全方向光照射における植物生育特性

I. サラダナ生長速度に及ぼす光強度、炭酸ガス濃度および気温の影響

池 田 彰・江 崎 謙 治・中 山 繁 樹*

三菱電機応用機器研究所*

植物工場における照明電力低減の基礎資料を得るために、蛍光ランプを用いて、照明方法の合理化について検討した。

1. 植物の受光効率を上昇させる目的で、円筒型の環境調節植物栽培室の周囲をランプハウスとし、このなかに蛍光ランプを垂直方向に配列したグロースチャンバを設計し製作した。

2. 試作したグロースチャンバで、一定の環境条件を設定し、岡山サラダナ (*Lactuca sativa* L. cv. Okayama saradana) を生育させた場合、一定期間の栽培日数に対して生体重量の対数グラフは、直線関係 (相関係数 0.99) を示した。

3. 照射光強度 $250 \mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、350 ppm CO_2 の条件で、生体重量は2日間で2倍に増加する高速生長を示した。

4. 照射光強度および二酸化炭素濃度を変えて生育させた場合、生長速度に及ぼす二酸化炭素の濃度効果は、 $250 \mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の強光条件で認められず、 $85 \mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の弱光条件で顕著であった。

5. 生長速度は上方からの照射条件下での飽和光強度の約 1/4 の弱光 ($85 \mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) で飽和した。その場合の生長適温は高くなる傾向が観察された。

6. 葉部と根部の生体重量比は照射光強度の影響を受けて変化し、弱光条件下で大きくなる傾向を示した。

1984年11月22日受付

緒 言

植物の生育環境を人工的に制御し、植物の持つ潜在的な生産性を高めようとする植物工場あるいは野菜工場 (以下植物工場と呼ぶ) が、わが国でも注目を集めつつある。

植物工場は、環境条件のなかで太陽光を利用するハイブリッド型と、すべての環境条件を人工的に制御する完全制御型に分けることができる。ハイブリッド型は、施設栽培におけるコンピューター制御をより高度に追求した究極の姿と考えることができるが、日射条件と温度の

変化についての処理方法を検討せねばならない。これに対して、人工光源を使う完全制御型は、自然依存からほぼ完全に脱却したところに、大きな特徴を持つものと考えることができる。

農業生産における植物工場の意義はいろいろ考えることができる。そのなかでも、天候、立地条件に左右されず、安定な生産が可能となることはとくに注目されてよいであろう。植物工場の役割をこのような特徴を持たせるところに規定するならば、それは完全制御型にならざるをえないと考える。

完全制御型植物工場が成立するためにはいくつかの解決すべき課題があり、なかでも光源電力低減化が最大である¹⁾。著者らは、完全人工制御の特徴を生かし、自然では実現できない環境条件のなかで、その可能性を見出そうとしており、自然と異なった光照射条件における植物生長を調べている²⁾。

この報告は、植物の受光効率を上昇させるために光照射を従来のように上方から行うのではなく、全方向から行

Akira IKEDA,* Kenji ESAKI* and Shigeki NAKAYAMA*: Plant Growth Characteristics under All Direction Illumination. I. Effects of Light Intensity, CO_2 Concentration and Air Temperature on Growth Rate of Lettuce.

* Product Development Laboratory, Mitsubishi Electric Corporation, Amagasaki, Hyogo 661, Japan.

ったときのサラダナの栄養生長期における生体重量増加特性を中心に述べたものである。

実験装置および方法

1. 実験装置

植物の受光効率を上昇させるために、円筒型の環境調節植物栽培室の周囲をランプハウスとし、このなかに蛍光灯ランプを垂直方向に配列したグロースチャンバを設計し製作した。

Fig. 1 に実験装置の構成を示した。円筒型栽培装置、空気調節装置、水耕装置および制御装置が主な構成要素である。Fig. 2 に示した円筒型栽培装置は、二重構造に

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus.

Fig. 2 Photograph of the cylindric growth chamber.

なっており、内面が機械研磨されたアルミニウム製反射筒（内径；35 cm，高さ；135 cm）とパイレックスガラス筒（内径；20 cm，高さ；150 cm）から構成される。ガラス円筒内部が栽培室となる。反射筒の内面に 40 W 蛍光灯ランプ（三菱色評価用蛍光灯 FL 40SW-50-EDL と近赤外用蛍光灯 FR を 3：1 の割合）が等間隔に 16 本、垂直方向に配列され、栽培室内には再現性確認のために水耕ポットが 2 個、上下に設置されている。空気調節装置は、冷水を用いた冷却コイルによりもどり空気を冷却除湿し、その後、スプレー充填塔により加湿し、電気ヒータで再熱する方式である。調温、調湿された空気は、栽培室内の風速を $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ になるように $600 \text{ 回} \cdot \text{hr}^{-1}$ と決めた。外気の取入れ量は $24 \text{ 回} \cdot \text{hr}^{-1}$ である。二酸化炭素は、構成図 (Fig. 1) の所定の位置で気化装置を取り付けたボンベより一定流量で添加される。二酸化炭素濃度は、分析計（富士電機製、ZFD）により監視した。設定濃度に対し $\pm 5\%$ の範囲で維持された。

照射光強度の調節は、点灯するランプの本数により行った。ランプ室を一定温度に保ち、結露を防止し、蛍光灯の発光効率を一定にするために、クーラとヒータによって温調した。

水耕装置は、水温調節とばっ気ができる内容積 20 l

Fig. 3 Relative spectral power of fluorescent lamp: (a) FL 40SW-50-EDL; (b) FR 40.

のタンクと、水耕液をポットに循環させるポンプからなっている。水耕栽培は、ばっ気された水耕液がポットに連続的に流速 $0.1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ で供給され、オーバーフロー水がタンクにもどされるが、根部は常時水耕液に浸漬されている。実験期間中、pH と電気伝導度を監視したが、それらの値は、7.0~4.5 および $1.3 \sim 1.0$ ミリモーターで変化した。

蛍光灯の発光スペクトルを Fig. 3 に示した。光合成に必要な光量は、色評価用ランプ (Fig. 3 (a)) により、光形態形成に必要な $700 \sim 800 \text{ nm}$ 域の遠赤色光は、近赤外用ランプ (Fig. 3 (b)) により補光した⁴⁾。

2. 材料および栽培方法

栽培に用いた植物は、玉チシャの一種、岡山サラダナ (*Lactuca sativa* L. cv. Okayama saradana) である。幼苗は、光強度 $164 \sim 250 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (色評価用蛍光灯)、日長 12 時間、気温 22°C 、湿度 50%、風速 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ の環境条件を設定した人工育苗箱で、パーミキュライトを担体とする水耕栽培で約 2.5 週間生育させたもの (2~3g) である。水耕液は、市販の大塚肥料 1 号および 2 号を水道水に溶解し、電気伝導度 $1.1 \sim 1.3$ ミリモーターに調節した。

幼苗を実験装置内のポットに移植し、14 日間 24 時間日長の連続照明条件下で栽培した。この間、毎日、生体重量を電子天秤 (島津製作所, EB-2800, $\pm 0.01 \text{ g}$) を用いて測定し、また、根の容積を、水が入ったメスシリンダーに根を浸漬したときの水容積増加量から求める方法で測定した。実験終了時に、葉と根の重量比 (F/C)、単位葉面積当りの乾物重量比 (X_f) および葉の含水率 (W_f) を測定した。

光強度はライカ社光度計 (LI 185) を用いて、照度は照度センサー (LI-210SB, $380 \sim 770 \text{ nm}$)、光量子量は光量子センサー (LI-190SB, $400 \sim 700 \text{ nm}$) により測定した。

光強度の測定は、植物体のない状態で、上段ポットの上方約 10 cm の中央点 (以後、指標位置と呼ぶ) にて行った。測定の際のセンサー方向は、センサー受光面を垂直なランプに対して平行とした。このようにして、実験開始、中間および終了時に測定した光量子量の平均値を光強度とした。

栽培室内の光強度分布の測定も植物体のない状態で行った。半径方向および上下方向の光強度分布を測定する際のセンサー方向は、上記と同様に、センサー受光面を垂直なランプに対して平行とした。また、上段と下段ポットの中間部の空間において、センサー受光面を水平軸に対して 360° 回転させて、上下左右の光強度分布を測

定した。

二酸化炭素濃度または温度条件を変えたおのおのの栽培実験において、湿度 $85 \pm 2\%$ 、風速 $0.5 \pm 0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、水耕液温度 $23 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、溶存酸素濃度 $7 \pm 0.5 \text{ ppm}$ および電気伝導度 $1.1 \sim 1.3$ ミリモーターの設定条件は一定に維持した。

実験結果と考察

1. 栽培室内の光強度分布と温度分布

Fig. 4 (a) は、上段と下段ポットの中間部での半径方向の光強度分布の測定結果である。反射板の効果により、最高強度を 100 としたときの相対光強度は $100 \sim 70$ になり、点灯ランプの本数が増すほどより均一化される。

半径の回転方向 (θ 方向) の光強度分布は図示しなかったがほぼ同様に均一であった。

Fig. 4 (b) は上下方向の光強度分布である。上下両端の 30 cm を除けば、 $100 \sim 80$ の範囲で均一であった。

Fig. 4 (c) は、図に示した位置において照度計の受光面を水平軸に対して 360° 回転させたときの光強度分布である。受光面が下方向を向いたとき最低照度を与えたが、相対光強度分布は上下いずれの位置でも $100 \sim 70$ の範囲で均一であった。これらの傾向は、点灯ランプの本

Fig. 4 (a) Light intensity distribution of the horizontal surface between upper pot and lower pot.

Fig. 4 (b) Light intensity distribution of the vertical surface in the center.

Fig. 4 (c) Light intensity distribution of each direction.

Fig. 5 Distribution of air temperature in the cylindric growth chamber.

数に関係なくほぼ同様であった。

Fig. 5 は、上下方向の温度分布である。上段ポットの位置での温度は、下段ポットの位置での温度にくらべて、1~2°C 高くなっている。

以上の結果から、植物体にはかなり均一度の高い光強度で全方向照射が行われることがわかる。

2. 栽培実験

サラダナの生体重量の経日変化に及ぼす照射光強度、二酸化炭素および気温の影響を調査した。

Fig. 6 は、数回繰り返した実験のなかで代表例として、指標位置での光強度 $250 \mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (15 klx)、二酸化炭素 350 ppm、気温 22°C の場合の生体重量と栽培日数の関係を片対数プロットしたものである。実験開始期と終期を除くと直線関係 (相関係数 0.99) を示した。実験開始直後の誘導期の長さは個体により異なっていた。これは、幼苗の個体差、移植時の環境変化に対する個体の環境適応性の差等によると考えられる。また、実験終了時においては、葉の生長に伴う栽培室の空間的制限が、生体重量増加に影響を及ぼすと考えられる。一

Fig. 6 Semi-logarithmic plots of the fresh weight and root volume of lettuce against time: ○, upper fresh weight; ●, lower fresh weight; △, upper root volume; ▲, lower root volume.

方、根部の生長は、生体重量の増加に概ね対応しているが、終了期においては、根部の生長速度の低下がより大きくなる傾向を示し、これも葉部の生長低下の原因の一つと考えられる。

対数的生長期における生長速度は、生体重量 (W) の一次に比例する反応式モデル

$$\frac{dW}{dt} = KW$$

で表わされることを示している。速度定数 K は、直線の傾きから求めることができる。そこで、環境条件変化による生体重量増加の評価に、この速度定数 K を用いることにする。

Table 1 には、指標位置での照射光強度と二酸化炭素濃度を変えた場合の速度定数、実験終了時の葉部と根部の生体重量比 (F/C)、単位面積当りの乾物重量 (X_f)、葉部の含水率 (W_f) をまとめた。Table 2 には、指標位置での照射光強度と気温を変えた場合の K 、 F/C 、 X_f および W_f をまとめた。これらの値は、上段と下段の2個のポットの平均値である。上段と下段の K 値は、10% 以内の差で、よく一致した。また、数回繰り返した実験でも、 K 値の差が 10% 以内で、よい再現性が得られた。

(1) 二酸化炭素濃度効果

Table 1 の結果は、 $250 \mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の照射光強度の場合には、高い K 値つまり2日間で2倍の高速生長を示すが、二酸化炭素の濃度の影響は、350~4,000 ppm の範囲でほとんど認められないことを示している。乾物重

Table 1 Effects of CO₂ concentration and light intensity under illumination from all directions.

Illumination ($\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	CO ₂ concentration (ppm)	K (day^{-1})	$(F/C)_f$ (g/g)	X_f (mg/cm^2)	W_f (%)
250	350	0.34	3.5	5.1	90.1
	950	0.31	3.8	6.4	90.3
	2,000	0.32	3.2	6.1	87.2
	4,000	0.33	3.6	8.1	86.4
164	350	0.26	4.4	4.3	91.0
	1,200	0.31	4.5	5.2	91.3
	4,000	0.27	3.9	4.9	89.2
85	350	0.21	5.3	3.7	92.2
	1,200	0.29	4.8	4.0	94.1
	4,000	0.27	4.7	4.7	89.5
50	1,200	0.21	—	—	—

量の増加は、二酸化炭素の濃度に影響されると高辻⁶⁾が報告しているが、Table 1 の結果においても 4,000 ppm で X_f が最大となり W_f は最小となった。しかし、 X_f の増加は、350 ppm の場合の 1.4 倍程度であった。

光強度が $164 \mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (10 klx) の場合、 K 値は若干下がるものの二酸化炭素濃度は、同様の傾向であった。

ところが、 $85 \mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (5 klx) の弱光照射下では前二者と傾向が異なった。すなわち、350 ppm の二酸化炭素濃度では、 K 値は 0.21 day^{-1} と小さく、二酸化炭素濃度を高めると大きくなり、1,200 ppm と 4,000 ppm でそれぞれ 0.29 day^{-1} および 0.27 day^{-1} になった。

このとき、4,000 ppm の高い二酸化炭素濃度において、 F/C 値は小さくなる傾向が見られ、また、 X_f が最大となり W_f は最小となった。

葉に照射される光の強度が十分である場合、光合成速度は二酸化炭素濃度が上がると上昇することが一般に認められている。これは当然乾物および生体重量増加速度に反映されるはずである。ところが、Table 1 から明らかなように、 $250 \mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の強光条件では、二酸化炭素濃度が 350~4,000 ppm の範囲において、 K 値に差がない結果になっている。一方、 $85 \mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の弱光強度の全方向照射では、速度定数 K に及ぼす二酸化炭素の濃度効果が顕著である。これらの二酸化炭素濃度に対する物質生産の挙動は、従来と異なる知見であり全方向照射に特有と見ることができる。

(2) 照射光強度効果

次に、照射光強度に焦点を合わせてみる。Fig. 7 は、Table 1 から K 値と照射光強度の関係を二酸化炭素濃度をパラメータにプロットしたものである。光強度が下がると K 値も下がるが、その程度は限られた範囲で緩やかであることがわかる。二酸化炭素濃度が 1,200 ppm

Fig. 7 Relation between K and light intensity: symbols $\square$, $\circ$ and $\blacksquare$ are corresponding to CO₂ concentrations of 350, and 1,200 and 4,000 ppm, respectively.

において、250 および $164 \mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の照射光強度での、 K , X_f および W_f はほとんど変わらず、すでに生長速度が飽和に達していることを示している。全方向光照射では、飽和光強度が低くなると考えられる。植物体の生長速度は、全光吸収エネルギー量に関係すると見られ、弱光でも照射方法によって葉面での光吸収効率を増大させ、その結果、強光照射に匹敵する高速栽培が得られることを示している。1,200 ppm および 4,000 ppm の二酸化炭素濃度では、前述したように、 $85 \mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の低光強度でも K 値はそれぞれ 0.29 および 0.27 day^{-1} と高いことが注目される。

Fig. 8 は、二酸化炭素濃度が 4,000 ppm で光強度が $250 \mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ および $85 \mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ でのサラダナ (生体重量約 100 g) の外観写真である。これらの植物体はハウス栽培での植物体にくらべて、葉の緑色が濃かった。葉の枚数はいずれも 20 枚前後であるが、 $250 \mu\text{E}\cdot$

250 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (15 klx), 4,000 ppm CO_2

85 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (5 klx), 4,000 ppm CO_2

Fig. 8 Photograph of the lettuce (about 100 g)

$\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ では 85 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ にくらべて、葉が厚く、また、葉面の凸凹が大きいなどの特徴が見られた。 F/C は 85 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ で顕著に大きくなる傾向を示し、目的生産物が葉である場合、有利になる。 X_f および W_f は、とくに 85 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ において、それぞれ低下および増加し、乾物生産量は低下した。

植物体への二酸化炭素の流入は、主に葉面の気孔を通して行われ、そのモデルも一般的に認められている⁵⁾が、気孔の開閉運動は光条件や二酸化炭素濃度の影響等を大きく受けることが報告され⁶⁾、そのメカニズムは複雑である。全方向光照射での光強度に対する挙動および前述の二酸化炭素濃度に対する挙動を統一して説明するためには、さらに詳細な検討が必要である。

(3) 温度効果

二酸化炭素濃度を 1,200 ppm として、いくつかの照射光強度の下で、気温を 18~32°C の範囲で変化させて実験した。結果は Table 2 にまとめられている。また、Fig. 9 は、Table 2 から K 値と気温の関係を光強度をパラメータにプロットしたものである。

Fig. 9 Relation between K and air temperature: symbols ○ and ● are corresponding to light intensity of 250 and 85 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively.

K 値に対する効果を見ると、250 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の光強度では、29°C のとき最大値 0.37 day^{-1} の高速生長速度を得た。このとき、 X_f および W_f は 22°C でのそれらと変りなく、生長速度の増大が単に含水率の増加によ

Table 2 The effect of air temperature under illumination from all directions.

Illumination ($\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	Air temperature (°C)	K (day^{-1})	$(F/C)_f$ (g/g)	X_f (mg/cm^2)	W_f (%)
250	18	0.25	3.5	5.1	89.7
	22	0.31	3.8	6.4	90.3
	29	0.37	5.9	5.4	90.4
	32	0.31	3.3	5.1	87.2
85	18*	0.28	2.9	7.1	91.0
	22	0.29	4.8	4.0	94.1
	26*	0.33	3.2	5.5	89.3
	30	0.29	5.2	2.6	92.9

* Results after 8 days cultivation

るものではないことがわかる。 $85 \mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ではこれと異なり、 26°C で最大になった。サラダナ栽培の適温は 20°C であることが報告されており⁷⁾、これが最大生長速度を与えるかは検討すべきであるが、全方向光照射では、生長の適温が高いように思われる。

F/C , X_f および W_f に対する気温の効果は複雑であり、その効果はさらに検討の必要がある。

これらの実験結果から、全方向光照射では、弱光強度、高濃度の二酸化炭素および高気温の条件において最適の生産量が得られるものと思われる。このような条件において、省電力高速栽培の可能性が見出された。

本論文作成にあたり、愛媛大学農学部橋本康先生から有益な御教示を得た。ここに厚く謝意を表する。

文 献

- 1) 橋本 康・高辻正基. 1984. 野菜工場の意義と技術課題. 遺伝 **38**: 4-8.
- 2) 池田 彰・中山繁樹・安西良矩・山崎広義. 1985. パルス光照射光源とそれによる植物栽培 第1報. 計測自動制御学会論文集 (投稿中).
- 3) 矢吹万寿. 1968. 炭酸ガス施肥とその問題点. 農業および園芸 **43**: 1526-1532.
- 4) DOWNS, R. J., S. B. HENDRICKS, and H. A. BORTHWICK. 1957. Photoreversible control of elongation of Pinto beans and other plants under normal conditions of growth. Bot. Gaz. **118**: 119-208.
- 5) GAASTRA, P. 1959. Photosynthesis of crop plants as influenced by light, carbon dioxide, temperature and stomatal diffusion resistance. Meded. Landbouwhogeschool Wageningen **59**: 1-68.
- 6) RASCHKE, K. 1979. Movements of stomata. In

“Physiology of Movements” (Ed. by Haupt, W. and Feinleib, M. E.) 383-441, Encyclopedia of Plant Physiology New Series Vol. 7, Springer-Verlag, Berlin.

- 7) 高辻正基. 1982. 生長特性の定量化. 「植物工場の基礎知識と実際」108-116, 技術情報センター, 大阪.

Summary

The optimization of illumination conditions with fluorescent lamps was studied to collect basic data for the reduction of light power consumption in a plant factory.

1. A cylindrical growth chamber with higher light reception was developed which houses on its periphery a vertically arranged array of fluorescent lamps.

2. A semi-logarithmic plot of the fresh weight of lettuce (*Lactuca sativa* L. cv. Okayama saradana) against cultural time gave a straight line with a correlation coefficient of 0.99.

3. The lettuce grew acceleratedly at a CO_2 concentration of 350 ppm under a light intensity of $250 \mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$: the fresh weight was doubled in two days.

4. The effect of CO_2 concentration on the growth rate was hardly appreciable over a range of 350~4,000 ppm at high light intensity of $250 \mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ but remarkable at a low light intensity of $85 \mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.

5. The growth rate seemed to be saturated at light intensity of $85 \mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ which is about a quarter of the saturation light intensity observed with the conventional, downward illumination. The optimum temperature under illumination from all direction was higher than that of the downward illumination.

6. The ratio of fresh weight of leaves to that of roots was higher under lower light intensity.

(Received November 22, 1984)