閉鎖型苗生産システムにおけるサツマイモ増殖体生産数と 電気エネルギー消費量に及ぼすトレイのセル容積の影響

藤原雅哉・門田太志・全 昶 厚・古在豊樹

千葉大学園芸学部

Number of Sweetpotato Propagules Produced and Electric Energy Consumption in
a Closed Transplant Production System as Affected by Cell Volume of a Tray

Masaya FUJIWARA, Taishi KADOTA, Changhoo CHUN and Toyoki KOZAI

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

(Received March 11, 2003)

Reduction in electric energy consumption is important for minimizing resources used for sweetpotato propagule production in a closed transplant production system. The objective of this study was to test whether or not an increase in cell volume of a tray can reduce electric energy consumption for sweetpotato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) vegetative propagation in a closed transplant production system. Single node cuttings each with one unfolded leaf were used as propagules and grown for 18 days at cell volumes of 20, 40, 60 or 80 mL with the same planting density of 643 m^{-2} in all treatments (number of cells per tray was 98). The number of harvestable propagules per stock plant did not differ significantly among cell volumes 6 and 10 days after planting, but increased with increasing cell volume 14 and 18 days after planting. The electric energy consumption per propagule for cell volumes of 20, 40, 60 and 80 mL was 0.54, 0.42, 0.34 and 0.26 MJ, respectively, corresponding to electricity costs of 2.2-2.4, 1.7-1.8, 1.4-1.5 and 1.0-1.1 Japanese Yen, respectively, 18 days after planting. Thus, increasing the cell volume of a tray is a useful method for reducing electric energy consumption per propagule for sweetpotato vegetative propagation in a closed transplant production system.

Keywords: electricity cost, *Ipomoea batatas* (L.) Lam., single node cutting, vegetative propagation

2003年3月11日受付

はじめに

閉鎖型苗生産システム (Kozai, 1999) では、季節や天候の影響をほとんど受けることなくシステム内の環境を容易に調節できる。また害虫や病原菌に汚染されていない増殖体あるいは苗を生産するのに適している。閉鎖型苗生産システムは、温室や苗圃などの開放型苗生産システムと比べてシステム内を安定した環境

に維持しやすいので、苗の生育と環境条件の関係を定量的に把握しやすい、苗生産方法を標準化できる、などの利点がある。

他方、サツマイモなどでは、母株である植物体の一部を増殖体（栄養繁殖で用いられる増殖のための最小単位）として利用し、その増殖体を育成して得られた植物体を次サイクルの母株として利用することを繰り返すことにより、増殖体ひいては苗の生産数を増大させる。従来、サツマイモの増殖には、展開葉を5~7枚

含む挿し穂が増殖体として用いられてきた。これに対して Kozai et al. (1997) は、閉鎖型苗生産システムを用いることにより展開葉1枚を含む短節を増殖体として用いることが可能であり、それゆえ増殖速度を増大できることを報告した (Fig. 1)。

閉鎖型苗生産システムにおいてサツマイモの増殖を行った際の増殖体あたりの電力料金は現状でも苗の一般販売価格と比べて小さい (Lok et al., 2002b) もの、今後、増殖に関わる資源消費量を最小限にするために、増殖時の電気エネルギー消費量をさらに低減することは重要である。

育成期間が同じでありかつ環境条件も同じ場合、閉鎖型苗生産システムの電気エネルギー消費量は育成面積に比例する。従って、栽植密度を高めても、単位面積あたり単位時間あたりの増殖体生産数が減少しなければ増殖体あたりの電気エネルギー消費量を維持あるいは低減することができる (Lok et al., 2002a)。ところが、実際には、栽植密度を一定以上に高めると、母株あたりの増殖体生産数が減少するためにかえて増殖体あたりの電気エネルギー消費量は増大する (Fujiwara et al., 2002)。従って、電気エネルギー消費量をこれまでよりもさらに低減するためには、高栽植密度でも増殖体の生長を維持あるいは促進させる方法を見出す必要がある。

トレイのセル容積の増大とともに植物体の生長は促進される (例えば、Liu and Latimer, 1995; Oda et al., 2002) ことから、閉鎖型苗生産システムにおける栽植

密度が高くても、セル容積の増大とともに母株の生長を促進できれば、母株あたりの増殖体生産数を増大でき、ひいては増殖体あたりの電気エネルギー消費量を低減できる可能性がある。セル容積が、閉鎖型苗生産システムにおいて育成したサツマイモセル成型苗およびその定植後の生長量に及ぼす影響を調べた報告 (He et al., 2000; Islam et al., 2002) はあるが、増殖体生産数と増殖時における電気エネルギー消費量に及ぼす影響を調べた報告はみあたらない。本研究では、サツマイモ増殖時における閉鎖型苗生産システムの電気エネルギー消費量を低減することを目的として、一定の栽植密度下におけるセル容積が母株あたりの増殖体生産数と増殖体あたりの電気エネルギー消費量に及ぼす影響について検討した。

材料および方法

1. 供試材料および増殖体育成条件

白色蛍光灯下で育成したサツマイモ (*Ipomoea batatas* (L.) Lam., 品種：ペニアズマ) 植物体 (展開葉：3~4枚, 生体重：4~5g) から、展開葉1枚を含む短節 (乾物重：86±8 mg, 葉面積：22±5 cm²) を切り出して増殖体とした。容積が20, 40, 60 および 80 mL となるように市販のポット (アイポット, 福岡丸本 (株), 容積：115 mL) の上部を切除した容器をセル (Fig. 2, Table 1) とした。市販の培地 (スミリンセル培土, スミリン農産工業 (株)) を充填したセルに増殖体を1個体ずつ植え付けた後、植え付け日を0日目と

Fig. 1 Schematic diagram of a vegetative propagation method that uses single node cuttings, each with one unfolded leaf, as propagules.

Fig. 2 Photograph of cells at four levels of volume used in the present experiment. Planting density was the same for all treatments at 643 m^{-2} (number of cells per tray was 98).

Table 1 Volume, depth and diameter of cells at four levels of volume used in the present experiment.

Volume (mL)	Depth (cm)	Diameter (cm)
20	4.4	2.8
40	7.3	3.1
60	9.7	3.4
80	11.8	3.7

Note: Planting density was the same for all treatments at 643 m^{-2} (number of cells per tray was 98).

して18日間生育させた。セルは栽植密度が 643 m^{-2} のトレイ (98 角プラグトレイ, $0.28 \text{ m (W)} \times 0.55 \text{ m (L)}$), 日新農工業 (株)) の各穴に設置した。充填する培地の乾燥重量は, セル容積が 20, 40, 60 および 80 mL のとき, それぞれ 5.8, 12.0, 17.6 および 23.5 g/cell とした。植え付け時の培地の体積含水率は, いずれの試験区でも 70% とした。育成期間中の気温, 相対湿度, 光合成有効光量子束, 明期, CO_2 濃度は, それぞれ 30°C , 75%, 100/200/300 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (0-4/5-9/10-17 日目), 16 h d^{-1} , 1000 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ に設定した。0 日目には水を底面から与えた。0 日目以降は, 明期開始時における培地の体積含水率が 40% 以下のときに, 底面から液肥 (大塚ハウス肥料 1 号: 1.5 g L^{-1} および 2 号: 1.0 g L^{-1} の混合液, 大塚化学 (株)) を与えた。なお, 体積含水率が 40% のときではまだ培地の乾燥は認められなかった。

2. 育成装置

育成装置としてグロースチャンバ (コイトトロノ KG-150MJA 型, 小糸工業 (株), $1.7 \text{ m (W)} \times 1.3 \text{ m (L)} \times 1.9 \text{ m (H)}$) を用いた。装置内に 4 枚のトレイを

収納できる棚 ($0.6 \text{ m (W)} \times 1.2 \text{ m (L)} \times 0.4 \text{ m (H)}$) を 4 段設置した。

32 W の高周波白色蛍光灯 (FHF32EX-W, 松下電器産業 (株)) を各棚に 8 本設置した。棚の天井および壁面を反射シート (SU-115, 三井化学 (株)) で覆った。トレイ面上における光合成有効光量子束の調節には, ライトコントローラ (NQ21575-321, 松下電工 (株)) を用いた。赤外放射式 CO_2 分析計 (ZFP9, 富士電気 (株)), データコントローラ (Greenkit 100, (株) ESD), 記録・制御用ソフトウェア (DL-300, (株) ESD), パーソナルコンピュータおよび電磁弁 (AB31-02-1, (株) CKD) を用いて装置内の CO_2 濃度の測定および制御を行った。

3. 測定および算定

新たに伸長したシュートの展開葉の枚数およびその葉身長を 6, 10, 14 および 18 日目に測定した。このシュートが有する節のうち, その葉身長が 55 mm (植え付け時における増殖体の葉身長の最小値) 以上の葉を有する単節を次サイクルの増殖体として利用可能と判断して, 増殖体生産数を算定した。増殖体生産数は母株あたりの値として算定した。母株の乾物重を 6, 10, 14 および 18 日目に, 生体重および葉面積を 18 日目に測定した。母株を地上部 (新たに伸長したシュートと増殖体) と地下部に切り分け, 80°C で 72 時間以上乾燥させた後, 乾物重の測定を行った。葉面積は, 葉部の画像をカラーイメージスキャナ (GT-8500WIN, セイコーエプソン (株)) で取り込み, 葉面積測定用ソフトウェア (LIA32 for Windows 95 ver. 0.374 β_2 , 山本一清 (名古屋大学)) を用いて測定した。

育成期間中の照明器具の電気エネルギー消費量を, 簡易型電力量表示器 (エコワット, 東光精機 (株)) を用いて測定した。この測定値, および Ohyama et al. (2000) が報告した閉鎖型苗生産システム全体 (照明器具, 空調器具および室内設備) の電気エネルギー消費量に対する照明器具の電気エネルギー消費量の比 (0.76) から, 育成期間中のシステム全体の電気エネルギー消費量を算定した。Ohyama et al. (2000) の実験では, 閉鎖型苗生産システムは環境制御を行っていない部屋内に, 空調器具の室外機は気温 $18 \sim 20^\circ\text{C}$ に制御されている室内にそれぞれ設置されている。東京電力 (株) の低圧電力契約 (基本料金: 1020 円/kW, 電力量料金: 10.6 円/kWh (夏季), 9.6 円/kWh (その他季)) にあてはめて電力料金を試算した。試算にあたり, 1) 燃料費調整および消費税は考慮しない, 2) 力率割引およ

び割増は考慮しない、3) 一か月は30日間である、とした。

育成期間中、明期開始時ごとにトレイ(セル、培地、母株を含む)の重量を測定した。トレイの重量、セルの重量、培地の乾燥重量および母株の生体重から、毎明期開始時における培地の体積含水率を算定した。毎明期開始時における母株の生体重には、予備実験で把握した生体重を用いた。予備実験に用いた育成装置ならびに装置内の環境条件は本実験のそれらと同じである。かん水前後のトレイ重量からかん水量を算定した。育成期間中に与えた窒素、リンおよびカリウムの量を、培地に含まれるそれらの量とかん水により与えたそれらの量の和から推定した。培地に含まれる量は、乾燥培地内の濃度(窒素: 0.3 mg g^{-1} , リン: 2.5 mg g^{-1} , カリウム: 0.1 mg g^{-1}) およびセルに充填した培地の乾燥重量から推定した。かん水により与えた量は、液肥内の濃度(窒素: 259 mg L^{-1} , リン: 53 mg L^{-1} , カリウム: 297 mg L^{-1}) およびかん水量から推定した。

実験を3回繰り返した。繰り返した実験のそれぞれを反復と見なし、平均値および標準誤差を算定した。サンプル数は1回の測定につき試験区あたり16とした。統計分析ソフトウェア(SigmaStat for Windows ver. 2.03, SPSS Inc.)を用いて分散分析法および回帰分析法により検定を行った。

結果および考察

1. 増殖体生産数

増殖体として利用可能な葉が出現し始めた後、日数の経過とともに母株あたりの増殖体生産数はほぼ直線的に増大した(Fig. 3)。増殖体生産数は、6および10日目では異なるセル容積の間で有意な差がみられなかったが、14および18日目ではセル容積の増大とともに大となった。増殖体生産数の経日変化を、Kubota and Kozai (2001), Fujiwara et al. (2002) および Lok

et al. (2002a, 2002b) と同様に一次式を用いて近似できた。増殖体生産数を日数の一次関数として表した場合のx軸切片はセル容積の間でほぼ同じだったが、傾きはセル容積の増大とともに大となった。傾きがセル容積の増大とともに大となったのは、育成期間後半において母株の葉の生長が促進されたためと考えた。

地上部(新たに伸長したシュートと増殖体)乾物重は、6、10および14日目では異なるセル容積の間で有意な差がみられなかったが、18日目ではセル容積の増大とともに大となった(Fig. 4)。一方、地下部乾物重は、6および10日目では40、60および80 mLがほぼ同じで20 mLよりも大となり、14および18日目では

Fig. 4 Above-ground and underground dry weights of stock plants at four levels of cell volume. L^{NS} , Q^{NS} , L^* , Q^* , L^{**} , Q^{**} = nonsignificant or significant linear (L) or quadratic (Q) response at $P \leq 0.05$ or 0.01 , respectively. Above-ground includes newly elongated shoot and explant. Vertical bars represent SE ($n=3$) for observations where ANOVA did not indicate significant differences among cell volumes.

Fig. 3 Time courses of the number of harvestable propagules of stock plants at four levels of cell volume during the experiment period. Vertical bars represent standard error ($n=3$).

セル容積の増大とともに大となった。18 日目における母株の生体重および葉面積は、乾物重と同様にセル容積の増大とともに大となった (Table 2)。

セル容積の増大による地下部乾物重の増大が日数の経過とともに顕著となった後、地上部乾物重も増大したことから、母株の生長量がセル容積の増大とともに大となった主な理由は、根圏の制限が減少したことと考えられる。根圏の制限により植物体の生長が抑制されるという報告は数多くなされ (例えば, Ruff et al., 1987; Ismail and Noor, 1996), その原因として植物成長ホルモンの根における合成と根からの転流が抑制されることが示唆されている (Richards and Rowe, 1977;

Carmi and Heuer, 1981)。ただし、このメカニズムは未解明である。今後、根圏の制限により植物体の生長が抑制される理由を明確にするために、このメカニズムの解明が期待される。

セル容積の増大とともに母株の生長量が大きくなったもうひとつの理由として、かん水回数が減少したことがあげられる。セル容積が 20, 40, 60 および 80 mL のとき、それぞれ 11, 9, 6 および 4 回かん水を行った。セル容積の増大とともにかん水回数が減少したのは、蒸発散に伴う培地の体積含水率の減少の割合が小さかった (Fig. 5) ためである。Yabuki and Kitaya (1984) は、かん水後に培地内の CO_2 濃度が高くなることを報告した。また、培地内の CO_2 濃度が高いと純光合成速度が低下し生長は抑制されることが、キュウリについて報告されている (Kitaya et al., 1984)。これらのことから、セル容積が小さい、すなわちかん水回数が多いほど、培地内における CO_2 濃度の増大が頻繁に起こり、その結果、母株の生長が抑制された可能性があると考えた。

母株の体内に含まれる窒素の量を、Yoshida et al. (1970) や Hozyo et al. (1971) が報告したサツマイモ植物体内の窒素濃度と本実験で育成した母株の乾物重から推定し、この量と育成期間中に与えた窒素の量 (Fig. 6) を比較すると、後者が前者の 1.9~2.2 倍であった。同様の方法でリンおよびカリウムについても比較

Table 2 Fresh weight and leaf area of stock plants at four levels of cell volume 18 days after planting.

Cell volume (mL)	Fresh weight (g/stock plant)	Leaf area (cm^2 /stock plant)
20	4.47	94
40	4.96	105
60	5.79	118
80	6.78	140
L	**	**
Q	**	**

** Significant linear (L) or quadratic (Q) response at $P \leq 0.01$.

Fig. 5 Time courses of water content of substrate by volume at four levels of cell volume during the experiment period.

Fig. 6 Amounts of applied fertilizer at four levels of cell volume during the experiment period.

すると、リンに関しては22.8～55.9倍、カリウムに関しては1.0～1.2倍であった。セル容積の増大とともに植物体の生長が促進される理由として施肥量が増大することが示唆されている (McConnaughay et al., 1993) もの、本実験の施肥量は、母株の生長に必要な量と比べて過剰だったと推測され、生長の制限因子とは考えにくい。また、育成期間中に与えた肥料のうち、リンの量はセル容積の増大とともに大となったが、窒素とカリウムの量は異なるセル容積の間で生長量にみられたほどの顕著な違いがみられなかった。これらのことから、本実験では、セル容積の間の施肥量の違いが母株の生長には影響を及ぼさなかったか、あるいは及ぼしたとしてもその影響は先に述べた二つの要因の影響と比べて小さいと考えた。

2. 電気エネルギー消費量

育成期間中の照明器具の電気エネルギー消費量は468 MJ m⁻²であった。この測定値より、育成期間中の閉鎖型苗生産システム全体 (照明器具、空調器具および室内設備) の電気エネルギー消費量を616 (=468/0.76) MJ m⁻²と算定した。18日目における増殖体あたりの電気エネルギー消費量は、セル容積が20, 40, 60 および 80 mL のとき、それぞれ0.54, 0.42, 0.34 および 0.26 MJ (それぞれ電力料金2.2～2.4, 1.7～1.8, 1.4～1.5 および 1.0～1.1 円) であった。増殖体あたりの電気エネルギー消費量は、セル容積が80 mL のときの値がFujiwara et al. (2002) および Lok et al. (2002a, 2002b) が報告したなかでの最も小さい値である0.36 MJ (セル容積: 35 mL, 栽植密度: 840 m⁻²) よりも約30%小さかった。

セル容積の増大とともにセルに充填する培地の量は増大するが、これに伴う培地に関わる料金の増大は小さい。メーカーにより公表されている培地の小売販売価格 (50 円/L) を乾燥培地重量あたりに換算した値段とセルに充填した培地の乾燥重量から推定した、増殖体あたりの培地に関わる料金は、セル容積が20, 40, 60 および 80 mL のとき、それぞれ0.4, 0.7, 0.8 および 0.8 円であった。これらの値と電力料金の和は、セル容積が20, 40, 60 および 80 mL のとき、それぞれ2.6～2.7, 2.3～2.4, 2.2～2.3 および 1.8～1.9 円であった。なお、培地を大量購入する場合の価格は小売販売価格よりも安くなると見込まれ、培地に関わる料金はここで推定した値よりもさらに安価になると考えられる。このように培地に関わる料金の増大の絶対量は小さいことから、セル容積を増大することは増殖体生産数を増

大する上で有効であると考えた。

前述した Lok et al. (2002a) の実験結果と本結果より、閉鎖型苗生産システムの電気エネルギー消費量を低減するためには、栽植密度が高くかつセル容積が大きいトレイを用いることが適していると考えられる。本実験条件下で増殖体生産数が増大した主な理由は根圏の制限の減少と考えられることから、栽植密度を本実験の密度より高めてもセル容積の増大とともに母株あたりの増殖体生産数が増大する可能性は高いと考えた。

本実験では栽植密度を643 m⁻²としたが、閉鎖型苗生産システムではこれよりも密度を高めることで増殖体あたりの電気エネルギー消費量を低減することができる (Fujiwara et al., 2002)。栽植密度を本実験の密度より高めても、セル容積の増大とともに母株あたりの増殖体生産数が増大すれば、増殖体あたりの電気エネルギー消費量を本結果よりもさらに低減できる可能性があり、その場合には増殖体あたりの電力料金は本結果の中の最小値である1.0～1.1 円よりもさらに安価になると予想される。

本実験ではサツマイモの増殖時に着目したが、セル容積の増大とともに苗の定植後の生育が促進される (Nicola and Cantliffe, 1996) ことから、苗化時においてもセル容積の増大による利点があると考えられる。He et al. (2000) および Islam et al. (2002) が行った実験では、セル容積の間 (35 および 55 mL) で圃場定植後の塊根収量に顕著な差が認められなかったが、検討する幅を広くした場合にはセル容積の増大とともに塊根収量が増大する可能性がある。しかし、苗の輸送コストが単位容積あたりあるいは単位重量あたりで決まる場合、このコストはセル容積の増大とともに増大すると考えられ、今後、これらに関する知見を得る必要がある。

結 論

展開葉を1枚含む単節を増殖体として用い、セル容積を20, 40, 60 および 80 mL、かつ栽植密度を一定 (643 m⁻², トレイあたりのセル数: 98) として18日間生育させた。母株あたりの増殖体生産数は、6 および 10 日目ではセル容積の間で有意な差がみられなかったが、14 および 18 日目ではセル容積の増大とともに大となった。18日目における増殖体あたりの電気エネルギー消費量は、セル容積の増大とともに低減し、容積が20, 40, 60 および 80 mL のときそれぞれ0.54, 0.42, 0.34

および 0.26 MJ (電力料金それぞれ 2.2~2.4, 1.7~1.8, 1.4~1.5 および 1.0~1.1 円) であった。栽植密度を本実験の密度より高めても、セル容積の増大による母株あたりの増殖体生産数の増大で、増殖体あたりの電気エネルギー消費量を本結果よりもさらに低減できると考えた。その場合には、増殖体あたりの電力料金は本結果の中の最小値である 1.0~1.1 円よりもさらに安価になると予想される。

文 献

- Carmi, A., Heuer, B. 1981. The role of roots in control of bean shoot growth. *Ann. Bot.* **48**: 519-527.
- Fujiwara, M., Kubota, C., Kozai, T., Sakami, K. 2002. Number of sweetpotato propagules produced and electric energy consumption in a closed-type transplant production system under different number of cells per tray. (D212), Annual Meeting of Environ. Control in Biol., August, Tokyo, p 185.
- He, D., Lok, Y. H., Chun, C., Kozai, T. 2000. Yield and growth of sweetpotato using plug transplants as affected by cell volume of plug tray and type of cutting. In "Transplant Production in the 21st Century" (ed. by Kubota, C., Chun, C.), Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, p 154-159.
- Hozyo, Y., Murata, T., Yoshida, T. 1971. The development of tuberous roots in grafting sweet potato plants, *Ipomoea batatas* Lam. (Japanese text with English abstract) *Bull. Natl. Inst. Agric. Sci. D* **22**: 165-191.
- Islam, A. F. M., Kubota, C., Takagaki, M., Kozai, T. 2002. Sweetpotato growth and yield from plug transplants of different volumes, planted intact or without roots. *Crop Sci.* **42**: 822-826.
- Ismail, M. R., Noor, K. M. 1996. Growth, water relations and physiological processes of starfruit (*Averrhoa carambola* L.) plants under root growth restriction. *Sci. Hortic.* **66**: 51-58.
- Kitaya, Y., Yabuki, K., Kiyota, M. 1984. Studies on the control of gaseous environment in the rhizosphere (2) Effect of carbon dioxide in the rhizosphere on growth of cucumber. (Japanese text with English abstract) *J. Agric. Meteorol.* **40**: 119-124.
- Kozai, T., Kubota, C., Heo, J., Chun, C., Ohyama, K., Niu, G., Mikami, H. 1997. Towards efficient vegetative propagation and transplant production of sweetpotato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) under artificial light in close ecosystems. December, Miyazaki, Proc. International Workshop on Sweetpotato Production System toward the 21st Century (ed. by LaBonte, D. R., Yamashita, M., Mochida, H.) p 201-214.
- Kozai, T. 1999. Advantages and disadvantages of closed-type over opened-type transplant production system. In "Development and Application of Closed-type Transplant Production System for Solving the Global Issues" (ed. by Kozai, T.), Yokendo, Tokyo, p 69-75.
- Kubota, C., Kozai, T. 2001. Mathematical models for planning vegetative propagation under controlled environments. *HortScience* **36**: 15-19.
- Liu, A., Latimer, J. G. 1995. Root cell volume in the planter flat affects watermelon seedling development and fruit yield. *HortScience* **30**: 242-246.
- Lok, Y. H., Ohyama, K., Kubota, C., Kozai, T. 2002a. Sweetpotato propagule production rate and electric energy consumption in a closed transplant production system as affected by planting density. (Japanese text with English abstract) *J. High Tech. Agric.* **14**: 10-17.
- Lok, Y. H., Ohyama, K., Kubota, C., Chintakovid, W., Kozai, T. 2002b. Sweetpotato propagule production rate and electric energy consumption in a closed transplant production system as affected by propagation method. (Japanese text with English abstract) *Environ. Control in Biol.* **40**: 311-316.
- McConnaughay, K. D. M., Bernston, G. M., Bazzaz, F. A. 1993. Limitations to CO₂-induced growth enhancement in pot studies. *Oecologia* **94**: 550-557.
- Nicola, S., Cantliffe, D. J. 1996. Increasing cell size and reducing medium compression enhance lettuce transplant quality and field production. *HortScience* **31**: 184-189.
- Oda, M., Takato, J., Ikeda, H., Furukawa, H. 2002. Effects of cell volume at raising lettuce plugs on growth, sugar concentration and root respiration immediately before and after planting. (Japanese text with English abstract) *Hortic. Res. (Japan)* **1**: 27-30.
- Ohyama, K., Yoshinaga, K., Kozai, T. 2000. Energy and mass balance of a closed-type transplant production system (1) Energy balance. (Japanese text with English abstract) *J. High Tech. Agric.* **12**: 160-167.
- Richards, D., Rowe, R. N. 1977. Effects of root restriction, root pruning and 6-benzylaminopurine on the growth of peach seedlings. *Ann. Bot.* **41**: 729-740.
- Ruff, M. S., Krizek, D. T., Mirecki, R. M., Inouye, D. W. 1987. Restricted root zone volume: Influence on growth and development of tomato. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* **112**: 763-769.
- Yabuki, K., Kitaya, Y. 1984. Studies on the control of gaseous environment in the rhizosphere (1) Changes in CO₂ concentration and gaseous diffusion coefficient in soils after irrigation. (Japanese text with English abstract) *J. Agric. Meteorol.* **40**: 1-7.
- Yoshida, T., Hozyo, Y., Murata, T. 1970. Studies on the development of tuberous roots in sweet potato (*Ipomoea batatas*, Lam. var *edulis*, Mak.). The effect of deep placement of mineral nutrients on the tuber-yield of sweet potato. (Japanese text with English abstract) *Jpn. J. Crop Sci.* **39**: 105-110.