

# 大規模トマト生産温室における生産性向上に関する研究

誌名	植物環境工学
ISSN	18802028
著者名	久枝,和昇 高山,弘太郎 仁科,弘重 東,幸太 有馬,誠一
発行元	日本植物工場学会
巻/号	19巻1号
掲載ページ	p. 19-26
発行年月	2007年3月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター  
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council  
Secretariat



## 大規模トマト生産温室における生産性向上に関する研究 —トマト群落における光強度とCO<sub>2</sub>固定量の垂直分布の解析—

久枝和昇<sup>1</sup>・高山弘太郎<sup>2</sup>・仁科弘重<sup>2</sup>・東 幸太<sup>2</sup>・有馬誠一<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 世羅菜園株式会社 722-1625 広島県世羅郡世羅町重永 608-25

<sup>2</sup> 愛媛大学農学部 790-8566 松山市樽味 3-5-7

### Studies on Improvement of Tomato Productivity in Large-scale Greenhouse —Analysis of Vertical Distribution of Light Intensity and Net CO<sub>2</sub> Fixation in Tomato Plant Canopy—

Kazunori HISAEDA<sup>1</sup>, Kotaro TAKAYAMA<sup>2</sup>, Hiroshige NISHINA<sup>2</sup>, Kouta AZUMA<sup>2</sup> and Seichi ARIMA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>SERA FARM Co., Ltd., Sera-cho, Sera-gun, Hiroshima 722-1625, Japan

<sup>2</sup>Faculty of Agriculture, Ehime University, Tarumi, Matsuyama 790-8566, Japan

#### Abstract

We have been conducting research on the improvement of productivity in large-scale greenhouse tomato production. One of the factors that largely influence the tomato productivity is the rate of CO<sub>2</sub> fixation by photosynthesis. The amount of CO<sub>2</sub> fixed by the whole plant canopy varies considerably and is known to depend on canopy structure.

To date, few studies have analyzed photosynthesis in plant canopies within the context of improving productivity for large-scale tomato production. Consequently, obtaining data and developing analytical methods that are relevant to production is important.

The present study investigated the rate of photosynthesis within a plant canopy and the vertical distribution of the amount of CO<sub>2</sub> fixed by plants with the aim of increasing CO<sub>2</sub> fixation and yield. This was done by analyzing the photosynthetic rate in individual leaves, examining plant canopy structure and measuring light intensity within the plant canopy.

It was found that the leaves located in the upper parts of canopies were exposed to higher light intensities, experiencing light saturation and had higher rates of photosynthesis at the point of light saturation than leaves in the middle and lower parts of the plant. It was assumed that this was due to the occurrence of senescence and the development of shade-leaf characteristics in the leaves of the lower parts of the plant. The results implied that removal of the leaves under 150 cm or farther from the apical meristems could increase CO<sub>2</sub> fixation and productivity of the plant canopy.

The analytical methods developed in the present study can be applied to assess the efficacy of seasonal management methods such as cropping patterns, utilization of lateral buds, and leaf thinning, for maximizing yields.

**Keywords:** greenhouse, light intensity, photosynthesis, productivity, tomato

2005年10月21日受付

2006年9月12日受理

Corresponding author: kazunori Hisada  
(khisada@d1.dion.ne.jp)

はじめに

著者らは、大規模トマト生産温室における生産性向上を

目的とした研究を行っている (Nishina *et al.*, 2003, Hisaeda *et al.*, 2004, Nishina *et al.*, 2004, Hisaeda and Nishina, 2005). オランダをはじめとするヨーロッパ諸国と同様に, 日本国内においても1棟が1haを越す大規模トマト生産温室が増加している。しかし, 収益に最も影響のある単位面積あたりの出荷量は, オランダなどの施設園芸先進国と比較すると, 日本は約半分の  $20 \sim 30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{year}^{-1}$  であり, 生産性向上のための技術的課題が多く残っていることを示している。

トマトの生産性に影響を与える生理的反応には様々なものがあるが, 光合成による  $\text{CO}_2$  固定も大きな要因であり,  $\text{CO}_2$  固定量は群落構造により大きく変化する。群落内光強度は, 指数関数的に低下することが知られている (Monsi and Saeki, 1953). Harper *et al.* (1979) は, 群落構造と透過して床面に到達する光強度の関係について, Papadopoulos and Pararajasingham (1996) は, 群落構造が光合成に及ぼす影響について, Peat (1970) は, トマトの光強度と光合成速度の関係について報告している。また, Acock *et al.* (1978) は, 群落の  $\text{CO}_2$  固定量, 群落内光強度および個葉の光合成速度の測定を行い, 光合成モデルの検証を行っている。また, 個葉の光強度と光合成速度の関係および群落内光強度から群落全体の光合成速度を推定する手法も提案されている (Hirose and Werger, 1987)。

しかし, このような研究を結びつけ, 大規模トマト生産温室における生産性向上という観点から群落の光合成を解析した例は見あたらず, 生産現場で活用できるデータや解析手法が求められている。

本研究では,  $\text{CO}_2$  固定量をより多くするという観点で, 個葉の光合成速度 (以下, 光合成速度) の解析, 群落構造の解析, 群落内光強度の解析を行い, 群落内の光合成速度,  $\text{CO}_2$  固定量の垂直分布を解析した。

## 実験方法

実験を行った広島県世羅郡世羅町 (北緯 35 度, 東経 133 度) にある世羅菜園株式会社の栽培温室は, 第 1 温室から第 4 温室で構成され, 合計 8.5 ha の国内最大規模である。栽培方式は, 培地にロックウールを使用した養液栽培で, 出荷期間が約 10 カ月である長期多段取りを行っている。

### 1. 温室

実験を行った世羅菜園の第 1 温室は, フェンロー型の南北棟で, 間口方向の長さ (東西方向) 112 m, 奥行き (南北方向) 132 m, 床面積  $14,784 \text{ m}^2$ , 棟高 6.5 m, 軒高 5.3 m である。畝の方位は南北であった。複合環境制御装置が導入されており, 天窓, カーテン, 暖房機器, 灌水機器などにより, 温室内の日射量, 気温, 湿度, 二酸化炭素濃度, 養液の電

気伝導度 (EC)・pH・灌水量などの栽培環境条件を, 生育ステージやトマトの状態によって調節することが可能である。

### 2. 栽培作物と仕立て方

測定対象としたトマトの品種は, プラムトマト (*Lycopersicon esculentum*, カゴメ株式会社, 平均果重約 30 g) であった。2003 年 10 月 9 日に播種し, 10 月 20 日にロックウールキューブへ移植と同時に定植穴の横に仮定植し, 第 1 花房開花まで育苗した後, 11 月 21 日にロックウールスラブに 25 cm 間隔で定植した。収穫開始は 2004 年 1 月 9 日で, 収穫終了は 11 月 19 日であった。トマトは, ロックウールスラブの中心から東西に 30 cm 離れた位置から垂らされた誘引ひもによって, 1 株ごとに振り分けられた。その結果, 株元の間隔は南北方向 25 cm であるが, 茎の間隔は南北方向 50 cm, 東西方向 60 cm となった。隣接した畝のトマトの茎との間隔 (東西方

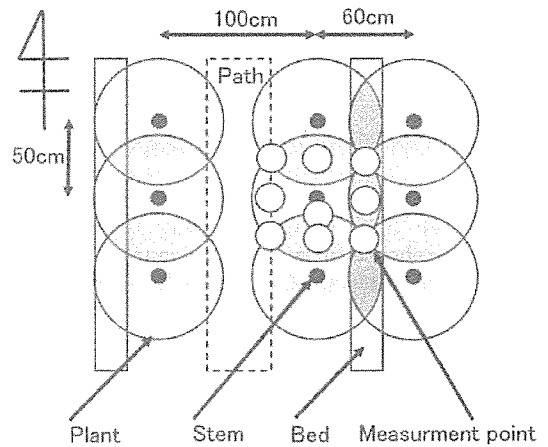


図 1 群落構造と群落内の光強度の測定点  
Fig. 1 Structure of plant canopy and measurement points of light intensity



図 2 群落の様子  
Fig. 2 Photograph of plant canopy

向)は、100 cmであった (Fig. 1)。栽植密度は、通路も含めた温室全体で  $2.5 \text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$  であった。Fig. 2 に群落の様子を示す。

### 3. 測定方法

#### (1) 個葉の光合成速度

測定は、2004年7月と2004年11月に行った。群落を垂直方向に60 cm間隔で3つの葉層(上層、中層、下層)に分け、それぞれに属する成熟葉の光合成速度を測定した。光源には人工光源(LI-COR: 6400-40、青色域470 nm、赤色域630 nm)を使用し、光強度(光合成有効量子束密度: PPF)  $0 \sim 2,000 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  の範囲の光合成速度を、光合成蒸散測定装置(LI-COR: LI-6400)により、葉温  $25^\circ \text{C}$ 、 $\text{CO}_2$ 濃度  $350 \mu \text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  に設定して測定した。測定結果から、光強度と光合成速度の関係を求めた。呼吸速度は、別の日に暗条件下で測定した。

#### (2) 群落構造

測定は2004年7月に行った。Fig. 3に群落構造の測定項目を示す。無作為に選定した13株のすべての葉について、長さ(茎から先端までの距離)、幅(左右に最も広がっている部分の間隔)、高さ(生長点からの距離)、方位角(真北を0度、真東を90度とする)を測定した。また、葉の長さとの積と葉面積との関係を求めるために、13株中の2株については、すべての葉を切り取り、デジタルカメラを用いて葉1枚ごとの画像を撮影した。画像撮影時には、 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ の紙を画像内に写るようにして葉面積算出の指標とし、撮影した画像を二値化してピクセル数を基に葉面積を算出した。

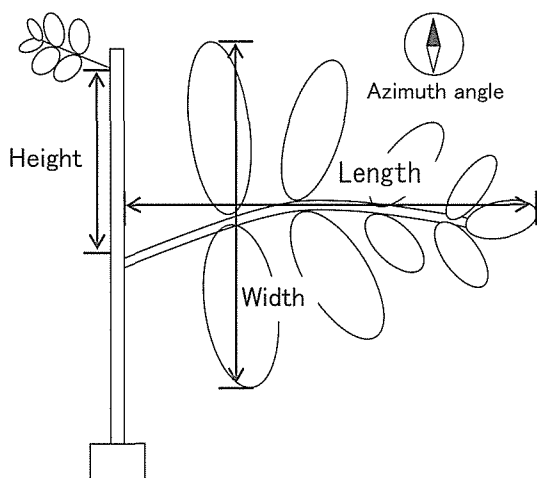


図3 群落構造の測定項目

Fig. 3 Measurement items for structure of plant canopy

#### (3) 群落内光強度

群落内光強度の垂直分布の測定は、2004年7月に行った。光強度は、量子センサー(LI-COR: LI-185A)を用いて測定した。群落構造の解析で測定したトマト13株について、生長点から高さ30 cmごとに、トマトの茎の周り9点で測定した。Fig. 1に群落内の光強度の測定点を示す。同時に群落上の光強度も測定した。群落上(生長点の上50 cm)の光強度は、小型日射センサー(英弘精機: ML-020VM)を設置し、連続測定した。また、量子センサーと日射センサーをともに群落上に置いて、量子量と日射量を測定し、変換式を求めた。

### 結果および考察

#### (1) 個葉の光合成速度

測定した個葉の光合成速度に下記の光強度と光合成速度の関係式(Hikosaka, 2003)を適用し、群落の上層、中層、下層それぞれのパラメータ値を求めた (Table 1)。

$$P = \frac{\phi I' + P_{MAX} - \sqrt{(\phi I' + P_{MAX})^2 - 4\phi I' + P_{MAX}}}{2\theta} - R$$

$P$ : 光合成速度 ( $\mu \text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$\phi$ : 初期勾配 ( $\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )

$I'$ : 光強度 ( $\mu \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$P_{MAX}$ : 最大光合成速度 ( $\mu \text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$\theta$ : 曲線の凸度

$R$ : 呼吸速度 ( $\mu \text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 4に、Table 1のパラメータ値によって計算された光-光合成曲線を光合成速度の測定値の平均値とともに示す。上層の方が、光飽和に達する光強度は大きく、光飽和点における光合成速度も大きいことが明らかになった。これは、下層の葉では老化や陰葉化が起きているためと推測される。

#### (2) 群落構造

葉の長さ ( $A$ : cm) と幅の積 ( $B$ : cm) と、画像から求めた葉面積 ( $S$ :  $\text{cm}^2$ ) との間に高い相関と推定式が得られた。この推定式を用いて、残りの11株については、葉の長さから幅から葉面積を算出した。

$$S = 0.293 \times A \times B \quad r^2 = 0.765$$

表1 パラメータ値

Table 1	Calculated values for each parameter		
	upper part	middle part	lower part
$\phi$	0.1088	0.0656	0.0492
$P_{MAX}$	31.2	18.5	9.95
$\theta$	0.480	0.752	0.957
$R$	2.63	1.32	1.32

トマト1株にはおよそ高さ10 cmごとに、計18枚の葉が付いていることが観察された。そこで、トマト群落を高さ10 cmごとに18の葉層に区切り、各葉層に属する葉の面積の平均値を求めた。生長点からの距離と葉面積の平均値の関係をFig. 5に示す。Fig. 5から、トマトの葉は、生長点からの距離が60 cmを超えると、面積はあまり増えないことがわかった。

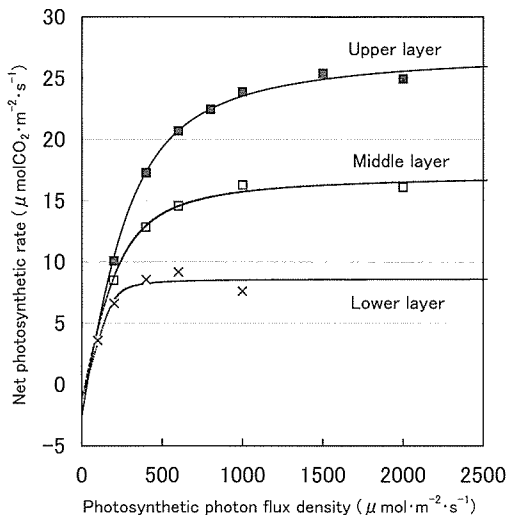


図4 各葉層の光-光合成曲線

Fig. 4 Photosynthetic-light response curves for different leaf layers

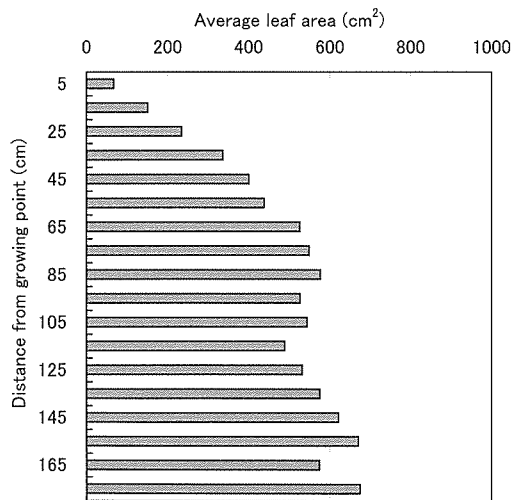


図5 生長点からの距離と葉面積の平均値の関係 (モデル個体)

Fig. 5 Relationship between distance from growing point and average leaf area of each leaf layer (model plant)

また、Fig. 5の葉面積をもつ株をモデル個体と定義した。

(3) 群落内光強度

群落内の光強度(I)は、各高さで茎の周りの9点(Fig. 1)で測定した光強度の平均値とした。さらに、この平均値の群落上の光強度(I<sub>0</sub>)に対する割合(%)を相対光強度と定義した。Fig. 6に群落内の相対光強度の垂直分布を示す。生長点から100 cmより低い位置では、相対光強度40%以下となつた。

次に、積算葉面積指数(L)を、下式のように、その点より上にある葉の面積の積算値が1株が占める床面積(通路も含めた面積で0.4 m<sup>2</sup>)に対する割合として定義した(Monsi and Saeki, 1953).

$$L \equiv Is/Fs$$

L: 積算葉面積指数

Is: その点より上にある葉の面積の積算値

Fs: 1株が占める床面積

積算葉面積指数と相対光強度を対数グラフ上にプロットしたところ(Fig. 7)、群落の上層、下層に関わらず1つの直線で表せることが確認されたため、群落全体で1つの近似式を求めた。指数関数で近似した結果、相対光強度は $I/I_0 = e^{-1.2119L}$ の式で表すことができ、吸光係数(値が大きいほど同じ葉面積でも光の減衰が大きい)は1.21となった。この1.21という値は一般的にいわれている値(Monsi and Saeki, 1953)より大きい。これは、積算葉面積指数の計算で床面積に通路も含めていることから、群落内の葉面積密度が実際よりも小さく計算されたためである。

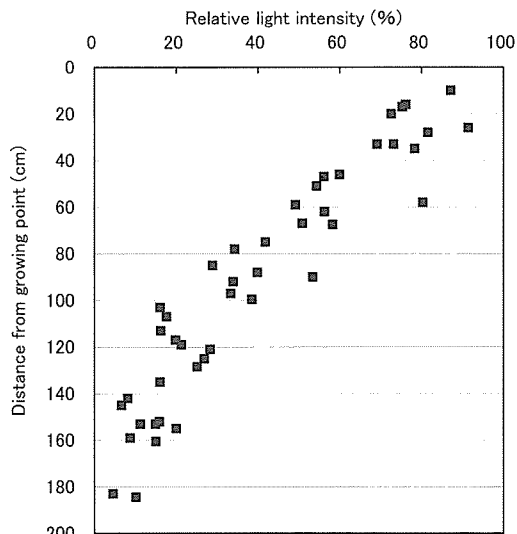


図6 群落内の相対光強度の垂直分布  
Fig. 6 Vertical distribution of relative light intensity within plant canopy

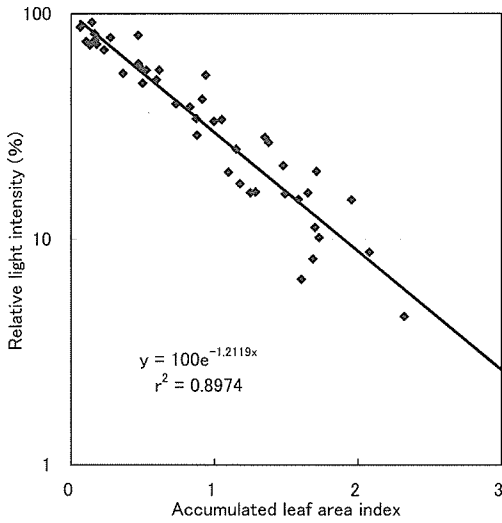


図7 積算葉面積指数と相対光強度の関係

Fig. 7 Relationship between accumulated leaf area index and relative light intensity

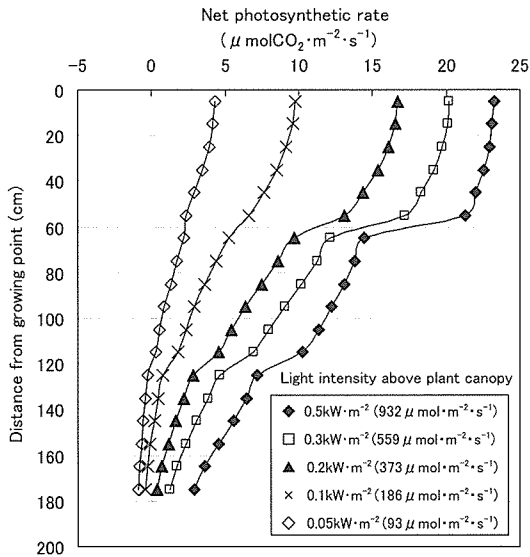


図8 光合成速度の垂直分布

Fig. 8 Vertical distribution of net photosynthetic rate

(4) 群落内の光環境と光合成の関係

(1) で得られた光-光合成曲線 (Fig. 4, Table 1) と, (2) で得られたモデル個体の葉面積垂直分布 (Fig. 5) と, (3) で得られた積算葉面積指数と相対光強度の関係式 (Fig. 7) を用いて, 個葉の光合成速度の垂直分布を, 群落上の光強度が異なる場合について求めた (Fig. 8). 光合成速度は群落の上層で大きいことがわかった.

次に, モデル個体 (Fig. 5) 各葉層の光合成速度を, 群落

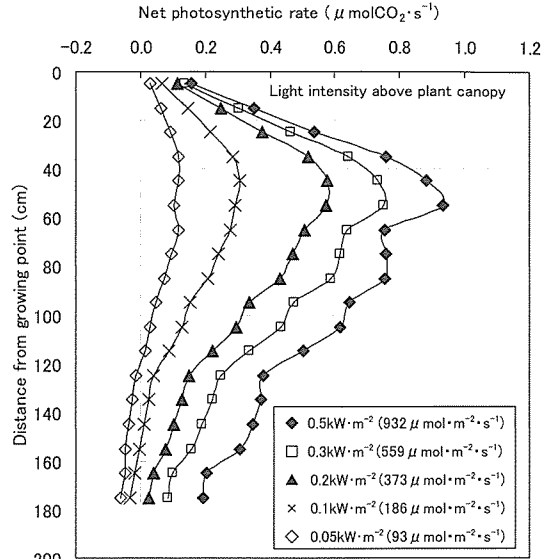


図9 モデル個体の各葉層の光合成速度

Fig. 9 Net photosynthetic rate of each leaf layer for the model plant

上の光強度が異なる場合について求めた (Fig. 9). 各葉層の光合成速度は, その葉層の葉面積 (Fig. 5) に個葉の光合成速度 (Fig. 8) を掛けることによって求めた. 光合成速度が大きい, すなわち, 純同化量 (CO<sub>2</sub> 固定量) が多いのは, 生長点から 40 ~ 80 cm の範囲にある葉であることがわかった.

また, 典型的な晴天日 (10月30日) と曇天日 (11月2日) の光強度の日変化データを用いて, モデル個体各葉層の1日のCO<sub>2</sub> 固定量と生長点からのその葉までの積算CO<sub>2</sub> 固定量を求めた (Fig. 10). 曇天日では生長点からの距離が120 cm 以上ではCO<sub>2</sub> 固定量はマイナスで, 晴天日でも150 cm 以上ではマイナスであった. Fig. 11 に, 生長点からの距離が150 cm 以上の葉を取り除いた場合, モデル個体各葉層のCO<sub>2</sub> 固定量と積算CO<sub>2</sub> 固定量を示す. CO<sub>2</sub> 固定量がマイナスとなっていた葉が無くなったことで, 1株全体のCO<sub>2</sub> 固定量が増加していることがわかる.

以上では, 群落を60 cm ごとに3つの葉層 (上層, 中層, 下層) に分けて光強度と光合成速度を測定し, 光-光合成曲線を求め, CO<sub>2</sub> 固定量の垂直分布を解析した. そのため, Fig. 8, Fig. 9 で示されているように, 上層, 中層, 下層の境目で光合成速度が大きく変わる部分が見られた. そこで, 内挿法により60 cm ごとの光合成速度から20 cm ごとの光合成速度を求め, 20 cm ごとの光-光合成曲線を求め, CO<sub>2</sub> 固定量の垂直分布を再計算した (Fig. 12). 生長点からの距離が40 ~ 80 cm の範囲の光合成速度が大きいという点では同様であるが, 光合成速度が最大となるのは60 ~ 80 cm で

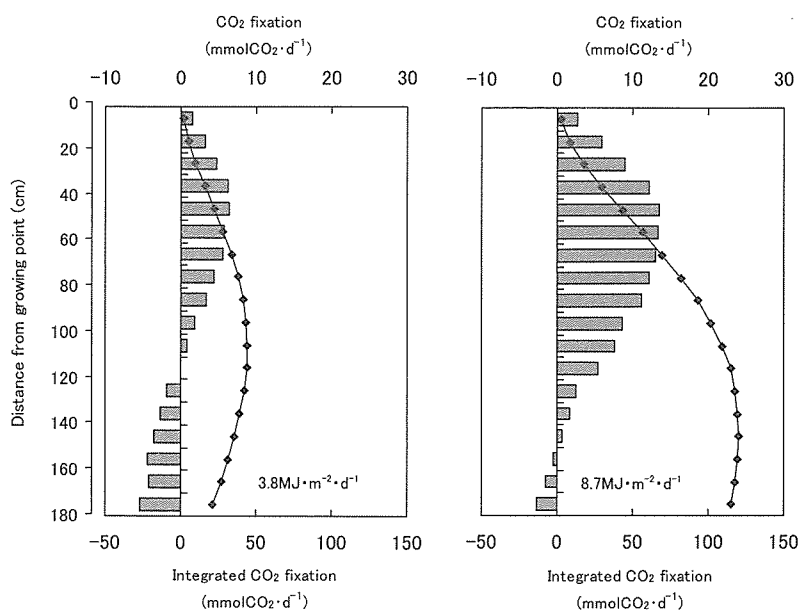


図 10 モデル個体の各葉層の  $\text{CO}_2$  固定量と積算  $\text{CO}_2$  固定量 (晴天日:  $8.7\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 右, 曇天日:  $3.8\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 左)

Fig. 10  $\text{CO}_2$  fixation and integrated  $\text{CO}_2$  fixation of each leaf layer of model plant (fine day:  $8.7\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , right, cloudy day:  $3.8\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , left)

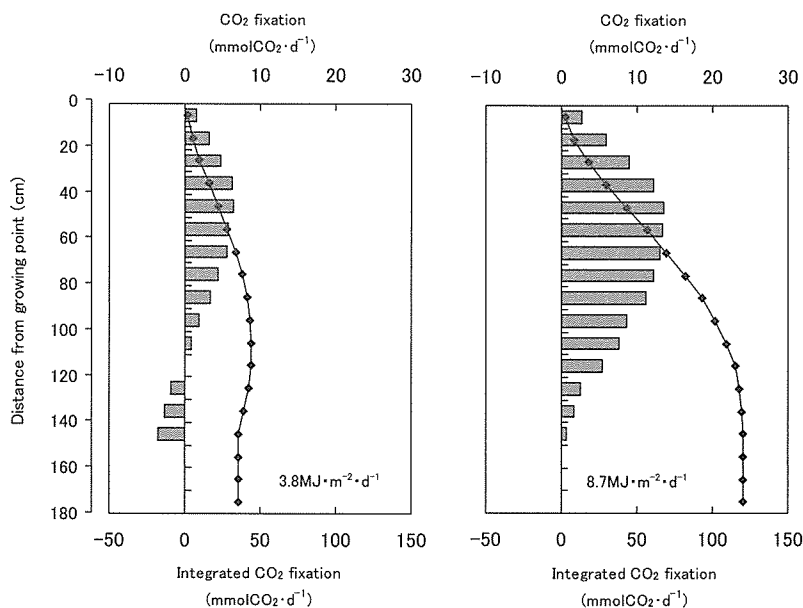


図 11 150 cm 以下の葉を切り取った場合のモデル個体各葉層の  $\text{CO}_2$  固定量と積算  $\text{CO}_2$  固定量 (晴天日:  $8.7\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 右, 曇天日:  $3.8\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 左)

Fig. 11  $\text{CO}_2$  fixation and integrated  $\text{CO}_2$  fixation of each leaf layer of model plant (fine day:  $8.7\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , right, cloudy day:  $3.8\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , left) for leaves cut below 150 cm

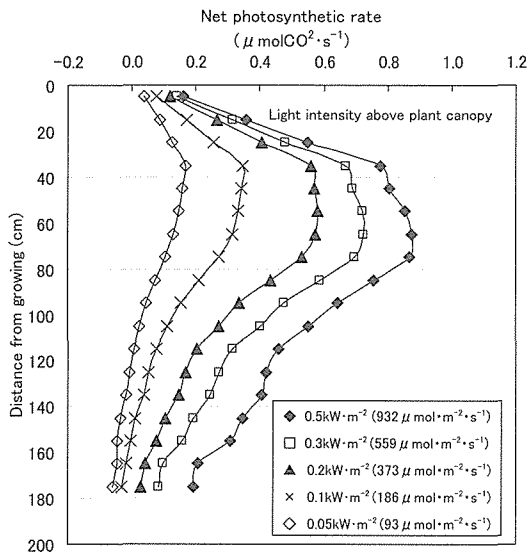


図 12 モデル個体の各葉層の光合成速度

Fig. 12 Net photosynthetic rate of each leaf layer for the model plant

あるという、Fig. 9とは異なる結果が得られた。今後の測定においては、光強度と光合成速度をより狭い間隔で測定することも検討する必要があると思われる。

本研究で行った、個葉の光合成速度の解析、群落構造の解析、群落内光強度の解析、群落内の光合成速度、CO<sub>2</sub>固定量の垂直分布の解析は、それぞれとしては新しいものではない。これらの方法を組み合わせることによって、群落としてのCO<sub>2</sub>固定量を求める手法を確立し、植物工場に適用できることを確認したこと、本研究の意義がある。本研究で用いた手法に比較的類似しているものに、Acock *et al.* (1978)の研究がある。ただし、Acock *et al.* (1978)は、実験用に育成した高さわずか1.1 mのトマト個体を供試植物として、CO<sub>2</sub>固定量の測定を行い、光合成モデルの検証を行っている。一方、本研究では、商用温室で周年栽培されている葉のある部分の高さが常時約1.8 mあるトマト群落を対象として測定を行っており、実際のトマト生産温室に適用可能な測定手法を開発したといえる。また、本研究では、下層の葉のCO<sub>2</sub>固定が負になっていることを明らかにした。

本研究により、大規模トマト生産温室において、個葉の光合成速度、群落構造、群落内光強度の垂直分布の測定を行うことで、群落としてのCO<sub>2</sub>固定量を求める手法を確立することができた。工場の生産を行っている大規模温室では、温室全体を一つの群落と考えられることができるため、本研究で確立した手法によって、温室全体のCO<sub>2</sub>固定量も求めることができる。また、群落下部の葉をより少なくすることによ

て、CO<sub>2</sub>固定量が増加し、生産性が向上する可能性が示唆された。この手法を用いることで、収量を最大にする管理方法(作型、わき芽利用、葉かきなど)を季節別に検討することが可能となった。

なお、品種により光-光合成曲線に違いが観察されたため、群落のCO<sub>2</sub>固定量を解析するには、品種ごとに光-光合成曲線を作成する必要があると思われた。このような品種による光合成の違いを解析することにより、高温多湿のため栽培が難しい夏期に適した品種を選定するといったことにも利用できると思われる。

## 謝 辞

この研究を実施するにあたり、カゴメ株式会社の関係各位、ならびに、世羅菜園株式会社の皆様には多大なご支援をいただいた。また、広島大学の正岡淑邦教授には実験機材の一部をお借りした。記して謝意を表す。

## 引用文献

- Acock, B., Charles-Edwards, D. A., Fitter, D. J. Hand, D. W., Ludwig, L. J., Wilson, J. W., Withers, A. C. 1978. The contribution of leaves from different levels within a tomato crop to canopy net photosynthesis: An experimental examination of two canopy models. *J. Exp. Bot.* 29 (111): 815-827.
- Harper, L. A., Pallas, Jr. J. E., Bruce, R. R., Jones, Jr. JB. 1979. Greenhouse microclimate for tomatoes in the southeast. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 104: 659-663.
- Hikosaka, K. 2003. Photosynthesis of plant canopy. In: *Introduction to plant physiological ecology (in Japanese)* (群落の光合成: 光と水と植物のかたち). Bun-ichi Sogo Shuppan Co., Tokyo, 57-84.
- Hirose, T., Werger, M. J. A. 1987. Nitrogen use efficiency in instantaneous and daily photosynthesis of leaves in the canopy of *Solidago altissima* stand. *Physiologia Plantarum* 70: 215-222.
- Hisaeda, K., Nishina, H., Azuma, K., Arima, S. 2004. Studies on improvement of tomato productivity in large-scale greenhouse (part 2) Effects of growth and yield from environmental changes in the greenhouse (in Japanese) (大規模トマト生産温室における生産性向上に関する研究 (2)温室環境の変化が生育及び収量に与える影響). In: *Proc. 2004 joint conference of Japanese four societies related agricultural engineering (農業環境工学関連4学会2004年合同大会講演要旨)*, Fukuoka. 6-8 September, 59.
- Hisada, K., Nishida, H. 2007. Studies on improvement of tomato productivity in large-scale greenhouse-Prediction of tomato yield based on integrated solar



- radiation-. J. SHITA 19(1): 00–00.
- Nishina, H., Azuma, K., Hisaeda, K., Arima, S. 2003. Analysis of characteristic of environmental control in large-scale tomato greenhouse (in Japanese)(大規模トマト生産温室における環境制御特性の解析). In: Proc. 2003 joint conference of Japanese five societies related agricultural engineering (農業環境工学関連5学会2003年合同大会講演要旨), Iwate. 8–11 September, 138.
- Nishina, H., Azuma, K., Hisaeda, K., Arima, S. 2004. Examination of temperature and humidity control preventing dew condensation on surface of tomato fruits (in Japanese)(トマト果実への結露防止のための温湿度管理について). In: Proc. 2004 joint conference of Japanese four societies related agricultural engineering (農業環境工学関連4学会2004年合同大会講演要旨), Fukuoka. 6–8 September, 60.
- Monsi, M., Saeki, T. 1953. Canopy light environment and its significance for the matter production (in German)(Über den lichtfaktor in den pflanzengesellschaften und seine bedeutung für die stoffproduktion). Jpn. J. Bot. 14: 22–52.
- Papadopoulos, A. P., Pararajasingham, S. 1996. The influence of plant spacing on light interception and use in greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Scientia Hort.* 69: 1–29.
- Peat, H. E. 1970. Relationships between photosynthesis and light intensity in the tomato. *Ann. Bot.* 34: 319–328.