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

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

Growth Control of the Sunflower (*Helianthus annuus* L. cv. Russian Mammoth) Seedlings by Additional Far-red 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 seedlings of sunflower (*Helianthus annuus* L. cv. Russian Mammoth) were hydroponic-cultured in a controlled environment at 25°C and at 70% relative humidity. Using three band fluorescent lamps (5000 K) as the main lighting source, the PPFD (400–700 nm) was kept at $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, and each additional PFD (700–800 nm) of far-red (FR) irradiation in four experiments, using FR fluorescent lamps, was kept at 107.1, 50.1, 25.6, and $9.3 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively.

According to the additional level of FR irradiation, the fresh weight, dry weight, leaf area and stem length of the seedlings were increased. The stem length was extended greatly by additional FR irradiation, and leaf/stem dry weight ratio was also changed. Eight days after the treatment by FR irradiation, the stem length was extended 3.8 times longer in FR, $107.1 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ treatment in comparison with the $9.3 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ treatment, and leaf/stem dry weight ratio was 5.8 to 2.7.

It was found that stem extension and leaf/stem dry weight ratio could be controlled artificially by the level of the additional FR irradiation. As a result, it indicates that the evaluation of FR irradiation may be useful in designing the lighting conditions of plant factories or in atria.

(Received December 14, 1990)

1990年12月14日受付

緒 言

近年、植物工場や屋内アトリウムなどにおいて、HIDランプや蛍光灯を用い、人工光源下で植物生育を行う機会が増加している。人工光源下では、特定の波長域を付加するなど、分光分布の制御が比較的容易である。分光分布の制御により光形態形成、たとえば植物の伸長が制御できれば、植物工場などにおいて、花の茎を長く伸長させたり、矮化させた植物に多くの果実を実らせるといった、自然光下と異なった形態の植物を生産できる

可能性がある。

遠赤色光が植物の成長や、形態形成に影響を与えるとの研究は多くある。それらの研究には、植物群落や水中の透過光の、植物の生態的挙動への影響の評価検討を目的として行われたもの¹⁻⁶⁾や、各種光源の植物生育に対する比較検討が行われたもの⁷⁻⁹⁾がある。報告は多くの植物種にわたっているが、R(赤色光)/FR(遠赤色光)の比率を低下させる、すなわち遠赤色光を相対的に多くした場合、茎または節間の著しい伸長^{1-3,5-8)}、あるいは茎乾物重の増加が見られる例^{3,6,8)}が多い。逆に、茎乾物重の減少した例もある³⁾。また、葉面積の増加^{3,4,9)}、葉

の乾物重の増加^{3,6)}が見られる例もあり、逆に葉面積の減少^{6,9)}、葉の乾物重の減少^{3,6)}がみられるとの報告もある。

これらの結果から推測すると、遠赤色光は植物の形態形成、とくに茎の伸長促進に重要な波長域であり、その人工光源下での植物成長制御への応用が可能であると考えられる。

一方、近年、蛍光ランプの発光効率は著しく増加した。洞口の計算 (1989)¹⁰⁾によれば、3波長域発光形蛍光ランプのランプ入力当りの光合成有効光量子束比は、高圧ナトリウムランプ、低圧ナトリウムランプには及ばないが、メタルハライドランプ (蛍光形) とほぼ同等である。また、2本のランプバルブをブリッジで接続した構造を持つ、ツインタイプの3波長域発光形蛍光ランプ (55 W)¹⁰⁾は、長さおよび装着必要面積は従来の3波長域発光形蛍光ランプ (20 W) と同じであるが、約2.2倍の光合成有効光量子束を有している。

このように、コンパクトで高出力の蛍光ランプが開発されたので、植物生育に必要な PPFD を確保しながら、遠赤色光を付加する光環境が、蛍光ランプによって人工光源下で実現できるようになった。

そこで、本研究では、植物工場などの光環境下での、遠赤色光の調節による植物の成長制御の実用化に関する基礎的検討を目的として、3波長域発光形蛍光ランプに、遠赤色蛍光ランプを付加した光環境を作成し、ヒマワリ幼植物を水耕栽培する実験を行った。

材料および方法

育苗および実験は、すべて気温 25°C、相対湿度 70% に制御されたウオークインタイプのグロースキャビネットで行った。

1. 植物材料

ヒマワリ (*Helianthus annuus* L. cv. Russian Mammoth) の種子 (1988 年産) を国立環境研究所、藤沼康実氏より提供を受けた。この種子は7年間継続して隔離栽培された植物から採取され、遺伝的な均一性が確保されている。24時間水道水に水浸し、発芽させた種子を、上面 3.6×3.6 cm、高さ 4 cm の穴開きロックウール培地 (Grodan 社製、AO 36/40 6/15 形) に播種し水道水を灌水した。播種4日目から市販培養液 (大塚ハウス1号、2号標準濃度、1000 l 当り窒素総量 260 g, P₂O₅ 120 g, K₂O 360 g, CaO 230 g, MgO 75 g, MnO 1.5 g, Fe 2.7 g, B₂O₅ 1.5 g, pH 約 6.5) で水耕栽培した。

育苗期間中の光源は3波長域発光形蛍光ランプ (55 W) (松下電器産業 (株) 製 FPL55SSEX-N, 5000K)¹⁰⁾ を

用いた。PPFD はライトメーター (Li-cor 社, LI-185) に光量子センサー (同, LI-190S) を取り付け測定し、ロックウール上面で 300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、24時間連続照射とした。

子葉が十分に展開し、第3葉、第4葉が展開しつつある播種8日目の均一な幼植物を供試植物として選択した。

2. 栽培光源

蛍光ランプ 20 W 形および 55 W 形を任意に混在させて13本まで点灯できる照明ユニットを4台製作し、グロースキャビネット内に設置した。

3波長域発光形蛍光ランプ (55 W) (前述) を主光源として4本装着し、付加光源として遠赤色蛍光ランプ (試作品 20 W) を9本 (A)、5本 (B) および1本 (C) 付加した処理区、主光源のみの処理区 (D) を設定した。遠赤色蛍光ランプを設置しないランプ装着場所には、20 W の蛍光ランプを黒色画用紙で覆い、さらに遠赤色蛍光ランプと同色の赤色チューブをかけたランプを装着し、処理区間の温度均一性が確保されるように配慮した。ランプはいずれも24時間点灯とした。

各処理区の 350 nm から 800 nm の、相対的光量子束の波長分布をマルチチャンネル分光測定システム (測光部: 大塚電子 MCPD-100, 解析部: 松下電器産業 Panasonic M353) を用いて測定した。また、このマルチチャンネル分光システムは PPFD 絶対値の測定ができない機器であるので、各処理区の PPFD は、実験開始時にライトメーターおよび光量子センサー (前述) で測定し、実験初期の植物体の位置で 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ とした。

3. 栽培装置

照明ユニットの下に、水耕バットを設置し、幼植物を育苗区から、ロックウールに取り付けたまま、培養液上に浮かせた発泡スチロールに移植した。約 12 cm 間隔で各処理区当り15個体を生育させた。処理区での植物は実験期間を通じ大塚ハウス1号、2号標準濃度培養液 (前述) を12 l 用いた水耕法により栽培した。6日目に3 l を補給し7日目に全量を交換した。根圏にはエアープンプにより空気を供給した。

4. 測定および統計処理

実験開始日に供試植物から10個体を、3日後、6日後、8日後に、各処理区の相対的に等しい位置から5個体ずつをサンプリングした。すべての試料は、地上部生体重、植物高、茎直径、葉数、葉面積を計測した。その後通風型乾燥器に入れ、80°C で48時間以上乾燥させ、地上部乾物重、茎乾物重、葉乾物重を測定した。また、

8日目のサンプリング時にはこれに加え、胚軸長、第1節間長、第2節間長を測定した。データは各処理区で分散分析により、解析した。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、マルチチャンネル分光システムの出力による350 nmから800 nmの、各処理区の光量子束の波長分布を相対的に示したものであり、最大強度の波長における値を一致させて示している。660 nm以上が遠赤色光の多い処理区で増加している。ただし、PPFDについては、ライトメーターで測定し、各処理区を $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ に一致させている(Table 1)。660~700 nmの光量子束については、ライトメーターの特性から感度が低下し、その各処理区の光量子束の差が把握から漏れていることが考えられるが、光量子束の波長分布から計算すると、その処理区Dに対する差は、最も多くても処理区A/B/Cで各4.6, 1.0, 0.1%程度であり、本実験では無視できるであろう。実際には、ライトメーターで測定してPPFDに差がないように照明ユニット高さを微小に調整しているため、差は上に示した数値よりさらに少なくなる。

また、Table 1には、相対的光量子束の波長分布から

求めた、 $660 \pm 5 \text{ nm} / 730 \pm 5 \text{ nm}$ 、 $600 \sim 700 \text{ nm} / 700 \sim 800 \text{ nm}$ 、 $400 \sim 700 \text{ nm} / 700 \sim 800 \text{ nm}$ の各光量子束密度の比率および、「PPFD $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 」と「比率 $400 \sim 700 \text{ nm} / 700 \sim 800 \text{ nm}$ 」との積を、 $700 \sim 800 \text{ nm}$ の光量子束密度の計算値として示した。

Table 2に生体重、葉乾物重、茎乾物重、地上部乾物重、葉/茎の乾物重の比率(全サンプル植物の総計)を示す。処理開始3日目の測定では、遠赤色光を多く付加した処理区A, Bでは、処理区C, Dに比べて、地上部生体重、茎乾物重が有意に増加し、6, 8日目には処理区間の差は拡大した。葉の乾物重は3日目では処理区間に有意差はなかったが、6日目、8日目で処理区A, Bで増加した。

Fig. 2には、3, 6, 8日目の全サンプルの各植物体の葉乾物重/茎乾物重の相関を示した。各処理区別の回帰直線はいずれも相関係数0.95以上の高い相関を示した。遠赤色蛍光ランプの付加にともなって回帰直線は傾きが増加し、植物体の茎の比率が増していることを示している。

Table 3には、形態的特徴の変化を示す。葉数は遠赤色蛍光ランプ付加により6日目以降で若干増加する傾向がある。茎の直径も増加傾向が見受けられた。葉面積は、処理区A, Bで処理開始6日目以降、有意な増加が

Fig. 1 Spectral distributions of each lighting conditions.
Treatment: A, —; B, ----; C,; D, ———.

Table 1 Photon flux density and ratio of the wavelength regions in each treatment.

Treatment	Additional far-red lamps	Photon flux density ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)		Photon flux density ratio		
		400~700 nm	700~800 nm	$660 \pm 5 \text{ nm} / 730 \pm 5 \text{ nm}$	$600 \sim 700 \text{ nm} / 700 \sim 800 \text{ nm}$	$400 \sim 700 \text{ nm} / 700 \sim 800 \text{ nm}$
A	9	200	107.1	0.17	0.63	1.87
B	5	200	50.1	0.36	1.28	3.99
C	1	200	25.6	0.83	2.48	7.81
D	0	200	9.3	14.76	6.78	21.62

Table 2 Changes of growth characteristics of sunflower by additional far-red irradiation.

Days after planting	Treatment	Fresh weight (g)	Dry weight (g)			
			Leaf	Stem	Top	Leaf/Stem
0	—	1.2	0.1	0.02	0.1	—
3	A	3.6a	0.2a	0.05a	0.3a	4.8
3	B	3.7a	0.3a	0.04b	0.3a	6.8
3	C	2.6b	0.2a	0.03c	0.2b	7.3
3	D	2.9b	0.2a	0.03c	0.3ab	7.7
6	A	9.5a	0.7a	0.20a	0.9a	3.3
6	B	9.1a	0.7a	0.17a	0.9a	4.0
6	C	6.4b	0.5b	0.09b	0.6b	5.7
6	D	6.0b	0.5b	0.08b	0.6b	6.4
8	A	16.7a	1.3a	0.46a	1.7a	2.7
8	B	14.3b	1.2a	0.32b	1.5b	3.7
8	C	10.4c	0.8b	0.16c	1.0c	5.3
8	D	8.8c	0.8b	0.14c	0.9c	5.8

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

Fig. 2 The relationship between leaf dry weight and stem dry weight.
Treatment: A, ○; B, *; C, ×; D, +.

Table 3 Changes of morphological parameters of sunflower by additional far-red irradiation.

Days after planting	Treatment	Leaf number	Leaf area (cm ²)	Plant diameter (cm)	Stem length (cm)
0	—	4.0	17.6	0.25	2.4
3	A	6.8a	68.8ab	0.34a	6.2a
3	B	6.6a	79.4a	0.34a	5.4a
3	C	6.0a	57.9b	0.30a	3.3b
3	D	6.2a	61.4b	0.32a	3.1b
6	A	9.6a	191.0a	0.51a	13.7a
6	B	9.6a	196.0a	0.47ab	12.1a
6	C	8.2b	135.1b	0.46ab	5.5b
6	D	8.8ab	129.9b	0.42b	5.1b
8	A	12.4ab	314.4a	0.53ab	22.1a
8	B	12.2a	308.3a	0.55a	15.6b
8	C	10.2ab	220.0b	0.54ab	7.1c
8	D	10.8b	199.7b	0.48b	6.0c

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

Fig. 3 Stem elongation of the plants occurred by the treatment for 8 days under four different lighting conditions.
 □ Hypocotyl length; ▨ First internode; ▤ Second internode.

Fig. 4 Effects of additional far-red irradiation on sunflower plants at 6 days after the treatment.
 Treatment A, B, C, D.

みられた。

最も端的な変化がみられたのは、茎長である。茎長は、遠赤色蛍光ランプの付加に従って、3日目には処理区 A, B で有意に増加した。処理日数が進むにつれて、差は拡大した。処理区 A では、8 日目には処理区 D の 3.6 倍以上に伸長した。処理区 B では処理区 D の 2.6 倍になった。処理区 C では、平均値はやや増加したが、処理区 D に対する 5% 水準での有意差はなかった。

Fig. 3 には、茎の伸長状態を示すために、処理開始 8 日目における各処理区の胚軸長、第 1 節間長、第 2 節間長、茎長、植物高を積層してグラフに示した。黒塗りつぶしの先端が茎長を示し、棒グラフの先端は植物高を示す。第 1、第 2 節間長、茎長、植物高ともに処理区 A、

B は大きく増加した。

Fig. 4 に、処理開始 6 日目の各処理区の代表的植物体の状態を示す。

考 察

Morgan and Smith¹⁾ は、アカザの伸長について、R/FR の比率を変えた処理区での実験を行った。蛍光ランプにフィルターを通した白熱ランプからの光を付加して R/FR の比率を低くしたところ、茎の伸長速度が増加した。その伸長速度の対数は、フィトクロム光平衡 ϕ 計算値と直線的に相関関係があるとした。

Smith and Holmes¹⁴⁾ は、660 nm/730 nm を中心とする 10 nm 幅の比率を ξ とし、フィトクロム光平衡 $P_{fr}/P_{total} = \phi$ との相関の検討を行った。 ξ が 2 以上では、フィトクロム光平衡 ϕ はほんのわずかに増加変化するだけであるが、 ξ が 2 を下回ると急激に光平衡が変化し、 ϕ が減少するとした。このフィトクロム光平衡の変化が、伸長効果を引き起こすのではないかと推定した。この例にならい、660 nm, 730 nm を中心とする 10 nm 幅の光量子比率 ξ を用いて、本研究でのヒマワリの実験結果を検討すると、Table 1 に示すように ξ が 1 付近である処理区 C で多少の効果が表れ、 ξ が 1 を下回るにつれて極端に伸長するといえる。

藤沼ら⁷⁾ は、ヒマワリを陽光ランプ、BOC ランプ、蛍光ランプ（白色）の 3 種類の光源で PPFD を一定として生育させた場合、乾物重、葉面積は有意に変化しない一方、草丈は陽光ランプ > BOC ランプ > 蛍光ランプの順に変化し、節間長、茎長比、葉面積比も同様に变化することを示した。藤沼らは、茎の伸長の差異についての原因は 700 nm 以上の光放射の存在ではないかと示唆している。彼らの結果から推定すると、蛍光ランプの場合 600~700 nm/700~800 nm の比率は 6.7 程度で、陽光ランプの場合には 1.2 程度であった。600~700 nm/700~800 nm の比率が 6.7, 1.2 という処理は、Table 1 に示すように本研究での処理区 D, B に近い。この程度の 600~700 nm/700~800 nm の比率の変化が、茎長に大きな変化を生じさせるという結論は、本研究と一致する。

しかし、乾物重については、藤沼らの実験では差異が認められなかったが、本研究では差異があった。この違いは、彼らは植物体の先端で PPFD を一致させているが、本研究では植物体の初期の位置で PPFD を一致させたことが原因と推定される。すなわち、本研究の場合は、生育の後期に遠赤色光の多い処理区では、茎長の増加による光源への接近により、植物体の受光量も増大し、光合成が増加し、乾物重の増加をもたらしたと考え

られる。PPFDを一致させ遠赤色光を増加させた本実験の処理区間での、単位葉面積当りの光合成がどう変化したかについては、本研究でのデータからでは明らかではないが、実用的には総合的に光合成量が増加することは望ましいことである。

Inada and Yabumoto⁹⁾は、赤色/遠赤色光の比率が異なるランプについて、生育が変化することを確認した。彼らの実験でも、用いたランプの種類が異なり、PPFDは同一ではあるが分光分布が異なっている。用いた高圧ナトリウムランプのR/FRの比率は、600~700 nm/700~800 nmの比率で、6.11および1.28であった。6.11にくらべ1.28は葉長、葉面積、生体重、乾物重が増加した。この傾向は本研究の結果と一致した。一方、メタルハイドランプのR/FR比率は、1.91と1.14であったがFRの少ない1.91のほうが生育が増加するという傾向がみられた。この原因はR/FRの比率があまり変わっていないこと、PPFD範囲の分光分布が異なっているため、遠赤色光以外の分光分布の影響ではないかと考えられる。

村上¹²⁾は、20 Wの3波長域発光形蛍光ランプに、本論文の実験で用いた遠赤色蛍光ランプを付加する実験を行い、レタスの乾物重が増加し、葉面積も増加することを認めた。この実験では赤色光/遠赤色光の比率の検討は行われていなかったが、この処理区を著者らによって再検討を行い、類似の処理区を作成し測定を行った結果、660 nm $\pm$ 5 nm/730 nm $\pm$ 5 nmの比率は、最も遠赤色蛍光ランプを多く付加した（3波長域発光形ランプ10本+遠赤色蛍光ランプ3本）処理区で、約1.3と推定できた、この増加も、Smith and Holmes¹¹⁾に示されるフィトクロム光平衡曲線による ϕ の変化の開始と同じ傾向であった。

しかしながら、3波長域発光形蛍光ランプを主光源として用い、トマトを用いて行った例については、上のレタスと同様の光環境でも、植物体には有意な変化がみられなかった（データ未発表）。このように植物によっては反応に差異がある。Morgan and Smith²⁾は、各種の雑草についての660 nm/730 nmの比率を変化させ、フィトクロム光平衡と植物の伸長についての検討を行った。彼らは多くの雑草に伸長効果を認めたが、一方、少数であるが効果のないものあるいは逆の効果があるものも見られるという結果を出している。

以上のSmithら^{1,2,11)}の結果などから推定すると、ヒマワリの場合、遠赤色蛍光ランプを3波長域発光形蛍光ランプに付加することにより、フィトクロム光平衡が変化し、茎、葉脈などの伸長速度が増大し、その結果、茎

長、節間長、葉面積、茎径が増加したと考えられる。

さらに、遠赤色光照射強度の増大により茎長、節間や葉脈の伸長が発生し、茎長の増加による植物の光源への接近、節間の増加による葉の遮蔽の減少、葉面積の増大などの要因が発生するが、いずれも受光量の増加をもたらし、すべてが光合成量を上昇させ、生体重、乾物量の増加をもたらしたと考えられる。

以上の結果は、遠赤色光の、赤色光あるいは可視光に対する割合が、植物生育に関する重要な要因であることを示唆している。本研究から、草丈や葉の形状などの植物形態および、葉、茎など植物種によって異なる有用部位の成長が、遠赤色光照射の制御により、容易に変化させられる可能性が見いだされた。

今後、光環境の遠赤色光の調節は、植物工場やアトリウムなどでの光環境設計、種苗生産での茎長制御による徒長防止、農業施設での光選択透過性を持つ被覆剤の設計などに活用できるであろう。

本研究の遂行に際し、大阪府立大学農学部環境調節工学研究室、清田信助教授、北宅善昭講師から御懇篤な指導と助言を得た。また、光量子束の波長分布の測定に際しては、松下電器産業(株)照明研究所、大久保和明氏、山中泰彦氏の協力を得た。ここに深く感謝の意を表する。

文 献

- 1) MORGAN, D. C. and H. SMITH. 1976. Linear relationship between phytochrome photoequilibrium and growth in plants under simulated natural radiation. *Nature* **262**: 210-212.
- 2) MORGAN, D. C. and H. SMITH. 1979. A systematic relationship between phytochrome-controlled development and species habitat, for plants grown in simulated natural radiation. *Planta* **145**: 253-258.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) CHOW, W. S., D. J. GOODCHILD, C. MILLER, and J. M. ANDERSON. 1990. The influence of high levels of brief or prolonged supplementary far-red illumination during growth on the photosynthetic characteristics, composition and morphology of *Pisum sativum* chloroplasts. *Plant Cell Environ.* **13**: 135-145.
- 6) RIVARD, P. G. and J. HODDINOTT. 1989. Morphological responses of *Myriophyllum exalbescens* Fern. to different red: far-red light ratios. *Biotronics* **18**: 9-14.
- 7) 藤沼康実・町田 孝・相賀一郎. 1984. ファイトロンにおける実験植物. 国立公害研究所研究報告第64号: 312-

- 336.
- 8) KNIGHT, S. L. and C. A. MITCHELL. 1988. Growth and yield characteristics of 'Waldmann's green' leaf lettuce under different photon fluxes from metal halide or incandescent+fluorescent radiation. *Scientia Hortic.* **35**: 51-61.
 - 9) 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.
 - 10) 洞口公俊. 1989. 植物生育と光放射. 電気設備学会誌 **9**: 118-126.
 - 11) SMITH, H. and M. G. HOLMES. 1977. The function of phytochrome in plants growing in the natural environment-III. Measurement and calculation of phytochrome photoequilibria. *Photochem. Photobiol.* **25**: 547-550.
 - 12) 村上克介・清田 信・北宅善昭・洞口公俊・森田政明・相賀一郎. 1988. レタスの人工光栽培における遠赤色光効果. 日本生物環境調節学会講演要旨集 **26**. 32-33.