

閉鎖型苗生産システムに設置した家庭用エアコンの冷房時成績係数

大山克己¹・古在豊樹²・久保田智恵利²・全 昶厚²
長谷川智行²・横井真悟²・西村将雄²

¹日本学術振興会特別研究員

²千葉大学園芸学部 271-8510 千葉県松戸市松戸 648

**Coefficient of Performance for Cooling of a Home-use Air Conditioner Installed
in a Closed-type Transplant Production System**

Katsumi OHYAMA¹, Toyoki KOZAI², Chieri KUBOTA², Changhoo CHUN²,
Tomoyuki HASEGAWA², Shingo YOKOI² and Masao NISHIMURA²

¹Research Fellow of the Japanese Society for the Promotion of Science

²Faculty of Horticulture, Chiba University, 648 Matsudo, Chiba 271-8510, Japan

Abstract

Electric energy consumption for cooling (W_c) and the coefficient of performance for cooling (C) were investigated in a closed-type transplant production system (CTPS). C is defined as the ratio of heat energy absorbed by the evaporator of the air conditioner to W_c . A Basic Module Room with thermally insulated walls (5.8 m(W), 2.7 m(L), 5.4 m(H)) in the Research Unit for Closed Plant Production Systems at Chiba University was considered as a model CTPS. Home-use air conditioners, fluorescent lamps, fans and humidifier were installed in the CTPS. One hundred fifty-one data sets were collected for the analysis during the period from 1 May 2000 to 30 April 2001 when air temperatures inside the CTPS (T_{in}) during photo- and dark period were 29-31°C and 27-29°C, respectively. The chemical energy assimilated by the transplants was considered to be negligible. In the preliminary study, the number of air exchanges of the system was found to be 0 h⁻¹. Heat energy transmission through the walls was estimated as the product of heat transmission coefficient (ceiling and side walls: 0.3 W m⁻² K⁻¹; floor: 0.2 W m⁻² K⁻¹) and the air temperature difference between inside and outside the CTPS. Subsequently, C was estimated by dividing the heat energy generated inside the CTPS (Q) by W_c . W_c increased with increasing air temperature outside the CTPS (T_{out}) and with increasing Q . Most (72-86%) of the electric energy was consumed by lamps. The rest was consumed by air conditioners (7-17%) and other equipments (5-15%). The average value of C was 7.6 under this experiment condition. The estimated values of C were 1.1-2.6 times greater in this experiment condition than the catalog value measured in the standard condition (T_{in} : 27°C, T_{out} : 35°C), because T_{out} was lower than T_{in} . C increased with decreasing T_{out} and with increasing Q . These results show that C of a recent model of home-use air conditioner is relatively high, and its application is beneficial for reducing W_c in the CTPS.

Keywords : air temperature, coefficient of performance, electric energy consumption, fluorescent lamp, heat energy, number of air exchange, thermal insulation

2002年 1月25日受付

2002年 4月17日受理

E-mail: ohyama@green.h.chiba-u.ac.jp

緒 言

閉鎖型苗生産システム¹⁾では、必要最小限の資源を用いて苗を効率的に生産することを目的としている。それゆえ、閉鎖型苗生産システムを構成する照明器具や空調器具(エアコン)などにおいて電気エネルギーを効率よく消費することが要求される。

最近、特定機器(エアコン、冷蔵庫、照明、テレビなど)のエネルギー消費効率の向上を趣旨として、エネルギーの使用の合理化に関する法律(省エネルギー法)²⁾が改正された。特定機器のエネルギー消費効率の向上を促進する上で、それぞれの機器においてエネルギー消費効率の目標値が定められ、目標を達成できなかった場合には、製品が事実上販売できなくなるという、いわゆる「トップランナー方式」が導入された。定格能力4kW以下のエアコンでは、1998年10月における成績係数(熱交換器で交換された熱エネルギー量に対する空調機具において消費された電気エネルギー量の比)が最も大きな機種値を目標値として設定された(たとえば、定格能力2.5kW以下のもので冷暖房時の平均成績係数5.27³⁾)。これらの施行を前にして、各空調器具製造メーカーでは成績係数の向上のための技術開発が盛んに行われるようになり、近年では、圧縮機入力の低減や熱交換効率の向上がはかられ、空調器具の成績係数は倍増した⁴⁾。閉鎖型苗生産システムにおいて、近年の技術開発により成績係数が大きくなった空調器具を用いることで、空気調和にかかわる電気エネルギー消費量の削減、ひいては育苗成にかかわる電気エネルギー消費量の削減が見込まれる。

他方、閉鎖型苗生産システムでは換気を最小限に抑えるために、システム内の気温よりもシステム外の気温が低い場合(たとえば、冬季)でも、空調器具は冷房運転する。システム内の気温よりもシステム外の気温が低い場合における空調器具の冷房時の成績係数は、カタログに記載されているような標準条件下(室内:27°C, 室外:35°C)⁵⁾におけるそれよりも高くなると予想されるが、そのような条件下での報告例は見あたらない。さらに、植物工場のような植物生産施設においては稼働状況によりシステム内での熱エネルギー発生量は変動することが予想されるが、それが空調器具の電気エネルギー消費量や冷房時の成績係数に及ぼす影響についての報告例は見あたらない。

本研究では、千葉大学にある閉鎖型植物生産施設⁶⁾内の基本モジュール実験室において計測された1年間のデータより、実験室内の気温がほぼ等しく、かつ実験室外

の気温および実験室内熱エネルギー発生量が異なる条件下におけるデータを抽出し、それらが空調器具の電気エネルギー消費量および冷房時の成績係数に及ぼす影響を解析した。

材料および方法

閉鎖型苗生産システムとして千葉大学(千葉県松戸市, N35°51', E140°01')にある閉鎖型植物生産施設内の基本モジュール実験室(5.8m(W), 2.7m(L), 5.4m(H))を取り上げた。詳細は、Chun and Kozai(2000)⁶⁾に記載されているので、ここでは簡単に述べる。この実験室は、照明器具、空調器具、ファン、加湿器、7段の育成棚(2.7m(W), 0.8m(L), 4.6m(H))およびそれらを取り囲む断熱材(壁面および天井面の熱貫流係数:0.3W m⁻² K⁻¹, 床面の熱貫流係数:0.2W m⁻² K⁻¹)により構成される。基本モジュール実験室は、施設の屋根と実験室の天井面との間の空間、地表面、側面のうち1面は基本モジュール実験室と気温が等しい空間(育苗室: Production rooms), 残り3側面は季節により気温が変動する空間(実験室: Laboratory), とそれぞれ接している(Fig. 1)。施設の屋根と実験室の天井面との距離は、約1mである。育成棚背面は実験室と気温が等しい空間側の側面と接している。実験室内のそれぞれの育成棚には、光源として32W白色高周波蛍光灯(FHF32-EXN, 松下電器産業(株))が16本、16W白色高周波蛍光灯(FHF16-EXN, 松下電器産業(株))が3本設置されている。空調器具として、家庭用エアコン(S259TSX-W, ダイキン工業(株))が3台設置されている(Fig. 2)。定格冷却能力および定格消費電力より推定した冷房時の成績係数は4.5である。空調器具の吹き出した空気および実験室内空気の一部がファン(CC-V9060, 三洋電機(株))により混合された後、各育成棚にほぼ均一に送られるようになっていく。

この実験室において2000年5月1日から2001年4月30日の間に測定された実験室内気温(T_{in}), 1日あたりの照明器具、空調器具および室内設備(ファンおよび加湿器)の電気エネルギー消費量(それぞれ W_L , W_C および W_E)より、明期および暗期における T_{in} がそれぞれ29-31°Cおよび26-28°Cを満たし、かつ実験室内で人の出入りなどをともなう長時間の作業が行われなかった日のデータを抽出($n=151$)した。

空調器具の冷房時の成績係数(C)は、実験室内における1日あたりの熱エネルギー発生量(Q)および W_C より1日あたりの平均値として、以下の式を用いて推定した。

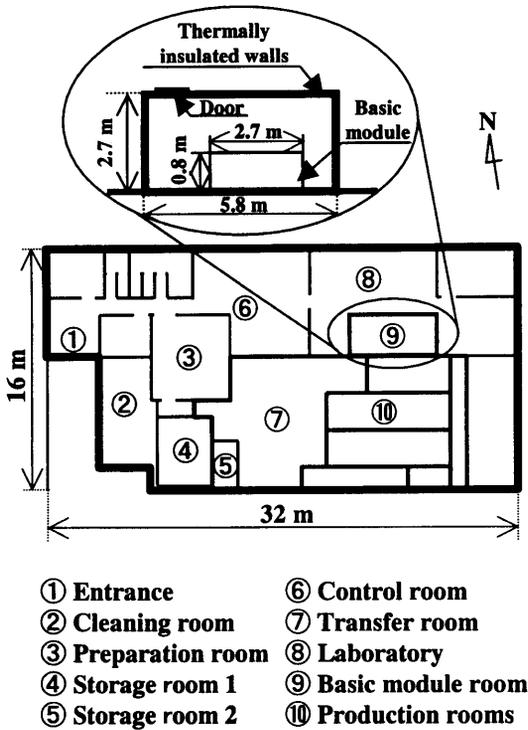


Fig. 1 Floor plan of the Basic Module Room in the Research Unit for Closed Plant Production Systems at Chiba University (See also, Chun and Kozai, 2000).

$$C = \frac{Q}{W_c} \quad (1)$$

Q は、システム内空気中へ輸送される方向を正とすると、 W_L 、 W_E 、植物体の生理反応(光合成および呼吸)によるエネルギー輸送量(Q_P)、換気によるシステム内外間の輸送量(Q_V)、天井面、壁面および床面を貫流する熱エネルギー輸送量(Q_T)より表すことができる。

$$Q = W_L + W_E + Q_P + Q_V + Q_T \quad (2)$$

ただし、 Q_P および Q_V は、それぞれ無視しうるほど小さいとした。 Q_T は、実際の閉鎖型植物生産施設内における配置を考慮して、1)天井面と閉鎖型植物生産施設の屋根との間の空間は施設外の気温(T_{out})よりも 10°C 高い、2)地表面の温度は T_{out} と等しい、3)基本モジュール実験室の側面のうちの1面は基本モジュール実験室と気温が等しい部屋に接する、4)残りの3側面と接する空間は、1-3月は 20°C 、4-6月および10-12月は 25°C 、7-9月は 20°C である、と仮定して求めた。ここで、地表面の温度は T_{out} と等しいと仮定したのは、システムと接している地表面は日射に対して不透明な建築構造物の

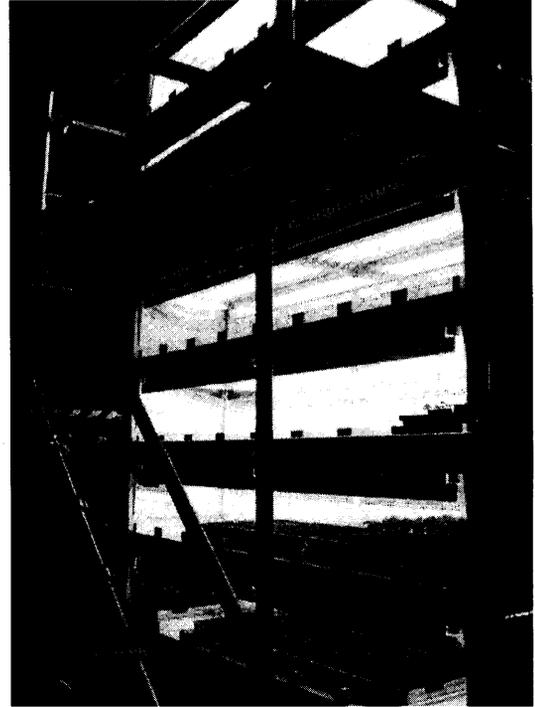


Fig. 2 Photograph of basic module inside the Research Unit for Closed Plant Production Systems at Chiba University. The module has an air conditioning system, a lighting system, and seven multi-shelves. Home-use air conditioners were installed on the top of the module. Each shelf has sixteen 32-W fluorescent lamps and three 16-W fluorescent lamps. Details were reported by Chun and Kozai (2000).

底面となっていて、短波放射の影響は皆無であり、また、そこでの純放射束はほぼゼロであると考えられるからである。

W_c および C を目的変数とし、 T_{out} および Q を説明変数として、重回帰分析を行った。重回帰分析には、重回帰分析用ソフトウェア(Proc reg, SAS institute, Ver. 6.12)を用いた。 T_{out} として、千葉県松戸市より14 km離れた千葉県我孫子市(N $35^\circ 47'$, E $139^\circ 54'$)において観測された日平均気温を用いた(Table 1)。本来は、同一の場所で記録された気温を用いて解析すべきであるが、記録用コンピュータの不具合によりそのデータが記録されていなかったために、千葉県松戸市に最も近いアメダス観測地点の1つである千葉県我孫子市のデータを用いることとした。

Table 1 Frequency distribution of air temperature outside the system used in this analysis. The data were selected for analysis among observed air temperatures at Abiko-city (N35° 47', E139° 54'), Chiba, Japan, during 1 May 2000 to 30 April 2001.

| Air temperature(°C) | Frequency |
|---------------------|-----------|
| -5- 0 | 1 |
| 0- 5 | 21 |
| 5-10 | 13 |
| 10-15 | 37 |
| 15-20 | 30 |
| 20-25 | 12 |
| 25-30 | 37 |
| Total | 151 |

結果および考察

全体の電気エネルギー消費量に対する W_L , W_C および W_E の百分率は、それぞれ 72-86, 7-17% および 5-15% であった。 W_C は、15-41 MJ の間で変動し、平均で 28 MJ となった (Fig. 3a)。また、 W_C は T_{out} が高くなるとともに増大し、 T_{out} が 0°C 付近の場合と比べて 30°C 付近では 2 倍となった。さらに、 Q の増大とともに増大する傾向がみられた (Fig. 3b)。 Q が同じ場合でも、 T_{out} により W_C は最大で 2 倍の開きがみられ、 T_{out} の低い冬季において W_C は小さく、 T_{out} の高い夏季において W_C は大きくなる傾向が見られた。他方、 C は 5.0-11.3 の間で変動し、平均で 7.6 となった (Fig. 4a)。また、 C は T_{out} が高くなるとともに低下し、 T_{out} が 0°C 付近の場合と比べて 30°C 付近では 1/2 倍となった。さらに、 Q の増大とともに C は増大する傾向がみられた (Fig. 4b)。 W_C の場合と同様に、 Q が同じ場合でも、 T_{out} により C は最大で 2 倍の開きがみられ、 T_{out} の低い冬季において C は大きく、 T_{out} の高い夏季において小さくなる傾向が見られた。定格冷却能力および定格消費電力より求められている C は 4.5 であったが、本解析結果での C はすべての条件下でその 1.1-2.6 倍となった。これは、定格冷却能力および定格消費電力を求める際の条件として、 $T_{in}=27^\circ\text{C}$ 、 $T_{out}=35^\circ\text{C}$ ⁵⁾ と $T_{in}<T_{out}$ であるのに対し、本解析で用いたデータを抽出した条件下では、ほぼ $T_{in}>T_{out}$ であったことから、空調器具による実験室内から実験室外への熱エネルギー輸送が起りやすかったことによる。Table 1 に抽出したデータでの T_{out} の出現度数を示す。 T_{out} の最大値は 29.2°C、最小値は -0.3°C、平均で 16.1°C であった。

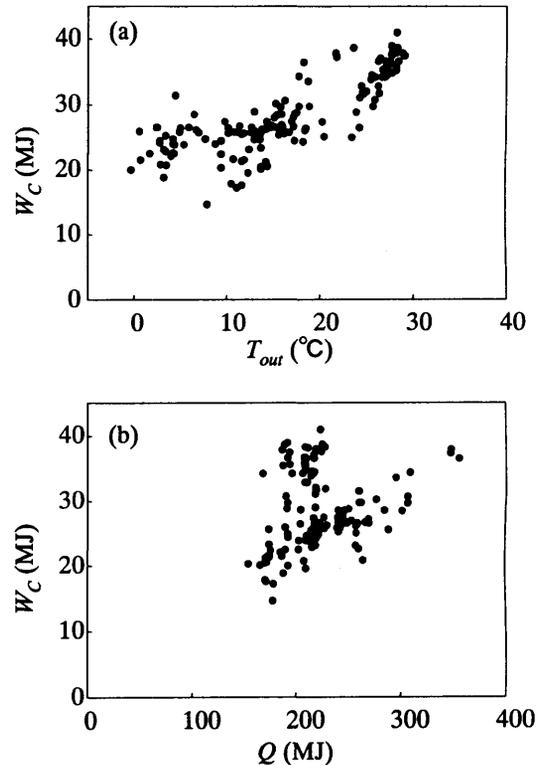


Fig. 3 Daily amount of electric energy consumption for air conditioning (W_C) as affected by a) air temperature outside the building (T_{out}) and b) daily amount of heat energy generated inside the room (Q in eq.(2)). The air temperatures inside the room (T_{in}) during photo- and dark period were 29-31°C and 27-29°C, respectively. The T_{out} was observed at Abiko-city (N35° 47', E139° 54'), Chiba, Japan.

本解析では、 C を求める際に、1) 光合成によるエネルギーの固定量は無視しうるほど小さい、2) 換気によるシステム内への熱エネルギー輸送量は無視しうるほど小さい、と仮定した。古在(1999)¹⁾の考察のように、照明器具の消費した電気エネルギー量のうち植物体に化学エネルギーとして固定される量の百分率は 0.4-2.1% 程度であり、1)の仮定は成り立つと予想される。他方、CO₂ ガスをトレーサーとしてその濃度の減少速度より基本モジュール実験室の換気回数の推定を試みたところ、実験室内のCO₂ 濃度は終日一定となってしまう、換気回数はほぼ 0 h⁻¹ であると推定されたことから、2)の仮定は成り立つと考えた。

これまでの完全閉鎖型の植物工場における研究例では、植物工場全体の電気エネルギー消費量に占める W_C の百分率は 30-40% であるとの報告がなされていた⁷⁻⁹⁾。し

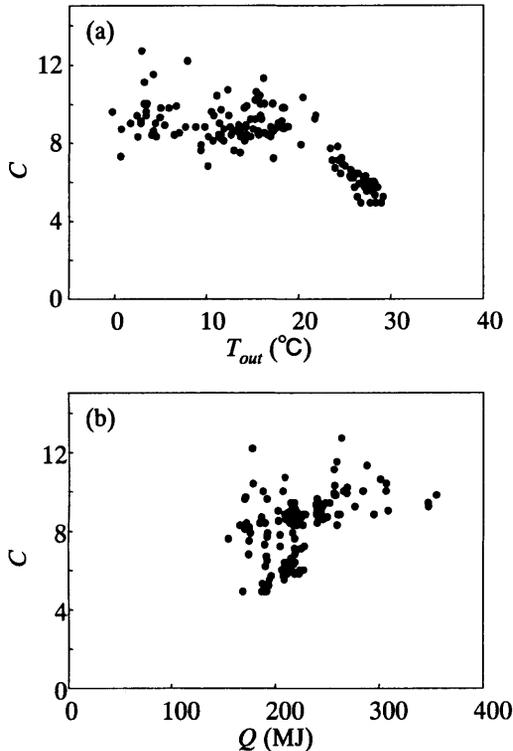


Fig. 4 Coefficient of performance for cooling (C in eq. (1)) as affected by a) air temperature outside the building (T_{out}) and b) daily amount of heat energy generated inside the room (Q in eq. (2)). See legend of Fig. 1 for description of temperatures.

かし、本解析で用いたデータを抽出した条件下では、それは7-17%であった。これは、1)前述の研究例で用いられた空調器具の C よりも、本解析で用いた空調器具のそれが大きかった、2)換気回数が小さかった、3)壁面などの熱貫流係数が小さかった、ことによる。1)の理由に関しては、近年の空調器具とくに家庭用エアコンの圧縮機入力の低減や熱交換効率の向上などの技術開発⁹⁾によるところが大きい。他方、2)および3)の理由のように、空調器具の電気エネルギー消費量にシステムの換気特性および熱貫流特性が影響することから、空調器具の電気エネルギー消費量を削減する上でそれらを小さくする必要があることが示唆される。

W_c を目的変数とし、 T_{out} および Q を説明変数として重回帰分析した結果、それぞれの説明変数は有意に影響をおよぼす(それぞれ、 $P < 0.001$)ことが分かった。また、 C を目的変数とし、 T_{out} および Q を説明変数として重回帰分析した結果、それぞれの説明変数は有意に影響をおよぼす(それぞれ、 $P < 0.001$)ことが分かった。

W_c および C は以下の式のように表すことができた。

$$W_c = 13.92141 - 0.52279 \cdot T_{out} + 0.03106 \cdot T_{out}^2 + 0.05958 \cdot Q \quad (R^2 = 0.85)$$

$$C = 4.41647 + 0.10049 \cdot T_{out} - 0.00659 \cdot T_{out}^2 + 0.01774 \cdot Q \quad (R^2 = 0.73)$$

今回の解析では、実験室内の相対湿度は最高83.5%、最低52.9%、平均で76.1%となっていた。実験室内の相対湿度が異なる場合、エアコンの出入り口における湿り空気の状態は異なる。エアコン入り口側における相対湿度が高くなった場合、エアコンの蒸発器のフィン面への水蒸気の凝結に起因して、熱伝達係数は低下し、空気通過抵抗は増大する¹⁰⁾。これらに起因して、実験室内の相対湿度が高くなるにつれて C は低下した可能性がある。他方、本解析で用いたデータの測定期間において、育成棚の使用状況により稼働台数は変化していたが、今回の解析ではそれを考慮できなかった。また、閉鎖型植物生産施設付近における気温と T_{out} として採用した千葉県我孫子市における気温とは、若干異なっていた可能性がある。さらに、 Q_T の推定に際して用いた仮定が実際の状況と異なっていた可能性もある。これらの理由により上記の重回帰式と推定した W_c および C との間で残差が生じたと考えられる。

2001年夏現在、家庭用エアコンとして流通している定格出力2.2-2.8kWの製品の C は、最も高いもので5.88-6.02となっている¹¹⁾。一方、業務用エアコンとして流通している定格出力7.1-12.5kWの製品の C は最も高いもので3.40-3.98と、定格出力2.2-2.8kWの家庭用エアコンと比べて20-30%低くなる。閉鎖型苗生産システムに2.5kWの家庭用エアコンを4台導入した場合、10kWの業務用エアコン1台を導入した場合と比べて、電気エネルギー消費量は30%少なくなる。導入時に必要とされるコストは諸事情により異なるが、エアコンの販売価格で判断すると、2.5kWの家庭用エアコンでは1台20万円程度、すなわち4台で80万円程度であるのに対し、10kWの業務用エアコンでは1台100-120万円程度となる。加えて、その設置にかかわる費用は前者の方で低いことから、現状では、家庭用エアコンの方が業務用エアコンよりも性能面および価格面で優れていると判断できる。このような家庭用エアコンと業務用エアコンの性能面での差は、家庭用エアコンでは新しい機能や性能を販売価格に転化し、開発にかかわる費用を回収してきたのに対し、業務用エアコンでは販売価格の削減のみを重視する傾向があったためであるとの示唆がなされている¹²⁾。業務用エアコンには、制御機器などへの取り込みが容易である点や動作保証される気温範囲が家

庭用エアコンと比べて広いといった利点があることから、今後、業務用エアコンでも家庭用エアコンと同程度に性能が向上した場合には、閉鎖型苗生産システムの空調器具としてのその適用を検討する必要がある。

結 論

本研究では、千葉大学にある閉鎖型植物生産施設内の基本モジュール実験室において、実験室外の気温および実験室内熱エネルギー発生量が家庭用エアコンの電気エネルギー消費量および冷房時の成績係数に及ぼす影響を解析した。解析に用いたデータを抽出した条件下では、1)季節変化にともなうシステム外の気温の変動およびシステムの稼動状況にともなうシステム内における熱エネルギー発生量の変動により、空調器具の冷房時の成績係数は5.0-11.3の間で変動する、2)その値は、標準条件下⁵⁾で推定されている値(カタログ値:4.5)の1.1-2.6倍となる、3)システム外気温が低くなるにつれて、空調器具の冷房時の成績係数は増大する傾向がある、4)システム内熱エネルギー発生量が増大するにつれて、空調器具の冷房時の成績係数は増大する傾向がある、5)育苗成にかかわる電気エネルギー消費量に占める空調器具のその率は7-17%となる、ことが示された。これらとその他の性能や販売価格などを考慮し総合的に判断すると、閉鎖型苗生産システムへの導入は、現状では業務用エアコンよりも家庭用エアコンの方が適しているといえる。家庭用エアコンでは、2003年10月以降の目標値を下回った場合の罰則強化を前にして、より冷房時の成績係数の大きな機種が開発が予想される。今後、それらを積極的に導入することで、閉鎖型苗生産システムにおける育苗成にかかわる電気エネルギー消費量のさらなる低減が見込まれる。

謝 辞

(株)テクノバの酒見幸助氏には、設備の管理にあたり

数々のご尽力をいただいた。ここに、感謝の意を表する。

引用文献

- 1) 古在豊樹(編著):閉鎖型苗生産システムの開発と利用, 養賢堂, 1-191pp(1999)
- 2) 通商産業省:エネルギーの使用の合理化に関する法律, 昭和54年6月22日法律第49号(平成10年6月5日一部改正)(1998)
- 3) 通商産業省:エアコンディショナーの性能向上に関する製造事業者等の判断の基準等, 平成11年3月11日通商産業省告示第190号(1999)
- 4) 大山和伸:省エネルギーエアコンの開発—消費電力が半分になったわけ—, 電学論D, 118(6):813(1998)
- 5) 日本工業標準調査会:ルームエアコンディショナー JIS C 9612⁻¹⁹⁹⁹, 86pp(1999)
- 6) Chun, C. and Kozai, T.: Closed transplant-production system at Chiba University, In: C. Kubota and C. Chun (Eds.), Transplant Production in the 21st Century, Kluwer Academic Publishers: 20-27(2000)
- 7) Hirosawa, Y., Takagi, F. and Takakura, T.: Analysis of electric energy consumption of a plant factory, Proc. Intl. Ann. Meeting ASAE, Paper No. 913060(1991)
- 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) 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, 植物工場学会誌, 3(2):111-123(1992)
- 10) 田中博国, 豊中俊之:空調機器, 実用空調技術便覧編纂委員会編:実用空調技術便覧, オーム社, pp. 403-542(1975)
- 11) (財)省エネルギーセンター:省エネ性能カタログ2001年夏版, <http://www.eccj.or.jp/catalog/index.html>(2001)
- 12) 小川剛保, 倉知光教:パッケージエアコン, 空気調和・衛生工学, 72(6):457-462(1998)