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

山田千佳子・大山克己・古在豊樹

千葉大学園芸学部

Time Course of Net Photosynthetic Rate of Sweetpotato Plants Canopy in a Closed-Type Transplant Production System

Chikako YAMADA, Katsumi OHYAMA and Toyoki KOZAI

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

(Received May 9, 2000)

The objectives of this study were to estimate 1) the net photosynthetic rate of sweetpotato plants canopy (P_{cn}) using Monsi and Saeki's mathematical model, and 2) the increase in dry weight of plants in closed-type transplant production system. The P_{cn} 2, 6, 9, 12, 13 and 14 d after planting were estimated to be 2, 8, 10, 17, 18 and 17 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectively. Measured and estimated values of increase in dry weight per plant for 15 d were 337 and 357 mg, respectively. The maximum light utilization efficiency (P_{cn} divided by photosynthetic photon flux (PPF) on the tray surface) 2, 6, 9, 12, 13 or 14 d after planting was found at the PPFs of 10, 191, 260, 321, 323 or 360 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectively. Hence, the electric energy consumption for lighting was reduced by 35% when PPFs were set at 50, 200 and 300 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 0-4, 5-8 and 9-14 d after planting, respectively, as compared with a constant PPF of 300 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, under the present experimental conditions. These results indicate that the mathematical model for estimating growth of sweetpotato plants can be applied to the energy conservative control of the environment (e.g., PPF) in the closed-type transplant production system.

Keywords: energy conservative control, growth estimation, *Ipomoea batatas* L., light utilization efficiency, mathematical model

2000年5月9日受付

はじめに

現在、苗生産および増殖の多くは、自然光を利用する温室や苗圃などの開放型苗生産システムで行われている。開放型苗生産システムでは、植物体の生育がシステム外の天候に影響されるために、高品質な植物体を計画的に生産することがむずかしい。かつ、システムが開放型であるがゆえに、エネルギー、水、農薬、肥料等のシステム外への散逸により、本研究で想定し

ている閉鎖型苗生産システムと比較して、それらの使用量は多くなると考えられる。なお、本稿では、植物体とは、増殖過程において増殖体を作り出すためのもの、苗生産過程において苗として出荷されるもの、および両過程において育成されている段階のもの、の総称とする。

閉鎖型苗生産システムとは、日射に不透明な断熱材で囲まれていて、内外間の物質およびエネルギー輸送が抑制もしくは制御されている空間内で、人工光源のみを用いて植物体を育成するシステムであると定義す

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

る。閉鎖型苗生産システムは、開放型苗生産システムと比べて、1) 光合成有効光量子束 (photosynthetic photon flux, 以下, PPF), 光質, 明暗周期などの光環境の調節が容易である, 2) 多段の育成棚を用いることによりシステム内空間の利用効率を向上できる, 3) 植物体の生産環境が安定しているので, 環境と植物体の生育との関係が比較的単純になり, 植物体の生育を制御しやすい, といった利点をもつ (Kozai et al., 1999). それゆえ, 開放型苗生産システムと比べて容易に高品質な植物体を計画的に生産できると考えられる。

閉鎖型苗生産システムでは, 照明器具の電気エネルギー消費量は, システム全体のその 70% を占めることが試算されている (Ohya and Kozai, 1998). 他方, 照明器具の電気エネルギー消費量と植物個体群育成時の PPF とは, 比例関係にあることが予想される。また, 冷房器具の消費電力は照明器具の消費電力に比例し, 前者は後者の約 30% である。それゆえ, 植物個体群育成時に生育にあわせて必要な PPF に調節することで, 照明器具と冷房器具の電気エネルギー消費量を削減でき, したがって, 閉鎖型苗生産システム全体の電気エネルギー消費量を削減できる可能性がある。植物個体群育成時の PPF を経日的に適切に設定するためには, PPF と植物個体群の純光合成速度, さらに成長との関係を詳細に把握する必要がある。

さて, 個葉の純光合成速度から, 数理モデルを用いて植物個体群の純光合成速度を推定する方法が報告されている (たとえば, Monsi and Saeki, 1953). 通常,

屋外では, 天候により育成環境条件が変動する等の理由により, 数理モデルを用いた植物個体群の純光合成速度の正確な推定はむずかしい (Yabuki et al., 1974). しかし, 閉鎖型苗生産システム内では, システム外の天候に育成条件が影響されにくいことから, 数理モデルを用いて, 植物個体群の純光合成速度を比較的正確に推定できると考えられる。さらに, その数理モデルを発展させ, 任意の育成条件下における植物体の生育を比較的高い精度で予測できる可能性がある。

本研究では, 閉鎖型苗生産システムにおける照明器具の電気エネルギー消費量を削減するための PPF 調節に関する知見を得るために, 携帯型光合成測定装置を用いて測定した個葉の純光合成速度を数理モデルにあてはめて, 植物個体群の純光合成速度を推定した。あわせて, 植物個体群の純光合成速度から推定した植物個体群の乾物重増加量を実測したそれと比較し, 数理モデルを用いた植物個体群の生育予測の妥当性を検討した。

材料および方法

1. 供試材料およびその育成環境条件

供試植物は, サツマイモ (*Ipomoea batatas* (L.) Lam., 品種: ペニアズマ) とした。人工光下で葉 1 枚を含む単節を 15 日間成長させて得た展開葉約 5 枚を有するサツマイモ植物体 (Fig. 1a) を, 再び葉 1 枚を含む単節 (Fig. 1b) に切り分けて, 増殖体 (乾物重: 41 ± 13 mg (平均 $\pm$ 標準偏差)) とした。

Fig. 1 Photographs of (a) sweetpotato plant and (b) single node cutting excised from sweetpotato plant.

セル成型苗用培地(ナプラ養土, ヤンマー農機(株))を充填した72穴のセルトレイ (W 0.27 m $\times$ L 0.54 m, 72角プラグトレイ, 日新農工産業(株))に増殖体を植え付けた。気温, 相対湿度, CO_2 濃度および明期をそれぞれ 28°C , 75%, $1000 \mu\text{mol mol}^{-1}$ および 16 h d^{-1} に設定した条件下で15日間成長させた。植え付け日を0日目として, 0~4, 5~9 および 10~14 日目の光合成有効量子束 (PPF) をそれぞれ 140, 190 および $310 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ に設定した。0日目に水を, 4, 7, 10 および 13 日目に養液(養液栽培用肥料 A-2 号: 1.2 g L^{-1} , B-2 号: 0.6 g L^{-1} , C-1 号: 0.1 g L^{-1} , 日本たばこ産業(株))を, それぞれ底面から与えた。

2. 閉鎖型苗生産システム

本実験では, 2台の基本モジュール(W 0.7 m $\times$ L 2.7 m $\times$ H 4.5 m) およびその周囲を覆ったビニールフィルムにより構成される閉鎖型苗生産システムを用いた (Fig. 2)。閉鎖型苗生産システム内外間の顕熱輸送量を小さくするために, システム内外間の気温をほぼ等しく設定した。閉鎖型苗生産システムの換気回数は 0~9 日目において 0.08 h^{-1} , 10~14 日目において 0.12 h^{-1} であった。閉鎖型苗生産システム内の気温は, 2台の家

Fig. 2 Closed-type transplant production system used in this experiment.

庭用エアコン (RAS-2559SDR および RAS-4069AS-DR, 東芝(株)) および1台の業務用エアコン (AID-3634BHG および ROA-J634HT, 東芝(株))を用いて調節した。閉鎖型苗生産システム内の相対湿度は, 超音波式加湿器 (WM-BNB4000, ウェットマスター(株))を用いて調節した。空調された空気は, 基本モジュールの各育成棚に均等に送り込むようにした。閉鎖型苗生産システムの CO_2 濃度は, 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 (21X, Campbell Scientific, Inc.), パーソナルコンピュータおよびマスフローコントローラ (Model 3615, コフロク(株))を用いて制御した。

基本モジュールは, 7段の植物育成棚(各 W 0.6 m $\times$ L 2.7 m $\times$ H 0.52 m)により構成される。それぞれの植物育成棚にはセルトレイを8枚設置できるようにし, 閉鎖型苗生産システム全体では合計で112枚設置できるようにした。各植物育成棚に光源として, 32 W 白色高周波蛍光灯 (FHF32EX-N, 松下電器産業(株)) および 16 W 白色高周波蛍光灯 (FHF16EX-N, 松下電器産業(株))を, それぞれ, 16 および 4 本取り付け付けた。PPFの調節には閉鎖型苗生産システム外に設置されたライトコントローラ (NQ21575-322, 松下電工(株))を用いた。

3. 測定および算定項目

3.1 個葉の純光合成速度の測定

増殖体として植え付けた個葉 (以下, 増殖体個葉) および新たに出現した個葉 (以下, 新個葉) の純光合成速度を携帯型光合成測定装置 (LI-6400, Li-cor, Inc.)を用いて測定した。携帯型光合成測定装置のリーフチャンバ内の環境条件は PPF 0, 50, 100, 200, 300 および $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 葉温 30°C , 相対湿度 60%, CO_2 濃度 $1000 \mu\text{mol mol}^{-1}$, 空気流量 $250 \mu\text{mol s}^{-1}$ に設定した。測定に用いた個体数は, それぞれの測定日において, 15 個体とした。そのうち 13 個体は常に同じ個体を含むようにした。

3.2 任意の PPF 条件下における個葉の純光合成速度の推定

任意の PPF 条件下における個葉の純光合成速度は, 式(1)を用いて推定した。これは, Tamiya (1951) の式に暗呼吸速度の項を付け加えた式である。

$$P_{in} = \frac{\alpha \cdot I \cdot P_{im}}{P_{im} + \alpha \cdot I} - r \quad (1)$$

ここで, P_{in} : 個葉の純光合成速度 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), I : 葉面における PPF ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), α : 式(1)の

$I=0$ における傾き, P_{lm} : 最大総光合成速度 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), r : 個葉の暗呼吸速度 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) である。

α , P_{lm} および r の推定には SAS プログラム nlin proc (SAS Version 6.09, SAS Institute, Inc.) を用いた。

3.3 植物個体群の純光合成速度の推定

植物個体群のトレイ面積あたりの純光合成速度 (P_{cn}) は, 式(2) (Monsi and Saeki, 1953) を用いて, 推定した。

$$P_{cn} = \frac{P_{lm}}{k} \ln \frac{P_{lm} + \alpha \cdot k \cdot I_0}{P_{lm} + \alpha \cdot k \cdot I_0 \cdot \exp(-k \cdot F_c)} - r \cdot F_c \quad (2)$$

ここで, I_0 : 植物個体群上の PPF ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), k : 吸光係数, F_c : 葉面積指数, である。

P_{cn} を推定するにあたり, 以下の3点を仮定した。1) 一定の PPF が均等に植物個体群に入射し, 葉の生理的特性 (呼吸や光合成など) および光学的性質 (反射, 透過など) が植物個体群のすべての葉で同じである, 2) サツマイモは水平葉である (Tuno and Fujise, 1965) ことから $k=1$ である, および 3) 植物個体群の根部および茎部の呼吸速度は無視しうほど小さい。

α , P_{lm} および r は, 式(1)を用いて推定した。0, 4, 7, 10 および 15 日目に, 32~35 個体の植物体を採用して, 葉面積を測定した。 F_c は積算葉面積をトレイ面積で除して算定した。 F_c の経日変化は, 算定値を指数関数で近似して求めた。

3.4 植物個体群の光利用効率の推定

植物個体群の光利用効率 (U , light utilization efficiency) は, 式(3)を用いて推定した。

$$U = \frac{P_{cn}}{I_t} \quad (3)$$

ここで, P_{cn} : 植物個体群の純光合成速度 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), I_t : トレイ面上での PPF ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), である。 I_t と I_0 の関係式, 式(2)および式(3)を用いて, U が最大となる PPF を推定した。

3.5 植物個体群の乾物重増加量

それぞれの測定日ごとに式(2)より算定した P_{cn} にもとづいて, 実験期間中の1日ごとの P_{cn} を推定した。各測定日間は, 1次式で補完した。推定したそれぞれの日における P_{cn} および植物個体群の暗呼吸速度を積算して, 15日間の乾物重増加量 (W_d) を推定した (式(4))。

$$W_d = \frac{m \cdot j}{D} \cdot \sum_{i=0}^i (P_i - R_i) \quad (4)$$

ただし, $P_i = P_{cnt} \cdot L_p$, $R_i = r_i \cdot F_{ct} \cdot L_d$ 。

ここで, P_i : t 日目における1日あたりの植物個体群の純光合成量 ($\mu\text{mol m}^{-2}$), R_i : t 日目における1日あたりの個葉の暗呼吸量 ($\mu\text{mol m}^{-2}$), m : CO_2 のモル数を質量に変換する係数 ($44 \text{ g CO}_2 \text{ mol}^{-1}$), j : 吸収した CO_2 の質量を乾物の質量に換算する係数 ($0.64 \text{ g DW g CO}_2^{-1}$), D : 栽植密度 ($514 \text{ plants m}^{-2}$), i : 日数 (d) (14 d), P_{cnt} : t 日目における P_{cn} ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), r_i : t 日目における個葉の暗呼吸速度 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), F_{ct} : t 日目における F_c , L_p : 1日あたりの明期 (57600 s), L_d : 1日あたりの暗期 (28800 s), である。 j は, Šetlík and Šesták (1971) の報告にもとづき算定した値である。

0 日目および 14 日目に, それぞれ 32~35 個体の増殖体もしくは植物体を採用して乾物重を測定した。両者の差から実験期間中の乾物重増加量を算定した。式(4)を用いて推定した W_d と, 実験期間中の植物個体群の乾物重増加量の実測値とを比較した。

結 果

2, 6, 9, 12 および 14 日目の増殖体個葉の純光合成速度を Fig. 3 に, 12 および 13 日目の新個葉の純光合

Fig. 3 Net photosynthetic rate of single leaves of propagules 2, 6, 9, 12 and 14 d after planting as affected by PPF.

Vertical bars represent standard deviation ($n=15$). The data were fitted with the mathematical model (Eq. (1)). Environmental condition inside the leaf chamber of portable photosynthesis measurement system was leaf temperature of 30°C , relative humidity of 60%, CO_2 concentration inside the leaf chamber of $1000 \mu\text{mol mol}^{-1}$ and air flow rate of $250 \mu\text{mol s}^{-1}$.

成速度を Fig. 4 に示す。2 日目の増殖体個葉の純光合成速度は PPF が 0, 50, 100, 200, 300 および 400 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ のとき、それぞれ -0.3, 2.1, 3.2, 2.9, 2.9 および 3.0 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であり、PPF が 100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

Fig. 4 Net photosynthetic rate of single leaves of newly developed leaves 12 and 13 d after planting as affected by PPF.

Vertical bars represent standard deviation ($n=15$). The data were fitted with the mathematical model (Eq. (1)). Environmental condition inside the leaf chamber of portable photosynthesis measurement system was leaf temperature of 30°C, relative humidity of 60%, CO_2 concentration inside the leaf chamber of 1000 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ and air flow rate of 250 $\mu\text{mol s}^{-1}$.

以上で増加は見られなかった。6 日目の増殖体個葉の純光合成速度は PPF が 0, 50, 100, 200, 300 および 400 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ のとき、それぞれ -1.6, 2.0, 5.8, 10.8, 15.2 および 18 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった。9 日目以降は同様の傾向を示し、増殖体個葉および新個葉の純光合成速度は PPF の増大に伴い増大した。

この結果より、式(1)を用いて推定したパラメータを Table 1 に示す。式(1)にパラメータをあてはめた曲線(光-光合成曲線)の $I=0$ における傾きは、2 日目では 0.23 ± 0.14 であったが、6 日目以降は $0.09 \sim 0.10$ であった。 P_{lm} は 2 日目では 4 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ となった。6 日目

Fig. 5 Time course of the leaf area index (F_c) of the plants canopy.

Table 1 Gradient of the P_{ln} vs. I curve at I equal to light compensation point, maximum gross photosynthetic rate and dark respiration rate of the single leaf 3, 8, 13 and 14 d after planting.^z

Days after planting (d)	α^y ($\times 10^{-2}$)	P_{lm}^x ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	r^w ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
2 ^u	23 ± 14^v	4 ± 0	-0.4 ± 0.3
6 ^u	9 ± 1	46 ± 8	-1.7 ± 0.6
9 ^u	10 ± 0	55 ± 3	-2.3 ± 0.2
12 ^u	10 ± 1	34 ± 4	-1.6 ± 0.5
12 ^t	9 ± 1	45 ± 5	-2.1 ± 0.4
13 ^t	10 ± 1	42 ± 4	-2.0 ± 0.3
14 ^u	10 ± 1	39 ± 2	-1.9 ± 0.2

^z These values 3, 8 and 14 d after planting and these 13 d after planting were estimated by using the data on the net photosynthetic rates of the propagules and by using the data on the net photosynthetic rates of the newly developed leaves, respectively.

^y Gradient of the P_{ln} vs. I curves at I =light compensation point.

^x Maximum gross photosynthetic rate of the single leaf.

^w Dark respiration rate of the single leaf.

^v Mean $\pm$ standard deviation ($n=15$).

^u Measuring day of the net photosynthetic rates of the propagules.

^t Measuring day of the net photosynthetic rates of the newly developed leaves.

Fig. 6 Time course of the net photosynthetic rate (P_{cn}) of the plants canopy.

The P_{cn} of the plants canopy 12 d after planting was estimated from the averaged P_{cn} of the single leaves of the propagules and the newly developed leaves.

Fig. 7 Time course of the PPf giving maximum light utilization efficiency of the plants canopy (U).

以降の P_{lm} は $34 \sim 55 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ と、2 日目のその、8~14 倍となった。0, 4, 7, 10 および 15 日目における F_c はそれぞれ 0.8, 0.9, 1.1, 2.0 および 5.1 であった (Fig. 5)。

これらの結果より推定した P_{cn} は 12 日目まで経日的に増大し、その後 $17 \sim 18 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ で一定となった (Fig. 6)。2, 6, 9, 12, 13 および 14 日目の U が最大となる PPf は、それぞれ 10, 191, 260, 321, 323 および $360 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった (Fig. 7)。

考 察

P_{cn} から推定した W_d (357 mg/plant) は、乾物重から

算定した乾物増加量 (337 mg/plant) とほぼ一致したが、前者の推定値は後者の実測値と比べて 10%ほど大きくなった。理由としては、1) 推定に用いた純光合成速度および暗呼吸速度は葉群のみの値であり、根部および茎部の呼吸速度を含まないこと、2) リーフチャンバ内の環境条件と実際の育成環境条件が異なること、および 3) 測定誤差が考えられる。水田において、水稻の個葉から推定した植物個体群の光合成量と実測した植物個体群の光合成量があまり一致しなかったことが報告されている (Yabuki et al., 1974)。しかし、本研究では両者の値はほぼ一致した。屋外で植物を育成した場合、天候により環境条件は大きく変動するために、植物体の純光合成速度は日変動する。本研究は閉鎖型苗生産システム内で行ったので、環境条件の日変動は小さく、明期における P_{cn} はほぼ一定であったと考える。そのために、式 (4) にもとづき求めた W_d は乾物重から算定した乾物増加量とおおよそ等しくなったと考えた。

植物個体群内での光の減衰は F_c と k に影響される。植物個体群の光合成は個葉の光合成特性が同一でも、植物個体群を構成する葉の傾斜角によって強く影響される (Horie, 1995)。 k は葉の傾斜角と密接に関係している (Kuroiwa, 1979) ために、Monsi and Saeki (1953) の提唱した数理モデルを用いて P_{cn} を推定する場合、 k を把握することは重要である。他方、 k の違いは F_c が低いときには純光合成速度に大きな影響は及ぼさないが、 F_c の増大とともに純光合成速度の違いは顕著になる (Saeki, 1960) ことが指摘されている。本研究では、サツマイモ葉の k は、Tuno and Fujise (1965) の報告にもとづき 1 と仮定した。本研究では、12 日目までは F_c は 3 以下であり、 k の影響を受けにくい条件下であった。このことも、 P_{cn} から推定した W_d は、実測値とほぼ等しくなったことの一つの要因である。

本研究では、増殖体個葉と新個葉の純光合成速度を区別せずに P_{cn} を推定した。Ito (1965) は、葉位により単位葉面積あたりの純光合成速度が異なることを示している。育成後期において、増殖体個葉の純光合成速度が低下していた可能性がある。他方、本研究では、根部および茎部の呼吸量は、考慮しなかった。今後、より正確に P_{cn} を推定するためには、1) 増殖体個葉および新葉の葉面積比を考慮する、および 2) 根部および茎部の呼吸量を考慮する、必要があると考えた。

本研究で用いた方法は、閉鎖型苗生産システム内における P_{cn} を推定するうえで、比較的簡便であり、か

つ、正確な推定を行うことができる手法であるといえる。本研究で用いた手法の他にも、 P_{cn} を推定する方法として、植物個体群を同化箱に入れ、同化箱へ流入する空気の流量および CO_2 濃度から推定する方法、乱流境界層内の2点間の CO_2 濃度および拡散係数から推定する方法、があげられる。前者の方法では、閉鎖型苗生産システム全体を同化箱として考えることにより、閉鎖型苗生産システムへの CO_2 供給速度および換気による閉鎖型苗生産システム内外の CO_2 輸送速度から P_{cn} を求めることができる。他方、後者の方法では、実際の育成環境条件下での P_{cn} を推定することができるが、数多くの前提条件があり、また、任意の環境条件、葉面積指数における植物個体群の純光合成速度を知るためには長時間を要する。

2日目の増殖体個葉の純光合成速度は、PPF 100～400 $\mu mol m^{-2} s^{-1}$ において3 $\mu mol m^{-2} s^{-1}$ と、ほぼ一定の値を示した。これは、2日目において植物体の根が未発達であったために、葉内水ストレスにより個葉の純光合成速度が低くなったからであると考えられる(Kramer and Boyer, 1995)。6日目以降の増殖体個葉および新個葉の純光合成速度はMikami et al. (1998)の人工光下で水耕したサツマイモ植物体の個葉の純光合成速度とほぼ同じであった。他方、 P_{cn} は経日的に大きくなったが、12日目以降では P_{cn} はほぼ一定になった。これは、 F_c の増大に伴う相互遮へいにより、下位葉では光合成速度よりも呼吸速度が大きくなったためであると考えられる。

U を最大にするPPFは経日的に増大した。照明器具の消費電力量はPPFに比例すると仮定した場合、0～4日目は、PPFを50 $\mu mol m^{-2} s^{-1}$ に、5～8日目は、PPFを200 $\mu mol m^{-2} s^{-1}$ に、9日目以降は、PPFを300 $\mu mol m^{-2} s^{-1}$ にすることで、 U を低下させずに、PPFを300 $\mu mol m^{-2} s^{-1}$ と一定のPPFで植物体を育成した条件下よりも、照明器具の消費電力量を35%削減できる。このとき、乾物重はPPFを300 $\mu mol m^{-2} s^{-1}$ と一定にして植物体を育成した条件下より13%減となると予想される。他方、常に U が最大となるようにPPFを調節した場合、照明器具の電気エネルギー消費量あたりの乾物重増加量は最大となる。このような光調節方法はGoto and Takakura (1987)によっても提唱されている。しかし、必要とされる乾物重に達するまでの期間は、照明器具の電気エネルギー消費量あたりの乾物重増加量が小さい条件下よりも、長くなる場合がある。実際に植物体を育成する場合、消費者の要求、労働者

賃金などの理由により、育成期間に制限が生じる。そのような条件下では、 U および P_{cn} の両方を考慮してPPFを調節する必要がある、それゆえ、本研究で用いたような数理モデルを用いた P_{cn} の推定、さらにそれを発展させた植物体の生育予測は、今後重要となると考えた。

結 論

植物個体群の純光合成速度から推定した乾物増加量と、乾物重増加量の実測値はほぼ等しくなった。このことから、閉鎖型苗生産システム内のような、環境要素が比較的一定である条件下では、数理モデルを用いて個葉の純光合成速度から植物個体群の純光合成速度を比較的正確に推定できることが示された。本研究で用いた数理モデルから、植物個体群の純光合成速度および植物個体群の光利用効率を低下させないようにPPFを経日的に調節することで、照明器具の電力を節減する可能性が示された。実際に植物体を育成する場合には、消費者の要求、労働者賃金などの理由により、育成期間に制限が生じる。そのような条件下では、植物個体群の光利用効率および植物個体群の純光合成速度の両方を考慮してPPFを調節する必要がある、それゆえ、本研究で用いたような数理モデルを用いた植物体の生育予測は、今後重要となると考えた。ただし、本研究で考察したPPFの調節方法は乾物重増加量のみに着目したものであり、植物体の形態におよぼす影響は考慮していない。今後は、本研究で求めた光環境条件下で植物体を育成して、形態におよぼすPPFの影響を検討する必要がある。

本実験で用いた閉鎖型苗生産システムの製作および運転に際して、ご尽力を賜った新菱冷熱工業(株)ならびに同社の堀切 仁氏、平 秀樹氏に深甚の謝意を表する。システム内のPPF計測に際し、松下電工(株)の工藤章英氏ならびに宮丸正人氏には、様々なご協力をいただいた。ここに満腔の謝意を表する。

文 献

- Goto, E., Takakura, T. 1987. Relationship between light intensity and light energy requirement in the growth of leaf vegetables under artificial light. (Japanese text with English abstract) J. Agric. Meteorol. **43**: 229-232.
- Horie, T. 1995. Plant production and environmental control. (Japanese text) In "Handbook of Environmental Control in Biology" (ed. by Japanese Society of Environmental Control in Biology). Yokendo, Tokyo, p 200-203.

- Ito, K. 1965. Studies on photosynthesis in sugar beet plant. II. The difference in photosynthetic and respiratory abilities and response to temperature and light between leaves of different leaf positions. (Japanese text with English abstract) *Jpn. J. Crop Sci.* **33** : 487-491.
- Kozai, T., Ohyama, K., Afreen, F., Zobayed, S., Kubota, C., Hoshi, T., Chun, C. 1999. Transplant production in closed system with artificial lighting for solving global issues on environment conservation, food, resource and energy. *Proc. ACESYS III Forum*, Rutgers University, New Jersey, p 31-45.
- Kramer, P. J., Boyer, J. S. 1995. Growth. In "Water Relations of Plants and Soils" (ed. by Kramer, P. J., Boyer, J. S.), Ed. 2. Academic Press, San Diego, p 344-376.
- Kuroiwa, S. 1979. Plants canopy photosynthesis. (Japanese text) In "Function and Productivity of Plants Canopy" (ed. by Iwaki, H.). Asakura Shoten, Tokyo, p 84-141.
- Mikami, H., Kozai, T., Niu, G., Kubota, C., Chun, C. 1998. Photosynthetic and transpirational characteristics of sweetpotato plants grown in vitro and in hydroponics. (Japanese text with English abstract) *Jpn. J. Trop. Agric.* **42** (Extra Issue 1) : 23-24.
- Monsi, M., Saeki, T. 1953. On the light factor in the plant community and its meaning for the biomass production (Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion). (German text) *Jpn. J. Bot.* **14** : 22-52.
- Ohyama, K., Kozai, T. 1998. Estimating electric energy consumption and its cost in a transplant production factory: A case study. (Japanese text with English abstract) *J. High Technol. Agric.* **10** : 96-107.
- Saeki, T. 1960. Interrelationships between leaf amount, light distribution and total photosynthesis in a plant community. *Bot. Mag. Tokyo* **73** : 55-63.
- Šetlík, I., Šesták, Z. 1971. Use of leaf tissue samples in ventilated chambers for long term measurements of photosynthesis. In "Plant Photosynthetic Production Manual of Methods" (ed. by Šesták, Z., ěatský, J., Jarvis, P.G.). Dr. W. Junk n.v., Publishers, The Hague, p 316-342.
- Tamiya, H. 1951. Some theoretical notes on the kinetics of algal growth. *Bot. Mag. Tokyo* **64** : 167-173.
- Tuno, Y., Fujise, K. 1965. Studies on the dry matter production of sweet potato. *Bull. Natl. Instit. Agric. Sci. Ser. D No. 13* : 131.
- Yabuki, K., Aoki, M., Hamotani, K. 1974. Studies on the effect of wind speed on photosynthesis. (5) The relation between wind speed and photosynthesis of rice plant community. (Japanese text with English abstract) *J. Agric. Meteorol.* **30** : 101-105.