人工光型植物苗工場における消費電力量と電力料金の試算例

大山克己・古在豊樹

千葉大学園芸学部

Estimating Electric Energy Consumption and its Cost in a Transplant Production Factory with Artificial Lighting: A Case Study

Katsumi OHYAMA and Toyoki KOZAI

Faculty of Horticulture, Chiba University, Matsudo, Chiba 271-8510, Japan

Abstract

The objective of this study was to estimate the electric energy consumption used for lighting and air conditioning and its cost in a transplant production factory with fluorescent lamps as the sole light source, using the following dimensions and assumptions: 1) the transplant production factory is 10.2 m wide, 12.0 m long and 3.0 m high, 2) the heat transmission coefficient of the factory walls is $0.38 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, 3) the number of air exchanges of the factory is 0, 0.001, 0.01, 0.03, 0.05 or 0.1 h^{-1} , 4) in the factory, there are three growth cabinets (1.8 m wide, 10.0 m long and 2.5 m high, each) each with 5 modules for holding 1,485 ($=3 \times 5 \times 99$) transplant trays in total, 5) the photosynthetic photon flux (PPF) with 16-hour photoperiod per day is 100, 200 and $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ for the first, second and third 10 days, respectively, by using fluorescent lamps (110 W, 8,960 lm, each). 6) air temperature, relative humidity and CO_2 concentration inside the factory during the photoperiod are, respectively, 25°C , 70% and $800 \mu\text{mol mol}^{-1}$, 7) electricity cost (The Tokyo Electric Power Co., Inc., Feb., 1998) during the daytime (8 a.m. to 10 p.m.) is 14.30 Yen/kWh from July to September, and 13.40 Yen/kWh from October to June, and electricity cost during the night-time is 6.25 Yen/kWh, 8) the average net photosynthetic rate and respiration rate per unit transplant tray area are $0.2 \text{ mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ and $0.02 \text{ mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectively, and 9) the cost of CO_2 is 170 Yen/kg.

Under these conditions, fluorescent lamps generate 50, 99 or 149 kW of heat energy in the factory, respectively, when PPF at the transplant tray surface is 100, 200 or $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. The annual average of the heat transmission rate through the walls is -1.3 kW (heat flows from inside to the outside the factory). The annual average of the heat transfer rate by ventilation is -3.6 , -31.7 , -95.1 , -158.6 or -317.1 kW when the number of air exchanges of the factory is 0.001, 0.01, 0.03, 0.05 or 0.1 h^{-1} , respectively. When where the number of air exchanges is 0.01 h^{-1} , daily electric energy consumption for lighting and air conditioning is 3.4, 7.2 and 11.2 GJ (946, 2,006 and 3.115 kWh) for the PPF values of 100, 200 and $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectively.

The electricity cost for lighting and air conditioning during 30 days is approximately 500–600 Yen per transplant tray. Thus, the electricity cost is approximately 1.8–2.1 Yen per transplant if the number of transplants is 288 per transplant tray. It is concluded that the transplant production under artificial light can be commercialized for many horticultural crops. Ideas for improving lighting and air conditioning systems for further reducing electricity costs are discussed.

緒 言

苗質の良否が移植後の生育、収量および品質に大きく影響をおよぼすことから、遺伝的に優良でかつ病原菌に汚染されていない、良質な苗の需要が急速に高まりつつある。良質な苗を生産するためには、専門的な育苗管理技術が必要とするので、苗生産と栽培を場所的、人的に分離して、苗生産には高度な設備を備えた施設型植物生産システムを利用する傾向が近年、顕著になってきている^{5,6)}。

施設型植物生産システムは、光源の種類により、1) 太陽光のみを利用する、2) 人工光のみを利用する、3) 太陽光と人工光を併用する、3つのシステムに分類できる。本稿では、とくに、人工光のみを利用して苗を生産する施設型植物生産システムを植物苗工場と定義する。植物苗工場は、温室などの自然光を利用した施設型植物生産システムを用いた苗生産と比べて、1) より半閉鎖的な空間内で苗の生産を行うので、病原菌や害虫に汚染されていない苗を、最小限の農薬と肥料で生産することができる、2) 物理環境調節による苗の成長制御が容易になり、温室などの自然光下で苗生産を行う場合と比べて育苗管理がしやすく、育苗管理技術を標準化しやすい、3) 苗の生育に適した一定の環境条件下で苗生産を行うことにより、良質な苗を計画的に大量生産することができる、4) 多段にして、それぞれに光源を設置できるので、苗生産の総面積を植物苗工場の敷地面積よりも大きくできる、といった利点があると考えられる。

人工光を利用した、植物工場のような、施設型植物生産システムにおける植物の生産に関する研究は数多く行われてきた(例えば、高辻(1982)⁹⁾; (社)日本施設園芸協会(1986)⁹⁾; 高辻(1987)¹⁰⁾; 高辻(1989)¹¹⁾; 岩尾・柴田(1994)⁹⁾)³⁾が、人工光下における苗の生産に対象を限定したシステムに関する研究は数少ない。現在、苗生産では、温室などの太陽光のみを利用、もしくは太陽光と人工光を併用した施設型植物生産システムがほとんどであり、植物苗工場のようなシステムは、接ぎ木苗の養生(順化)や組織培養など、高価格で販売できる苗の生産に用いられる程度である。これは、現在の苗の生産コストに電力コストが加算されるために苗の単価が上昇すると考えられているためである。他方、近年、全国的に急速に生産量が増加している、セル成型苗のような小さな植物体の生産においては、植栽密度が高く、環境調節による生育促進効果が大きいので、植物苗工場で生産しても、植物体あたりの電力コストは小さくなることが予想され

る。そこで本稿では、植物苗工場において、セル成型苗の生産を行った場合について消費電力量の試算を行い、今後の植物苗工場の実用化について展望する。

照明器具および空調器具の消費電力量 および CO₂ 供給量の試算方法

1. 照明器具の消費電力量

本稿では、光源として蛍光灯を用いた場合について検討する。これは、蛍光灯では近接照射を行うことができ、その場合、高圧ナトリウムランプなどの高輝度ランプと比べて光利用効率が著しく高い¹²⁾からである。等間隔に配置された蛍光灯が、床面と平行に設置されている場合、必要な蛍光灯の本数 N は、床面上で必要とする平均照度、床面の面積 R_A [m²]、蛍光灯1本あたりの光束 F [lm]、照明率 U および保守率 M から算定できる¹⁴⁾。ただし、植物を生産する場合には、照度ではなく光合成有効量子束密度 P (Photosynthetic photon flux, 以下 PPF) を基準にして蛍光灯の本数を算定する必要がある。同一形式の蛍光灯を用いた場合、PPF と照度には比例関係がある。そこで、本稿では、PPF から照度に換算するための係数 k_L (87.8 lx $\mu\text{mol}^{-1} \text{m}^2 \text{s} = \text{lm } \mu\text{mol}^{-1} \text{s}$) を用いて、蛍光灯の必要本数を算定する。

$$N = \frac{k_L \cdot P \cdot R_A}{F \cdot U \cdot M} \quad (1)$$

照明率 (U , Coefficient of utilization) とは、光源から発散される全光束と被照面へ入射する光束(直接入射する光束と相互反射により間接的に入射する光束との和)との比で、照明器具の配光、位置、育苗を行う部屋もしくは箱の形状(室指数)および各面の反射率などにより異なる。室指数 (R , Room index) は、育苗を行う部屋もしくは箱の長さ R_L [m]、奥行き R_W [m] および高さ R_H [m] から以下の式を用いて算定する。

$$R = \frac{R_L \cdot R_W}{R_H \cdot (R_L + R_W)} \quad (2)$$

一般に、照明器具のメーカーから照明器具、室指数および各面の反射率ごとの照明率が公開されている (Table 1)。ただし、本稿で想定したような形状のグロースキャビネット内での照明率を求める際には誤差が生じることが予想される。正確な試算を行うためには、池田ら(1992)¹³⁾が用いた手法を用いて照明率を計算する必要がある。しかし、本稿では概算を目的としているために、Table 1 の照明率表の値を用いることとする。保守率 (M , Maintenance factor) とは、初期光束とある一定時間点灯した後の光束との比である。ほこり等の多い場所

Table 1 Coefficient of utilization for lighting as affected by reflectances of ceiling, wall and floor, and room index (Matsushita Electric Works, Ltd., FA81064P).

Reflectance	Ceiling	80%				70%				50%				30%				0%
	Wall	70%	50%	30%	10%	70%	50%	30%	10%	70%	50%	30%	10%	70%	50%	30%	10%	0%
	Floor	10%				10%				10%				10%				0%
Room index	Coefficient of utilization(×0.01)																	
0.6	44	32	25	20	42	31	24	19	37	28	22	18	33	25	20	16	13	
0.8	52	41	33	27	49	39	32	26	44	35	29	24	39	32	27	22	18	
1.0	58	47	39	33	55	45	37	32	49	40	34	30	43	36	31	27	22	
1.3	63	53	45	39	60	50	43	38	53	46	40	35	47	41	36	32	27	
1.5	67	58	50	44	63	55	48	42	57	50	44	39	50	45	40	36	30	
2.0	72	64	57	52	69	61	55	50	61	55	50	46	55	50	46	42	35	
2.5	76	68	62	57	72	65	60	55	65	59	55	51	58	54	50	46	39	
3.0	78	72	66	61	74	68	63	59	67	62	58	54	60	56	53	50	42	
4.0	81	76	71	67	78	73	68	64	70	66	63	59	63	60	57	54	46	
5.0	84	79	75	71	80	75	72	68	72	69	66	63	65	63	60	58	49	
7.0	86	82	79	76	82	79	76	73	75	72	70	67	68	66	64	62	53	
10.0	88	85	83	80	84	82	79	77	77	75	73	71	70	68	67	65	56	

で照明器具を使用した場合、蛍光灯へのほこり等の付着により光束が低下しやすいために、保守率 M は小さくなる。

植物苗工場内における1日あたりの照明器具の消費電力量 W_L [J (1 J = 2.8×10^{-4} Wh)] は、照明器具の本数 N 、消費電力 L [W] および1日あたりの明期時間(点灯時間) P_p [s] の積で表される。

$$W_L = N \cdot L \cdot P_p \quad (3)$$

2. 空調器具の消費電力量

照明器具により消費された電力は、光エネルギーに変換され、植物や壁面などに吸収されると熱エネルギーに変換される。また、光に変換されなかった電力は熱エネルギーとして植物苗工場内に放出される。それゆえ、照明器具により消費された電力のほとんどは、熱エネルギーに変換されるので、照明器具からの発熱速度 Q_L [W] は、蛍光灯の本数 N および蛍光灯の消費電力 L [W] の積で表される。

$$Q_L = N \cdot L \quad (4)$$

実際には、光エネルギーの一部(約1%)は、植物の光合成作用により化学エネルギーに変換されるが、ここでは、無視できるほど小さいと仮定する。また、蛍光灯の安定器は、入力された電力の約10%を消費して、熱エネルギーに変換する。蛍光灯の安定器を植物苗工場の外に設置すれば、その分だけ植物工場内での熱の発生量は減少する。

植物苗工場内では、照明器具、植物の呼吸およびファン、加湿器など室内設備から熱が発生し、換気および熱伝導により熱が流入または流出する(Fig. 1)。植物苗工場内の気温を一定に保つためには、空調器具を用いて加熱もしくは冷却することにより、それら熱量の和を0に

する必要がある。一般に、施設内外の表面温度差に起因する、壁面の熱伝導による熱の流入速度(以下、貫流伝熱速度)は、天井、壁および床の施設内面の表面積、熱貫流係数および施設内外の気温差から算定できる¹³⁾。同様に、植物苗工場における貫流伝熱速度 Q_L [W] は、植物苗工場内面の表面積 S [m²]、熱貫流係数 k_e [W m⁻² K⁻¹]、植物苗工場内気温 T_{in} [K] および植物苗工場外気温 T_{out} [K] から算定できる。

$$Q_L = S \cdot k_e \cdot (T_{out} - T_{in}) \quad (5)$$

植物苗工場における換気による熱の流入速度(以下、換気伝熱速度) Q_v [W] は、植物苗工場の換気回数 E [s⁻¹]、植物苗工場内の空気容積 V [m³]、空気の容積から重量に換算するための係数 k_w (乾き空気の密度: 1.29 kg m⁻³ (D. A.)), 植物苗工場内エンタルピー i_{in} [J kg⁻¹ (D. A.)] および植物苗工場外エンタルピー i_{out} [J kg⁻¹ (D. A.)] から算定できる。

$$Q_v = k_w \cdot E \cdot V \cdot (i_{out} - i_{in}) \quad (6)$$

植物苗工場内での熱の発生速度 Q_c [W] は、貫流伝熱速度 Q_L [W]、換気伝熱速度 Q_v [W]、照明器具からの発熱速度 Q_L [W]、植物の呼吸熱の発生速度 Q_p [W]、室内設備からの発熱速度 Q_e [W] の和で表される。

$$Q_c = Q_L + Q_v + Q_L + Q_p + Q_e \quad (7)$$

冷暖房にヒートポンプを利用すると仮定すると、明期における空調器具の消費電力量 W_c [J] は、明期における植物苗工場内での熱の発生速度 Q_c [W]、1日あたりの明期時間 P_p [s] および成績係数 C_p から算定することができる。

$$W_c = \frac{Q_c \cdot P_p}{C_p} \quad (8)$$

Fig. 1 Heat balance of the transplant production factory with artificial lighting.

ここで、成績係数とは、ヒートポンプが単位時間あたりに吸収または発生する熱量とそのために入力した電力との比である。なお、暖房時の成績係数は、冷房時のそれよりも1だけ大きい。

3. 植物苗工場全体の消費電力量

1日あたりの植物苗工場全体の消費電力量 W [J] は、1日あたりの照明器具の消費電力量 W_L [J]、1日あたりの空調器具の消費電力量 W_C [J] および1日あたりの室内設備の消費電力量 W_e [J] の和で表される。

$$W = W_L + W_C + W_e \quad (9)$$

4. CO₂ 供給量

一般に、植物苗工場のような半閉鎖的な施設では、明期における植物体の光合成により、植物苗工場内のCO₂濃度が低下しやすい。植物苗工場内のCO₂濃度を外気CO₂濃度以上のレベルで一定に維持するためには、換気により植物工場外へ排出されるCO₂量および植物体の純光合成量と同じ量のCO₂を補わなければならない。植物苗工場内のCO₂濃度を一定に維持するために必要とされる1日あたりのCO₂供給量 B [kgCO₂] は、育苗期間内での平均純光合成速度 P_n [kgCO₂ m⁻² s⁻¹]、

Table 2 Demand and electric energy charge of optional-time-of-use service
(The Tokyo Electric Power Co., Inc., Feb., 1998)

	Demand charge (Yen)	Electric energy charge (Yen)			
		Daytime (8 a.m. to 10 p.m.)			Night time
		Peak*	Summer*	Not summer*	
Commercial Power (6 kV)	1,560	23.05	20.75	19.85	6.25
Commercial Power (20 kV)	1,510	22.40	20.20	19.30	6.05
Commercial Power (60 kV)	1,460	22.00	19.80	18.85	5.85
High Voltage Power A	1,175	15.85	14.30	13.40	6.25
High Voltage Power B	1,650	15.10	13.60	12.15	6.25
Extra High Voltage Power (20 kV)	1,600	14.50	13.05	11.70	6.05
Extra High Voltage Power (60 kV)	1,550	14.15	12.75	11.40	5.85
Extra High Voltage Power (140 kV)	1,500	13.75	12.40	11.10	5.70

*: Peak: 1 p.m. to 4 p.m. in summer season.

Summer: summer season (July to September).

Not summer: October to June.

Fig. 2 Schematic diagram of the transplant production factory with artificial lighting used in the present calculation.

苗トレイの総面積 A [m^2], 植物苗工場の換気回数 E [s^{-1}], 植物苗工場内の空気容積 V [m^3], 容積から重量へ換算するための係数 k_m (CO_2 の密度: $1.96 \text{ kgCO}_2 \text{ m}^{-3}$), 植物苗工場内 CO_2 濃度 C_{in} [mol mol^{-1}], 植物苗工場外 CO_2 濃度 C_{out} [mol mol^{-1}] および 1 日あたりの明期時間 P_p [s] から, 以下の式を用いて算定できる.

$$B = (A \cdot P_n + k_m \cdot E \cdot V (C_{out} - C_{in})) \cdot P_p \quad (10)$$

5. 電力料金体系

本稿では, 植物苗工場で用いることのできる電力契約種別の例として, 季節別時間帯別電力 (Optional-time-of-use service) を取り上げる (Table 2). 季節別時間帯別電力には, 業務用季節別時間帯別電力 (Commercial Power), 高圧季節別時間帯別電力 A (High Voltage Power A), 高圧季節別時間帯別電力 B (High Voltage Power B) および特別高圧季節別時間帯別電力 (Extra High Voltage Power) がある. 電気料金は, 基本料金 (Demand charge) および電力量料金 (Electric energy charge) からなる. 基本料金は, それぞれの契約種別での 1 kW あたりの料金単価, 契約電力および力率 (供給される電力のうちの有効電力の割合) から算定される. 電力量料金は, それぞれの契約種別での 1 kW あたりの

料金単価および使用した電力量の料金から算定される. また, 四半期ごとの原油, 液化天然ガスなどの平均燃料価格を燃料価格の基準値と比較して上昇または下降した場合には, 電力量料金に燃料費調整額が加算される.

植物苗工場における消費電力量試算の条件

一般に, 恒温室などは, 空調負荷を軽減するために高气密, 高断熱構造になっている. 本稿では, そのような恒温室内で人工光源を用いて苗生産を行った場合の消費電力量の試算を行う. 以下では, 試算の際に想定した条件について述べる.

1) 植物苗工場の大きさは, 長さ 10.2 m , 奥行き 12 m , 高さ 3 m (Fig. 2) である.

2) 植物苗工場の天井, 壁面および床面は, Fig. 2 に示した構造材および断熱材により構成されていて, 熱貫流係数 h_k は $0.38 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ¹²⁾ であり, 植物苗工場の壁面などの熱容量は小さく, 定常的に扱える.

3) 明期における植物苗工場の換気回数は, $0, 0.001, 0.01, 0.03, 0.05$ および 0.1 h^{-1} の場合をそれぞれ想定する.

4) 植物苗工場内では、3つのグロースキャビネットがあり、グロースキャビネットは5つのモジュール(長さ R_L : 1.8m, 奥行き R_w : 10m, 高さ R_H : 0.5m)により構成される。モジュール内の天井、壁および床面における反射率は、それぞれ 80, 70 および 10% である。1つのモジュール内には、苗トレイ (0.3m×0.6m, 288穴) を 99 枚収納できるので、植物苗工場全体では、99 枚×5モジュール×3グロースキャビネット=1,485 枚の苗トレイを用いて育苗できる。

5) 光源として白色蛍光灯(消費電力 L : 110 W)および蛍光灯器具を用いる。照明器具の大きさは無視して、光源と培地面との距離を 0.5m と仮定して、培地面上における PPF を基準に蛍光灯の必要本数を求める。蛍光灯 1 本あたりの光束 F は 8,960 lm, 蛍光灯の保守率 M は 0.74 とする。PPF の設定値は、育苗開始 1-10 日目は $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 11-20 日目は $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 21-30 日目は $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ である。1 日あたりの明期時間 P_p は 57,600 s (16 h) とする。

Table 3 Variables and its value used in the present calculation

Symbol	Variable name	Equation	Value*	unit
A	Transplant tray area	(10)	267.3	m^2
B	Daily amount of CO_2 supply	(10)		kgCO_2
C_{in}	CO_2 concentration inside the factory	(10)	800	$\mu\text{mol mol}^{-1}$
C_{out}	CO_2 concentration outside the factory	(10)	350	$\mu\text{mol mol}^{-1}$
C_p	Coefficient of performance for cooling	(8)	2.5	—
C_h	Coefficient of performance for heating	(8)	3.5	—
E	Number of air exchange	(6), (10)	0, 0.001, 0.01, 0.03, 0.05, 0.1	h^{-1}
F	Luminous flux per fluorescent lamp	(1)	8960	lm
L	Electric energy of lighting	(3), (4)	110	W
M	Maintenance factor	(1)	0.74	—
N	No. of fluorescent lamps	(1), (3), (4)		—
P	PPF	(1)	100, 200, 300	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
P_n	Net photosynthetic rate of the whole transplants	(10)	0.2	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
P_p	Photoperiod	(3), (8), (10)	57600 (16 h)	s
Q_L	Heat generation rate by fluorescent lamps	(4), (7)		W
Q_c	Heat generation rate inside the factory	(7), (8)		W
Q_e	Heat generation rate from the equipment	(7)		W
Q_p	Heat generation rate by respiration of transplants	(7)		W
Q_t	Heat transmission rate through walls by conduction	(5), (7)		W
Q_v	Heat transfer rate by ventilation	(6), (7)		W
R	Room index	(2)		—
R_A	Floor area of the module	(1)	18	m^2
R_H	Height of the module	(2)	0.5	m
R_L	Length of the module	(2)	10	m
R_w	Width of the module	(2)	1.8	m
S	Wall surface area of the factory	(5)	378	m^2
T_{in}	Air temperature inside the factory	(6)	25	$^{\circ}\text{C}$
T_{out}	Air temperature outside the factory	(6)		$^{\circ}\text{C}$
U	Coefficient of utilization	(1)		—
V	Volume of the factory	(6), (10)	367.2	m^3
W	Daily electric energy consumption of the factory	(9)		J
W_L	Daily electric energy consumption of lighting	(3), (9)		J
W_c	Daily electric energy consumption of air conditioner	(8), (9)		J
W_e	Daily electric energy consumption of the equipment	(9)		J
h_t	Heat transmission coefficient	(5)	0.38	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$
i_{in}	Enthalpy of the air inside the factory	(5)		J kg^{-1} (D. A.)
i_{out}	Enthalpy of the air outside the factory	(5)		J kg^{-1} (D. A.)
k_L	Conversion factor from PPF to illuminance	(1)	87.8	$\text{lm } \mu\text{mol}^{-1} \text{s}$
k_m	Conversion factor from volume to mass(density of CO_2)	(10)	1.96	$\text{kgCO}_2 \text{m}^{-3}$
k_w	Conversion factor from volume to mass(density of air)	(6)	1.29	kg m^{-3} (D. A.)

*) Values in this column are given as input data. Other values are calculated using equations(1)~(10) with the input data

6) 植物苗工場内の明期における気温、相対湿度および CO_2 濃度の設定値は、それぞれ 25.0°C 、70% および $800\mu\text{mol mol}^{-1}$ とする。植物苗工場外の気温、相対湿度および CO_2 濃度として、それぞれ東京の月別平均気温⁷⁾、月別平均相対湿度 (Fig. 3) および $350\mu\text{mol mol}^{-1}$ を用いる。暗期には、換気回数 E を 0h^{-1} にして、環境制御は行わない。ファンや加湿器などの室内設備は使用しない ($Q_e=0\text{W}$, $W_e=0\text{J}$)。気温、相対湿度などの環境要素は、植物苗工場内で均一である。

7) 高压季節別時間帯別電力 A (6kV 供給) により電力の供給を受ける (Table 3)。明期のうち 10 時間は、夜

間 (午後 10 時から翌日午前 8 時までの 10 時間) を含む。基本料金は 1kW あたり 1,175 円である。本稿では、最大消費電力を約 10% 大きく見積もって、基本料金を試算することにする。力率は 100% とする。電力量使用料金は、1kWh あたり昼間の夏季 (7-9 月) 14.30 円、その他の季節 13.40 円、夜間 6.25 円である。ただし、燃料費調整額などは考慮しないこととする。

8) 育苗期間内での平均純光合成速度および呼吸速度はそれぞれ $0.2\text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、 $0.02\text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ であるとして、 CO_2 供給量を試算する。

9) CO_2 の価格は 170 円/kg とする。

Fig. 3 Monthly averages of air temperature and relative humidity in Tokyo (1961-1990).

Fig. 4 Heat transmission rate through the walls by conduction as affected by the air temperature outside the factory. The values of air temperature outside the factory used in the present estimation were monthly averages in Tokyo (1961-1990). For the values, see Fig. 3.

植物苗工場における消費電力量の試算結果

1. 照明器具の消費電力量

モジュールの大きさから、室指数 R は、(2)式より約 3 となった。室指数および天井、壁面および床面の反射率を、照明率表 (Table 1) と照らし合わせると、照明率 U は 0.78 である。PPF の設定値が 100, 200 および $300\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ の時の必要な蛍光灯本数は、(1)式の試算結果より、モジュールあたりそれぞれ 30, 60, 90 本と設定した。このことから、PPF を 100, 200 および $300\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ に設定したときの植物苗工場全体での照明器具の消費電力は、それぞれ 49.5, 99.0 および 148.5kW となり、1 日あたりの照明器具の消費電力量 W_L は、(3)式よりそれぞれ 2.9, 5.7 および 8.6 GJ (792,

Fig. 5 Heat transfer rate by ventilation as affected by the air temperature and relative humidity outside the factory. The values of air temperature and relative humidity outside the factory used in present estimation were monthly averages in Tokyo (1961-1990). For the values, see Fig. 3.

Fig. 6 Daily electric energy consumption as affected by the setpoint of PPF at each module, air temperature, and relative humidity outside the factory when the number of air exchanges of the factory was 0.01 h^{-1} . The values of air temperature and relative humidity outside the factory used in the present estimation were monthly averages in Tokyo (1961–1990). For the values, see Fig. 3.

1,584 および 2,376 kWh) となった。

2. 空調器具の消費電力量

PPF を 100, 200 および $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ に設定したときの照明器具からの発熱速度 Q_L は, (4) 式よりそれぞれ 49.5, 99.0 および 148.5 kW となった。貫流伝熱速度 Q_A は, (5) 式より最大の 1 月で 0.3 kW, 最小の 8 月で -2.8 kW , 年平均値は -1.3 kW となった (Fig. 4)。また, 換気回数が 0.01 h^{-1} のときの換気伝熱速度 Q_v は, (6) 式より最大の 8 月で -11.6 kW , 最小の 1 月で -64.0 kW , 年平均値は -31.7 kW となった (Fig. 5)。植物が 1 mol の糖を呼吸により消費する場合, 2,870 kJ の呼吸熱が放出される¹⁶⁾。本稿で想定した育苗期間内での

平均呼吸速度は $0.02 \text{ mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であることから, 苗全体の呼吸熱の発生速度 Q_p は, 0.06 kW となり, 照明器具からの発熱量と比べて無視し得るほど小さい。暗期における植物苗工場内での熱の発生速度 Q_c は, 植物苗工場の換気回数 E を 0 h^{-1} とするために, 明期におけるそれと比べて無視できるほど小さい。PPF の設定値が $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 換気回数が 0.01 h^{-1} のとき, 1 日あたりの空調器具の消費電力量 W_c は, (8) 式より最大の 8 月で 3.7 GJ (1,026 kWh), 最小の 1 月で 1.9 GJ (522 kWh), 年平均値は 2.7 GJ (739 kWh) となった (Fig. 6)。

Fig. 7 Daily amount of CO₂ supply per day as affected by the number of air exchanges of the factory.

Fig. 8 Electricity and CO₂ cost for production of transplants as affected by the number of air exchanges of the factory, air temperature and relative humidity outside the factory. The values of air temperature and relative humidity outside the factory used in the present estimation were monthly averages in Tokyo (1961-1990). For the values, see Fig. 3.

3. 植物苗工場全体の消費電力量

1日あたりの植物苗工場全体の消費電力量 W は、(9)式より PPF の設定値が $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ で換気回数が 0.01 h^{-1} のとき、最大の8月で 4.3 GJ (1185 kWh)、最小の3月で 3.0 GJ (839 kWh)、年平均値は 3.4 GJ (949 kWh) となった (Fig. 6)。換気回数が 0.01 h^{-1} の場合、PPF の設定値がそれぞれ 200 および $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

のとき、1日あたりの植物苗工場全体の消費電力量 W の年平均値は、それぞれ 7.2 GJ および 11.2 GJ ($2,006$ および $3,115 \text{ kWh}$) となった。

4. CO₂ 供給量

苗の純光合成速度は植物苗工場の換気回数 E の影響を受けないとすると、換気回数 E が大きいほど植物苗工場外へ流出する CO₂ 量は増大するために、1日あたりの CO₂ 供給量 B は換気回数の増大につれて増大する (Fig. 7)。換気回数 E が $0, 0.001, 0.01, 0.03, 0.05$ および 0.1 h^{-1} のとき、1日あたりの CO₂ コストは、それぞれ $0.3, 0.4, 0.4, 0.5, 0.6$ および 0.9 円/tray であった。

5. 電力および CO₂ コスト

植物苗工場の換気回数が $0, 0.001, 0.01, 0.03, 0.05$ および 0.1 h^{-1} のときの最大消費電力は、それぞれ $208, 209, 213, 222, 231$ および 313 kW であった。そこで、植物苗工場の換気回数が $0, 0.001, 0.01, 0.03, 0.05$ および 0.1 h^{-1} のときの契約電力を、それぞれ $230, 230, 235, 245, 255$ および 345 kW とした。育苗期間を30日間とすると、苗トレイあたりの電力および CO₂ コストは、換気回数が 0.01 h^{-1} のとき $505\text{--}600$ 円/tray であり、288穴の苗トレイを用いた場合、苗1本あたりの電力および CO₂ コストは、 $1.8\text{--}2.1$ 円/transplant となった (Fig. 8)。

考 察

本稿の想定条件下における電力および CO₂ コストの試算結果において、苗1本あたりの電力および CO₂ コストは $1.8\text{--}2.1$ 円/transplant となったが、この結果は、実際に植物苗工場で苗生産を行った場合よりも高く見積もられていると考えられる。その理由として、保守率および照明率を低く設定したことがあげられる。植物苗工場内では、蛍光灯へのほこりなどの付着による光束の低下は、通常の室内で蛍光灯を用いる場合と比べて小さい。また、蛍光灯と苗との距離を 30 cm にした場合、照明率は1を越える高い値を示す⁷⁾。保守率および照明率を技術的に高めた場合を想定して、それぞれの値を1として試算を行うと、苗トレイあたりの電力および CO₂ コストは、換気回数が 0.01 h^{-1} のとき $330\text{--}402$ 円/tray となる。このとき、288穴の苗トレイでは、苗1本あたりの電力および CO₂ コストは、 $1.2\text{--}1.4$ 円/transplant となり、本稿で示した試算結果と比べて25%ほど安価になる。

モジュール内では、温度、相対湿度などの環境要素の

分布が生じることが予想される。また、セル成型苗個体群の群落内では、環境要素の不均一な分布が生じやすい¹⁵⁾。苗を均一に生育させて、商品化率を向上するためには、モジュール内および苗群落内の環境要素を均一にする必要がある。本稿の想定条件下では、苗トレイあたりの苗数を2倍にすると、苗あたりの電力およびCO₂コストは1/2になるが、苗の均一な生育は得られにくくなると予想される。今後、苗の均一な生育を得るとともに電力およびCO₂コストを削減するために、苗トレイあたりの苗数が多い条件下、すなわち植栽密度が高い条件下での群落内の環境要素を均一にする技術を開発する必要があると考える。

植物苗工場全体の消費電力量を削減するためには、照明器具および空調器具の消費電力量を削減する必要がある。とくに、照明器具の消費電力量は、植物苗工場全体での消費電力量の約70%を占める。照明器具の消費電力量の削減は、植物苗工場の実用化を行う上で、重要な課題であるといえる。照明器具の消費電力量削減のための手法として、以下のような手法が考えられる。

1) 生育段階にあわせてPPFを調節する

本稿では、PPFの設定値を、育苗開始1-10日目は $100\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、11-20日目は $200\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、21-30日目は $300\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ と、段階的に高めて、30日間育苗する場合を想定して、消費電力量を試算した。けれども、PPFの設定値を $300\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ として30日間育苗した場合には、本稿で示した消費電力量の試算結果よりも約30%高くなる。生育初期では、苗の光合成能力は低く、生育のために高いPPFを必要としない。それゆえ、苗の生育に合わせてPPFを高めても、PPFを一定にして苗を生育させた場合と苗の生育がほぼ同等になることが予想され、PPFを低くした分だけの消費電力量の削減ができると考えられる。

2) 照明方式の改善

室指数 R が大きいほど照明率は大きくなる¹⁾。また、天井、壁面および床面の反射率が高いほど、照明率は大きくなる。それゆえ、グロースキャビネットの設計を行う際に、室指数 R が大きく、かつ天井、壁面および床面の反射率を高めることで、蛍光灯の本数、ひいては植物苗工場の消費電力量を削減することが可能である。

3) 植物苗工場内のCO₂濃度を高める

一般に、CO₂濃度の異なる条件下における植物のPPF-純光合成速度曲線は、Fig. 9 のようになっている。このことから、CO₂濃度が $350\mu\text{mol mol}^{-1}$ 、PPFが $500\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ のときの純光合成速度は、CO₂濃度が $800\mu\text{mol mol}^{-1}$ 、PPFが $300\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ のときの純

Fig. 9 Net photosynthetic rate as affected by the PPF at different CO₂ concentrations (Sweetpotato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam., c. v. Beniazuma) single leaf)

光合成速度とほぼ等しくなっていることがわかる。すなわち、PPFが低い条件下での苗の生長量は、CO₂濃度を高めることで、PPFが高い条件下でのそれとほぼ等しくなると考えられる。植物苗工場では、PPFの設定値が低いほど植物苗工場全体での消費電力量を小さくすることができる。植物苗工場内のCO₂濃度を高めること(CO₂施用)は、苗の生産コストを削減する上で効果的であると考えられる。

4) 明期時間とPPFを調節する

低PPF条件下でも、明期時間を長く、あるいはCO₂濃度を高くすることによって、高PPF条件下と同程度の乾物重を得られることが、サラダナセル成型苗で報告されている⁴⁾。また、1日あたりに照射される光量子量が等しい条件下では、サラダナの生長がほぼ等しくなることも報告されている²⁾。他方、深夜電力Bの基本料金および電力量使用料金は、それぞれ300および6.15円(6kV供給の場合)であり、深夜電力Bの基本料金は、Table 2に示した電力契約種別の基本料金のそれと比べて1/2-1/3である。PPFを $400\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ に設定して、深夜電力Bを用いることのできる時間帯(午後11時から翌午前7時まで)にのみ照明器具および空調器具を稼働して苗が生育できるとした場合、苗トレイあたりの電力およびCO₂コストは、換気回数が 0.03h^{-1} のとき264-355円/trayであり、288穴の苗トレイを用いた場合、苗1本あたりの電力およびCO₂コストは、0.9-1.2円/transplantとなり、40%ほど安価になる。

空調器具の消費電力量は、植物苗工場全体での消費電力量の約30%を占める。PPFが高い条件下では、空調

器具の消費電力量も大きくなるので、その削減も重要な課題である。空調器具の消費電力量削減のためには、以下のような手法が考えられる。

1) 植物苗工場の換気回数の調節による冷房負荷の軽減

植物苗工場外の気温よりも植物苗工場内の設定気温が高い場合、熱は植物苗工場内から植物苗工場外へ流出する。植物苗工場の換気は換気装置を用いて容易に調節できるので、照明器具により発生する熱を植物苗工場外に排出する、すなわち冷房負荷軽減のための手段として、植物苗工場の換気量の調節が有用であることが、本稿の試算結果により示されている。しかし、換気を行うことにより病虫害が植物苗工場内に進入する危険が増大する。そのために、換気装置にフィルターを取り付けるなどの対策が必要である。

2) 蛍光灯の安定器などの熱を発生する器具の植物苗工場外への設置

入力された電力のうちの10-20%が蛍光灯の安定器で消費されて、熱として周辺に放出される。蛍光灯の安定器を植物苗工場外に設置することで、冷房負荷の10-20%を削減することができる。

現状でも、人工光を利用した育苗に要する電力コストは、苗1本あたり2円程度である。けれども、上記の考察で述べたような、照明器具および空調器具の消費電力量を削減するための手段を組み合わせることで、本稿での試算結果よりも消費電力量の削減、すなわち電力コストの削減ができ、将来的には電力コストを苗1本あたり1円程度にできると考える。

結 論

本稿で想定したような植物苗工場でセル成型苗の生産を行う場合の電力およびCO₂コストは、換気回数が0.01h⁻¹のとき、約500-600円/trayであることがわかった。288穴の苗トレイを用いた場合、苗1本あたりの電力およびCO₂コストは、1.8-2.1円/transplantになる。照明システム、空調システムなどの改良により電力料金はさらに低下させられる見通しが得られた。従って、人工光下で生産された苗が、その質的な高きゆえに、苗トレイ1枚500-600円高く販売することができれば、それだけで電気料金はまかなえる。実際には、1) 人件費の削減、2) 苗の高品質化、3) 苗の商品化率の向上、4) 農薬、肥料などの削減、などの総合的な効果により販売価格が現状と同じでも、採算に合う場合が多いと考えられる。

本稿では、セル成型苗の生産に着目して試算を行った。栄養繁殖法を用いて増殖した挿し穂を苗化する場合も本稿と同様の手法を用いて試算を行うことができる。苗の増殖時における消費電力量を明らかにするためには、苗の増殖モデルを開発した上で、その際に投入した電力量との関係を明らかにする必要がある。今後、植物苗工場を模した装置内での苗の増殖予測ならびに電力コストの試算を行っていく予定である。

謝 辞

照明計算方法について松下電工株式会社照明R&Dセンターの宮丸正人氏に、電気料金計算方法について東京電力株式会社柏営業所所長の平山隆夫氏に、それぞれ有益な助言を賜った。ここに深く感謝の意を表する。また、千葉大学園芸学部久保田智恵利氏、ならびに渋谷俊夫氏には、本稿作成にあたり有益な示唆をいただいた。深甚なる謝意を表する。

引用文献

- 1) 池田 彰・谷村康宏・中山繁樹・岩尾憲三：蛍光灯を用いた植物工場の照明設計法に関する研究，生物環境調節，30(1)：9-15(1992)
- 2) 石井雅久・伊東 正・丸尾 達・鈴木皓造・松尾幸蔵：短時間高光強度照射下におけるサラダナの生育と生理的特性，生物環境調節，33(2)：103-111(1995)
- 3) 岩尾憲三・柴田孝信：植物工場工学，(株)矢野経済研究所，pp. 1-1(1994)
- 4) 北宅善昭・鈕 根花・大橋マキ・古在豊樹：光合成有効光量子束密度，明期時間およびCO₂施用がサラダナセル成型苗の生長および形態に及ぼす影響，日本農業気象学会1997年全国大会・日本生物環境調節学会第35回集会合同大会講演要旨：pp. 204-205(1997)
- 5) 古在豊樹・佐瀬勘紀・G. Giacomelli・K.C. Ting・W. Roberts：苗生産システムの将来，農業および園芸，65(1)：97-103(1990)
- 6) 古在豊樹：新しい植物生産システムとその研究方向・課題の展望(2)，農業および園芸，71(2)：243-248(1996)
- 7) 国立天文台編：理科年表，丸善，pp. 1054(1997)
- 8) (社)日本施設園芸協会編：植物工場のすべて，養賢堂，pp. 248(1986)
- 9) 高辻正基：植物工場の基礎知識と実際，技術情報センター，pp. 217(1982)
- 10) 高辻正基編：植物工場システム総合技術，(株)シーエムシー，pp. 281(1987)
- 11) 高辻正基編：植物生産システム実用事典，(株)フジ・テクノシステム：pp. 1385(1989)

- 12) 日本建築学会編：建築設計資料集成 1. 環境，
熱，丸善，pp. 97-134(1978).
- 13) 三原義秋編：温室設計の基礎と実際，伝熱，養賢
堂：pp. 30-39(1980).
- 14) 渡辺要編：建築計画原論 I，電灯照明，丸善：pp.
311-355(1962)
- 15) Kim, Y.H., Kozai, T., Kubota, C. and Kitaya, Y.
: Effects of air current speeds on the micro-
climate of plug stand under artificial lighting,
Acta Horticulturae, 440: 354-359(1996)
- 16) Salisbury, F.B. and Ross, C.W.: Plant Physiol-
ogy (forth edition), Respiration, Wadsworth
Publishing Company Belmont, California: pp.
266-288(1992)