単色LEDが切り拓く、固体照明の新たな分野

ラジェンドラ・スワミー

LEDベースの照明は、植物の育成、水族館照明、野生生物に優しい一般照明など、生命科学の分野に実質的な恩恵をもたらすことのできる狭帯域スペクトルの光を照射することができる。

図1　複数の単色LEDが組み合わされた園芸照明システム

SSL（solid state lighting：固体照明）は、照明システムのエネルギー効率に関する需要を満たすという点において非常に有望であることが明らかになっており、エネルギーコストを制御し、環境への影響を最小限に抑え、エネルギー自給率を高める可能性を秘めている。蛍光体変換による白色LEDが、多くの一般照明用途に採用されている一方で、単色LEDも、建築、エンターテインメント、自動車の分野にわたる多数の用途で使用されている。単色LEDは、特定の波長で発光し、最適な光出力を提供することから、さらに広い範囲にわたる、有望な新しい応用分野に恩恵をもたらす可能性がある。本記事では、植物の育成または園芸、水族館照明、野生生物に特に有益な一般照明における潜在的な応用分野について説明する。

狭帯域の光を照射する単色LEDはまず、計器表示の用途において使用され始めた。それから歳月が経ち、LED技術の絶え間ない進歩に支えられ、高輝度の単色LEDは、バックライト、車載照明、建築、劇場、看板照明など、多様なその他の用途に使用されるようになった。LEDは幅広い範囲の色を実現し、サイズがコンパクトで、効率が高く、多用途に適用できるため、これらの分野において、従来の光源に代わる魅力的な代替となっている。さらに、単色LEDの特性は現在、多数の新しい応用分野に適用されつつある。それは、光のスペクトル組成が、さまざまな環境における多様な生物の生命活動

の維持と増進に重要な役割を担う場面においてである。

植物の育成

植物は、光をエネルギー源として利用し、光合成を行う。光合成は、植物の成長と生存可能性に影響を与える主要な化学反応である。光のスペクトルにおける異なる波長が、植物の大きさ、発芽過程、開花、生育など、植物の成長のさまざまな側面に影響を与える。光の品質に加えて、土壌の品質、水の有無、気候条件など、多様なその他の要因によっても植物の栽培は影響を受ける。

温室で植物を栽培する場合には、植物の成長に影響を与えるこれらすべての要素を制御することができる。温室内であれば、気候条件によって植物に悪影響が及ぼされる場所や時期であっても、植物を栽培することが可能である。温室内で使用される人工照明は、植物の成長と形態に影響を与える最も重要な要素の1つである。

温室内の人工照明には、いくつかの利点がある。例えば、日照時間が足りない時期や短い時期であっても栽培が可能であること、複数層で栽培することによって生産量を高められること、植物の下部または内部から光を当てられること、一定サイズの温室内でより多くの植物を育てられること、実際の太陽光にさらに光を補足することによってより早く育成できることなどである。

光合成の強化

光合成反応は主に、植物の葉の中にある葉緑体、具体的にはクロロフィルと呼ばれる緑色の色素のペアを用いて行われる。クロロフィルは、ベータカロチンなど他のいくつかの色素とともにクラスタを構成しており、光合成に関与する。これらの色素はそれぞれ、異なる波長の光を吸収可能で、そのエネルギーを中央のクロロフィル分子に送り、そこで光合成が行われる。

表1　光合成に関連する重要な色素のピーク吸収波長

色素	吸収のピーク
ベータカロチン	450nmと480～485nmのデュアルピーク
クロロフィルa	430nmと662nmのデュアルピーク
クロロフィルb	453nmと642nmのデュアルピーク
フィコエリトリン	590nm
フィコシアニン	625nm

クロロフィル色素は、主に光スペクトルの青色と赤色の領域に吸収のピークがある。**表1**は、光合成に関連する重要な色素の吸収のピークを詳細に示したものである。

温室の補足的な光源としては現在、HPS（high pressure sodium：高圧ナトリウム）ランプが最も広く使用されている。HPSランプは、供給電力から光出力への変換効率が高いが、スペクトルの黄色から橙の部分で放射されるスペクトルエネルギーがあり、光合成活動の主要な領域である青と赤の部分のエネルギーが不足している。そのため、HPSランプが放射するスペクトルエネルギーのほとんどは無駄となり、植物の光合成には使用されない。

従来の光源の欠点

また、HPSランプはかなりの量の熱を放射するため、温室の温度が上昇し、エネルギー消費量が増加してしまう。メタルハライド（MH：metal halide）ランプや小型蛍光灯（CFL：compact fluorescent lamp）は、スペクトルの青色領域でより多くの光を生成し、赤色と遠赤色領域の光が十分ではない。

光合成色素の吸収のピークに合わせて特定の波長に調整された単色LEDを使用すれば、植物栽培のための理想的な環境が構築できる（**図1**）。**図2**は、これらのピークに対応する、独オスラム・オプト・セミコンダクターズ社（OSRAM Opto Semiconductors）のLEDのスペクトル分布を示したものである。LEDは、400～700nmの範囲のPAR（photosynthetically active region：光合成有効領域）における電力から光への変換についても、従来のどの光源よりも効

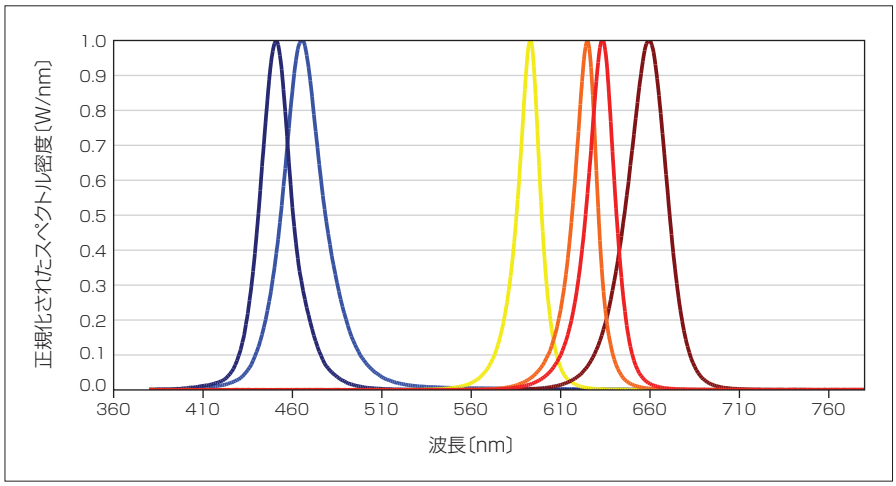

図2　オスラム・オプト・セミコンダクターズ社が提供する7種類の単色LEDのスペクトルパワー密度。ピーク波長はそれぞれ、光合成に関連する重要な色素の吸収のピークに対応して、450、465、590、625、634、660nmである。

率が高い。

当然ながらLEDを採用すれば、LEDを一般照明に適用した場合と同じ利点の多くが、園芸照明にももたらされる。LEDは従来の光源よりも寿命が長いため、メンテナンスコストが低下する。また、異なる波長のLEDを使用して光のスペクトル出力を調整し、特定の種類の植物に対して、最適な成長とエネルギー節減が得られるようにすることができる。

従来の光源と比較した場合のLEDのその他の利点としては、さまざまな視野角が選択可能で応用効率が改善できることや、光の強度、瞬時点灯時間、コールドスタート（低温始動）が制御可能で光周期照明が実現できることなどがある。世界の人口が増加し続け、さらに多くの農耕地が都市開発によって失われていく中、人工照明を備えた温室は植物栽培において、今後ますます重要な役割を果たすことになる。

藻類の培養

次は、藻類の培養への応用について説明する。微細藻類は、医薬品、健康食品、化学薬品の製造原料として、多大な期待を集めている。より最近では、バイオエタノールやバイオディーゼルなど、化石燃料に代替する可能性を秘めたバイオ燃料を生成するための原料として、藻類に対する関心が改めて高まっている。

バイオ燃料の生成に藻類を使用することにはいくつかの利点がある。藻類は耕作地を必要としないため、トウモロコシやサトウキビといった従来の農作物と競合しない。野外の池でも、耕作が不可能な土地に設置された光バイオリアクター（PBR：photobioreactor）などの閉ループシステムでも藻類を培養することができる。藻類は、多様な気候や水条件の下で成長することができる。また、他の油料作物と比べて、より多くのバイオ燃料を生産できる可能性を秘めている。

図3　孵化して海へと入るカメ

藻類は、植物に非常によく似ており、植物と同じ光合成を行う。屋外の池と屋内のPBRが、藻類の培養に使用される最も一般的な生産システムである。PBRは、藻類の成長に対して、より制御された環境を提供する。光はPBR内に保存することはできず、連続的に供給される。微細藻類の光合成による成長には、連続的な光が必須である。

藻類の成長と代謝は、光のスペクトル品質と強度の両方に依存する。LEDは、光合成成長にとって重要な波長におけるエネルギー効率が高いため、人工照明として魅力的な代替である。単色LEDはスペクトル帯域が狭いため、フィルタや複雑な冷却システムが不要で、また、従来の光源よりも寿命が長い。

高密度な藻類の培養においては、細胞が互いの影となって光が遮られ、細胞密度の増加に伴って光量が低下する。複数の研究によって、LEDのパルス光の方が、連続光よりも細胞密度の増加を促進することが明らかになっている。パルス光の方が、瞬間の光合成有効光量子束（PPF：photosynthetic photon flux）の値を高くすることが可能で、光をより深く浸透させることで、藻類の生産性を高めることができる。LEDは、瞬時点灯や瞬時消灯が可能であるため、有効に活用することによって、可変の動作周期でパルス光を生成することができる。藻類からバイオ燃料を生成することによって、温室効果ガス排出量を削減し、地球温暖化の影響を抑制できる可能性がある。

カメに優しい照明

単色LED照明は、環境に対する影響を最小限に抑えることを目的とする一般照明にも適用できる。例えば、人工の夜間照明は、砂浜の巣穴から孵化して出てきたウミガメの方向感覚を乱す可能性がある。孵化したばかりのウミガメは、その本能に従って視界において最も明るい光源に向かって前進する。自然環境ではこれは太陽または月となるはずで、それがウミガメを海の水平線へと導き、卵の中とは異なる新しい生態系へと入っていく（**図3**）。

孵化したばかりのカメはここで、視

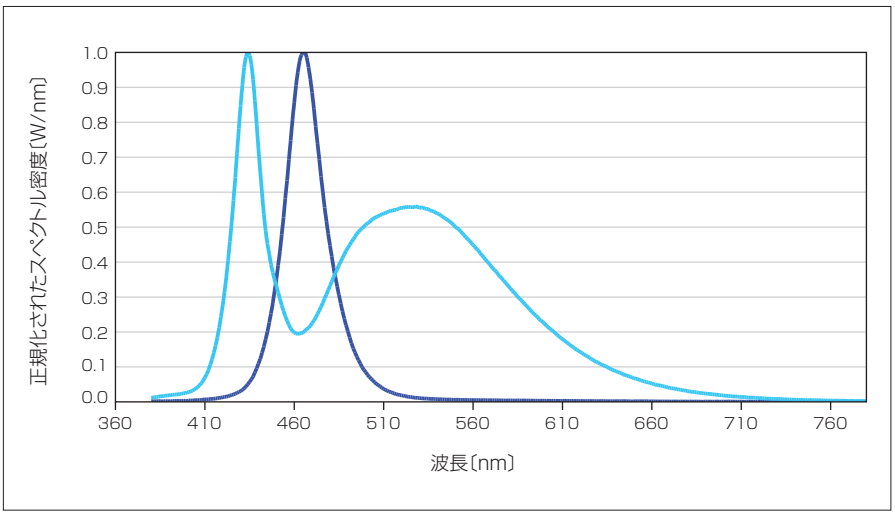

図4　オスラム社が提供する、色温度が9000Kの広帯域LEDとピーク波長が450nmの単色LEDのスペクトルパワー密度。両者の組み合わせによって、最適な水族館照明が構成される。

界に入る人工照明に向かって進んでしまう恐れもある。海岸近くの道路、建物、駐車場などを照らす照明である。孵化した後に海に入らなかったカメは、疲労、脱水、捕食といった原因によって死に至る確率が高い。複数の研究や実地実験によって、孵化したウミガメの視界に入る光のスペクトルエネルギーと強度が、ウミガメが海を発見するメカニズムにおいて重要な役割を果たすことが明らかになっている。ウミガメは、ウミガメの視覚の境界部に当たる光の長い波長（>560nm）よりも、短い波長に対して敏感であることも研究によって示されている。

したがって、人間が安全に動き回れるだけの十分な光出力を生成するとともに、光の長い波長（560～700nm）しか放射しない照明が、砂浜において「カメの安全を守る照明」であると考えられる。長い波長は、従来の光源にフィルタを適用することによって生成可能である。しかし、フィルタを適用すると本質的に光出力の強度が低下し、システム損失が生じるとともに、短い波長の光が一部漏れてしまう可能性もある。光の特定の波長（>560nm）しか照射しないLEDならばフィルタは不要であるため、従来の光源に対する魅力的な代替である。LED照明システムは寿命が長いためにメンテナンスコストも低くなり、消費電力も低く、また、指向性の光源であるために光汚染の問題も低減される。

孵化したウミガメが多数見られる場所として有名な米国フロリダ州の砂浜では、海岸沿いの開発によってウミガメの数が減少している。絶滅の危機にあるウミガメを保護しようと、FWC（Florida Fish and Wildlife Conservation Commission）は、認可するウミガメ用照明のガイドラインを定めた。これには、560nm以上の波長のLEDが含まれている。

水族館照明

最後に紹介する応用分野は、水族館照明である。水族館照明としてはこれまで、蛍光灯、白熱灯、MHランプなどをベースとする光源が使用されてきた。水族館における照明の目的は、水中空間に均一の照明を提供し、海洋生物の育成と維持を支援することである。また照明は、月明かり、日の出、夕日といった水中生活におけるさまざまな場面を演出する装飾的な要素としても使用することができる。

陸地における植物の育成への応用と同様に、LEDは海洋生物の育成に最適なスペクトル出力を提供する。LEDシステムは、従来の光源よりも光の強度が高く、放射熱が少ないため、冷却要件が引き下げられる。また、LED照明システムは効率が高く、メンテナンスコストが低く、蛍光灯システムに見られるような時間の経過に伴う波長の劣化は生じない。

特定のLED波長は、一部の種類のサンゴの蛍光性と色をより美しく見せる。450nm周辺の短い波長はエネルギーも高く、長い波長よりも水に対する透過性が高い。蛍光サンゴのために、青色にピークを持ち広帯域スペクトルの太陽光を模した色温度の高いLEDが、水族館照明として広く検討されている。**図4**は、この要件を満たすLEDのスペクトル分布を示している。また、LEDは点光源であり、光が水を透過し、また、水面の動きに応じて反射する様子が、より自然でかつ目を引く、光の揺らめきによる効果を水族館にもたらす。

光のスペクトル組成を変える、特定の波長を照射するLEDは、心躍らせるような新しい可能性を切り開く。このような光源には、エネルギー節減をはるかに超えた、従来の光源に勝る利点がある。単色LEDの独特の特性は、現行技術では決して実現できるとは考えられなかった方法で、さまざまな分野に対して効果を生み出し、光を適用する可能性を秘めている。

著者紹介
ラジェンドラ・スワミー（Rajendra Swamy）は、独オスラム・オプト・セミコンダクターズ社（OSRAM Opto Semiconductors）のLEDアプリケーションエンジニア。

LEDJ