レーザーレター

赤色レーザーダイオードと青色発光ダイオードを用いた
植物栽培実験

西田 嘉夫*・山中 正宣**・井澤 靖和**・中井 貞雄**

(1995年10月9日 受理)

Plant Growth Experiments Using a Red Laser Diode
and Blue Light Emitting Diodes

Yoshio NISHIDA*, Masanobu YAMANAKA**, Yasukazu IZAWA** and Sadao NAKAI**

(Received October 9, 1995)

Growth experiments of Sprouting Radish were carried out for the first time by using a red laser diode (LD) and two blue light emitting diodes (LED) as the light source for the photosynthesis. The output power and the central wavelength of the LD are 5 mW and 670 nm, and those of the LED are 1.2 mW and 450 nm, respectively. The type of the LD is selected so that the central wavelength of the LD matches to the band center of the absorption spectrum of the plant. It is found that the plant under the artificial light grows similarly to that under sunlight.

Key Words: Photosynthesis, Laser diode, Light emitting diode, Action spectrum, Chlorophyll

1. はじめに

最近の光半導体素子の研究開発には著しいものがある。特に半導体レーザー (Laser Diode, 以下LD) については、その高出力化^{1,2)}が、また、発光ダイオード (Light Emitting Diode, 以下LED) については高輝度ブルー化^{3,4)}が進んでいる。

太陽エネルギーを利用して無機物から有機物を合成する植物の光合成 (生合成) に関しては、その反応機構の解明に様々な科学的アプローチ

がなされてきた⁵⁻⁸⁾。農業の分野においても、高度なバイオテクノロジーによる植物栽培が盛んに研究されている⁹⁾。一例として、環境制御などハイテク技術を利用した植物の周年生産システムと定義される「植物工場」の研究開発が進行中であり⁹⁾、そこでは植物を生育させるための光源として、従来のランプ光源 (例えば、高圧ナトリウムランプなど) に代わって、レーザーを光源に用いた「レーザー植物工場」が提案されている¹⁰⁻¹²⁾。緑色植物の光合成反応に必要なとされる光源の条件から、LDに要求され

* 大阪市立西高等学校 (〒550 大阪市西区北堀江4-7-1)

** 大阪大学レーザー核融合研究センター (〒565 大阪府吹田市山田丘2-6)

* Osaka City Nishi Senior High School (4-7-1 Kitahorie, Nishi-ku, Osaka 550)

** Institute of Laser Engineering, Osaka University (2-6 Yamada-oka, Suita, Osaka 565)

Fig. 1 Action spectrum of plants⁹⁾ and the emission spectra of LD and LED.

Fig. 2 Optical absorption spectra of chlorophyll a and b.⁶⁾

る波長範囲は、赤色光が640～690 nmであり、青色光は420～470 nmである¹⁰⁻¹²⁾。また、近赤外光 (730 nm近辺の遠赤色光) も加えるのが望ましいとも言われている¹²⁾。

これまで、赤色及び青色光源にLEDを用いて植物栽培を試みた報告がなされている¹³⁻¹⁵⁾。我々は、植物に照射した単色光に対してどの程度の大きさの作用があるかを示す作用スペクトル (Fig. 1) と、よく知られている植物の光合成反応に主たる役割を果たすクロロフィルの吸収スペクトル⁶⁾ (Fig. 2) に対応する光源として、青色にはLEDを、また、赤色には高効率化を目指してLDを使用し、水耕栽培によるカイワレダイコンの栽培を試みたのでここに報告する¹⁶⁾。

2. LD光源の利点

LEDの代わりにLDを用いる利点は、まず第一に光源自体の高効率・高出力化が可能であるということである。LEDの電気光変換効率が2～3%程度であるのに対し、LDのそれは20%台のものが市販されており、今後さらに高出力化が進むものと思われる。高出力化については、現在、LD単体ではCW動作で～100Wのものが、二次元LDアレイの準CW動作ではピークパワー～420kWのものが米国で作製されている¹⁻²⁾。

もう一つの利点は、LD光源には、熱発生が少い有利さがある。ランプ光源はランプ自体の発生する余分な熱を冷却する必要がある、装置自体が大きいものとなるが、LDの場合はコンパクト化が極めて容易となる。そのほか、LEDは発光ピーク幅が半値全幅 (FWHM) で70nm程度とかなり広いのに対して、LDは多モード発振しても高々数nm程度であるため、光励起する場合に植物の吸収帯に高効率の整合が容易である。また、発振波長の温度依存性は、0.2～0.3 nm/℃ であるので、±10℃程度をTEC (Thermo-electric cooler) により制御させれば、20～25℃での発振波長から2～3 nmを長短波長側にシフトさせることが出来る。その結果、Fig. 2に示したクロロフィルのような狭い吸収帯への整合を図るには有効な手段となる。

このように、LDは熱発生が少なく、高出力、高効率で植物を光励起できるというメリットを活かせる点は大きい。また、LDのような単一ピーク光では、吸収された光がどのような効率で利用されるかという光化学反応のプロセス上の効果を調べる事ができる。さらに、最近では様々な発振波長のLDが入手可能なことから、LDを種々の植物の (人工光) 照射実験に用いれば、植物の成長に及ぼす明確な波長依存性を調べることもできる。LD光は発振ピーク幅が狭いため、植物のいくつかの吸収スペクトルのピークに合合わせることが出来ないで、正常な育成が可能かどうかという問題がある⁹⁻¹²⁾。し

Fig. 3 LD and LED drivers:(a) driver system using a micro-computer; (b) arrangement of lighting elements using an LD and LEDs.

かし、この点は640～690 nm帯での様々な発振スペクトルをもつAlGaInPのLDが市販されているので、これらLDを複数個使用することによって解決できる。

3. 栽培実験の方法

3.1 光源ユニットの構成

カイワレダイコンという小さい植物の栽培実験を試みるので、光源には大がかりな高出力、高価格のものを必要としない。カイワレダイコンの葉色をよくするには、クロロフィル生成に直接関与する光として、450～550 nm、650～700 nmの両方を十分に与えることが肝要であると言われて¹⁷⁾。

そこで、使用する半導体光源を作用スペクトルに合わせ、次にクロロフィルの吸収ピークに

できるだけ近づけるように配慮して選定した。赤色LDとしては、クロロフィル aの最大吸収帯に近い発振波長670 nm^{6,7)}、光出力5 mWのもの(三洋電機(株)製SDL-3039-011)を1個使用した。一方、青色光については、LDは開発段階にあり非常に高価で入手が困難なため、1994年から市販が開始された発光の中心波長が450 nm、光出力1.2 mWの高輝度青色LED(日亜化学工業(株)製NLPB500)を2個使用した。このように、入手可能なLDとLEDの発光波長が、光形態形成⁹⁻¹²⁾に必要な作用スペクトルのピークにうまく重なっているため、効率のよい成育が期待されるとともに、それぞれがクロロフィル aおよびbの吸収スペクトルの一部に合っていることから葉色にもよい効果が期待される。ここで、光合成反応においてクロロフィル a

Fig. 4 Photograph of the LD and LED driver unit.

は主色素として働き、その補助色素としてのクロロフィル b は、吸収した光を100%の効率でクロロフィル a にエネルギー伝達する役目を担っていると言われている⁷⁾。また、光形態形成には弱光反応と強光反応があり、フィトクロームという色素の働きを介して種子発芽、葉緑素合成、子葉の展開、花芽分化及び開花などの植物の質的な変化を誘起することが知られている。強光下における葉緑素合成は青色光によって促進され、赤色光によって阻害される傾向があり、葉の正常な形態形成には青色光が必要であると言われている¹²⁾。本実験装置には、成長促進効果があると言われる近赤外LD (785 nm) も1個設けている。しかし、この近赤外LDを加えた実験データは、今のところまだ不十分なので今後報告することにする。

以上、これら3種類の光源を設けた構成とその駆動回路システムをFig. 3に、その写真をFig. 4に示す。

3.2 実験装置の構成

照明光源としてLDとLEDを使用した植物栽培実験装置をFig. 5に示す。使用した植物はカイワレダイコンで、水耕栽培によった。種子は水に漬けたスポンジ上に播き、その真上に光源ユニットを配置したものをグロースチャンバーに入れ、実験室内で栽培する方法をとった。植物の葉との距離は、5 cmを保ちながら、光源ユニットを垂直に上昇させた。光源直下5 cm

Fig. 5 Experimental setup for plant growth using an LD and LEDs.

の位置でのピーク光出力は、赤色光1.39 mW、青色光0.98 mWであった。温度は、20～25℃の間を変動し、CO₂量の制御などは行っていない。

4. 栽培実験

1995年5月8日から5月23日までの期間において実験室内で行った栽培実験の結果を述べる。

前述の光源ユニットにより、カイワレダイコンの栽培を行っている様子をFig. 6に示す。カイワレダイコンの種子は、朝9時に3時間水に浸した後、水に漬けたスポンジ上に播き、グロースチャンバー内に放置した状態にしておくと、翌朝には少し発芽していた。その日の朝9時より照射し、夕方6時には照射を止めるという日照時間に合わせた1日9時間の点灯による方法を毎日繰り返した。その成長の結果を横軸に経過時間、縦軸に茎の長さをとってFig. 7に示す。この測定結果より、茎の成長速度は平均0.60 mm/hであり、茎の太さや葉の緑色度は太陽光の散乱光が当たる窓辺(日射量は、最大約10 mW/cm²)に置いたものと比べても遜色のない

(a)

(b)

(c)

Fig. 6 Growth of sprouting radish under an LD and LED illumination: (a) two days after initial planting; (b) four days later; (c) six days later.

ものであった。Fig. 8に両者の比較を示す。

また、朝9時から以後一週間昼夜を分かつたず

Fig. 7 Growth speed of Sprouting Radish under continuous illumination from 9:00 to 18:00 each day.

Fig. 8 Photographs of the grown sprouting radish under solar light in a room (left), and under an LD and LEDs as the light source (right).

点灯し続けた栽培実験も行ったが、初期の発芽抑制が見受けられたものの、茎の成長速度は0.86 mm/hで前述の結果より約1.4倍速かった。これは照射時間が長かったために、光合成量が多かったことと、赤色光の成長促進効果が現れたものと考えられる。

5. おわりに

植物の育成に関わる光質について、青色部に青色LED、赤色部に初めてLDという単一スペクトルに近い半導体光源を用いて、カイワレダイコンの水耕栽培を試みた。その結果、多くのスペクトルを含んだ太陽光やランプ光源と同等の成育が見られた。この実験は、定常光による光合成反応や形態形成に関する予備的な栽培で

あるが、光と直接関係する光化学反応である明反応とその後に起こる光に無関係な化学反応である暗反応に合わせた、パルス光による光化学反応プロセスを考慮に入れたり、近赤外光の与え方による形態形成への効果などを取り入れれば、さらにLD及びLEDならではの成長促進効果が期待されるものと思われる。

最後に、本研究を進めるに当り御協力戴いたローム(株)津守昌彦氏、股本宏至氏、内田智士氏、並びに三洋電機(株)マイクロエレクトロニクス研究所の吉年慶一氏に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 山中正宣：レーザー研究 21 (1993) 850.
- 2) 菅博文，神崎武司，宮島博文，伊藤之弘，書馬輝夫，山中正宣，近江雅人，桐山博光，中井貞雄：レーザー研究 23 (1995) 541.
- 3) 中村修二：光学 23 (1994) 701.
- 4) 中村修二：電子情報通信学会誌 78 (1995) 683.
- 5) 加藤 栄：光合成入門 (共立出版, 1973).
- 6) 柴田和雄：光と植物 [光合成のエネルギーとエントロピー] (培風館, 1982).
- 7) 藤茂 宏：光合成 [明反応研究の流れ] (東京大学出版会, 1982).
- 8) 宮地重遠 編集：現代植物生理学 1 [光合成] (朝倉書店, 1992).
- 9) 高辻正基：植物工場入門 (オーム社, 1987).
- 10) 高辻正基，山中正宣：植物工場学会誌 6 (1994) 184.
- 11) 高辻正基，山中正宣：応用物理 63 (1994) 1127.
- 12) 高辻正基：平成7年レーザー学会学術講演会第15回年次大会, 20pIV8 (1994) M3-6.
- 13) 岡本研正，柳智博：農業および園芸 70 (1995) 32.
- 14) 岡本研正，柳智博，藤原清人：第42回応用物理学関係連合講演会, 30p-ZY-1 (1995-03, 東海大学) 1195.
- 15) 高辻正基，辻貴之，関善範，星岳彦：植物工場学会誌 7 (1995) 163.
- 16) 西田嘉夫，山中正宣，中井貞雄：第56回応用物理学学会学術講演会, 27a-A-11 (1995-08, 金沢工業大学) 990.
- 17) 吉野 実：農業および園芸 62 (1987) 206.

レーザーワード

光合成 (photosynthesis)

生物が光エネルギーを化学エネルギーに変換して有機物を合成する全反応過程を光合成という。植物は光合成によって成長するが、これ以外の重要な光反応に光形態形成がある。これには弱光反応と強光反応があり、フィトクローム分子の働きを介して植物の質的な変化を誘起する。植物工場 (plant factory, 高度環境制御による植物の連続生産システム) で葉菜類を栽培する際には強光反応が重要であり、強光下における葉緑素合成は青色光によって促進され、赤色光によって阻害される傾向にある。また、葉の正常な形態形成には青色光が必要である。従って、植物工場には赤色光 (640～690 nm) と青色光 (420～470 nm) があればよいことが知られている。さらに、成長促進効果がある遠赤色 (700～800 nm) も必要とされている。青色光は赤色光の10分の1程度の強度でよく、連続照射よりも間欠照射の方が光合成の効率が高いことが知られている。植物工場用人工光源として従来より高圧ナトリウムランプ等が用いられているが、最近では単色で高効率の発光ダイオード (LED) や半導体レーザー (LD) を用いて種々の植物栽培実験が行なわれている。特に、人工光源としてレーザーを用いるものはレーザー植物工場と呼ばれている。

(山中 正宣)