立体式植物工場の照明設計法

鶴岡 久*・金子 忠男*・高辻 正基*

Lighting Design for a 3-Dimensional Plant Factory

Hisashi TSURUOKA*, Tadao KANEKO* and Masamoto TAKATSUJI*

Lighting design for a 3-dimensional plant factory. Methods of designing lighting for 3-dimensional plant factories in which plants are cultivated by artificial light are discussed. Moving through the 3-dimensional light lattice, plants in factory of this type grow. Plants periodically approach to lamps and all leaves get light radiation from various directions. Therefore lighting environment of 3-dimensional plant factory is very complex.

Then a lighting design method is developed by the use of a model facility. First, direct incident illuminance is calculated using the light distribution diagram for a lamp. Next, the reflected illuminance and transmitted illuminance are experimentally determined from the values of the design parameters (trough dimensions, distance between troughs, plant weight, etc). These illuminances are added to the direct incident illuminance. Finally, total illuminance is converted into effective illuminance using experimental results obtained by comparison of plants growing in 2-dimensional illuminance with those in 3-dimensional illuminance.

Keyword: lighting design, plant factory, lamp, direct incident illuminance, light distribution diagram, reflected illuminance, transmitted illuminance

1. はじめに

植物工場は照明空調装置や移動水耕栽培装置を使用して、施設園芸よりも植物に最適な生長環境を人工的に作り出し、生産量の大幅な増大を狙うことに特徴がある¹⁾。反面経済性向上のため、装置の設備費や照明空調などの運転費を極力おさえることが重要である。とりわけ照明費は生産費の中で大きなウェイトを占め、照明設計の最適化は植物工場の最重要課題の一つ

である。

照明装置は植物が健全に生育できる光エネルギー（照度）と光質（分光特性）を備え、省電力で寿命が長く保守が容易であることが望まれる。照明対象が植物であるため、人間の作業や生活を対象とする建築照明とは異なった照明設計を必要とする。

植物工場には Fig. 1 に示すように、栽培装置の構造から立体式と平面式、利用する光源から人工照明のみを使う完全制御形と、太陽光人工光を並用するハイブリッド形にわけることができる。立体式と平面式の中間的な構造も考えられるが、照明設計の基本形はこの二つに絞ることができる。立体式は狭い土地を有効に生かすことができるため、日本などにおける普及が考えられる。

従来農業関係の照明設計の主たる対象は施設園芸の補光である²⁾。立体式植物工場における照度の実測例は報告されているが、設計法として提案されていない³⁾。これは立体式植物工場の照明環境が非常に複雑であることに起因すると思われる。本論文では葉菜類を生産する完全制御形立体式植物工場を対象とし、目標照度を実現するための照明設計法の確立を目指した。

2. 照明設計法の開発

ルスナ社が最初に開発した立体式植物工場は、Fig. 1 に示すように格子状に配列されたランプの間を植物を移動させながら生産する。植物を植えた栽培槽（トラフ）は移動するチェーンにハンガを介して取り付けられる。照明対象はランプからみて 360 度方向に存在するので反射傘は不用となる。また植物を立体移動させることにより、植物をランプに接近させ照度をあげることができる。

しかし、これらの特徴は逆に立体照明設計を非常に複雑にする原因となる。多方向からの光照射は従来の栽培法にみられなかった点であり、植物の生長反応は十分解明されてはいない。また、ランプ-植物が至近距離にあると、相互の位置関係の微小な変化が光環

* 日立製作所中央研究所 国分寺市東恋ヶ窪 1-280

* Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd., Koku-bunji

(Received April 5, 1984)

General Electric Co. (2-dimensional type)

Ruthner Co. (3-dimensional type)

Fig. 1 Typical plant production system

Fig. 2 Model facility for design of a 3-dimensional plant factory

Table 1 Experimental conditions for 3-dimensional model facility

Plant	Lettuce
Lamp	High-pressure sodium (NH 360 LX)
Lamp-plant distance	50 cm
Trough dimensions	2×0.1×0.1 (m), 2×0.2×0.1 (m)
Distance between two troughs	35 cm, 75 cm
Plants/trough	10, 20
Trough material	Vinyl chloride covered with aluminium-evaporated film

境，温度環境，栽培密度に大きな変化を与える。このような理由によりわれわれは，立式式植物工場の実験プラントを作り，その多方向の光源と植物の生長の関係を実験的に把握することにした。

立体式における設計変数にはトラフの深さ，幅 (W)，トラフに植える株の条数 (N)，株間距離，トラフの反射率 (R_r)，ランプ-植物間距離 (L)，トラフトラフ間距離 (H)，風速，ライン移動速度，ランプ容量，

ランプの配置などがあげられる。本論文ではこの中で照度計算に直接関係する W , N , R_r , L , H の変数に着目した考察を行う。ランプの容量や配置も重要な設計変数であるが，実験上は固定値 (400 W 高圧ナトリウムランプ) として扱う。ただしこれらの設計変数を変化させた場合の照度計算も，本実験結果から可能である。

実験プラントの構成をに，Fig. 2 主な諸元を Table 1 に示す。トラフの間隔はチェーンのピッチで決まるが，本装置では 35 cm を単位にして変えられる。1 トラフの株の条数は 2 条まで可能である。トラフの幅とトラフ間距離は，トラフの移動方向が垂直方向から水平方向に移行するとき，トラフと植物が接触しない関係を満足することが必要である。実験試料にはサラダナを選び，定値から収穫時までの照明計算を検討対象とした。

立体照明環境は Fig. 1 に示すように 3 ゾーンに分けることができる。すなわちランプとトラフが規則的に配列している中心部のゾーン I，建屋の壁面に近いゾーン II，チェーン滑車に近いゾーン III である。容積では I が最も多く立体照明設計の主要対象である。トラフ間距離が零の極限を壁面と考えると，II は I の変形と考えられる。III は容積が少く考察の対象外とする。I に対応する実験は Fig. 2 の X1 の部分で行い，II に対応する実験は X2 で行う。

ゾーン I において植物が受ける光のパスは Fig. 3 に示すように分解できる。

(1) ランプの光が直接植物に到達する直接光

Fig. 3 Analysis of light radiation in a 3-dimensional plant factory. E_d , E_r , and E_t are direct incident illuminance, reflected illuminance, and transmitted illuminance, respectively

(E_d)

(2) ランプの光がトラフに当り、反射を何回か繰り返した後、植物に到達する相互反射光 (E_r)

(3) ランプの光がトラフの間を透過して植物に到達する透過光 (E_t)

E_d , E_r が存在する範囲は Fig. 3 において A のゾーンである。B のゾーンは E_t の存在する範囲である。 E_d はランプの形式と配置を決めれば、ランプの配光曲線を利用して厳密に計算できる。 E_r , E_t は E_d に比例して変化すると予想され、 W, N, R_r, L, H の関数である。これらの関係を実験プラントを利用して決定することにする。 E_r は E_d と切り離して測定できないので、透過光に関するランプを消し、 $E_d + E_r$ を測定し、計算で求めた E_d を差し引いて求める。

立体照明における多方向の光環境は、照度計をトラフ中央部の水平面に置いた状態で測定される水平照度 E_H と、垂直面に置いた状態で測定される垂直照度 E_V で表現する。添字 H, V で水平、垂直成分を表わすとすれば、ゾーン I について

$$E_H = E_{Hd} + E_{Hr} + E_{Ht} \quad (1)$$

$$E_V = E_{Vd} + E_{Vr} + E_{Vt} \quad (2)$$

である。 E_{Hr} , E_{Ht} , E_{Vr} , E_{Vt} を E_{Hd} , E_{Vd} の相対比でつぎのように表わす。

$$E_{Hd} + E_{Hr} = K_{Hd} \cdot E_{Hd} \quad (3)$$

$$E_{Vd} + E_{Vr} = K_{Vd} \cdot E_{Vd} \quad (4)$$

$$E_{Ht} = K_{Ht} \cdot E_{Hd} \quad (5)$$

$$E_{Vt} = K_{Vt} \cdot E_{Vd} \quad (6)$$

ゾーン II では透過光に関してはランプが片側に存在しないのでゾーン I の 1/2 と考えられる。 E_d と E_r はまとめてつぎのように表わす。

$$E_{Hd} + E_{Hr} = C_H \cdot E_{Hd} \quad (7)$$

Fig. 4 Spectral reflectance of certain material

$$E_{Vd} + E_{Vr} = C_V \cdot E_{Vd} \quad (8)$$

以上のように K_{Hd} , K_{Vd} , K_{Ht} , K_{Vt} , C_H , C_V の 6 個の係数を設計条件に応じて実験的に決定すれば、照度計算が可能となる。

4. 実験結果とその検討

はじめに植物工場の天井、壁、トラフなどに使用されると考えられる材料の分光反射率をカラーアナライザ(日立製)を使って測定した (Fig. 4)。この結果によればウレタンや発泡スチロールの反射率が高く、試料に使ったアルミ蒸着フィルムは期待したより高くなかった。これらの試料は購入直後のものであり、使用中は劣化やよごれを考慮することが必要である。

立体式ではランプと植物を至近距離で使うことに特徴があるため、ランプ-植物間距離の適正値を求めることが設計上まず必要である。そこで Fig. 5 のように 400 W 高圧ナトリウムランプとサラダナの距離 X を変化させ、葉温を放射温度計 (6 T 16 三栄測器) で測定し植物の生理状態を調べた。 X の初期値は 70 cm とし、10 cm きざみ 20 分間隔でサラダナをランプへ接近させた。周囲温度はサラダナの最適な生育温度である 20°C に設定し、風速、湿度を約 0.5 m/s, 60% とした。またサラダナの葉面の放射率として 0.99 を仮定した。植物が健全に生育しているときの葉温は湿度や風速にもよるが、大体周囲温度 $\pm 2^\circ\text{C}$ 以内にあると考えられる⁴⁾。Fig. 7 に示すように X が 30 cm 以下では正常の生長は期待できないと判断される。そ

Fig. 5 Relationship between leaf temperature and lampplant distance

Fig. 6 Change in illuminance on trough. The full line gives the measured illuminance. The dashed line gives the calculated direct incident illuminance

こでランプとチェーンの距離は 50 cm とし、2 条式においてもランプ植物間距離は 40 cm 以上を確保するようにした。

つぎに直接光、相互反射光、透過光の概略比を知り、また全照度が直接光に比例していることを確認するため、Fig. 2 に示した X1 の測定領域における照度測定を行った (Fig. 6 実線)。Fig. 6 の破線はランプの配光曲線を使って求めた直接光の計算値である。この結果から立体照明はおおよそ Table 2 に示すように分解できることがわかる。すなわち直接光は 40~60% であり、透過光は 30~40% である。相互反射光の垂直成分は認められない。これは植物が完全に近い光の吸収材として働いていることを示している。

透過光の割合がやや大きいので、この実験プラントの結果の工場規模への適用の是非を調べる必要がある。

Table 2 Typical 3-dimensional illuminance (%) in a model facility ($H=35$ cm, $W=15$ g)

	Direct	Reflected	Transmitted
Horizontal	42—52	28—17	30
Vertical	65	0	35

Table 3 Attenuation of transmitted illuminance (Klx) with distance

H (cm)	Illuminance	Condition	
		T_4, T_5, T_6 ON	T_4 OFF; T_5, T_6 ON
70	Horizontal	1.0	0.2
	Vertical	5.9	2.3
80	Horizontal	0.9	0.2
	Vertical	4.9	2.0

Table 4 Relation between effective illuminance (Klx) and measured illuminance (Klx)

Mean measured illuminance		Effective illuminance
Horizontal	Vertical	
10.5	9.7	13.0—13.5
12.1	11.7	15.0—15.6
15.9	16.4	19.3—20.0

である。そこで透過光の距離による減衰を調べた。

Table 3 に X1 の領域に関する全透過ランプ (T_4, T_5, T_6) を点燈した場合と、 T_5, T_6 のみを点燈した場合の X1 領域における平均照度の相違を示す。これから実用規模の植物工場でも水平透過光で 1 層目、垂直透過光で 2 層目までのランプの影響を考慮すれば十分であると考えられ、工場規模への適用に問題はないと考えられる。

立体照明で観測される水平照度、垂直照度を従来の平面栽培における照度と関係づけるため、立体照明環境における植物生長を実際に調べた。基準となる平面栽培照度は 18 Klx とした。

任意の光環境下の有効栽培照度 E_e を基準環境下と比較した相対生長量で定義する。Table 4 に示すように実験プラントのランプ点灯数を変化させて垂直照度と水平照度の比率を変え、生長の度合を観測し E_e を求めた。この結果サラダナの場合おおよそ

$$E_e = E_H + \frac{1}{4} \cdot E_V \quad (9)$$

が成立することがわかった。

2.2 節で述べた立体照明計算に必要な係数 $K_{Hd} \sim C_V$ を求める実験結果を示す。まずゾーン I における相互反射光に関する K_{Hd}, K_{Vd} の W, H, N 依存

Fig. 7 W, H, and N dependence of K_{hd} and K_{vd} . K_{hd} and K_{vd} are coefficients of direct incident illuminance

性を Fig. 7 に示す。また透過光に関係する, K_{ht} , K_{vt} の W, H, N 依存性を Fig. 8 に示す。これからつぎの結果が得られる。

(1) 相互反射光はトラフの間隔を狭くすると大きくなり, 植物の大きさにはほとんど影響を受けない。

(2) 透過光は植物が大きくなると共に低下する。トラフの間隔を狭くするほど水平成分は増加するが, 垂直成分は減少する。

(3) トラフの間隔を狭くするほど照度は低下するように思われるが, (1), (2)の結果から実際は透過光の低下よりも相互反射光の増加が上回り, 全体の照度が増加することがある。

(4) 2条植えにすると1条植えに比較して相互反射光の水平成分は増えるけれども垂直成分は減る。また透過光の水平成分は増加するが垂直成分は減少する。水平成分の増加は植物がランプへ接近したためであり, 垂直成分の減少は隣接株により対象植物が遮光されたためである。

つぎにゾーン II に関する係数 C_h, C_v の W, H, N 依存性を Fig. 9 に示す。H が零になった極限を壁面と考えると, Fig. 9 は Fig. 7 で $H \rightarrow 0$ とした結果に近いと考えることができる。

以上 Table 1 の条件下で, 立体照明ゾーン I, II におけるトラフ長さ方向に関する中心部の水平および垂直照度を求める方法が定まった。実際の設計にはトラフ長さ方向の平均照度が必要になるが, これまでの結果に実験的に求めた係数 0.91 を乗ずることにより求められる。この値は (9) 式によって有効栽培照度に変換される。トラフの深さ, ランプの配置などほかの設計変数が変化した場合も, 以上の結果から類推するこ

Fig. 8 W, H, and N dependence of K_{ht} and K_{vt} . K_{ht} and K_{vt} are coefficients of transmitten light intensity. W, H, and N are plant weight, distance between troughs, and number of plant columns in the trough, respectively

Fig. 9 W, H, and N dependence of C_h and C_v . C_h and C_v are coefficients of light intensity at the side wall of a plant factory

とがでしよう。

トラフの反射率は水耕栽培によるよごれのため劣化しやすい。トラフの表面に蒸着フィルムを貼った状態と, 塩ビ槽のままの状態との照度の相違から, トラフの反射率が $\Delta r(\%)$ 変化したときのゾーン I の水平照度, 垂直照度の変化率は次式で推定する。

$$\Delta E_H/E_H = 0.15 \cdot (\Delta r/40) \quad (10)$$

$$\Delta E_V/E_V = 0.21 \cdot (\Delta r/40) \quad (11)$$

最後に立体式植物工場における最適構成, すなわち単位電力, 単位容積当りの生産量を最大にする設計変数についてふれる。経済性の指標 P として

$$P = (E_e \times \text{株数}) / \text{ランプ数} \quad (12)$$

Table 5 Relative production ($/m^3$, electric power) in a 3-dimensional plant factory

$N \backslash L$ (cm)	35	42.5
1	57	42
2	71	52
3	65	48

をとることができる。照度計算法をもとにして L , N を変数にした P の相対値の計算例を **Table 5** に示す。これから2条植えて、ランプ植物間距離が短いほど P は大であるが、Fig. 7 の実験から葉温上昇による生産量や品質の低下を考え、 L として 40 cm は確保することが必要である。

5. おわりに

人工照明による完全制御形立体式植物工場の照明計算法を検討しつぎの主要な結果を得た。

(1) 立体照明によって植物に照射される光は、もよりのランプから来る直接光、ランプの光がトラフにあたり、何回かトラフ間を往復して植物に到達する相互反射光、およびトラフの間を透過して植物に到達する透過光に分類できる。また植物に対する多方向からの光照射、すなわち配光分布は栽培面における水平照度と垂直照度で代表できる。

(2) 直接光はランプの性能と配置によって決まり、ランプの配光曲線を使って計算で求めることができる。相互反射光と透過光は直接光に比例して変化する。その比例係数はトラフの寸法やトラフ間隔などの設計変数に依存し、この関係を実験プラントによって決定した。

(3) 直接光に相互反射光と透過光を加算して、その設計条件下における栽培面の照度が水平照度と垂直照度にわけて得られる。この結果から垂直照度が十分小さい平面式栽培照度（有効栽培照度）に変換するための関係式を実験的に導いた。

以上の結果は実験試料にサラダナ、ランプに高圧ナトリウムランプを選定して得たものであるが、ほかの葉菜類に対しても、またランプの種類、容量などが変わっても応用が可能である。こうして完全制御形立体式植物工場の照明計算法の基礎を確立することができたと考える。

参考文献

- 1) 高辻：植物工場，ブルーボックス，B-410，講談社(1979)
- 2) Philips：Lighting Catalogue, 1021 053 00081 (1982)
- 3) E. Ruthner：High Efficient Plant Radiation with in Ruthner Crop Production System, Acta Horticulturae, **128**, 197~202 (1981)
- 4) 滝内，橋本：放射温度計による葉温測定と植物生体情報との関連，計測自動制御学会論文集, **13**-5, 482/488(1977)