蛍光ランプを光源とした人工光型植物工場の開発 とその照明設計法

正会員 池田 彰* 谷村 泰宏* 江崎 謙治* 河相 好孝*
中山 繁樹* 専門会員 安西 良矩* 岩尾 憲三**

Development of Plant Factory Using Fluorescent Lamps and Its Lighting Design

Akira Ikeda, Yasuhiro Tanimura, Kenji Esaki,
Yoshitaka Kawaai, Shigeki Nakayama, Yoshinori Anzai
and Kenzo Iwao

Summary

We developed an experimental plant factory equipped with fluorescent lamps to illuminate plants closely and the inside wall coated with highly reflectable paint to use reflected light effectively (close illumination method). In this paper, saving degree of lamp energy of the close illumination method on lettuce cultivation was experimentally and theoretically investigated by employing this plant factory.

(1) The mean photon density on the cultivation panel (area of 12 m²) was as high as 650 μ E·m⁻²·S⁻¹, when 42 fluorescent lampS (110W) were installed 30 cm above the surface of cultivation panel to illuminate plants.

(2) The coefficient of utilization(U), which indicates the light utilization efficiency in this cultivation room of this plant factory, was about 1.7. The measured value of U is well coincide to the value calculated by Moon's equation, and was nearly 2.5 times higher than high pressure sodium lamps installed about 80 cm above the cultivation panel.

(3) The electric energy consumption for lighting and total electric power consumption for the production of lettuce (75g fresh weight) was about 1.1kwh and 2.5kwh respectively. Thus, the electric energy consumption for lighting was about half that of conventional high pressure sodium lamps.

On the other hand, the lighting power consumption for the production of seedlings weighing about 10g and 0.2g was about 0.3 kwh and 0.06kwh, respectively.

1. はじめに

人工光型植物工場は、光強度、照明時間などの光環境要因だけでなく、空調などその他の育成環境要因も容易に制御できる。さらに、天候や立地条件に左右されない安定した生産、高い土地生産性、無農薬といった特長を有する¹⁻³⁾。しかし、人工光型植物工場は設備費および運転経費がかさみ、特に大量の照明電力を消費することから、実用化が遅れている。人工光型植物工場を実用化するためには、生産コストの大半を占める照明電力を低減する必要がある。このためには、光の有効利用の観点から照明装置および照明方法を改善することにより、植物生産の高効率化を図り、かつ人工光型植物工場の機能を十分に発揮させる必要がある。

従来の植物工場では、光源として発光効率が最も高い高圧ナトリウムランプが使用されている。しかし、植物栽培における照明では栽培室の照明効率を向上させ、かつ葉群の受光効率を高めて光の利用効率を高めることが重要である。筆者らは光強度、照明時間や光質などの光環境の制御が容易な蛍光ランプを用いた植物工場実験装置を試作し、照明の方向、強度および照明時間が植物の育成に及ぼす影響について調べた⁴⁻⁹⁾。その結果、蛍光ランプと床面の距離を数十cmに接近させ内面を白色塗装し、反射光を有効に利用した近接照明により、従来の高圧ナトリウムランプよりも省電力でレタスを高速栽培できることを見出した^{6,9,10)}。

また、植物育成に及ぼす人工光の影響については、古くから多くの研究があるが^{11,12)}、人工光源を用いた照明設計に関する報告は少ない^{13,14)}。本報では蛍光ランプを光源とした植物工場の実用化を目的として、蛍光ランプによる近接照明の特性を理論的に解析し、その照明設計法を確立するとともに、実際に植物工場実験プラントを開発して、その有効性を実験的に検証した結果について報告する。

*三菱電機㈱中央研究所・生活システム研究所

**中部電力㈱電気利用技術研究所

Akira Ikeda, Yasuhiro Tanimura, Kenji Esaki,

Yoshitaka Kawaai, Shigeki Nakayama, Yoshinori Anzai and Kenzo Iwao

2. 開発した人工光型植物工場（実験プラント）

図1に実験プラントの構成を示した¹⁵⁾。この実験プラントの諸元は、表1に示すとおりであり、育苗装置－1（幅0.45m、長さ1.3m、高さ1.8m）、育苗装置－2（幅1.4m、長さ2.65m、高さ2.3m）、成育装置（幅3.3m、長さ6.0m、高さ2.5m）および計測・制御装置から構成した。栽培装置は図2に示したように蛍光ランプによる

図1 人工光型植物工場プラントの概要

表1 植物工場実験プラントの仕様

対象作物	サラダナ、サニーレタス、ミツバ、ホウレンソウ、イチゴ、トマト
栽培装置の構造	育苗装置－1、育苗装置－2、成育装置
成育装置の外形寸法	(幅3.3m×奥行6.0m) × 2段
成育装置の光源	高効率蛍光ランプ110W×42灯×2段
生産能力	120株/日（サラダナの場合）
電気設備容量	20kW
栽培方式	水耕

図2 蛍光ランプによる近接照明

る近接照明の特長を活かし、栽培床を育苗装置3段、成育装置2段とし、土地利用効率の高いコンパクトな栽培システムを実現した。蛍光ランプは試作した110W3波長形蛍光ランプ（形式EX-3）を使用した。この蛍光ランプは、図3に示した分光分布をもち、

図3 試作の3波長形蛍光ランプ（形式EX-3）の分光分布

同一投入電力で従来の白色蛍光ランプよりも光合成有効量子束密度（PPFD）が約10%高かった¹⁶⁾。なお、生産量はレタス基準で120株/日である。環境条件は図4に示したようにプログラミングコントローラによりON-OFF制御し、光強度、照明時間、温度、湿度、CO₂濃度および水耕液条件（電気伝導度、pH、液温など）について制御と監視を行った。

図4 制御概要図

一方、作物の成育監視は、重量測定ならびに画像計測により葉面積を測定して行った。

実験に用いた植物は、晩抽レッドファイヤー、ニューウェーブおよびグリーンウェーブなどのレタス類である。育苗装置において、ウレタン担体に定植したレタスの幼植体を9日間（播種から11日間）成育したのち、この幼苗（生体重量約0.2g）を株間8cmの発泡スチロールパネルに移植し、さらに9日間（播種から20日間）成育した。次に、この苗（生体重量約8g）を株間15cmに広げた発泡スチロールパネルに移植し、成育装置で9日間（播種から29日間）栽培した。なお、光強度は、植物を設置しない状態で照度センサー（型名LI-210SB、370～770nm）および光子センサー（型名LI-190SB、400～700nm）により測定した。

3. 近接照明の理論とシミュレーション

3.1 植物がない場合の照明計算法

成育室の光利用効率を示す照明率 (U) は(1)式で定義される。なお、植物栽培での光強度の単位は一般に光量子束密度が用いられるが、同一ランプの場合、光量子束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。

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

ここで、Eは床面照度 (lx)、Uは照明率、Mはランプ保守率、Fはランプ全光束 (lm)、Sは床面積 (m²) である。

$$Z_{1j} = \tan^{-1}(H/j \cdot d) + \tan^{-1}(H/(L-j \cdot d))$$

$$Z_{2j} = \pi$$

$$Z_{3j} = \pi - Z_{1j}$$

図5 蛍光ランプから放射された光の分配

図5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 (F) は壁面、天井面および床面にそれぞれ F₁、F₂ および F₃ に分配される。このとき、栽培室の照明率 (U) は(2)式から算出される¹⁷⁾。

$$U = U_1 \cdot (F_1/F) + U_2 \cdot (F_2/F) + U_3 \cdot (F_3/F) \quad (2)$$

(2)式において、光束分配率 (F₁/F)、(F₂/F) および (F₃/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。またランプ長は無限長と仮定した。

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

また、(2)式において、U₁、U₂ および U₃ 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 & Spencer の式により算出した^{17,18)}。この際、室指数 (Kr) は(4)式で定義された。

$$Kr = [H \cdot (L+W)] / 2 \cdot L \cdot W \quad (4)$$

ここで、Hは成育室の高さ (m)、Lは長さ (m)、Wは幅 (m) である。

3.2 植物が育成している場合の照明計算法

植物が栽培室に設置されている場合の照明モデルを図6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、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。

この際、植物の葉径 (D) および高さ (h_p) は図7に示したレタ

図6 植物が設置されたときの近接照明モデル

図7 レタス（ニューウェーブ）の生体重量と葉径および草丈の関係

ス（ニューウェーブ）の成育実験から得た実験式(5)および(6)から求めた。図中、円相当葉径は長径と短径から求めただ円の面積から算出した。なお(5)式では、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。

$$D = D_0 \cdot [(M/50)^{2/3}]^{1/2} \quad (5)$$

$$h_p = D / 2 \quad (6)$$

ここで、Mは植物の生体重量 (g/個体)、D₀は生体重量が50gのときの葉径でニューウェーブの場合、約18cmである。

また、仮想床面の反射率 (ρ₀) は(7)式と(8)式から算出した。

$$\rho_0 = \rho \cdot \beta + \rho_3 \cdot (1 - \beta) \quad (7)$$

$$\beta = (n \cdot S_p) / S \quad (8)$$

ここで、ρは植物葉の反射率、ρ₃は床面材の反射率、β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 (cm²)、nは栽培室に定植した植物個体数、Sは床面積 (cm²) である。

4. 実験プラントの性能試験結果

蛍光ランプを光源とした植物工場実験プラントにおいてレタス等の栽培試験を通じて、その装置性能および生産能力を調べた結果は次のとおりであった。

(1) 蛍光ランプによる近接照明方式により、栽培床を育苗を3段化、成育を2段化でき、コンパクトな栽培システムを実現することができた。また、110W3波長型蛍光ランプ42本/段 (床面積12 m²/段) を栽培パネル表面から30cmの高さで近接照明したとき、床面の平均光量子束密度は約650 μE・m⁻²・S⁻¹ (床面照度約45klx) の高い値が得られた。

(2) 環境条件をプログラミングコントローラにより ON-OFF 制御した結果、気温、湿度、CO₂濃度、水耕液の電気伝導度 (EC)

および pH は、光量子束密度 $330\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{S}^{-1}$ 、照明時間 $16\text{h}/\text{日}$ 、風速 $0.5\text{m}/\text{s}$ の条件において、それぞれ明期 $25\pm 0.5^\circ\text{C}$ / 暗期 $20\pm 0.2^\circ\text{C}$ 、 $70\pm 5\%$ 、 $900\pm 50\text{ppm}$ 、 $1.3\pm 0.1\text{mS}$ および 5.5 ± 0.5 の範囲で調節された。

(3) 晩抽レッドファイヤーおよびグリーンウェーブは育成日数 29 日で生体重量 75g 以上が得られ、生産量は $120\text{株}/\text{日}$ であることが

図8 パソコン方式の画像計測装置

図9 地上部新鮮重による成長曲線
(サラダナ・幼苗)

注) 図中プロットされたデータは 1 日当り
10 株の平均値

図10 鉛直投影面積による成長曲線
(サラダナ・幼苗)

図11 周囲長による成長曲線 (サラダナ・幼苗)

認められた。この際、育苗装置では、約 0.2g の幼苗は 9 日間で約 40 倍に増加する高速成長を示し、環境制御による著しい育成促進が認められた。

5. 野菜の成長の光応用計測

植物工場では運転監視のため、製品となる作物の成長量をはじめとした生体計測が不可欠である。しかし、作物の成長計測については、その重要性が指摘されながらも実用化されていないのが実情である。そこで我々は非接触、非破壊が特長である画像計測手法を作物の成長モニターに適用した。

5.1 装置および方法

画像処理装置として筆者らの開発したパソコン方式の画像計測装置 (図 8) を用い、作物を真上から見た鉛直投影像の面積、周囲長、最大長、幅、円形度、円相当径、縦横比を測定した。次に、上記の画像計測項目を指標にした成長曲線を描き、サンプリングを伴う新鮮重に代替えてできるかどうかを検討した。供試作物は植物工場実験プラントで育成するサラダナ、レタス類を用いた。

5.2 結果および考察

幼苗の段階である育苗室 1 での岡山サラダナの新鮮重の成長曲線は図 9 に示すとおり、指数関数 (成長係数 $k=0.44$ 、相関係数 $r=0.99$ 以上) によく適合した。一方、画像計測値である鉛直投影面積の成長曲線も図 10 に示すとおり指数関数 ($k=0.51$, $r=0.98$) で表されることが分かった。同様に、周囲長 (図 11) 最大長、幅、円形度、円相当径も指数関数に良く適合した。但し、縦横比は約 3.0 から指数関数で減少し、1.0 に漸近することがわかった。以上の成長曲線のうち、鉛直投影面積が指数回帰式と相関係数が高く、有用な成長指標になり得ることがわかった。

供試作物の新鮮重と鉛直投影面積は相似的に推移することから、両者の関係を散布図 (図 12) で検討した結果、非常に高い相関係数 ($r=0.99$) で比例関数にあることが分かった。これは葉の展開が互生で、展葉面積に応じて生体重が増すことを示唆している。従って、株が大きくなり、葉が重なり始めるとその関係が壊れるため、その成株には適用の限界があることもわかった。ちなみに、両者の相関係数は育苗室 2 では $r=0.97$ 、成育室では $r=0.89$ と次第に低下した。画像計測項目のうち、円形度は成育段階に依らず約 0.5 の前後で推移する特性を示した。ちなみに、円形度は真円で 1.0 である。また、縦横比が 1.0 に漸近することは正方形に内接することなので、成育に伴ってサラダナの形が整ってゆくことを意味している。

図12 サラダナ幼苗の鉛直投影面積と地上部新鮮重の関係（育苗室一）

表2 各種作物の鉛直投影面積と地上部新鮮重の関係

	回 帰 式 (W : mg, A : mm ²)	相 関 係 数
サラダナ	$W = 1.69 + 0.21 \cdot A$	0.990
マノアレタス	$W = 8.33 + 0.20 \cdot A$	0.989
グリーンウエーブ	$W = 7.55 + 0.16 \cdot A$	0.993

鉛直投影面積と生体重は表2に示すとおり、他の作物でも高い相関係数で比例関係にある。植物工場での検証の結果からも生体重の代わりに非接触、非破壊で計測できる鉛直投影面積を用いることにより軽便に成長の監視が行えることがわかった。その信頼度は幼苗ほど高い。従って、苗半作と言われる苗の成長評価の重要性和併せ考えるとその実用性は高いと言える。

6. 蛍光ランプによる近接照明の解析と検証

6.1 照明率のシミュレーション結果

図13は、(2)および(3)式を用いて、近接照明方式(内面白色塗装、反射率0.8)の育成室における照明率(U)と室指数(Kr)の関係をシミュレーションした結果を示したものである。なお、壁面の反射率は通気口の空隙を考慮し、約0.6とした。UはKrが小さくなると著しく増加する傾向が認められた。Krは(4)式に示したよう

図13 育成室の照明率(U)と室形状係数(Kr)の関係

に栽培パネル表面からのランプ高さとの比例関係にあり、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示された。

6.2 実験プラントの照明率

本実験プラントの育成室の照明率(U)は、試作110W3波長形蛍光ランプ光束7500lm/本、床面積12m²/段(幅2.25m、奥行き5.4m)、ランプ保守率1.0(点灯時間100時間のランプを使用)および平均床面照度(42本/段点灯で約45klx)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、シミュレーションによるUは、図13から、Krが約0.1であるので約1.9となり、測定結果とよく一致した。このように、近接照明(ランプ高さ30cm)での照明率は1を越える高い値を示し、育成室の光利用効率が高いことが明らかとなった。一方、高圧ナトリウムランプなどの高輝度ランプの場合、赤外放射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1m以上を必要とする。例えば、幅90cm、長さ635cmの栽培ベッド(栽培面積5.7m²)のベッド面より80cm上方に設置した反射形高圧ナトリウムランプ(350W、2,700lm/灯)4灯を点灯した場合、栽培ベッド表面の平均照度は約13,000lxと報告されており¹⁹⁾、照明率はランプ保守率1.0とすると約0.7となる。従って、本実験プラントの育成室の照明率は、上記の高圧ナトリウムランプを用いた場合よりも約2.5倍高くなり、蛍光ランプを用いた近接照明により育成室の光利用効率を著しく向上できることが実証された。

6.3 育成室の高さの違いによる光強度分布の分析

実験プラントの育苗室の中央部において、蛍光ランプから下方の距離(h')が5cm、15cm、および30cm(床面)における光強度(水平面照度)を測定した結果、それぞれ約25、29klxであった。

このように、近接照明の場合、周囲面の反射効果により育成室の高さの違いによる水平面照度は、h'が5～30cmの範囲において平均照度の±10%の範囲で分布し、均一であることがわかった。また図14に示したシミュレーションの結果においてもh'=7.5～30cmおよび床面反射率(ρ₃)=0.1～0.8の範囲において、育成室の光強度は約7%以内の差で均一であった。

図14 育成室の高さの違いによる水平面照度の変化と床面反射率の関係

以上のように、蛍光ランプによる近接照明（ランプ高さ30cm）では、床面からの距離が0～25cmの範囲において、育成室の高さの違いによる照度の変化は20%以内の差にとどまることがわかった。

6.4 照明率に及ぼす周囲面の反射率の影響

図15はU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。但し、他の2面の反射率はいずれも0.8とした。Uは周囲面の反射率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することから、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と考えられる。

図15 照明率に及ぼす壁面、天井面、床面の反射率の影響

6.5 植物の育成に伴う指標光強度の変化

図16は、実験プラントの育苗室における植物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(2)式～(8)式によるシミュレーション結果を示す。

図16 床面積に対する植物占有面積比率と指標光強度の関係

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概ね一致し、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、ニューウェーブおよび晩抽レッドファイヤーでの指標光強度は、初期の床面照度に比べてそれぞれ約35%および33%低下した。従って、栽培期間中、一定の光条件を維持するためには、植物の育成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を一定に保つ必要がある。

7. 作物の生産に要した電力量

図17は、日産120株（レタス）の実験プラントにおける日消費電力量の月変化を示したものである。日消費電力量は最大345 kWh/月（7月および8月）、最小276 kWh/日（1月）であり、1年間の平均の日消費電力量は約300 kWh/日であった。この際、内訳は、概ね照明電力45%、空調電力35%、その他の電力20%であった。これらの結果から、収穫時の生体重量が約75gのレタス生産に要する照明電力量は、約1.1 kWh/株（総消費電力量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²⁰⁾。一方、生体重量が約10gの苗を生産する場合、照明消費電力量は約0.3 kWh/株（総消費電力量0.6 kWh/株）で、育成時の約1/4であった。また本葉が数枚展開した幼植物（生体重量0.2g）の苗を生産する場合、約0.06 kWh/株（総消費電力量0.13 kWh/株）で、さらに1/5であった。

以上のように、蛍光ランプを用いた近接照明により、レタスを省照明電力で高速栽培できることが実証された。しかし、総電力量の75%が育成装置で消費されていることから、生産コストを低減するためには、栽培密度が高く、育成促進効果が大きい育苗装置への重点的投入、すなわち種苗工場としての展開が効果的であると考えられる。

図17 日消費電力量の月変化

8 おわりに

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の特性を理論的に解析するとともに実験的に検証し、次の諸点を明らかにした。

(1) 日産120株（レタス）の植物工場実験プラントによる栽培試験

を通して、蛍光ランプによる近接照明下で葉菜類を省電力で高速栽培できることが実証された。その照明消費電力量は、収穫時の生体重量が75gの場合、約1.1kWh/株（総電力消費量約2.5kWh/株）となり、従来の高圧ナトリウムランプの約1/2であった。一方、苗生産に要する照明電力量は、生体重量が10gおよび0.2gの場合、それぞれ約0.3kWh/株および0.06kWh/株であった。

(2) 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、照明率は室指数が小さくなると著しく上昇した。室指数はランプ高さと比例関係にあるので、照明率を高める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示された。また、成育室（ランプ高さ30cm）の高さ方向の光強度は、床面からの距離が0～25cmの範囲において、20%以内の差で均一であることがわかった。

(3) ランプ高さ30cmの成育室（幅2.25m、奥行き5.4m）において、110W3波長形蛍光ランプを42本点灯した場合、床面の平均光強度は約45klxの高光強度が得られた。このとき、照明率は約1.7となり、従来の高圧ナトリウムランプ（ランプ高さ80cm）の場合よりも約2.5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証明された。

(4) 非接触・非破壊を特長とする代表的な光応用計測である画像計測の手法により野菜成育の監視と評価を試みた結果、野菜を真上から見た面積が生体重と最も相関が高く、面積から軽便に成長の非破壊連続監視できることがわかった。また、円形度や縦横比から形態的な品質も評価できる。

人工光型植物工場を野菜工場として実用化するためには、設備コストの低減や対象作物の拡大などが今後の課題として残されている。しかし、蛍光ランプを用いたシステムは、植物の成長に大きく関与する光環境を容易に制御できるだけでなく、環境の調節も容易なため、画像計測と組み合わせることにより植物バイオ分野や植物生理学に関連した研究分野において応用が今後益々開けていくものと思われる。本研究で得られた成果はその基礎データとして多方面で活用されることを切望している。

Appendix

$$U_1 = (\rho_1/4Kr) \cdot \{ (1 \cdot A_1) + (E/A_1) \cdot \{ [A_2 \cdot (2 - \rho_1 \cdot (1 + \rho_3)) \times \cosh(2Kr \cdot B) + 2A_2 \cdot B \cdot \sinh(2Kr \cdot B) + A_3 \cdot (2\rho_2 - \rho_1 \times (1 + \rho_3))] \cdot \sinh(2Kr \cdot B \cdot h'/H) - [A_2 \cdot (2 - \rho_1 \cdot (1 + \rho_3)) \times \sinh(2Kr \cdot B) + 2Kr \cdot B \cdot \cosh(2Kr \cdot B) + 2\rho_2 A_3 \cdot B] \times \cosh(2Kr \cdot B \cdot h'/H) \} \} \quad (A-1)$$

$$A_1 = 1 - \rho_1, \quad A_2 = 1 - \rho_2, \quad A_3 = 1 - \rho_3, \\ B = (1 - \rho_1)^{1/2}$$

$$E = \{ [2(1 + \rho_2 \cdot \rho_3) - \rho_1 \cdot (1 + \rho_2) \cdot (1 + \rho_3)] \cdot \sinh(2Kr \cdot B) + 2 \cdot B \cdot (1 - \rho_2 \cdot \rho_3) \cdot \cosh(2Kr \cdot B) \}^{-1}$$

$$U_2 = \rho_2 \cdot E \cdot \{ [(2 - \rho_1 \cdot (1 + \rho_3)) \cdot \sinh(2Kr \cdot B) + 2 \cdot B \times \cosh(2Kr \cdot B)] \cdot \cosh(2Kr \cdot B \cdot h'/H) - [(2 - \rho_1 \times (1 + \rho_3)) \cdot \cosh(2Kr \cdot B) + 2 \cdot B \cdot \sinh(2Kr \cdot B)] \times \sinh(2Kr \cdot B \cdot h'/H) \} \quad (A-2)$$

$$U_3 = 1 + \rho_3 \cdot E \cdot [- (2\rho_2 - \rho_1 \cdot (1 + \rho_2)) \cdot \sinh(2Kr \cdot B \cdot h'/H) + 2\rho_3 \cdot B \cdot \cosh(2Kr \cdot B \cdot h'/H)] \quad (A-3)$$

ここで、 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。

光源を試作して戴いたオスラム・メルコ社、三橋征寿郎氏ならびに本論作成にあたりご助言を戴いた三菱電機生活システム研究所、狩野雅夫氏に謝意を表します。

参考文献

- (1) 高辻正基：野菜工場の進展。計測と制御，22（昭58）522—528
- (2) 橋本 康・高辻正基：野菜工場の意義と技術課題。遺伝，38（昭59）4—8
- (3) 中山繁樹・池田 彰：植物工場の一視点。電気学会雑誌，105（昭和60）235—238
- (4) 池田・江崎・中山：全方向光照射における植物生育特性（I）。生物環境調節，22（昭60）71—77
- (5) 池田・中山・山崎・安西：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（昭60）107—109
- (6) 池田・江崎・河相・中山：全方向光照射における植物生育特性（II）。生物環境調節，25（昭62）1—5
- (7) 池田・中山・北宅・矢吹：植物工場における物質生産の研究（I）。生物環境調節，26（昭63）107—112
- (8) IKEDA, A., S.NAKAYAMA, Y.KITAYA and K. YABUKI: Effect of photoperiod, CO₂ concentration, and light intensity on growth and net photosynthetic rates of lettuce and turnip. Acta Hort., 229(1987)PP. 273-282
- (9) 池田 彰・中山繁樹：「植物工場と光放射応用」完全人工制御植物工場の現状と展望。照明学会研究会資料，光放射の応用・関連計測研究会，AR—86—15～19（昭61）18—26
- (10) 池田 彰・谷村泰宏・江崎謙治・河相好孝・中山繁樹・岩尾憲三：蛍光ランプを光源とした人工光植物工場の開発—近接照明による照明電力の低減。植物工場学会誌，3，2（平4）111—123
- (11) 稲田勝美：人工光と植物の生育。「光と植物生育」（稲田勝美編）養賢堂（昭和59）236—307
- (12) 洞口公俊：植物生育と光放射。電気設備学会誌，9（平1）118—126
- (13) 鶴岡・金子・高辻：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（1984）734—739
- (14) RUTHNER, E: High efficient plant radiation within Ruthner crop production system. Acta Hort., 128(1981) 197-202.
- (15) 谷村・池田・河相・江崎・中山・岩尾・蔭山：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（平3）144—145
- (16) 池田・江崎・中山・安西・岩尾・蔭山：植物工場に適した光源の検討。生物環境調節学会第29回集会講演要旨集（平3）96—97
- (17) 藤原義輝・斎藤辰彌訳：相互反射。「照明設計」（“Lighting Design” MOON, P. and D.E.SPENCER 著），技報堂（昭30）114—137
- (18) 石野幸三：「室内照明設計法」。森北出版。（昭47）88
- (19) 関山・岡野・星：野菜の工業的生産の実際。食品工業，29（1986）32—38
- (20) 伊東 正：植物の工場の生産への実線のアプローチ。農業および園芸，61（昭61）174—180