短時間高光強度照射下におけるサラダナの生育と生理的特性

石井雅久・伊東 正・丸尾 達・鈴木皓三*・松尾幸蔵**

千葉大学園芸学部・*東京電力・**高岳製作所

Growth and Physiology of Lettuce Plants Grown under Artificial
Light of High Intensity in Short-Day Regime

Masahisa ISHII, Tadashi ITO, Tooru MARUO, Keizoh SUZUKI* and Kohzoh MATSUO**

Faculty of Horticulture, Chiba University, Matsudo 271, Japan

*Tokyo Electric Power Company, Tokyo, Chiyoda-ku, Tokyo 100, Japan

**Takaoka Electric Manufacturing Company, Nishikasugai-gun, Aichi 452, Japan

Lettuce plants (*Lactuca sativa* L.) were grown under 2 levels of intensity in combination with 3 levels of irradiating hour. Plants grown under higher photosynthetic photon flux densities (PPFD) and longer photoperiod increased fresh and dry weights. However, inferior quality with the increased axillary buds and the curling of heart leaves were found in the plants under high PPFD with a photoperiod of 12 h. There was no significant difference between the plants grown under same integral amounts of PPFD $\times$ photoperiod. The present experiment indicates that an optimum PPFD of 400–420 $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ with 8 h photoperiod increases lettuce growth and crop quality. It is may be suggested that high light intensity with short day regimes (11.00 pm–7.00 am) will be commercially recommended for lettuce production in the artificially controlled plant factory.

(Received October 21, 1994)

1994年10月21日受付

結 言

完全制御型植物工場は次世代の農業生産システムと注目されながらも、建設・電力費などコストの点で経済性が疑問視されている。とくに照明および空調に関わる電力費が問題であり、現状では全生産費のうち、これらに要する電力費が約4~5割占めている(伊東, 1986b; 高辻, 1992)。この点に関して、各方面から実用化へのアクセスがなされているが、いまだ解決しなければならない問題が山積している(安井, 1986; 伊東, 1991)。

一方、深夜電力契約(11 pm~7 am)は、その割引率や契約条件が電力会社ごとに多少異なるものの、一般電力に比べて約40~70%割安となるので、植物工場施設で深夜電力の有利性を活用できるか否かも、一つの課題となっている。この深夜電力の利用について一部の施設では、空調に利用して電力コストを低減している事例がみられるが(岡部ら, 1993)、完全制御型植物工場では照

明に関わる点について、その利用を探る必要がある。

現在、わが国において営利的に運営されている完全制御型植物工場では、照射時間は12~16時間の事例が多く、深夜電力の利用時間をこえている。また、光強度は光合成有効光量子束密度(Photosynthetic Photon Flux Density: PPFD)で230~300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の事例が多い(伊東, 1986a, b; 高辻, 1992)。一方、人工光源下の光強度がサラダナの生育に与える影響は多数報告されており(池田ら, 1988; Ito, 1989; Knight and Mitchell, 1983; 佐瀬ら, 1989; Tibbitts ら, 1983)、いずれもPPFDの増加とともに、作物の乾物生産は増加すると報告されている。Ito (1989)は人工光源下において、明期を14時間の一定とし、5水準のPPFD条件(140, 210, 280, 350, 420 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)でサラダナの栽培を行った結果、経済的な限界光強度は280 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 付近にあると提言している。しかし、これらの研究はいずれも12時間以上の照射条件で試験が行われたものであり、8時間以下の短時間照射下で行ったものは見あた

らない。

そこで本研究では、深夜電力の利用を想定した短時間照射による野菜生産の可能性を模索し、かつその場合の好適光強度を究明するために、照射時間および PPFD を変えてサラダナ (*Lactuca sativa* L.) を栽培し、生育、品質、光合成速度、蒸散速度、培養液の養水分吸収などについて調査した。

材料および方法

本研究は、完全制御型植物工場『TEPCO BIOTORY』（伊東ら，1991）を利用した実験Ⅰと、千葉大学園芸学部内グロースチャンパーで行った実験Ⅱからなる。実験Ⅰではサラダナの生育と光合成の関係について、実験Ⅱでは生育と養水分吸収の関係について調査・検討を行った。

実験Ⅰ

供試した育苗室および実験室の環境条件を Table 1 に示した。照射条件は、深夜電力の利用を基本とする照射時間に、実際に稼働している完全制御型植物工場の事例（伊東，1986a）を参考に 3 水準（8，10，12 時間）設けた。また、光強度については PPFD で $330, 400 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の 2 水準を設け、計 6 区とした。試験は実験室 3 室を供試し、PPFD ごとに 2 回に分けて栽培を行った。光

源は東芝ライテック製の高圧ナトリウムランプ（HPS-360）とメタルハライドランプ（MH-360）を併用し、ランプを 1.8 m^2 におのおの 1 灯ずつ、光分布が均等になるよう天井部に配列した。また、PPFD は栽培架台の高さを変えて調節した。炭酸ガス濃度は、育苗室 350 ppm，栽培室 500 ppm とし、炭酸ガス測定装置（堀場製作所製，GH-250E）で制御した。

供試品種、『岡山サラダナ』を、 $2.4 \times 2.4 \times 3 \text{ cm}$ の水耕用ウレタンキューブに播種し、『TEPCO BIOTORY』内の育苗室で 17 日間育苗した。生体重が約 $0.5 \sim 0.7 \text{ g}$ ，葉数約 3～4 枚に生長した苗を、『TEPCO BIOTORY』内の実験室内に設置した NFT 栽培装置に栽植距離 $15 \times 30 \text{ cm}$ で、各区 60 株ずつ定植した。

育苗と栽培の培養液は、Table 2 に組成を示した千葉大サラダナ処方を用いた。培養液の管理は伊東ら（1991）と同じとし、基肥培養液（180 L）で栽培を開始した後、作物の吸水に応じて自動的に所定の培養液量になるよう追肥培養液を補給した。サラダナの生体重が約 75 g に達した定植後 15 日目に栽培を終了した。

調査は、定植後 6，10，13，15 日目に生育および光合成速度、蒸散速度を測定した。サラダナを栽培状態のまま上方から測定した値を投影植物面積とし、また、 1 cm^2 以上に展開した葉を切断して測定した葉の総計を葉面積

Table 1 Environmental factors.

Factors	Expt. I		Expt. II	
	Propagation room	Growth room	Propagation room	Growth room
Light source ²	HPS+MH	HPS+MH	HPS	HPS
PPFD ³ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	150	330, 400	224	280, 350, 420
Photoperiod (h·d ⁻¹)	10	8, 10, 12	12	8, 10, 12
Room temp. L/D (°C)	24/18	24/20	24/18	24/20
Relat. humid L/D (%)	60/90	60/90	70/90	70/90
CO ₂ conc. (ppm)	350	500	350	350
Nutrient Sol.				
EC (dS·m ⁻¹)	1.2	1.9	1.2	1.7
pH	6.5	6.5	6.5	6.5

² HPS: high pressure sodium lamp, MH: metal halide lamp.

³ Photosynthetic Photon Flux Density.

Table 2 Composition of the nutrient solutions (meq·L⁻¹).

	NO ₃ -N	NH ₄ -N	PO ₄ -P	K	Ca	Mg	SO ₄
Basal solution	12	0	4	8.3	5	2	2
Additional solution	12	1.3	4	8	4	2	2

Table 3 Effect of radiation intensity and photoperiod on the growth of lettuce plants 15 days after planting^z (Expt. I).

Experimental plot		Number of leaves	Number of axillary bud leaves	Leaf fresh weight (g)	Leaf dry weight (g)	Percentage of dry matter (%)	Leaf shape ratio ^y	Projected plant area ^x (cm ²)	Total leaf area ^w (cm ²)	Chlorophyll content (mg.FWg ⁻¹)
PPFD ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	Photoperiod (h)									
330	8	22.0	3.9	32.9	2.01	6.1	1.4	336.0	548.4	1.68
	10	23.6	8.8	42.4	2.54	6.0	1.3	358.5	774.8	1.79
	12	25.8	19.6	58.4	3.39	5.8	1.1	342.0	815.0	1.81
400	8	23.6	4.0	47.5	3.04	6.4	1.3	322.3	809.6	2.03
	10	23.8	7.4	60.5	3.63	6.0	1.2	353.8	1027.4	2.17
	12	25.6	19.2	75.9	4.48	5.9	1.0	315.5	1006.5	2.21
PPFD (D)		NS ^v	NS	**	**	NS	NS	*	**	**
Photoperiod (H)		**	**	**	**	NS	**	**	**	**
D × H		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

^z Mean of 5 plants.^y Leaf length/Leaf width.^x Projected plant area (attached leaves).^w Total leaf area (detached leaves).^v *, **, and NS indicate significant difference at 0.05, 0.01 % and non-significance, respectively.

とした。投影植物面積は植物体が生育中に受光する実際の面積を評価したものである。また、クロロフィル濃度の測定には葉緑素計（ミノルタ製，SPAD-501）を使用した。葉緑素計の測定値は，あらかじめ常法の分析で得られたクロロフィル濃度との関係式から濃度に換算した。光合成速度，蒸散速度はランプ点灯5時間後に，最大葉の葉身部を携帯用光合成・蒸散測定装置（小糸製作所製，KIP-8510型 Ver. 2）で測定した。一方，これら単位葉面積当たりの光合成速度，蒸散速度に投影植物面積を乗じた値を，株当たりの推定指数とした。

実験 II

グロースチャンバーを4室使用し，1室を育苗用，3室を栽培用とし，各室の環境条件をTable 1に示した。照射時間は実験Iと同様に8，10，12時間照射の3水準とし，光強度はPPFDで280，350，420 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の3水準の計9区とした。試験には栽培用のチャンバー3室を供試し，PPFDごとに3回に分けて栽培を行った。光源は青色域の演色性を高めた日本電池製の高圧ナトリウムランプ（KBN 661）単用とし，PPFDは栽培面との距離を変えて調節した。炭酸ガス濃度は育苗室，栽培室ともに350 ppmとし，炭酸ガス測定装置（富士電機製，ZFP-6F）で制御した。

サラダナ種子はウレタンキューブに播種し，3週間育苗した後，生体重約3g，葉数約7～8枚に達した苗を，各グロースチャンバー内に設置した4組の湛液水耕装置（容量4.8L）に，栽植距離15×15cmで各6株ずつ，計24株を定植した。

育苗と栽培の培養液には千葉大サラダナ処方の基肥を用い，定植後5，10日目に培養液の更新を行い，その間

の調整は行わなかった。

定植後5，10，15日目に各栽培装置から2株ずつ採取し，1区8株を生育し，同時に植物体に吸収された無機成分を調べるため，培養液を採取した。培養液の分析は， $\text{NO}_3\text{-N}$ を紫外外部吸光法， $\text{PO}_4\text{-P}$ をバナドモリブデン酸法，K，Ca，Mgを原子吸光法によった。

結 果

実験 I

定植後15日目のサラダナの生育をTable 3に示した。本葉数ならびに腋芽葉数には，PPFDによる影響はみられなかったが，長時間照射によって増加した。葉の生体重および乾物重は高PPFDならびに長時間照射によって増加した。乾物率にはPPFDおよび照射時間の影響はなかった。葉形比は長時間照射によって1に近くなり葉形は丸型になった。投影植物面積は高PPFDで減少し，とくにPPFDが400 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の12時間照射（以下，PPFD 400-12hと省略）区が著しく減少した。葉面積は，高PPFDならびに長時間照射によって増加したが，PPFD 400-12h区は同PPFDの10h区より減少した。また，クロロフィル濃度も高PPFDならびに長時間照射によって有意に増加した。

定植後15日目に撮影したPPFD 400-8h区および12h区のサラダナをFig. 1に示した。8h区のサラダナは正常な生育を示したのに対して，12h区のサラダナでは中心葉付近に葉捲きやチップバーンの発生がみられた。

定植後10，13，15日目に測定した光合成速度をTable 4に示した。単位葉面積当たりの光合成速度は定植後13日目までは，高PPFDならびに長時間照射によって高

Fig. 1 Effect of radiation intensity and photoperiod on the growth of lettuce plants 15 days after planting (Expt. I).

A; PPFD 400 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 8 h photoperiod, B; PPFD 400 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 12 h photoperiod, Leaf curling was found in the heart leaves of plants grown under high PPFD (B).

Table 4 Effect of radiation intensity and photoperiod on the photosynthetic rate of lettuce plants (Expt. I).

Experimental plot		Photosynthetic rate					
		In mature leaf ^z (gCO ₂ ·m ⁻² ·h ⁻¹)			Calculated as total plant ^y (mgCO ₂ ·h ⁻¹)		
		10 (Days after planting)	13 (Days after planting)	15 (Days after planting)	10 (Days after planting)	13 (Days after planting)	15 (Days after planting)
330	8	0.94	1.19	1.61	12.8	27.9	54.1
	10	1.39	1.42	1.80	21.1	34.4	64.5
	12	1.39	1.44	1.78	20.3	36.6	60.9
400	8	1.36	1.44	1.61	18.6	31.8	51.9
	10	1.47	1.53	1.89	21.9	36.5	66.9
	12	1.55	1.61	1.58	23.1	42.3	49.8
PPFD (<i>D</i>)		NS*	*	NS	—	—	—
Photoperiod (<i>H</i>)		NS	NS	NS	—	—	—
<i>D</i> × <i>H</i>		NS	NS	NS	—	—	—

^z Mean of 5 plants.

^y Photosynthetic rate of total plant is calculated as follows (photosynthetic rate × projected plant area).

* , **, and NS indicate significant difference at 0.05, 0.01% and non-significance, respectively.

Table 5 Effect of radiation intensity and photoperiod on the transpiration rate of lettuce plants (Expt. I).

Experimental plot		Transpiration rate					
		In mature leaf ^z (kgH ₂ O·m ⁻² ·h ⁻¹)			Calculated as total plant ^y (gH ₂ O·h ⁻¹)		
		10 (Days after planting)	13 (Days after planting)	15 (Days after planting)	10 (Days after planting)	13 (Days after planting)	15 (Days after planting)
330	8	0.031	0.034	0.056	0.42	0.80	1.88
	10	0.044	0.056	0.088	0.67	1.36	3.15
	12	0.046	0.063	0.069	0.67	1.60	2.36
400	8	0.072	0.078	0.080	0.99	1.72	2.58
	10	0.056	0.064	0.066	0.83	1.53	2.34
	12	0.070	0.077	0.060	1.04	2.03	1.89
PPFD (<i>D</i>)		* [*]	**	**	—	—	—
Photoperiod (<i>H</i>)		NS	NS	NS	—	—	—
<i>D</i> × <i>H</i>		NS	*	**	—	—	—

^z Mean of 5 plants.

^y Transpiration rate of total plant is calculated as follows (transpiration rate × projected plant area).

* , **, and NS indicate significant difference at 0.05, 0.01% and non-significance, respectively.

くなる傾向がみられたが、15日目の測定では高 PPFD による影響は認められず、PPFD 400-12h 区では逆に低下する傾向がみられた。株当たりの光合成速度も、高 PPFD ならびに長時間照射によって高くなったが、定植後 13 日目以降には PPFD 400-12h 区では同 PPFD

の 10h 区より著しく低下した。

定植後 10, 13, 15 日目に測定した蒸散速度を Table 5 に示した。単位葉面積当たりの蒸散速度は定植後 13 日目の測定までは、高 PPFD 区で高くなったが、15 日目の測定では 8 時間照射区以外で高 PPFD 区が低下した。

Table 6 Effect of radiation intensity and photoperiod on the growth of lettuce plants 15 days after planting (Expt. II).

Experimental plot		Number of leaves	Number of axillary bud leaves	Leaf fresh weight (g)	Leaf dry weight (g)	Percentage of dry matter (%)	Leaf shape ratio ^z	Projected plant area ^x (cm ²)	Total leaf area ^w (cm ²)
PPFD ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	Photoperiod (h)								
280	8	26.9	0.3	36.5	2.31	6.33	1.5	407.8	1103.4
	10	25.8	1.0	41.1	2.71	6.59	1.2	432.8	1035.4
	12	25.1	1.1	43.4	2.88	6.65	1.2	404.1	1015.7
350	8	27.5	0.6	43.2	2.54	5.90	1.4	473.0	1242.0
	10	26.0	10.1	47.9	2.84	5.93	1.2	456.9	1267.9
	12	26.3	12.9	52.1	3.24	6.28	1.0	418.2	1153.3
420	8	29.0	6.7	60.8	3.53	5.80	1.2	441.8	1477.4
	10	28.1	15.1	61.7	3.87	6.27	1.1	411.2	1206.2
	12	31.1	19.9	64.6	4.08	6.36	1.1	372.2	1126.0
PPFD (<i>L</i>)		** ^v	**	**	**	**	**	NS	**
Photoperiod (<i>H</i>)		NS	**	*	**	**	**	*	**
<i>L</i> $\times$ <i>H</i>		*	**	NS	NS	NS	**	NS	*

^z Mean of 5 plants.

^y Leaf length/Leaf width.

^x Projected plant area (attached leaves).

^w Total leaf area (detached leaves).

^v *, **, and NS indicate significant difference at 0.05, 0.01% and non-significance, respectively.

Table 7 Effect of radiation intensity and photoperiod on the Relative Growth Rate [RGR], Net Assimilation Rate [NAR] and Leaf Area Ratio [LAR] in lettuce plant (Expt. II).

Experimental plot		RGR ($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)			NAR ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)			LAR ($\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)		
PPFD ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	Photoperiod (h)	1-5	6-10	11-15	1-5	6-10	11-15	1-5	6-10	11-15
		(Days after planting)			(Days after planting)			(Days after planting)		
280	8	0.28	0.13	0.17	4.44	2.01	2.89	0.063	0.065	0.058
	10	0.30	0.13	0.18	5.29	2.49	3.95	0.058	0.054	0.045
	12	0.32	0.14	0.17	5.66	2.79	3.94	0.057	0.051	0.043
350	8	0.30	0.17	0.14	5.41	2.65	2.65	0.059	0.052	0.051
	10	0.32	0.18	0.13	5.84	3.85	2.83	0.056	0.047	0.046
	12	0.36	0.17	0.14	7.11	4.21	4.21	0.050	0.034	0.034
420	8	0.35	0.20	0.13	6.21	4.30	3.01	0.057	0.046	0.043
	10	0.39	0.18	0.13	7.52	4.61	3.79	0.052	0.040	0.034
	12	0.42	0.18	0.13	9.06	5.40	4.20	0.046	0.033	0.030

株当たりの蒸散速度は定植後 13 日目までは高 PPFD ならびに長時間照射によって高くなる傾向がみられたが、15 日目になると長時間照射によって低下した。

実験 II

グロースチャンパー内で 15 日間栽培したサラダナの生育を Table 6 に示した。本葉数ならびに腋芽葉数は高 PPFD によって有意に増加したが、長時間照射については腋芽葉数のみ有意に増加した。葉の生体重および乾

物重は高 PPFD ならびに長時間照射によって増加した。また、葉形比は高 PPFD ならびに長時間照射によって 1 に近くなり葉は丸型になったが、この傾向は高 PPFD ほど顕著であった。投影植物面積および葉面積は、高 PPFD によって増加し、長時間照射によって減少する傾向がみられた。

定植後 15 日間のサラダナの相対生長率、純同化率、葉面積比を Table 7 に示した。相対生長率と純同化率は

Table 8 Effect of radiation intensity and photoperiod on the water and mineral uptakes in lettuce plants^z (Expt. II).

Experimental plot		Water uptake (mL·plant ⁻¹ ·d ⁻¹)		Mineral uptakes (mg·plant ⁻¹ ·d ⁻¹)				Mineral uptakes (n) per unit volume of water uptakes (w) (meq·L ⁻¹)			
PPFD ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	Photoperiod (h)	NO ₃ -N	PO ₄ -P	K	Ca	Mg	NO ₃ -N	PO ₄ -P	K	Ca	Mg
280	8	39.0	4.8	16.3	6.9	0.4	16.4	11.9	10.7	8.9	0.9
	10	42.6	5.3	17.8	9.2	0.6	18.2	12.0	10.7	10.8	1.2
	12	42.3	4.6	17.7	8.5	0.7	17.5	10.6	10.7	10.0	1.3
350	8	40.3	6.5	20.3	10.4	0.7	18.6	15.6	12.9	12.5	1.5
	10	44.2	6.4	23.5	12.0	0.7	19.7	14.1	13.6	11.2	1.4
	12	51.0	6.3	23.3	11.9	0.9	17.5	12.0	11.7	10.5	1.5
420	8	66.7	7.5	33.1	16.9	1.5	18.6	10.9	12.7	10.7	1.8
	10	61.7	6.6	31.6	16.2	1.4	19.3	10.4	13.1	10.5	1.9
	12	81.5	8.1	37.6	19.2	1.6	17.6	9.6	11.8	9.2	1.6

^z Planting ~ 15 Days after.

定植後 10 日目までは、高 PPFD ほど高かったが、15 日目になると逆に低下した。また、相対生長率は定植後 5 日目まで長時間照射区で高かったが、以降は差がなく、純同化率は栽培の全期間を通して、長時間照射区が高かった。葉面積比は栽培の全期間を通して、高 PPFD、長時間照射、生育の進行によって低下する傾向にあった。

栽培期間中の養水分吸収量を Table 8 に示した。吸収量は高 PPFD ならびに長時間照射によって増加する傾向がみられ、とくに、PPFD 350-12h および PPFD 420-12h の両区で著しく増加した。無機成分吸収量はすべての成分で、高 PPFD による増加傾向がみられ、とくに PPFD 420-12h 区は吸収量が著しく増加した。養水分吸収比（以下、n/w と略す）は高 PPFD によって Mg が高くなった。また、NO₃-N、PO₄-P、K、Ca の成分の n/w については、高 PPFD によって PPFD 350 区が PPFD 280 区より高くなり、PPFD 420 区になると低くなる傾向がみられた。

考 察

サラダナの生育が光の強さならびに照射時間の増加とともに促進されることは、本試験の結果でも確認された。生育の促進は、葉数、葉の生体重および乾物重において明瞭に現れ、とくに、生育初期～中期にかけての相対生長率や純同化率でも明らかのように、より強い光のもとで長時間照射されたときに、生長速度が速いことがわかった。しかし、生育後期になると高 PPFD の長時間照射区では、中心葉付近に葉捲きやチップバーンが発生し、腋芽葉数の著しい増加がみられ、サラダナの生産物として価値を著しく低下させた。これらのことは、実験 I の定植後 15 日目に測定した PPFD 400-12h 区の光合成速度および蒸散速度が同 PPFD の 10h 区の値より低下したこと、また、実験 II の定植後 10 日目以降の相対生長率および純同化率が高 PPFD によって低下したこと、また、高 PPFD、長時間照射、生育期間の進行によって葉面積比が低下したと深い関係があると推察された。

一般にサラダナは、主茎頂付近の葉の分化とその生長が順調に行われている場合は、葉捲きやチップバーン、腋芽葉の発生はほとんど起こらないのがふつうである。サラダナは栽培環境の影響によって、中心葉付近にチップバーンが発生すると報告されている (Barta and Tibbitts, 1991; Collier and Tibbitts, 1984; 孫・高倉, 1989)。丸尾 (1986) はチップバーンと Ca 栄養の関係を生長および展開葉位別に調査した結果、葉中の Ca

Fig. 2 Relationship between light intensity and dry weight accumulation of lettuce plants 15 days after planting.

**Significant at 1% level.

含有率は下位葉で高く、上位葉で低くなり、また、生長速度が速いと上位葉ではCa吸収が生長に追いつかなくなるため、生育後期にチップバーンが発生しやすくなることを報告した。また、Tibbitts *et al.* (1985) は、Ca濃度に依存する細胞壁の支持力が小さければ乳細胞の物理的な破壊が起こることを報告している。これらのことから高PPFDの長時間照射区では、高い生長速度にもなって無機成分吸収量が増加したものの、蒸散速度の低下によって、蒸散流との関わりが強いCaが本葉の葉縁付近で欠乏し、細胞増殖が抑制されたために葉捲きが起こり、これが重度になったものがチップバーンであると考えられた。一方、高PPFDの長時間照射区では葉面積比が低下するとともに腋芽葉が増加したが、これらはシンク葉である中心葉付近が、葉捲きやチップバーンの発生によって頂芽優勢を失ったために、ソース葉に光合成産物が蓄積し、中心葉の代わりに活力あるシンクとして腋芽葉が分化、発達したものと推察した。この腋芽葉の増加は、高PPFDおよび長時間照射区の吸水量や無機成分吸収量が著しく増加したことから関係があると考えられる。

このように高PPFDによるストレスが作物の生育や品質に影響を及ぼすことは、Knight and Mitchell (1983) の報告と類似しており、生育の途中までは高PPFDおよび長時間照射によって乾物生産量は増加するものの、最終的には生育の抑制や品質の低下などを引き起こすことが明らかになった。

一方、実験I、IIの各区に対して1回の明期に照射する光量子の積算値と定植後15日目の乾物重を用いて回帰分析を行った結果、 $y = 0.40 + 0.23x$ ($r = 0.909^{**}$) という高い正の相関関係がみられた。よって、光周期が一定の場合、照射時間の長短を問わず、1明期に照射する単位面積当たりの光量子が同じならば、いずれの場合も乾物生産量はおおよそ同じになると推察された(Fig. 2)。

以上のことから、短時間照射条件で生育したサラダナはPPFDを高めることによって、長時間照射で生育したものと変わらないものが生産できることが確認でき、深夜電力の利用による短時間高光強度照射の実用的可能性が示唆された。

摘 要

完全制御型植物工場の電力コストを削減させるために、一般電力と比べて割安な深夜電力(11 pm~7 am)の利用について、『岡山サラダナ』を供試し、光強度と照射時間の関係から調査・検討を行った。

生育中期までは、PPFDならびに照射時間の増加とともに葉の生体重および乾物重は増加したが、後期から腋芽葉の発生や葉捲きが多く発生し、サラダナの生育は遅延し、生産物の品質は低下した。また、1回の明期に照射する光量子の積算値が等しければ、サラダナの生育や品質も同様になると推察された。

以上のことから、本試験の照射条件のなかでは、PPFDが $400 \sim 420 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、照射時間が8時間

で生育したサラダナが生育や品質などの面から効率的であることがわかり、深夜電力の利用による栽培の実用的可能性が示唆された。

文 献

- Barta, D.J., Tibbitts, T.W. 1991. Calcium localization in lettuce leaves with and without tipburn: Comparison of controlled-environment and field-grown plants. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* **116**: 870-875.
- Collier, G.F., Tibbitts, T.W. 1984. Effects of relative humidity and root temperature on calcium concentration and tipburn development in lettuce. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* **109**: 128-131.
- 池田 彰・中山繁樹・北宅善昭・矢吹萬寿 1988. 植物工場における物質生産の基礎的研究 (1) サラダナの光合成と日長、光強度および CO₂ 濃度の関係. *生物環境調節* **26**: 107-112.
- 伊東 正 1986a. 植物の工場的生産と差別化商品. *農林統計調査* **8**: 19-23.
- 伊東 正 1986b. 植物の工場的生産への実践的アプローチ. *農業および園芸* **61**: 174-180.
- Ito, T. 1989. More intensive production of lettuce under artificially controlled conditions. *Acta Hortic.* **260**: 381-389.
- 伊東 正 1991. 「施設園芸における高度集約生産システムの展開方向—野菜の工場的生産の可能性—」(日本施設園芸協会編)(社)日本施設園芸協会, 東京, p 71-78.
- 伊東 正・丸尾 達・鈴木皓三・松尾幸蔵 1991. 都市型植物工場の実用化に関する研究 (第1報) 研究用施設「TEPCO BIOTORY」の仕様とその環境諸元. *園学要旨* **60秋**: 260-261.
- Knight, S. L., Mitchell, C. A. 1983. Enhancement of lettuce yield by manipulation of light and nitrogen nutrition. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* **108**: 750-754.
- 丸尾 達 1986. サラダナの tipburn に関する研究 (第1報) 葉位別 Ca 栄養について. *園学要旨* **58秋**: 294-295.
- 岡部利明・小酒井一嘉・寺添 斉・庄子和博 1993. 野菜工場の実用化 (1) 流液式 (NFT) 栽培装置と夜間電力利用空調装置の開発. *電中研報告 U90079*: 24-32.
- 佐瀬勘紀・池田英男・奈良 誠・竹園 尊 1989. 光源の種類と光強度がレタスの生育に及ぼす影響. *農業気象・生物環境調節要旨*: 105-106.
- 孫 禎翼・高倉 直 1989. 植物工場におけるサラダナの蒸散量とチップバーンに対する培養液の電気伝導度と光条件の影響. *農業気象* **44**: 253-258.
- 高辻正基 1992. 21 世紀のハイテク農業—植物工場—. 裳華房, 東京, p 82-93.
- Tibbitts, T.W., Morgan, D.C., Warrington, I.J. 1983. Growth of lettuce, spinach, mustard, and wheat plants under four combinations of high-pressure sodium, metal halide, and tungsten halogen lamps at equal PPFD. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* **108**: 622-630.
- Tibbitts, T.W., Bensink, J., Kuiper, F., Hobé, J. 1985. Association of latex pressure with tipburn injury of lettuce. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* **110**: 362-365.
- 安井英夫 1986. 「植物工場のすべて」(日本施設園芸協会編) 富民協会, 東京, p 75-91.