閉鎖型苗生産システムの開発およびその利用

大山克己¹・古在豊樹²・全 昶厚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

Development of Closed-type Transplant Production System and Its Application

Katsumi OHYAMA¹, Toyoki KOZAI² and Changhoo CHUN²

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

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

Abstract

The closed system is defined as a warehouse-like structure covered with opaque thermally insulated walls, multi-shelves with lamps, home-use air conditioners, and other equipments for water and CO₂ supply. Environments inside the closed system are not disturbed and thus can be controlled as desired. Ventilation is restricted at minimum to minimize resource consumption and environmental pollution, and to prevent insects and/or pathogens from entering into the system. It was estimated that the initial cost for construction of the closed system per transplant could be the same as that of the open system (i.e., greenhouse). Optimally controlled environments in the closed system enhanced the growth and development of several transplants so that the production period in the closed system was reduced by 10 to 50%, compared with that in the open system.

Electric energy consumption per transplant in the closed system was 0.3-0.6 MJ, and its cost was 1-2 Japanese Yen. Water and CO₂ consumptions in the closed system were, respectively, about 1/15 and 1/5 of those in the open system. Transplant quality (vigor, growth uniformity, controlled flower development, etc.) was higher in the closed system than in the open system. We concluded that high quality transplants could be produced within a significantly shorter period and with less consumption of resources in the closed system than in the open system. Hence, the closed system was economically competitive over the open system for many horticultural, medicinal and other crops.

Keywords : initial cost, production period, quality of transplants, resource consumption, ventilation

はじめに

21世紀における環境劣化、石油資源および食料の不足に関する地球規模の問題の解決に貢献するためには、植林緑化植物、石油代替植物、園芸作物、工芸作物、食料作物などの苗が大量に必要とされる¹⁾。これらの苗を

省資源的、環境保全的、省力的、かつ安定的に大量生産するためには、従来とは発想と基盤技術が異なる革新的な苗生産システムの開発が必要である^{2,3)}。筆者らは、上記の背景にもとづいて、閉鎖型苗生産システムの開発研究を行っている⁴⁻²⁰⁾。現在までに、閉鎖型苗生産システムを用いて高品質な苗を1本あたり1-2円程度の電気料金で、かつ必要最小限の資源で、生産できることを示唆した。また、システム内の環境調節により、従来よりも高付加価値化した苗を生産できることを実証した。本稿では、筆者らの研究グループにおける成果を紹介しつ

2002年10月1日受付

2002年10月26日受理

つ、閉鎖型苗生産システムの定義や具体例を紹介し、従来の苗生産で用いられている自然光利用の温室と比較する。

定 義

内外の物質(水、CO₂ など)交換が最小限となるように制御された、光に不透明な断熱壁に囲われた建物内で、人工光を利用して植物を生産するシステムを閉鎖型植物生産システムと呼び、その利用を苗生産に限定した場合を閉鎖型苗生産システム(以下、閉鎖型システム)と呼ぶ。他方、閉鎖型植物生産システムと比べて内外の物質交換が制御されていない建物(例えば、自然光利用の温室)とその付属設備からなる生産システムを開放型植物生産システムと呼び、その利用を苗生産に限定した場合を開放型苗生産システム(以下、開放型システム)と呼ぶ。なお、従来の研究と比較した場合、完全制御型植物工場のうち、内外の物質交換が最小限となるような概念にもとづき設計された植物工場のみが閉鎖型植物生産システムに分類され、従って、大半の植物工場(例えば、太陽光利用型植物工場)は開放型植物生産システムに分類される。

苗生産を目的とする理由

筆者らの研究グループでは、閉鎖型システムにおける苗生産に着目している。これは、1)一般的に栽植密度が500-2500本/m²と高い、2)最適光強度が比較的低く、光合成有効光子束(以下、PPF)で表すと100-350 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 程度である(幅60cmの棚で30-40cm程度の距離から蛍光灯により近接照射した場合、その管数は3-6本で上述のPPFを実現可能)、3)草丈が短く、蛍光灯を用いた場合には近接照射が可能である^{21,22)}ので、間隔を30-40cm程度にして棚を多段にできる(苗の移動を人手で行なう場合4-5段程度、搬送装置などで行なう場合はそれ以上)、4)近接照射されていて、かつPPFや気温、CO₂濃度などの環境条件が適切に制御されていることから、光利用効率(投入エネルギー量に対する光合成による固定化学エネルギー量の百分率)が高い、5)環境調節による苗品質向上と成長促進が容易である、6)生産の計画・調整がしやすい、からである。

閉鎖型システムにおいては、自然光を利用した開放型システムでは実現困難な環境にも制御できることから、それを利用してさらなる苗の成長促進や高付加価値化、電力コストの削減などが可能となる。例として、1)低光強度でも日長を16-24時間と延長することで、従来と同

等の苗を生産できる²³⁾、2)連続明期下でも変温処理と組み合わせることで、ナス科植物でも従来と同様の苗の生育および花房分化が認められる²⁴⁻²⁶⁾、3)育成期間中の暗期の気温を低下させることで、夏季においても適切な位置にトマトの第1花房を分化させられる²⁷⁾、4)電気料金の安価な時間帯にのみ強光を照射して苗を育成できる²⁸⁾、ことなどがあげられる。

他方、これまでの環境条件と植物の生育との関係調べた研究では、自然環境下における植物の生育反応に関する知見が主であり、自然環境下では起こりえない条件下でのそれは少ない。今後、閉鎖型システムを用いていく上で、そのような環境下での植物成長に関する研究が必要となってくると考えられ、その研究を開始した。これまでに、日長を48時間にした場合の苗の生育²⁹⁾、明暗や気温の非周期的変動が苗の生育におよぼす影響^{30,31)}、日長を24時間に限定しない条件下でのハウレンソウの抽だい^{32,33)}、に関しての知見が得られた。

閉鎖型植物生産システムで苗以外の植物を生産することは、外界の気象条件に影響されずに生産できるといった点で大きな魅力ではある。しかし、苗生産の場合と異なり、1)最適PPFが比較的高い(300 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以上)、2)栽植密度が低い、3)苗と比べて草丈が長いので近接照射が難しい、4)育苗期間と比べて栽培期間は通常長い、5)果菜類の場合は可食部よりも植物体全体に占める非可食部の百分率が高い、といった人工光源を利用する上での短所も存在することから、現在のところ、上記の短所の影響による生産コストの上昇が比較的小さい葉菜類の生産において実用例(例えば、キューピー[®]のTSファームなど)が見られるだけである。今後、技術的な進歩および社会的状況の変化によりトマトなどの果菜類の生産を目的とした閉鎖型植物生産システムが実用化する可能性もあるが、現状では、販売価格の高い薬用植物や高級園芸植物(イチゴ、ラン、ハーブなど)、特殊工芸作物(サフランなど)などがその候補となるにとどまる。

閉鎖型システムの具体例

本稿では、閉鎖型システムの具体例として、千葉大学園芸学部(千葉県松戸市)内にある大規模生産用システム³⁴⁾とその1/10の生産能力に相当する農家普及用システム^{35,36)}について、簡単に説明する。

1. 大規模生産用システム

現在、千葉大学園芸学部内に、その実証研究を目的とした閉鎖型システムがある。このシステムは、研究用設

備と苗生産用設備とにより構成されている。研究用設備として、生物工学系および物理工学系の測定および作業用の実験室が5室設けられている。苗生産用設備は、クリーンエリアと非クリーンエリアに大別される。クリーンエリアには、育苗成空間である培養室および2つの育苗室、貯蔵の際に利用される低温貯蔵室、および植付けなどの作業のための作業室により構成される。他方、非クリーンエリアには、システムを運営・管理するためのコンピュータなどが配置されている制御室、作業の準備を行なう準備室、貯蔵もしくは出荷の際に通過する低温貯蔵室、器具やトレイなどの洗浄に用いられる洗浄室、および制御機器などが設置された機械室により構成される。そのほかに、居室や管理主任室などが設けられている。培養室および育苗室には、それぞれ2および4台の基本モジュールが設置されている。基本モジュールは、蛍光ランプ、エアコン、ファン、加湿器および7段の育成棚により構成される。実験室内の育成棚の各段には、光源として32 W 白色高周波蛍光ランプが16本、16 W 白色高周波蛍光ランプが3本それぞれ設置されている。家庭用エアコンは基本モジュールごとに3台設置され、エアコンの吹き出した空気とファン周辺の空気がファンにより混合された後、各育成棚にほぼ均一に送り込まれる。その結果、比較的均一な環境制御結果が得られ、ほぼ均一に苗は生育する³⁷⁾。1台の基本モジュールで56枚のトレイを収容することができるので、育苗期間を2-3週間とし、通年稼動した場合、年間でトレイにして9500-14600枚のセル成型苗を生産できる。これは、トレイあたりのセル数が72穴の場合は70-100万本に、400穴の場合は380-580万本にそれぞれ相当する。トレイの移動は自動倉庫などで利用されている搬送装置を用いている。この搬送装置は、培養室および育苗室にそれぞれ1台ずつ設置され、他方、かん水装置も設置されているので、かん水時にも利用される。かん水装置としては、噴射式底面かん水装置^{38,39)}が採用され、より高度な培地水分管理が可能となっている^{40,41)}。建物の屋上には太陽熱温水器が設置されていて、そこで作られた70-80°Cの温水がトレイの洗浄などに利用される。これまでに、閉鎖型システムにおけるエネルギーおよび物質収支の解析結果より、省資源・省エネルギー的な苗生産が可能であることが示唆されている⁴²⁻⁴⁸⁾。他方、システムの運用・管理のために、自律分散制御を利用したソフトウェア⁴⁹⁻⁵⁶⁾も導入されている。苗個体群の成長管理用システムとして、双眼カメラを利用して苗個体群の成長度を測定するための画像計測システム⁵⁷⁾が用いられている。現在、ニューラルネットワークを利用した成長量予測精

度の向上も図られている⁵⁸⁾。

2. 農家普及用システム

最近になり、比較的小規模な閉鎖型システムの開発もはじめられている。このシステムでは、全体で48枚のトレイを収容でき、気温およびCO₂濃度は自動的に調節される。トレイの移動は人手により行なうことを前提としている。かん水には、底面式自動かん水装置⁵⁹⁾を用いられる。育苗期間を2-3週間とし、通年稼動した場合、年間でトレイにして800-1300枚のセル成型苗を生産できる。このシステムは、前述の大規模システムの1/10程度の生産能力であり、年間のセル成型苗生産数はトレイあたりのセル数が72穴の場合は6-9万本に、400穴の場合は30-50万本にそれぞれ相当する。

主要構成要素とその特徴

閉鎖型システムの主要構成要素は、光に不透明な断熱材で囲われた構造物、蛍光ランプ、多段棚、エアコン、空気循環ファンおよびCO₂施用装置である。閉鎖型システムでは、開放型システムの主要構成要素である、温室構造物、暖房装置、換気装置、保温カーテン、ベンチ・ベッドは不要である。かん水装置、総合環境制御装置は両システムに共通な構成要素である。

閉鎖型システムにおけるPPFと明期は、ランプの点灯数と点灯時間の調節で正確に制御できる。気温などの環境条件も、システム外の天候による影響をうけることなく高精度に制御できる。他方、開放型システムでは、PPFの調節精度は遮光装置と補光装置を用いても不十分であり、また、明期を自然日長より短縮するのは困難である。気温もシステム外の天候による影響をうけやすく、高精度に制御するためには大量のエネルギー投入を必要とする。

家庭用電化製品を用いることの利点

筆者らの研究グループでは、閉鎖型システムの構成要素として、家庭用電化製品および一般建築用部品を用いることを想定している。これらは、高性能かつ低価格なためであり、また、廃棄時のリサイクルシステムが確立されているからである。

蛍光ランプの発光効率(ランプの消費電力あたりの光束(lm W⁻¹))は、ここ20年間で50%向上している⁶⁰⁾。発光効率の向上は、主にインバーターの導入とハロゲン化希土類蛍光体の利用による。また、蛍光ランプの平均寿命は3000時間から12000時間になった。他方、蛍光

ランプ内に封入されている環境汚染物質である水銀の量の削減が取り組まれ、従来のそれよりも30%程度削減された。他方、リサイクルシステムも完成されている。

家庭用エアコンの節電技術も、大幅に向上してきている。家庭用エアコンに関して、平均年間消費電力量は、1994年から1998年の5年間で、50%低下し、定格電力は70%に低下した⁶¹⁾。その結果、家庭用エアコンの冷房時成績係数は、日本工業規格で定められた標準条件下(室内27°C/室外35°C)で、2.5程度から4程度にまで向上した。この理由として、1)インバーターの導入、2)モータの性能向上、3)熱交換機の性能向上、などがあげられる。現在では、冷房時の成績係数が6近くにまで高められた製品も販売されはじめている。他方、家庭用エアコンは、特定家庭用機器再商品化法、いわゆる家電リサイクル法の施行に起因して、リサイクルに対する配慮がなされるようになり、冷媒(R-22)の廃棄処理システムの開発や代替フロン(R410A)の導入が図られている。

閉鎖型システムと比較して、開放型システムの構成要素はどうであろうか。現状では、施設園芸に特有な製品であり、家庭用電化製品に比較して技術進歩が遅く、高価である。また、リサイクルシステムが確立されていないので、廃棄処理コストが高くなる。今後、環境負荷に対する課金が発生した場合には、システムの建設から廃棄までの一連のコストを考慮すると、閉鎖型システムの方が開放型システムよりも低コストとなりうる。

生産性の向上

開放型システムと比較して、閉鎖型システムは以下のような利点を有するために、単位面積あたりの生産性が向上すると考えられる。1)多段棚の利用により、床面積あたりの育苗面積を2.5倍以上にできる(育苗面積/床面積比の例：開放型システム、0.7-0.8；閉鎖型システム、2.5-3.0)、2)通風と低相対湿度により、育苗密度を1.5倍以上に増やしても、苗質の低下は認められない⁶²⁾、3)システム内の環境調節が比較的正確に行われることにより苗の生育がそろい³⁷⁾、苗商品化率を10%以上向上できる可能性がある(例：開放型システム、85%；閉鎖型システム、95%)。上記の1)-3)の数値にもとづくと、閉鎖型システムでは開放型システムに比較して、1回の単位面積あたりの苗生産数を4倍以上(=2.5×1.5×1.1)に増大できる。

さらに、4)CO₂濃度、光強度、明期、気温などの環境調節により、育苗日数を10-50%短縮できる⁶²⁻⁶⁴⁾、5)閉鎖型システムは外界気象にかかわらず周年利用でき

ることから、年間の稼働日数を10%以上増やすことができる、といったことにより生産性が向上すると予想される。

前述した1回の単位面積あたりの苗生産数が4倍となることに加えて、育苗期間が25%短縮でき、稼働日数を10%増大させることができると仮定した場合、閉鎖型システムは開放型システムに比較して、年間で床面積あたり苗生産数を約6倍(=4×1.1÷0.75)に増大できる。後述するような苗品質の向上により、閉鎖型システムで生産した苗の販売価格は開放型のそれより約10%高くできるとした場合、床面積あたり生産額は開放型システムに比較して約7倍になる。他方、開放型システムに比較して、閉鎖型システムでは、快適な労働環境での作業だけではなく、作業面積が1/6に減少することにもなる人や物品の移動距離削減との相乗効果により、労働生産性は10%以上高まると予想される。

初期施設設備費

上述のように、閉鎖型システムは、開放型システムに比較して、年間の床面積あたり苗生産能力を約6倍以上にできると予想される。それゆえ、閉鎖型システムの苗生産数あたりの初期施設設備費は、開放型システムのそれと比較して、現在でも同等もしくはそれ以下であろう。

現在、日本におけるガラス室の建屋価格は25,000円/m²程度である。また、保温カーテン、遮光カーテン、換気装置、かん水装置、細霧冷房装置、温風暖房装置、ベッド・ベンチなどの設備価格は、各数千円/m²であるので、建物と装置の合計価格は50,000円/m²程度である。例をあげると、300m²の育苗ガラス室の初期施設設備価格は1,500万円になる。他方、年間苗生産数が上記開放型システム(育苗ガラス室)の同等な閉鎖型システムの床面積は50m²であり、現在、床面積50m²閉鎖型システムの初期施設設備価格は1,000-1,500万円程度(20-30万円/m²)以下であるので、閉鎖型システムの初期施設設備費は開放型システムのそれと同等以下となる。あわせて、上記の仮定の下で閉鎖型システムを用いた場合では、土地面積を250m²(=300-50)節約できるので、その土地を他用途に活用できる。

閉鎖型システムが普及して量産が開始された場合、家電製品・断熱材のメーカーまたは問屋からの大量一括購入による50%以上の値引きが通常可能であることから、閉鎖型システムの初期施設設備費は現在の1/2以下となる。なお、家庭用エアコンの販売価格は、業務用エアコンのそれと比較して1/3程度(家庭用エアコン：約20万

円、業務用エアコン：約60万円)であり、また冷房時の成績係数(電気消費量あたりの冷房能力)は約2倍(家庭用エアコン：約6、業務用エアコン：約3)、すなわち電気消費量は約1/2である。ただし、前述の成績係数は日本工業規格で定められた標準条件下(室内：27°C/室外：35°C)で求められたものであり、実際に稼動した場合には夏季においてもそれよりも大となり、電気エネルギー消費量は少なくすむ⁶⁵⁾。

苗品質の向上

苗品質は、外観品質と生理的な特性にもとづく品質とに大別される。外観品質とは、大きさ、葉色、質感などであり、また、生理的な特性にもとづく品質とは、花芽の分化が開始されている、移植後のストレスに耐えうるだけの貯蔵養分が含まれる、ことなどが例としてあげられる。閉鎖型システムでは、1)育苗密度でも、コンパクトで強健な苗が、トレイ間およびトレイ内で均一に生育する^{37,63)}、2)サツマイモでは単節単葉を外植体として2週間でセル成型苗のような小苗に仕立てることができる⁶⁶⁾、といった一般的な外観品質の向上が見られるだけでなく、3)トマトでは葉位8段目に第1花房が確実に分化発育し、早期収穫、増収が可能になる^{27,62)}、4)ハウレンソウなどでは夏の収穫時に抽だいしない苗になる^{67~71)}、5)トルコキキョウなどでは出荷時に抽だいしている苗になる⁷²⁾、6)パンジーでは花芽分化・開花が早期に開始した苗ができる^{73,74)}、といった苗として望まれる生理的特性をもつ、すなわち付加価値がある苗を生産できることが実証されている。これらの苗の高付加価値化は、開放型システムでは困難であるか、大幅な生産コストの上昇を引き起こすと考えられる。苗の高付加価値化は、閉鎖型システムで生産した苗の開放型生産システムで生産したそれに対する差別化、ひいては高価格で販売する上での一つの手法となる。

電気エネルギー消費量および電気料金

閉鎖型システムは厚さ100-150 mm以上の断熱壁で覆われ、かつ換気が抑制されているので、夏期でもシステム外から壁を通しての熱侵入はほとんどなく、また、冬の暖房は、外気温が-5-0°C程度であれば不要である。年間電気エネルギー消費量の内訳は、照明65-75%、空調15-20%、ポンプ・空気循環ファンなど5-20%である^{42,43,75)}。苗あたりの電気エネルギー消費量は0.3-0.6 MJであり、平均的な苗販売価格50円程度に対して、

苗あたりの電気料金は現在1-2円である⁷⁶⁾。トレイあたりの苗数が多くなるほど苗あたり電気料金は小となる。また、環境調節による育苗期間の短縮によっても、苗あたり電気料金は削減できる。

閉鎖型システムの電気エネルギー消費量を節減していく上で、高性能な要素技術を採用していくことは必須である。また、それぞれの要素が十分に性能を発揮できるようにシステムを設計することも必要である。とくに、照明システムに関しては、その電気エネルギー消費量が全体のそれに占める百分率が高いことから、適切なランプの本数、配置、反射板の設置といった、照明システムの適切な設計が重要である。

かん水量、施用CO₂量、施肥量 および農業使用量の節減

閉鎖型システムでは、以下のような理由により、開放型システムと比べて、かん水量、施用CO₂量、施肥量および農業使用量を節減することが可能である。1)換気量が小さいために、システム外への水損失がほとんど無い、2)苗・培地から蒸発散した水はエアコンの冷却コイルで凝結し集められ、それをかん水に再利用することにより、その必要量が約1/5-1/15になる^{44,77)}、3)システム外へのCO₂の流出が少なく、施用したCO₂の80-90%が植物に光合成により吸収される^{46,48)}、4)肥料成分を含んだかん水余剰水がシステム外に排出されないの、施肥量を節減でき、また排水による環境汚染がない、5)害虫および病原菌の侵入を開放型システムと比較して阻止しやすく、それゆえ農業はほぼ不要であり、また、使用するとしても、閉鎖型であるがゆえにシステム外への薬剤の散逸が少なく、結果として使用量は少なくてすむ。

苗生産予測およびシステムの運用・管理

閉鎖型システムのような環境制御下では、苗の生育もしくはガス交換特性をシステム内の環境の関数として表すことが容易である⁷⁸⁾。これまでに、比較的簡単な数理モデルを用いて、閉鎖型システムにおけるサツマイモ苗個体群の光合成速度⁷⁹⁾や蒸発散速度⁸⁰⁾の推定、気流速度が苗のガス交換におよぼす影響⁸¹⁾、苗の生育予測⁸²⁾、栄養繁殖法を用いたときの増殖体生産数予測^{83~87)}についてそれぞれ検討してきている。現在、その精度を上げるために必要とされる基礎知見も収集している⁸⁸⁾。これらの研究は、システムの運用・管理面で有益な基礎知見となるので、今後さらに発展させる必要がある。

他方、システムの運用・管理技術の良否により、苗の品質の良否は影響される場合がある。閉鎖型システムにおいては、開放型システムよりもその運用・管理技術は簡略化しようと考えられるが、さらなる簡略化、省力化のためには、コンピュータの利用が必須である。ただし、そのコンピュータは特別なものではなく、比較的安価な量販品でも十分である。

今後の課題

閉鎖型システムの普及のためには、さらなる低コスト化が必要とされる。実用的なシステムの開発は、現在のところ数社で行なわれているが、まだ始まったばかりであり、依然高価である。導入事例に関しても、ごくわずかである。今後、閉鎖型システムの苗生産現場へのさらなる普及を図るためには、不必要な機能を一切省き、より低価格で供給されるシステムの開発が必要となる。あわせて、開放型システムと比べて、より高品質な苗をより低コストで生産できることを実証する必要がある。

ビール工場や食品工場などでは、製品の生産工程の中でゴミを排出しないというゼロエミッションがこれまでに達成されている。また、コンピュータ工場や自動車工場でも、それ目標として掲げられている。これは、企業イメージ向上だけではなく廃棄物の処理費用および資材調達費用も節減できるためである。閉鎖型システムでは、閉鎖型であるがゆえにゼロエミッションの達成は比較的容易であると考えられ、コスト削減の上でも、また、システム外周辺に与える影響、すなわち環境汚染を最小にする上でも、今後、それを目標とすべきであろう。

現在、あるシステム(例えば、工場など)が周辺の環境に与える影響の度合いを表すための手法として、ライフサイクルアセスメント(Life Cycle Assessment, LCA)が導入されつつある。LCAとは、製品の原料調達から廃棄までのそれぞれのステージにおいて、システム外の環境に与える影響を定量的に把握する手法の1つである。農業分野においても導入されつつあり、水稻生産や、肉牛生産の分野においてLCAが取り組まれている⁸⁹⁾。今後、LCAによる閉鎖型システムと開放型システムの評価を行うことで、閉鎖型システムで苗を省資源的に生産できることがより明確になるであろう。

食品工場などの高度な衛生管理を必要とされるところでは、作業の手順を明確にし、汚染が予想される場所の重点的な管理を行なうというHACCP(Hazard Analysis and Critical Control Point)が導入されている。現在のところ、苗生産現場における病虫害管理は、その管理

者もしくは個々の生産業者によって異なっていて、明文化もしくは標準化されたそのような指標は見あたらない。閉鎖型システムにおいても、病虫害に汚染されていないことも重要な苗の品質の1つであることから、HACCPと同様の概念で病虫害管理を行なう必要がある。

おわりに

閉鎖型システムは従来の苗生産で用いられている温室のような開放型システムに比較して上述のような多くの利点を有することから、今後、実用的苗生産システムとして普及しようと筆者らは考えている。その根拠として、1)苗の品質向上、2)苗あたり資源総使用量の低減、および3)それにとまなう生産コストの低減、があげられる。苗の品質向上は、ここにあげた例だけでも十分その可能性を示すことができる。今後、さらなる実証試験により、より明確にできるであろう。苗あたり資源総使用量は、閉鎖型システムの方が開放型システムより低くなり得る。まだ実験的には証明されていない部分もあるが、水およびCO₂輸送に関する結果より推測すると、閉鎖型システムの方が開放型システムより苗あたり資源総使用量は小さくなると予想される。詳細なコスト試算に関しては今後の課題ではあるが、本稿に示した程度の単純な試算を行なった場合でも、十分にその実用化の可能性を示すことができる。若干の課題は残されているが、早期に解決しえるものばかりである。それらを解決していくことで、比較的近い将来、閉鎖型システムの苗生産現場への導入が行なわれ、高品質な苗がより安価に流通することを望む。

謝 辞

東海大学開発工学部の星 岳彦氏には、本稿作成時に有益な意見をいただいた。ここに、感謝の意を表する。

引用文献

- 1) 古在豊樹：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) 古在豊樹：新しい植物生産システムとその研究方向・課題の展望 [1] 一環境調節工学の立場から一、農業および園芸、71(1)：10-14(1996)
- 3) 古在豊樹：新しい植物生産システムとその研究方向・課題の展望 [2] 一環境調節工学の立場から一、農業および園芸、71(2)：243-248(1996)

- 4) 全 昶厚：優良均質苗を育てる人工照明苗プラント，照明学会誌，85(3)：213-216(2001)
- 5) Chun, C. and Kozai, T.：A closed transplant production system, a hybrid of scaled-up micro-propagation system and plant factory, J. Plant Biotechnology, 3(2)：59-66(2001)
- 6) 古在豊樹：植物組織培養の新段階—培養器環境から地球環境へ—，農山漁村文化協会，pp. 1-172(1998)
- 7) Kozai, T.：Transplant production under artificial light in closed systems, Proc. the 3rd Asian Crop Science Conference, Taichung, Taiwan：296-308(1998)
- 8) Kozai, T., Ohyama, K., Afreen, F., Zobayed, S., Kubota, C., Hoshi, T. and Chun, C.：Transplant production in closed systems with artificial lighting for solving global issues on environmental conservation, food, resource, and energy, Proc. ACESYS III Conference—from protected cultivation to phytomation—, Rutgers University, New Jersey, USA：31-45(1999)
- 9) 古在豊樹・全 昶厚・大山克己：閉鎖型苗生産システムの開発と利用，SHITA REPORT NO. 16 植物工場の最新技術 その2：14-29(2000)
- 10) 古在豊樹・全 昶厚・大山克己：新たな苗生産システムの構築を目指して [1] —閉鎖型苗生産システムの提案—，農業および園芸，75(3)：371-377(2000)
- 11) 古在豊樹・全 昶厚・大山克己：新たな苗生産システムの構築を目指して [2] —閉鎖型苗生産システムの提案—，農業および園芸，75(4)：453-458(2000)
- 12) Kozai, T.：A closed system for mass production of transplants with minimum resources and environmental pollution, Proc. Intl. Sympo. Trends in plant cell culture and biotechnology for plant production and crop improvement, Bangkok, Thai land：1-17(2000)
- 13) Kozai, T., Chun, C., Kubota, C. and Ohyama, K.：Transplant production in closed systems with artificial lighting for solving global issues on environmental conservation, food, resource, and energy, Proc. ACESYS IV Conference—Environmentally friendly High—Tech Controlled Environment Agriculture—, Tsukuba, Ibaraki, Japan：110-126(2000)
- 14) Kozai, T., Chun, C., Islam, A.F.M.S. and Ohyama, K.：Efficient production of sweetpotato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) propagules and transplants using single node leafy cuttings in closed systems with artificial lighting, Proc. Intl. workshop on sweetpotato cultiver decline study, Miyakonoyjo, Miyazaki, Japan：106-115(2000)
- 15) Kozai, T., Kubota, C., Chun, C., Afreen, F. and Ohyama, K.：Necessity and concept of the closed transplant production system, In：Kubota, C. and Chun C.(eds.), Transplant Production in the 21st Century, Kluwer Academic Publishers, pp. 3-19(2000)
- 16) Kozai, T. Kubota, C., Chun, C. and Ohyama, K.：Closed transplant production systems with artificial lighting for quality control, resource saving and environment conservation, Proc. The XIV memorial CIGR world congress 2000, Tsukuba, Ibaraki, Japan：103-110(2000)
- 17) 古在豊樹：省資源・環境保全的閉鎖型植物生産システム，生物と気象，1(1)：13-16(2001)
- 18) 古在豊樹：熱帯における森林資源の保全・再生とその多目的利用 熱帯林保全・植林に関する植物環境工学的アプローチ，熱帯農業，45(5)：308-314(2001)
- 19) Kozai, T. and Chun, C.：Closed systems with artificial lighting for production of high quality transplants with minimum resource and environmental pollution, Proc. Intl. Symposium on Design and Environmental Control of Tropical and Subtropical Greenhouses, Taichung, Taiwan：77-84(2001)
- 20) 大山克己：植物苗生産システム，(社)農業電化協会編，知っておきたい農業電化の先端技術用語テクノワード，農業電化協会，pp. 54-55(2001)
- 21) 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—近接照射による照明電力の低減—，植物工場学会誌，3(2)：111-123(1992)
- 22) 谷村泰宏・池田 彰：蛍光ランプを光源とする植物栽培システムの照明設計，CELLS 研究会誌，5(2)：7-10(1993)
- 23) Kitaya, Y., Niu, G., Kozai, T. and Ohashi, M.：Photosynthetic photon flux, photoperiod, and CO₂ concentration affect growth and morphology of lettuce plug transplants, HortScience, 33(6)：988-991(1998)
- 24) 大村好孝・大嶋好衣・古在豊樹：連続光照射下における変温処理はトマト実生の第一花房の着生葉位の低下とクロロシスの回避を可能とするか，関東の農業気象，26：26-27(2000)
- 25) 大村好孝・大嶋好衣・久保田智恵利・古在豊樹：連続光照射下における変温処理がナス，ピーマンおよびトマト実生の生育に及ぼす影響，農業環境工学関連4学会 2001 年合同大会：50(2001)
- 26) Omura, Y., Oshima, Y., Kubota, C. and Kozai, T.：Treatments of fluctuating temperature under continuous light enabled the production of quality transplants of tomato, eggplant and sweet pepper, HortScience, 36：586(2001)
- 27) 大山克己・真辺幸治・大村好孝・久保田智恵利・古在豊樹：閉鎖型苗生産システムと開放型苗生産システムの夏季におけるトマトセル成型苗の品質と資源消費量の比較例，生物環境調節(2002，投稿中)
- 28) 鈴木光則・全 昶厚・古在豊樹：閉鎖型苗生産シ

- システムに関する研究3. 深夜電力利用によるトマトセル成型苗生産, 日本植物工場学会平成10年度大会講演要旨: 52-53(1998)
- 29) 大村好孝・古在豊樹: 48時間明暗周期における明期・暗期気温差がトマト実生の茎長および乾物重に及ぼす影響, 関東の農業気象, 26: 28-29(2000)
 - 30) 大村好孝・戸井田宏美・古在豊樹: 非周期的および周期的明暗下におけるトマト実生の生育, 農業環境工学関連4学会2001年合同大会: 67(2001)
 - 31) 大村好孝・戸井田宏美・古在豊樹: 連続明期下において24時間の温度周期はトマト実生の生長を最大とするか, 農業環境工学関連4学会合同大会2002年度大会講演要旨: 193(2002)
 - 32) 阿南純一・全 昶厚・古在豊樹: 24時間に限定しない明暗周期下におけるハウレンソウの抽だいおよび花芽の発達, 農業環境工学関連4学会2002年合同大会講演要旨集: 194(2002)
 - 33) 全 昶厚・古在豊樹・阿南純一・渡辺 歩・樋川 亘: 自然界に存在し得ない環境条件下における植物生育—明暗周期と植物苗の花成を中心に—, 農業環境工学関連4学会2002年合同大会講演要旨集: 359(2002)
 - 34) Chun, C. and Kozai, T.: Closed transplant production system at Chiba University, In: Kubota, C. and Chun C.(eds.), Transplant Production in the 21st Century, Kluwer Academic Publishers, pp. 20-27(2000)
 - 35) 全 昶厚・古在豊樹・布施順也: 小規模閉鎖型苗生産システムの開発, 農業環境工学関連4学会合同大会2001年度大会講演要旨集: 318(2001)
 - 36) 岡部勝美・土屋 和・布施順也・中南暁夫: 人工光閉鎖型苗生産装置の開発とその応用, SHITA REPORT NO. 18 植物工場をとりまく最新テクノロジー: 14-29(2002)
 - 37) 大山克己・横井真悟・長谷川智行・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物理環境要素の空間的微小変動と苗の生育のばらつきとの線形重回帰分析, 農業環境工学関連4学会合同大会2002年度大会講演要旨: 186(2002)
 - 38) 村瀬治比古: プラグトレイ用噴射式底面灌水装置の開発, 日本農業気象学会1999年度全国大会・日本生物環境調節学会1999年大会合同大会講演要旨: 328-329(1999)
 - 39) Murase, H.: Microprecision irrigation system for transplant production, In: Kubota, C. and Chun, C.(eds.), Transplant Production in the 21st Century, Kluwer Academic Publishers, pp. 33-37(2000)
 - 40) 大山克己・横井真悟・長谷川智行・村瀬治比古: 噴射式底面かん水装置の利用 その1 初期噴射圧力と電磁弁開放時間がかん水量におよぼす影響, 農業環境工学関連4学会合同大会2002年度大会講演要旨: 168(2002)
 - 41) 大山克己・横井真悟・長谷川智行・村瀬治比古: 噴射式底面かん水装置の利用 その2 トマトセル成型苗育成期間中の培地の体積含水率制御, 農業環境工学関連4学会合同大会2002年度大会講演要旨: 169(2002)
 - 42) 西村将雄・古在豊樹・久保田智恵利・全 昶厚: 実用規模閉鎖型苗生産システムのエネルギー収支, 植物工場学会誌, 13(4): 254-261(2001)
 - 43) 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): 167-170(2000)
 - 44) 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)
 - 45) 大山克己・長谷川智行・横井真悟・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水収支の苗の生育にともなう変化, 農業環境工学関連4学会合同大会2002年度大会講演要旨: 188(2002).
 - 46) 大山克己・長谷川智行・横井真悟・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二酸化炭素収支の苗の生育にともなう変化, 農業環境工学関連4学会合同大会2002年度大会講演要旨: 189(2002)
 - 47) 大山克己・横井真悟・長谷川智行・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エネルギー収支の苗の生育にともなう変化, 農業環境工学関連4学会合同大会講演要旨: 187(2002).
 - 48) 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)
 - 49) 長谷川智行・横井真悟・酒見幸助・林 泰正・星 岳彦・久保田智恵利・全 昶厚・古在豊樹: 自立分散制御を用いた苗工場生産管理システムの栽培試験, 農業環境工学関連4学会合同大会2001年度大会講演要旨: 325(2001)
 - 50) 林 泰正・星 岳彦・古在豊樹: 大規模植物増殖施設における受注・生産管理支援システム, 日本農業気象学会1999年度全国大会・日本生物環境調節学会1999年大会合同大会: 408-409(1999)
 - 51) 林 泰正・星 岳彦・古在豊樹: 大規模植物増殖施設における受注・生産管理システム, SHITA REPORT NO. 16 植物工場の最新技術 その2: 1-13(2000)
 - 52) 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): 1165-1174(2000)
 - 53) 林 泰正・星 岳彦・古在豊樹: 自律分散制御を用いた大規模苗工場生産支援システムの開発, 農業環境工学関連4学会合同大会2002年度大会講演要旨: 323(2002)
 - 54) Hoshi, T., Hayashi, Y. and Kozai, T.: Design concepts of computerized support systems for large-scale transplant production, In: Kubota, C. and Chun C.(eds.), Transplant Production in the 21st Century, Kluwer Academic Publishers,

- pp. 38-43(2000)
- 55) 星 岳彦・林 泰正・古在豊樹：個体群を管理単位とした生産支援システムの提案，農業環境工学関連 4 学会合同大会 2001 年度大会講演要旨：322(2001)
 - 56) 横井真悟・長谷川智行・林 泰正・星 岳彦・田口勝則・久保田智恵利・全 昶厚・古在豊樹：自律分散制御による苗工場生産管理システムの動作特性，農業環境工学関連 4 学会合同大会 2002 年度大会講演要旨：324(2001)
 - 57) Matsuura, Y., He D. and Kozai, T. : Development of transplant population analysis system, Intl. Ann. Meeting ASAE, Sacramento, California, USA. Paper No. 017051.(2001)
 - 58) He, D., Hirafuji, M. and Kozai, T. : Improvement of a binocular stereovision system by using artificial neural networks, J. SHITA, 14 (1) : 18-24(2002)
 - 59) 土屋 和・布施順也・岡部勝美・全 昶厚・古在豊樹：閉鎖型苗生産システムにおけるセルトレイ育苗のための自動灌水方法，農業環境工学関連 4 学会 2001 年合同大会：320(2001)
 - 60) 山本修司：照明の省エネルギーを考えるための照明の量と質の基本知識，鉄道と電気技術 9(12) : 5-11(1998)
 - 61) 大山和伸：省エネルギーエアコンの開発，電学論 D, 118(6) : 813(1998)
 - 62) 金子賢一・渋谷俊夫・古在豊樹：閉鎖型苗生産システムに関する研究. 1. トマトセル成型苗の生育特性，日本植物工場学会平成 10 年度大会講演要旨：48-49(1998)
 - 63) Ohyama, K., Fujiwara, M., Kozai, T. and Kimura, H. : Growth and development of transplants in a closed-type transplant production system, Intl. Ann. Meeting ASAE, Milwaukee, Wisconsin, USA. Paper No. 004084(2000)
 - 64) 大山克己・藤原雅哉・古在豊樹・全 昶厚：閉鎖型苗生産システムのナスセル成型苗育成時における電気エネルギーおよび水消費量，植物工場学会誌, 13(1) : 1-6(2001)
 - 65) 大山克己・古在豊樹・久保田智恵利・全 昶厚・長谷川智行・横井真悟・西村将雄：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，植物工場学会誌, 14(3) : 141-146(2002)
 - 66) He, D., Lok, Y.H., Chun, C. and Kozai, T. : Yield and growth of sweetpotato using plug transplants as affected by cell volume of plug tray and type of cutting, In : Kubota, C. and Chun C.(eds.), Transplant Production in the 21st Century, Kluwer Academic Publishers, pp. 154-159(2000)
 - 67) Chun, C., Kozai, T., Kubota, C. and Okabe, K. : Manipulation of bolting and flowering in spinach (*Spinacia oleracea* L.) transplant production system, Acta Hort, 515 : 201-206(2000)
 - 68) Chun, C., Watanabe, A., Kim, H-H., Fuse, J. and Kozai, T. : Bolting and growth of *Spinacia oleracea* L. can be altered by modifying the photoperiod during transplant production, HortScience, 35(4) : 624-626(2000)
 - 69) Chun, C., Tominaga, M. and Kozai, T. : Effects of photoperiod and carbon dioxide concentration during transplant production on floral development and bolting of *Spinacia oleracea* L., Environ. Control in Biol., 39(2) : 87-94(2001)
 - 70) Chun, C., Tominaga, M. and Kozai, T. : Floral development and bolting of *Spinacia oleracea* L. as affected by photoperiod and integrated photosynthetic photon flux during transplant production, HortScience, 36(5) : 889-892(2001)
 - 71) Kim, H-H., Chun, C., Kozai, T. and Fuse, J. : The potential use of photoperiod during transplant production under artificial lighting conditions on floral development and bolting, using spinach as a model, HortScience, 35(1) : 43-45(2000)
 - 72) Kim, H-H. and Kozai, T. : Production of value-added transplants in closed systems with artificial lighting, In : Kubota, C. and Chun C. (eds.), Transplant Production in the 21st Century, Kluwer Academic Publishers, pp. 137-144(2000)
 - 73) 布施順也・土屋 和・岡部勝美・全 昶厚・古在豊樹：閉鎖型苗生産システムにおける高品質パンジー苗生産，農業環境工学関連 4 学会合同大会 2001 年度大会講演要旨：319(2001)
 - 74) Omura, Y., Chun, C., Kozai, T., Arai, K. and Okabe, K. : High quality plug-transplants produced in a closed system enables pot-transplant production of pansy in the summer, In : Kubota, C. and Chun C.(eds.), Transplant Production in the 21st Century, Kluwer Academic Publishers, pp. 145-148(2000)
 - 75) 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)
 - 76) 大山克己・古在豊樹：人工光型植物工場における消費電力量と電力料金の試算例，植物工場学会誌, 10(2) : 96-107(1998)
 - 77) Ohyama, K., Fujiwara, M., Kozai, T. and Kimura, H. : Water consumption and utilization efficiency of a closed-type transplant production system, Intl. Ann. Meeting ASAE, Milwaukee, Wisconsin, USA, Paper No. 004085(2000)
 - 78) Kubota, C. : 2000. Modeling and simulation in transplant production under controlled environment, In : Kubota, C. and Chun, C.(eds.), Transplant Production in the 21st Century, Kluwer Academic Publishers, pp. 47-52(2000)
 - 79) 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電気エネルギー消費量削減のための光合成有効光量子束調節，生物環境調節, 38

- (4) : 255-261 (2000)
- 80) Bostick, W.M., Kubota, C., Abdel-Ghany, A.M. and Kozai, T. : A preliminary experiment to simulate evapotranspiration rate of plug transplant trays in a closed transplant production system, Proc. Intl. Sympo. Design and Environ. Control of Trop. and Subtrop. Greenhouses, Taichung, Taiwan : 53 (2001)
- 81) Chintakovid, W., Kubota, C., Bostick, W.M. and Kozai, T. : Effect of air current speed on evapotranspiration rate of transplant canopy under artificial light, J. SHITA, 14(1) : 25-31 (2002)
- 82) 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)
- 83) Kubota, C. and Kozai, T. : Use of transition matrix models for transplant production under controlled environments, Intl. Ann. Meeting ASAE, Toronto, Ontario, Canada, Paper No. 995061 (1999)
- 84) Kubota, C. and Kozai, T. : Development of a mathematical model for vegetative propagation : Simulated sweetpotato cutting production as affected by propagation methods and environment conditions, Acta Hort, 519 : 65-72 (2000)
- 85) Kubota, C. and Kozai, T. : Mathematical models for planning vegetative propagation under controlled environments, HortScience, 36(1) : 15-19 (2001)
- 86) ロク・イイ・ヒン・大山克己・久保田智恵利・古在豊樹：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栽植密度の影響, 植物工場学会誌, 14(1) : 10-17 (2002)
- 87) ロク・イイ・ヒン・大山克己・久保田智恵利・古在豊樹：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, 生物環境調節, 40(3) : 311-316 (2002)
- 88) 藤原雅哉・古在豊樹：明期と暗期におけるサツマイモ単節挿し穂苗の葉身生長, 熱帯農業 45 (Extra issue 2) : 91-92 (2001)
- 89) 農林水産省農業環境技術研究所編：農業におけるライフサイクルアセスメント, 養賢堂, pp.1-125 (2000)