特性

定着している¹⁾。なお，植物体が実際に受光する光子の量は光合成有効光子照度（PPFD, Photosynthetic Photon Flux Density）で示される。

光形態形成は光のもつ情報（分光特性，日長時間，光の有無等）が信号となって茎の節間や葉の伸長，花芽の形成，種子の発芽等が制御される作用である。

植物の各種光反応およびその分光作用特性を表1，図1に示す。

2. 植物成育用光源

2.1 植物成育の観点からの光源の評価

光合成の活性は前述のように植物が受光するPPFDで評価する。既存の代表的な光源をPPF発光効率で評価すると図2の棒グラフ（左縦軸）のようになる²⁾。

また光形態形成のうち，植物の形状を左右する伸長成長は660nmと730nmを中心とする二つの波長帯に含まれる光子束PFの比（R/FR）に密接な関係があり，この値が大きいと葉面積や茎の節間が縮小・矮化傾向に，逆に小さいと伸長傾向になる植物が多い³⁾。既存の光源をR（600～700nm）/FR（700～800nm）で評価すると図2の白丸（右縦軸）のようになる²⁾。白熱電球（Lw）を除くと既存の人工光源の大部分はこの比が自然光（D₆₅）に比べて大きくなり，植物は矮化を示すことが多い。またLwではこの比が自然光よりも小さくなるため，葉・茎の伸長が促進傾向になることが多い。

2.2 4波長形植物成育用蛍光ランプ

蛍光ランプは他の光源に比べてランプからの赤外放射比率が少なく，しかもその赤外放射の大部分を占める長

表1 植物成育における各種の光の作用

植物成育	光の作用
光合成	光合成有効放射(PAR)と呼ばれる400～700nmの光が有効。数100～数1,000μmol・m ⁻² ・s ⁻¹ の強い光強度を要する。
光形態形成	茎・葉の伸長成長
	花・果実の着色
	種子の発芽
	茎の屈曲（屈光性）
	落葉・冬芽形成等の休眠誘導
	花芽の形成（光周性）

Lw：白熱電球
 FL-FR：4波長形植物用蛍光ランプ
 FL-D：昼光色蛍光ランプ
 FL-EX：3波長形蛍光ランプ(5000K)
 HF-X：水銀ランプ
 MF：メタルハライドランプ
 NH：高圧ナトリウムランプ
 D65：標準昼光(6500K)

図2 植物育成からみた各種光源の特性評価

波長の赤外放射はガラスなどで簡単に除去できる。このため、ランプを植物体に十分接近させて使用でき、比較的容易に効率よく、しかも均斉度の良好な所要のPPFDが栽培面に得られる。

蛍光ランプの中では3波長形蛍光ランプが最も高いPPF発光効率を得られ(図2)、実際に植物育成効率も高いことが植物育成実験からも検証されている²⁾。しかし、このランプは一般照明用光源のため、植物の光形態形成に關与するFRが、人間の視覚にはほとんど關与しないという理由から欠如している。このため本ランプの下ではR/FRが自然光に比べて大きくなり植物の育成が矮化傾向になる。

そこで3波長形蛍光ランプにFRを付加した分光特性をもたせ、光合成の促進と自然光の下での育成に近い形態での育成を目的とした4波長形植物育成用蛍光ランプが開発されている。その分光特性を図3に、光特性を表2に、また同一ランプ本数を使用した条件下での3波

図3 4波長形植物育成用蛍光ランプおよび3波長形蛍光ランプ(一般照明用)の分光特性

長形蛍光ランプと比較した4波長形植物育成用蛍光ランプの葉菜類を対象とした育成状況を図4、表3に示す。また植物工場システムでの葉菜類生産実験施設での使用例を図5に示す。

2.3 広照タイプリフレクタ形HIDランプ

HIDランプ(高輝度放電ランプ)は高ワットランプの使用によって大きな光出力が得られる。このため自然光と人工光との併用方式の植物工場や育苗工場等の使用光源として好適である。さらに、できるだけ小型・軽量と言う点からは、ランプバルブの内面に反射鏡を設け、しかも1.5m前後の比較的近距離から、植物体に均斉度の良好な光を供給できる広がりの大きな配光をもったリフレクタ形HIDランプの使用が、反射がきをランプに装着する必要がなく有利である。こうした目的のために開発された広照形タイプリフレクタ形メタルハライドランプとその配光特性を図6、図7に示す⁴⁾。

3. 植物生産への光放射利用

3.1 植物工場

植物の育成を制御された人工環境下で工業的に行なう植物工場の開発が活発化し、一部では実用プラントも実現している。現在のところ植物工場で生産される植物は、野菜のうちの芽菜類、葉菜類及び果菜類の一部である。生産対象植物に制約があるのは生産効率、経済性に難点をもつためであるが、人工光利用のタイプでは光エネルギーコストからの制約が大きい。植物工場の生産対象植物と光との関係を表4に示す⁵⁾。

光エネルギーコスト引き下げには高い植物育成効率を得

表2 4波長形植物育成用蛍光ランプの光特性

光源	定格ランプ力 (W)	光合成有効 光子束PPF ($\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$)	形態形成指数 R(600~700nm)/ FR(700~800nm)	平均演色 評価数Ra	色温度 (K)
4波長形植物 用蛍光ランプ	40	32.45	1.0	80	6700
(自然光D65)	—	—	1.1	100	6500)

(a) レタス

(b) コマツナ

図4 4波長形植物育成用蛍光ランプ(A)と3波長形蛍光ランプ(一般照明用)(B)の育成比較

表3 4波長形植物育成用蛍光ランプの育成効果(3波長形蛍光ランプの下での育成を1.0とした場合の相対値)

葉菜類の種類	地上部生体重	葉面積	植物高
レタス	1.7	2.2	2.5
コウサイ(ハーブ)	1.8	2.0	2.1
シュンギク	1.1	1.5	1.3
コマツナ	1.4	1.4	1.8
ミツバ	1.0	1.3	1.8
ハウレンソウ	1.1	1.3	1.1

図5 植物工場システムでの葉菜類生産実験設備
上段：自然光での栽培
下段：4波長形植物育成用蛍光ランプでの栽培
(写真提供：(株)植物情報物質研究センター)

図6 広照タイプリフレクタ形メタルハライドランプ

図7 広照タイプリフレクタ形メタルハライドランプ(400W)の配光特性

表 4 植物工場の生産対象植物と光条件

	生産対象植物	所要の光エネルギー
芽菜類	カイワレ、クレソン等が生産されており、今後、芽ジソ、紅タデ等の生産も見込まれる。	子葉の緑化工程でいくぶん光エネルギーを必要とする($7\sim15\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)が、全体として余り光エネルギーを必用とせず、光エネルギーコストを低く抑えられる。
葉菜類	主としてサラダナ、レタス、ホウレンソウ、ミツバ等の生産が行なわれているが、チンゲンサイ等の中国野菜やハーブをはじめその対象植物は拡大しつつある。	所要の光エネルギーが $200\sim300\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ であり、完全人工光方式での実用化システムの開発が活発。
果菜類	ピーマン、トマト、キュウリなどの生産が試みられているが、果実の成熟時期が一定していない、植物体が蔓ものが多い等から生産工程の自動化が図りにくく、実用性の高いものは実現していないが、ブドウ、サクランボ、モモ等への試みもなされている。	所要の光エネルギー約 $550\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上と非常に高く、自然光を主体に人工光を補光的に用いる方法が多く採られる。

図 8 逆さに吊り下げた状態で育成させたトマト
(茎が重力と反対方向に曲がった状態に育成)

図 9 レタスの上下栽培装置
(上下ともに正常に育成)

られる光源や光環境の設定・制御技術、植物育成空間の高密度利用技術の開発が課題である。その一方法として育成植物への光の近接照射と反射がさ等の光制御部を介在させない光源からの直接照射が考えられる。実用施設としては、光源の上下面、両側面に栽培面を配設する高密度植物栽培方式の採用が考えられる。しかし、地球の重力方向に植物を逆さにして吊り下げた状態で育成させた場合、根や茎の伸長、葉の展開等に不具合が生じ、商品価値が損なわれる懸念がある(図8)。こうした懸念に対し、蛍光灯を挟んでその上下で各種植物を育成させた実験から、レタス、カブ等の葉菜類や根菜類では、強い光強度の下では重力の影響が光の作用で補正され、上下位置における植物の育成に差異が見られないことが確認されており⁶⁾、光源の周辺空間を3次元的に有効利用できるシステムとして注目されている(図9)。

3.2 育苗工場

近年、農業生産者の高齢化、農村での人手不足、苗植え付け作業の機械化に伴う形状寸法の均一な苗の需要、苗生産技術の高度化(バイオ苗、ウイルスフリー苗の出現、接ぎ木苗の一般化など)への対応、さらには砂漠緑化、森林再生、都市緑化、食糧不足に対する充足等の諸問題解決のための大規模な苗生産の必要が増加してきている。こうした状況を背景に、苗生産の専門化がすすみ、その工業化が急務となっている。

自然光は季節や天候によってその変動が大きい。このため、環境条件に大きく影響を受ける苗生産において、

良質な苗を大量に安定生産・供給する上で、自然光のみで通年、所要の光環境を確保することは困難であり、人工光による補光の実施が不可欠である。

レタス、ブロッコリを対照植物とした通年補光育苗実験から

- (1) 日の出前2時間補光の実施でレタスでは30~50%、ブロッコリでは20~30%の育苗促進効果が期待できる(図10)。
- (2) 効果的な補光効果を得る上で、約 $60\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上の光強度の確保が好ましい。
- (3) 補光に効果的な波長としてはPARの波長域である400~700nmに加え、FR(700~800nm)を付加することが望ましい。

等の事柄が判明しているが^{7)~9)}今後、育苗プラントの実用化に向けた光環境の設定・制御技術の構築が急がれる。

一方、バイオテクノロジーの進展で組織培養苗生産システムの開発も進められている。糖を加えない培地上でCO₂濃度を高めて強い光強度下で光独立栄養培養した場合、従来の糖を添加した培地上で従属栄養培養した場合に比べ、雑菌やバクテリアの繁殖の抑制と丈夫な培養苗の生産が図れ、大型培養器で大量生産できる¹⁰⁾ことも

図10 補光処理10日後のブロッコリー苗の育成状況
(A: 補光未実施, B: 超高圧ナトリウムランプによる補光実施) ($60\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

あいまってその実用化が期待されている。

4. おわりに

21世紀を支える科学・技術としてバイオサイエンス、バイオテクノロジーが重要な位置を占めることは衆目の一致するところである。近年、バイオテクノロジーや農業工業化に伴い、植物工場や育苗工場に関する研究開発が活発化し、一部ではその実用プラントも実現している。

光は植物成育の支配的環境要因の一つであるが、自然光は季節や天候によってその変動が大きく、自然光のみで、通年、安定して植物生産に所要の光環境を得ることは不可能である。従って、有効適切に制御された成育環境の下で高効率・高品質な植物生産を図る植物工場や育苗工場を現実のものとする上では、自然光に代えた人工光の利用が欠かせない。21世紀に向けた農業工業化の推

進において、今後、高い成育効率の得られる光源および光環境の設定・制御技術の開発をはじめとする農学と工学とを融合した新しい技術の構築が急がれる。

参考文献

- (1) 村上克介, 洞口公俊: 「フォトンによる光放射環境の測定と評価」, JCIE J., 12-4, pp.15-19 (1995)
- (2) 洞口公俊, 村上克介, 森田政明, 柴田治男, 高橋睦夫: 「4波長域発光形植物栽培用蛍光ランプ」, National. Tech. Rep., 38-6, pp. 627-634 (1992)
- (3) Morgan, D. C. and Smith, H.: "Linear relationship between phytochrome photoequilibrium and growth in plants under simulated natural radiation", Nature, 262, pp.210-212 (1976)
- (4) 洞口公俊, 村上克介: 「植物成育用光源とその応用」, JCIE J., 11-1, pp.14-18 (1994)
- (5) 洞口公俊, 村上克介, 相賀一郎: 「未来を拓く植物工場」, H 7 照学会大講演論文集, pp.327-328 (1995)
- (6) 清田信, 北宅善昭, 相賀一郎, 矢吹万壽, 藤井昌之, 田守芳勝, 洞口公俊: 「CELSSにおける植物栽培」, CELSS J., 2-1, pp. 51-58 (1990)
- (7) 成日慶, 村上克介, 洞口公俊, 向阪信一, 森田富彦, 清田信: 「レタス生産システムにおける補光に関する実験的研究」, 日本植物工場学会 H8大会学術講演要旨集, pp.21-22 (1996)
- (8) Murakami, K. and Sung, I.: "Comparison of Three Types of HID Lamps for Supplemental Lighting on Lettuce Seedling Plant Production", Appl. Bio. Sci., in press
- (9) 洞口公俊, 成日慶, 村上克介, 向阪信一, 森田富彦, 清田信: 「ブロッコリー育苗補光に関する実験的研究」, 日本植物工場学会 H 9 大会学術講演要旨集, (1996), 印刷中
- (10) Kozai, T.: Transplant Production Systems, Kluwer Academic Publishers, pp.247-282 (1992)

著者紹介

洞 口 公 俊

1941年2月生。同志社大学工学部卒。現在、松下電器産業㈱照明研究所にて光バイオの研究に従事。CELSS学会理事、学術博士。

村 上 克 介

1958年2月生。東京大学農学部卒。大阪府立大学大学院農学研究科博士後期課程修了。現在、大阪府立大学農学部講師、1992年学術博士。

向 阪 信 一

1947年10月生。大阪府立大学工学部卒。現在、松下電工㈱中央EC綜合部にて光放射応用の技術開発に従事。技術士(電気・電子部門)