蛍光ランプを用いた植物工場の照明設計法に関する研究

池田 彰・谷村泰宏・中山繁樹・岩尾憲三*

三菱電機中央研究所・*中部電力電気利用技術研究所

Study on Lighting Design in Plant Factory Using Fluorescent Lamps

Akira IKEDA, Yasuhiro TANIMURA, Shigeki NAKAYAMA
and Kenzo IWAOKA**Central Laboratory, Mitsubishi Electric Corp., Amagasaki 661, Japan***Electrotechnology Applications R&D Center, Chubu Electric Power Co., Inc.,
Mitsubishi-ku, Nagoya 459, Japan*

We have developed a plane growth chamber equipped with fluorescent lamps to closely illuminate plants, and painted the inside white (0.8 reflectance) to effectively use the reflected light (close illumination method). In this paper, the characteristics of the close illumination method using fluorescent lamps were investigated experimentally and theoretically.

(1) A simulation of the coefficient of utilization (f), which indicates the light utilization efficiency in the growth room, agreed well with the experimental results. When the room shape coefficient became smaller, the value of f increased remarkably. Since the room shape coefficient was proportional to lamp height, close illumination was found to be effective for improvement of f .

(2) In a growth room (2.25 m wide, 5.4 m long) with a set lamp height of 30 cm, f was found to be about 1.7; nearly 3 times higher than the value found by the illumination method using high brightness lamps, such as high pressure sodium lamps. Thus, the light utilization efficiency of the growth room could be greatly improved by the close illumination method using fluorescent lamps.

(3) The light intensity of the horizontal plane at a distance of 0-25 cm above the floor, was uniformly within 20% difference.

(4) In the case of plants present in the growth room, the simulation of the light intensity of the horizontal plane at the highest part of lettuce (index light intensity), predicted well the experimental results. When the entire floor was covered with lettuce, the index light intensity was about 35% lower than the initial value.

(Received August 26, 1991)

1991年8月26日受付

緒 言

人工光型の植物工場（または種苗工場）において、照明の最適化は植物育成に対してのみならず、電力コストに係わる重要課題である¹⁾。人工光源を用いた照明は本来人間を対象としたものであり、視覚および心理的な条件を満足するように設計される。いっぽう、植物栽培における照明では、育成室の照明効率を高め、かつ葉群の受光効率を向上させて光利用効率を高めることが重要である。

筆者らは、このような観点から、光源として葉焼けの原因となる熱線含量が少なく、光環境要因の制御が容易な蛍光ランプを用いて、照明の方向、強度および時間が植物育成に及ぼす影響について調べてきた²⁻⁷⁾。その結果、ランプと床面の距離を数十 cm に近接させ、内面を白色塗装（反射率 0.8）し、反射光を有効に利用した近接照明方式により、レタスなどの葉菜類を省電力で高速栽培できることを明らかにした⁸⁾。

人工光源を用いた照明に関する報告は、鶴岡・高辻らによる立体式植物工場の照明設計法⁹⁾や Ruthner による高効率照明法¹⁰⁾があるが少ない。とくに蛍光ランプを

用いた植物工場の照明設計に関する研究はほとんど見あたらない。

そこで、本報では蛍光ランプを光源とした植物工場または種苗工場における照明設計の基礎資料を得るために、近接照明方式の照明計算法について検討するとともに、成育室の照明率、高さ方向の光強度分布および植物成長に伴う光強度の変化などを調べ、いくつかの新しい知見を得たので報告する。

蛍光ランプによる近接照明特性のシミュレーション

1. 植物が成育室に設置されない場合の照明計算法

照明率 f (成育室の光利用効率を示す係数) は、(1) 式で定義される。なお、植物栽培での光強度単位は一般に光量子密度が用いられるが、同一ランプの場合、光量子密度と照度は一定の比例関係にあることから以下では照度を用いた。

$$E = (f \cdot U \cdot F) / S \quad (1)$$

ここで、 E は床面照度 (1 m^2)、 f は照明率 (—)、 U はランプ保守率 (—)、 F はランプ全光束量 (1 m)、 S は床面積 (m^2) である。

Fig. 1 に示したように、 n 本の蛍光ランプを天井に配置した場合、ランプからの全光束量 (F) は壁面、天井面および床面にそれぞれ F_1 、 F_2 および F_3 に分配される。このとき成育室の照明率 (f) は (2) 式から算出される¹¹⁾。

$$f = f_1 \cdot (F_1/F) + f_2 \cdot (F_2/F) + f_3 \cdot (F_3/F) \quad (2)$$

ここで、光束分配率 (F_1/F)、(F_2/F) および (F_3/F) は、ランプから壁面、天井面および床面への配光角度 Z_{ij} を用いて、(3) 式から算出した。このとき、ランプは天井面に接近して配置されるので、天井面への配光角度 Z_{2j} は π ラジアンとした。

$$(F_i/F) = \sum_{j=1}^n (Z_{ij}/2\pi n) \quad i=1, 3, j=1, n \quad (3)$$

Fig. 1 Distribution of radiation from fluorescent lamp.

また、(2) 式において、 f_1 、 f_2 および f_3 はランプの全光束が壁面、天井面および床面の単一面のみに照射された場合の照明率であり、Moon の照明計算式、(4)~(6) 式により算出できる^{11,12)}。式中、 ρ_1 、 ρ_2 および ρ_3 は壁面、天井面および床面の反射率である。 H および h' は天井面高さおよび天井面下の距離である。また Kr は室形状係数であり、(7) 式で定義される。

$$f_1 = (\rho_1/4Kr) \cdot [(1/A_1) + (E/A_1) \cdot \{A_2 \cdot (2 - \rho_1 \times (1 + \rho_3)) \cdot \cos h(2Kr \cdot B) + 2A_2 \cdot B \cdot \sin h(2Kr \times B) + A_3 \cdot (2\rho_2 - \rho_1 \cdot (1 + \rho_3))\} \cdot \sin h(2Kr \cdot B \times h'/H) - [A_2 \cdot (2 - \rho_1 \cdot (1 + \rho_3)) \cdot \sin h(2Kr \cdot B) + 2Kr \cdot B \cdot \cos h(2Kr \cdot B) + 2\rho_2 A_3 \cdot B] \times \cos h(2Kr \cdot B \cdot h'/H)] \quad (4)$$

$$A_1 = 1 - \rho_1, \quad A_2 = 1 - \rho_2, \quad A_3 = 1 - \rho_3,$$

$$B = (1 - \rho_1)^{1/2}$$

$$E = \{[2(1 + \rho_2 \cdot \rho_3) - \rho_1 \cdot (1 + \rho_2) \cdot (1 + \rho_3)] \times \sin h(2Kr \cdot B) + 2 \cdot B \cdot (1 - \rho_2 \cdot \rho_3) \times \cos h(2Kr \cdot B)\}^{-1}$$

$$f_2 = \rho_2 \cdot E \cdot \{[(2 - \rho_1 \cdot (1 + \rho_3)) \cdot \sin h(2Kr \cdot B) + 2B \times \cos h(2Kr \cdot B)] \cdot \cos h(2Kr \cdot B \cdot h'/H) - [(2 - \rho_1 \cdot (1 + \rho_3)) \cdot \cos h(2Kr \cdot B) + 2B \times \sin h(2Kr \cdot B)] \cdot \sin h(2Kr \cdot B \cdot h'/H)\} \quad (5)$$

$$f_3 = 1 + \rho_3 \cdot E \cdot [-(2\rho_2 - \rho_1 \cdot (1 + \rho_2)) \cdot \sin h(2Kr \times B \cdot h'/H) + 2\rho_2 \cdot B \cdot \cos h(2Kr \cdot B \cdot h'/H)] \quad (6)$$

$$Kr = [H \cdot (L + W)] / (2 \cdot L \cdot W) \quad (7)$$

ここで、 H は成育室の高さ (m)、 L は奥行き (m)、 W は幅 (m) である。

2. 植物が成育室に設置された場合の照明計算法

植物が成育室に設置された場合の照明モデルを Fig. 2 のように仮定した。すなわち、植物体の高さ (h_p) の位置に仮想床面を仮定し、植物体はこの仮想床面と同一平面上に葉径が D の円板として存在するとした。また、仮想床面は植物の成長に伴って天井面方向へ移動するとした。このようにモデル化すると Moon の照明計算法が適

Fig. 2 Model for theoretical analysis of close illumination with plants present in growth room.

Fig. 3 Relationship between fresh weight, leaf diameter, and height lettuce (new-wave).

用でき、前述と同様に成育室の照明率および光強度を算出することができる。

このさい、植物の葉径 (D) および高さ (h_p) は Fig. 3 に示したレタス (ニューウェーブ) の成育実験から得た実験式 (8) および (9) 式から求めた。図中、測定した円相当葉径は長径と短径から求めた楕円の面積から算出した。なお (8) 式に示したように、葉径は植物断面積の $1/2$ 乗に比例し、面積は生体重量の $2/3$ 乗に比例するとした。

$$D = D_0 \cdot [(M/50)^{2/3}]^{1/2} \quad (8)$$

$$h_p = D/2 \quad (9)$$

ここで、 M は植物の生体重量 (g/個体)、 D_0 は生体重量が 50 g のときの葉径で、ニューウェーブの場合、約 18 cm であった。

いっぽう、仮想床面の反射率 (ρ_0) は (10) 式と (11) 式から算出した。

$$\rho_0 = \rho \cdot \beta + \rho_s \cdot (1 - \beta) \quad (10)$$

$$\beta = (n \cdot S_p) / S \quad (11)$$

ここで、 ρ は植物葉の反射率 (—)、 ρ_s は床面材の反射率 (—)、 β は床面積に対する植物の占有面積比率 (—)、 S_p は植物個体の占有面積 (cm^2)、 n は成育室に定植した植物個体数、 S は床面積 (cm^2) である。

実験装置および方法

1. 植物が成育室に設置されない場合の光強度の測定

Fig. 4 に示したように、形状の異なる A (幅 1.2 m, 奥行き 1.8 m) および B (幅 0.3 m, 奥行き 1.2 m) の平面式のモデル成育室 (内面白色塗装) において、天井面に設置した 40 W 蛍光ランプ (三菱, FL40SW-50-EDL, 2,370 lm/本) をそれぞれ 15 本および 3 本点灯し、ラン

Fig. 4 Structure of plane growth room.

Fig. 5 Close illumination using fluorescent lamps.

プ高さが 20~30 cm の近接照明下で、床面照度とランプ高さ (h) の関係を調べた。なお、照度は床面 (白色発泡スチロール) 上の代表点 (A: 24 点, B: 12 点) で測定した。

また、Fig. 4(b) に示した成育室 (ランプ高さ 30 cm) を用いて、成育室の高さ方向の光強度分布を調べた。高さ方向の光強度は、ランプ下面から 5 cm, 15 cm および 30 cm (床面) の位置での水平面照度を測定した。

さらに、Fig. 5 に示した近接照明方式の実験プラント成育室 (幅 2.25 m, 奥行き 5.4 m, ランプ高さ 30 cm) において、試作した 110W 蛍光ランプ (形式 EX-3, 約 7,500 lm/本) を 42 本 (全灯)、28 本 (2/3 灯) および 21 本 (半灯) 点灯し、床面上の代表点 (15 点) で照度を測定した。

光強度は、照度センサー (LI-210SB, 370~770 nm) および光量子センサー (LI-190SB, 400~700 nm) により測定し、床面 (発泡スチロール) 上の代表点で測定した照度の平均値とした。照明率は、この平均床面照度を用いて (1) 式から求めた。このとき、ランプ保守率は点灯時間が約 100 時間後のランプを用いたので 1.0 とした。

白色塗装材 (壁面、天井面) および白色発泡スチロール板 (床面) の反射率は、積分球 (ライカー社製, 1800-12, 400~1,100 nm) により測定し、いずれも約 0.8 であ

た。いっぽう、壁面の反射率は通気口の空隙を考慮し、約 0.6 とした。また、レタス葉（ニューウェーブ）の反射率は前述の積分球で測定し、約 0.1 であった。

2. 植物育成に伴う指標光強度変化の測定

ランプ高さが 30 cm の近接照明方式の育苗成育室⁸⁾ (幅 2.16 m, 奥行き 1.12 m) において、白色発泡スチロールの栽培パネルにレタス（ニューウェーブ）の苗（生体重量約 0.2 g）を株間 16 cm×16 cm で 91 株定植し、光強度 310 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ (110 W 蛍光ランプ、形式 EX-3, 9 本点灯, 約 7,500 lm/本) の条件下で約 12 日間水耕栽培した。

実験期間中、毎日一定時刻に葉径を測定し、床面積 S (栽培パネル面積) に対する植物の占有面積比率の経時変化を測定した。光強度は、成育室中央部付近に定植した 4 個体の植物体の最上部での水平面照度（指標光強度）を照度センサーで測定し、これらの平均値とした。

その他の栽培条件は、照明時間 16 h/日、気温 25°C、湿度 70%、 CO_2 濃度 350 ppm、風速 0.5 m/s、EC 1.3 mS および pH 5.5 に維持した。

実験結果および考察

1. 植物が成育室に設置されない場合の近接照明特性

1-1. モデル成育室の照明率

Fig. 6 は、Fig. 4 に示して平面式のモデル成育室 A および B の照明率 (f) とランプ高さ (h) の関係を示したものである。 h が 20 cm の近接照明の場合、A の f は 1.5 と高い値を示した。また、B の f も 1.1 と高い値を示したが、A の f に比べて約 27% 低下した。 h が 30 cm の場合、A および B の f は h が 20 cm の場合に比べてそれぞれ約 12% および 25% 低下した。このように、照明率は室の形状によって変化し、とくにランプ高さに強く依存することがわかった。

Fig. 7 は、Fig. 6 の結果を照明率 (f) と室形状係数 (Kr) の関係としてまとめたものである。図中、実線は測定結果を示し、破線は (1)~(7) 式によるシミュレーションの結果を示す。シミュレーションの結果と測定結果とはよく一致した。 f は成育室の大きさに関係なく Kr で一義的に決定され、 Kr が小さくなると顕著に増加した。

したがって、照明率を高めるには、成育室の W および L を大きくするか、または H を小さくする必要があるが、 Kr は (7) 式に示したようにランプ高さとは比例関係にあり、ランプ高さを低くした近接照明が有効であることがわかった。

1-2. 実験プラントの照明率

Fig. 5 に示した近接照明方式の実験プラントの成育室

Fig. 6 Relationship between coefficient of utilization (f) and lamp height (h).

Fig. 7 Relationship between coefficient of utilization (f) and room shape coefficient (Kr).

(ランプ高さ 30 cm, 床面積 12 m^2) において、試作した 110 W 蛍光ランプ (形式 EX-3) を 42 本点灯 (全灯) した場合、床面の平均光強度は約 45 klx (650 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$) の高光強度が得られた。点灯本数を 28 本および 21 本に減少した場合、床面の平均光強度はそれぞれ約 30 klx (440 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$) および約 22 klx (330 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$) となり、ほぼランプの点灯本数の減少量に比例して低下した⁸⁾。

成育室の照明率 (f) は、これらの平均床面照度を用いて、(1) 式から算出すると約 1.7 の高い値を示した。このとき、Fig. 7 に示したシミュレーションによる f は、室形状係数 (Kr) が 0.13 であるので約 1.8 となり、測定結果とよく一致した。

一方、高圧ナトリウムランプなどの高輝度ランプの場

合、熱線による葉焼けの問題や光強度分布の均一化などからランプ高さは 1 m 以上を必要とし、照明率は通常 0.5~0.7 として設計される。したがって、この育成室の照明率は、高圧ナトリウムランプなどの高輝度ランプよりも約 3 倍高くなり、蛍光ランプによる近接照明方式により育成室の光利用効率が一著しく向上することが明らかとなった。

なお、レタスの生産に要する照明電力量は、前報で報告した植物工場実験プラントを用いて求めた結果⁹⁾、生体重量が 75 g/株の場合、約 1.1 kWh/株 (総電力消費量約 2.5 kWh/株) となり、従来の高圧ナトリウムランプなどの高輝度ランプの約 1/2 に低減された¹³⁾。いっぽう、育苗に要する照明電力消費量は、生体重量が 10 g/株および 0.25 g/株の場合、それぞれ約 0.3 kWh/株および 0.06 kWh/株であった。このように、蛍光ランプを用いた近接照明により、省照明電力でレタスを生産または育苗できることが実証された。

1-3. 育成室の高さ方向の光強度分布

Fig. 8 は、Fig. 4(b) に示した育成室 (ランプ高さ 30 cm) において、40 W 蛍光ランプ 15 本を点灯したときの $W=60$ cm (中央部) における高さ方向の光強度 (水平面照度) 分布を示したものである。図中、 h' はランプ下面からの距離を示す。縦軸は $h'=5$ cm, $L=90$ cm での照度を 100 としたときの相対光強度を示す。

光強度は、いずれの h' においても L の両端 (苗の供給と収穫のために隙間が大きい) で低くなる傾向が見られたが、 h' が 30 cm (床面), 15 cm ($1/2h$) および 5 cm で、それぞれ 21.5, 23 および 25 klx であった。このように、近接照明の場合、周囲面の反射により、育成室の高さ方向の光強度分布は、 $h'=5\sim30$ cm の範囲において、80~100 の範囲で均一であることがわかった。また、Fig. 9 に示したように、シミュレーションの結果においても $h'=7.5\sim30$ cm および床面反射率 (ρ_3) が 0.1~0.8 の範囲において、高さ方向の光強度は約 7% 以内の差で均一であった。

以上のように、蛍光ランプによる近接照明の場合、育成室の高さ方向 (ランプ高さ 30 cm) の光強度は、ランプからの距離の 2 乗に反比例する関係が成立せず、床面からの距離が 0~25 cm の範囲において、20% 以内の差で均一であった。

1-4. 照明率に及ぼす周囲面の反射率の影響

Fig. 10 は、 f に及ぼす周囲面の反射率の影響をシミュレーションした結果を示したものである。ただし、他の 2 面の反射率はいずれも 0.8 とした。 f は ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 の減少に伴って低下したが、天井面の反射率 (ρ_2) の減少に

Fig. 8 Light intensity in the height-direction of growth room.

Fig. 9 Relationship between light intensity in the height-direction and reflectance of floor.

より最も著しく低下した。

このように、天井面の反射率が照明率に対して最も強く影響し、照明率を高めるためには、天井面を高反射率とすることが有効であることがわかった。

2. 育成に伴う指標光強度の変化

Fig. 11 は、育成室に定植したニューウェーブおよび

Fig. 10 Effects of reflectance of wall, ceiling, and floor on coefficient of utilization (f).

Fig. 11 Relationship between index light intensity and ratio of plant area occupation to floor area.

晩抽レッドファイヤーの成長に伴う指標光強度（植物体最上部での水平面照度）の経時変化を示したものである。図中、実線は測定結果を示し、破線は（1）～（11）式によるシミュレーションの結果を示す。測定結果とシミュレーションの結果はおおむね一致し、植物の成長に伴って指標光強度は著しく低下する傾向が認められた。床面全体が植物で覆われた場合の指標光強度は、植物が設置されない場合の床面照度にくらべてニューウェーブおよ

び晩抽レッドファイヤーでそれぞれ約 35% および 33% 低下した。このように、成長に伴う植物の占有面積比率の増加により、指標光強度は著しく低下することがわかった。

以上の結果から、一定の光強度条件を維持するには、成育に伴ってランプの点灯本数を増加するなどの方法により指標光強度が低下しないようにする必要があると考えられる。

摘 要

蛍光ランプと床面の距離（ランプ高さ）を数十 cm に近接させ内面を白色塗装（反射率 0.8）し、反射光を有効に利用した近接照明の特性を調べ、以下の知見を得た。

（1）照明率（成育室の光利用効率を示す係数）のシミュレーションは測定結果とよく一致した。照明率は室形状係数が小さくなると著しく増加した。室形状係数はランプ高さとは比例関係にあり、照明率を高めるためにはランプ高さを低くした近接照明が有効であることがわかった。

（2）ランプ高さ 30 cm の近接照明方式の成育室（幅 2.25 m、奥行き 5.4 m）において、110 W 蛍光ランプを 42 本点灯した場合、床面の平均光強度は約 45 klx の高光強度が得られた。このとき、照明率は約 1.7 となり、高圧ナトリウムランプなどの高輝度ランプの場合よりも約 3 倍高くなった。このように、蛍光ランプを用いた近接照明により成育室の光利用効率を著しく向上できることが明らかとなった。

（3）成育室（ランプ高さ 30 cm）の高さ方向の光強度は、床面からの距離が 0～25 cm の範囲において、約 20% 以内の差で均一であった。

（4）照明率と壁面、天井面、および床面の反射率の関係をシミュレーションした結果、照明率を高めるには、天井面を高反射率とするのが有効であることがわかった。

（5）成育室に植物が設置された場合の指標光強度（植物体最上部の水平面照度）のシミュレーションと測定結果はおおむね一致した。指標光強度は、床面全体が植物（レタス）で覆われたとき、初期の床面照度の約 35% 低下した。一定の光強度条件を維持するには、成長に伴ってランプの点灯本数を増加するなどの方法により指標光強度が低下しないようにする必要がある。

本研究を遂行するにあたり、光源を試作していただいた三菱電機（株）生活システム研究所安西良矩氏、三橋征寿郎氏に謝意を表する。また、本論文作成にあたり、ご

助言を賜った大阪府立大学相賀一郎教授に感謝いたします。

文 献

- 1) 稲田勝美. 1984. 人工光と植物の生育. 「光と植物生育」(稲田勝美編) 236-306, 養賢堂, 東京.
- 2) 池田 彰・江崎謙治・中山繁樹. 1985. 全方向光照射における植物生育特性 (I). サラダナ生育速度に及ぼす光強度, CO₂ 濃度および気温の影響. 生物環境調節 **22**: 71-77.
- 3) 池田 彰・中山繁樹・山崎広義・安西良矩. 1985. パルス光照射光源とその植物栽培への適用. 計測自動制御学会論文集 **21**: 107-109.
- 4) 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.
- 5) 池田 彰・中山繁樹・北宅善昭・矢吹万寿. 1988. 植物工場における物質生産の研究 (I). 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.
- 6) 池田 彰・中山繁樹・北宅善昭・矢吹万寿. 1988. 植物工場における植物生産の研究 (2). コカブの光合成と日長, 光強度および CO₂ 濃度の関係. 生物環境調節 **26**: 113-117.
- 7) IKEDA, A., S. NAKAYAMA, Y. KITAYA, and K. YABUKI. 1987. Effect of photoperiod, CO₂ concentration, and light intensity on growth and net photosynthetic rates of lettuce and turnip. Acta Hort. **229**: 273-282.
- 8) 谷村泰宏・池田 彰・江崎謙治・河相好孝・中山繁樹・岩尾憲三・蔭山裕之. 1991. 蛍光ランプを用いた人工光型植物工場の研究. 生物環境調節 **29**: 81-88.
- 9) 鶴岡 久・金子忠男・高辻正基. 1984. 立体式植物工場の照明設計法. 計測自動制御学会論文集 **20**: 734-739.
- 10) RUTHNER, N. 1981. High efficient plant radiation within Ruthner crop production systems. Acta Hort. **128**: 197-202.
- 11) 藤原義輝・斉藤辰彌. 1955. 相互反射. 「照明設計」(“Lighting Design” MOON, P. and D. E. SPENCER 著) 114-137, 技報堂, 東京.
- 12) 石野幸三. 1972. 「室内照明設計法」88-108, 森北出版, 東京.
- 13) 伊東 正. 1986. 植物の工場の生産への実践的アプローチ. 農業および園芸 **61**: 174-180.