

地下空間植物工場と人工光源

田澤 信二

植物工場成立の課題として、光合成用の照明電力費と温度制御用空調電力費が生産コストの1/3をしめることが指摘されていた。この課題は一部の葉菜類（サラダナ・レタス類）については蛍光灯の近接照射（30～40 cm）棚段栽培方式で解決され、さらに最近ではLEDなどの省エネ長寿命新光源の開発が進展し、効率的な生産の実現が期待されている。地下空間植物工場では、安定した生育適温が安価に得られ、都市近郊の立地条件では輸送コストも低減できるなど、さらにコストダウンが期待できる。ここでは植物育成における人工光源応用の歴史的経緯から、植物工場に利用されている光源の特性および発光原理や応用、研究事例、施工例などを紹介する。

キーワード：植物育成，人工光源，地下空間，植物工場

1. はじめに

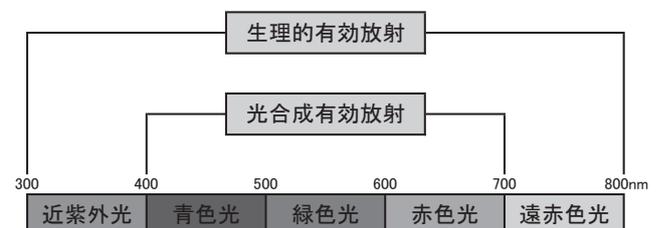
植物工場とは天候に左右されず植物を周年生産できる施設で、葉菜類では約30日間で1作、日産数百から数万株の安定生産出荷が可能である。その起源は1889年デンマークのクリステンセン農場とされている。植物工場の基礎学問としては生物環境調節工学があり、研究施設として1949年に米国でファイトトロン（植物環境調節施設，phyto：植物，tron：装置）が完成したのが端緒とされ、我が国では1952年に完成した国立遺伝学研究所（三島）のファイトトロンとされている。この技術を野菜生産の植物工場として利用し、我が国で注目されたのは1985年に完成したダイエー（船橋）「ららぽーと」内の高圧ナトリウムランプを使用した完全制御型小型施設である。現在では、完全制御型施設（人工光源利用）30ヶ所、太陽光併用型施設（太陽光と人工光源の併用）9ヶ所の合計39ヶ所が稼働中（2009）である。2009年には、食品の安全・安心、不況下の雇用拡大を目的に農工商連携（農水省と経産省）による植物工場の普及・拡大推進のため補正予算が組まれ、昨年度より数ヶ所の研究施設が建設中であり現在話題になっている施設である。今回、植物工場の地下空間での利用を目的に執筆依頼をされたが、完全閉鎖型施設が正にその対象であり、温度条件や都市周辺の地下空間では空調費や輸送費の削減など、さらに経済効果が見込まれるため今後期待されている。

2. 植物育成と光環境

植物育成に必要な光環境条件としては、「波長範囲、光質バランス、光強度、照射時間」などがある。植物工場では対象植物ごとに最も成育に効率的な光環境が求められる。

(1) 必要な波長範囲

図—1は植物育成に必要な波長範囲を示し、光合成では400～700 nmの範囲を光合成有効放射（Photosynthetically Active Radiation：PAR）、300～800 nmを生理的有効放射（Physiologically Active Radiation）と呼ばれている。光合成有効放射のみならず、葉色の発色には300～400 nm、茎の伸長制御には700～800 nmの波長も重要な要因となる。



図—1 植物育成に必要な波長範囲

(2) 光質バランス

図—2は光質バランスを示し、McCree (1972)（チャンパー 20種、圃場 8種作物）と稲田 (1976)（草本 26種、木本 7種作物）の示した61種の植物の平均光合成作用曲線を示している。（青色光：24%，緑色光：32%，

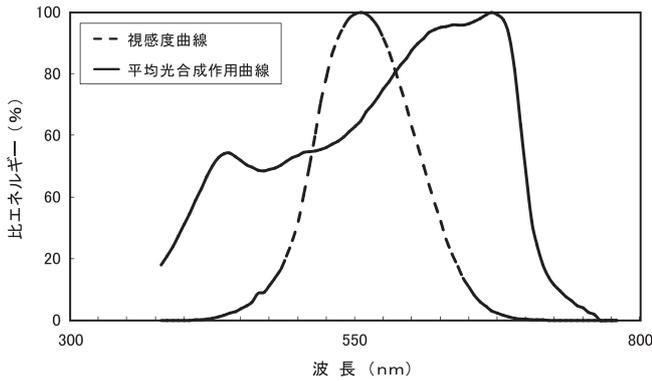


図-2 平均光合成作用曲線

表-1 代表的光受容体

主な生理反応	光受容体	主な吸収波長範囲(nm)
光合成	クロロフィル(chlorophyll)	青色400-500 赤色640-700
	カロテノイド(carotenoid)	青色400-530
光形態形成	フィトクロム(phytochrome)	UV-A+青色380-480 赤色540-690 遠赤色700-750 (光周性反応)
	クリプトクロム(cryptochrome)	UV-A380付近 青色450付近 (胚軸伸長抑制)
	フォトトロピン(phototropin)	UV-A380付近 青色450付近 (屈光性反応)

赤色光：44%) 実際の植物生産ではこの波長バランスを調整し、基本的には赤色光を増加することで生育を促進し、青色光の増加で成育の抑制に利用する。表-1は植物の代表的光受容体(色素)と吸収波長範囲を示している。

(3) 必要な光強度

表-2は各種植物の光補償点, 光飽和点を示し, 育成光強度設定の参考とする。葉菜類では一般的に光量子束密度で, 育苗期 $150 \sim 200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (10,000 ~ 15,000 lx 程度), 成育期 $250 \sim 350 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (20,000 ~ 25,000 lx 程度) に設定される。

表-2 各種植物の光補償点, 光飽和点

作物名	光飽和点(klx)() 内は光量子束密度	光補償点(klx)() 内は光量子束密度	備考
イネ	40~50 (672~840)	0.5~1.0 (8~17)	Murata,1961
オオムギ	50 (840)	---	Takeda,1978
ダイズ	20~25 (336~420)	1.0~1.5 (17~25)	Böhning & Burnsaid,1956
トウモロコシ	80~100 (1344~1680)	1.8 (30)	Hesketh & Moss, Hesketh 1963
パレイシヨ	30 (504)	---	Chapman & Loomis,1953
トマト	70 (1176)	---	Tatsumi & Hori,1969
ナス	40 (672)	2.0 (34)	
メロン	55 (924)	0.4 (7)	
エンドウ	40 (672)	2.0 (34)	
ミツバ	20 (336)	1.0 (17)	
レタス	25 (420)	1.5~2.0 (25~34)	

(4) 照射時間

照射時間は栽培植物によって異なるが, 14 ~ 15 時間照射が葉菜類では一般的とされている。

3. 人工光源の種類と特性

エジソンの白熱電球開発(1879年)から, 130年経過した現在では, 人工光源も真空燃焼光源(白熱電球)より放電プラズマ光源(蛍光灯, 高輝度放電ランプ)を経て, 固体発光光源(LED, ELなど)の新しい世代へ変遷しつつある。現在, 人工光源は図-3に示すごとく, 熱放射とルミネッセンス, 電界発光の3系統に大別され, この中で植物育成用として実際に利用されているものは, 白熱電球, 蛍光灯, メタルハライドランプ, 高圧ナトリウムランプの4種類である。キセノンランプや低圧ナトリウムランプ, 無電極ランプ, 発光ダイオード(LED), レーザーダイオード(LD)はおもに試験研究用として使用されている。特にLEDは容易に単色光に近い光質が選択可能なため光質影響試験用(着色促

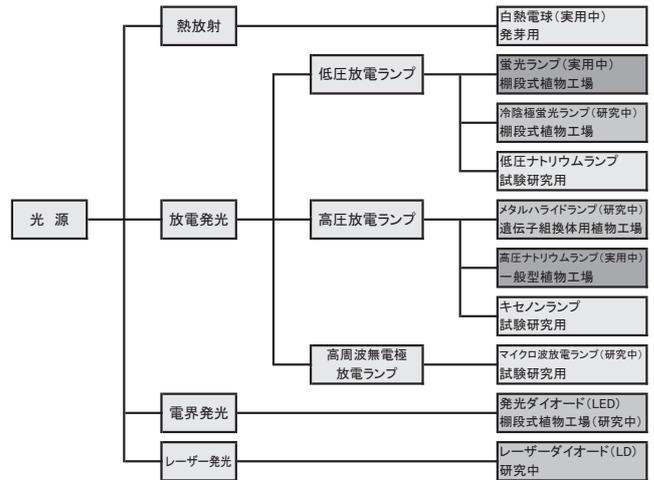


図-3 人工光源の種類

表-3 光源の特長と用途

ランプ種類	特長	主な用途
高圧ナトリウムランプ	高効率・長寿命・動程良 赤色光成分が多い	施設園芸: 光合成補光用(花卉, 果菜等) 植物工場: 光合成用
メタルハライドランプ	効率・青色光成分が多い 太陽光近似型昼光有り	施設園芸: 形態形成補光用(果実の着色等) 植物工場: 形態形成補光用(着色, 形態等)
セラミック メタルハライドランプ	効率・光質調整可能 植物用可能性有り	施設園芸: 光合成・形態形成補光用 植物工場: 光合成・形態形成補光用
蛍光灯(熱陰極型)	効率・中発熱・多品種 植物育成用ランプ有り 安価	施設園芸: 光合成補光用(花卉, 果菜, 果樹等) 植物工場: 光合成用(苗, 近接照射で主生産) 組織培養: 光合成, 形態形成用 花店舗: 光合成補光, 形態維持用
蛍光灯(冷陰極型)	低発熱, 多品種 長寿命, 高電圧, 高価	植物工場: 光合成用(近接照射で主生産)
白熱電球	赤・遠赤色光成分が多い 安価	施設園芸: 形態形成補光用(開花制御) 植物工場: 形態形成用(発芽促進)
LED	コンパクト, 低発熱 長寿命, 総合効率, 高価	植物工場: 光合成用(近接照射で主生産)

進、内成分増強など)として種々な植物に利用され、さらには近接照射による省電力光源として植物工場への導入が期待されている。また、蛍光灯の中でも液晶用バックライト用の冷陰極蛍光灯が長寿命(60,000時間など)のため近接照射による野菜類の植物工場用として提案されている。表—3には光源の特長と用途を示す。

(1) 蛍光灯 (Fluorescent Lamp : FL)

FLは熱陰極を持つ低圧水銀蒸気放電ランプであり、放電により発生する紫外放射をガラス管内に塗布された蛍光体によって可視放射に変換して利用する。蛍光体の種類によって比較的容易に必要な分光エネルギー分布が得られる。現在では、高周波(45kHz)点灯タイプ(Hf蛍光灯)が開発され、32W型で110lm/W、50W型で104lm/Wの高効率を達成し、寿命時間も15,000時間のものがある。また、液晶用バックライト用の冷陰極蛍光灯が長寿命(60,000時間など)のため植物工場用に提案されており、熱陰極蛍光灯においても長寿命型の開発(60,000時間)が報告されている。応用例としては、小規模閉鎖型苗生産システムや多段棚式植物工場の近接照射での植物生産が行われ、イチゴの育成試験なども行われている。写真—1は棚段式完全制御型植物工場例を示す。



写真—1 蛍光灯による棚段式完全制御型植物工場
(安全野菜社・サンチェの照明)

(2) メタルハライドランプ (Metal Halide Lamp : MHL)

MHLは、高圧水銀ランプをベースに各種ハロゲン化物を添加したもので、輝線を中心とした発光のものと、連続発光を含むものと多様な品種がある。応用としては、一般形ランプでは主に高圧ナトリウムランプとの混光照明用に利用されており、太陽光近似の分光エネルギー分布を有すMHLはグロースチャンバーなどの植物育成試験用に利用されている。最近では、従

来の石英の発光管より耐熱性の優れたセラミックの発光管を使用し、赤色光成分を増強したセラミックメタルハライドランプ(CMHL)が製品化され、従来困難とされていた連続調光(100~50%)も可能で、高ワットの680W形(105lm/W、12,000hr寿命)も発売されている。さらにCMHLの単独照射で、イネ(コレラ用ワクチンタンパク産生目的)やダイズ(アルツハイマー病用ワクチンタンパク産生目的)の高照度型遺伝子組換体用完全制御型研究施設(写真—2参照)やグロースチャンバーに利用されるようになった。



写真—2 遺伝子組換体用完全制御型研究施設 (産総研・北海道)

(3) 高圧ナトリウムランプ (High Pressure Sodium Lamp : HPSL)

HPSLは、発光管に光透過率の高い透光性多結晶アルミナを使用し、管内にはナトリウムアマルガムの形で緩衝ガスとして作用する水銀が封入されている。始動補助用にキセノンガスが封入されており、発光管内のNa蒸気圧を制御することで発光分光分布をある程度調整することができる。また、微量の水銀が封入されているため僅かなUVを放射している。応用としては、高圧放電ランプの中でも発光効率が最も高いため、完全制御型植物工場では主照明として使用されている。デメリットとしては、主にNa(589nm)の発光を利用しているため赤色光/青色光比(R/B比)が高く、



写真—3 完全制御型植物工場 (キュービー社・HPSL使用)



写真-4 イネ栽培 PR 施設 (パナソ社・呉服橋・HPSL + MHL 使用 2010)

弱光強度では徒長を引き起こす場合がある。また、一部の植物ではアントシアニンの着色が促進されないことや、葉巻き現象を生じるものがあるため、MHLによる青色光成分の補強が行われる場合がある。最近では寿命が従来の2倍の24,000時間(光束維持率80%時)で、価格もさらに低価格な経済的光源となっている。写真-3は完全制御型植物工場例を、写真-4はMHLと混光照明を行っているイネ栽培PR施設を示す。

(4) 発光ダイオード (Light-emitting Diode : LED)

LEDの発光原理は、InGaN(インジウム・ガリウム・ナイトライド)、GaP(ガリウム・リン)やGaAsP(ガリウム・ヒ素・リン)などの化合物半導体のp-n接合に順方向電流を流すことにより接合近傍でおこる電子、正孔の再結合により発光する。特長は低電圧駆動、低発熱、コンパクト、軽量、ノイズレス(放電灯はノイズ源)、調光やパルス点灯の容易などがある。デメリットとしては、温度上昇で光出力が低下するため放熱対策が必要、水分や静電気に弱い、高価格、回路効率(一般的に50~60%)を考慮した総合効率が低いなどがある。植物栽培への応用は宇宙における植物栽培を目的とした研究より始められ、具体的な照射方法は、LED素子を集合して放射源(面)を作り、植物体に近接照射するもので、植物体の成長とともに放射源を移動させるものである。我が国の宇宙ステーション実験モジュール「きぼう」にも植物実験用として赤+青色の育成用照射装置が搭載されるなど今後の応用が期待される光源である。写真-5は白色LED(青色光ベース)を使用したパナソ社の植物育成施設例、写真-6は玉川大学のLED研究施設例を示す。

4. おわりに

植物工場の運営は、高品質な製品を周年生産し、適切な価格で安定した消費先へ送り出すことである。課題としては、生産コストの1/3を照明・空調などの電



写真-5 白色LEDを使用した植物育成施設 (パナソ社・大手町 2005)



写真-6 各色LED照射による育成試験 (玉川大学)

気代の削減が示唆されており、LEDやELの近接照射による省電力化が期待されている。LEDの実利用については更なる効率の増加(点灯回路の電力損を含む総合効率が低い)や放熱対策(素子の温度上昇による光量減などの問題がある)など解決しなければならない課題も多い。昨年玉川大学に完全閉鎖型LED植物工場の研究施設が開設され、水冷式の効率的な照明器具による栽培試験を開始、課題解決の成果が期待されている。今後、植物工場の地下空間への普及を期待するとともに、(社)日本建設機械化協会殿のさらなる発展を祈念する。

JCMA

《参考文献》

- 1) 高辻正基編・田澤信二:「植物工場ハンドブック」pp.35-43, 東海大学出版会, 東京 1997.
- 2) 田澤信二:「光環境の制御」空気清浄, 第47巻第1号 pp.7-11, 2009.

【筆者紹介】

田澤 信二 (たざわ しんじ)
岩崎電気(株) 技術研究所・主席研究員
山口大学・客員教授 (H21年度)
植物工場普及振興会・会長

