

SSLに対する植物の反応と市場の可能性 —栽培用照明カンファレンスにて

モーリー・ライト

ポートランドで開催された第3回 Horticultural Lighting Conference では、科学とビジネスに関する幅広い基盤情報が参加者らに提供された。カンファレンスの講演者らは、未来はLED照明にあると明言した。

LEDを採用する栽培用照明の主要な研究者と利用者が2018年10月9日、オレゴン州ポートランドで開催された第3回 LEDs Magazine Horticultural Lighting Conference に集結した。すばらしい人脈づくりの機会が設けられ、休憩時間や夕方のレセプション時には、机の上に並べられた展示品(図1)の周りに多くの人々が集まった。講演では、栽培用固体照明(Solid State Lighting: SSL)の背景にある科学に関連する豊富な知識が披露されたほか、人工照明と、特にLEDを採用する照明のビジネスケースが紹介された。スペクトルに対する植物の反応、新しいメトリクス、植物反応の測定、SSLのビジネスケース

に関する、非常に魅力的な話が聞けたので、本稿では、そうした発表のいくつかの概要を紹介したいと思う。

2018年度の同カンファレンスの基調講演者は、米ミシガン州立大(Michigan State University)園芸学部の教授でエクステンション・スペシャリストのエリック・ランクル氏(Erik Runkle)だった(図2)。ランクル氏は、栽培用照明としてのLEDの利用に早くから取り組んできたパイオニアであり、同氏の研究所はおそらく、世界で最も先進的なSSLベースの栽培用照明研究施設である。ランクル氏がControlled Environment Lighting Laboratory (CELL)で使用する7チャンネルのLEDシステムに

ついては、以前の文章で詳しく取り上げたので、本稿では簡単に触れるだけとする(<http://bit.ly/2G6a3QU>)。そのシステムは、今月号の表紙にもなっている。このシステム(図3)は、2個の蛍光体変換白色チャンネル、4個の単色カラーチャンネル、そして1個の紫外線(UV)チャンネルを装備する。

波長の除外または供給

ランクル氏はまず、光と温室内の光の調整方法をテーマとした、自身の修士論文と博士論文の研究について説明した。「1990年終盤頃、LEDは存在していたが、これほど早く栽培用に採用されるようになるとは誰も想像していなかった。そのため、私の研究は主に、光によって開花がどのように制御されるか、さまざまな波長帯を除外した場合に、生長と発達がどのように制御されるかに着目するものだった。今では、それとはほぼ逆のことを行っている。つまり、さまざまな波長帯を除外する代わりに、さまざまな波長帯を意図的に供給している。さまざまな波長帯の作用を解明していくのだが、では互いに対してそれらはどのように反応するのかとなると、必ずしも予測できないという点に醍醐味がある」と同氏は述べた。

またランクル氏は、光強度に関する実質的な調査はまだきわめて初期の段階にあり、これまでの研究は光のみに着目しているが、最終的には、光が他の環境パラメータとどのように相互に作用するかを調べるのが重要かもし



図1 机の上に並べられた展示品によって、最新のLEDコンポーネント、光学系などの実現技術、最終照明製品を実際に目にする機会が、Horticultural Lighting Conferenceの参加者らに提供された。すべて特に栽培用に開発されている。

れない点を嘆いてみせた。「それは私たちの今後の研究において、さらに大きな役割を担うことになる」と同氏は言い添えた。

ランクル氏は講演の最初のほうで、光と光照射が植物に影響を与え得る3つの方法をまとめた、比較的シンプルな図を示した(図4)。その影響には3つの次元があると同氏は述べた。つまり、光量または強度、光品質またはスペクトルパワー分布(Spectral Power Distribution: SPD)、そして照明システムの光周期(photoperiod)として表現されることの多い、1日あたりの光照射時間である。主にこれらの次元が、植物のバイオマス、形態、開花にそれぞれ影響を与える。

植物のバイオマスは、芽や根の生長、または茎の太さを指す。形態は、茎の高さや枝の数といった、植物の物理的構造を指す。開花はその名のとおりだが、ランクル氏は、例えば観賞植物か野菜かによって、開花の目的はまったく異なる可能性がある」と説明した。

「上述の主要な結果にそれぞれ関連する各次元を、研究において個別に扱うことができれば非常に便利のだが」と、ランクル氏は述べた。しかし同氏によると、「植物に対する照明と光照射について理解が深まるにつれて、そのすべての要因が互いに作用し合っているのだという認識を強くしている」という。図に示された要因が、研究を複雑にしており、ランクル氏の研究室に実装されたSSLの複雑さに、研究者らがすべての次元の解明に向けて要因を適切に掌握していることが表れている。

PARやその他の波長域

ランクル氏は続いて、光に対する植物の一般的な反応について説明した。



図2 ミシガン州立大園芸学部のエリック・ランクル教授が、基調講演を行った。

避けては通れない栽培に固有のメトリクスから話を始めて、最終的には、図5の複雑なグラフ集合にまで議論を展開した。「植物の光覚について、人間が独自の先入観を持つのは自然なことだ」と同氏は述べた。本誌でもこれまでに何度も指摘してきたように、それはまったく適切な概念ではない(<http://bit.ly/2wKGoGs>)。上述のグラフにはまだ、発光効率(Luminous Efficiency: LE)という光に対する人間の視覚的反応が示されている。

このグラフからは、ランクル氏の研究が、400~700nmの波長域にわたる、いわゆる光合成有効放射(Photosynthetically Active Radiation: PAR)領域の範囲を超えていることが明らかに見てとれる。ランクル氏は、PAR領域よりも短波長側のUV領域と長波長側の遠赤色領域の両方に着目して、研究を行っている。遠赤色領域の研究は比較的初期の段階にあるが、それらの波長は確かに光合成に影響を与えると同氏は述べた。

最終的にグラフから読み取れるのは、植物には、栽培用照明で対象としなければならない光受容体が複数存在

するということである。そこで議論は、フィトクロムの吸収へと移っていった。フィトクロムには2つの異なる種類があり、一方はPAR領域の長波長側の赤色スペクトルに吸収ピークがあり(PR型)、もう一方はPAR領域の隣の遠赤色領域に吸収ピークがある(PFR型)。吸収ピークはそれぞれ660nmと735nmで、ランクル氏によると、これらの光受容体はほとんどの植物に存在することが確認されているという。遠赤光受容体は、茎を伸ばしたり葉を広げたりして陰を避けるなどの植物反応に影響を与える。

すべての植物に見られるもう1つの重要な受容体または色素が、クリプトクロムである。ランクル氏によると、クリプトクロム受容体の吸収ピークは品種によって異なるとのことだが、同氏が示したグラフでは、クリプトクロム受容体の吸収ピークが一般的に青色領域とUV領域にあると示されている。一般的には450nmのスペクトルに最も良く反応すると同氏は述べた。ランクル氏は最後に、これ以外にも非常に多数の光受容体が存在するが、この講演では、図5に示すように、青色、赤色、遠赤色の各波長



図3 ランクル氏のControlled Environment Lighting Laboratory (CELL)には、独オスラム社 (Osram) の研究用に開発された7チャンネルのSSLシステムが導入されている。(写真提供: ミシガン州立大CELL。撮影者: キンウー・(ウィリアム)・メン氏 (Qingwu (William) Meng))

域に対象を絞ったと述べた。

ランクル氏は、青色、赤色、遠赤色のLEDの普及により、それらの波長域のエネルギーに対する植物反応の研究がしやすくなったと述べた。しかし同氏は、クロロフィルの吸収において、緑色光は効率的ではないという意見を否定した。同氏は、300～800nmの波長域にわたる光子受容のグラフを示し、緑色領域で反射または伝達される光の量が、青色や赤色領域よりも少し多いだけであることを示した。ランク

ル氏の研究の大部分は、遠赤色スペクトルで得られる有効効果と、緑色スペクトルを含めることの影響に着目するものである。

応用分野とタイミング

ランクル氏は、研究では、光子の即効的な影響を測定しているのか、それとも長期的な光照射とそのような長い露光に対する植物の反応を考察しているのかを、検討する必要があることも強調した。同氏は概して長期的な反応

に重きを置いているという。

栽培用照明の一般的な用途は、次の3つのカテゴリのいずれかに該当すると同氏は述べた。

- ・開花などの特定の動作に影響を与えるための、温室内または屋外の光周性照明
- ・生長と収穫量を促進するための、温室内の補助照明
- ・垂直農業などの屋内SSL

開花を目的とした光周性照明の簡単な実験として、光周期を14時間以下にした場合、ホタルブクロ属の観賞植物が栄養成長期を維持することが示された。光周期を15時間以上にすると、生殖成長期(つまり開花)に移行した。ランクル氏は、この特定のケースでは影響がきわめて顕著に現れたが、予想される影響はそれよりもはるかに微妙なものになることを何度も指摘した。

当初、開花に関するほとんどの研究が白熱灯で行われていた。白熱灯は、赤色と遠赤色の両方のスペクトルを生成し、遠赤色スペクトルの追加が開花を促進することが研究によって実証されていたためである。ランクル氏らは現在、LEDを使用することにより、赤色と遠赤色の比率をよりきめ細かく試験することができる。実際、遠赤色スペクトルが存在しなければ、LED照明は開花の促進に有効ではないと、同氏は述べた。キンギョソウを用いた研究では、遠赤色の赤色に対する比率を0.6～0.7にした場合に最良の結果が得られたという。その比率は、開花に影響を与えるために必要な遠赤色エネルギーが、赤色エネルギーよりも多いことを意味していることを理解してほしい。

温室の補助照明

続いて、温室の補助照明へと話を移し、現時点ではまだ、高圧ナトリウム

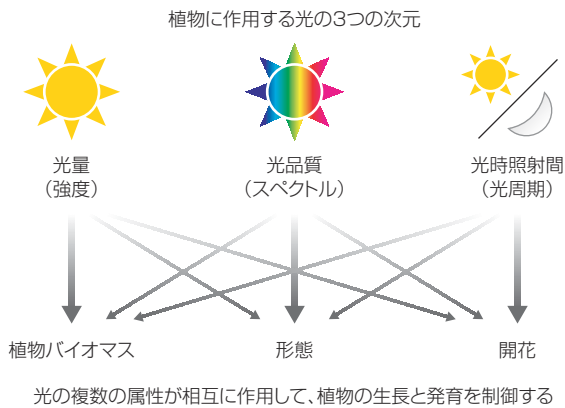


図4 光の3つの次元は、植物にそれぞれ異なる影響を与えるが、研究者らは、それらの次元の間に相互作用が存在することも発見している。

は赤色、緑色、青色スペクトルのさまざまな組合せを用意し、光合成光量子束密度 (Photosynthetic Photon Flux Density : PPF) を $90 \mu \text{ mol/m}^2 \times \text{s}$ として光を当てたところ、スペクトルよりも強度の影響のほうがはるかに高かったとランクル氏は述べた。しかし、強度をかなり低くした場合は、スペクトルの影響が顕著になったという。

最後にランクル氏は、垂直農業などの単光源照明について説明した。その研究は、古いものから、前述のCELL施設で行われている比較的新しいものまで、数多く行われている。研究者らは、フウロソウ属を対象に、青色、赤色、遠赤色のLEDをさまざまな組合せで使用して、各LEDの強度も変えながら、実験を行った。結果はあまりにも複雑なので、ここでは詳細は割愛する。しかし、植物の健全性と品質という点では、遠赤色スペクトルによって概して結果は向上し、青色スペクトルも重要であることがわかった。その後の実験では、レタスを対象に、緑色スペクトルの追加を評価した。緑色と遠赤色の両方のスペクトルで、葉の広がりが増長されることが観測された。ランクル氏は、最適なスペクトルは「状

(High Pressure Sodium : HPS) 照明が主に利用されていると、ランクル氏は述べた。価格が非常に手ごろであるためだ。しかし、ここ数年でLEDの導入はかなり増えたという。この用途の目的は、トマトなどの収穫量を増やしたり、茎を太くしたりすることや、観賞用として一般的に質の高い植物を育てることである。

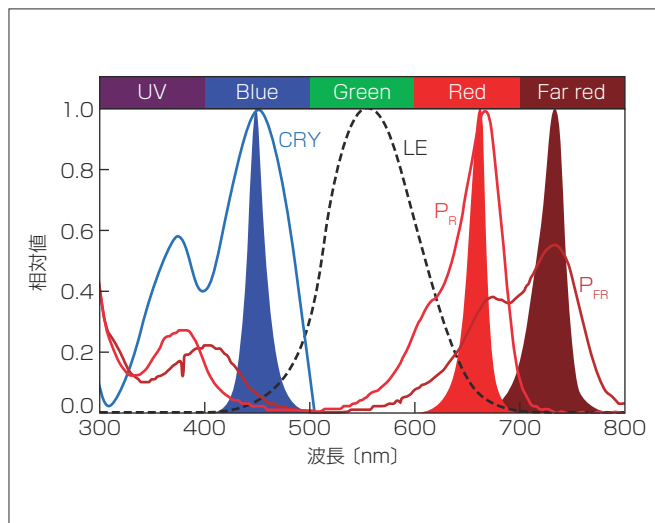
このような補助照明において最も重要なメトリクスは、植物に与えられる総光量で、日積算光量 (Daily Light Integral : DLI) として定量化される。ランクル氏は簡単な例として、6DLI、10DLI、16DLI (単位 : $\text{mol/m}^2 \times \text{d}$) の下で育てられた観賞用の苗木を示した。各値は、米国太平洋岸北西部の曇った秋の日や、より暖かい季節の晴れた日に対応する。DLIが大きいほど、茎は太くなって根はしっかりと張り、輸送や植え替えに耐えられる植物が育つ確率は高くなる。

ランクル氏は、補助照明に有効な効果があることに議論の余地はないと述べた。しかし、価値提案は別問題である。栽培業者は、補助照明のコストを検討し、栽培周期の短縮と質の高い植物の育成によって、そのコストを正当化できるかどうかを考察しなければならない。また、簡単な答えは存在しな

い。SSLが実行可能かどうかについては、「その質問を受けることがよくある。場合による、というのがその答えだ。責任逃れをしているわけではない。ただ、具体的な栽培条件、栽培する農作物、1年の中の時期、電気料金などを確認する必要があるということだ」と同氏は述べた。

スペクトルとの関連性

当然ながら最大の疑問は、スペクトルに関連性があるかどうかである。その答えを聞けば、従来光源よりもLED照明に軍配が上がるかもしれない。ペチュニアをHPS光源とLED光源の下で栽培する実験を行い、LEDについて



況に大いに依存する」としつつ、単光源照明の応用分野に「顕著な効果」をもたらす可能性がある」と結論付けた。とはいえ、スペクトル間の相互作用についてはまだかなりの研究が必要で、強度との相互作用についてもさらなる研究が必要である。

メトリクス、規格、奨励プログラム

その後、カンファレンスでは多数の魅力的な講演があり、メトリクス、規格、そして、栽培用照明器具が電気料金の割引などの市場変革のための各種奨励プログラムに適合するかどうかに影響を与える、新たな規制指針に関する話を聞くことができた。アクセル・ピアソン氏(Axel Pearson)は、DesignLights Consortium (DLC)の取り組みについて、最新情報を詳しく語った。栽培用照明に関するその取り組みは、奨励プログラムへの重要な扉となるものである。この取り組みについては過去の記事で取り上げているので、ここでは詳細は割愛する(<http://bit.ly/2zErtzj>)。

規格の策定も引き続き重要で、それによってDLCのようなプログラムの基礎が築かれる。米国農業生物工学会(American Society of Agricultural and Biological Engineers: ASABE)

は、植物の生長に関連するLED製品の試験方法を定義する、新しいANSI/ASABE S642規格の策定に取り組んでおり、これについては本誌の最近の記事で詳しく解説されている(<http://bit.ly/2zCUw65>)。

ビジネスケース

次は、ビジネスケースに話を移そう。カンファレンスでは複数の講演者が、ケーススタディを投資回収分析とともに示した。多くのケースで、LEDはまだ、HPSやその他の従来光源に及ばない。従来光源のほうが格段に安価で、一部のケースでは高い光強度を生成するためである。米レンセラー工科大の照明研究センター(Lighting Research Center: LRC)は2018年に、栽培用照明についてまさにそのような内容の研究結果を発表している(<http://bit.ly/2G6ATZd>)。しかしLEDは、順調に改良が進んでいる。

米エバーグリーンコンサルティンググループ社(Evergreen Consulting Group)のプリンシパルを務めるダグ・オッペダル氏(Doug Oppedal)は、大麻に関するケーススタディを紹介した。大麻の栽培には、今でもHPSが選択される場合が多い。同氏は、商用栽培の開花

室を特に調査した。開花は、最大の光強度を必要とする段階である。この調査では、1000WのHPS照明を218個設置した開花室と、1個1200ドルの640WのLED照明を同じ個数だけ設置した開花室を比較した。オレゴン州では、このようなSSL関連の投資に対して、10万ドル強の奨励金を受けることができる。この奨励金を加味した投資回収期間は2.4年で、それ以降は、年間6万4128ドルの追加利益が得られる計算になるという。

市場予測

最も期待を集めていた発表の1つが、カンファレンスの最後に行われた、米ストラテジーズ・アンリミテッド社(Strategies Unlimited)の調査ディレクターで、同カンファレンスの共同議長を務めるフィリップ・スモールウッド氏(Philip Smallwood)の講演だった(図6)。実際、1日の終わりに回収されたアンケート用紙に「フィリー・スモールウッド最高」と記した参加者がいたほどだった。スモールウッド氏は、栽培用照明分野に関する自身の最新市場調査を報告した(市場の最新情報と予測に関する詳細な報告書は、ストラテジーズ・アンリミテッド社のウェブサイト<http://bit.ly/2CLCnIa>で購入できる)。

スモールウッド氏はまず、この分野を取り巻く現状を把握してもらうために、LEDベースの栽培用照明市場が5年のうちに80億ドル規模にまで成長する可能性がある、と多くの人が予測していることを指摘した。「期待あふれる分野で、成長が見込まれるが、その数字の背景で、さまざまな取り組みが必要になる」と同氏は述べた。用途によるSSLの支持状況の違い、世界のどの地域でLEDが使われているか、大麻などの栽培に伴う地政学的な問題を



図6 フィリップ・スモールウッド氏は、LEDは2022年までに温室照明市場の30~40%を占めるようになる」と述べた。ただし大麻栽培においては、2020年までに従来光源を上回るという。

理解する必要があると、同氏は述べた。実際、地域だけをとって、どれだけの補助照明が必要になるかが左右される。

「これはビジネスだ」ということを忘れてはならないとも、同氏は述べた。栽培にLEDを採用するかどうかは、必ずコスト分析に基づいて判断しなければならない。スモールウッド氏のチームは、投資回収も加味して市場予測を行っている。LED照明には否定できないメリットがあると同氏は説明した。調整可能なスペクトルがその1つだ。それは、必ずしも稼働中に調整可能であることを意味するわけではなく、照明器具の製造工程において、LEDの組合せをカスタマイズできることを意味する。さらに、寿命が長く、光源を植物の近くに配置できることは、非常に大きなメリットである。従来光源は熱を生成するので、そのような近さに配置することはできない。それでも同氏は、「LEDが将来的にこの市場を占有するのは間違いないと私は思う。それまでにどれだけの時間がかかるかというだけの問題だ」と述べた。

設置面積による対象市場分析

ストラテジーズ・アンリミテッド社の調査は、対象市場の分析に基づいている。それは、究極的には栽培用照明の潜在的応用分野の設置面積に帰結する。例えば、現在の世界の温室設置面積は、合計550億平方フィート(約51億平方メートル)である。しかし、補助照明が使われているのはそのうちの1%に満たない。赤道近くの地域では、補助照明は不要である可能性が高く、経済的に余裕のない地域では、単純にその導入費用が賄えない。

一方、北米や西欧などの地域では当然、温室や補助照明を導入する経済的余裕がある。スモールウッド氏は、米

国の温室設置面積は約15億平方フィート(約1億4000万平方メートル)で、観賞植物や野菜の栽培を含むその10~15%で、補助照明が使われていると述べた。西欧の温室設置面積は約200億平方フィート(約19億平方メートル)とそれよりも広く、そのうちの約10%で補助照明が使われている。

現在、観賞植物や野菜の栽培におけるLEDの普及率はまだ非常に低い。しかしスモールウッド氏は、それはLEDの機会を示しているのでチャンスとして自分は捉えていると述べた。温室市場の世界規模は現在40億ドルで、2022年までに80億ドルに成長する。LED照明はその成長の大部分を担う見込みで、2022年までに設置数に占める割合は30~40%にまで増加すると期待される。

垂直農業に関しては、LEDが市場をほぼ独占している。垂直農業は、耕作地が限られた地域で大きな人口を支えることになる。しかしそのコストは高い。垂直農業のコストの56%以上は人件費だとスモールウッド氏は述べた。既存の垂直農業のほとんどが収益を上げていない。スモールウッド氏によると、収益を上げるようになるまでに平均で7年かかるという。「進捗が緩やかな市場で、多大な関心が寄せられているが、まだ成熟した状態にはない」と同氏は述べ、垂直農業用照明の市場規模は、2022年までに3億5000万ドルを超えるとした。

急成長する大麻栽培

鍵を握る不確定要素が、大麻である。「州ごとに調査したところ、医療用だけでなく、娯楽用大麻も許可する州が増え始めている」とスモールウッド氏は述べた。カナダでも同じ現象が見られる。カナダの生産施設のライセンス

はこの1年間で倍増し、現在カナダには、合法的な大麻消費者が3000万人も居住しており、年間消費量は240万ポンド(約109万kg)に相当する。この数から逆算すると、その需要に対応するために必要な栽培面積は650万平方フィート(約60万平方メートル)ということになるが、カナダはさらに、大麻の輸出にも意欲を示している。

投資回収について、大麻のスポット指数は、1ポンド(約450g)あたり1200ドルだとスモールウッド氏は述べた。また、栽培用にLEDスペクトルを最適化すれば、収穫量を5%増加できるという予測を示した。それだけ効率が上がれば、1年以内での回収が可能である。鍵となるのは、適切な設置である。栽培業者は、単にHPSをLEDに置き換えるだけではなく、SSLの性質に栽培方法を適応させる必要がある。

「大麻については、LED照明がより急速なペースで普及する見込みだ」とスモールウッド氏は述べた。合法化された屋外温室での栽培と、垂直農法が改変されて適用される屋内栽培の両方で、成長が見込まれる。LEDが最も急速に導入されるのは繁殖期、続いて成長期で、開花期は高い光強度が必要なため、LEDの導入は遅れると予想される。2020年には、大麻栽培においてLEDが従来光源を上回り、カナダと米国のLED照明の市場規模は、4億ドルを超える見込みである。

栽培用照明は、LEDメーカーと、効果的な照明器具設計技術を保有する企業に対し、多大な可能性を示しつつも課題を残した状態にある。しかし、新たな研究によって状況は常に変化しており、研究される波長域も拡大している。この技術と市場の動向については今後もちろん、注視していきたいと思う。