4 波長域発光形蛍光ランプがヒマワリ実生の気孔特性、蒸散速度、光合成速度におよぼす影響

南 俊 毅¹・村上 克 介・成 日 慶
洞 口 公 俊*・相 賀 一 郎²

大阪府立大学農学部・* 松下電器産業株式会社照明研究所・¹ 現住所：堺市経済局農政部・² 現住所：福岡女子短期大学

Effects of the 4-Band Fluorescent Lamp on the Stomatal Features, Transpiration Rate and Photosynthetic Rate of Sunflower Seedlings

Toshiki MINAMI,¹ Katsusuke MURAKAMI, Ilkyung SUNG,
Kimitoshi HORAGUCHI* and Ichiro AIGA²

College of Agriculture, Osaka Prefecture University, Sakai 593, Japan

** Lighting Research Laboratory, Matsushita Electric Industrial Co., Ltd., Kyoto 619-02, Japan*

¹ Agricultural Administration Department, Economic Affairs Bureau, Sakai City Government, Sakai 590, Japan

² Fukuoka Women's Junior College, Fukuoka 818-01, Japan

Sunflower seedlings (*Helianthus annuus* L. cv. Russian Mammoth) were grown under two different lamps of a 4-band fluorescent lamp with a red/far-red photon flux ratio (R/FR) of 1.10 and a 3-band fluorescent lamp with a R/FR of 12.5. Photosynthetic photon flux density (PPFD) was kept at $160 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ in both treatments. The stomatal density and stomatal aperture were measured with a microscope after 6 days of treatment. After 7 days of treatment, the stomatal conductance was measured with a porometer. Then the transpiration rate and photosynthetic rate were also measured under a metalhalide lamp, when PPFD was kept at $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Compared with the 3-band fluorescent lamp, the plants grown under the 4-band fluorescent lamp increased in top fresh weight, top dry weight and shoot length for the sunflower. The stomatal density and stomatal aperture increased for plants grown under the 4-band fluorescent lamp. The stomatal conductance, transpiration rate and photosynthetic rate of the plants grown under the 4-band fluorescent lamp were greater than under the 3-band. In this study, we found that FR radiation affected the features of the stomata, and as a result, increased the transpiration rate and photosynthetic rate.

(Received January 16, 1996)

1996 年 1 月 16 日受付

はじめに

著者らは、現在市販されている蛍光ランプのなかで光合成有効光量子束 (PPF) 発光効率が最も高い 3 波長域発光形蛍光ランプに使用されている蛍光体と遠赤色光 (FR) 発光蛍光体を組み合わせ、赤色光量子束/遠赤色光量子束 (R/FR) 比を調節した 3 種類の 4 波長域発光形植物栽培用蛍光ランプを試作した (洞口ら、

1992)。また、このランプがヒマワリ実生の伸長成長の制御やレタスの成育の促進に有効であることを示した。

FR が相対的に多い光環境下での成育促進の原因として、著者らは、茎、葉脈などの伸長速度の増大、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などを示唆した (村上ら, 1991)。FR が相対的に多い光環境下での成育促進は著しく (村上ら, 1992)、うえに記した要因以外にも、植物の特性に

何らかの変化が生じているとも考えられる。Assmann (1992) はツユクサを PPFD の低い光環境下で栽培し、R/FR 比の差異によって気孔開度、気孔密度は変化しないが、気孔コンダクタンスが増加し、青色光パルスの照射による気孔コンダクタンスの変化が促進されると報告している。この例に比較して著者らの実験で用いた光強度は植物栽培を目的としたためはるかに高く(村上ら, 1991), FR の気孔特性への影響に関する検討を行う必要があると考えられた。

そこで、今回、4 波長域発光形蛍光ランプおよび 3 波長域発光形蛍光ランプを光源とした光環境下でヒマワリ実生の栽培実験を行い、これらのランプの種別の違いが植物の気孔特性、気孔コンダクタンス、蒸散速度、光合成速度におよぼす影響について比較検討した。

材料および方法

栽培実験は気温 25°C、相対湿度 60% に制御したグロースキャビネット内に設けた二つの処理区で行った。

光源として用いたランプは、4 波長域発光形試作蛍光ランプ (20 W, 6500 K, DUV = -10, R/FR 比 = 1.10, R/B 比 = 1.04) および 3 波長域発光形蛍光ランプ(松下電器産業製, FLR20S・EX-N/M, 20 W, 5000 K, DUV = 0, R/FR 比 = 12.5, R/B 比 = 1.11)である。この 2 種類のランプを、それぞれ 13 本まで点灯できる照明ユニット 2 台に 4 波長域発光形試作蛍光ランプは 13 本、3 波長域発光形蛍光ランプは 8 本取り付け、高さを調節することによって植物の栽培初期の位置で PPFD を $160 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ に調節し、実験処理区の光源とした。Fig. 1 に各処理区の分光特性を示す。照明は連続

Fig. 1 Spectral distributions of the 4-band fluorescent lamp and 3-band fluorescent lamp.

照射とした。

植物材料としてヒマワリ (*Helianthus annuus* L. cv. Russian Mammoth) を用い、3 波長域発光形蛍光ランプ (55W), PPFD $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 連続照射の下で、ロックウール培地 (Grodan 社, Multiblock AO 36/40 hole 10/10) を用いて種子から育苗した。播種 9 日目に均一な幼植物を選択し、ロックウールに付けたまま各処理区にそれぞれ 15 個体を移植して実験処理を開始した。培養液は大塚ハウス 1 号, 2 号, 標準濃度液 (1000 L あたり窒素総量 260 g, P_2O_5 120 g, K_2O 360 g, CaO 230 g, MgO 75 g, MnO 1.5 g, Fe 2.7 g, B_2O_5 1.5 g, pH 約 6.5) を用いた。処理開始 7 日目に成育調査 (地上部生体重, 地上部乾物重, 植物高, 葉数, 葉面積) を行った。

気孔分布と気孔の形態を測定するため、処理開始 6 日目に展開開始葉から下へ 2 番目の本葉を各処理区から 4 か所選択した。透明のマニキュアの光沢剤を葉の裏面に薄く数回塗り、乾燥後ピンセットで剥がし、プレパラートにのせ水で封入し、顕微鏡 (OLYMPUS 製, BH-2) (40×10 倍) を用いて気孔開度および気孔密度を観察した。気孔開度は、各処理区からランダムに 20 個の気孔を選択し、接眼マイクロメータ (10 mm 等分十字目盛) を備えた接眼レンズ (Nikon 社, ハイアイポイント広視野 CFWN 10×) を用いて、それぞれ開孔縦径と開孔横径を測定し、対物マイクロメータに対比させて実寸法を算出した。また、気孔密度も各処理区からランダムに 20 か所の気孔数を接眼マイクロメータ (方眼 1 目 1 mm 10 mm×10 mm) を備えた接眼レンズ (Nikon 社, ハイアイポイント広視野 CFWN 10×) を用いて測定し、同様にして単位面積あたりの気孔密度を算出した。

気孔コンダクタンスを測定するため、処理開始 7 日目に各処理区から均一な植物を 4 個体選択し、展開開始葉から下へ 2 番目の本葉を 1 個体につき各 2 か所ポロメータ (LI-COR 社, LI-1600) を用いて測定した。測定は処理区内に置いたまま PPFD が $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の地点で行った。そのとき葉温は 24°C で両処理区とも差異はなかった。

蒸散量を測定するため、処理開始 7 日目に各処理区から均一な植物を 3 個体選択し、重量法を用いて蒸散量を測定した。各処理区の植物体 3 個体を 1 時間ごとに電子天秤を用いて各 3 回測定した。ロックウールからの蒸発を防ぐため、植物体以外はすべてビニール袋で覆った。実験は気温 25°C、相対湿度 60% に制御した

グロースキャビネット内で行い、実験処理区の PPFD は、栽培条件と同様な $160 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった。そして、各単位面積あたりの蒸散量を算出し、平均値をとった。

光合成速度の測定は、植物体を処理開始 7 日目に処理区から閉鎖型チャンバー（容積約 187 L）に移動して行った。チャンバー内は、気温 25°C 、相対湿度 60% に設定した。チャンバーの換気回数は、 CO_2 をトレーサガスとした場合、およそ 0.043 回/h であり、実験期間を通してほぼ一定であった。チャンバーには、環境条件（ CO_2 濃度、相対湿度、気温）を監視するため、赤外線 CO_2 分析計（富士電機製）、湿度センサー（TDK 製、CHS-UPS）および熱電対温度計を取り付け、温度、湿度および CO_2 濃度のデータを 1 分ごとに AD コンバータ（ESD 製、Green kit 88）を経由させてコン

ピュータ（NEC 製、PC-9801）に取り込んだ。本チャンバーは、 CO_2 濃度を制御するために、ON・OFF 制御により CO_2 濃度下限の設定値以下になると電磁弁が開き、 CO_2 が添加され、上限の設定値以上になると電磁弁が閉じる設計であり、本実験の場合、 CO_2 濃度を 300~350 ppm に設定した。また、湿度は、塩化カルシウムによって制御した。光合成速度を測定するため、処理開始 7 日目に各処理区から均一な植物を 3 個体選択し、1 個体ずつ閉鎖型のチャンバーに入れ、メタルハライドランプ（東芝製、YOKO、400W、D400）からの光を水フィルターを通して照射し、植物体の最上部を $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ になるように高さを調節し、光合成速度を測定した。測定後、各個体の葉面積を測定し、葉面積あたりの光合成速度を算出し、3 個体の平均値を求めた。

Table 1 Growth characteristics of sunflowers at 7 days of treatment.

Treatment	Top fresh weight (g)	Top dry weight (g)	Shoot length (g)	Leaf number	Leaf area (cm^2)
3-Band fluorescent lamp*	13.1 ± 0.66 b	1.22 ± 0.14 b	13.8 ± 0.99 b	11.3 ± 0.58 a	329 ± 17.3 a
4-Band fluorescent lamp**	18.3 ± 2.32 a	1.54 ± 0.13 a	30.6 ± 0.25 a	9.70 ± 0.58 b	327 ± 36.8 a

Values after $\pm$ mean standard deviations. * R/FR=12.5, color temperature 5000 K. ** R/FR=1.10, color temperature 6500 K. Different letter means separation within columns by Duncan's multiple range test, $p=5\%$.

Table 2 Features of stomata on sunflowers at 6 days of treatment.

Treatment	Stomatal density (number/ cm^2)	Length of aperture (A) (μm)	Width of aperture (B) (μm)	$A \times B$ (μm^2)
3-Band fluorescent lamp*	4060 ± 373 b	22.4 ± 2.53 a	7.13 ± 1.11 b	160 ± 35.6 b
4-Band fluorescent lamp**	5580 ± 440 a	23.4 ± 2.25 a	9.56 ± 0.77 a	223 ± 26.2 a

Values after $\pm$ mean standard deviations. * R/FR=12.5, color temperature 5000 K. ** R/FR=1.10, color temperature 6500 K. Different letter means separation within columns by Duncan's multiple range test, $p=5\%$.

Fig. 2 Photograph of stomata on the sunflower grown under 4-band fluorescent lamp (left) and 3-band fluorescent lamp (right). Length of the scale is $100 \mu\text{m}$.

Table 3 Stomatal conductance, transpiration rate, photosynthetic rate of sunflowers at 7 days of treatment.

Treatment	Stomatal conductance (cm s^{-1})	Transpiration rate ($\text{g h}^{-1} \text{dm}^{-2}$)	Photosynthetic rate ($\text{mg CO}_2 \text{h}^{-1} \text{dm}^{-2}$)
3-Band fluorescent lamp*	$1.15 \pm 0.13 \text{ b}$	$1.32 \pm 0.13 \text{ b}$	$21.5 \pm 1.16 \text{ b}$
4-Band fluorescent lamp**	$1.44 \pm 0.09 \text{ a}$	$1.68 \pm 0.13 \text{ a}$	$25.3 \pm 0.47 \text{ a}$

Values after $\pm$ mean standard deviations. * R/FR=12.5, color temperature 5000 K. ** R/FR=1.10, color temperature 6500 K. Different letter means separation within columns by Duncan's multiple range test, $p=5\%$.

結果および考察

成育調査結果を Table 1 に示す。4 波長域発光形蛍光ランプで成育させた植物体が 3 波長域発光形蛍光ランプで成育させた植物体と比較して、とくに茎の伸長成長が著しく増加し、地上部生体重量および地上部乾物重も増加した。しかし、葉数は 3 波長域発光形蛍光ランプで成育させた植物体が多くなる傾向があったが、葉面積は差異がなかった。

気孔特性の測定結果を Table 2 に示す。単位面積あたりの気孔の数は 4 波長域発光形蛍光ランプで成育させた植物体は、3 波長域発光形蛍光ランプの 1.37 倍となった。開孔縦径 (A) は、両処理区ともほとんど差異はないが、開孔横径 (B) は、4 波長域発光形蛍光ランプで成育させた植物体が 3 波長域発光形蛍光ランプで成育させた植物体の 1.34 倍となった。したがって、開孔面積 ($A \times B$) は 4 波長域発光形蛍光ランプで成育させた植物体が大きかった (Fig. 2)。Table 3 に示すように、気孔コンダクタンス、蒸散速度および光合成速度も、4 波長域発光形蛍光ランプで成育させた植物体が 3 波長域発光形蛍光ランプで成育させた植物体と比較して、それぞれ 1.25 倍、1.27 倍、1.18 倍と大きくなった。この結果は、気孔密度および気孔開度の増加によるものと考えられる。

今回の結果から、FR の相対的に多く、R/FR 比の低い分光特性をもつ 4 波長域発光形蛍光ランプの処理区において、気孔密度が増加し、気孔開度も大きくなることが認められた。その結果、気孔を通じて行われるガス交換が盛んになり、蒸散速度および光合成速度が増加し、植物の成育に影響をおよぼしたと考えられる。

R/B 比については、4 波長域発光形蛍光ランプが 1.04、3 波長域発光形蛍光ランプが 1.11 であり、差は少ない。また、Inada and Yabumoto (1989) から推測すると R/B 比の高い 3 波長域発光形蛍光ランプが成長がよくなる可能性が高い。しかし、本研究では 4 波長域発光形蛍光ランプのほうが成長が促進された。よって気孔特性などについても R/B 比の影響よりは R/FR 比の影響と考える方が妥当である。

なお、今回の実験では、PPFD を栽培初期の位置で一致させたため、調査した葉について成育時の光強度に差が生じた。今後、FR による茎の伸長差が比較的に少ない他の植物種を用いた調査を行う予定である。

本研究は文部省科学研究費補助金試験研究 (B) (1) (No. 05556046) によって遂行された。ここに関係各位に謝意を表す。

文 献

- Assmann, S. M. 1992. Effects of light quantity and quality during development on the morphology and stomatal physiology of *Commelina communis*. *Oecologia* **92**: 188-195.
- 洞口公俊・村上克介・森田政明・柴田治男・高橋睦夫 1992. 4 波長域発光形植物栽培用蛍光ランプ. *Natl. Tech. Rep.* **38**: 627-634.
- Inada, K., Yabumoto, Y. 1989. Effects of light quality, day-length and periodic temperature variation on the growth of lettuce and radish plants. *Jpn. J. Crop Sci.* **58**: 689-694.
- 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.
- 村上克介・洞口公俊・森田政明・相賀一郎 1992. 遠赤色光 (FR) 付加照射によって生じるレタス生育の促進. *生物環境調節* **30**: 23-28.