

灌水後におけるセル成型苗個体群の純光合成速度, 蒸発散速度, 顕熱輸送速度および潜熱輸送速度の変動

渋谷俊夫・北宅善昭*・古在豊樹

千葉大学園芸学部・*大阪府立大学農学部

Changes with Time in Rates of Net Photosynthesis, Evapotranspiration and
Sensible and Latent Heat Transfers of the Plug Sheet after Watering

Toshio SHIBUYA, Yoshiaki KITAYA* and Toyoki KOZAI

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

**College of Agriculture, Osaka Prefecture University, Sakai 593, Japan*

Characterizing mass and energy balance at a plug sheet consisting of plug seedlings and soil mix is essential for optimum control of soil-mix moisture in plug seedling production. Time courses of rates of net photosynthesis, evapotranspiration and sensible and latent heat transfers of a tomato plug sheet under artificial light and the volumetric percent water content of soil mix were estimated micrometeorologically using the measured data on CO₂ concentrations, dewpoint temperatures at two heights above the plug sheet and weight of the plug sheet measured with an electronic balance. The first watering was done at the start of measurements and the second watering 16 hours after the first watering. After the first watering, the volumetric percent water content of soil mix decreased with time. Sensible heat transfer rate increased, and evapotranspiration and latent heat transfer rates decreased with decreasing volumetric percent water content when it was lower than about 20%. Net photosynthetic rate decreased with decreasing volumetric percent water content when it was lower than about 12%. One to three hours after the second watering, all the rates returned to the levels at the start of measurement. The present method is useful for on-line monitoring of micrometeorological and water-stress status of the plug sheet and for automatic watering based upon the status.

(Received March 28, 1997)

1997年3月28日受付

緒 言

セル成型苗はセルトレイ上において高栽植密度の個体群を形成しており, 個体群上には特有の境界層が形成されている (Kim *et al.*, 1996a). 近年, セル成型苗個体群 (苗および培地を含む系と定義し, 以下, 苗個体群と呼ぶ) における物質および熱収支の解析が, 野外の植物個体群におけるそれらの解析方法 (例えば, Lemon, 1963) を応用して行われている (Kim *et al.*, 1996a; 1996b; Shibuya *et al.*, 1997). セル成型苗は, 100 から 300 個程度のセルからなるセルトレイ (幅約

300 mm×長さ約 600 mm) を用いて育成され, セルあたりの培地量は 5 から 20 mL 程度と比較的少ないことから, 培地の保持できる水の量が少ない (Milks *et al.*, 1989). このような培地の特性は, 苗個体群における物質および熱収支特性に大きく影響すると考えられ, その影響を明らかにすることは, セル成型苗生産における環境調節技術, 特に灌水管理技術の確立に重要である.

本研究では, セル成型苗生産における灌水管理技術の確立のための基礎データを得ることを目的として, 人工光型グロースチャンパ内で培地の水分状態の変動に伴うセル成型苗個体群の純光合成速度, 蒸発散速度,

顕熱輸送速度および潜熱輸送速度の変動を、先に報告した微気象学的方法と秤量法を応用した計測方法 (Shibuya *et al.*, 1997) を用いて動的に計測した。さらに本研究では、これらの計測値から苗個体群の水利用効率、ポーン比および水蒸気拡散抵抗を求めた。

材料および方法

1. 供試材料

植物材料には温室内で播種後約1か月間育成されたナス (*Solanum melongena* L., 品種: 千両二号) のセル成型苗を用いた。実験に用いた苗個体群の概要を Table 1 に示す。

2. 計測方法

苗個体群をグロースチャンバ (日立製作所製) 内に設置した (Fig. 1)。グロースチャンバ内の気温、相対湿度、CO₂ 濃度、気流速度、光合成有効光子束密度および短波放射束密度を Table 2 に示す。グロースチャンバ内の気流方向はほぼ水平であった。グロースチャンバの光源にはメタルハライドランプ (DR400/T, DR125/T, 東芝ライテック (株) 製) と高圧ナトリウムランプ (NHR360・L, 松下電工 (株) 製) を併用した。苗個体群上の2高度 z_1 , z_2 における露点温度、CO₂ 濃度および気温を、それぞれ鏡面式露点計 (Model 911, Digital Humidity Analyzer, EG&G 製)、赤外線 CO₂ 分析計 (IR21-2-MV, 横河電機 (株) 製) および熱電対 (銅-コンスタンタン, 線径 0.1 mm) を用いて計測した。苗個体群の重量を電子天秤 (EB-2800, (株) 島津製作所製) を用いて計測した。本実験において、 z_1 および z_2 を苗個体群のキャノピーからの高さ 0 mm および 30 mm とした。計測装置の模式図を Fig. 2 に示す。エアポンプを用いて、苗個体群上の2高度 z_1 , z_2 の空気をそれぞれ空気採取用パイプ (内径 2 mm, アルミニウム製) から電磁弁へ送った (送気速度, 1 L min⁻¹)。採取空気は

電磁弁が通電状態のときには IN から NC へ、非通電状態のときには IN から NO へ流れた。電磁弁を2分間隔で順次通電状態にすることによって各高度の採取

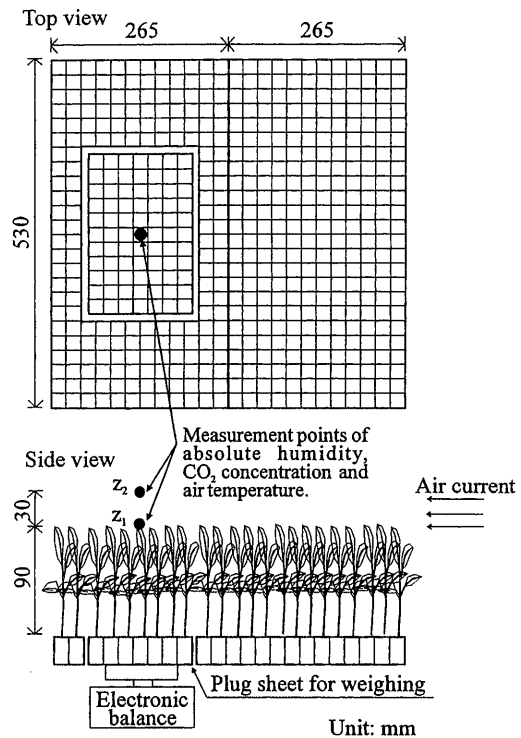


Fig. 1 Schematic diagram of the measurement method.

Table 2 Description of environmental conditions in the growth chamber.

Air temperature*	$30 \pm 1^\circ\text{C}$
Relative humidity*	$60 \pm 3\%$
CO ₂ concentration*	$340 \pm 30 \mu\text{mol mol}^{-1}$
Air current speed*	0.1 m s^{-1}
Photosynthetic photon flux density on the canopy	$450 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Shortwave radiation flux density on the canopy	250 W m^{-2}

* Measurements of air temperature, relative humidity, CO₂ concentration and air current speed were made at z_2 (30 mm above the plug sheet).

Table 1 Description of the plug sheet.

Plant material
Eggplant (<i>Solanum melongena</i> L., CV. Senryo-nigo)
Average plant height: 90 mm
Leaf area index: 3.1
Plug tray
Size: 265 mm wide, 530 mm long, 25 mm height
Number of cells per tray: 288
Volume of soil mix per cell: 4.7 mL
Composition of soil mix
Peat-moss with vermiculite

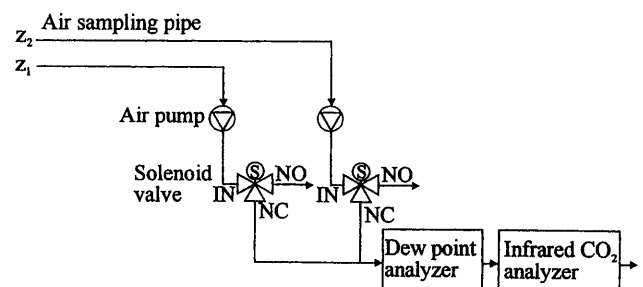


Fig. 2 Schematic diagram of the measuring system.

空気を鏡面式露点計および赤外線 CO₂ 分析計に送り、露点温度および CO₂ 濃度を計測した。気温は採取用パイプの先端の位置で計測した。露点温度と気温から絶対湿度を求めた。葉の裏面に熱電対(銅-コンスタタン、線径 0.1 mm)を密着させることによって葉温を計測した。各計測機器からの信号の処理および電磁弁の通電・非通電状態の切替は汎用パーソナルコンピュータ(PCX-300, ソニー(株)製), 信号入出力装置(Green kit 88, (株)イー・エス・ディ製) および自作の専用ソフトウェアを用いて行った。

計測開始直前に 1 回目の灌水を苗個体群の底面から行った。計測開始 16 時間後に 2 回目の灌水を培地表面から行った。

3. 純光合成速度, 蒸発散速度, 顕熱輸送速度および潜熱輸送速度の算定方法

苗個体群の純光合成速度, 蒸発散速度, 顕熱輸送速度および潜熱輸送速度の算定方法には, 先に報告した微気象学的方法と秤量法を応用した計測方法(Shibuya *et al.*, 1997)を用いた。その概要を以下に示す。

苗個体群の蒸発散速度(E)は式(1)のように表され, 苗個体群の重量の実測値から求めることができる。また, E は拡散理論から式(2)のように表される。拡散係数(K)は(1)式によって求めた E と苗個体群上の絶対湿度勾配 $(q_2 - q_1)/(z_2 - z_1)$ の実測値を用いて求めることができる。苗個体群の純光合成速度(P)は拡散理論から式(3)のように表され, (2)式で求めた K と CO₂ 濃度勾配 $(C_2 - C_1)/(z_2 - z_1)$ の実測値を用いて求めることができる。顕熱輸送速度(H_s)は拡散理論から式(4)のように表され, (2)式で求めた K , 気温勾配 $(T_2 - T_1)/(z_2 - z_1)$ の実測値および空気の熱容量 $(\rho_a \cdot c_p)$ から求めることができる。潜熱輸送速度(H_1)は E に水の蒸発潜熱(λ)を乗じることによって求めることができる(式(5))。

$$E = \frac{W_1 - W_2}{t_2 - t_1} \cdot \frac{1}{A} \quad (1)$$

E : 苗個体群の蒸発散速度 (gH₂O m⁻² s⁻¹)

W_1, W_2 : 時間 t_1, t_2 ($t_1 < t_2$) における苗個体群の重量 (g)

A : 重量計測に用いた苗個体群の面積 (m²)

$$E = -K \frac{q_2 - q_1}{z_2 - z_1} \quad (2)$$

K : 拡散係数 (m² s⁻¹)

q_1, q_2 : 高さ z_1, z_2 ($z_1 < z_2$) における絶対湿度

(gH₂O m⁻³)

$$P = K \frac{C_2 - C_1}{z_2 - z_1} \quad (3)$$

P : 純光合成速度 (gCO₂ m⁻² s⁻¹)

C_1, C_2 : 高さ z_1, z_2 ($z_1 < z_2$) における CO₂ 濃度

(gCO₂ m⁻³)

$$H_s = -K \frac{\rho_a \cdot c_p (T_2 - T_1)}{z_2 - z_1} \quad (4)$$

H_s : 顕熱輸送速度 (W m⁻²)

ρ_a : 空気密度 (g m⁻³)

c_p : 定圧比熱 (J g⁻¹ °C⁻¹)

T_1, T_2 : 高さ z_1, z_2 ($z_1 < z_2$) における気温 (°C)

$$H_1 = \lambda \cdot E \quad (5)$$

H_1 : 潜熱輸送速度 (W m⁻²)

λ : 蒸発潜熱 (J gH₂O⁻¹)

4. 水利用効率の算定方法

水利用効率 (WUE) は一般に, 単位量の乾物を生産する間に蒸発散によって消費された水量と定義される (Kramer, 1983)。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, P の 30/44 倍を植物の乾物生産速度と仮定すると, WUE は式(2)と式(3)から式(6)のように表される。すなわち WUE は z_1, z_2 間の絶対湿度差 $(q_2 - q_1)$ と CO₂ 濃度差 $(C_2 - C_1)$ の実測値を用いて求めることができる。

$$WUE = \frac{E}{h \cdot P} = -\frac{1}{h} \cdot \frac{q_2 - q_1}{C_2 - C_1} \quad (6)$$

WUE : 水利用効率

h : 純光合成速度を乾物生産速度に変換する係数 (= 30/44)

5. ボーエン比の算定方法

苗個体群のボーエン比 (β) は式(2), 式(4)および式(5)より, 式(7)のように表される。すなわち, β は気温差 $(T_2 - T_1)$ および絶対湿度差 $(q_2 - q_1)$ の実測値, 空気の熱容量 $(\rho_a \cdot c_p)$, 水の蒸発潜熱 (λ) を用いて求めることができる。

$$\beta = \frac{H_s}{H_1} = \frac{\rho_a \cdot c_p (T_2 - T_1)}{\lambda (q_2 - q_1)} \quad (7)$$

β : ボーエン比

6. 水蒸気拡散抵抗の算定方法

ある 2 点間における拡散抵抗は, その 2 点間における濃度差を濃度差によって生じたフラックスで除することによって求めることができる (Oke, 1987)。本研究では苗個体群をマスとしてとらえ, その仮想表面と

大気との水蒸気交換を律則する抵抗（気孔抵抗，葉面境界層抵抗など）の合成抵抗を苗個体群の水蒸気拡散抵抗と定義し，フラックスを蒸発散速度，濃度差を葉温における飽和絶対湿度と高さ z_1 における絶対湿度との差として，苗個体群と高さ z_1 との間の水蒸気拡散抵抗を算定した（(8)式，Oke, 1987 を一部改定）。

$$R = \frac{q_L - q_2}{E} \quad (8)$$

R ：水蒸気拡散抵抗 ($s\ m^{-1}$)

q_L ：葉温における飽和絶対湿度 ($gH_2O\ m^{-3}$)

7. 培地の体積含水率の算定方法

培地の体積含水率は，苗個体群の重量，苗個体群の乾燥重量，培地の容積および苗の含水量から式(9)を用いて近似的に求めることができる。ただし，苗の根部の容積は培地の容積に対して無視できるほど小さいと仮定する。

$$l = \frac{a(W - W_d - W_p)}{V} \times 100 \quad (9)$$

l ：培地の体積含水率 (%)

W ：苗個体群の重量 (g)

W_d ：苗個体群の乾燥重量 (g)

W_p ：苗個体群あたりの苗の含水量 (g)，本実験では $W_p = 80\ g$ とした。

V ：苗個体群あたりの培地の体積 (m^3)

a ：水の重量を体積に変換する係数 ($\cong 10^{-6},\ m^3\ g^{-1}$)

結 果

1. 苗個体群の面積含水量

苗個体群の面積あたりの含水量（苗個体群の重量から苗個体群の乾燥重量を引いた値を苗個体群のトレイ面積で除した値，以下，面積含水量）の経時変化を Fig. 3 に示す。計測開始時の苗個体群の面積含水量は $8.8\ kg\ m^{-2}$ であった。このときの培地の体積含水率は 70% であった（培地の最小容水量に相当）。苗個体群からの蒸発散によって面積含水量は経時的に減少した。計測

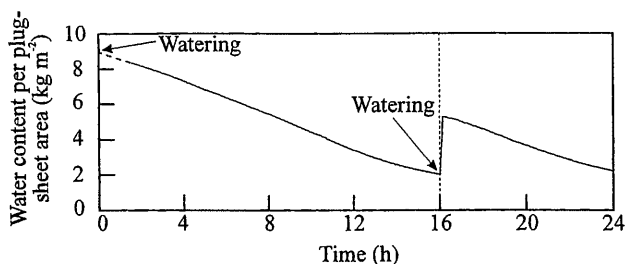


Fig. 3 Time course of water content per plug-sheet area.

開始 16 時間後に行った 2 回目の灌水によって面積含水量は $2.0\ kg\ m^{-2}$ から $5.2\ kg\ m^{-2}$ へと増加した。

2. 純光合成速度

純光合成速度の経時変化を Fig. 4(a) に示す。計測開始 15 時間後から 17 時間後の間は，苗が萎れ，苗個体群のキャノピーの高さが低下したことによって，拡散係数の算定を正確に行うことができなかつたために欠測とした。純光合成速度は計測開始から 13 時間はほぼ一定値であったが，計測開始 13 時間後（面積含水量： $2.9\ kg\ m^{-2}$ ）に減少し始めた。計測開始 16 時間後に行った 2 回目の灌水によって，純光合成速度は計測開始から 18 時間後に計測開始時と同じレベルに戻った。計測開始 20 時間後（面積含水量： $3.6\ kg\ m^{-2}$ ）に純光合成速度は再び減少し始めた。計測開始 13 時間後および 20 時間後における培地の体積含水率はそれぞれ，12% および 19% であった。面積含水量と純光合成速度の関係を Fig. 5 に示す。1 回目の灌水後（計測開始 0 時間後から 15 時間後）では，面積含水量が $2.9\ kg\ m^{-2}$ を下回ると，2 回目の灌水後（計測開始 17 時間後から 24 時間後）では，面積含水量が $3.6\ kg\ m^{-2}$ を下回ると，純光合成速度は面積含水量の減少に伴って一次関数的に減少した。面積含水量の減少に対する純光合成速度の減

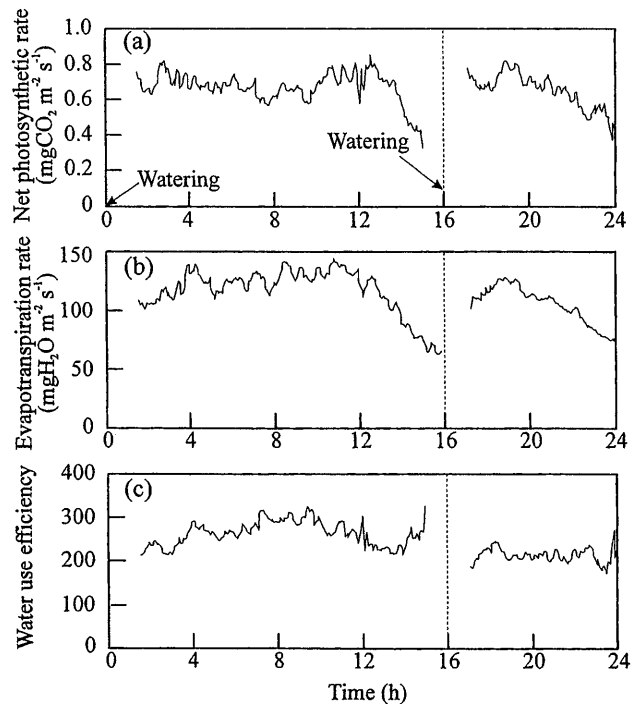


Fig. 4 Time courses of (a) net photosynthetic rate, (b) evapotranspiration rate and (c) water use efficiency of the plug sheet.

Data are shown as running average for 16 minutes.

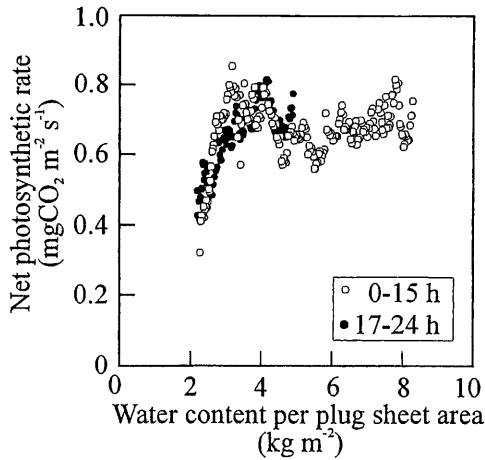


Fig. 5 Relationship between water content per plug-sheet area and net photosynthetic rate of the plug sheet after the first watering (0 h) and the second watering (16 h).

Open and solid circles denote the data for 0-15 h and 17-24 h after the start of experiments, respectively.

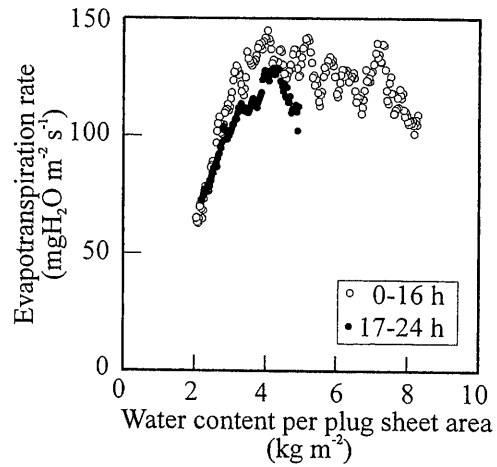


Fig. 6 Relationship between water content per plug-sheet area and evapotranspiration rate of the plug sheet after the first watering (0 h) and the second watering (16 h).

Open and solid circles denote the data for 0-16 h and 17-24 h after the start of experiments, respectively.

少の割合は、2回目の灌水後では1回目の灌水後よりも小である傾向が見られた。

3. 蒸発散速度

蒸発散速度の経時変化を Fig. 4(b) に示す。計測開始 16 時間後から 17 時間後の間は、2 回目の灌水による外乱のために欠測とした。蒸発散速度は計測開始 11 時間はほぼ一定値であったが、計測開始 11 時間後(面積含水量: 3.9 kg m^{-2})に減少し始めた。計測開始 16 時間後に行った 2 回目の灌水によって、蒸発散速度は計測開始 19 時間後に計測開始時と同じレベルに戻った。計測開始 19 時間後(面積含水量: 4.1 kg m^{-2})に蒸発散速度は再び減少し始めた。計測開始 11 時間後および 19 時間後における培地の体積含水率はそれぞれ、21% および 23% であった。面積含水量と蒸発散速度の関係を Fig. 6 に示す。1 回目の灌水後(計測開始 0 時間後から 16 時間後)では、面積含水量が 3.9 kg m^{-2} を下回ると、2 回目の灌水後(計測開始 17 時間後から 24 時間後)では、面積含水量が 4.1 kg m^{-2} を下回ると、蒸発散速度は面積含水量の減少に伴って一次関数的に減少した。面積含水量の減少に対する蒸発散速度の減少の割合は、2 回目の灌水後では 1 回目の灌水後よりも小である傾向が見られた。

4. 水利用効率

水利用効率の経時変化を Fig. 4(c) に示す。水利用効率は 215 から 330 であった。水利用効率は計測開始 10 時間後に減少し始め、計測開始 14 時間後に増加し始め

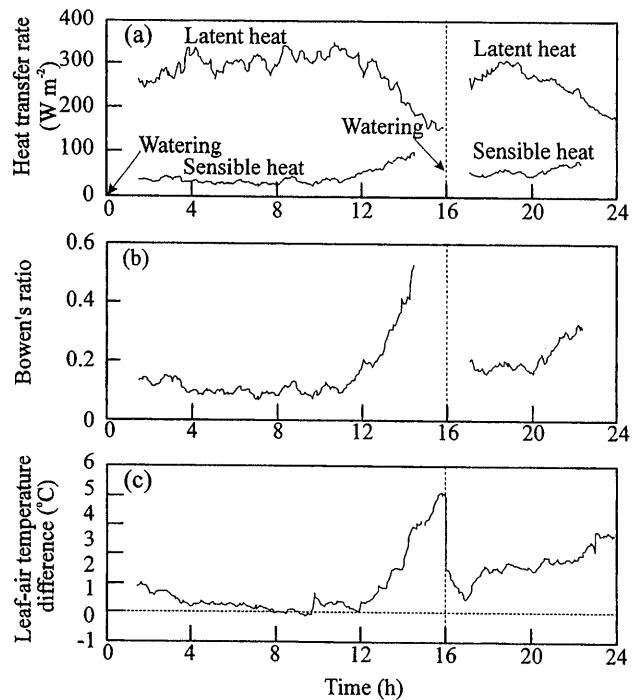


Fig. 7 Time courses of (a) sensible and latent heat transfer rates, (b) Bowen's ratio and (c) leaf-air temperature difference of the plug sheet.

Data are shown as running average for 16 minutes.

る傾向が見られた。

5. 顕熱および潜熱輸送速度

顕熱および潜熱輸送速度の経時変化を Fig. 7(a) に

示す。計測開始 15 時間後から 17 時間後の間は、苗が萎れ、苗個体群のキャノピーの高さが低下したことによって、拡散係数の算定を正確に行うことができなかったために顕熱輸送速度は欠測とした。計測開始 16 時間後から 17 時間後の間は、2 回目の灌水による外乱のために潜熱輸送速度は欠測とした。顕熱輸送速度は計測開始から 11 時間はほぼ一定値であったが計測開始 11 時間後（面積含水量：3.9 kg m⁻²）に増加し始めた。潜熱輸送速度は計測開始から 11 時間はほぼ一定値であったが、計測開始 11 時間後に減少し始めた。計測開始 11 時間後における培地の体積含水率は 21% であった。

6. ポーエン比

ポーエン比の経時変化を Fig. 7(b) に示す。ポーエン比は計測開始から 11 時間はほぼ一定値であったが、計測開始 11 時間後（面積含水量：3.9 kg m⁻²、培地の体積含水率：21%）に増加し始めた。

7. 葉気温差

葉気温差（葉温から気温を引いた値）の経時変化を Fig. 7(c) に示す。葉気温差は計測開始から 12 時間はほぼ一定値であったが、計測開始 12 時間後（面積含水量：3.4 kg m⁻²）に増加し始めた。計測開始 16 時間後に行った 2 回目の灌水によって葉気温差は計測開始 17 時間後に計測開始時と同じレベルに戻った。計測開始 12 時間後および 17 時間後における培地の体積含水率はそれぞれ、17% および 32% であった。面積含水量と

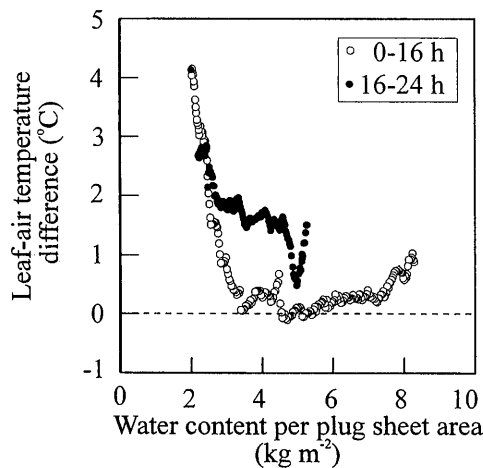


Fig. 8 Relationship between water content per plug-sheet area and leaf-air temperature difference of the plug sheet after the first watering (0 h) and the second watering (16 h).

Open and solid circles denote the data for 0-16 h and 16-24 h after the start of experiments, respectively.

葉気温差の関係を Fig. 8 に示す。1 回目の灌水後（計測開始 0 時間後から 16 時間後）では、面積含水量が 3.4 kg m⁻² を下回ると、2 回目の灌水後（計測開始 16 時間後から 24 時間後）では、面積含水率が 4.9 kg m⁻² を下回ると、葉気温差は面積含水量の減少に伴って一次的に増加した。面積含水量の減少に対する葉気温差の増加の割合は、2 回目の灌水後では 1 回目の灌水後よりも小である傾向が見られた。

8. 水蒸気拡散抵抗

水蒸気拡散抵抗の経時変化を Fig. 9 に示す。計測開始 15 時間後から 17 時間後の間は、苗が萎れ、苗個体群の高さが低下したことによって、葉温の計測位置と絶対湿度の計測位置 z_1 との距離が増大したために欠測とした。水蒸気拡散抵抗は計測開始から 13 時間後はほぼ一定値であったが、計測開始 13 時間後に増加し始めた。計測開始 16 時間後に行った 2 回目の灌水によって水蒸気拡散抵抗は計測開始 17 時間後に計測開始時のレベルに戻った。

9. 拡散係数

拡散係数の経時変化を Fig. 10 に示す。計測開始 15 時間後から 17 時間後の間は、苗が萎れ、苗個体群の高さが低下したことによって、絶対湿度の計測位置 z_2 が境界層外となり、拡散係数の算定を正確に行うことが

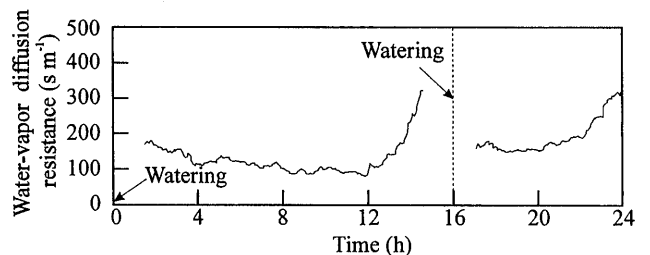


Fig. 9 Time course of water-vapor diffusion resistance of the plug sheet.

Data are shown as running average for 16 minutes.

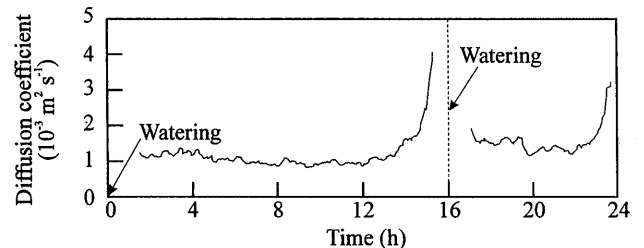


Fig. 10 Time course of diffusion coefficient above the plug sheet.

Data are shown as running average for 16 minutes.

できなかったために欠測とした。拡散係数は計測開始から14時間はほぼ一定値であったが、計測開始14時間後に増大し始めた。計測開始16時間後に行った2回目の灌水によって拡散係数は計測開始17時間後に計測開始時のレベルに戻った。

考 察

目視によるしおれの初期兆候は計測開始約12時間後に観察され、14時間後には明らかなしおれが観察された。計測開始11時間から13時間後(面積含水量: 3.9 kg m^{-2} から 2.9 kg m^{-2} ; 培地の体積含水率: 21% から 12%)における純光合成速度、蒸発散速度、顕熱輸送速度、潜熱輸送速度、ボーエン比、水蒸気拡散抵抗および葉気温差の変動は、培地の水ポテンシャルが減少したことによって苗が水ストレスを受けたことに起因すると考えられる。葉気温差が計測開始12時間後に増大したのは、苗の蒸散速度が減少したことを示唆する。純光合成速度は計測開始15時間後に計測開始時における値のほぼ50%となった。Brix (1962) がトマトのポット苗(ポットの径: 約18 cm)を用いて行った研究では、光合成速度は灌水終了約170時間後に灌水直後の値のほぼ50%となった。本研究において、灌水後、純光合成速度が灌水直後の値の50%に減少するまでの時間がBrix (1962) の研究に比べて短かったことは、主に培地量がBrix (1962) の実験に比べて少なかったためと考えられる。

1回目の灌水後は、蒸発散速度、葉気温差、純光合成速度の順に、2回目の灌水後は葉気温差、蒸発散速度、純光合成速度の順にそれぞれの値が変動し始める傾向が見られた。Brix (1962) は水ストレスの増加に伴う光合成速度の低下と蒸散速度の低下との間には高い相関が見られることを指摘している。しかし本研究の結果では、蒸散速度は純光合成速度よりも早く水ストレスによる低下を始めたと考えられる。水利用効率率は計測開始10時間後に減少し始める傾向が見られた。これは蒸発散速度の低下が純光合成速度の低下よりも早く始まったことを示唆している。2回目の灌水後では1回目の灌水後よりも高い体積含水率で蒸発散速度、純光合成速度および葉気温差が変動し、また、面積含水量の減少に対する各値の変動の割合は、2回目の灌水後では1回目の灌水後よりも小である傾向が見られた。これは2回目の灌水前に苗が水ストレスを受けたこと、および1回目と2回目の灌水方法および灌水量が異なることに起因すると考えられる。

顕熱輸送速度および潜熱輸送速度が計測開始11時間後にそれぞれ増加および減少し始め、ボーエン比が計測開始11時間後に増加し始めたのは、計測開始11時間後に、苗個体群の蒸発散速度の低下によって、苗個体群上面への純放射に対する潜熱輸送速度の割合が減少し、顕熱輸送速度の割合が増加したことを示す。顕熱輸送速度に潜熱輸送速度を加えた値が苗個体群上における短波放射束密度より大であったのは、グロースチャンバの光源からの長波放射の影響が比較的大きく、苗個体群上の長波放射収支が鉛直下向きに正であったためと考えられる。また、顕熱輸送速度に潜熱輸送速度を加えた値は一定値ではなかった。これは、苗個体群下面など、苗個体群上、鉛直上向き方向以外にも顕熱が輸送されたためであると考えられる。ボーエン比は(7)式によって比較的簡易に求めることができ、また、計測誤差も比較的小さいと考えられるので、苗の水ストレス状態の指標として有効であると考えられる。

純光合成速度、蒸発散速度、顕熱輸送速度、潜熱輸送速度、ボーエン比、水蒸気拡散抵抗および葉気温差の経時変化から、本研究において、計測開始11から13時間後(面積含水量: 3.9 kg m^{-2} から 2.9 kg m^{-2} ; 培地の体積含水率: 21% から 12%)における培地の水ポテンシャルは永久しおれ点であると推測される。永久しおれ点付近では、わずかな含水量の変化で大きな水ポテンシャルの変化が起こる(例えば、Kramer, 1983)のために、計測開始11から13時間後以降では、比較的小さい含水量の変化に対して純光合成速度、蒸発散速度、顕熱輸送速度、潜熱輸送速度、ボーエン比、水蒸気拡散抵抗および葉気温差が大きく変動したものと考えられる。このことは培地量が極端に少なく、培地の水分状態が蒸発散や灌水によって変化しやすいセル成型苗において特に留意すべき問題である。本研究において推定した培地の体積含水率の値は、苗の含水量の計測を十分に行わなかったために、正確な値とはいえない。今後、培地の体積含水率を正確に推定することによって、培地の水分状態と苗の生育状態との関係を定量的に明らかにする必要がある。

水蒸気拡散抵抗が計測開始13時間後に増大し始めたのは、主に気孔抵抗の増大に起因すると考えられる。本研究では、葉温における飽和絶対湿度を苗個体群全体の絶対湿度の指標として用いたが、実際は、苗の葉の絶対湿度の指標と苗および培地を含めた絶対湿度の指標は異なり、また、苗個体群全体の絶対湿度の指標

は苗および培地の水ポテンシャルによって異なると考えられる。従って、本計測方法によって水蒸気拡散抵抗を正確に求めるためには、苗および培地を含めた苗個体群を代表した絶対湿度の指標を連続的に算定する必要があると考えられる。

拡散係数が計測開始 14 時間後に増大し始めたのは、苗個体群と苗個体群上の空気との温度差が増大し、苗個体群上の空気の浮力が増加したことに起因すると考えられる。拡散係数は分子拡散係数（オーダー： $10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ）の 10^2 倍以上の大きさであったことから、分子量の違いによる分子拡散係数の違いは無視でき、ここで得られた拡散係数は水蒸気以外の物質および熱に対する拡散係数としても用いることができることが確認できた。

結 論

本研究で示した計測方法により、比較的少ない計測要素から苗個体群の物質および熱収支特性が多面的に解析された。苗個体群における純光合成速度、蒸発散速度、顕熱輸送速度および潜熱輸送速度は、永久しおれ点以下の培地の水ポテンシャルにおいて、比較的小さな含水量の変化で大きく変動することが示唆された。これらの変動は苗の水ストレス状態の変動に対応したことから、本研究で用いた計測方法によって、非接触で動的に個体群単位での苗の水ストレス状態を推

定できると考えられる。

実験材料のセル成型苗を提供して下さったダイヤトピー農芸(株)の根本 修氏に謹んで感謝の意を表す。

文 献

- Brix, H. 1962. The effect of water stress on the rates of photosynthesis and respiration in tomato plants and loblolly pine seedlings. *Physiol. Plant.* **15**: 10-20.
- 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.
- Kramer, P. J. 1983. *Water Relations of Plants.* Academic Press, Orlando, pp 489.
- Lemon, G. 1963. Energy and water balance of plant communities. In "Environmental control of plant growth," (ed. by Evans, L. T.), Academic Press, New York, p 55-76.
- Milks, R. R., Fonteno, W. C., Larson, R. A. 1989. Hydrology of horticultural substrates: III. Predicting air and water content of limited-volume plug cells. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* **114**(1): 57-61.
- Oke, T. R. 1987. *Boundary Layer Climates.* Ed. 2. Methuen, New York, pp 435.
- Shibuya, T., Kitaya, Y., Kozai, T. 1997. 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.