閉鎖型苗生産システムにおけるサツマイモ増殖体生産速度と消費電力量に及ぼす増殖法の影響

ロク イイ ヒン・大山 克己・久保田智恵利・チンタコーヴィッド ワッチャラ・古 在 豊 樹

千葉大学園芸学部

Sweetpotato Propagule Production Rate and Electric Energy Consumption in a Closed Transplant Production System as Affected by Propagation Method

Yee Hin LOK, Katsumi OHYAMA, Chieri KUBOTA, Watcharra CHINTAKOVID and Toyoki KOZAI

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

(Received January 25, 2002)

Multiplication ratios (average number of harvestable propagules per stock plant) and electric energy consumption per harvestable propagule (single nodal cutting with an unfolded leaf, SNC) as affected by two propagation methods, propagation method using SNC only as propagules and propagation method using both SNC and stock plant base with an unfolded leaf (SPB) as propagules were investigated for sweetpotato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) vegetative propagation in a closed transplant production system. Total number of harvestable propagules and electric energy consumption per harvestable propagule n multiplication cycles after the start of propagation ($P(n)$ and $E_p(n)$, respectively) were simulated for the two propagation methods, based on the results of the experiment: multiplication ratios were 1.8 and 3.7 for SNC and SPB, respectively, when a multiplication cycle was 12 d. $P(10)$ were 89 to 197 times greater in the propagation method using both SNC and SPB than in the propagation method using SNC only. $E_p(n)$ five or more multiplication cycles after the start of propagation in the propagation method using both SNC and SPB were reduced by 40% compared with those in the propagation method using SNC only. Results show that propagation method using both SNC and SPB as propagules in the system reduces the electricity cost and shortens the multiplication period.

Keywords: *Ipomoea batatas* L. (Lam.), multiplication ratio, single nodal cutting, stock plant base, vegetative propagation

2002年1月25日受付

緒 言

近年、苗生産と作物生産とは業種的に分離される傾向にあり、高品質な苗の計画的安定生産が必要とされている。断熱性を高めた壁で囲まれ、人工光源のみを利用する閉鎖型苗生産システム (Kozai, 1999) では、自然光源を利用する温室などの開放型苗生産システムと比べて、システム内の環境をより高精度に調節でき

ることから、高品質な苗や増殖体 (栄養繁殖で用いられる増殖のための最小単位, propagule) を計画的に生産できると予想されている。さらに、苗や増殖体の生産にともなう消費電力量、資源投入量などをシステム外の気象条件などによらず比較的正確に予測できることから、効率的な育苗や増殖計画を策定することが容易であると考えられる。

他方、苗の需要は季節により変動するので、それにあわせて生産される増殖体の数 (以下、増殖体生産数)

Corresponding author: Toyoki Kozai, +81-47-308-8841, e-mail: kozai@midori.h.chiba-u.ac.jp

を調節する必要があり、増殖体生産数の推定は増殖体を効率的に生産する上で重要な知見となる。閉鎖型苗生産システムでは増殖体生産数の推定のみならず、増殖体の生産にかかわる消費電力量の推定も重要である。これまでに、数理モデルを用いて、増殖体生産数を推定する方法 (Kubota and Kozai, 2001) や増殖法による増殖体の生産計画の最適化 (Simonton and Thai, 1988; Humphries et al., 1991; Hara and Kozai, 1992) が報告されている。Lok et al. (2002) は、サツマイモの展開葉1枚を有する単節 (single nodal cutting with an unfolded leaf, 以下、単節) を増殖体とした場合の閉鎖型苗生産システムについて、増殖体生産数および増殖体あたりの消費電力量を数理モデルを用いて推定することを試みた。

本稿では、増殖体として、① 単節のみを使用する方法 (propagation method using single nodal cutting only), ② 単節だけではなく母株のシュートを採取した後に残った部位 (stock plant base with an unfolded leaf, 以下、母株基部) も併用する方法 (propagation method using both single nodal cutting and stock plant base) の、二つの増殖法について検討した。以下では、前者を単節増殖法、後者を併用増殖法と呼ぶこととする。これまでに、母株基部を用いた場合のラジアタマツのさし木による増殖では、次サイクルの増殖体を使用するさし木の発根率が向上することが報告されている (Libby et al., 1971)。また、ラジアタマツの組織培養による増殖において、母株基部を増殖体を使用することの有用性が報告されている (Aitken-Christie and Jones, 1987)。Kubota and Kozai (2001) は、単節増殖法に比べて併用増殖法では、増殖体として使用する単節の生産数 (以下、単節生産数) が増大することを増殖モデルにより予測している。併用増殖法は単節生産数が増大するだけではなく、培養土やトレイなどの資材の節約が可能であることから、増殖体の生産コストを抑える利点もあると考えられる。

本研究では、閉鎖型苗生産システムにおけるサツマイモの増殖体の生産に併用増殖法を応用することを目的として、単節増殖法および併用増殖法による単節生産数および単節あたりの消費電力量をそれぞれ推定した。

材料および方法

1. 供試植物および試験環境条件

供試植物は、サツマイモ (*Ipomoea batatas* (L.) Lam., 品種: ペニアズマ) とした。人工光源下で単節

を17日間育成して再生した母株を切り分けて、2種類の増殖体 (単節 (Fig. 1a) および母株基部 (Fig. 1b)) を採取した。それぞれの増殖体の生体重、乾物重、葉枚数、葉面積および葉身長を Table 1 に示す。増殖体の育成には、72 セルのトレイ (546 (L) × 279 (W) mm, セル容積: 55 mL, 日新農工業 (株) 製, 以下、トレイ) を用いた。培養土として、セル成型苗用培養土 (ナブラ養土, ヤンマー農機 (株) 製) を用いた。

検討した二つの増殖法の概要を Fig. 2 に示す。単節増殖法では、培養土を充填したトレイに単節を植え付けて、新たにシュートを伸長させた。一方、併用増殖法では、培養土を充填したトレイに単節を植え付けて新たにシュートを伸長させるとともに、シュートを採取した後の母株基部についても単節と同じ環境条件下

Fig. 1 Two types of propagules used in this experiment: (a) single nodal cuttings each with an unfolded leaf (SNC) and (b) stock plant base with an unfolded leaf (SPB) derived from 17-day-old stock plant regenerated from SNC.

Table 1 Descriptions of propagule types (see Fig.1).

	Single nodal cutting	Stock plant base
Leaf and stem		
Fresh mass (g)	0.7 ± 0.1 ^z	1.3 ± 0.2
Dry mass (g)	0.08 ± 0.02	0.12 ± 0.02
Root		
Fresh mass (g)	0	0.7 ± 0.3
Dry mass (g)	0	0.05 ± 0.02
Number of leaves	1	1
Leaf area (cm ²)	18 ± 2	27 ± 4
Leaf blade length (mm)	67 ± 5	80 ± 9

^z Mean ± standard deviation (n=28).

で育成し、新たにシュートを伸長させた。

閉鎖型苗生産システムとして、Ohyama et al. (2000) が製作したシステムを用いた。このシステム内には、5枚のトレイを収納することができる育成棚が3段設置されている。光源として白色高周波蛍光灯 (FHF32EX-W, 松下電器産業(株)製) が、各々の育成棚に8本ずつ設置されている。空調器具として、家庭

用エアコン (AS22CHR および AO22CHR, (株)富士通ゼネラル製) を用いた。システム内の相対湿度の測定およびその制御には、ヒューミディスタット (ヒューミアイ 100, (株) 鷺宮製作所製) および遠心式加湿器 (D-505, ピーエス工業(株)製) を用いた。システム内の CO_2 濃度は、赤外放射式 CO_2 分析計 (ZFP9, 富士電気(株)製) を用いて測定し、その測定値をもとに、データコントローラ (Greenkit 100, (株) ESD 製), 記録・制御用ソフトウェア (DL-300, (株) ESD 製), パーソナルコンピュータおよび電磁弁 (AB31-02-1, (株) CKD 製) を用いて制御した。

トレイ面上における光合成有効光量子束 (photosynthetic photon flux, 以下, PPF), 気温, CO_2 濃度, 相対湿度および明期は, それぞれ $340 \pm 10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, $31 \pm 2^\circ\text{C}$, $1030 \pm 50 \mu\text{mol mol}^{-1}$, $75 \pm 15\%$ および 16 h d^{-1} とした。切り分け・植え付け日を試験開始1日目として, 単節および母株基部をそれぞれ15および12日間育成した。試験開始1日目には水を, 試験開始2, 5, 8, 11 および14日目には養液 (A-2: 濃度 1.2 g L^{-1} , B-2: 濃度 0.6 g L^{-1} , C: 濃度 0.1 g L^{-1} , 日本たばこ産業(株)製) を, それぞれ底面から与えた。

2. 測定および算定

増殖体として単節を用いた場合は試験開始後6, 9, 12 および15日目に, 母株基部を用いた場合は試験開始後5, 8, 10 および12日目に, それぞれ新たに伸長したシュートの展開葉の枚数および葉身長を測定した。葉身長が 50 mm 以上の単節は次サイクルの増殖体として利用が可能とみなして, 単節を用いた場合の増殖比 (母株あたりの単節生産数, m_c) および母株基部を用いた場合の増殖比 (m_b) をそれぞれ算定した。試験期間中の閉鎖型苗生産システムの照明器具, 空調器具およびその他の器具の消費電力量を, 積算電力計 (A-11 型 (100 V 単相2線式), 大崎電気工業(株)製) を用いてそれぞれ測定し, それらの合計より1日あたりのトレイ面積あたりの消費電力量 (E_a) を算定した。

育成試験で得られた m_c , m_b および E_a により, 閉鎖型苗生産システム内において単節増殖法および併用増殖法を用いた場合の各サイクル ($n=1, 2, 3, \dots$) における単節生産数 ($P(n)$) および単節あたりの消費電力量 ($E_p(n)$) をそれぞれ推定した。 $P(n)$ は Kubota and Kozai (2001) の増殖モデルにもとづき, 式(1)~(3)にそれぞれのパラメータに数値を代入して推定した。 $E_p(n)$ は各サイクル ($n=1, 2, 3, \dots$) における閉鎖型苗生産システム内に存在する母株の占有面積 ($A(n)$) の

Fig. 2 Schematic diagram of two propagation methods considered in this study: (a) propagation method using single nodal cutting with an unfolded leaf (SNC) only and (b) propagation method using both SNC and stock plant base with an unfolded leaf (SPB) as propagules.

The $n=1$ and $n=2$ indicate the 1st and 2nd multiplication cycles after the start of propagation, respectively.

みを考慮して、式(4)および式(5)を用いて推定した。

$$N(n+1) = M \times N(n) \quad (1)$$

$$N(n) = [P(n); S_1(n); S_2(n); \dots; S_i(n)] \quad (2)$$

$$M = \begin{bmatrix} m_c & m_s & m_s \cdot m_s \\ 1 & 0 & 0 \cdot 0 \\ 0 & 1 & 0 \cdot 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot \cdot \cdot \\ 0 & 0 & 0 \cdot 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$E_p(n) = \frac{\sum_{k=1}^n A(n) \times E_a \times C_m}{P(n)} \quad (4)$$

$$A(n) = \frac{P(n-1) + S_1(n-1) + S_2(n-1) + \dots + S_i(n-1)}{D} \quad (5)$$

ここで、 $N(n)$ 、 $N(n+1)$ ： n および $n+1$ サイクル目におけるそれぞれ増殖体の種類ごとの個体数を示すベクトル、 $P(n)$ ： n サイクル目における単節生産数、 $S_1(n)$ 、 $S_2(n)$ 、 $\dots$ 、 $S_i(n)$ ：繰り返し使用1, 2, $\dots$, i 回目の母株基部の数、 M ：各種類の増殖体に関して、 n サイクル目と $n+1$ サイクル目の個体数の比を表す $i+1$ 次の正方行列、 D ：栽植密度、 C_m ：サイクルの増殖期間である。単節増殖法においては、 $S_1(n) = S_2(n) = \dots = S_i(n) = 0$ 、 $m_s = 0$ である。

本研究においては以下の条件を想定して、 $P(n)$ および $E_p(n)$ を推定した。①閉鎖型苗生産システムで占有できるトレイ面積($A_{\max}$)の制約はない($A_{\max} = \infty$)。②増殖開始時に投入される単節数($P(0)$)は400(任意の値)とする。③増殖開始時に投入される単節を生産した際の単節あたりの消費電力量($E_p(0)$)は0 kWhである。④1サイクルの増殖期間(C_m)は12日間とする。これは、育成試験で得られた m_c および m_s の共通の測定日が試験開始12日目であるためである。⑤シュートを採取する際には、最下位の葉を残さない。⑥母株基部については利用回数が増えると増殖比が低下することが予想されるので、併用増殖法では同一の母株基部を1~4回($i=1, 2, 3$ または4)使用した後廃棄する。ただし、 m_s は i の影響を受けず、全サイクル($n=1, 2, 3, \dots$)で同じとする。⑦単節については異なる葉身長(葉面積)の増殖体を使うと増殖比が異なることが予想されるが、 m_c は葉面積の影響を受けず、全サイクル($n=1, 2, 3, \dots$)で同じとする。⑧ E_a は全サイクル($n=1, 2, 3, \dots$)で同じとする。

結果および考察

m_c および m_s は、それぞれシュートの出現後、日数の経過とともに直線的に増大した(Fig. 3)。ここで、 m_c および m_s を時間(日数)の関数として1次式で近似したときの x 切片、すなわち出葉開始日は、それぞれ、8.9および4.9日となった。母株が再生する際の様子を観察すると、増殖体として単節を用いた場合では試験開始2~4日目より発根し、その後試験開始7~8日目より新たなシュートが伸長し始めた。一方、母株基部を用いた場合では、試験開始4~5日目より新たなシュートが伸長し始めた。これらのことから、母株基部を用いた場合、出葉開始日およびシュートが伸長し始めるまでの日数は、単節を用いた場合と比べてそれぞれ5および2~4日間短くなった。これは、単節の根元が発達するまでに要する期間が2~4日間以上であることにより育成が遅れたためであると考えた。育成試験よりえられた m_c および m_s は、1サイクルの増殖期間を12日間とした場合、それぞれ1.8および3.7であった。このことは、同一の増殖期間では増殖体として単節を用いた場合よりも母株基部を用いた場合に母株あたりの単節生産数が大きくなることを示している。また、母株あたりの単節生産数がほぼ同一になるまでの増殖期間は、増殖体として単節を用いた場合よりも母株基部を用いた場合に、短くなることも意味する。 m_c および m_s を時間の関数として1次式で近似し

Fig. 3 Time courses of multiplication ratios (average number of harvestable propagules per stock plant) for single nodal cutting and stock plant base (m_c and m_s , respectively).

Newly developed single nodal cuttings each having an unfolded leaf with leaf blade length of ≥ 50 mm were counted as harvestable propagules. Vertical bars indicate standard errors ($n=3$).

た場合の傾きは、それぞれ 0.53 および 0.55 となり、ほぼ同じであった。これまでに、葉枚数は日数の経過とともに直線的に増大し、葉枚数を時間の関数として 1 次式で近似した場合の傾きは、気温 (Cao and Moss, 1989a) および明期 (Cao and Moss, 1989b) の影響を受けることが知られている。本試験条件下では、増殖体の種類によらず育成期間中の環境条件、とくに気温が同じであったことから、 m_c および m_s を時間の関数として 1 次式で近似した場合の傾きに差がみられなかったと考えた。

育成期間を 12 日間としたときの照明器具、空調器具およびその他の器具の消費電力量の積算値は、それぞれ 230, 61 および 18 kW h となった。また、15 日間としたときには、それぞれの積算値は、288, 77 および 23 kW h となった。これらの積算消費電力量の結果およびシステムの総トレイ面積 (2.285 m²) から E_a を算定すると 11.3 kW h m⁻² d⁻¹ となった。

推定した 120 日間 (10 サイクル) の増殖期間においては、併用増殖法を用いた場合の $P(n)$ は、単節増殖法を用いた場合のそれよりも大となった (Fig. 4)。例として、併用増殖法を用いた場合の 10 サイクル目における単節生産数 ($P(10)$) は、 $i=1, 2, 3$ および 4 としたときに、単節増殖法を用いた場合のそれと比べてそれぞれ 89, 167, 191 および 197 倍となった。また、 i が大きくなるにつれて併用増殖法での $P(n)$ は大となった。他方、 $E_p(n)$ は単節増殖法を用いた場合では 1~5 サイクル

目の間で増大したが、5 サイクル目以降ではほぼ一定の値 (0.28 kW h) に収束する傾向がみられたのに対し、併用増殖法の場合ではそのような傾向はみられず、初期よりほぼ一定の値 (0.16 kW h) となった (Fig. 5)。

現在、サツマイモウイルスフリー苗は 100~150 円程度で販売されている。単節増殖法および併用増殖法の場合、 $E_p(n)$ は 0.28 および 0.16 kW h に収束することから、電力コストはそれぞれ 7 および 4 円となる。これらの値は苗の販売価格のそれぞれの 5~7% および 3~4% であり、単節の生産にかかわる電力コストは、いずれの増殖法の場合も苗の販売価格と比べて非常に小さいことが示された。単節増殖法では、サツマイモの母株の育成にあわせて PPF を高めると、PPF を一定にした場合と比べて、ほぼ同じ展開葉数、葉面積および乾物重の母株を、より少ない照明器具の消費電力量で生産できる可能性がある (Yamada et al., 2000a, b)。その場合、本研究の値よりも $E_p(n)$ を小さくできることから、今後検討する必要がある。

前述のように併用増殖法では、単節増殖法と比べて 5 サイクル目以降の $E_p(n)$ 、ひいては単節あたり電力コストを 40% 削減できる。さらに、① 母株基部を用いることで培養土やトレイなどの節約による資材にかかわるコストの削減、② 植付けのための人件費や時間の削減、も見込むことができる。それゆえ、併用増殖法は、増殖体の生産コスト全体を削減する上でも有用な手法の一つとなりうると考えた。本試験では増殖体として

Fig. 4 Time courses of simulated total number of harvestable propagules (single nodal cuttings each with an unfolded leaf (SNC)) produced in the closed transplant production system ($P(n)$) as affected by the propagation methods (propagation method using SNC only, and propagation method using both SNC and stock plant bases each with an unfolded leaf (SPB) as propagules).

The initial number of SNC used as propagules in the system ($P(0)$) and planting density (D) were 400 and 473 m⁻², respectively. Multiplication ratios for SNC (m_c) and SPB (m_s) were 1.8 and 3.7, respectively. Multiplication cycle was 12 d. The i is the number of repetitive use of the SPB as propagules.

Fig. 5 Time courses of simulated electric energy consumption per harvestable propagule (single nodal cutting with an unfolded leaf (SNC)) produced in the system ($E_p(n)$) as affected by the propagation methods (propagation method using SNC only, and propagation method using both SNC and stock plant base with an unfolded leaf (SPB) as propagules).

The initial number of SNC used as propagules in the system ($P(0)$) and planting density (D) were 400 and 473 m^{-2} , respectively. Multiplication ratios for SNC (m_c) and SPB (m_s) were 1.8 and 3.7, respectively. Multiplication cycle was 12 d. The i is the number of repetitive use of the SPB as propagules.

母株基部を1回使用した場合 ($i=1$) の増殖比を m_s とした。しかし、同一の母株基部を繰返し ($i>1$) 使用し続けた場合と、1回のみ使用した場合とでは m_s は異なる可能性がある。今後、 $P(n)$ および $E_p(n)$ をより精度よく推定する上で、 i が m_s に及ぼす影響を把握する必要がある。

結 論

閉鎖型苗生産システムによる本試験条件下では、サツマイモの増殖体の生産に単節と母株基部も併用する併用増殖法を用いることで、単節のみを用いる単節増殖法と比べて、単節生産数が10サイクル目では89~197倍に増えるとともに、生産された単節あたりの消費電力量が40%削減できることが示された。また、母株基部の使用は、培養土やトレイなどの資材の節約にもつながることから、併用増殖法のサツマイモの増殖体生産への応用は有用であると考えた。

文 献

Aitken-Christie, J., Jones, C. 1987. Towards automation: Radiata pine shoot headges in vitro. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* **8**: 185-196.
 Cao, W., Moss, D. N. 1989a. Temperature effect on leaf emergence and phyllochron in wheat and barley. *Crop Sci.* **29**: 1018-1021.
 Cao, W., Moss, D. N. 1989b. Day length effect on leaf emergence and phyllochron in wheat and barley. *Crop Sci.* **29**: 1021-1025.
 Hara, M., Kozai, T. 1992. Mathematical methods to maximize the overall multiplication ratio of micropropagation in a deter-

mined period. *Acta Hort.* **319**: 625-630.
 Humphries, S., Simonton, W., Thai, C. N. 1991. Computer-aided management of plant tissue culture production. *Comput. Electron. Agric.* **6**: 33-49.
 Kozai, T. 1999. Electric energy consumption rate for light, air conditioning system and other equipment. (Japanese text) In "Development and Application of Closed-Type Transplant Production System for Solving the Global Issues" (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—) (ed. by Kozai, T.). Yokendo, Tokyo, p 79-87.
 Kubota, C., Kozai, T. 2001. Mathematical models for planning vegetative propagation under controlled environments. *Hort-Science* **36**: 15-19.
 Libby, W. J., Brown, A. G., Fielding, J. M. 1971. Effects of hedging radiata pine on production, rooting, and early growth of cuttings. *N. Z. J. For. Sci.* **2**: 263-283.
 Lok, Y. H., Ohshima, K., Kubota, C., Kozai, T. 2002. 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.
 Ohshima, K., Yoshinaga, K., Kozai, T. 2000. Energy and mass balance of a closed-type transplant production system. (Part 1) Energy balance. (Japanese text with English abstract) *J. High Tech. Agric.* **12**: 160-167.
 Simonton, W., Thai, C. N. 1988. Plant tissue culture production planning using computer simulation/optimization. *Trans. ASAE* **31**: 1616-1622.
 Yamada, C., Ohshima, K., Kozai, T. 2000a. Time course of net photosynthetic rate of sweetpotato plants canopy in a closed-type transplant production system. (Japanese text with English abstract) *Environ. Control in Biol.* **38**: 247-254.
 Yamada, C., Ohshima, K., Kozai, T. 2000b. Photosynthetic photon flux control for reducing electric energy consumption in a closed-type transplant production system. (Japanese text with English abstract) *Environ. Control in Biol.* **38**: 255-261.