

植物工場用光源に適した光質の研究
— 植物生長実験用 LED モジュールの製作評価 —¹
**Study and Optimization of Lighting Quality for Plant
Factory**
**- Fabrication and Evaluation of LED Modules for Plant Growth
Experiments -**

堀内 利一² 摂南大学理工学部電気電子工学科
HORIUCHI, Toshikazu Department of Electrical and Electronic Engineering,
Faculty of Science and Engineering, Setsunan University

Abstract

This paper describes the research on light-emitting diodes (LED) lighting for plant growth. Spectrum of the light has profound effects on the development of plants. Large LED module such as grow lights are easily constructed by using power LEDs. Emission spectra of the LEDs are narrow bandwidth with peak wavelength. These spectra enable to isolate the effects of specific photoreceptor systems in plants. This paper also describes hydroponic cultivation method and LED module fabrication. Tested results of photomorphogenesis in plants under several combination of red, green, blue LEDs are reported.

キーワード: 発光ダイオード, 光質, 植物工場, 光受容体, 光形態形成

Keywords : LED, light quality, plant factory, photosynthesis,
photomorphogenesis

1. はじめに

野菜や観賞植物, 薬用植物などの有用植物を効率よく栽培するためには, 干ばつや洪水, 暴風, 日照不足, 低温, 雪氷などの気象要因や害虫, 鳥, 小動物による食害や病原菌, 雑草の繁殖などの悪影響を受けない環境が望まれる. 外部環境と切り離れた閉鎖環境において, 温度, 湿度, 光, 水, 肥料, CO₂ 供給量を制御し有用植物を栽培する完全制御型植物工場は, このニーズを満たすものであり, 無農薬で高効率に栽培できる利点がある. また, 昨今の気候変動や我が国の農業就業人口の減少と高齢化に対する一つの解決策でもある.

植物工場で用いる光源としては, 従来から高圧ナトリウムランプや蛍光灯などが使用さ

¹ 【原稿受付】2018年7月26日, 【掲載決定】2018年9月5日

² 【主著者連絡先】堀内 利一 摂南大学, 教授 e-mail: horiuchi@ele.setsunan.ac.jp
〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町 17-8, 摂南大学理工学部 電気電子工学科

れていたが、最近では発熱の少ないLED（発光ダイオード）を用いて、植物に近づけて照射する近接照明方式がとられるようになってきている^{(1),(2),(3),(11)}。LEDは長寿命で消費電力が少なく、発熱も少ないので、栽培室の温度を制御するための空調用の電力も軽減できる。さらに、赤色や青色などの単色LEDは、その色特有のピーク波長を中心とした単色光を発するため、ピーク波長の異なるLEDを組み合わせると任意の波長帯域の光をつくりだすことができる⁽¹⁾。植物を育成させるための光環境については、光の強度、明期と暗期の周期、光質がかかわっている。ここで、植物育成における光質とは、植物にあてる光の波長分布のことである。LEDを用いると、光質や光の強度、明期と暗期の周期を容易に調整することができる。このため、この植物は、この光質の光をこういうふうにあてると、よく生長し、植物体内に含まれる有用成分も増えるのではないかと、という栽培実験が各所で盛んに実施されている^{(1),(2),(3),(7),(11)}。

植物は種によってそれぞれ異なる環境下で世代を重ねてきているため、適した光環境がそれぞれ異なる。従って、栽培種に適した光質を把握していれば、余計な波長の光を与えることなく効率的に栽培できる。

この他、LEDを用いることで、朝夕の時間帯の光を昼間の時間帯に比べて長波長側にシフトしたスペクトルの光に変える栽培実験や、光の強さを時間的に変化させたり、高速度で明滅する光を与えたりする実験なども比較的容易にできる。このような実験により、栽培種に適した光のレシピなるものを導出し、様々な植物種に対するデータベースを構築していくことが可能となる。

2. 植物の光形態形成と光のスペクトル

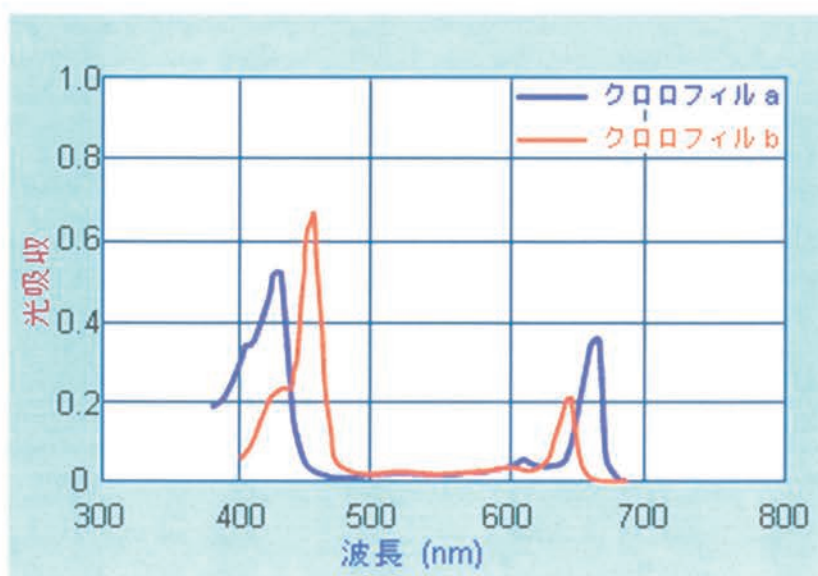


図1 クロロフィルの吸収スペクトル（出典：文部科学省ホームページ 科学技術・学術審議会資源調査分科会⁽¹³⁾）

植物は特定波長の光に対する各種の光受容体を持ち、その波長の光に反応して生長や分化を引き起こすメカニズムを有している^{(4),(5),(6)}。光の波長だけではなく、光の強度や明期と暗期の周期といった光環境が、植物の細胞分裂や生長方向、細胞分化、発芽、子葉の展開、茎の成長、開花などに影響することを光形態形成と呼んでいる。

植物体内に何種類もある光受容体のうち、光合成色素としてよく知られているのがクロロフィルである。葉緑素とも呼ばれているのでご存知の方も多いと思う。陸上植物のクロロフィルには、クロロフィルaとクロロフィルbがあり、図1に示すように光の吸収スペクトルが少しずつ異なっている。この2種類のクロロフィルで光合成に必要な光を吸収しており、吸収される光の波長は、Q帯と呼ばれる630~690nm（ナノメートル、ナノは 10^{-9} ）の赤色光と、ソーレー帯(Soret band)と呼ばれる400~480nmの青色光の吸収率が大きい⁽¹¹⁾。

クロロフィルa、bとも光を集める集光性色素の役割を担っており、光の吸収によりクロロフィル分子内の電子軌道が基底状態から励起状態に遷移する。励起状態の電子が持つエネルギーは、これらクロロフィル分子を通して植物体内の光化学系の反応中心に運ばれ、クロロフィル分子から電子受容体に電子が渡される。電荷分離と呼ばれる現象で、電子伝達反応とも呼ばれている。このようにして反応中心にエネルギーが集められるが、反応中心となり得るのは、一部のクロロフィルaである。クロロフィルbや反応中心ではないクロロフィルaは光を捕集するアンテナとしての役割とエネルギー伝達の役割を担う。

この光合成のメカニズムにより、植物栽培には赤と青の光が重要であるとされている。太陽光のスペクトルは波長が長い方から順に、赤外線、赤、橙、黄、緑、青、藍、紫、紫外線となっているが、光合成には主に赤と青の光だけが使われるということでもある。これ以外の波長の光はクロロフィルではほとんど吸収されない。植物が緑色(波長495~570 nm)に見えるのは、太陽光スペクトル強度で最大ピークとなっている緑色の光が吸収されず、反射や透過するためである。

植物の栽培実験をする際にも、この赤(R)と青(B)の光がよく用いられており、その比率であるB/R比やその逆数であるR/B比をパラメータにした栽培実験が行われている^{(1),(7),(8),(9),(10)}。この比率の草姿に与える影響が、栽培種により異なっている。草姿とは、植物の背丈や枝の配置、茎の長さや太さ、葉の幅や長さなど植物の姿のことである。例えば、リーフレタスであればRを大きくした方が、葉が細長くなり、ナスであればBを大きくした方が、背丈がよく伸びることが知られている⁽¹⁰⁾。

摂南大学理工学部電気電子工学科で学生が製作した赤と青のLEDモジュールの発光スペクトル分布を図2に示す。縦軸は光の相対強度を表しており、赤色LEDのピーク値で規格化している。図2では青色LEDのピーク値が赤色LEDの約半分になっているが、LEDモジュールに流す電流を制御することで、この比率は任意に変更可能である。このスペクトル分布は、図1のクロロフィルの吸収スペクトルにほぼ対応している。ただし、クロロフィルaの赤色光の吸収スペクトルのピークが約660nmにあり、この部分を考慮すると、赤色LEDのピーク波長をもう少し長いものにする必要があった。このピーク波長660nmの赤色光は、人間の目には暗く映り、表示灯としての実用性が乏しいため、当初あまり製造されていなかったが、最近、植物用としてこの波長のパワーLEDが製造されるようになってき

たため、電気電子工学科においても、2017年度よりピーク波長 660nm のパワーLED を使用している。

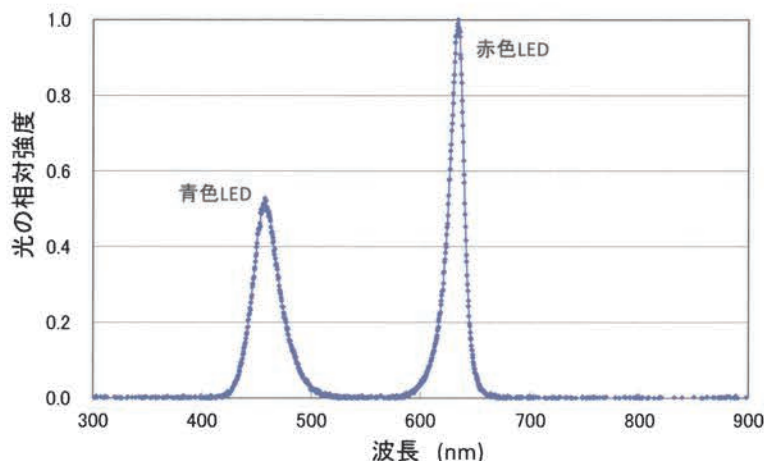


図2 赤色LEDと青色LEDの発光スペクトル分布

この他、赤や青以外の光で実験によく用いられるのが波長 700~800nm の遠赤色光(Far Red, FR)である。遠赤色光(FR)は、赤外線 (IR) の短波長側である近赤外線(Near-infrared, NIR)と一部波長が重なっている。赤外線の長波長側である遠赤外線(Far infrared, FIR)と名称や記号が似ているので混同されやすいが、波長が全く異なるので注意が必要である。植物研究分野では、この遠赤色光(FR)と赤色光(R)の比率を変える実験手法がよく用いられている。遠赤色光(FR)の波長領域は、図1では右端部分になり、クロロフィルはほとんど吸光しない。この領域ではフィトクロムという別の光受容体が吸光し、種子発芽の誘導や胚軸伸長に影響することが知られている^{(4),(10)}。この他、カロテノイドやクリプトクロム、フォトトロピンといった光受容体とその働きなどが知られている^{(5),(10)}。これら既知の光受容体に関しては、赤外、赤、青、紫外光を吸収し、光形態形成の様態が知られているが、これ以外の波長の光である黄や緑などの光に対する光形態形成はあまり知られていない。これらの波長の光を付加することで植物生長や形態形成に差が生じる場合は、新たな光受容体が存在している可能性があり、また差が生じない場合は、その光は不要であるということになる。

3. 植物栽培実験で用いる光の単位

光を計測するのに一般的に用いられる単位には照度(ルクス, lx)や、光度(カンデラ, cd), 光束(ルーメン, lm), 輝度(cd/m^2)があるが、これらは主に人間の目が感じる光の波長を基準にした単位系であり、植物栽培にこれらの単位はあまり用いられない。植物には植物専用の単位が使われている。植物の光化学反応量は、光合成が作用する波長帯域の光量子数に比例しており、光合成に有効な光量の指標として、光合成有効光量子束(Photosynthetic photon flux, PPF)や光合成有効光量子束密度(Photosynthetic photon flux density, PPFD)が用いられている。PPFDの単位は $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ であり、1秒間に1平方メートルあたり何モルに相当する光量子が通過するのかを計測するのである。1molは 6.02×10^{23} 個、 μ (マイ

クロ)は 10^{-6} である。図3のような光量子計(apogee製, MQ-200)で、植物葉面でのPPFDを揃えて、R/B比などを変え、生長比較実験をする方法が一般的である。

では、どの程度のPPFDにすればよいのかというと、この値も植物の種類によって大きく異なってくる。トウモロコシやトマトのような強い光に適した果菜類もあれば、レタスのように比較的弱い光に適した葉菜類もあり、それらの最適値も実験で求める必要がある。電気電子工学科での実験では、レタスでは $100\sim150\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ の範囲で設定している。 $100\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ より低いと光量不足で、細長く徒長してしまうことがあり、その場合、実験失敗となる。ただし、モヤシやカイワレなどのスプラウト栽培でのPPFDは、 $100\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ よりかなり低く設定することになる。



図3 実験用栽培床でのLEDモジュール下のPPFD計測

4. 植物栽培方法

4-1 水耕栽培の種類

植物工場では、土などの固形培地を用いずに養液を使う水耕栽培でレタスなどの葉菜類を栽培している所が多い。養液中には植物の生長に必要な窒素やリン、カリウム、カルシウム、マグネシウム、ホウ素、マンガン、鉄、亜鉛、モリブデンなどが溶解している。水耕栽培では、養液濃度の管理がしやすく、土耕栽培のような輪作障害も出ず、また害虫なども発生しにくい。水耕栽培にも各種の方法があり、養液を流動させる流動法と流動させない静置法に分かれる。また、ポンプを用いて傾斜をつけた板に薄い膜状に養液を流し続ける NFT (Nutrient Film Technique) と呼ばれる薄膜水耕や、塩ビパイプを水平に配置してポンプで養液を循環させ、パイプ上部に定植用穴を一定間隔開けてパイプ上で育てる方法、養液を数センチメートル溜める DFT (Deep Flow Technique) と呼ばれる湛液型水耕などがある。

植物は、根から養分と水以外に酸素も取り入れており、養液中の酸素濃度が低下すると根が茶色に変色して枯死し、うまく育たない。溶液中に酸素を取り込みやすいという点では流動法が有利であり、なかでも空気に触れる面積が最も大きい NFT が優れている。しかし、NFT は全体の水量が少ないので養液濃度が変動しやすい。一方、DFT は養液量が多く、養液濃度を長時間安定させるという点では NFT より優れている。ホウレンソウ栽培では養液中の溶存酸素量を大きくする必要があり、DFT では溶存酸素量が不足しがちになることがある。また、静置法では植物の生長と共に溶存酸素が減少していくため、長期間の栽培では、一定期間毎に養液を取り換えるか、エアポンプ等で液中に酸素供給する必要が生じる。ただし、レタスなど栽培期間が短く、また養液中の溶存酸素が少なくてもあまり問題とならない場合は、静置法でもある程度育ち、ペットボトルで栽培することさえ可能である。

水耕栽培用の養液については、ネット通販などで様々な種類のものが入手できるが、これらは大抵、個人の趣味に適した少量栽培用であり、農業や植物工場、大規模実験として大量に栽培する場合は、JA などから OAT アグリオ(株)の OAT ハウス肥料シリーズという粉末状の養液栽培用肥料を購入し、同社が公開している各処方により栽培種に適した養液を調合する方法が一般に行われている。養液濃度については、養液作製時に電気伝導率である EC(Electrical Conductivity)を市販の EC メータで計測し管理する。EC 値については、栽培種別に適切な範囲が公開されているものの、最適値については、先述の水耕栽培方法の種類によっても異なるため、独自に見つけ出す必要がある。電気電子工学科の実験では、レタスなどの葉菜類では、EC 値を 1.2~1.7 程度、幼苗時は 0.8~1.2 程度としている。単位は(mS/cm ミリジーメンズ毎センチメートル)である。さらに、栽培途中で養液の PH 値が酸性に傾かないよう、市販の PH メータで測定し、養液の取り換え等により管理する必要がある。

4-2 栽培環境の制御

植物の生長比較を厳密に実験しようとする場合、ハードルが高いのが、温度、湿度、養液量、養液濃度などを制御する環境制御システムである。1 株や 2 株育てるのであれば、そう問題とはならないが、同一植物で同一ロットの種子を使用してさえ、植物生長には個体差が生じるため、同時に育成する株数をある程度増やして個体差の影響をなくすよう統計処理しなければならない。従って、育成環境はかなり広いスペースが必要になる。この広い育成環境全体の温度、湿度等を一定にしなければならない。通常の空調設備や恒温槽などでは不十分である。通常用いられるエアコンや恒温槽は、低沸点媒体を用いたヒートポンプで温度制御しているので、空気中の水分を取り除いてしまう。このため育成に適した湿度よりかなり低くなってしまふのである。正確な生長比較実験には、温度、湿度等が制御できるインキュベータが多数台必要になってくるので、多額の設備投資と広い設置スペースが必要になる。設置スペースが限られる場合や研究予算がそれほどない場合は、温度・湿度が適した季節に同時に多数株栽培して比較する方法を用いるか、同時栽培する株数を減らしてインキュベータ数台程度で生長比較する実験を繰り返し、母数を増やしていくことになる。

摂南大学理工学部電気電子工学科においては、大学研究室の一面にラックを用いた多段式の栽培床を製作し、光質別に区画を設けて試作 LED モジュールを用いた実験をしていた

が、温湿度を一定にさせるため、後者の方法に切り替え、小型インキュベータ4台を光質別に1台ずつ使用して試作LEDモジュールを取り付け、生長比較実験をしている。

5. 植物生長比較実験用LEDモジュールの製作

LEDには様々な形状のものがあり、図4に砲弾型LEDとパワーLEDの例を示す。最も一般的に販売、使用されているのが、イルミネーションなど電飾に用いられる砲弾型LEDである。しかし、砲弾型LEDは、1個あたりの光度が小さいため、植物生長実験に使用する場合は個数が増える。放熱特性を高めて大電流・高出力化をはかったパワーLEDを用いると、全体のLED個数を少なくできるので、電気的な接続箇所や配線数を少なくでき、比較的容易に光源の製作が可能となる。

このパワーLEDを複数個接続して基板上にLEDモジュールを製作していく。このとき、全てのLEDを直列接続する方法でモジュールを製作すると、その中の1個が故障したときにモジュールのLED全部が消灯してしまうので、長期間継続点灯が求められる植物栽培用光源としては適さない。光源の長期的な信頼性を向上させるには並列接続が必要となるが、特定のLEDに電流が集中しないよう工夫する必要がある。LEDを並列接続するときは、同一型式のLEDを接続するが、同一型式のLEDであっても、順方向の電圧・電流特性に製造時のばらつきがあるため、順方向電圧の少し低いLEDに電流が多く流れてよく光り、順方向電圧の少し高いLEDに電流があまり流れず暗いというアンバランスが生じてしまう。特定のLEDだけよく光っていると、その部分だけ温度が高くなり、壊れやすくなるのである。このため、LEDと直列にそれぞれ値の異なる電流制限抵抗を入れて、電流のアンバランスを解消する方法が一般的にとられる。また、図5のようにLEDを数個直列接続した各列（これをストリングという）どうしを並列接続する際にも、特定のストリングに電流が集中しないよう、ストリング毎に電流制限抵抗を入れる必要がある。ストリング毎に入れる電流制限抵抗値はそれぞれ異なり、実測によって抵抗値を求めておかなければならない。



図4 砲弾型LEDとパワーLED

さらに，ストリング中の 1 個の LED が故障した場合，開放状態の故障であれば，そのストリングに直列接続している全ての LED が点灯しなくなったり，短絡状態の故障であれば，そのストリング全体の耐圧が低下したりするので，この方法でも長期間継続点灯には不向きである．

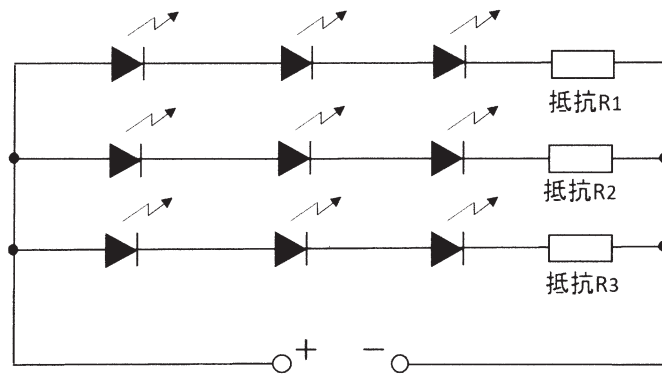


図5 LED 3個を直列接続したストリング3本を並列接続する回路

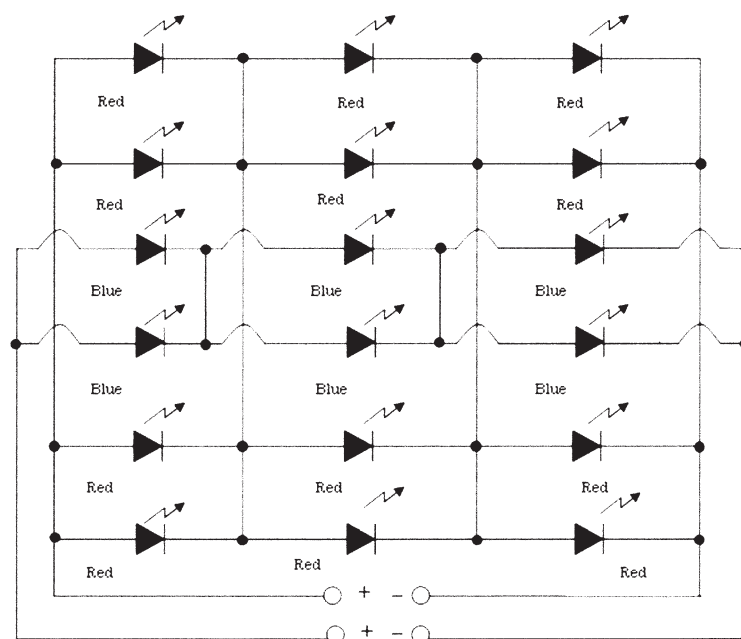


図6 赤色 LED12 個と青色 LED 6 個を格子状接続する回路

これらの問題点を解決する接続法としては，図6のように LED を格子状に接続する方法がある．格子状接続では，図5の接続方法より配線数が増えてしまうが，電流経路が分散化され，各ストリングに流れる電流が平均化されるので，電流制限抵抗を 1 つにすることが

できる。また LED が 1 個故障しても、残りの LED のほとんどが、そのまま点灯状態を保つ。図 6 では、赤色 LED12 個と青色 LED6 個をそれぞれ格子状接続した回路で、赤と青の LED をそれぞれ直流電源に接続し、赤色光と青色光を独立に制御する。電流制限抵抗は、直流電源と直列に各 1 個ずつ挿入することになるが、市販の直流安定化電源装置を使用し、電源装置側で電流制限をかけておけば、電流制限抵抗は不要となる。

さらに、LED モジュール製作には、放熱対策が不可欠である。LED は半導体の pn 接合面から発光しており、この接合面の温度をジャンクション温度という。このジャンクション温度を最大定格温度以内の可能な限り低い温度に抑える必要がある。LED モジュールの放熱対策としては、パソコンの CPU と同様、放熱用の金属フィン（放熱板）を取り付け、空冷ファンで熱い空気をはき出す方法が一般的で、なかには、パイプに冷水を通して冷却させる水冷装置が付随する場合もある。ただし、空冷ファンなどの機械的な可動装置を付ける場合は、ファンが故障したときの安全対策が必要になってくる。ファンが停止した状態で、LED モジュールが継続点灯していると温度が上昇し過ぎて、モジュールが焼けてしまうからである。温度上昇を検知し、LED モジュールを消灯させる制御装置が必要となる。

電気電子工学科の学生が製作した LED モジュール例を図 7 に示す。95mm×291mm の長方形の基板上に赤と青のパワー LED を図 6 の格子状接続で配線している。この LED モジュールは、LED と基板を合わせた厚さが約 3mm の薄い板状であり、基板背面に放熱フィンを取り付けている。LED モジュール 1 枚あたりに流す電流に上限値を設けており、空冷ファンがない状態で点灯を続けても LED のジャンクション温度が最大定格値より低い温度で熱平衡状態を保ち、それ以上温度が上がらないようにしている。この LED モジュールでは赤と青の LED に流す電流値を別々に制御できるので、B/R 比やその逆数である R/B 比といった植物生長に関する分野でよく用いられるパラメータを変える実験ができる。さらに、赤や青以外の中間色にピーク波長を持つ LED を付加した場合、植物がどのように生長・分化するかを比較実験するための LED モジュールも製作している。

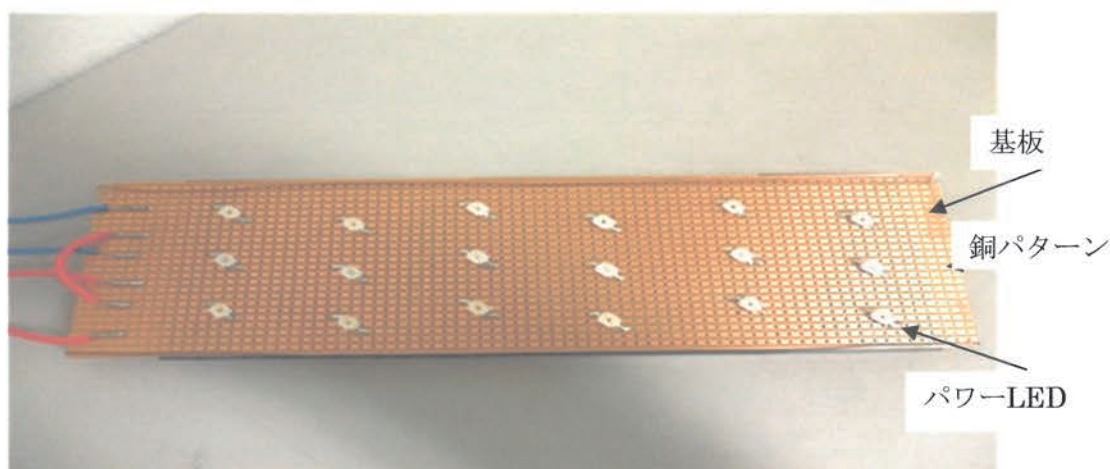


図 7 学生が製作した LED モジュール

6. 植物生長比較実験

ピーク波長が 660nm の赤色 LED と 465nm の青色 LED で製作したモジュールを 8 枚使用し、4 台のインキュベータに各 2 枚ずつ設置して植物葉面での PPFD を $100\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ に揃えたうえで B/R 比を 4 通りにし、温湿度、養液濃度を揃えてリーフレタスの生長比較実験をした。その結果、図 8 に示すように葉幅の生長に有意な差が見られた⁽¹²⁾。各 2 株ずつ計 8 株での実験で母数が少ないが、B/R 比 0.5~1.0 で葉幅の生長速度が大きい。過去に実施した同種の実験においても、B/R 比を 0.3 程度に留めるよりも 0.5~1.0 まで大きくするほうが、葉の幅が広がることがわかっている⁽¹⁾。

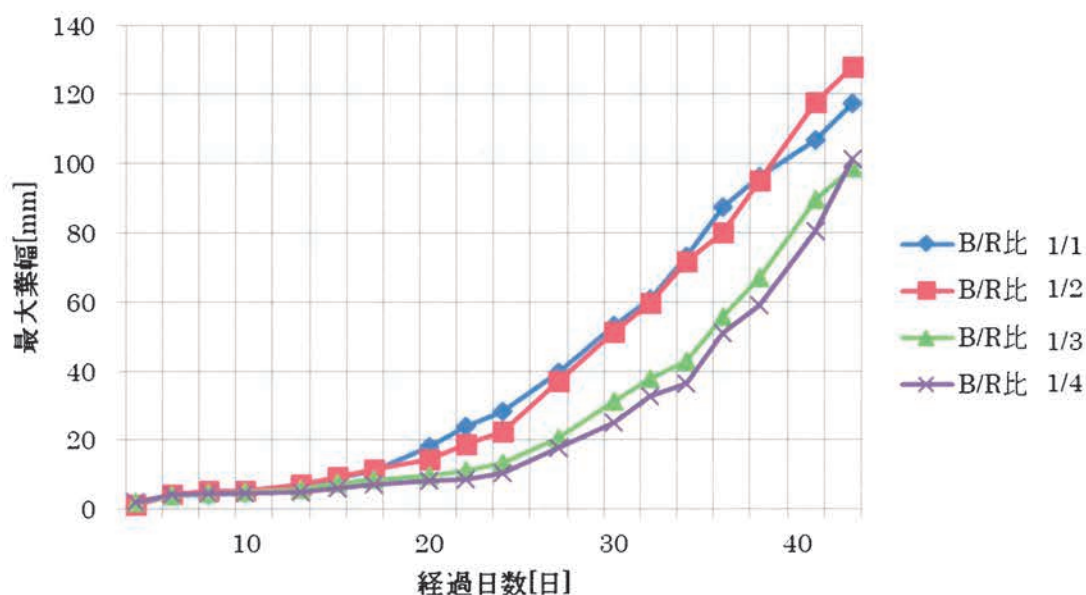


図 8 B/R 比をパラメータにしたリーフレタスの生長比較実験結果
(いずれも赤色光と青色光の合計の PPFD は $100\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 一定)

インキュベータ 2 台で実施した図 9 の赤色光と青色光に緑色光（ピーク波長 520nm）を加えたリーフレタスの生長比較実験では、葉幅、葉長、草丈、草姿とも緑色光の有無に関わらずほぼ同じであった。各 2 株だけの比較であるので、母数を増やしても同様な結果であれば、この植物の場合、緑色光は生長にほとんど影響を与えていないといった結論になる。なお、緑色光を赤、青光に加えると、光の三原色である RGB（赤・緑・青）が揃うので白色光になる。



(a) 赤，青光に緑色光を加えた場合

(b) 赤，青光のみの場合

図9 赤色光と青色光に緑色光を加えた生長比較実験（19日経過時点）

7. まとめ

本稿では、植物工場用光源に適した光質探査の必要性和、探査方法の例、水耕栽培法、単色LEDを組み合わせたLEDモジュール製作方法を説明した上で、摂南大学理工学部電気電子工学科で実施している植物生長比較実験の概要を紹介した。今日の植物工場では白色光源を使っている所が多いが、栽培種に最も適した光質がわかれば、有用な波長の光だけ強めたり、不要な波長の光を省いたりすることで、栽培速度の向上や植物の品質向上、省エネルギー化が期待できる。

参考文献

- (1) 堀内利一，「パワーLEDモジュールによる植物生長実験用光源の製作評価研究」，電気学会論文誌A, 131-11(2011), pp.893-899.
- (2) 野末はつみ，島田葵，谷口彬雄，野末雅之，「調光モジュールLED光源ユニットを用いた植物の生産性向上への試み」，植物環境工学, 22-2(2010), pp.81-87.
- (3) 松本拓也，伊藤博通，白居祐希，白石齊聖，宇野雄一，「光質がレタス成長と野菜中硝酸イオン濃度に及ぼす影響」，植物環境工学, 22-3(2010), pp.140-147.
- (4) 松下智直，「植物の光情報受容体フィトクロムの細胞内シグナル伝達機構」，光合成研究, 18-1 (2008), pp.16-23.
- (5) 井上晋一郎，武宮淳史，島崎研一郎，「青色光受容体フォトトロピンに依存した植物の生長制御」，光合成研究, 19-1(2009), pp.4-8.
- (6) 稲田勝美，「水稻生育の光質依存性 第1報 幼植物の生長に及ぼす特定波長帯を除去した光の影響」，日本作物學會紀事, 42-1 (1973), pp.63-71.

- (7) 清水浩, 馬稚昱, 田澤信二, 「青色蛍光灯と青色 LED ではキクの茎伸長に与える影響が異なる」, 植物環境工学, 20-2(2008), pp.98-101.
- (8) 庄子和博, 後藤英司, 橋田慎之介, 後藤文之, 吉原利一, 「赤色光と青色光がレッドリーフレタスのアントシアニン蓄積と生合成遺伝子の発現に及ぼす影響」, 植物環境工学, 22-2(2010), pp.107-113.
- (9) 富士原和宏, 木村好克, 蔵田憲次, 「赤・青色 LED 弱光照射低温貯蔵における青色光 PPFD 比率がトマト接ぎ木セル成型苗の品質に及ぼす影響」, 生物環境調節, 41-4(2003), pp.361-368.
- (10) 後藤英司, 渡邊博之, 雨木若慶, 平井正良, 福田直也 他著, 後藤英司 監修, 「アグリフォトニクスーLED を利用した植物工場をめざして」, (株)シーエムシー出版, (2008).
- (11) 増田健, 池内昌彦 他著, 岡本和夫代表, 「光合成の科学」, 東京大学光合成教育研究会編, 東京大学出版会, (2007).
- (12) 中野寛理, 「植物生長比較用パワーLED モジュール製作評価研究」, 摂南大学理工学部電気電子工学科卒業研究報告書, (2017), pp.1-53.
- (13) 文部科学省ホームページ, 科学技術・学術審議会 資源調査分科会 光資源を活用し, 創造する科学技術の振興ー持続可能な「光の世紀」に向けてー第2章 豊かなくらしに寄与する光, http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu3/toushin/attach/1333537.htm (2018年7月20日 閲覧).