レーザー光によるサラダ栽培実験

森 康裕¹⁾・高辻正基²⁾

¹⁾東海大学理学部化学科 259-1292 神奈川県平塚市北金目 1117

²⁾東海大学開発工学部生物工学科 410-0395 静岡県沼津市西野 317

Growth Experiment in Lettuce using Laser Light

Yasuhiro MORI¹⁾ and Masamoto TAKATSUJI²⁾

¹⁾Department of Chemistry, Faculty of Science, Tokai University,
Kita-Kaname 1117, Hiratsuka, Kanagawa 259-1292, Japan

²⁾Department of Biological Science and Technology, School of
High-Technology for Human Welfare, Tokai University, Nishino 317,
Numazu, Shizuoka 410-0395, Japan

Abstract

Photosynthetic rate, relative growth rate and vitaminC contents were measured in lettuce cultivated under red and blue lasers and the results were compared with those cultivated under light emitting diodes(LED). It was found that lettuce grew fairly healthily under red laser diode(650nm) and blue laser(442nm) with R/B ratio 10. However, both photosynthetic rate and growth rate rather diminished compared with LED cases. As for vitaminC contents, the result was about the same as LED cases.

Keywords : photosynthetic rate, relative growth rate, vitaminC content, laser, LED, lettuce

緒 言

近年、完全制御型植物工場の新しい光源として各所で可視発光ダイオード(LED)を使用した植物栽培実験の研究が行われている¹⁻³⁾。また可視半導体レーザーダイオード(LD)を使用した植物栽培実験が始められている⁴⁻⁷⁾。これらの光半導体素子は従来光源に比べて、①発光波長をクロロフィルの吸収ピークと光形態形成の強光反応の作用スペクトルのピークにほぼ一致させられる、②熱放射がない、③小型軽量である、④長寿命である、⑤低電圧駆動である、⑥パルス照射が可能である、という利点がある。さらにLDの場合は高効率、高出力、電流で直接変調可能という利点に加わる。

赤色LDはDVD(Digital Versatile Disc)の光ピックアップ

2000年8月21日受付

2000年10月20日受理

アップ部分に広く採用されている。赤色LDの開発だけでなく、さらに記憶密度の増大を目指して青色LDの開発も急速に進み実用化も近い。DVDが広く普及した暁には、これらLDの大幅なコストダウンが図られ、植物栽培用光源として使われる可能性がある。

前報⁶⁾ではLEDの組み合わせおよび、赤色LDと青色LEDを組み合わせさせてサラダの成長率、光合成速度、クロロフィル含量、気孔コンダクタンスなどを測定した結果を報告した。また山崎ら⁷⁾は680nmの赤色LDのみによるサラダの栽培実験を行い高圧ナトリウムランプによる栽培と比較した。

本論文では、DVD用の赤色LD(650nm)と青色のHe-Cdレーザー(442nm)を用い、前報より広い条件下でレーザー光のみによるサラダの栽培実験を行った。すなわち、相対成長率、光合成速度、気孔コンダクタンス、ビタミンC含量などの成長指標に関して基本的なデータをとり、前報の結果と比較しながらレーザー光が植物

成長に与える影響を調べた。これらの成長指標は成長の量(相対成長率, 光合成速度), 成長の状態(気孔コンダクタンス)および成長の質(ビタミンC含量)に対する基本的な量である。

材料および方法

1. 試料

サラダナ (*Lactuca sativa* cv. “Natsuyo-Saradana”) のコーティング種子を, 水耕用ウレタンキューブに播種し育苗室で12日間育苗した(蛍光灯により光量子束密度 $150 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ s}$, 気温 $22 \sim 25^\circ\text{C}$, 日長 17 h)。そして葉数 2~3 枚で全生体重が 2 g 程度のものを選抜した。培養液は大塚1号, 2号それぞれ 0.75 g, 0.50 g を水 1 l に溶解し, $\text{pH} 6.0 \pm 0.5$, $\text{EC} 1.2 \pm 0.1 \text{ mS}/\text{cm}$ に調整したものを使用した。

2. 光源

(1) 赤色 LD と青色レーザーの組み合わせ

使用した赤色 LD は DVD-ROM の用途に開発された発振波長 650 nm, 光出力 10 mW のものである。これをプリント基盤上の $15 \text{ cm} \times 14 \text{ cm}$ の範囲に 3 個直列 $\times$ 6 個並列に並べ, サラダナに均一に照射するようにした。LD の駆動回路には光出力を一定に保つことができる APC 回路を採用した。LD は温度によってその特性(波長, 動作電流)が変化するために, プリント基盤上に冷却用のペルチェ素子を固定しその上にファンをのせ, 冷風を LD に送るようにした。実験中, 電圧や熱によって LD の実際の発振波長が基準波長より 10 nm 程度伸びる傾向があったので, 波長別光エネルギー分析装置(LI-1800 C, Licor 社)を使用し, 波長がほぼ 650 nm になるように制御した。

青色レーザー光は, 白色 He-Cd レーザー光(KL-450, (株)小糸製作所)から青色の波長光のみを選択して透過させるダイクロイックフィルター(選択透過膜)を用いて得られた成分(波長 442 nm, 光出力 43 mW)である。またこの青色レーザー光は, 凹レンズを 2 枚使用して拡散させ, サラダナの側方から照射した。

(2) 赤色 LD と青色 LED の組み合わせ

青色 LED については日亜化学工業(株)の NLPB 500 (中心波長 450 nm, 半値幅約 70 nm, 出力 3 mW)を使用した。これをプリント基盤上の先ほどと同じ範囲に LD を 3 個直列 $\times$ 3 個並列, 青色 LED を 10 個直列 $\times$ 4 個並列にして, 赤色 LD の列と青色 LED の列を交互に並べた。Fig. 1 に栽培の様子を示すように, 基盤を 2 枚使用した。

図1 赤色 LD と青色 LED 照射下のサラダナの育成

Fig. 1 Growth of lettuce under the illumination of red LD and blue LED(R/B ratio 10)

(3) 赤色 LED と青色 LED の組み合わせ

赤色はスタンレー電気の H 2000 L(中心波長 660 nm, 半値幅約 25 nm, 出力 7 mW)を使用した。プリント基盤上の $15 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}$ の範囲に赤色 LED を 10 個直列 $\times$ 10 個並列, 青色 LED を 10 個直列 $\times$ 10 個並列に配置し, 赤色の列と青色の列が交互になるようにした。

(4) 単色 LED

赤色と青色 LED については上述のものを使用し, 緑色には日亜化学工業(株)の NSPG 500 S(中心波長 525 nm, 半値幅約 40 nm, 出力 4 mW)を使った。それぞれ, プリント基盤上の前述と同じ範囲の中で 10 個直列 $\times$ 20 個並列に配置した。

3. 栽培条件

栽培は主に赤色 LD と青色レーザーの組み合わせ(R/B=10), および赤色 LD と青色 LED の組み合わせ(R/B=5, 10, 20)を使って行った。ここで R/B とは, 赤と青の比率を光合成有効光量子束密度で表した量である。ビタミンC含量測定の場合のみは赤色, 緑色, 青色の各単色 LED 光についても実験した。それぞれの基盤の

周囲3方向を、コンパウンドを混ぜた白色のペンキで塗ったプラスチックの板で囲って反射率を高めた。

いずれの場合も栽培トレイ上面の光子束密度をほぼ $50 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ に保った。栽培装置を気温 22°C 、相対湿度 70%、 CO_2 濃度 400 ppm、日長 17 h に設定したグロースキャビネット内に設置した。以上の環境条件下で全生体重 2 g 程度の試料を水耕栽培した2週間後に収穫した。

4. 測定項目

(1) 相対成長率, 光合成速度, 気孔コンダクタンス

相対成長率は定植後14日目の3株の全生体重を測定して、その平均から求めた。光合成速度と気孔コンダクタンスについては、それぞれの実験区で収穫直前の2株のサンプルを用意し、光合成蒸散測定装置(KIP-9010, (株)小糸工業)によって30回づつ合計60回測定したデータの平均値と標準偏差から求めた。

(2) ビタミンC含量

ビタミンC(アスコルビン酸)含量については、全アスコルビン酸量と還元型アスコルビン酸量を以下の方法で測定し、酸化型アスコルビン酸量は両者の差から求めた⁸⁾。定量測定のためのサンプルの調整方法は以下の通りである。

種々の光源の照射下で栽培したサラダナの葉 0.5 g を 5% トリクロロ酢酸(TCA) 5 ml で固定しホモゲナイザーによって粉碎し、遠心分離機で 4°C 、12,000 rpm で5分間遠心分離した。この上清を、還元型アスコルビン酸と全アスコルビン酸を定量するためのサンプルとして用いた。還元型アスコルビン酸は、サンプルを 5% TCA で10倍希釈したもの 1 ml に、5% TCA 1 ml, EtOH 1 ml, 0.4% H_3PO_4 -EtOH 0.5 ml, 0.5% 4, 7-diphenyl-1, 10-phenanthroline(Bathophenanthroline, BP)-EtOH 1 ml, 0.03% FeCl_3 -EtOH 0.5 ml の順に加え合計 5 ml とした。そして 30°C で90分間静置後、534 nm の吸光度を分光光度計で測定し、標品(L(+))アスコルビン酸を使用して作成した検量線から求めた。

全アスコルビン酸量については、サンプルを 5% TCA で10倍希釈したもの 1 ml に、0.06% dithiothreitol(DTT)-EtOH を 0.5 ml, Na_2HPO_4 -1.2 N NaOH 1 ml の順に加えて pH 7~8 に調整した。こうして酸化型アスコルビン酸を還元するために室温で10分間静置した。その後、還元剤の過剰な反応を止めるために 0.24% N-ethylmaleimide-EtOH 0.5 ml を加え、20% TCA 0.5 ml で pH 1~2 に調整した。還元後は還元型アスコルビン酸量の測定と同様に行った。

結果および考察

1. 相対成長率

赤色 LED 単色, 赤色 LED と青色 LED の組み合わせ, 赤色 LD 単色, 赤色 LD と青色 LED の組み合わせ, および赤色 LD と青色レーザーの組み合わせに対するサラダナの相対成長率を測定した結果を Fig. 2 に示す。この結果を見ると、同じ R/B=10 で比較して赤色 LD と青色 LED を使用する場合は、赤色と青色両方とも LED の場合より 30% 相対成長率が低く、また赤色 LD と青色レーザーで栽培した場合は同じく 40% 低くなった。赤色、青色とも LED の場合は R/B=10 のときが最大であるのに対して、赤色に LD を使用した場合には青色を多く含むほど相対成長率が高い結果が得られた。これは、レーザーの鋭い単色性が青色 LED と併用することで放射スペクトルに幅ができ光合成の光利用効率が上がったためだと考えられる。

山崎ら⁷⁾は、680 nm の赤色 LD と同じ光子束密度の高圧ナトリウムランプによる成長を比較しているが、LD による成長は大幅に低い結果を報告している。両者のスペクトルの違いはあるが、単色性の影響が考えられる。というのは、筆者らの研究では同じ波長で比較してスペクトル幅の広い LED のほうが LD よりも成長がかなり大きかったからである。

2. 光合成速度

Fig. 3 は Fig. 2 と同じ照射条件下で、みかけの光合成速度を測定した結果を示す。この結果を見ると赤色 LD と青色 LED の場合、赤色と青色両方とも LED の場合と同様に、光合成速度は青色の比率が高い R/B=5 が最も高く、次いで R/B=10, 20 の順となった。これは、前報⁶⁾の単色 LED によって栽培した場合の光合成速度

図2 LEDおよびレーザー照射下のサラダナの成長率

Fig. 2 Growth rates of lettuce under the illumination of various spectra of LED and laser

図3 LED およびレーザー照射下のサラダナの光合成速度

Fig. 3 Photosynthetic rates of lettuce under the illumination of various spectra of LED and laser

で、青色がもっとも高かったことに関係している。一方、成長率に関しては赤色の場合がもっとも高かったので、光合成速度と成長率の結果に違いが出たと考えられる。

次に、赤色 LD と青色レーザーの場合の光合成速度は、青色に LED を使用する場合より約 8% 低かった。それについて以下簡単に考察する。

よく知られているように、光合成反応は育成に本質的であり、その作用スペクトルをみると植物は幅広い波長領域を受けて反応しているのがわかる。自然界では、可視光全体をカバーする太陽光を使って光合成をしている。したがって、単色性の光源よりもある程度のスペクトル幅のある光源あるいは、複数のスペクトルの混ざった光源の方が光合成の光利用効率が高まると考えられる。実際、680 nm より長波長の単色光と短波長の単色光を同時に照射すると別々に照射したときの光合成速度の和よりも大きくなるというエマーソン効果⁹⁾が知られている。

3. 気孔コンダクタンス

Fig. 4 は Fig. 2, Fig. 3 と同じ照射条件下で、気孔コンダクタンスを測定した結果を示す。本実験のように光以外の栽培環境が同じ場合、気孔コンダクタンスが高いことは、ある特定の波長や光源の種類に対して気孔開度が大きく、蒸散や光合成が活発に行われていることを意味する。

全体的に光合成速度と同じ傾向になっているが、赤色と青色の混合光ではレーザーを使用すると気孔コンダクタンスが全体的に低くなった。したがって気孔の開閉に対しても、鋭い単色光は不利であると考えられる。また、赤色と青色両方とも LED の場合と赤色 LD と青色 LED の組み合わせでは、青色の比率を高くすると気孔コンダクタンスが高くなった。この実験結果は、前報⁹⁾の単色

図4 LED およびレーザー照射下のサラダナの気孔コンダクタンス

Fig. 4 Stomatal conductances of lettuce under the illumination of various spectra of LED and laser

LED によって栽培した場合の気孔コンダクタンスが青色の場合にもっとも高かった結果と一致する。

4. ビタミンC 含量

Fig. 5 に種々の波長の LED、赤色 LED と青色 LED の組み合わせの場合、および赤色 LD と青色レーザーを R/B=10 の比率で組み合わせた場合のサラダナのビタミンC 含量を測定した結果を示す。単色光については青色の場合のビタミンC 含量が最大だった。赤色と青色両方とも LED の場合、光合成速度と同様に R/B=5 の場合が最も含量が高く、次いで R/B=10, 20 の順となった。また、レーザー光のみの場合に最も総ビタミンC 含量が多くなった。全体的に還元型より酸化型の割合が大きく、とくに単色 LED 光やレーザー光で栽培した場合がそうだった。

図5 LED およびレーザー照射下のサラダナのビタミンC 含量

Fig. 5 VitaminC contents of lettuce under the illumination of various spectra of LED and laser

植物はストレスを受けるほど、生体防御機能が働きアスコルビン酸は還元型から酸化型に変換されると考えられている。また、総ビタミンC含量も増えると考えられる。青色LEDやレーザーで栽培したサラダナの酸化型が多いのは、光の波長が短かったり、鋭い単色性が植物にストレスをかけるためだと考えられる。

5. 生育状況

赤色LDと青色レーザーをR/B比10で併用し、光量子束密度が $50 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ という低い強度で生育させた場合のサラダナの生育状況をFig. 6に示す。これを見ると葉はやや細長く、徒長傾向になったものの比較的健全に生育することがわかった。また、全体的に赤色LDを使用すると、数枚の葉が下向きに巻き込む現象があった。これは、レーザー光が葉上に均一に拡散されていないためだと考えられる。

結 言

本研究ではレーザー光のみによってサラダナを栽培し、

図6 赤色LDと青色レーザー照射下のサラダナの成育

Fig. 6 Growth of lettuce under the illumination of red LD and blue laser (R/B ratio 10)

成長率、光合成速度、気孔コンダクタンス、ビタミンC含量を測定しLEDの場合と比較した。赤色LDと青色レーザーによる栽培は、赤色と青色両方ともLEDの場合や赤色LDと青色LEDの組み合わせの場合より成長率、光合成速度、気孔コンダクタンスとも若干落ちることがわかった。これはレーザー光の放射スペクトルの幅が極めて狭いためだと考えられる。ただし、ビタミンC含量に関しては変わらなかった。

今回の実験では、レーザーによりサラダナを比較的健全に生育させることができた。今後、DVDなどの普及によりLDの高出力化、低価格化が進めば、植物栽培用の光源として利用可能であると考ええる。さらに、高出力のレーザー光をパルス照射することにより、光合成の暗反応によって律速されずに、効率よい栽培が可能になると考えられる。

謝 辞

本研究の実施にあたって白色He-Cdレーザーを貸与いただいた(株)小糸製作所と、LEDを提供いただいた(株)シーシーエスに御礼申し上げる。また東海大学の高山真策教授と三菱化学(株)の渡辺博之氏には、アスコルビン酸の実験手法等について有益な助言をいただいたことに感謝する。

引用文献

- 1) 渡辺博之：LED光源の植物栽培利用，植物工場実用化ビジネス研究部会資料，日本工業技術振興協会(1995)
- 2) 渡辺博之：LED光源の植物工場への適用，SHITA Report, 11: 31-41(1996)
- 3) 渡辺博之：LED光源の植物工場への応用，SHITA Report, 12: 14-23(1997)
- 4) 高辻正基，森 康裕：レーザー植物工場，植物工場ハンドブック(高辻正基編集)，東海大学出版会，pp.80-85(1997)
- 5) 社団法人 レーザー学会編：レーザーの植物工場への応用小特集号，レーザー研究，25: 831-854(1997)
- 6) 森 康裕，高辻正基：LEDとLD光がサラダナ生育に及ぼす影響，植物工場学会誌，11(1): 46-49(1999)
- 7) 山崎 文，土屋広司，宮島博文，本間孝宜，菅博文：半導体レーザー光がサラダナ生育に及ぼす影響，植物工場学会誌，12(2): 93-98(2000)
- 8) Arakawa, N., Tsutsumi, K., Sanceda, N., Kurata, T. and Inagaki, C.: A Rapid and Sensitive Method for the Determination of Ascorbic Acid

using 4,7-Diphenyl-1, 10-phenanthroline, Bio-chem., 45(5) : 1289-1290(1981)

9) 加藤 栄：光合成入門，光生物学シリーズ，共立出版(株)，pp. 15-16(1973)