

LED 園芸照明システムのエネルギー効率を理解する

ジョシュ・ジェロヴァック

園芸照明用のLED照明器具の実際の効率は、多数の要因に依存する。照明メーカーや栽培業者は、最適な収穫量とエネルギー効率を確保するために広い視野でこれを捉える必要がある。

園芸照明に使用する光源を評価する際には、複数の項目を検討する必要がある。例えば、光強度、スペクトル、配光の均一性、エネルギー効率、照明器具の寿命などがあるが、これだけに限定されない。園芸照明システムは、電気エネルギーを植物が成長と発育のための光合成の促進に使用する光に変換するが、LED光源は、その目的に合ったスペクトルを提供することができる。しかし、このような固体照明(SSL: Solid State Lighting)システムの効率または有効性の解明は難しい。特定の用途に対し、複数の要因が照明システムの全体的な効率に影響を与える。本稿では、照明器具の設計がエネ

ルギー効率にどのような影響を与えるか、またそれによって、制御環境下で植物を栽培する施設の全体的な収益性にどのような影響が生じ得るかについて解説する。

実際、電気エネルギーを植物の成長に使用可能な光に変換する園芸照明器具の効率は、すべての環境制御植物栽培施設において、成功に欠かせない要素である。このような栽培は、環境制御農業(CEA: Controlled Environment Agriculture)と呼ばれることが多い。図1に、CEAの1例である垂直農場を示す。植物用にチューニングされた照明の効率に関する検討項目は、人間用にチューニングされた照明とは必然的に全く異なるものになる。

に全く異なるものになる。

園芸における指標

まずは、本稿の以下の部分で使用する、園芸照明に適用される適切な指標を定義することから始めよう。植物は主に、400～700nmの可視域内の光波長によって光合成を行う(図2)。この範囲が、光合成有効放射(PAR: Photosynthetically Active Radiation)とも呼ばれるのはそのためである。光合成有効光量子束(PPF: Photosynthetic Photon Flux)は、照明システムによって1秒ごとに生成されるPARの総量を表す。この値は、照明システムによって放射される基本的にすべての光量子を取得して測定する、積分球と呼ばれる特殊な計測器によって測定される。PPFは、マイクロモル/秒($\mu\text{mol/s}$)という単位で表される。

光合成有効光量子束密度(PPFD: Photosynthetic Photon Flux Density)は、植物上部に到達するPARの量を表す。PPFDは、植物上部の特定の位置におけるスポット測定値であり、単位はマイクロモル/平方メートル/秒($\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$)である。

最後は、光量子効率である。これは、電気エネルギーをPARの光量子に変換する園芸照明システムの効率を表す。光のPPFと入力ワット数が既知ならば、園芸照明システムの光量子効率



図1 作物上部から数インチ未満の距離に照明を設置できるというのは、垂直農業における画期的な進歩である。適切に設計されたLEDソリューションを採用すれば、適切に設計されていないLEDソリューションや、HPSや蛍光灯などの照明技術よりも、単位面積当たりの収穫量を増やすことができる。

を簡単に計算することができる。PPFの単位は $\mu\text{mol/s}$ 、ワット数の単位はジュール毎秒(J/s)であることから、秒は分母と分子で消去されて、結果の単位は $\mu\text{mol/J}$ となり、これが効率を表す単位となる。この数値が大きいほど、電気エネルギーをPARの光量子に変換する照明システムの効率は高いということになる。

園芸照明に対する一般的なアプローチ

園芸システムの特長評価に適切な指標を示したところで、照明器具設計と、園芸照明システムのエネルギー効率を左右する要素へと話を進めよう。世界中で最も一般的に使用される園芸照明システムは、高輝度放電(HID: High Intensity Discharge)照明をベースとし、主に高圧ナトリウム(HPS: High Pressure Sodium)ランプを採用している。HPS照明器具は、栽培用に特別に設計されたものではなく、車道や駐車場を照らすことを目的に設計されている。しかし、入手しやすく出力レベルが高いことから園芸に採用されるようになり、その後この分野で普及したのは、光強度が非常に高いこと、そして、照射光の大部分が光合成の促進に有効な波長域である565~700nmの範囲にあるためといえる。

HPS照明器具を園芸照明に使用することの1つの欠点は、大量の放射熱が生成されることである。HPS電球の表面温度は800°Fを超えることもあるため、植物組織に損傷を与えないように、植物上部と照明器具の間に十分に距離をとることが必要になる。照明器具を取り付ける高さを高くすると、逆2乗の法則が成り立ち、利用率(CU: Coefficient of Utilization)が低下する。CUとは、照明が対象領域に光を届け

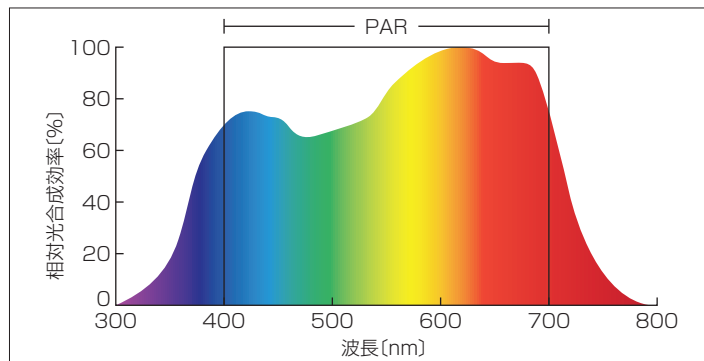


図2 PARに対する植物反応の平均値を示す光合成作用曲線。

る効果を表すために照明専門家が使う用語である。HPS照明器具のエネルギー効率はここ数年で高まっており、今では $1.7\mu\text{mol/J}$ の光量子効率を達成可能な両面型のHPS照明器具が登場している。

LEDへの移行

園芸照明にLEDが使用されるようになった経緯を時系列で示そう。2014年には、最も効率の高いLED採用の園芸照明システムで、両面型のHPS照明器具と同等の効率を達成していた(<http://bit.ly/2kRoP4H>)。HPS電球よりも寿命が長い(L70 \geq 5万時間)ことから、複数の栽培業者がLEDへの切り替えに関心を示した。しかし、効率は同等だったものの、LED採用の園芸照明システムはHPS照明器具と比べるとコストが高かったために、SSLへの移行は限定された。

LEDチップメーカーがこの数年間で、園芸照明メーカーに提供する部品の効率を改善したことから、園芸照明メーカーは光量子効率を大幅に向上させることができるようになり、光量子効率は今やHPS照明器具を上回り、引き続き年々高まっている。実際、LED採用の園芸照明システムは現在、両面型HPS照明器具よりも45%高い光量子効率を達成可能である。個々の部品の効率が向上したことでLED採

用園芸照明システムの効率が向上したわけだが、それがHPS技術を上回ることになった唯一の要因でもある。

LEDシステムの熱

照明器具によって生成される熱について、LED照明に関するありがちな誤解がある。多くの栽培業者が、LEDはHPS照明器具よりも発熱量が小さいと思っているが、それはLED照明器具を低いワット数で駆動した場合のみ正しい。600WのLED照明器具と600Wの両面型HPS照明器具を比べると、両者の生成熱は、発熱量という観点からはほぼ同等である。

LEDシステムとHPSシステムの最大の違いは、その600Wから生成されるPARエネルギーの量(つまり効率の問題に帰着する)と、照明器具からの熱の放射状態である。HPSランプからの熱の大部分は、下方向に放射されて植物上部へと向かうのに対し、LEDの熱の大部分は、その部品が実装されているプリント回路基板(PCB: Printed Circuit Board)上の接続部で生成される。そしてその熱は通常、PCBを介しておそらくはヒートシンクへと伝導し、上方向の対流によって除去される。

したがって、放射熱によって組織に損傷を与えることなく、照明器具を植物の近くに配置できるというのが、園芸照明システムの光源としてのLED

の主要な利点の1つである。しかし、適切な熱管理システムによってこの熱をPCBから効果的に除去しなければ、LED部品の寿命は著しく低下する。

商用園芸環境における照明システムの冷却には2つの方法があり、照明器具の光量子効率に影響を与える。受動冷却では、ヒートシンクを利用して回路基板からの熱を除去し、能動冷却では、ファンまたは水を利用して熱を除去する。照明器具の冷却に用いられるファンは、エネルギーを消費し、照明器具の全体的な光量子効率を低下させる。また、照明器具の稼働中にファンが故障すると、PCB上のLEDは過熱して焼け切れてしまう恐れがある。重大な故障につながらなかったとしても、出力が低下するとLED照明器具の耐用期間は著しく短縮する。これは、園芸照明システムを比較する際に栽培

業者が検討しなければならない、非常に重要な項目である。

スペクトルと効率

光量子効率に影響を与える、園芸照明システムのもう1つの重要な項目が照射光のスペクトルである。園芸照明システムで使われる最も効率の高い波長は、赤色(660nm)と青色(450nm)である。従来のLED採用の園芸照明技術では、主に赤色LEDに少数の青色を組み合わせることによって、できるだけ高い光量子効率を達成している。

赤色LEDは光量子効率が最も高いが、植物は自然界において狭域波長下で進化してきたわけではない。そのため、植物の成長と発育の最適化に関して、赤色LEDだけで最も効率的なスペクトルは生成されない。照明システムが、ビニールハウスの補助照明とし

てではなく、垂直農場の単一照明として使用される場合は、特にそうである(図3)。

複数の園芸照明メーカーが、クロロフィル(葉緑素)aとクロロフィルbの吸収ピークに基づく自社製品の「特殊スペクトル」をうたっている。しかし、クロロフィルの色素を植物の葉から抽出して試験管の中で測定していることを、どのメーカーも説明していない。光合成作用曲線(図2)は、1970年代にマックリー(McCree)と稲田の両博士が行った研究を基に作成されたものである。両博士の研究では、光合成速度とクロロフィルaおよびbの作用スペクトルの間には相関関係が存在するが、光合成に作用する波長はそれだけではないことが示された。この研究の前は、クロロフィルは可視光スペクトルの赤色と青色の部分を中心に吸収する



図3 ビニールハウスのように、泥などの汚れもある厳しい環境では、能動的な冷却システムが簡単に故障してしまう恐れがあり、それが照明システム全体の故障につながる。受動的な冷却システムならば、エネルギー効率が改善されるだけでなく、壊れたり詰まったりしやすい可動部品が不要である。

のだから(そのために植物の葉は緑色になる)、緑色光は植物の光合成に使われていないと、一般的に誤って認識されていた。

マックリーと稲田の両博士による研究は、スペクトル光質が光合成に与える影響を理解する上での基礎となった。ただし両博士は、低い光強度における1枚の葉の光合成に基づいて、作用スペクトルを求めていた。この30年間で、より高い光強度で植物全体の光合成を対象とした複数の研究が行われ、スペクトル光質が成長速度に与える影響は、光強度に比べるとはるかに小さいことが明らかになっている。

スペクトル光質は、種子発芽、茎成長、開花といった植物の発育反応と、植物の味、外観、においに影響を与える二次代謝産物やフラボノイドに、強い影響を及ぼす。したがってLEDメーカーは、最も電気効率の高いLEDを使用することと、栽培業者が望む最適な植物の成長と発育を引き出すLEDを使用することの間でバランスを図る必要がある。園芸照明用のLED技術については、マックリーと稲田両博士の研究を基に光生物学の研究をさらに進め、最適な成長を促す光組成を明らかにするための手段を研究者らがついに手に入れた状態にあり、今後の発展が期待される。

フォームファクタとビーム制御

最後に、照明器具のフォームファクタ、ビーム光学系、光強度について説明する。園芸照明システムの全体的な効率を検討する際には、PPFDとCUを考慮に入れる必要がある。しかし、照明器具そのものの光量子効率(PLQ)が園芸照明において非常に重要であることは間違いないが、実際の適用現場で生成される光が均等かつ効率的に作物に照

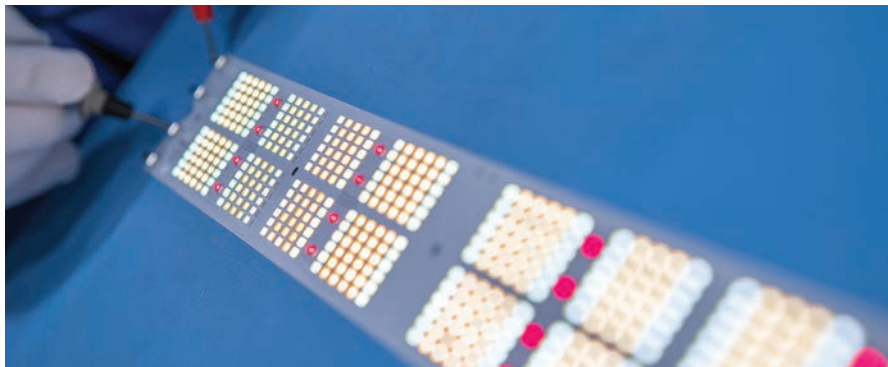


図4 園芸照明ソリューションから照射される光のスペクトル(色)は、エネルギー効率と、全体的な植物の成長と発育の両方に多大な影響を与える。赤色光や青色光の方がエネルギー効率よく生成可能だが、この図に示したようなライトエンジンによって達成される幅広いスペクトルは、より多くの光受容体に作用して栽培を促進する。

射されないのであれば、そのソリューションの実際のエネルギー効率は大幅に低下してしまう。

HPS照明器具では、1つの器具に1つの光源(360°の電球)しかないため、リフレクタによって光を植物上部に均等に拡散させることが行われる。HPSに勝るLEDのもう1つの利点は、特別設計のビーム光学系を採用して、器具全体にわたって数百もの光源を搭載し、リフレクタを使用することなく均一性に非常に優れた光パターンを生成できることである。図4に、一般的なLEDライトエンジンを示す。

この形状の柔軟性を活かして適切な設計を行えば、生成される光の大部分が植物上部に到達し、環境制御栽培施設の通路や壁に当たって無駄になることのない、非常に高いCUを備えるソリューションが実現できる。結局のところ、光が生成されても植物上部に届かなければ、それはエネルギー(とコスト)の無駄になってしまう。栽培業者は園芸照明システムを選定する際に、このことを必ず考慮しなければならない。

まとめ

LED照明システムならばどれも同じ

というわけではないので、栽培業者は、対象栽培施設における所定の取り付け高さでの平均PPFDと配光パターンを示した照明設計を、メーカーから入手することが重要である。園芸照明システムのフォームファクタと配光は、施設に必要な照明器具の台数を左右する。そしてその台数も、栽培施設の全体的なエネルギー効率に影響を与える要因の1つとなる。

以上まとめると、園芸照明システムのエネルギー効率に影響を与える要因は1つだけではなく、複数存在する。正しい指標を使用し、園芸照明システムのエネルギー効率に影響を与える要因を理解することが、環境制御栽培施設の全体的な収益性の向上につながる。

本稿で取り上げた内容の詳しい情報については、「栽培用照明の比較方法」(<http://bit.ly/2lkXDGD>)を参照してほしい。

著者紹介

ジョシュ・ジェロヴァック(JOSH GEROVAC)は、米フルーエンス・バイオエンジニアリング社(Fluence Bioengineering)の園芸科学者。この10年間、栽培室から商用ビニールハウスにいたるまでの環境制御農業に従事している。パデュー大(Purdue University)で、園芸生産およびマーケティングの理学士号、園芸学修士号を取得している。URL: fluence.science