温室内におけるトマトセル成型苗個体群の光利用効率および水利用効率

渋谷 俊夫¹・古在 豊樹

千葉大学園芸学部

¹ 現在：大阪府立大学大学院農学生命科学研究科

Light-Use and Water-Use Efficiencies of Tomato Plug Sheets in the Greenhouse

Toshio SHIBUYA¹ and Toyoki KOZAI

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

¹ Present address : Graduate School of Agriculture and Biological Science,
Osaka Prefecture University, Sakai 599-8531, Japan

(Received July 14, 2000)

The light-use and water-use efficiencies of tomato plug sheets in the greenhouse were estimated continuously for 15 d based on micrometeorological and weighing methods. The light-use efficiency, defined as chemical-energy transformation rate by photosynthesis per unit shortwave radiation flux density, increased with increases in leaf area index and then remained stable at about $2 \times 10^{-2} - 4 \times 10^{-2} \text{ J J}^{-1}$ when leaf area index was higher than about 1.0. The light-use efficiency decreased with increases in shortwave radiation flux density. The water-use efficiency, defined as dry matter production rate per unit evapotranspiration rate, also increased with increases in leaf area index and then remained stable at about $3 \times 10^{-3} - 4 \times 10^{-3} \text{ g dry matter g}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ when leaf area index was higher than about 0.5. The accumulated light-use and water-use efficiencies for 15 d were $1.8 \times 10^{-2} \text{ J J}^{-1}$ and $2.7 \times 10^{-3} \text{ g dry matter g}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$, respectively.

Keywords: photosynthetic photon flux density (PPFD), net photosynthetic rate, evapotranspiration rate, micrometeorological method, weighing method

2000年7月14日受付

緒 言

セル成型苗生産において苗は高栽植密度の個体群を形成して育成されており、セル成型個体群（苗、培地およびトレイを含む、以下、苗個体群と呼ぶ）上には特有の境界層が形成される（Kim et al., 1996b）。苗個体群と周辺大気との間における CO_2 や水蒸気などのガス交換は苗個体群上の境界層を介して行われ、これらガス交換速度は光強度、気温、相対湿度、 CO_2 濃度、気流速度、培地の水分状態など苗個体群周辺の環境要素の変動や、葉面積指数の増大など苗個体群の構造の

変化にともな大きく変動する（Shibuya et al., 1997a, b; Shibuya and Kozai, 1998）。このような環境要素や苗個体群の構造の変動・変化にともなうガス交換速度の変動を把握し、苗生産に投入されたエネルギー・資源の輸送過程の実態を知ることは、より省エネルギー・省資源的な環境調節技術を確立するために重要である。

本研究では温室内におけるトマトセル成型苗の純光合成速度および蒸発散速度を微気象学的方法および秤量法を応用した方法（Shibuya et al., 1997a）を用いて生育期間を通して連続計測し、計測値に基づいて光利用効率（light-use efficiency, LUE）および水利用効率

(water-use efficiency, WUE) を算定した。

材料および方法

1. 植物材料および計測条件

植物材料にはトマト (*Lycopersicon esculentum* Mill., 品種: ハウス桃太郎) を用いた。育苗容器には 128 穴のセルトレイ (セルサイズ: 30 mm 角, トレイサイズ: 長さ 600 mm × 幅 300 mm × 高さ 43 mm, 容積: 2.8 L/tray) を用い, 培地には市販の育苗用培地 (げんきくん 1 号, コーブケミカル (株) 製) を用いた。計測は茨城県農業総合センター園芸研究所のガラス温室 (間口 7.5 m × 奥行き 25 m, 南北棟) 内の自動干滴灌水装置 (Shibuya et al., 1999) が設置された育苗ベンチ上で行った。灌水は上記灌水装置によって適時行った。温室内には本研究で用いた苗個体群以外の植物が栽培されていた。計測状況の模式図を Fig. 1 および 2 に示す。子葉展開日を試験開始 0 日目として 15 日間 (1997 年 9 月 18 日 ~ 10 月 2 日) 計測を行った。

2. 苗の葉面積指数および乾物重の測定

試験開始 0, 4, 7, 11 および 13 日目に苗の葉面積を, 代表的な大きさの苗の葉型をトレースすることによって求めた。苗の葉面積と苗個体群のトレイ面積から苗個体群の葉面積指数を算定した。試験開始 0 日目および 14 日目にそれぞれ 10 個体の苗の乾物重を測定した。

3. 気温, 露点温度, CO₂ 濃度, 苗個体群重量, 気流速度および短波放射束密度の計測方法

苗個体群上 20 mm および 100 mm の高さにおける露点温度および CO₂ 濃度を, それぞれ鏡面式露点計 (Model 911, Digital Humidity Analyzer, EG&G 製) および赤外線 CO₂ 分析計 (IR21-2-MV, 横河電機 (株)

製) を用いて計測した。苗個体群の重量を Shibuya et al. (1999) の方法に基づき, 電子天秤 (EL-4300S, (株) 島津製作所製) を用いて計測した。苗個体群周辺の気流速度を熱式風速計 (クリモスター MODEL 6521, 日本カノマックス (株) 製) を用いて計測した。苗個体群上の短波放射束密度を簡易全天日射計 (MS-100, 英弘精機産業 (株) 製) を用いて計測した。計測された短波放射束密度 ($W m^{-2}$) に, 短波放射束密度を光合成有効光子束密度 (以下 PPFD, $\mu mol photon m^{-2} s^{-1}$) に換算する係数 $2.0 \mu mol photon m^{-2} s^{-1} / W m^{-2}$ を乗じて PPFD を算定した。

4. 純光合成速度および蒸発散速度の算定方法

苗個体群上の 2 高度における露点温度および CO₂ 濃度, 苗個体群重量から苗個体群の純光合成速度および蒸発散速度を微気象学的方法と秤量法に基づく算定方法 (Shibuya et al., 1997a) によって求めた。夜間における暗呼吸速度も同様の方法で求めた。純光合成速

Fig. 1 Schematic diagram of measurement setup (cross section view).

Fig. 2 Schematic diagram of measurement setup (top view).

度および暗呼吸速度から1日あたりの純光合成量を算定した。植物はCO₂ (分子量:44) を吸収してCH₂O (分子量:30) を乾物として生産することから、苗個体群の純光合成速度の30/44倍を乾物生産速度として、暗呼吸速度の30/44倍を乾物消費速度として算定した。苗個体群の乾物生産速度および乾物消費速度から1日あたりの乾物生産量および試験期間中における乾物生産量を算定した。試験期間を通して純光合成速度の経時変化が短波放射束密度の変動に追隨していた(後述)ことから、本研究では、純光合成速度の算定値が相対的に正確であると仮定して、試験開始0日目および14日目における苗の乾物重から求めた試験期間中における苗の乾物生産量と、試験開始0日目から14日目までの純光合成速度および暗呼吸速度から算定した試験期間中における乾物生産量が等しくなるように、純光合成速度の算定値を補正した。

5. 光利用効率 (LUE) の算定方法

苗個体群の純光合成速度および短波放射束密度、またはPPFDから式(1)、(2)を用いて光利用効率(Forseth and Norman, 1993)を求めた。光利用効率は植物個体群に投入された短波放射束密度、またはPPFDあたりの植物個体群のCO₂吸収速度と定義する。Forseth and Norman (1993)は植物個体群に投入されたPPFDから個体群内地表面におけるPPFDを差し引いた値を用いて光利用効率を算定しているが、本研究では、個体群内地表面における短波放射束密度、またはPPFDは差し引かなかった。1日あたりの純光合成量と短波放射エネルギー量、または光合成有効光量子量から同様に1日あたりの光利用効率を求めた。さらに試験期間15日間における純光合成量および短波放射エネルギー量、または光合成有効光量子量から試験期間15日間あたりの光利用効率を求めた。

$$LUE_r = \frac{k \cdot P}{R_s} \quad (1)$$

LUE_r : 光利用効率(J J⁻¹), P : 純光合成速度(mol CO₂ m⁻² s⁻¹), R_s : 短波放射束密度(W m⁻²), k : CO₂ 1 molを同化するのに必要なエネルギー(≒48×104 J mol⁻¹ CO₂).

$$LUE_p = \frac{P}{F} \quad (2)$$

LUE_p : 光利用効率(mol CO₂ mol⁻¹ photon), P : 純光合成速度(mol CO₂ m⁻² s⁻¹), F : 光合成有効光量子束密度(mol photon m⁻² s⁻¹).

6. 水利用効率 (WUE) の算定方法

苗個体群の乾物生産速度と蒸発散速度から式(3)を用いて水利用効率(たとえば, Kramer and Boyer, 1995)を求めた。農学分野では、水利用効率は単位乾物生産速度あたりの蒸発散速度として用いられることが多いが、本研究では、入力に対する出力の関係を光利用効率と合わせるために、水利用効率を単位蒸発散速度あたりの乾物生産速度と定義した。1日あたりの乾物生産量と蒸発散量から、同様に1日あたりの水利用効率を求めた。さらに試験期間15日間における乾物生産量と蒸発散量から、試験期間15日間あたりの水利用効率を求めた。

$$WUE = \frac{D}{E} \quad (3)$$

WUE : 水利用効率(g dry matter g⁻¹ H₂O), D : 乾物生産速度(g dry matter m⁻² s⁻¹), E : 蒸発散速度(g H₂O m⁻² s⁻¹).

結 果

1. 苗個体群の乾物重および乾物生産量の推定値

試験開始0および14日目における苗の乾物重はそれぞれ4および121 mg/plantであった。苗個体群の純光合成速度から算定した試験期間中の乾物生産量の推定値は175 mg/plantであり、乾物重から算定した乾物生産量117 mg/plantの1.5倍であった。純光合成速度と苗の乾物重から求めた試験期間中における苗の乾物生産量は、理論的には等しくなるはずである。また、乾物重の測定の方が純光合成速度の算定より正確であると考えられる。したがって、以下では、純光合成速度の測定を1.5で除して補正したものを、その真値とした。

2. 温室内の環境条件

試験期間中における温室内の環境条件をTable 1に示す。試験開始3, 5, 8および9日目は曇雨天日のため、短波放射束密度は比較的小さく、日中の気温は比較的低く、また相対湿度は比較的高かった。日中の平均CO₂濃度は307~383 μmol mol⁻¹であり、各日で比較的ばらつきが大きかった。日中の平均気流速度は短波放射束密度が大きい日ほど大きくなる傾向がみられた。

3. 純光合成速度および蒸発散速度の経時変化

試験開始9日目における短波放射束密度、苗個体群の純光合成速度および蒸発散速度をFig. 3に示す。純光合成速度および蒸発散速度は短波放射束密度の変動

Table 1 Environmental conditions in the greenhouse during the experiment.

Day	Daily integrated shortwave radiation (MJ m ⁻² d ⁻¹)	Daily integrated PPFD ^z (mol m ⁻² d ⁻¹)	Average air temperature ^y (°C)		Average relative humidity ^y (%)		Average CO ₂ concentration ^y (μmol mol ⁻¹)		Average air current speed (m s ⁻¹)	
			Day ^x	Night ^w	Day	Night	Day	Night	Day	Night
0	4.5	9.0	25.8	23.0	88	99	336	366	0.34	0.08
1	6.8	13.6	27.6	21.9	73	85	307	342	0.40	0.11
2	7.0	14.0	25.0	18.8	60	90	341	393	0.29	0.11
3	2.3	4.5	22.5	20.1	89	96	333	389	0.16	0.08
4	4.3	8.6	24.0	20.3	75	94	351	401	0.23	0.08
5	1.8	3.5	22.2	19.0	92	98	383	406	0.10	0.10
6	6.2	12.3	23.1	18.3	71	95	331	381	0.33	0.11
7	4.8	9.6	22.3	18.0	71	90	320	369	0.35	0.10
8	1.8	3.6	20.6	18.0	93	98	352	393	0.09	0.10
9	3.8	7.5	22.8	17.8	82	96	353	400	0.12	0.07
10	8.2	16.3	24.0	15.1	62	91	346	415	0.21	0.10
11	8.4	16.8	23.5	14.9	56	87	345	396	0.19	0.09
12	10.2	20.4	24.4	15.6	53	83	335	378	0.19	0.09
13	10.5	21.0	23.1	13.2	52	88	333	408	0.29	0.09
14	6.8	13.5	21.7	11.2	63	96	340	464	0.28	0.11

^z Photosynthetic photon flux density estimated from the shortwave radiation using conversion factor 2.0μmol photon m⁻² s⁻¹/W m⁻².^y Air temperature, relative humidity and CO₂ concentration were measured at 100 mm above the canopy.^x Time period from sunrise to sunset.^w Time period from sunset to sunrise. **Fig. 3** Time courses of shortwave radiation flux density, net photosynthetic rate and evapotranspiration rate of the plug sheets.

にもなって変動した。この傾向は試験期間を通して同様にみられた。

4. 1日あたりの光利用効率および水利用効率の経日変化

試験期間中における苗個体群の葉面積指数、1日あたりの蒸発散量、純光合成量、乾物生産量、水利用効率および光利用効率の経日変化を Table 2 に示す。光利用効率は経日的に増大する傾向がみられた。試験開始 8 および 9 日目に光利用効率は比較的高い値を示した。水利用効率は経日的に増大する傾向がみられた。試験開始 5, 8 および 9 日目において水利用効率は比較的高い値を示した。試験期間 15 日間あたりの光利用効率および水利用効率はそれぞれ $1.7 \times 10^{-2} \text{ J J}^{-1}$ ($1.8 \times 10^{-2} \text{ mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ photon}$) および $2.7 \times 10^{-3} \text{ g dry matter g}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ であった。

5. 苗個体群の葉面積指数と光利用効率との関係

異なる短波放射束密度における苗個体群の葉面積指数と光利用効率との関係を Fig. 4 に示す。光利用効率は葉面積指数約 1.0 以下において、葉面積指数の増大にもなって増大し、葉面積指数約 1.0 以上において $2 \times 10^{-2} \sim 4 \times 10^{-2} \text{ J J}^{-1}$ ($2 \times 10^{-2} \sim 4 \times 10^{-2} \text{ mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ photon}$) 付近ではほぼ一定値を推移した。光利用効率は短波放射束密度の増大にもなって減少する傾向

Table 2 Leaf area index of the plug sheets, daily integrated shortwave radiation, daily net photosynthesis, daily dry matter production, daily water-use efficiency and daily light-use efficiency of the plug sheets during the experiment.

Day	Leaf area index	Daily integrated shortwave radiation (MJ m ⁻² d ⁻¹)	Daily evapotranspiration (kg m ⁻² d ⁻¹)	Daily net photosynthesis ^z (mol CO ₂ m ⁻² d ⁻¹)	Daily dry matter production ^z (g m ⁻² d ⁻¹)	Daily light-use efficiency ^y (× 10 ⁻² J J ⁻¹)	Daily water-use efficiency ^x (× 10 ⁻³ g dry matter g ⁻¹ H ₂ O)
0	<u>0.17^w</u>	4.5	1.09	0.03	0.7	0.3 (0.3) ^y	1.0
1	<u>0.24</u>	6.8	2.30	0.07	1.8	0.5 (0.5)	1.2
2	<u>0.31</u>	7.0	2.22	0.10	2.7	0.7 (0.7)	1.8
3	<u>0.38</u>	2.3	0.67	0.05	1.3	1.0 (1.1)	3.0
4	<u>0.43</u>	4.3	1.54	0.14	3.8	1.6 (1.7)	3.8
5	<u>0.52</u>	1.8	0.50	0.09	2.3	2.4 (2.5)	7.2
6	<u>0.61</u>	6.2	2.00	0.22	5.9	1.7 (1.8)	4.5
7	<u>0.70</u>	4.8	1.88	0.24	6.3	2.4 (2.5)	5.2
8	<u>0.81</u>	1.8	0.50	0.11	2.8	2.9 (3.0)	8.7
9	<u>0.92</u>	3.8	1.37	0.25	6.7	3.2 (3.4)	7.5
10	<u>1.02</u>	8.2	3.25	0.34	8.9	2.0 (2.1)	4.2
11	<u>1.13</u>	8.4	3.34	0.33	8.8	1.9 (2.0)	4.1
12	<u>1.26</u>	10.2	3.70	0.36	9.6	1.7 (1.8)	4.0
13	<u>1.38</u>	10.5	3.61	0.39	10.3	1.8 (1.8)	4.4
14	<u>1.50</u>	6.8	2.51	0.34	9.0	2.4 (2.5)	5.6
Total		87.1 MJ m ⁻²	3.0 kg m ⁻² (43 g/plant)	3.1 mol CO ₂ m ⁻² (4.3 mmol CO ₂ /plant)	81.0 g m ⁻² (113.9 mg/plant)	1.7 (1.8)	2.7

^z Per unit planting area.

^y Daily light-use efficiency is defined as daily chemical-energy transformation by photosynthesis per unit daily integrated shortwave radiation.

^x Daily water-use efficiency is defined as daily dry matter product per unit daily evapotranspiration.

^w Leaf area indexes with underline are the measured values. The others are interpolated from the measured values.

^y Light-use efficiencies in parentheses indicate light-use efficiency per unit photosynthetic photon flux density (mol CO₂ mol⁻¹ photon). Photosynthetic photon flux density was estimated from the shortwave radiation flux density using conversion factor 2.0 μmol photon m⁻² s⁻¹/W m⁻².

がみられた。

6. 苗個体群の葉面積指数と水利用効率との関係

異なる短波放射束密度における苗個体群の葉面積指数と水利用効率との関係を Fig. 5 に示す。水利用効率は葉面積指数約 0.5 以下において、葉面積指数の増大にともなって増大し、葉面積指数約 0.5 以上において $3 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-3}$ g dry matter g⁻¹ H₂O 付近でほぼ一定値を推移した。葉面積指数 0.81 (試験開始 8 日目) において短波放射束密度 100~150 W m⁻² 条件下の水利用効率は比較的大きい値を示した。各葉面積指数において短波放射束密度が水利用効率におよぼす影響は確認されなかった。

考 察

苗個体群の純光合成速度から算定した試験期間中の乾物生産量の推定値が苗個体群の乾物重から算定した乾物生産量の 1.5 倍になった原因として、本研究の計測条件が前提条件を十分に満たしていなかったことが

考えられる。本研究で用いた計測方法では、計測対象の苗個体群上の高さ 20 mm, 100 mm 間において CO₂ および水蒸気の輸送がみかけ上、鉛直方向のみに行われていることが前提条件であるが、本研究の計測条件では 2 高度間において移流が存在したことが考えられる。今後、純光合成速度の計測の精度を向上させるためには、温室内での苗個体群上における境界層形成の実態を詳細に明らかにし、前提条件を満たすように計測を行う必要がある。試験期間を通して純光合成速度の経時変化が短波放射束密度の変動に追従していたことから、本研究では、純光合成速度の計測値は相対的に正確であると仮定して、乾物生産量の実測値を用いて純光合成速度の補正を行った。

温室内の日平均 CO₂ 濃度は比較的ばらつきが大きかったが、これは、本実験で用いた苗以外の植物が温室内に存在していたこと、および作業者が温室内で作業した際の呼気の影響である。日中の平均気流速度は短波放射束密度が大きい日ほど大きくなる傾向がみら

Shortwave radiation flux density Photosynthetic photon flux density³⁾
 ■ 100 - 150 W m⁻² ■ 200 - 300 μmol m⁻² s⁻¹
 ● 200 - 250 W m⁻² ● 400 - 500 μmol m⁻² s⁻¹
 ▲ 300 - 350 W m⁻² ▲ 600 - 700 μmol m⁻² s⁻¹

Fig. 4 Relationship between leaf area index and light-use efficiency of the plug sheets under different levels of shortwave radiation flux density.

¹⁾ Light-use efficiency defined as net photosynthetic rate per unit shortwave radiation flux density. ²⁾ Light-use efficiency defined as net photosynthetic rate per unit photosynthetic photon flux density. ³⁾ Photosynthetic photon flux density estimated from the measured value of shortwave radiation flux density using a conversion factor $2.0 \mu\text{mol photon m}^{-2} \text{s}^{-1} / \text{W m}^{-2}$. Data are shown as daily average under each level of shortwave radiation flux density.

れた。これは温室内に生じた熱対流、および気温が上昇したことによって温室の天窗および側窓が自動的に開いたことに起因する。試験後半において気流速度は比較的小さい値を示したが、これは風速計を苗個体群の近くに設置したために、苗の生育にともなって風速計近辺の気流速度が小さくなったためと考えられる。このことから、本研究では気流速度に関する解析は行わなかった。後述のとおり、気流速度は苗個体群内外の物質およびエネルギーの輸送に大きく影響を及ぼすことが想定されることから、今後、気流速度を含めた計測・解析を行う必要がある。

苗個体群の光利用効率が葉面積指数約 1.0 以下において、葉面積指数の増大にともなって増大したのは、苗個体群単位における苗の受光面積が増大したためである。光利用効率が葉面積指数約 1.0 以上において、ほぼ一定になったのは、苗個体同士の相互遮へいによって、苗の葉面積の増大にともなう苗個体群単位における葉の受光面積の増大が小さくなったことが主な原因であると考えられる。しかし、苗個体群単位における

Shortwave radiation flux density Photosynthetic photon flux density³⁾
 ■ 100 - 150 W m⁻² ■ 200 - 300 μmol m⁻² s⁻¹
 ● 200 - 250 W m⁻² ● 400 - 500 μmol m⁻² s⁻¹
 ▲ 300 - 350 W m⁻² ▲ 600 - 700 μmol m⁻² s⁻¹

Fig. 5 Relationship between leaf area index and water-use efficiency of the plug sheets under different levels of shortwave radiation flux density.

¹⁾ Water-use efficiency is defined as dry matter production rate per unit evapotranspiration rate. ²⁾ Photosynthetic photon flux density estimated from the measured value of shortwave radiation flux density using a conversion factor $2.0 \mu\text{mol photon m}^{-2} \text{s}^{-1} / \text{W m}^{-2}$. Data are shown as daily average under each level of shortwave radiation flux density. Relative humidity around the plug sheets was relatively high at leaf area index of 0.81 and shortwave radiation flux density of 100-150 W m⁻².

苗の受光面積が飽和に達するには、葉面積指数 1.0 は比較的小さい値であることから、それ以外の原因として、苗個体群の構造の変化によって苗個体群上の境界層抵抗が大きくなり、苗個体群と大気との間の CO₂ の拡散が抑制されたことが考えられる。Yabuki et al. (1967) は、植物の栽植密度をある密度以上に高めると乾物生産量が飽和に達するのは、植物個体群内への CO₂ 供給が制限因子となるためであり、個体群への CO₂ 供給を高めることによって飽和に達する栽植密度を高めることができることを指摘している。したがって、セル成型苗生産において、苗個体群への CO₂ 供給を高めることにより、より高い葉面積指数の条件下での育苗ができると考えられる。特に苗個体群上の気流速度は苗個体群上に形成された境界層に影響を及ぼし、その結果、苗個体群内外の物質およびエネルギー輸送に大きく影響を及ぼす (Kim et al., 1996a,b; Kitaya et al., 1998, 2000; Shibuya and Kozai, 1998) ことから、気流速度の制御は苗個体群内への CO₂ 供給を促進するための有効な手段であると考えられる。試験

開始 5, 8 および 9 日目に 1 日あたりの光利用効率が比較的大きかったのは、日中の短波放射束密度が比較的小さかったためである。

苗個体群の水利用効率が葉面積指数約 0.5 以下において葉面積指数の増大にともなって増大したのは、苗の生育にともなって蒸発散に対する培地からの蒸発の割合が減少し、乾物生産に利用される水の割合が増大したためである。このことから、苗の生育段階の初期では蒸発散のほとんどを培地からの蒸発が占め、苗個体群が消費した水が苗の乾物生産に利用される割合が小さかったことが考えられる。水利用効率が葉面積指数約 0.5 以上において $3 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-3} \text{ g dry matter g}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ 付近ではほぼ一定値を推移したのは、蒸発散に対する培地からの蒸発の割合がほぼ一定になったためであると考えられる。試験開始 5, 8 および 9 日目に 1 日あたりの水利用効率が比較的大きく、また、葉面積指数 0.81 (試験開始 8 日目) において短波放射束密度 $100 \sim 150 \text{ W m}^{-2}$ 条件下の水利用効率が比較的大きい値を示したのは、曇雨天の影響により苗個体群周辺の相対湿度が高かったために飽差が小さくなり、苗個体群からの蒸発散が抑制されたためと考えられる。

本研究を遂行するにあたり、種々のご援助をいただいた、茨城県農業総合センター園芸研究所野菜研究室的鈴木雅人室長、中原正一氏、橋本桂子氏に謹んで感謝の意を表す。

文 献

- Forseth, I. N., Norman, J. M. 1993. Modelling of solar irradiance, leaf energy budget and canopy photosynthesis. In "Photosynthesis and Production in a Changing Environment. A Field and Laboratory Manual" (ed. by Hall, D. O., Scurlock, J. M. O., Bolhr-Nordenkamp, H. R., Leegood, R. C., Long, S. P.). Chapman & Hall, London, p 207-219.
- Kim, Y. H., Kozai, T., Kubota, C., Kitaya, Y. 1996a. Design of a wind tunnel for plug seedlings production under artificial lighting. *Acta Hort.* **440**: 153-158.
- Kim, Y. H., Kozai, T., Kubota, C., Kitaya, Y. 1996b. Effects of air current speeds on the microclimate of plug stand under artificial lighting. *Acta Hort.* **440**: 354-359.
- Kitaya, Y., Shibuya, T., Kozai, T., Kubota, C. 1998. Effects of light intensity and air velocity on air temperature, water vapor pressure and CO_2 concentration inside a plant canopy under an artificial lighting condition. *Life Support & Biosphere Sci.* **5**: 199-203.
- Kitaya, Y., Tsuruyama, J., Kawai, M., Shibuya, T., Kiyota, M. 2000. Effects of air current on transpiration and net photosynthetic rates of plants in a closed plant production system. In "Transplant Production in the 21st Century" (ed. by Kubota, C., Chun, C.). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p 83-90.
- Kramer, P. J., Boyer, J. S. 1995. *Water Relations of Plants and Soils*. Academic Press, San Diego, pp 495.
- Shibuya, T., Kitaya, Y., Kozai, T. 1997a. Dynamic measurements of net photosynthetic and evapotranspiration rates, and sensible and latent heat transfer rates of plug sheets based on micrometeorological and weighing methods. (Japanese text with English abstract) *Environ. Control in Biol.* **35**: 71-76.
- Shibuya, T., Kitaya, Y., Kozai, T. 1997b. Changes with time in rates of net photosynthesis, evapotranspiration and sensible and latent heat transfers of the plug sheet after watering. (Japanese text with English abstract) *Environ. Control in Biol.* **35**: 227-234.
- Shibuya, T., Kozai, T. 1998. Effects of air current speed on net photosynthetic and evapotranspiration rates of a tomato plug sheet under artificial light. (Japanese text with English abstract) *Environ. Control in Biol.* **36**: 131-136.
- Shibuya, T., Nakahara, M., Kozai, T. 1999. Development of an automatic ebb and flood watering system with estimation of evapotranspiration of a plug sheet. (Japanese text with English abstract) *Environ. Control in Biol.* **37**: 57-61.
- Yabuki, K., Tamura, J., Oda, Y., Imazu, T. 1967. The effect of carbon dioxide concentration of atmospheric on growth of leaf beet with various plant densities. (Japanese text with English abstract) *J. Agric. Meteorol.* **23**: 25-29.