閉鎖型苗生産システムにおける消費電力量および電力コストの解析

西村将雄・古在豊樹・久保田智恵利・全 昶厚

千葉大学園芸学部 271-8510 千葉県松戸市松戸 648

Analysis of Electric Energy Consumption and Its Cost for a Closed-type Transplant Production System

Masao NISHIMURA, Toyoki KOZAI, Chieri KUBOTA and Changhoo CHUN

Faculty of Horticulture, Chiba University, 648, Matsudo, Matsudo, Chiba 271-8510, Japan

Abstract

We measured electric energy consumption and estimated electric energy cost of a closed-type transplant production system to investigate how much we can reduce them toward a practical use of the closed-type transplant production system. Sweetpotato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam. cv. Beniazuma) transplants were grown for 15 days under $31/42/68 \text{ W m}^{-2}$ (1-5/6-10/11-15 days after planting, respectively) photosynthetic active radiation with 16 h d^{-1} photoperiod, 28°C air temperature, 75% relative humidity and $920 \mu\text{mol mol}^{-1} \text{ CO}_2$ concentration in the closed-type transplant production system. The amounts of electric energy consumption of lamps, air conditioners, fans and humidifiers during 15 days were 376, 118, 55 and 19 MJ m^{-2} , respectively. The amount of increased chemical energy of transplants was 3 MJ m^{-2} . The electric energy cost per tray of the closed-type transplant production system was estimated as 288 Yen. We estimated reductions of 50% of electric energy consumption of lamps, 20% of air conditioners, 40% of fans, 30% of humidifiers and 7% of electric energy cost without reducing the amount of increased chemical energy of transplants during 15 days by improving the efficiency of lighting, air cooling and circulating systems. From the above estimation, the amount of electric energy consumption and the electric energy cost per tray of the improved closed-type transplant production system will be 288 MJ m^{-2} (50% reduction) and 132 Yen (54% reduction).

Keywords : fluorescent lamp, air conditioner

緒 言

天然資源、人為エネルギー消費量および環境汚染を最小にすることを旨とした苗生産システムとして、閉鎖型苗生産システムが提案されている¹⁾。これは、光に不透明な断熱壁で囲われており、物質およびエネルギーの輸送を制御できる、もしくはそれらの交換が著しく制限されている空間内の人工光源下で苗を生産するシステムと定義されている¹⁾。閉鎖型苗生産システムでは、システム内

の環境を制御しやすいことから、高品質な苗を安定的、短期的に大量生産できると考えられる。

従来、人工光源を用いた植物工場では、電力コストの高さが問題になるとされ²⁾、電力コストの削減を目的として、蛍光灯を用いた照明設計^{3,4)}、パルス光照射光源⁵⁾、夜間電力の利用⁶⁾などに関する研究がサラダナ栽培^{7,8)}などに関して行われている。しかし、人工光源を用いた植物生産においては、栽培に比較して、苗生産の方が光強度および植物当たりの占有面積が低く、生育期間も短いことなどから、植物体当たりの消費電力量および電力コストは少ないと考えられている^{9,10)}。したがって、苗価格が比較的高い(50-100 円/本)果菜苗、ウィルスフリー

2001 年 2 月 14 日受付

2001 年 5 月 25 日受理

苗等に関しては、今後閉鎖型苗生産システムの実用化が進む可能性が高い。

閉鎖型苗生産システムにおける消費電力量および電力コストに関しては、実験室規模のシステムを用いた報告¹⁰⁾がある。本研究では、実用規模の閉鎖型苗生産システムにおいて消費電力量および電力コストを調べ、さらにそれらの今後における削減方法について検討した。

材料および方法

閉鎖型苗生産システム

本研究では、実用化を目的として試作した閉鎖型苗生産システムを用いた。試作した閉鎖型苗生産システム(以下、試作システム)を、壁面における見かけの貫流熱量がゼロとなるように、気温28°Cに制御された室内に設置した。試作システムは、7段の育苗棚、照明器具、空調器具、ファンおよび加湿器から構成される基本モジュール2台(Fig. 1)から構成された。

育苗棚

育苗棚の寸法は、奥行き69 cm×幅267 cm×高さ52 cmであった。1棚あたり、セルトレイ(28 cm×55 cm)

Fig. 1 Schematic diagram of the two basic modules that consist of shelves, lamps, air conditioners, fans and humidifiers in the closed-type transplant production system used in this experiment. The air volume of the system was 165 m³. No. of air exchanges of the system was 0.08 h⁻¹ on days 1-10 and 0.12 h⁻¹ on days 11-15. Arrows in the basic modules indicate the directions of air flows.

を8枚設置できた。

照明器具

1育苗棚あたり、32 W 高周波点灯(以下、Hf)蛍光灯(FHF 32 EX-N, 松下電工(株), 45 W 出力)16 灯および16 W Hf 蛍光灯(FHF 16 EX-N, 松下電工(株), 23 W 出力)3 灯を設置した。1育苗棚あたり、32 W Hf 蛍光灯用安定器(HPEX 32 HF 22 HK-2 EEH, 松下電工(株))8 器および16 W Hf 蛍光灯用安定器(HEX 16 HF 12 HK-2, 松下電工(株))3 器を設置した。蛍光灯の点灯および光合成有効放射(以下、PAR)の調節は、タイマおよびHf 蛍光灯用ライトコントローラ(NQ 21575-322, 松下電工(株))によって試作システム外から行った。

空調器具

一方の基本モジュールには家庭用インバータ空調器具の蒸発器(定格消費電力0.5 kW, RAS-2559 SDR, 東芝(株))2 台, 他方の基本モジュールには業務用空調器具の蒸発器(定格消費電力2.2 kW, AID-3634 BHG, 東芝(株))1 台を設置した。家庭用および業務用空調器具の凝縮器(それぞれ, RAS-4069 AS-DR および ROA-J 634 HT, 東芝(株))は、気温制御された室内(気温28°C)に設置した。

ファンおよび加湿器

1基本モジュールあたり有圧換気扇(CC-V 9060, 三洋電機(株))3 台および超音波式加湿器(WM-BNB 4000, ウェットマスター(株))1 台を設置した。

供試植物

供試植物はサツマイモ(*Ipomoea batatas* (L.) Lam., 品種: ペニアズマ)とした。サツマイモの葉1枚を含む単節を72穴のセルトレイに植え付け、Table 1に示す環境条件下で15日間育苗した。

測定および算定

消費電力量

照明器具、空調器具、ファンおよび加湿器の育苗期間中の単位育苗面積あたりの消費電力量(それぞれ W_L , W_C , W_F および W_H)は、電力計で測定したそれぞれの消費電力量を育苗面積(17.06 m²)で除して求めた。試作システムの消費電力量(W_T (MJ m⁻²))は、 W_L , W_C , W_F および W_H の和とした。

苗の化学エネルギー増加量

育苗期間中の単位育苗面積あたりの苗の化学エネルギー増加量(Q_F (MJ m⁻²))は、単位育苗面積あたりの苗の増加乾物重(g m⁻²)および単位乾物重あたりの化学エネルギー量(m(0.0159 MJ g⁻¹))の積として算定した。mは、

Table 1 Description of the environmental conditions in the system.

Air temperature	28°C
Relative humidity	75%
PAR*	31/42/68 W m ⁻² (1-5/6-10/11-15 days after planting)
CO ₂ concentration	920 μmol mol ⁻¹
Photoperiod	16 h d ⁻¹

* Photosynthetically active radiation on the empty tray surface

Table 2 Electric energy charges used in the present cost estimation (cited from an electric energy charge list from Tokyo Electric Power Co.).

Demand charge	1, 175. 00 (Yen/kW/month)
Electric energy charge	
Peak time	15. 15 (Yen/kWh)
Day time	
Summer season	14. 05 (Yen/kWh)
Other seasons	12. 90 (Yen/kWh)
Night time	6. 10 (Yen/kWh)

Peak time: From 1 p. m. to 4 p. m. in summer season, Day time: From 8 a. m. to 10 p. m., Summer season: From July to September, Other seasons: From October to June, Night time: From 10 p. m. to 8 a. m.

炭水化物(CH₂O)1 モルあたりの化学エネルギー量(0. 477 MJ¹¹⁾)を炭水化物の分子量(30)で除して求めた。

照明器具が射出した PAR(PAR_L)および苗に照射された PAR(PAR_P)

育苗期間中の PAR_L は、ランプの最大光束(4500 および 2300 lm, 松下電工(株)カタログ値), 測定した放射エネルギー(W)および光束(lm)から算定した単位光束あたりの放射エネルギー(3. 04×10⁻³ W lm⁻¹)および各蛍光灯の調光率(1-5 日目平均 31%, 6-10 日目平均 46%, 1-15 日目平均 76%)の積として算定した。PAR_P は, PAR_L と育苗期間中の平均の照明率¹²⁾(0. 42)の積として算定した。ここで、照明率とは、照明器具の射出した光束に対する苗の占有面における光束の百分率である。照明器具の射出した光束は PAR_L を上記の単位光束あたりの放射エネルギーで除して求めた。苗の占有面における光束は、育苗面における光束と育苗面積に対する苗占有面積の比(1-5 日目の平均は 0. 86, 6-15 日目の平均は 1)の積として算定した。

空調器具の成績係数(COP)

COP は W_L, W_H および W_F の和を W_C で除して求めた。

電力料金(C_P)

育苗期間中の C_P は、東京電力(株)の高圧季節別時間帯別電力 A(Table 2)にもとづいて算定した。1 月を 30 日間とし、育苗期間中の基本料金を算定した。明期 16 時間のうち 10 時間の消費電力量は、夜間(午後 10 時-午

前 8 時)の電力量料金にもとづいて、その他の時間の消費電力量は、夏季(7 月-9 月)およびピーク(夏季の午後 1 時-4 時)の電力量料金にもとづいて算定した。

結 果

消費電力量, Q_P, PAR_L, PAR_P および COP

育苗期間中の消費電力量, Q_P, PAR_L および PAR_P を Table 3(Measured energy)に示す。W_L, W_C, W_F および W_H は、それぞれ W_T の 66%, 21%, 10% および 3% を占めた。試作システムの Q_P/W_L は 0. 008 であった。PAR_L/W_L, PAR_P/PAR_L および Q_P/PAR_P は、それぞれ 0. 25, 0. 42 および 0. 08 であった。COP は 3. 8 であった。

C_P

育苗期間中のトレイあたりの C_P を Table 4(16 h d⁻¹ photoperiod)に示す。苗 1 本当たりの C_P は 4. 0 円であった。基本料金、照明器具、空調器具、ファンおよび加湿器の電力料金は、それぞれ C_P の 22%, 51%, 16%, 9% および 2% を占めた。

考 察

上記の結果は、試作システムにおける結果であり、今後の技術的改良により W_T を約 50% 削減(Table 3)し得ると考えられる。以下に W_T の 50% 削減を達成する

Table 3 The amounts of electric energy consumption measured for whole system (W_T), lamps (W_L), air conditioners (W_C), fans (W_F), humidifiers (W_H) of the closed-type transplant production system, increased chemical energy of transplants (Q_P), PAR emitted by lamps (PAR_L) and PAR absorbed by transplants (PAR_P), and estimated amounts based on the proposed improvement (refer to the text for more details).

	Measured values of the present system (MJ m ⁻²)	Estimated values with the proposed improvement (MJ m ⁻²)
W_T	568	288
W_L	376	189
W_C	118	48
W_F	55	37
W_H	19	14
Q_P	3	3
PAR_L	93	43
PAR_P	39	26

Table 4 Estimated electric energy costs (Yen) per tray for 15 days transplant production with 16 or 10 h d⁻¹ photoperiod using the measured energy of the closed-type transplant production system that we used in this experiment.

	Photoperiod	
	16 h d ⁻¹ photoperiod	10 h d ⁻¹ photoperiod
Total electric energy cost (C_P)	288	268
Demand cost	63	101
Electric energy cost of lamps	146	97
Electric energy cost of air conditioners	47	37
Electric energy cost of fans	25	28
Electric energy cost of humidifiers	7	5

方法を具体的に考察する。

W_L の削減

W_T に占める割合が最大であった W_L を、 Q_P を低下させることなく削減するためには、 PAR_L/W_L 、 PAR_P/ PAR_L および Q_P/ PAR_P の3つの比のいずれか、あるいは全てを増大させる必要がある。

PAR_L/W_L は、照明器具の種類によって決定される。試作システムでは、1) ランプ光効率がナトリウムランプに次いで高い、2) 棚の多段化が容易、3) 平行に配列することで、比較的均一な PAR 分布を得やすい、4) 消費電力、ランプ光効率および寿命当たりの価格が安い、などの理由¹⁾から、Hf 蛍光灯を採用した。Hf 蛍光灯の PAR_L/W_L をさらに高めることは、現状では困難であると考えた。よって、 W_L を削減するためには PAR_P/ PAR_L または Q_P/ PAR_P を増大させる必要がある。

PAR_P/ PAR_L は、棚の開口部への反射板の設置などによる照明率の向上により増大し得る。試作システムでは、反射板の設置および改良により、天井面および壁面の反射率を現在の 50 および 60% から、それぞれ 80 およ

よび 70% 程度に高めることで、照明率は 0.60 になると推定される。よって PAR_P/ PAR_L は 0.60 (現状の 1.4 倍) になり得る。

Q_P/ PAR_P の最大値は、 PAR_P に対するクロロプラストが受けた PAR 量の比 (約 0.875)¹¹⁾、クロロプラストにおける PAR から化学エネルギーへの変換比 (I) および光合成産物の化学エネルギー量に対する植物体内に保存された化学エネルギー量の比 (約 0.51)¹¹⁾ の積より求められる。I の最大値は、光合成の量子効率 (1 炭水化物/8 光量子) および光量子と炭水化物のエネルギー量より求められる。ここで、炭水化物のエネルギー量は 477 kJ mol⁻¹¹¹⁾、試作システムの照明器具から射出された光合成に有効な光量子の持つエネルギー量は 224 kJ mol⁻¹ であったので、I の最大値は 0.27 (477/(8×224)) であると考えられる。閉鎖型苗生産システムでは環境制御が容易であることから、純光合成速度を最大にする環境制御 (葉面積指数に合わせた PAR および気流速度制御、水ストレスを与えない水環境制御) を行うことで、I は最大値に近い値になり得る。よって、 Q_P/ PAR_P は、以上の3つの比の積

($0.875 \times 0.27 \times 0.51$)より約0.12(現状の1.5倍)になり得る。

以上より、 Q_p/W_L は0.018($0.25 \times 0.60 \times 0.12$)現状の2.1倍)となり、 Q_p を削減することなく、 W_L を約50%削減し得る。

W_cの削減

最大冷房能力の大きい(6.3kW)業務用空調器具を1台設置する代わりに、最大冷房能力は小さい(3.5kW)が、日本工業規格で定められた標準環境条件下(蒸発器周辺27°C、凝縮器周辺35°C)でのCOPが高い(5.0)家庭用空調器具を2台設置することで、COPは5.0以上になり、 W_c を20%以上削減し得る。ただし、家庭用空調器具は、通常は定格冷房能力(2.5kW)で稼動するので、実際には3台設置する必要がある。また、閉鎖型苗生産システムを実際に運用した場合、凝縮器周辺の年平均気温は上記の35°Cより低くなるので、日本の関東地方での年間のCOPは約6-10を推移し、 W_c をさらに約20-50%削減し得ると考えられる。

W_FおよびW_Hの削減

本研究では3台のファンを常時運転したが、照明器具の発熱量および苗の蒸発散量が少ない暗期および育苗初期(1-5日目)に、1台のファンのみを運転することで、 W_F を約40%削減し得る。本研究で用いた業務用空調器具の除湿量は、家庭用空調器具の約2倍であった。空調器具の変更に伴い試作システムの除湿量は約30%削減されることが考えられることから、 W_H も30%削減し得ると考えられる。

C_pの削減

高圧季節別時間帯別電力Aにおいて、夜間の電力量料金は、昼間のその約半分である。日積算PARを変えずに、 16 h d^{-1} の明期を 10 h d^{-1} (夜間の電力量料金適用時間)に削減することで、 Q_p を削減することなく C_p を削減し得ると考えられる。試作システムではトレイあたりの C_p は268円(7%削減)になり得る(Table 3, 10 h d^{-1} photoperiod)。この場合苗1本当たりの C_p は、288穴、128穴および72穴のトレイを用いた場合、それぞれ0.9円、2.1円および3.7円となり得る。また、基本料金、照明器具、空調器具、ファンおよび加湿器の電力量料金は、それぞれ C_p の38%、36%、14%、10%および2%を占めると考えられる。

本研究では、年間で最も電力量料金の高い時期における C_p を算定した。実際に閉鎖型苗生産システムを運用した場合、年平均でのトレイあたりの C_p は266円であると試算される。

W_TおよびC_p

以上の W_T および C_p 削減方法を適用した場合、 W_T は288 MJ m⁻²(50%削減)に、トレイあたりの C_p は132円(54%削減)になる可能性が示された。この場合、苗1本当たりの C_p は、288穴、128穴および72穴のトレイを用いた場合で、それぞれ0.5円、1.0円および1.8円となる。

以上より、閉鎖型苗生産システムにおける苗1本あたりの電力コストは果菜苗、ウィルスフリーサツマイモ苗などの価格(約50-100円)の約1-2%である考えられる。また、閉鎖型苗生産システムの特徴として水¹³⁾、二酸化炭素¹⁴⁾、農薬および肥料の使用量削減が挙げられており、苗生産コストは温室などに比べて小さくなりうると考えられる。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、数々のご援助を頂いた、新菱冷熱工業の堀切仁氏および平秀樹氏に謹んで感謝の意を表す。

引用文献

- 1) 古在豊樹編：閉鎖型苗生産システムの開発と利用-食料・環境・エネルギー問題の解決を目指して-、養賢堂、pp. 1-191(1999)
- 2) 中川靖夫：エネルギー問題のクリアが課題、日本園芸施設協会編：植物工場のすべて、富民協会、pp. 59-60(1986)
- 3) 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型植物工場の開発-近接照明による照明電力の低減-、植物工場学会誌、3(2)：111-123(1992)
- 4) 池田 彰、谷村泰宏、中山繁樹、岩尾憲三：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、生物環境調節、30(1)：9-15(1992)
- 5) 橋本 康、丹生谷太、易 佑林、仁科弘重、安西良矩、山崎広義、中山繁樹、池田 彰：パルス光照射光源によるサラダナの光合成特性、生物環境調節、25(3)：127-129(1987)
- 6) Okano, T., Hoshi, T. and Sekiyama, T.: Vegetable growth and energy consumption in a vegetable factory using off-peak electricity, Acta Horticulturae, 229: 353-359(1988)
- 7) 池田 彰、中山繁樹、北谷善昭、矢吹萬寿：植物工場における物質生産の基礎的研究(1)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(3)：107-112(1988)
- 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：蛍光ランプを用いた人工光型植物工場の研究(その1)栽培システムの

- 諸元ならびに性能試験結果, 生物環境調節, 29 (2) : 81-88(1991)
- 9) Dreesen, D. R. and Langhans, R. W. : Research Update, In : Hamrick, D.(Ed.), 'GrowerTalks' on Plugs, Geo. J. Ball, pp. 4-6(1990)
- 10) 大山克己, 吉永慶太, 古在豊樹: 閉鎖型苗生産システムのエネルギーおよび物質収支(第1報)-エネルギー収支-, 植物工場学会誌, 12(3) : 160-167 (2000)
- 11) Beadle, C. L. and Long, S. P. : Photosynthesis-Is It Limiting to Biomass Production?, Biomass, 8 : 119-168(1985)
- 12) 関 重広: 照明工学講義, 東京電機大学出版局, pp. 115-121(1987)
- 13) 大山克己, 吉永慶太, 古在豊樹: 閉鎖型苗生産システムのエネルギーおよび物質収支(第2報)-水収支-, 植物工場学会誌, 12(4) : 217-224(2000)
- 14) 吉永慶太, 大山克己, 古在豊樹: 閉鎖型苗生産システムのエネルギーおよび物質収支(第3報)-二酸化炭素収支-, 植物工場学会誌, 12(4) : 225-231 (2000)