

実用規模閉鎖型苗生産システムのエネルギー収支

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

Energy Balance of a Commercial Scale Closed 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

The energy balance of a commercial scale closed transplant production system was investigated to estimate the energy consumed by the system and to find the optimal strategies of environmental control of the system. The system consisted of a transportation/irrigation machine, four basic modules and thermal insulation wall. The basic module consisted of shelves, lamps, air conditioners, fans and a humidifier. Sweetpotato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam. cv. Beniazuma) transplants were grown for 15 days under conditions of 140/200/320 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (1-5/6-11/12-15 days after planting, respectively) photosynthetic photon flux with 16 h d^{-1} photoperiod, 28°C air temperature, 74% relative humidity and 990 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ CO_2 concentration in the system. The total electric energy consumed by the system during 15 days when four basic modules operated was 764 MJ m^{-2} . The system's lamps, air conditioners, fans, humidifiers and transportation/irrigation machine consumed 78.4%, 10.6%, 7.1%, 0.7% and 3.2% of the total electric energy consumed by the system, respectively. The electric energy cost per transplant, depending on the seasonal electric energy charge, was 2.5-2.6 Yen. The ratio of net chemical energy fixed by transplants to the total electric energy consumed by the system was estimated at 0.006 when the transplants grew normally. The coefficient of performance of the system was 8.0 and about 2 times higher than that described in the catalog of the air conditioner. The maximum percentage of heat energy transported by ventilation and penetrated through walls and floor to the cooling load of the system was estimated at 0.18% in summer and -25% in winter.

Keywords : electric energy consumption, electric energy cost, energy utilization efficiency, COP

緒 言

21世紀においては、環境汚染および食料と天然資源の不足が現在より深刻になると懸念されている。これらの問題を解決するには、植物現存量の増大およびその最

大限の持続的利用が地球規模で必要である¹⁾ことから、従来に比較して大量の高品質苗が必要になる²⁾。他方、現在、苗生産の多くが行なわれている、温室などの自然光を利用した苗生産システムでは、苗の生育は天候に大きく左右される。また、苗質の良否が、移植後の生育、収量および品質に大きな影響を及ぼすことから、高品質な苗を生産するために、専門的な育苗管理技術と資源が必要とされている。したがって、今後、大量に必要になると考えられる高品質な苗を、省資源的、省エネルギー的

2001年5月25日受付

2001年8月20日受理

に、かつ環境汚染を最小にして生産するためには、新たな苗生産システムの開発が必要になる。

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¹⁾が提案されている。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¹⁾と定義されている。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。すでに閉鎖型苗生産システムの開発および実用化を目指し、実験室規模の閉鎖型苗生産システムのエネルギー²⁾、水⁴⁾および二酸化炭素収支⁵⁾が報告されている。また、実用規模の閉鎖型苗生産システムでの使用を想定した基本モジュールが試作され、その消費電力量および電力コストの削減方法⁶⁾についても検討されている。ここで基本モジュールとは、多段の育苗棚、照明および空調器具等から構成される、環境制御可能な最小単位の苗生産用の装置である。本研究では、筆者ら⁶⁾の研究結果をもとに消費電力量の削減を図った基本モジュールおよび新たに導入した運搬・かん水装置等から構成される実用規模閉鎖型苗生産システムを試作し、そのエネルギー、資源消費量の把握および環境調節技術の確立のための知見を得ることを目的として、エネルギー収支を解析した。

材料および方法

1. 供試植物材料および育苗環境条件

供試植物はサツマイモ (*Ipomoea batatas* (L.) Lam., 品種：ベニアズマ)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(日清紡績(株))に充填された培地(ナプラ養土, ヤンマー農機(株))に植え付け、Table 1に示す環境条件下で15日間育苗した。運搬・かん水装置を用いて、1-9日目には1日1回、10-15日目には1日2回養液(園試処方)を底面からかん水した。

Table 1 Environmental condition in the closed transplant production system.

Air temperature	28±1°C
Relative humidity	74±6%
PPF*	140/200/320 μmol m ⁻² s ⁻¹ (1-5/6-11/12-15 days after planting, respectively)
Photoperiod	16 hd ⁻¹
CO ₂ concentration	994±35 μmol mol ⁻¹

*Photosynthetic photon flux on the tray surface.

1セルあたりのかん水量は、1日目1ml、2-3日目2ml、4日目3ml、5-8日目5ml、9日目6ml、10-11日目8ml、13日目9ml、14日目11mlおよび15日目13mlであった。

2. 閉鎖型苗生産システム

本研究では、試作した実用規模の閉鎖型苗生産システム(Fig. 1)⁷⁾を用いた。実用規模の閉鎖型苗生産システム(以下、閉鎖型システム)を断熱壁、基本モジュール4台および運搬・かん水装置1台で構成した。断熱材として、壁面および天井面にはポリスチレン(厚さ75mm)を、床面にはポリウレタン(厚さ59mm)を用いた。

基本モジュールを育苗棚、照明器具、空調器具、ファンおよび加湿器で構成した。基本モジュール1台あたり育苗棚を7段設置した。育苗棚の寸法は、奥行き69cm×幅267cm×高さ52cmであった。1育苗棚あたり、セルトレイ(28cm×55cm)を8枚設置した。1育苗棚あたり、32W高周波点灯(以下、Hf)蛍光灯(FHF32EX-N, 松下電器(株), 45W出力)16灯および16W Hf蛍光灯(FHF16EX-N, 松下電器(株), 23W出力)3灯を設置した。1育苗棚あたり、32W Hf蛍光灯用安定器(HPEX32HF22HK-2EEH, 松下電工(株))8器および

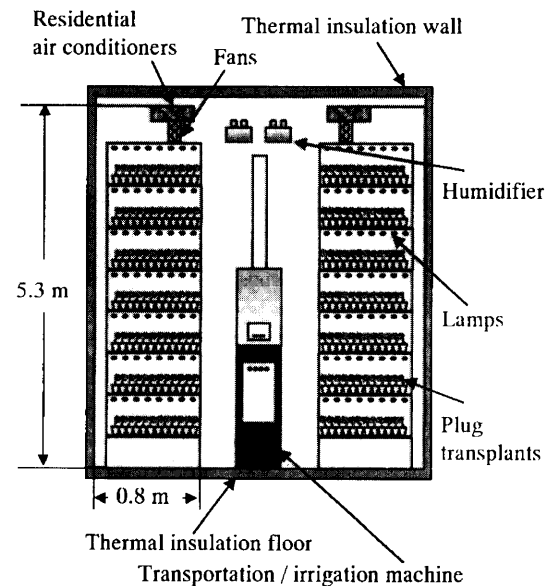


Fig. 1 Schematic diagram of the commercial scale closed transplant production system that has a transportation/irrigation machine and four basic modules consisting of shelves, lamps, air conditioners, fans and humidifiers. The air volume of the system was 112.5m³. No. of air exchanges of the system was 0.1h⁻¹.

16 W Hf 蛍光灯用安定器 (HEX16HF12HK-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光量子束 (以下, PPF) は, 閉鎖型システム外から制御した。

基本モジュール 1 台あたり, 家庭用インバータ空調器具の室内機 (F259TSX-W, ダイキン工業(株)), 定格消費電力 0.56 kW を 3 台設置した。空調器具の室外機 (RA259SX, ダイキン工業(株))3 台は, 屋外 (育苗期間中の平均気温 26°C) に設置した。

基本モジュール 1 台あたり有圧換気扇 (CC-V9060, 三洋電機(株))3 台および超音波式加湿器 (WM-BNB4000, ウェットマスター(株))1 台を設置した。明期のファンの稼働台数は, 1-5 日目は 1 台, 6-15 日目は 3 台とした。暗期のファンの稼働台数は 1 台とし, 間欠運転 (5 分稼働, 10 分休止) を行った。

運搬・かん水装置を, 運搬装置, かん水装置, 各装置の制御盤および付属のトランスフォーマで構成した。運搬・かん水装置のうち, 運搬装置, かん水装置および運搬装置の制御盤を閉鎖型システム内に設置した。かん水装置の制御盤および付属のトランスフォーマは, システム外に設置した。運搬・かん水装置へのトレイの出入庫およびかん水指示は, 閉鎖型システム外から行った。

閉鎖型システム内の気圧を閉鎖型システム外の気圧よりも約 40 Pa 高く維持するために, 屋外の空気を気温 30°C に制御した後, 閉鎖型システム内へ送風した。

3. 閉鎖型システムのエネルギー収支

育苗期間中の閉鎖型システム内の環境は Table 1 の環境条件に維持された。Fig 2 に閉鎖型システムのエネルギー収支の概念図を, Table 2 にエネルギー収支の各項の記号と変数名を示す。

照明器具の消費電力量 (W_L) は, 照明器具が射出した放射量および照明器具と閉鎖型システム内空気間の顕熱エネルギー輸送量 (Q_{SL}) の和に等しい。本研究では, 棚内の壁面に照射された放射および苗によって反射された放

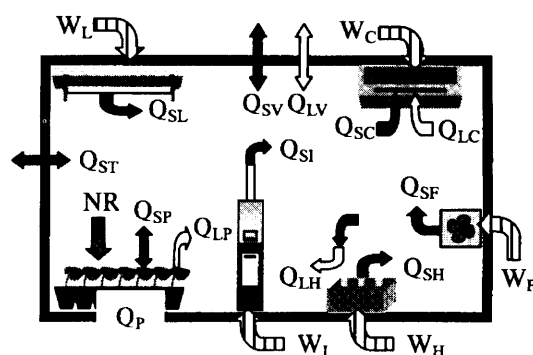


Fig. 2 Conceptual diagram of the energy balance of the commercial scale closed transplant production system. Striped, black, white and gray arrows indicate electric energy, sensible heat and latent heat energy and net radiation, respectively. The energy consumed outside of the system ($W_I - Q_{SI}$) is not included in this energy balance.

Table 2 Variables and their symbols used in the conceptual diagram of the energy balance (Fig. 2).

Symbol	Variable name
W_T	Total electric energy consumption
W_L	Electric energy consumption of lamps
W_C	Electric energy consumption of air conditioners
W_F	Electric energy consumption of fans
W_H	Electric energy consumption of humidifiers
W_I	Electric energy consumption of transportation/irrigation machine
Q_{SL}	Sensible heat transported between lamps and air inside the system
NR	Net radiation on the transplants
Q_P	Net chemical energy fixed by transplants
Q_{SP}	Sensible heat transported between transplants and air inside the system
Q_{LP}	Latent heat transported between transplants and air inside the system
Q_{SC}	Sensible heat transported to outside of the system by air conditioner
Q_{LC}	Latent heat transported to outside of the system by air conditioner
Q_{SF}	Sensible heat transported between fans and air inside the system
Q_{SH}	Sensible heat transported between humidifier and air inside the system
Q_{LH}	Sensible heat exchanged for latent heat by humidification
Q_{SI}	Sensible heat transported between transportation/irrigation equipment and air inside the system
Q_{ST}	Sensible heat penetrated through walls and floor
Q_{SV}	Sensible heat transported by ventilation between inside and outside of the system
Q_{LV}	Latent heat transported by ventilation between inside and outside of the system

射は最終的に顕熱エネルギーに変換されるとの仮定により、そのエネルギー量を Q_{SL} に含めた。したがって、照明器具が射出した放射量を、苗における純放射量(NR)に等しいと仮定した。

NR は、苗の化学エネルギー増加量(Q_P)、苗と閉鎖型システム内空気間の顕熱エネルギー輸送量(Q_{SP})および苗と閉鎖型システム内空気間の潜熱エネルギー輸送量(Q_{LP})の和に等しい。

ファンの消費電力量(W_F)は、ファンの運転により閉鎖型システム内の空気が得た顕熱エネルギー量(Q_{SF})に等しい。これは、 W_F は、最終的に熱エネルギーに変換されるとの仮定にもとづく。

加湿器の消費電力量(W_H)は、加湿器の運転により閉鎖型システム内の空気が得た顕熱エネルギー量(Q_{SH})に等しい。これは、 W_H は最終的に熱エネルギーに変換されるとの仮定にもとづく。また、加湿器により、閉鎖型システム内空気中の顕熱エネルギーと潜熱エネルギーの交換が起こる。この交換量を Q_{LH} とする。ここで、加湿器により放出された水は、全て閉鎖型システム内空気中で蒸発すると仮定した。

閉鎖型システム内に設置された、運搬装置、かん水装置および運搬装置の制御盤の消費電力量は、閉鎖型システム内空気間との顕熱エネルギー輸送量(Q_{SI})に等しい。これは、運搬装置、かん水装置および運搬装置の制御盤の消費電力量は、最終的に熱エネルギーに変換されるとの仮定にもとづく。運搬・かん水装置の消費電力量(W_I)の内、閉鎖型システム外に設置されたかん水装置の制御盤および付属のトランスフォーマで消費された電力は、閉鎖型システム外で熱エネルギーに変換されるが、閉鎖型システム内のエネルギー収支項目には影響を及ぼさないで、ここでは考慮しない。

空調器具の消費電力量(W_C)と閉鎖型システムの成績係数(COPs)の積は、空調器具による閉鎖型システム内外間の顕熱エネルギー輸送量(Q_{SC})と潜熱エネルギー輸送量(Q_{LC})の和に等しい。

閉鎖型システム内空気中への顕熱エネルギー量($Q_{SL} + Q_{SP} + Q_{SF} + Q_{SH} + Q_{SI} - Q_{LH}$)は、閉鎖型システム内外間の顕熱エネルギー輸送量($Q_{SC} +$ 換気による閉鎖型システム内外間の顕熱エネルギー輸送量(Q_{SV}) + 壁面における貫流熱量(Q_{ST}))に等しい。閉鎖型システム内空気中への潜熱エネルギー輸送量($Q_{LP} + Q_{LH}$)は、閉鎖型システム内外間の潜熱エネルギー輸送量($Q_{LC} +$ 換気による閉鎖型システム内外の潜熱エネルギー輸送量(Q_{LV}))に等しい。

測定および算定方法

閉鎖型システムには基本モジュールを4台設置したが、エネルギー収支項目の測定は、基本モジュール1台のみが稼動した時を対象とした。基本モジュール1台が稼動した時の閉鎖型システムのエネルギー収支を測定および算定し、その結果をもとに、基本モジュールが4台稼動した時の閉鎖型システムのエネルギー収支を推定した。

1. 基本モジュール1台稼動時のエネルギー収支の測定および算定方法

W_L , W_C , W_F , W_H および W_I (MJ m^{-2}) は、積算電力計(M2B, 三菱電機(株))で測定した育苗期間中の各器具の消費電力量(MJ)を、閉鎖型システムの床面積(20.75 m^2)で除して求めた。総消費電力量(W_T)は W_L , W_C , W_F , W_H および W_I の和とした。

NR は、放射収支計(C201R, LASTM, 精度3%)を用いて測定したエネルギーフラックス(W m^{-2})、トレイ面積(8.53 m^2)および育苗期間の積を床面積で除して求めた。放射収支計からトレイ面を見る形態係数が、0.90-0.95になる位置⁹⁾でNRを測定した。 Q_{SL} は、 W_L とNRの差として求めた。

Q_P は育苗期間中の単位床面積あたりの苗の増加乾物重(g m^{-2})と単位乾物重あたりの化学エネルギー量(0.0159 MJ g^{-1})の積として算定した。苗の乾物重は、育苗開始時および終了時に任意の56個体をサンプリングし、恒温乾燥機(DV600, ヤマト科学(株))内において気温 80°C で3日以上乾燥させた後に電子天秤(AW320, (株)島津製作所)を用いて測定した。単位乾物重あたりの化学エネルギー量は、炭水化物(CH_2O)1モルあたりの化学エネルギー量($0.477 \text{ MJ}^9)$ を炭水化物の分子量(30)で除して求めた。 Q_{LP} は、 28°C における水の蒸発潜熱(2.43 MJ kg^{-1})と単位床面積あたりの蒸発散量(kg m^{-2})の積として算定した。蒸発散量(kg m^{-2})は、運搬・かん水装置に設置された電子天秤(HP-20K, (株)エー・アンド・デイ)を用いて測定した。かん水前後のトレイ重量の差とトレイ数(56)の積として求めた。 Q_{SP} は、NRから Q_P と Q_{LP} を減じて求めた。 Q_{SF} および Q_{SH} は、それぞれ W_F および W_H に等しいとした。

Q_{SI} は、運搬装置、かん水装置および運搬装置の制御盤の消費電力量に等しい。運搬装置、かん水装置および運搬装置の制御盤の消費電力量は、運搬・かん水作業に必要なとされた電力量と運搬装置の制御盤の待機電力量の和とした。運搬装置の制御盤の待機電力量は、仕様書に記載された消費電力から、運搬・かん水装置の待機電力量

Table 3 Electric energy charges used in the present cost estimation (cited from an electric energy charge list of Tokyo Electric Power Co.).

Demand charge	1,175.00 (Yen kW ⁻¹ per month)
Electric energy charge	
Peak time	15.15 (Yen kWh ⁻¹)
Day time	
Summer season	14.05 (Yen kWh ⁻¹)
Other seasons	12.90 (Yen kWh ⁻¹)
Night time	6.10 (Yen kWh ⁻¹)

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.

の40%であると推定した。ここで待機電力とは、運搬装置、かん水装置の制御盤および付属のトランスフォーマで常時消費されていた電力を意味する。

Q_{LH} は、28°Cにおける水の蒸発潜熱と育苗期間中の単位床面積あたりの加湿量(kg m⁻²,)の積として算定した。加湿量は、加湿用貯水タンク内の水重量変化から求めた。

Q_{SV} は、閉鎖型システム内へ流入する空気の温度(30°C)と閉鎖型システム外へ流出する空気の温度(28°C)の差(2°C)、閉鎖型システム内乾燥空気重量(125.9 kg)、閉鎖型システム内乾燥空気の定圧比熱(1.006×10⁻³ MJ/kg°C)、閉鎖型システムの換気回数(0.1 h⁻¹)および育苗期間(360 h)の積を床面積で除して求めた。 Q_{LV} は、単位床面積あたりの閉鎖型システム内外の換気による水輸送量(kg m⁻²)と28°Cにおける水の蒸発潜熱の積として求めた。換気による水輸送量は、蒸発散量と加湿量の和から空調器具による除湿量を減じて求めた。 Q_{ST} は壁面および天井面からの貫流熱量と床面からの貫流熱量の和から求めた。壁面および天井面からの貫流熱量は、壁面および天井床面の熱貫流係数(1.08 kJ m⁻² h⁻¹°C⁻¹および1.33 kJ m⁻² h⁻¹°C⁻¹)、面積(47.85 m²および20.75 m²)、育苗期間(360 h)および閉鎖型システム内外の平均気温差(2.4°C、内気温>外気温)の積を床面積で除して求めた。床面からの貫流熱量は、床面の熱伝導率(1.33 kJ m⁻² h⁻¹°C⁻¹)、面積(20.75 m²)、育苗期間(360 h)および閉鎖型システム内気温と閉鎖型システム外の土の温度差(8.3°C、内気温>外温度)の積を床面積で除して求めた。

Q_{SC} は、 Q_{SL} 、 Q_{SP} 、 Q_{SF} 、 Q_{SH} および Q_{SI} の和から Q_{LH} 、 Q_{SV} および Q_{ST} を減じて求めた。 Q_{LC} は、28°Cにおける水の蒸発潜熱および育苗期間中の単位床面積あたりの空調器具の除湿量(kg m⁻²)の積として算定した。空調器具の除湿量(kg)は、貯水タンク内のドレイン水重量変化より求めた。

閉鎖型システムのエネルギー利用率は、 Q_p を W_T で

除して求めた。 COP_s は、 Q_{SC} と Q_{LC} の和を W_C で除して求めた。

2. 基本モジュール4台稼働時のエネルギー収支の推定方法

Q_{ST} 、 Q_{SV} 、 Q_{LV} は基本モジュール1台稼働時の値と等しいとした。 W_L 、 Q_{SL} 、 NR 、 Q_{LC} 、 Q_p 、 Q_{SP} 、 Q_{LP} 、 W_F および Q_{SF} は、基本モジュール1台稼働時のそれらの値の4倍とした。 W_I は、基本モジュール1台あたりのかん水に必要とされる電力量と基本モジュール台数(4)の積に待機電力量を加えて求めた。 Q_{LH} は、 Q_{LC} 、 Q_{LV} の和から Q_{LP} を減じて求めた。 W_H は、基本モジュール1台稼働時の W_H と基本モジュール4台稼働時の Q_{LH} の積を基本モジュール1台稼働時の Q_{LH} で除して求めた。

Q_{SC} は、 Q_{SL} 、 Q_{SP} 、 Q_{SF} 、 Q_{SH} および Q_{SI} の和から Q_{LH} 、 Q_{SV} および Q_{ST} を減じて求めた。 W_C は Q_{SC} および Q_{LC} の和を基本モジュール1台稼働時の COP_s で除して求めた。

3. 電力量料金

育苗期間中の電力量料金は、東京電力(株)の高圧季節別時間帯別電力A(Table 3)にもとづいて算定した。1ヶ月を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)もしくはその他の季節(10月-6月)の電力量料金にもとづいて算定した。

結 果

閉鎖型苗生産システムのエネルギー収支の各項を Fig. 3 に示す。閉鎖型システム内空気中へ輸送されるエネルギー量を正の値で示す。

1. 基本モジュール1台稼働時のエネルギー収支

育苗期間15日間における W_T は208.8 MJ m⁻² であ

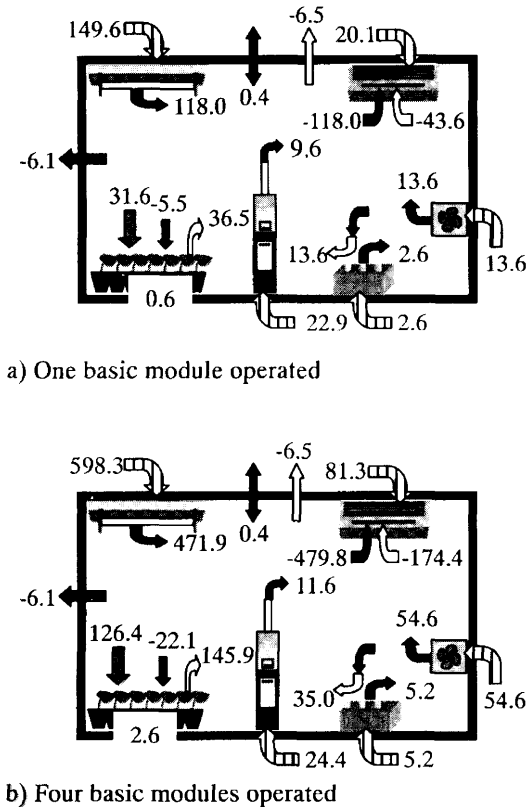


Fig. 3 Energy balance of the commercial scale closed transplant production system.

a) One basic module operated. b) Four basic modules operated.

Striped, black, white and gray arrows indicate electric energy, sensible heat and latent heat energy and net radiation, respectively. Unit of each value is MJ m⁻².

った。育苗期間15日間における W_L, W_C, W_F, W_H および W_I は、それぞれ W_T の71.6%, 9.6%, 6.5%, 1.2% および 11.0% を占めた。暗期における W_T は、明期におけるその6.2%であった。苗1本あたりの総消費電力量は1.07MJ (3.4-3.6円)であった。

育苗期間15日間における W_I は22.9MJ m⁻²であった。育苗期間15日間における運搬・かん水装置の待機電力量は W_I の97% を占めた。

育苗期間15日間における空調器具によって輸送された熱エネルギーの顕熱比(Q_{sc}/(Q_{sc}+Q_{Lc}))は、0.73であった。COP_sは8.0であった。閉鎖型システムのエネルギー利用効率は0.003であった。

PPFが140μmol m⁻²s⁻¹時の1日あたりの W_L, W_C, W_F, W_H および W_I は、それぞれ7.9MJ m⁻², 1.2MJ

m⁻², 0.4MJ m⁻², 0.2MJ m⁻² および1.5MJ m⁻²であった。PPFが200μmol m⁻²s⁻¹時のそれらは、それぞれ9.6MJ m⁻², 1.3MJ m⁻², 1.2MJ m⁻², 0.1MJ m⁻² および1.5MJ m⁻²であった。PPFが320μmol m⁻²s⁻¹時のそれらは、それぞれ13.1MJ m⁻², 1.6MJ m⁻², 1.2MJ m⁻², 0.3MJ m⁻² および1.6MJ m⁻²であった。

2. 基本モジュール4台稼働時のエネルギー収支

育苗期間15日間における W_T は763.7MJ m⁻²であった。育苗期間15日間における W_L, W_C, W_F, W_H および W_I は、それぞれ W_T の78.4%, 10.6%, 7.1%, 0.7% および3.2%を占めた。苗1本あたりの総消費電力量は0.97MJ (2.5-2.6円)であった。

閉鎖型システムのエネルギー利用効率は0.003であった。なお、PPFが140μmol m⁻²s⁻¹時の1日あたりの W_L, W_C, W_F, W_H および W_I は、それぞれ31.7MJ m⁻², 4.2MJ m⁻², 1.6MJ m⁻², 0.4MJ m⁻² および1.6MJ m⁻²であった。PPFが200μmol m⁻²s⁻¹時のそれらは、それぞれ38.4MJ m⁻², 4.8MJ m⁻², 4.7MJ m⁻², 0.1MJ m⁻² および1.6MJ m⁻²であった。PPFが320μmol m⁻²s⁻¹時のそれらは、それぞれ52.4MJ m⁻², 6.1MJ m⁻², 4.7MJ m⁻², 0.7MJ m⁻² および1.6MJ m⁻²であった。

考 察

育苗期間15日間において、W_LはW_Tの約70-80%を占めた。この結果は、実験室規模の閉鎖型システムで得られた結果⁹⁾とほぼ同じであった。W_Lは、棚の開放部への反射板の設置による照明率⁹⁾の向上などにより、約50%削減しうる⁶⁾。しかし、閉鎖型システムでは、運搬・かん水装置により苗の入出庫を行うために、棚の前面が開放されている⁷⁾。セルトレイを反射板つきの容器に収め、その容器を棚に設置することで、装置を複雑化することなく W_Lの削減が可能であると考えられる。W_F および W_H は、筆者ら⁶⁾が推定した、消費電力量削減後の閉鎖型苗生産システムのそれらとほぼ同じ値であった。

基本モジュール1台が稼働した時の W_I は W_T の11% を占めた。運搬・かん水装置の待機電力量は、W_I の97% を占め、実際に運搬・かん水作業で消費された電力量は、W_I の3%であった。育苗期間に比べて運搬・かん水装置の動作時間が短いため、運搬・かん水作業に必要なとされる電力量は小であったと考えられる。運搬・かん水装置の待機電力は約380Wであった。今後、待機電力の少ない制御盤の開発が必要である。他方、今後閉鎖型システムに導入する予定である自律分散制御に

よる苗生産¹²⁾では、苗の生育状態に合わせて、より適した環境条件の棚へトレイを移動する。本研究では、消費電力量の削減を図るために、育苗期間中の運搬・かん水装置の動作を最小限にとどめていた。しかし、運搬・かん水作業に必要とされる電力量が少ないことが判明したので、今後、苗の生育促進が期待できる場合は、かん水およびトレイ移動を積極的に行うべきである。

COP_sは8.0であり、カタログに示された標準条件下(蒸発器周辺27°C、凝縮器周辺35°C)での空調器具のCOP(4.5)の約2倍であった。一般に、蒸発器周辺の気温が凝縮器周辺より高くなるほど、冷房時の空調器具のCOPは大となる。標準条件では、蒸発器周辺の気温は凝縮器周辺の気温よりも8°C低い。一方、本研究の条件下では、それが2°C高かったために、COP_sが大であったと考えられる。本研究では明期を夜間に設定し、かつ蒸発器周辺の気温が28°Cと高かったことが、蒸発器周辺の気温が凝縮器周辺の気温よりも高くなった原因である。関東地方では、夏季においても、夜間の凝縮器周辺の気温は、標準条件下の気温よりも低くなる場合が多い。よって、閉鎖型システム内の気温を本研究と同様に制御した場合、明期を夜間に設定することで、COP_sは年間を通じてカタログのCOP(4.5)よりも高く推移すると考えられる。

基本モジュール4台稼働時のQ_{SP}は-22.1 MJ m⁻²であり、システム内空気から苗へ顕熱が輸送されていた。加熱作用のある波長0.7μm以上の赤外放射が、蛍光灯からの短波放射の約4%である¹¹⁾ことが一因であると考えられる。閉鎖型システムで育苗中の苗の温度は、閉鎖型システム内気温よりも低く推移していた可能性がある。ただし、実験室規模の閉鎖型苗生産システムで育苗した場合のQ_{SP}³⁾は正の値であり、本研究の結果とは一致しなかった。大山ら³⁾の算定では、苗による短波および長波放射の反射を考慮しなかったことが一因である可能性がある。他方、温室などの自然光を用いた植物生産システムでは、Q_{SP}が正の値になることが、Q_{SP}の経時変化から示唆されている¹³⁾¹⁴⁾。したがって、設定気温に対する苗温度は、閉鎖型システムでは低く、自然光を利用した植物生産システムでは高いと考えられ、最適な設定気温が異なることが予想される。今後、閉鎖型システム内気温と苗の温度の関係を調べる必要がある。

本研究では、システム外からシステム内へ送風する空気の温度を30°Cに制御していた。本研究では、気温制御に必要とされる電力量をW_Tに含めていないが、気温を制御しない場合、気温制御に必要とされる電力量を削減できると考えた。システム内へ送風する空気の温度

を制御しない場合のQ_{SV}は、本研究で用いたQ_{SV}の算定方法より、-0.6 MJ m⁻²である。関東地方での冬季の気温および相対湿度を、それぞれ0°C、40%と、夏季のそれらを、それぞれ30°C、80%と想定すると、育苗期間15日間におけるQ_{SV}、Q_{LV}およびQ_{ST}の和は、本研究で用いたそれらの算定方法より、それぞれ-44.0 MJ m⁻²および0.3 MJ m⁻²である。システム外の環境が、閉鎖型システム内の空調負荷を増大させる夏季において、Q_{SV}、Q_{LV}およびQ_{ST}の和は、閉鎖型システム内で発生する顕熱および潜熱エネルギー量の和が少ない基本モジュール1台稼働時であってもその0.18%であり、その冷房負荷は無視しうるほど小さい。一方、冬季においては、冷房負荷が25%軽減される。

本研究では、育苗期間を15日間とした。閉鎖型苗生産システムで11日間育苗したサツマイモの定植後の収量は、閉鎖型苗生産システムで15日間育苗したサツマイモの収量と同等である¹⁵⁾ことから、育苗日数を4日間短縮することで、基本モジュール4台稼働時のW_Tを760 MJ m⁻²から550 MJ m⁻²に削減(34%削減)でき、苗あたりの電力料金を2.5-2.6円から1.6-1.7円に削減(64-65%削減)できると考えた。なお、ウィルスフリーのサツマイモセル成型苗は、現在100円程度で売られている。

本研究では、育苗15日目の一部の苗において、葉の黄化、脱落が見られた。これは、供試植物の準備期間中における生育不良が原因であったと考えられる。閉鎖型苗生産システムで順調に生育したサツマイモの純光合成速度¹⁶⁾より算定した、苗あたりの増加乾物重は0.36gであり、本研究より0.15g大であった。育苗15日目における苗の増加乾物重が、純光合成速度から算定した増加乾物重と同じ値であった場合、基本モジュール4台稼働時のQ_Pは4.4 MJ m⁻²になる。この場合、閉鎖型システムのエネルギー利用率は0.006になる。これは、実験室規模の閉鎖型苗生産システムのエネルギー利用率³⁾と同じ値である。

以上より、実用規模閉鎖型苗生産システムでは、苗1本あたり1.6-1.7円程度の電力コストで苗を周年生産できることが分かった。また、運搬・かん水作業に必要とされる電力量が少ないことが判明したので、今後、自立分散による苗生産を行なっても、閉鎖型苗生産システムの消費電力量は本研究の結果とほぼ変わらないことが分かった。他方、閉鎖型苗生産システムの単位床面積あたりの建設・設備コストは、温室などの育苗システムに比べて3-4倍高いと見積もられている¹⁾。しかし、閉鎖型苗生産システムでは多段の育苗棚を設置できることから、

年間苗生産量あたりの建設・設備コストでは、現在でも両システム間で差がないと推定されている。以上より、実用規模閉鎖型苗生産システムは、現在でも実用可能であると考えた。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、数々のご援助を頂いた、(株)テクノバの酒見幸助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) Kurata, K. and Kozai, T. : preface, In : Kurata, K. and Kozai, T. (Ed), Transplant production system, Kluwer Academic Publishers, pp 7-8 (1992)
- 3) 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)
- 4) 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)
- 5) 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) : 225-231(2000)
- 6) 西村将雄, 古在豊樹, 久保田智恵利, 全 昶厚：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, 植物工場学会誌, 13(3) : 204-209(2001)
- 7) Chun, C. and Kozai, T. : Closed transplant production system at Chiba University, Transplant production in the 21st century -Proceedings of the international symposium on transplant production in closed system for solving the global issues on environmental conservation, food, resources and energy-, Kluwer Academic Publishers, pp. 20-27(2000)
- 8) 内嶋善兵衛：日射の測定法, 農業気象, 37(2) : 137-138, (1981)
- 9) Beadle, C. L. and Long, S. P. : Photosynthesis-Is It Limiting to Biomass Production?, Biomass, 8 : 119-168(1985)
- 10) 関 重広：照明工学講義, 東京電機大学出版局, pp. 115-121(1987)
- 11) 田澤信二：植物育成用光源の最新情報, SHITA Report 15 : 16-28(1999)
- 12) 林 泰正, 星 岳彦, 古在豊樹：大規模植物苗生産施設のための受注・生産管理システム, 農業および園芸, 75(11) : 1165-1173(2000)
- 13) 渋谷俊夫, 北谷善昭, 古在豊樹：微気象学的方法と秤量法に基づくセル成型苗個体群の純光合成速度および蒸発散速度, 顕熱および潜熱輸送速度の動的計測, 生物環境調節, 35(1) : 71-76(1997)
- 14) 蒸発散研究グループ：水田の蒸発散, 農業気象, 22(4) : 149-157(1967)
- 15) Saiful Islam, A. M. F., Chun, C., Takagaki, M., Sakami, K. and Kozai, T. : Yield and growth of sweetpotato using plug transplants as affected by their ages and planting depths, Transplant production in the 21st century-proceedings of the international symposium on transplant production in closed system for solving the global issues on environmental conservation, food, resources and energy-, Kluwer Academic Publishers, pp. 149-153(2000)
- 16) 山田千佳子, 大山克己, 古在豊樹：閉鎖型苗生産システムにおけるサツマイモ植物個体群の純光合成速度の経日変化, 生物環境調節, 38(4) : 247-254(2000)