植物栽培用人工光源の開発に関する考察

村上克介・洞口公俊・柴田治男*・森田政明・相賀一郎**

松下電器産業株式会社照明研究所・*松下電子工業株式会社照明R&Dセンター・**大阪府立大学農学部

A Discussion on the Development of Artificial Radiant Sources for Plant Growth

Katsusuke MURAKAMI, Kimitoshi HORAGUCHI, Haruo SHIBATA,*
Masaaki MORITA and Ichiro AIGA**

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

**Lighting R & D Center, Matsushita Electronics Corporation, Takatsuki 569, Japan*

***Faculty of Agriculture, University of Osaka Prefecture, Sakai 593, Japan*

1992年6月22日受付

はじめに

多種類の人工光源が、施設園芸において光合成促進のための補光や、日長操作の目的で利用され¹⁻⁴⁾、人工光型ファイトロンでは、光環境条件を作出するために用いられている^{5,6)}。最近では、植物工場や屋内アトリウムなどにおいて、HID（高輝度放電）ランプや蛍光灯を用い、人工光源下で植物を生育させる機会が増加している⁷⁾。

人工光源下では、自然光下と異なり、光放射強度、時間および分光分布を自在に調節できる。この利点を生かし、植物の成長を最適に制御するように光源を利用する技術が開発できる可能性がある。また、植物生育に用いる人工光源の発光効率を高め、電力消費を低減させることも重要である。

人工光源は、一般に人間生活における照明に役立つ目的で開発されており、照明工学の分野では、その評価は主として人間の視覚特性をその基準としている。Fig. 1に示すように、植物の光合成作用スペクトルの平均曲線⁸⁾は、明所視における分光視感効率⁹⁾曲線とまったく異なっており、視覚特性を基準とした評価をそのまま植物に当てはめることは適切とはいえない¹⁰⁾。さらに、植物光形態形成についてもその評価対象に加えることが必要である。

植物栽培に用いる光源の選択基準は、たとえば、低圧ナトリウムランプ、高圧ナトリウムランプは入力電力当りの光束が大きいという理由で、太陽ランプ（メタルハ

ライドランプ）は分光分布が太陽光に類似しているという理由で、また植物用蛍光灯は分光分布が葉緑素合成スペクトルに類似しているという理由¹¹⁾でそれぞれ用いられている。このように、光源の評価基準は統一されていない。著者らは、植物栽培用人工光源について、光合成、光形態形成という二つの観点からの評価法を提案し、光合成有効放射が高く、植物の形態の操作が自在にできる光源を開発することを目標とした。基礎的な計算および栽培実験を経て、4波長域発光形植物栽培用蛍光灯の試作およびその実証実験を行った。本文ではこの一連の経緯およびその周辺の概略について述べる。

計算による人工光源の光合成 および伸長成長に関する評価

植物生育における光環境の評価法として、Bickford and Dunn¹¹⁾は、波長400から700 nmの範囲の光放射が光合成に関与していたとした。McCree⁸⁾は、チャンパー内の作物20種の光合成作用スペクトルの平均曲線が400から700 nmの可視光の範囲で平坦ではなく、青色光で低く赤色光で高いことを示し、さらに、光合成有効放射（PAR）の定義として400~700 nmの光子束密度（単位： $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$ ）を用いると、400~700 nmの放射束密度（放射照度）（単位： $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ）で定義した場合に比較して誤差が19%から8%に大きく減少する¹²⁾ことを見いだした。Inada¹³⁾は26種類の草本作物、7種類の木本植物の光合成作用スペクトルの測定を行い、さらに、8種の作物の光合成の測定結果から、McCreeの結果の検証¹⁴⁾を行った。矢吹・高¹⁵⁾も同様の

Fig. 1 Photosynthetically action spectrum (—) (McCree, 1972)⁸⁾ and spectral luminous efficiency for photopic vision (---) (CIE, 1987)⁹⁾.

光合成作用スペクトルを得ている。これらの結果から、400~700 nm の光量子束密度を光合成有効光量子束密度 (PPFD) とし、PAR の定義とする概念が成立する。

PPFD が光合成の評価法であることを実証する実験として、Tibbitts ら¹⁶⁾は、光源をメタルハライドランプ単独、高圧ナトリウムランプ単独、メタルハライドランプ+タングステンハロゲンランプ、メタルハライドランプ+高圧ナトリウムランプとした4処理区で PPFD を等しくして生育させた場合に、光源が異なっても、乾物量の増加については PPFD で決定されることを示した。村上ら¹⁷⁾は、レタスについて、3 波長域発光形蛍光ランプ、昼光色蛍光ランプ、植物用蛍光ランプを用い、PPFD を同一にして、生育に対する影響を比較したところ、各処理区の生育特性には、顕著な差がみられないことを示した。藤沼ら¹⁸⁾は、ヒマワリを用いた実験を行い、人工光 (陽光ランプ) と太陽光の、それぞれ単独で、あるいは、両方を含めて、PPFD と植物乾物成長の関係について、正の一次式で回帰できることを示した。Warrington and Norton¹⁹⁾の報告には、一日の光量子積分値と乾物量の関係について、日長を一定とした場合には正比例に近い関係がみられる。

これらの実験例から推測すると、とくに偏ったスペクトルを用いた場合^{20,21)}を除くと、PPFD の概念を用いることができると考えられる²²⁾。植物の乾物生産は光合成の結果であり、PPFD と乾物生産量は比例関係がある¹⁸⁾と考えることは理論的に一応の合理性がある。分光エネルギー組成が異なる光源間において、PPFD が一致している場合、乾物生産量には差異がないという考え方である。現在では、PPFD の絶対値についての測定機器は、400~700 nm の光量子感度に近似した応答曲線²³⁾をもつ光合成有効光量子センサー (LI-COR, LI-190S) をライ

Fig. 2 PPF luminous efficacy per input wattage (□) and R/FR photon flux ratio (●) of the artificial lighting sources.

Lw, incandescent lamp; FL-D, day-light fluorescent lamp; FL-EX, three band fluorescent lamp; FL-PG, plant growth fluorescent lamp; HF-X, high pressure mercury vapor lamp (fluorescent type); MF, high pressure metal halide lamp (fluorescent type); NH, high pressure sodium lamp; NX, low pressure sodium lamp.

トメーター (同, LI-185) に装着したものをを用いて測定することが一般に行われ、PPFD による植物生育光環境の評価法が定着してきた。

しかしながら、人工光源の効率は、一般に、全光束/消費電力で表示されている^{2,24)}。そこで、この PPFD の概念を用い、植物栽培用人工光源として現在使用されているランプを含む9種の光源の分光分布を測定し、その分光分布から、計算により、各種人工光源の入力電力当りの光合成有効光量子束 (PPF) 発光効率⁷⁾および伸長成長に関係が深い赤色光 (600~700 nm) 光量子束/遠赤色光 (700~800 nm) 光量子束の比 (R/FR) (詳細は次節に記す) を計算した。

その結果を Fig. 2 に示す。人工光源のなかでは、白熱電球を 100 とした PPF 発光効率で評価した場合に、低圧ナトリウムランプおよび高圧ナトリウムランプが最も大きい数値を示し、ついで3 波長域発光形蛍光ランプが大きい数値を示した。以下メタルハライドランプ (蛍光形) > 昼光色蛍光ランプ > 植物用蛍光ランプ > 水銀ランプ (蛍光形) > 白熱電球の順になった。低圧ナトリウムランプは 589 nm の単波長光源であることから、光形態形成上不具合が生じる場合があり⁷⁾、これを除くと高圧ナトリウムランプ、3 波長域発光形蛍光ランプ、メタルハライドランプが PPF 発光効率が高く、光合成に対して有効な光源である。いっぽう、昼光色蛍光ランプ、

植物用蛍光ランプ、水銀ランプ、白熱電球は前者らに比較すると光合成促進には適当ではない光源である。

また、R/FR はすべての蛍光ランプで高い値を示し、ついで高圧ナトリウムランプ、水銀ランプ、メタルハライドランプ、白熱電球の順となった。低圧ナトリウムランプについては 589 nm の単波長光源であるため、図示していない。

遠赤色光 (FR) 付加照射による植物の成長制御

先に述べたように、光合成に関する光量を 400~700 nm の光量子束密度を用いて評価することが一般に認められつつある。しかし、藤沼らの実験¹⁵⁾では、乾物重が同一であるにもかかわらず、ランプの種類によって草丈、葉面積に大きな変化を生じており、700 nm 以上の放射束の存在影響をかれらは示唆している。

この 700~800 nm 付近の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り、その影響原因はフィトクロム光平衡の Pr, Pfr 形の変化ではないかと推測されている。報告は多くの植物種にわたっているが、R/FR を低下させる、すなわち FR を相対的に多くした場合、茎または節間の著しい伸長^{18,25-31)}、あるいは茎乾物重の増加が見られる例^{26,29,30,32)}が多い。逆に、茎乾物重の減少した例もある²⁶⁾。また、葉面積の増加^{26,33,34)}、葉の乾物重の増加^{26,29)}がみられる例もあり、逆に葉面積の減少^{30,33)}、葉の乾物重の減少^{26,30)}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、FR 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る。

そこで、3 波長域発光形蛍光ランプに、FR 蛍光ランプを付加した光環境を作成し、ヒマワリ³⁵⁾、レタス³⁶⁾、ペニタデ³⁷⁾、トマト³⁷⁾、ゴガツササゲ³⁷⁾、ツルナシインゲンマメ³⁷⁾の幼植物を水耕栽培する実験を行い、FR 付加照射の植物生育に対する影響を検討した。55 W 3 波長域発光形蛍光ランプ 4 本に対し、20 W FR 蛍光ランプの付加本数を 9, 5, 1, 0 本とすることにより、遠赤色光付加強度を変化させた処理区 A, B, C, D を設け、PPFD は全処理区で一定とした。処理区的光環境の分光分布を Fig. 3³⁶⁾に示す。さらにこの内処理区 A と D で 12 日間生育させたペニタデの代表例を Fig. 4 に示す。

これらすべての植物は、FR 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、付加しない場合に比較して茎や節間の伸長促進効果が生じ、生体重、乾物重も FR 付加区で増加することが認められた。さらに、レタスの FR 付加照射による生育促進効果につい

Fig. 3 Relative spectral photon flux of the FR added experiment performed on sunflower, lettuce, smartweed, tomato and kidney bean.

Treatment (A —, B ---, C ----, D, ---).

Fig. 4 Comparison on the development of smartweed (*Polygonum Hydropiper* L.) 12 days after the treatments A and D.

て、ランプ電力と関係づけた考察³⁶⁾を行ったところ、FR 付加照射による生育促進法を用いると、蛍光ランプ下で PPFD を増加させる生育促進法を用いた場合にみられる単位生産生体重量あたりの消費電力の増加がみられず、電力消費的に有利に生育促進が行われることが明らかになった。また、レタスの葉については縦長になる傾向³⁶⁾もみられた。

FR の付加照射による伸長促進効果の原因は、R/FR の変化によりフィトクロム光平衡が変化し^{27,38)}、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、茎径が増加することによって考えられる。Fig. 1 に示すように、FR の光合成への寄与は無視できると考えられるため、乾物重増加の原因は、FR それ自体が植物光合成を促進するのではなく、FR 付加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相互遮蔽の減少、葉面積の増大などが発生し、それらいずれもが植物体の受光量の増加をもたらす、光合成量を上昇させ、生体重、乾物量が増加したものと考えられる³⁵⁾。

以上の結果は、R/FR の変化により植物の光形態形成とくに、伸長成長の制御が行われ、さらに植物体受光面積が増加することによる間接的な光合成促進にも効果があることを示している。この R/FR を用いた FR の評価を、PPF 発光効率に次ぐ植物栽培用光源の第 2 の評価法とすべきであると考えられる。

R/FR に用いる波長帯 (幅) については、研究者により必ずしも一致していない^{33,38-40)}が、フィトクロムの作用スペクトル^{41,42)}の幅が広範囲にあることから、幅は狭い ($660 \pm 5 \text{ nm} / 730 \pm 5 \text{ nm}$) より幅広い ($600 \sim 700 \text{ nm} / 700 \sim 800 \text{ nm}$) ほうが望ましいのではないかと推測され、ヒマワリの茎の伸長との一致関係から、波長帯 (幅) を広くとることが望ましい⁴³⁾という提案もなされている。

4 波長域発光形植物栽培用蛍光ランプの試作

蛍光ランプは取扱いが簡便で低価格であり、赤外放射も少なく近接照明が可能⁴⁴⁾であり、安定器も HID ランプに比較して簡易で低価格である。しかし、昼光色蛍光ランプや植物用蛍光ランプの場合には、高圧ナトリウムランプやメタルハライドランプに比較して PPF 発光効率が低いという問題があり、実用的な植物栽培用光源としては不適當であった。

しかし、ユーロピウム、テルビウムなどを付活剤とする希土類蛍光体を使用し、青 (450 nm)、緑 (540 nm)、赤 (610 nm) の 3 波長、狭帯域の発光を組み合わせた 3 波長域発光形蛍光ランプは、メタルハライドランプをしのぐ PPF 発光効率をもち、照明用としての製造技術も確立された。さらに 2 本、もしくは 4 本の細管バルブをガラスブリッジにより接合したコンパクト形ツインタイプの 3 波長域発光形蛍光ランプが開発され、装着面積当り PPF は従来の 20 W 単管蛍光ランプの 2.2 倍となった³⁵⁾。これらの蛍光ランプの PPF 発光効率および装着面積当り PPF の改善によって、蛍光ランプを用いる植物栽培用光源の開発の可能性が高まった。

いっぽう、先に述べたように 3 波長域発光形蛍光ランプに FR 蛍光ランプを付加することにより、間接的に光合成が促進され、生体重、乾物重、葉面積が増大することが確認された。しかしながら、実用上は単独ランプが必要かつ十分な植物栽培用機能をもつことが望ましい。そこで、1 本の蛍光ランプのなかに、蛍光体のなかで最も高い PPF 発光効率をもつ 3 波長域発光形蛍光体と

Fig. 5 Relative photon flux distribution of trial 4-band fluorescent lamps (A —, B ---, C) and 3-band fluorescent lamps (— · —).

FR 蛍光体を混在させ、R/FR を変化させた 20 W 蛍光ランプ 3 種を試作した。Fig. 5 に試作蛍光ランプ (A, B, C) および 3 波長域発光形蛍光ランプの光量子束の分光分布を示す。

一本のランプに塗布できる蛍光体には限度があるために、FR 蛍光体の組み込み比率を高めると、3 波長域発光形蛍光体を減ずることとなり、PPF 発光効率は低下する。しかしながら、レタスを試作ランプ A ($R/FR = 0.78$, $PPFD = 147 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$) で生育させると、ランプ本数を同一 (13 本) とした 3 波長域発光形蛍光ランプ ($R/FR = 8.68$, $PPFD = 275 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$) で生育させた場合にくらべ、処理開始 17 日目には生体重は 1.7 倍に、葉面積は 2.2 倍になり、先に述べたとおり FR 放射を PAR と共存させることにより、電力消費的に有利に生育が促進されることを確認した⁴⁵⁾。また、ヒマワリを試作ランプ A, B, C および 3 波長域発光形蛍光ランプで生育させた場合を比較すると、Fig. 6 に示すように茎の伸長が制御され茎/葉の乾物重比率を変化さ

Fig. 6 The sunflower seedlings grown under trial lamps (A, B, C) and 3-band fluorescent lamps (D) after 6 days of treatment (lamp bulbs are 13 in all treatments).

せることも実現できた。

Fig. 5 に示したとおり, FR 光量子束を付加するために PAR 範囲の光量子束が大きく減少していることから, FR 蛍光体の光量子束発光効率が 3 波長域発光形蛍光体に比較して低いことがわかる. FR 蛍光体の改善ができれば PPF 発光効率の低下も少なくなろう. また, 今回の試作の関係上 20 W 直管蛍光ランプを用いたが, 最終的には装着面積当り PPF の高いツインタイプのコンパクト蛍光ランプで 4 波長域発光形植物栽培用蛍光ランプの実用化が望まれる.

おわりに

光合成の観点から考えると, 植物栽培用人工光源の第一の評価は電力入力当り PPF 発光効率で行い, その開発目標はこの発光効率の高い光源を開発することが望ましい.

また, 本文で述べた一連の研究により, 光合成への寄与が無視できると考えられる FR の付加照射により, R/FR 光量子束比の値が小さくなり, 伸長成長が制御されることが見いだされた. R/FR を小さくすると植物の茎は伸長し, 逆にその比を大きくすると矮化する. この伸長成長制御により, 茎長, 節間長, 葉長の伸長が生じ, 結果として植物の生体重, 乾物重を増加させることが認められた. また, ヒマワリ各個体の葉, 茎の乾物重の相関を示すグラフの回帰直線の傾きは変化することが認められ³⁵⁾, FR の付加あるいは削除により葉/茎の乾物重比率を, 人工的に制御できる可能性が見いだされた. 植物体のなかで, 茎, あるいは葉など植物種によって異なる有用な部位をとくに成長させる技術にも応用が可能かと思われる. これらの結果は, R/FR が, 植物生育に関する重要な要因であることを示唆しており, この R/FR を植物栽培用光源の第二の評価法とすべきであると提案した.

この第一, 第二の特色をあわせもった, すなわち, PPF 発光効率が高く, R/FR が 0.78, 1.26 および 2.09 である 3 種の蛍光ランプを試作し, 3 波長域発光形蛍光ランプとの比較生育実験を行った結果, 試作ランプが実用に供し得ることを確認した.

FR に関する植物生育, あるいは形態形成に関する研究例のなかには, 明期の終わりに FR を短時間照射する, あるいは付加する実験を行っているものもある^{46~55)}. 明期の終わりの FR 付加は, 明期中連続で FR を付加した場合の 0~35% であったとの報告もある⁵⁵⁾. この点については今後の検討を要する.

文 献

- 1) 堀 裕. 1977. 光環境と野菜の生育 (人工光の利用). 「施設園芸の環境と栽培」(位田徳久太郎編著) 31-39, 誠文堂新光社, 東京.
- 2) 稲田勝美. 1984. 人工光と植物の生育. 「光と植物生育—光選択利用の基礎と応用—」(稲田勝美編著) 236-307, 養賢堂, 東京.
- 3) 古在豊樹. 1980. 光環境 (人工光源の利用). 「温室設計の基礎と実際」(三原義秋編著) 60-63, 養賢堂, 東京.
- 4) TURNBULL, L. V. and M. L. ELLIS. 1987. Effect of incandescent and fluorescent lighting used in photoperiod extension on the vegetative growth and floral development of four lines of pigeonpea. *Field Crops Res.* 17: 25-36.
- 5) AIGA, I., K. OMASA, and S. MATSUMOTO. 1984. Phytotrons in the National Institute for Environmental Studies. *Res. Rep. Natl. Inst. Environ. Stud. Jpn.* 66: 133-155.
- 6) DOWNS, R. J. and H. HELLMERS. 1975. Phytotrons (Controlled environments for plant research). In "Environment and the Experimental Control of Plant Growth" (Ed. by Sutcliffe, J. F. and P. Mahlborg) 132-139, Academic Press, London.
- 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) MCCREE, K. J. 1972. The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agric. Meteorol.* 9: 191-216.
- 9) 国際照明委員会. 1989. 「国際照明用語集第 4 版」4-5, (社)日本照明委員会, 東京.
- 10) MCCREE, K. J. 1971. Significance of enhancement for calculations based on the action spectrum for photosynthesis. *Plant Physiol.* 49: 704-706.
- 11) BICKFORD, E. D. and S. DUNN. 1972. "Lighting for Plant Growth," 46, 145-146, The Kent State Univ. Press, Kent, Ohio.
- 12) MCCREE, K. J. 1972. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. *Agric. Meteorol.* 10: 443-453.
- 13) INADA, K. 1976. Action spectra for photosynthesis in higher plants. *Plant Cell Physiol.* 17: 355-365.
- 14) 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.
- 15) 矢吹萬寿・高 博. 1973. 数種の蔬菜の光合成と光質との関係. 農業気象 29: 17-23.
- 16) TIBBITS, T. W., D. C. MORGAN, and I. J. WARRINGTON. 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.
- 17) 村上克介・清田 信・北宅善昭・洞口公俊・森田政明・相賀一郎. 1989. レタスの人工光栽培における 3 波長域発光形蛍光灯の効果. 日本農業気象学会, 日本生物環境調節学会合同大会講演要旨: 12-13.
- 18) 藤沼康実・町田 孝・相賀一郎. 1984. ファイト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.
- 19) WARRINGTON, I. J. and R. A. NORTON. 1991. An

- evaluation of plant growth and development under various daily quantum integrals. J. Am. Soc. Hortic. Sci. **116**: 544-551.
- 20) MORTENSEN, L. M. and E. STRØMME. 1987. Effects of light quality on some greenhouse crops. Sci. Hortic. **33**: 27-36.
 - 21) WARRINGTON, I. J. and K. J. MITCHELL. 1976. The influence of blue- and red-biased light spectra on the growth and development of plants. Agric. Meteorol. **16**: 247-262.
 - 22) 村上克介・相賀一郎 (分担執筆). 1992. 光バイオのための光放射源. 「光バイオインダストリー」((社)照明学会編) 134-162, オーム社, 東京.
 - 23) 盟和商事(株). Li-Cor 社製品カタログ.
 - 24) THIMIJAN, R. W. and R. D. HEINS. 1983. Photometric, radiometric, and quantum light units of measure: a review of procedures for interconversion. Hortscience **18**: 818-822.
 - 25) 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.
 - 26) 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.
 - 27) MORGAN, D. C. and H. SMITH. 1976. Linear relationship between phytochrome photoequilibrium and growth in plants under simulated natural radiation. Nature **262**: 210-212.
 - 28) 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.
 - 29) 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. Sci. Hortic. **35**: 51-61.
 - 30) RIVARD, P. G. and J. HODDINOTT. 1989. Morphological responses of *Myriophyllum exalbescens* Fern. to different red:far-red light ratios. Biotronics **18**: 9-14.
 - 31) WARRINGTON, I. J., D. A. ROOK, D. C. MORGAN, and H. L. TURNBULL. 1988. The influence of simulated shadelight and daylight on growth, development and photosynthesis of *Pinus radiata*, *Agathis australis* and *Dacrydium cupressinum*. Plant Cell Environ. **11**: 343-356.
 - 32) KAUL, K. and M. J. KASPERBAUER. 1988. Row orientation effects on FR/R light ratio, growth and development of field-grown bush bean. Physiol. Plant. **74**: 415-417.
 - 33) 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.
 - 34) 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.
 - 35) 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.
 - 36) 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.
 - 37) 村上克介. 1992. 蛍光ランプによる植物栽培用光源の開発に関する研究. 大阪府立大学博士学位論文: 45-54.
 - 38) 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.
 - 39) KNIGHT, S. L. and C. A. MITCHELL. 1988. Effects of incandescent radiation on photosynthesis, growth rate and yield of 'Waldmann's Green' leaf lettuce. Sci. Hortic. **35**: 37-49.
 - 40) WARRINGTON, I. J., K. J. MITCHELL, and G. HAL-LIGAN. 1976. Comparisons of plant growth under four different lamp combination and various temperature and irradiance levels. Agric. Meteorol. **16**: 231-245.
 - 41) BUTLER, W. L., S. B. HENDRICKS, and H. W. SIEGELMAN. 1964. Action spectra of phytochrome *in vitro*. Photochem. Photobiol. **3**: 521-528.
 - 42) HARTMANN, K. M. 1966. A general hypothesis to interpret 'high energy phenomena' of photomorphogenesis on the basis of phytochrome. Photochem. Photobiol. **5**: 349-366.
 - 43) 村上克介・洞口公俊・大久保和明・相賀一郎. 1991. 植物生育光放射環境における遠赤色光 (FR) の効果と評価. 平成3年度 (第24回) 照明学会75周年記念大会講演予稿集: 217-218.
 - 44) 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.
 - 45) 村上克介・洞口公俊・柴田治男・森田政明・相賀一郎. 1992. 4波長域発光形植物栽培用蛍光ランプの試作と生育実験. 日本農業気象学会, 日本生物環境調節学会合同大会講演要旨: 142-143.
 - 46) CASAL, J. J. and V. O. SADRAS. 1987. Effects of end-of day red/far-red ratio on growth and orientation of sunflower leaves. Bot. Gaz. **143**: 463-467.
 - 47) ADAMSE, P., P. A. P. M. JASPERS, J. A. BAKKER, R. E. KENDRICK, and M. KOORNNEEF. 1988. Photo-physiology and phytochrome content of long-hypocotyl mutant and wild-type cucumber seedlings. Plant Physiol. **87**: 264-268.
 - 48) APHALO, P. J., D. GIBSON, and A. H. DiBENEDETTO. 1991. Response of growth, photosynthesis, and leaf conductance to white light irradiance and end-of-day red and far-red pulse in *Fuchsia magellanica* Lam. New Phytol. **117**: 461-471.
 - 49) CASAL, J. J. and H. SMITH. 1988. Persistent effects of changes in phytochrome status on internode growth in light-grown mustard: occurrence, kinetics and locus of perception. Planta **175**: 214-220.
 - 50) CASAL, J. J. and H. SMITH. 1988. The loci of perception for phytochrome control of internode growth in light-grown mustard: promotion by low phytochrome photoequilibria in the internode is enhanced by blue

- light perceived by the leaves. *Planta* **176**: 277-282.
- 51) CASAL, J. J. and H. SMITH. 1989. The 'end-of-day' phytochrome control of internode elongation in mustard: kinetics, interaction with the previous fluence rate, and ecological implications. *Plant Cell Environ.* **12**: 511-520.
 - 52) CASAL, J. J., P. J. APHAIO, and R. A. SANCHEZ. 1987. Phytochrome effects on leaf growth and chlorophyll content in *Petunia axilaris*. *Plant Cell Environ.* **10**: 509-514.
 - 53) DIJAK, M. and D. P. ORMROD. 1985. Responses involved in increased dry matter production with supplementary incandescent radiation in growth chambers. *Environ. Exp. Bot.* **25**: 195-201.
 - 54) KORANSKI, D. S., B. E. STRUCKMEYER, G. E. BECK, and B. H. MCCOWN. 1987. Interaction of photoperiod, light intensity, light quality and ancymidol on growth and flowering of *Clerodendrum thomsoniae* Balf. 'Wisconsin.' *Sci. Hortic.* **33**: 147-154.
 - 55) MORGAN, D. C. and H. SMITH. 1978. The relationship between phytochrome photoequilibrium and development in light grown *Chenopodium album* L. *Planta* **142**: 187-193.