遠赤色光 (FR) 付加照射によって生じるレタス生育の促進

村上克介・洞口公俊*・森田政明*・相賀一郎

大阪府立大学農学部・*松下電器産業株式会社照明研究所

Accelerating the Growth of Lettuce (*Lactuca sativa* L.) by Additional Far-Red (FR) IrradiationKatsusuke MURAKAMI, Kimitoshi HORAGUCHI,* Masaaki MORITA*
and Ichiro AIGA

Faculty of Agriculture, University of Osaka Prefecture, Sakai 591, Japan

*Lighting Research Laboratory, Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.,
Moriguchi 570, Japan

The effect of additional far-red (FR) irradiation produced by FR fluorescent lamps on the growth of lettuce (*Lactuca sativa* L. cv. Okayama) was examined. The main lighting source was 3-band fluorescent lamps. The photosynthetic photon flux density (PPFD) (400-700 nm) was kept at $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$ in all treatments and each additional photon flux density (PFD) of FR (700-800 nm) irradiation in four treatments was kept at 107.1, 50.1, 25.6, and $9.3 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$, respectively. The experiment was performed in a controlled environment at 25°C and at 70% relative humidity.

According to the level of additional FR irradiation, the fresh weight, dry weight, leaf area, stem length and internode length of the lettuce was increased. Although the PPFD remained constant, additional FR irradiation was useful in accelerating plant growth. It was believed that plant photomorphogenesis was changed by FR irradiation, resulting in the increase in the internode length and leaf area and consequently the plants were able to absorb more photons.

Comparing the two methods of accelerating plant growth, adding FR irradiation and increasing the level of the PPFD, the former was more efficient than the latter as far as electrical consumption.

(Received October 4, 1991)

1991年10月4日受付

緒 言

前報に、村上ら¹⁾は、FR 付加照射によるヒマワリ幼植物の伸長成長制御について報告し、そのなかでヒマワリの葉面積は付加した FR に従って増加することを示した。Kwesiga and Grace²⁾, Methy ら³⁾, Inada and Yabumoto⁴⁾ もまた、FR 付加により数種の植物の葉面積が増加することを報告した。

光放射の分光分布を制御することにより、葉面積を増加させ、あるいは生体重、乾物重の増加につながる生育促進を図れるとすれば、光放射の制御は人工光環境下で植物を生育させる場合の重要な課題となる。本報告では緑色野菜の一例として、レタスの生育に対する FR 付加

照射の効果を検証した。さらに、光合成有効光量子束密度 (PPFD) の増加による生育促進と、FR 付加照射による生育促進についてランプ電力と関係づけた考察を行った。

材料と方法

実験は、気温 25°C、相対湿度 70% に制御したウォークインタイプのグロースキャビネット内で、村上ら¹⁾ と同様の方法により行った。

1. PPFD の定義および計測器

本報告で用いた PPFD の定義は、McCree⁵⁾、稲田ら⁶⁾ に従い、400~700 nm における光量子束密度(単位 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$) を用いた。光合成に有効な光波長は 400~700 nm の領域にあり、実用的にはこの波長域に含まれ

る光放射束で光合成に寄与する効果度を評価しても差し支えないとも考えられる⁷⁾が、400~700 nm における光量子束密度を用いたほうが誤差がより少ないとされている^{8,9)}のが上記の定義を用いた理由である。

PPFDの絶対値についての測定機器は、この波長特性に近似した応答曲線⁷⁾をもつ光合成有効光量子センサー(LI-COR, LI-190S)をライトメーター(同, LI-185)に装着したものを用いて測定した。

2. 光源および相対的光量子束の波長分布の測定

光源として用いたランプは、3波長域発光形蛍光ランプ(松下電器産業, 55W, FPL55SSEX-N, 5000K)およびFR 蛍光ランプ(20W, 試作品)である。この2種類のランプを組み合わせ、蛍光ランプ20W形および55W形を任意に組み合わせ、13本まで点灯できる照明ユニット4台に取り付け、各実験処理区の光源とした。実験処理区は4区設定した。主光源は各処理区につき3波長域発光形蛍光ランプ(55W)4本とし、処理区Aでは9本、処理区Bでは5本、処理区Cでは1本のFR 蛍光ランプ(20W)を付加した。処理区Dは主光源のみとした。処理区間の温度均一性確保のため、FR 蛍光ランプを付加しないランプ装着場所にはFR 蛍光ランプを黒色画用紙で覆ったランプを装着した。PPFDは4処理区ともに実験初期の植物体の位置で $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$ とし、実験期間中連続照射とした。この各処理区の設定方法は、村上ら¹⁾と同様である。

ランプ単体、およびランプ組合せ後の相対的光量子束の波長分布の測定はマルチチャンネル分光システム(測光部: 大塚電子 MCPD-100, 解析部: 松下電器産業 Panacom M353 もしくはヒューレットパッカード HP-310)を用いた、この分光システムは理論分解能 1.3 nm

で分光光度を測定でき、波長校正、エネルギー補正が自動的に可能である。

3. 植物材料、測定および統計処理

市販のレタス (*Lactuca sativa* L. cv. Okayama) 種子をロックウール培地 (Grodan AO36/40 6/15) に播種し、3波長域発光形蛍光ランプ(55W)を用い、PPFD $300 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$ 、連続照射下で10日間、市販培養液(大塚ハウス1号, 2号, 2分の1濃度)を用いた水耕栽培により育苗した。

均一な幼植物を選択して、A, B, C, Dの4区の処理区に各処理区当り15個体をロックウールにつけたまま移植した。処理区での栽培も上記の市販培養液を用いた水耕栽培とし、根圏にはエアープンプにより空気を供給した。

処理開始時に10個体、処理開始6, 11, 17日目に各処理区から8, 4, 3個体ずつサンプリングし、地上部生体重、葉数、葉面積、最も葉長の長い葉の縦横比、茎の直径を測定した。さらに、80°Cで48時間以上通風乾燥機で乾燥させ、葉の乾物重と茎の乾物重を測定した。平均値間の差異はDuncanの多重範囲検定により分析し判定した。

結 果

Fig. 1は、FR 蛍光ランプ(20W)、3波長域発光形蛍光ランプ(55W)、それぞれ単体での相対的光量子束の波長分布を示したものである。FR 蛍光ランプの光量子束は660 nm 付近から始まり、740 nm 付近にピークがあり、900 nm 付近ではほとんど0となる。FR 蛍光ランプはPPFD 範囲にも若干の光量子束があり、その割合は400 から 800 nm の全光量子束の9%である。3波

Fig. 1 Relative spectral photon flux per a tube.

—, far-red fluorescent lamp (20W);
....., three band fluorescent lamp (55W).

Table 1 Changes in growth characteristics of lettuce by additional far-red irradiation.

Days after planting	Treatment (Additional FR lamps)	Top fresh weight (g)	Dry weight (g)		
			Leaf	Stem	Top
0		0.2	—	—	—
6	A (9)	3.4a	0.3a	0.02a	0.3a
6	B (5)	2.8ab	0.2ab	0.01b	0.2ab
6	C (1)	1.9c	0.2c	0.01b	0.2c
6	D (0)	2.2bc	0.2bc	0.01b	0.2bc
11	A (9)	20.2a	1.4a	0.09a	1.5a
11	B (5)	16.3ab	1.2ab	0.06ab	1.2ab
11	C (1)	8.8b	0.7c	0.03b	0.7c
11	D (0)	11.8b	0.8bc	0.04b	0.9bc
17	A (9)	130.4a	6.6a	0.75a	7.4a
17	B (5)	113.2ab	5.4ab	0.51b	6.0ab
17	C (1)	90.4bc	5.1ab	0.35bc	5.4b
17	D (0)	66.0c	4.0b	0.28c	4.3b

Mean separation within columns by Duncan's multiple range test, $p=5\%$.

Fig. 2 Spectral distributions of each lighting condition.

Treatment: A, —; B, ----; C,; D, -.-.-.

長域発光形蛍光ランプは約 400 nm から約 800 nm の範囲に光量子束が見られ、PPFD 範囲の光量子束は 400 から 800 nm の全光量子束の 96% である。

Fig. 2 は、A, B, C, D 各処理区の光量子束の 350 nm から 800 nm の波長分布を相対的に示したものである。PPFD を一致させているので、この図での各処理区の 400~700 nm の光量子束の積分値は等しい。FR 蛍光ランプの付加にともない、700 nm から 800 nm の光量子束は増加する。700~800 nm の光量子束密度は計算によると、A, B, C, D 各処理区で 107.1, 50.1, 25.6, 9.3 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$ となった¹⁾。赤色光/遠赤色光 (R/FR) の比率は、 $660\pm 5\text{ nm}/730\pm 5\text{ nm}$ 比で比較すると、0.17, 0.36, 0.83, 14.76 となり¹⁾、自然光 (標準昼光) の場合が 1.04

になる⁷⁾ ことと比較すると、A, B では自然光にくらべて非常に FR の多い光環境になっている。

Table 1 には、各処理区のレタスの生育特性について示した。処理開始 6 日後、生体重は処理区 A で C, D にくらべ有意に増加し 11, 17 日後も同様であった。葉乾物重は 6, 11 日後処理区 A で、C, D にくらべ有意に増加し、17 日後には処理区 D にくらべ増加した。茎乾物重は 6 日後処理区 A で有意に増加した。11 日後、および 17 日後には、処理区間の差異は増大した。17 日後の処理区 A では、処理区 D に対し、生体重は 2.0 倍に、葉の乾物重は 1.7 倍に増加し、茎の乾物重は 2.7 倍に増加した。

形態パラメーターの変化を Table 2 に示す。葉数は、6 日後には FR を付加した処理区で増加の傾向であった。葉面積は、6 日後には処理区 A で処理区 C, D に対し、有意に増加した。日数が経過すると差は拡大した。葉の長さとの比は、葉の形態を表す指標であるが、6 日目には処理区「A B」, C, D の間に有意な差異が認められた。この結果から、FR を付加した処理区では、葉の幅にくらべ長さが長くなる傾向にあった。しかしながら、時間が経過するとこの傾向ははっきりしなくなった。茎の直径は、処理区 A では、17 日後には、処理区 B, C, D にくらべ有意に増加した。17 日間の FR 処理の後には、茎長は処理区 A では処理区 D にくらべて 2.1 倍となった。

Fig. 3 には各処理区の処理開始 11 日目の植物体の代表例、Fig. 4 には各処理区の処理開始 17 日目の茎およびその断面を示す。植物体は FR を付加した処理区では

Table 2 Changes in morphological parameters of lettuce by additional far-red irradiation.

Days after planting	Treatment (Additional FR lamps)	Leaf number	Leaf area (cm ²)	Leaf length /leaf width	Stem diameter (cm)	Stem length (cm)
0		4.0	8.6	—	0.11	0.8
6	A (9)	13.0a	124.1a	1.87a	0.32a	0.9a
6	B (5)	12.3a	140.9ab	1.79a	0.29ab	0.9a
6	C (1)	10.4b	75.2c	1.51b	0.26b	0.8b
6	D (0)	10.9b	86.9bc	1.29c	0.26b	0.8b
11	A (9)	22.5a	667.9a	1.54ab	0.67a	1.8a
11	B (5)	21.3a	534.2ab	1.49ab	0.62ab	1.6a
11	C (1)	18.3b	306.4c	1.66a	0.49b	1.3b
11	D (0)	18.5b	370.5bc	1.31b	0.55ab	1.4b
17	A (9)	43.7a	3007.0a	1.31a	1.33a	5.7a
17	B (5)	41.7a	2691.3ab	1.35a	1.23b	4.3b
17	C (1)	38.7ab	2062.8ab	1.22a	1.17b	3.2be
17	D (0)	35.0b	1500.2c	1.17a	1.04c	2.7c

Mean separation within columns by Duncan's multiple range test, $p=5\%$.

Table 3 Changes in the ratio of lamp power to fresh weight by additional far-red irradiation.

Treatment	A	B	C	D
3-band lamp power (W)	220	220	220	220
FR lamp power (W)	180	100	20	0
Total lamp power (W)	400	320	240	220
Fresh weight (17 days) (g)	130.4	113.2	90.4	66.0
Total lamp power /fresh weight (17 days)	3.07	2.83	2.65	3.33

Fig. 3 Effects of additional far-red irradiation on lettuce plants at 11 days after the treatments A, B, C, D. **Fig. 4** Effects of additional far-red irradiation on lettuce stems at 17 days after the treatments A, B, C, D.

付加しない処理区にくらべて大きくなるが、色調は変化が見られない。また、Fig. 2 に明らかなように、FR を付加した処理区では茎は伸長し茎径も増大する。

Table 3 には、3 波長域発光形蛍光ランプ、FR 蛍光ランプ、全ランプのランプ電力、および 17 日目の生体重、全ランプ電力を 17 日目の生体重で除した値を示した。この生体重 1g 当りランプ電力は処理区 A で 3.07、処理区 B で 2.83、処理区 C で 2.65、処理区 D では 3.33 となり、処理区 D にくらべ処理区 A, B, C で減少した。

考 察

以上の結果から、PPFD が一定であるにもかかわらず、FR 照射を増加させると、茎が伸長し葉面積が増大する。乾物重の増加は以下のような機作によるものと推測される。まず、葉脈や茎が FR 付加照射によって伸長する。その結果、植物の葉面積が増加し、また節間長の増大により葉の相互遮蔽が減少し、植物は多くの光量子を受光することができるようになる。したがって、植物の光合成は促進され、乾物重の増加に結びつく。Table 2 に示すように、17 日目には処理区 A では処理区 D に対して葉面積は 2.0 倍となる、また、節間長を表す指標として、葉数 1 枚当りの茎長（茎長/葉数）を計算すると処理区 A では 0.13 となり処理区 D の 0.08 にくらべ大きく増加している。したがって、処理区 A の植物はより多くの光量子を受光できるようになり、そのことが光合成を増加させ、結果として地上部乾物重を 1.7 倍に増加させたと推定できる。

光強度を上げた場合のランプ電力消費に関する考察として、池田ら⁹⁾ は本実験で用いたものと同一品種のレタス（サラダナ）を用い、蛍光ランプを光源とした場合に、PPFD を $112 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$ から $309 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$ に増加させると、100 g 生産に要するランプ電力消費は約 65% 増加することを報告した。すなわち、PPFD を増加させると植物生育は促進されるが、いっぽうその場合の生産生体重当りの電力消費は増加するとの報告である。

レタスを用い、PPFD を変化させた同様な生育実験には、Kitaya ら⁹⁾ の昼光色蛍光ランプを用いた実験、今中ら（未発表）の 3 波長域発光形蛍光ランプを用いた実験がある。これらの実験は分光分布の同じランプを用い、PPFD を変化させていることから、PPFD 変化の比率はランプ電力変化の比率であるとしてよい。この前提に基づいて各実験の生産生体重当りの電力消費がどの程度変化するかを計算すると、Kitaya ら⁹⁾ の場合、PPFD $170 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$ の場合にくらべ、 $330 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$

では、電力消費は 56% 増加した。今中ら（未発表）の場合、PPFD $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$ の場合にくらべ、200, 300, 400 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$ では電力消費はそれぞれ 45, 64, 91% 増加した。以上の実験からの計算が示すように、ランプ電力を増加（灯数などを増加することにより PPFD を増加）させると生育は促進されるが、同一生体重を生産するための電力消費は増加する。すなわち、ランプ電力当りの生産効率は悪化する。

しかしながら、本報告の場合、Table 3 から計算すると、生産生体重当り電力消費は処理区 D（FR 無付加区）にくらべ、処理区 A, B, C では 8, 15, 20% 減少する。ランプ電力を増加（PPFD は一定とし FR を付加）させても、いずれも生産生体重当り電力消費は処理区 D を下回り、ランプ電力当りの生産効率は上昇する。

したがって、生育促進方法としての 2 種の方法、すなわち同一蛍光ランプの電力を増加させることにより PPFD を上げる生育促進法と、FR 付加照射による生育促進法を比較した場合、後者の場合にはランプ電力当りの生産生体重の低下を生じることがなく、効率的にレタス生育を促進できる。このようにランプ電力消費効率を低下させずに生育が促進できた原因は、FR の植物光形態形成に関する効果により、植物がより多くの光量子を受光できる形態となった結果によるものと推定される。

以上から、FR 付加照射により植物の光形態形成が制御され、葉面積が増加し、植物生育が促進されることが明らかになった。また、FR 付加照射はレタスの場合、ヒマワリの場合⁹⁾と同様にとくに茎の成長に顕著に効果が現れることが明らかになったが、葉の成長、生体重、乾物重の増加にも効果があることが認められた。さらには、蛍光ランプの電力（灯数）を増加させる生育促進法にくらべ、FR 付加照射による生育促進法が電力消費の点からみてレタスの場合効率的であることが明らかになった。今回用いた FR 蛍光ランプは試作品のため、FR 光量子束発光効率には改良の余地があると考えられるので、さらに効率の上昇も期待できる。本研究では、FR 蛍光ランプを、人工光源下での光形態形成変化用、さらには、植物生育促進用ランプとして活用できる可能性が見いだされた。また FR 光は植物生育に関し注目すべき波長域であり、新しい植物栽培用人工光源開発の場合には、その設計にとくに考慮すべき波長域であると考えられる。

本研究の遂行にあたり、松下電器産業（株）照明研究所、大久保和明、山中泰彦両氏より測光に関する技術協力を得た。ここに深く感謝の意を表する。

文 献

- 1) 村上克介・洞口公俊・森田政明・相賀一郎. 1991. 遠赤色光付加照射によるヒマワリ幼植物の伸長成長制御. 生物環境調節 **29**: 73-79.
- 2) KWESIGA, F. and J. GRACE. 1986. The role of the red/far-red ratio in the response of tropical tree seedlings to shade. *Ann. Bot.* **57**: 283-290.
- 3) METHY, M., P. ALPERT, and J. ROY. 1990. Effects of light quality and quantity on growth of the clonal plant *Eichhornia crassipes*. *Oecologia*. **84**: 265-271.
- 4) INADA, K. and Y. YABUMOTO. 1989. Effects of light quality, daylength and periodic temperature variation on the growth of lettuce and radish plants. *Jpn. J. Crop Sci.* **58**: 689-694.
- 5) MCCREE, K. J. 1972. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. *Agric. Meteorol.* **10**: 443-453.
- 6) 稲田勝美・船越建明・青木幹男・福井正夫・桂 直樹. 1980. 混合光の光質が作物の光合成に及ぼす影響. 日作紀 **49**: 34-41.
- 7) 洞口公俊. 1989. 植物生育と光放射. 電気設備学会誌 **9**: 118-126.
- 8) 池田 彰・江崎謙治・河相好孝・中山繁樹. 1987. 全方向照射における植物生育特性 II. 蛍光ランプによる近接光照射下でのサラダナ生産に要する照明電力消費量. 生物環境調節 **25**: 1-5.
- 9) KITAYA, Y., T. IMANAKA, M. KIYOTA, and I. AIGA. 1988. Advantageous arrangement of plants in a plant factory—Cultivation of lettuce suspended upside down. *Acta Hortic.* **230**: 271-278.