培養液への光入射が培養液組成と 野菜の生育に及ぼす影響

星 岳彦*・岡野利明・寺添 斉・吉原利一・斎木 博

(電力中央研究所・生物部)

Change in the Composition of Hydroponic Nutrient Solution Exposed to Light and Its Effect on Vegetables Growth

Takehiko HOSHI, Toshiaki OKANO, Hitoshi TERAZOE,
Toshikazu YOSHIHARA and Hiroshi SAIKI

(Biology Dept., Central Research Institute of Electric Power Industry,)
Abiko 1646, Abiko-city, Chiba, 270-11, Japan

Nutrient solution in hydroponics is usually covered with the shading material, plate or film. A hydroponic vegetable production system which uses a movable vegetable supporting mechanism for varying the space among vegetables according to the growth stage, called “spacing”, was developed. For easy spacing, it is desirable not to use the shading material on the nutrient solution. Then, the nutrient solution is exposed to the light. There are a number of unclarified points concerned with the effects of the lighted nutrient solution on vegetables growth.

Two experiments were performed. In experiment 1, to observe the effects on vegetables growth, spinach (*Spinacia oleracea*) and Senpoh-sai (*Brassica x hybrida*) were planted in two hydroponic beds. One bed was covered with the shading plate to keep the nutrient solution dark, and the other bed was not covered to expose the solution to the light. In experiment 2, to investigate hourly changes of the composition of the nutrient solution, the nutrient solution was illuminated with white fluorescent lamps.

The top fresh weight of spinach 17 days after transplanting to the lighted nutrient solution decreased to 36% of the control. The primary cause of vegetable growth inhibition was considered to be iron deficit induced by changing of soluble iron (EDTA-Fe) into insoluble one (FePO_4).

94% of soluble iron in the nutrient solution under the lighting intensity of $240 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$ changed into insoluble iron for 42 hours. When the lighting intensity in the nutrient solution is reduced to $11.8 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$ by shading, the change of soluble iron into insoluble one is controlled at 5% increase per day compared with case of quite dark condition.

These results will provide clues for studying on soluble iron condition of nutrient sterilization using ultra violet ray and tissue culture medium of a transparent vessel.

Key words: Hydroponics, Iron, Light environment, Nutrient solution, Spinach.

キーワード：鉄，培養液，光環境，ハウレンソウ，養液栽培

1. はじめに

養液栽培では，光が入射しないように，発泡ポリスチレンや不透明ポリエチレンなどの被覆材で培養液を遮光して栽培を行っている。この理由として，培養液中の藻

類などの増殖や pH の上昇を抑制したり (Resh ; 1978), 根部の生長を妨げないためであるなどといわれている。

ところが，培養液に光が入射した場合の野菜の生育や培養液の組成におよぼす影響についての具体的な報告例はみあたらず，また，実際の養液栽培においても，培養液の遮光をそれほど慎重には行っていない。

近年，野菜工場と呼ばれる養液栽培システムを活用し

昭和 63 年 4 月 13 日 全国大会にて発表

平成元年 2 月 20 日 受理

* 現在：東海大学，渋谷区富ヶ谷 2-28-4

た野菜の連続生産施設の開発が進められている。野菜工場では、毎日播種しながら野菜の生産を行うので、さまざまな生育ステージの作物が混在することになる。そして、限られた栽培面積を有効に使うことで生産性を上げるため、苗のうちは間隔を密にしておき、生育に従って間隔を疎にする植え広げ(spacing)作業を実施して集約化を行っている(星ら, 1988, Okano *et al.*, 1987; 1988)。植え広げ作業を容易にしたり、その自動化を図ったり、設備費を軽減するためには、養液栽培ベッド表面に覆いをせずに、作物を自由にスライドできるようにすることが望ましい。ところが、表面の覆いをなくすと、培養液に光が入射するようになり、培養液への光入射が野菜の生育に及ぼす影響についての検討が必要になってきた。

そこで、培養液に光が入射したときの野菜の生育、および培養液組成の変化について検討を行ったところ、野菜工場のみならず、一般の養液栽培や組織培養においても役立ち得る知見を得たので報告する。

2. 実験方法

培養液への光入射の影響を検討するために、2種類の対照実験を行った。ひとつは、培養液の光入射が野菜の生育に与える影響と、培養液の定性的な組成変化を観察する目的で、太陽光と人工光を併用する養液栽培設備において、野菜の栽培試験を行った(以降実験1と呼ぶ)。もうひとつは、培養液の組成変化を定量化する目的で、野菜を栽培せずに人工光による各種強度の光を照射し、経時変化を観察した(以降実験2と呼ぶ)。

2.1 実験1

比較試験を行うために、培養液に光が入射しない遮光区(以降D区と呼ぶ)と、光が入射する光入射区(以降L区と呼ぶ)の2試験区を設け、ホウレンソウ(*Spinacia oleracea* cv. "Lead")およびセンボウサイ(*Brassica × hybrida* cv. "Senpohsai-No.2")の養液栽培を行った。D区は、Fig.1の(a)で示したように、30 mm厚の低発泡ポリスチレン板を培養液面に浮かべ、穴をあけてウレタンスポンジに植付けた野菜を挿入して栽培した。D区の培養液への遮光率はほぼ100%であった。また、L区は、Fig.1の(b)で示したように、直径5 mmのステンレスレールを培養液面に並べ、それにポットと呼ばれる筒状のプラスチックを取り付け、ポットにウレタンスポンジに植付けた野菜を挿入して栽培した。水面の法線方向から培養液に光が入射した場合の遮光率は約32%であった。培養液水温は、光入射区に培養液冷却装置を設置し、遮光区の水温と同じになるように制御した。

栽培試験は、播種後10日間育苗したホウレンソウおよびセンボウサイの苗を、栽植密度7×11 cmで、自然

Fig. 1. Over view of the hydroponic bed to change lighting condition of the nutrient solution.

光利用型野菜工場に定植して開始した。24時間中、13時間を明期にした。設定気温は、明期 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 、暗期 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ に制御した。相対湿度は制御しなかった。明期の CO_2 濃度を 1400 ppm に制御した。補光は、400 W 反射型メタルハライドランプを光源とし、 $0.6 \text{ 灯}/\text{m}^2$ でベッド面から約 90 cm に設置して、 $0.21 \text{ kW}/\text{m}^2$ 以下の屋外日射量が 15 分以上継続した明期に限り行った。また、培養液は、E.C. が $2.4 \text{ mS}/\text{cm}$ 、pH が 5.5~6.5 (肥料は大塚ハウス肥料A処方(大塚化学(株)編; 1987) + 5号使用)に制御し、湛液方式($260 \text{ cm}^3/\text{株}$)の養液栽培を行った。実験開始時の培養液の無機成分濃度は、B: 0.92 ppm, Ca: 180 ppm, Cu: 0.039 ppm, Fe: 5.2 ppm, K: 290 ppm, Mg: 56 ppm, Mn: 2.1 ppm, Mo: 0.077 ppm, P: 57 ppm, Zn: 0.19 ppm であった。

作物の生育諸量(新鮮重、葉面積など)の調査は、数日ごとに各実験区 10 個体を測定した。測定後のサンプルは、 60°C で 1 週間程度風乾して乾物重を測定した。培養液無機成分の定量は、高周波誘導結合プラズマ発光分光光度計(日立製 Super Scan ICP-306, 高周波出力: 1 kW, plasma gas: $14 \text{ l}/\text{min}$, nebulizer gas: $0.5 \text{ l}/\text{min}$, auxiliary gas: $0.7 \text{ l}/\text{min}$, スリット: $30 \mu\text{m}$, 検出位置: 15 mm, スリット高さ: 10 mm, 測定波長: B: 249.773 nm, Ca: 317.933 nm, Cu: 324.750 nm,

Fe: 259.940 nm, K: 769.898 nm, Mg: 285.313 nm, Mn: 257.610 nm, Mo: 202.030 nm, P: 213.618 nm, Zn: 213.856 nm)を用いた。

2.2 実験 2

培養液およびエチレンジアミン4酢酸ナトリウム鉄(EDTA-Fe)を円筒形のガラス容器に入れ、液面だけから光が入射するように、周囲を黒色ポリエチレンフィルムで被覆し、高出力白色蛍光灯を光源にした光照射を行った。気温は、23℃に制御した。照射強度は、光源との距離によって調節し、照射強度の測定は、液面において法線方向に光子量子センサを設置して光子量子フラックス密度を測定し、単位液面あたりの照射量とした。そして、培養液の可視的変化の観察、原子吸光光度計(日立製 Z 6000, 管電流: 15.0 mA, 波長: 248.3 nm, スリット: 0.2 mm, atomizer: air-C₂H₂ head, パーナー高さ: 7.5 mm)を用いた経時的な鉄濃度の測定および沈澱物の同定を行った。同定には、定性分析が蛍光 X 線分析装置(理学製 3080E2 型, 管球: ロジウム, 管電圧: 50 kV, 管電流: 50 mA, 検出器: シンチレーションカウンタまたはガスフロー比例計数管)を、定量分析は、カルシウム, 鉄, リンについては高周波誘導結合プラズマ発光分光光度計, カリウムについては原子吸光光度計, 炭素, 酸素については不活性ガス融解-赤外線吸収法を、それぞれ用いた。なお、測定液の採取は、液を攪拌せずに静置状態で行った。

3. 結 果

3.1 実験 1

地上部新鮮重の経日変化を Fig.2 に示す。ホウレンソウでは、定植後 17 日目に L 区の地上部新鮮重が D 区の約 36% になり、培養液に光が

入射することで生育が抑制された。センボウサイでは、定植後 14 日目ごろまでは同様の傾向を示したが、定植後 17 日目には両区の差がほとんどなくなった。L 区の野菜の外観は、葉色が淡色になり、特にホウレンソウの場合は、新葉部分にクロロシスが現われるものもあった。同様の試験をもう一度繰り返したが、同じ結果が得られた。また、定植後 17 日目および 14 日目の地上部乾物重、草丈、葉面積指数などの生育諸量の計測値をまとめたものを Table 1 に示す。ホウレンソウはすべての項目について、センボウサイはほとんどの項目について、L 区の生育が D 区よりも劣っていた。

続いて、栽培実験開始前と開始後の培養液の各種元素の濃度変化を Fig.3 に示す。実験終了時には、L 区と D 区で鉄の濃度に約 9 倍の大きな差が認められた。

そこで、培養液中の鉄の濃度差が野菜の生育に与える影響を調べる目的で、L 区で減少した分の鉄を EDTA-Fe 水溶液で毎日補給する試験区(LFe 区)を新たに設

Fig. 2. Effect of lighting hydroponic solutions on the top fresh weights of Spinach and Senpoh-sai.

“*” indicates the mean values are significantly different ($P \leq 0.05$) in the same day. Vertical lines indicate standard deviation.

Table 1 Effect of the lighted nutrient solutions on the growth of Spinach and Senpoh-sai

Vegetables	Days after planting	Lighting treatment	Top F.W. (g)	Top D.W. (g)	Height (cm)	Number of leaf	L.A.I.
Spinach	14	D	12.4	0.63	—	11.7	2.07
		L	4.1*	0.23*	—	9.4*	0.40*
	17	D	22.6	1.00	25.3	14.6	3.52
		L	8.2*	0.53*	19.5*	10.8*	1.40*
Senpoh-sai	14	D	25.7	1.23	—	8.6	5.44
		L	14.4*	0.70*	—	8.1	3.33*
	17	D	42.4	1.88	30.7	9.5	7.28
		L	38.3	2.02	28.2	8.9	6.99

Seeding: 9, Oct., 1987, planting: 19, Oct., 1987, averaged 10 plants, D.W. means dry weight, F.W. means fresh weight, L.A.I. means leaf area index. “*” indicates the mean values are significantly different ($P \leq 0.05$) in each pair.

Fig. 3. Effect of lighting nutrient solutions on final concentration and remaining ratio of nutrient elements in the solutions after 17 days cultivation.

The nutrient solutions were maintained at E.C.=2.4 and pH=6.0 by pouring onto concentrated fertilizer, KOH, and H_3PO_4 solutions through the experiment. Numbers indicate concentrations (ppm) of each element at the end of experiment.

Fig. 4. Reduction of iron concentration in the nutrient solutions and pure EDTA-Fe solution.

Lighting photon flux intensity: $240 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$. Sampled solutions were filtrated before the measurement.

Table 2 Effect of the administration of iron to the lighted nutrient solutions on the growth of spinach

Treatment	Top F.W. (g)	Top D.W. (g)	Height (cm)	Number of leaf	L.A.I.
L	5.2	0.50	11.2	10.8	1.13
D	23.6	1.47	20.5	13.6	4.38
LFe	16.0	1.11	17.6	13.1	3.39
Recovery ratio (%)	58.3	63.0	69.3	82.1	69.6

Seeding: 9, Aug., 1988, planting: 19, Aug., 1988, sampling: 17 days after planting, averaged 10 plants, D.W. means dry weight, F.W. means fresh weight, L.A.I. means leaf area index. Treatment-L: lighting nutrient solutions, D: shading nutrient solutions, LFe: lighting nutrient solutions and iron administration.

Recovery ratios were defined as $([LFe] - [L]) / ([D] - [L]) \times 100$.

け、ハウレンソウを栽培して比較試験を行った。その結果をTable 2に示す。前回の試験と同様に、L区の生育はD区と比較して著しく劣ったが、LFe区の生育は、調査項目にもよるが、L区と比較して60~80%程度までの回復がみられた。

3.2 実験2

培養液に $240 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{sec}$ の光照射を開始してから4時間程度経過すると、それまで淡黄色を帯びて透明だった培養液に白濁が観察されるようになった。さらに、時間の経過とともに白濁が顕著になり、24時間が経過すると、培養液は再び透明になり、容器底部に淡褐色を帯びた沈殿物が観察された。

暗黒下の培養液、および $240 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{sec}$ の光照射下の培養液と同濃度の鉄を含むEDTA-Fe水溶液の鉄

濃度の経時変化をFig.4に示す。いずれの区の採取液もろ過(東洋ろ紙No.5B)後に計測を行った。暗黒下の培養液では、42時間経過後の鉄濃度は22%減少したに過ぎなかったが、光照射下の培養液の鉄濃度は94%と著しく低下した。ところが、同じく光照射を行ったEDTA-Fe水溶液の鉄濃度の低下は36%であった。

光照射強度を変えた培養液の24時間後の鉄濃度をFig.5に示す。計測データは、2本の直線によく当てはまった。2本の直線の交点の光照射強度は、 $81.9 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{sec}$ であった。

培養液に光照射を行って沈殿する物質を吸引濾過により濾紙上に捕集し、メタノールで洗浄して有機成分を除去した。精製した沈殿物を定性分析した結果、主成分元素として、カルシウム、鉄、カリウム、リンが検出され

Fig. 5. Relationship between iron concentration and lighting photon flux density in the hydroponic nutrient solutions.

The term of lighting: 24 hours. Sampled nutrient solutions were filtrated before the measurement.

た。そこで、これらと、炭素および酸素の6元素について定量分析を行なった結果、沈澱物には酸素47% (重量比)、カルシウム22%、カリウム13%、炭素6.2%、リン2.5%、鉄2.4%が含まれていた。

4. 考 察

培養液に光が入射すると、培養液を遮光して暗黒に保った場合と比較して野菜の生育が抑制される傾向にある。また、ホウレンソウとセンボウサイで差があったのは、種の違いによる生理生態的な差によるとも考えられるが、一方で、以下のようにも考察できる。すなわち、センボウサイは生育速度が大きく、順調に生育したD区では、栽植密度が定植後14日目以降の生育の主要な制限要因になったことが考えられる。Table 1によると、定植後17日目のセンボウサイの葉面積指数が7程度と、ホウレンソウよりも2倍以上高い値を示しており、Fig. 2でも定植後14日ごろまでのセンボウサイの新鮮重には、ホウレンソウとほぼ同様の差が観察されることも、そのことを支持している。したがって、栽植密度が制限要因にならない場合には、定植後17日目のセンボウサイの生育差がホウレンソウとほぼ同程度になる可能性がある。

Fig. 3の結果と、一般的に1ppm以下の濃度で鉄欠乏が発生することから、野菜の生育抑制の主因は、鉄欠乏によるものと考えられた。さらに、Table 2に示した、L区、D区他に、LFe区を加えた栽培試験の結果、LFe区のホウレンソウの生育は、生育調査項目にもよるが、L区と比較して約60~80%まで回復した。このことから、培養液の光入射によるホウレンソウの生育抑制のうち、少なくとも60%は鉄欠乏に起因していると考えられる。残りの部分については、①作物の根部に光があたり、屈光性などの生理反応が根の伸長を抑制した、

②培養液に藻類が発生し生育抑制物質を出した、③培養液中の鉄以外の成分が光によって変化した、④培養液を遮光していた板の表面が白色なので、これがなくなることによって地上部の光環境が悪化した、ことなどが考えられるが、これらの点については今後の検討が必要である。

実験2における培養液の観察の結果、培養液中の鉄が光によって不溶化し、沈澱することによって、実験1で観察された鉄欠乏が発生するのではないかと考えられた。すなわち、光によって鉄の不溶性化合物が微結晶として培養液中に浮遊する状態になり、24時間程度経過すると、結晶が成長するか、または凝集によって沈澱を始めると考えられた。

また、実験1において、L区の培養液の流動が激しい培養液吹き出し口付近では、野菜の生育抑制が多少回復する傾向が観察された。培養液の攪拌により沈澱した鉄が浮遊して根に接触する機会が増えることで鉄欠乏の発生が抑えられることが知られており (Guminski *et al.*, 1965)、これも鉄の不溶化が生じていることを支持していると考えられる。

Fig. 4の結果は、光が入射しなければ鉄の不溶化はほとんど生じないことを示している。そこで、鉄源として使われているEDTA-Fe水溶液の吸収スペクトルを計測したところ、257 nm付近に吸光度9300のピークが観察された。この吸収は可視光領域まで尾を引いており、400 nmにおける吸光度は200であった。したがって、可視光領域におけるこれらの吸収が鉄の不溶化に関与していると考えられる。もし、不溶化反応がEDTA-Feの吸光によって生じているのであれば、スペクトルの計測結果から、500 nm以下の光を遮光できれば、鉄の不溶化を防ぐことができることを示している。

一方、Fig. 4の結果も示している通り、EDTA-Fe水溶液だけでは、光を照射してもほとんど不溶化が発生しない。このことは、光反応によって、鉄が培養液中の何らかの物質と結び付くことによって、不溶化が起こっていると考えられ、この問題は、EDTA-Feの物性に関するものというよりは、むしろ養液栽培に固有の問題として取り組む必要があると考えられた。養液栽培の培養液中のキレート化合物の安定度に関する文献は、pHに関するものがいくつかある (Halvorson and Lindsay, 1972, Wallace and Wallace, 1984) が、光に関する報告は見当たらない。また、沈澱物の分析結果から、沈澱物の主成分は炭酸カルシウム、リン酸鉄、およびこれらのカリウム置換体に若干の結晶水が含まれるものと考えられた。したがって、鉄と結合して不溶化の原因となるのは、培養液中のリン酸化合物であると考えられる。

光照射強度を変化させた Fig. 5 の結果では, $81.9 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{sec}$ を境界にして 2 本の直線でよく近似できている。このことは, 不溶化反応が光強度に対して 1 次であり, さらに, 光反応生成物が光反応を消光する可能性があることと考え合わせると, 約 $80 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{sec}$ 付近で光飽和していると考えらるべきであろう。実用面においては, 培養液面に入射する光量子フラックス密度を $11.8 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{sec}$ にすることで, 暗黒の場合と比較して, 1 日あたりの鉄の不溶化を 5 % 程度の増加に抑制することができることを示している。また, 培養液に入射する光強度を測定できれば, この図から毎日補わねばならない鉄量を推定できる。

培養液に光が入射する条件は, 野菜工場での生産に限ったことではなく, 程度の差こそあるが, 通常の養液栽培, 培養液の紫外線殺菌, 植物組織培養においても想定される。これらの場合の鉄の不溶化とその対策についても今後検討する必要があると考えられる。

5. ま と め

養液栽培における培養液に光が入射した場合のホウレンソウとセンボウサイの生育, および培養液組成に及ぼす影響について検討した。その結果, 以下の事が明らかになった。

① 培養液に光が入射することによって, ホウレンソウは定植後 17 日目で地上部新鮮重が対照区の約 36 % になり, 生育が抑制された。

② 生育抑制の少なくとも 60 % は, 光入射による鉄の不溶化に起因している。

③ 鉄の不溶化は, 紫外域から 500 nm 付近までの吸収帯を持つ EDTA-Fe の鉄が, 培養液への光入射によってリン酸鉄になることで発生する。

④ 高出力白色蛍光灯を光源とした, $240 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{sec}$ の光照射下の培養液の鉄は, 照射開始 42 時間後には 94 % が不溶化した。

⑤ 培養液面に入射する光量子フラックス密度を 11.8

$\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{sec}$ にすることで, 暗黒の場合と比較して, 1 日あたりの鉄の不溶化を 5 % 程度の増加に抑制することができる。

⑥ 通常の養液栽培, 培養液の紫外線殺菌, 植物組織培養において, 培養液に光が入射する場合の鉄の不溶化とその対策について検討する必要があると考えられる。

最後に, この研究の機会を与えていただいた当所生物部の関山哲雄農業技術研究室長, ならびに分析にご協力いただいた河野吉久陸生生物研究室長に謝意を表します。

引用文献

- Guminski, S., Guminska, Z. and Sulej, J., 1965: Effects of Humate, Agar-agar, and EDTA on the Development of Tomato Seedlings in Aerated and Non-aerated Water Cultures. *J. Exp. Bot.*, **16**, 151–162.
- Halvorson, A. D. and Lindsay, W. L., 1972: Equilibrium relationships of metal chelates in hydroponic solutions. *Soil. Sci. Amer. Proc.*, **36**, 755–761.
- 星 岳彦・岡野利明・小酒井一嘉・寺添 斉, 1988: 高能率野菜生産技術の開発(3) 基礎実験設備における数種野菜の栽培, **U8 8008**, 電力中央研究所報告。
- Okano, T., Hoshi, T. and Sekiyama, T., 1987: Vegetable growth and energy consumption in a vegetable factory using off-peak electricity. *Acta Hort.*, **229**, 353–359.
- Okano, T., Hoshi, T. and Terazoe, T., 1988: Development of hydroponic system and adaptation of microcomputers for a commercial size vegetable factory. *Acta Hort.*, **230**, 343–348.
- 大塚化学株式会社編, 1987: 大塚ハウス肥料と養液栽培, 18 pp., 2–3.
- Resh, H. M., 1978: 野菜の水耕栽培(並木訳), 養賢堂, 220 pp., p.66.
- Wallace, G. A. and Wallace, A., 1984: Maintenance of iron and other micronutrients in hydroponic nutrient solutions. *J. Plant Nutr.*, **7** (1–5), 575–585.