微気象学的方法と秤量法に基づくセル成型苗個体群の純光合成 および蒸発散速度、顕熱および潜熱輸送速度の動的計測

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

Dynamic Measurements of Net Photosynthetic and Evapotranspiration Rates, and Sensible and Latent Heat Transfer Rates of Plug Sheets Based on Micrometeorological and Weighing Methods

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*

The net photosynthetic and evapotranspiration rates, and sensible and latent heat transfer rates of tomato plug sheets consisting of plugs, soil mix and a tray in a greenhouse were estimated continuously. Absolute humidities (q_1 and q_2), CO_2 concentrations (C_1 and C_2) and air temperatures (T_1 and T_2) were measured at two heights (z_1 and z_2 , respectively) above the plug sheets with a dew point analyzer, an infrared CO_2 analyzer and thermocouples. The weight of the plug sheet was also measured with an electronic balance. The evapotranspiration rate, E , was determined based on the difference between weights of the plug sheet at time $t - \Delta t/2$ and $t + \Delta t/2$. The diffusion coefficient, K , was determined based on E and the absolute humidity gradient with the equation $E = -K(q_2 - q_1)/(z_2 - z_1)$. The net photosynthetic rate was determined from the CO_2 gradient, $(C_2 - C_1)/(z_2 - z_1)$, multiplied by K . The sensible heat transfer rate was determined from the air temperature gradient, $(T_2 - T_1)/(z_2 - z_1)$, multiplied by K and the heat capacity of the air. The latent heat transfer rate was determined from the evapotranspiration rate multiplied by the latent heat of vaporization. This technique was useful to estimate the rates of net photosynthesis, evapotranspiration and the sensible and latent heat transfers of plug sheets under the growing conditions in the greenhouse.

(Received October 9, 1996)

1996年10月9日受付

1. 緒 言

近年、育苗作業の合理化、移植作業の自動化を目的としたセル成型苗の利用が普及しつつある。セル成型苗生産において、一般に苗は100から200個のセルを含む 300×600 mm程度のセルトレイを用いて育苗され、苗は高栽植密度の個体群を形成している。セル成型苗生産における環境調節技術を確立する上で、環境の変動に対する苗の光合成や蒸散の変動を把握し、苗の生育と環境要因との関係を解析することは重要であ

る。

これまで苗の光合成や蒸散に関する研究のほとんどが個葉、または個体レベルで行われてきた（例えば、Tatsumi and Hori, 1969; Ikeda, 1978）。しかし、個体群内外の CO_2 の拡散が植物の光合成に大きく影響を及ぼしている（例えば、Yabuki *et al.*, 1967）ことから、個葉、または個体レベルでの苗の光合成や蒸散の研究結果を個体群を形成したセル成型苗の環境調節に適用することは困難である。また、個体群単位での植物の光合成を計測する方法として、同化箱法による圃場個体群光合成速度計測法（例えば、Munakata, 1970）

が検討されているが、この方法によって得られた結果は同化箱内の環境における植物個体群の光合成速度であり、生産現場における植物の光合成の実態とは異なる。生産現場におけるセル成型苗の光合成や蒸散の実態を把握するためには、苗周辺の環境を乱さず、個体群単位での計測を行うことが望ましい。

植物個体群内外の微気象計測に基づいて植物個体群内外の物質および熱の輸送速度を連続計測する方法は、野外のトウモロコシ個体群 (Inoue *et al.*, 1968)、水稻個体群 (Yabuki *et al.*, 1974) などの光合成を、環境を乱さずに計測するのに用いられてきた。この方法は、セル成型苗個体群 (苗、培地およびセルトレイを含む系と定義し、以下、苗個体群と呼ぶ) のような比較的スケールの小さな植物個体群においても適用可能であると考えられる。他方、植物および培地の重量の減少速度から蒸発散速度を求める方法は、蒸発散速度の計測方法の中で、もっとも基本的で精度の高い方法であり (例えば、Salisbury and Ross, 1991)、野外の植物個体群に比べ、重量の計測が容易な苗個体群の蒸発散速度の計測に適する。

本研究では微気象学的方法と秤量法を組み合わせ、苗個体群の純光合成速度、蒸発散速度、顕熱および潜熱輸送速度を苗周辺の環境を乱さずに連続計測するシステムを試作した。また、そのシステムを用いてトマトセル成型苗個体群における上述の各速度の日変化を温室内で連続計測した。

2. 計測方法

計測は茨城県農業総合センター園芸研究所内の温室 (アクリル被覆、南北棟) で 1995 年 4 月 21 日に行った。温室内の気温は、夜間は温風暖房 (設定値: 15°C)、日中は天窓および側窓の自動開閉 (設定値: 25°C) によって調節した。植物材料はトマト (*Lycopersicon esculentum* Mill., 品種: 桃太郎) とし、培地としてピートモスを主成分とする市販培土 (ピートポット V, 北海道ピートモス (株) 製) を用い、セルトレイ (セル: 25 mm 角, トレイ面積: 300×300 mm, 市販のセルトレイを半分に切断した) で 14 日育苗した。計測時の苗の草高は 90 mm, 葉面積指数は 2.0 であった。

温室床面に苗個体群を設置し、苗個体群の重量、苗個体群上 2 高度 (20 mm および 100 mm) における露点温度、CO₂ 濃度および気温を電子天秤 (EB-2800, (株) 島津製作所製)、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) を用いて連続計測した。周辺効果による計測誤差を防ぐため、重量計測用の苗個体群の周囲を苗個体群で囲んだ (Fig. 1)。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 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 へ流した。電磁弁を 1 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

Fig. 1 Schematic diagram of the measurement method.

Unit: mm.

Fig. 2 Schematic diagram of the measuring system.

測した。露点温度と気温から絶対湿度を求めた。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。また、苗個体群の純光合成速度、蒸発散速度、顕熱および潜熱輸送速度に影響する環境要素として、苗個体群上における短波放射束密度および風速をそれぞれ日射計(MS-100, 英弘精機産業(株)製)および熱式風速計(アネモマスター Model 6071, 日本カノマックス(株)製)を用いて連続計測した。

3. 算定方法

3.1 蒸発散速度

苗個体群の重量の減少速度が蒸発散速度とほぼ等しいと仮定すると、苗個体群の蒸発散速度(E)は式(1)のように表される。

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

E : 苗個体群の蒸発散速度 ($\text{gH}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

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 (m^2)

植物が 1 g の乾物生産を行うために使用する水の重量は約 200 g から 1 000 g である(Kramer, 1983)。従って、一定期間の苗の乾物重の増加量は、その期間の蒸発散量の 0.1~0.5% と無視し得るので、上記の仮定は妥当である。

3.2 拡散係数

拡散に関する Fick の法則によると、物質あるいは熱の輸送速度は、対象とする物質の濃度勾配あるいは熱エネルギー勾配と拡散係数との積で表される(Monteith and Unsworth, 1990)。苗個体群上の 2 高度 z_1, z_2 間において、苗個体群からの蒸発散にともなう水蒸気の輸送が乱流拡散によってみかけ上、鉛直方向に行われているとき、 E は苗個体群上における水蒸気の鉛直上向きの輸送速度として、式(2)のように表される。

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

K : 拡散係数 ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)

q_1, q_2 : 高さ z_1, z_2 ($z_1 < z_2$) における絶対湿度 ($\text{gH}_2\text{O m}^{-3}$)

拡散係数(K)は、式(1)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。Kim *et al.* (1996) が風洞実験によって求めた苗個体群上の風速分布から、本計測でのセルトレイ中央部における乱流境界層の厚さは約 100 mm と推測される。従って、計測時における z_2 は乱流境界層内であったと考えられ、 z_1, z_2 間では物質および熱の輸送はみかけ上、鉛直方向に行われていたと考えられる。 K は乱流拡散係数と分子拡散係数を含む。 K の値が分子拡散係数の値に対して十分に大きい場合、分子量の違いによる分子拡散係数の違いが K に及ぼす影響を無視することができ、 K を水蒸気以外の物質、さらには熱に対する拡散係数として用いることができる。

3.3 純光合成速度

苗個体群上の 2 高度 z_1, z_2 間において、苗個体群の CO_2 吸収または放出にともなう CO_2 の輸送がみかけ上、鉛直方向に行われているとき、苗個体群の純光合成速度(P)は苗個体群上における CO_2 の鉛直下向きの輸送速度として、式(3)のように表される。すなわち P は式(2)で求めた K と CO_2 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。 P は単位床面積あたりの値である。

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

P : 純光合成速度 ($\text{gCO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

C_1, C_2 : 高さ z_1, z_2 ($z_1 < z_2$) における CO_2 濃度 ($\text{gCO}_2 \text{m}^{-3}$)

3.4 顕熱および潜熱輸送速度

苗個体群上の 2 高度 z_1, z_2 間において、顕熱の輸送が乱流拡散によってみかけ上、鉛直方向に行われているとき、顕熱輸送速度(H_s)は苗個体群上の顕熱の鉛直上向きの輸送速度として、式(4)のように表される。すなわち H_s は式(2)で求めた K 、気温勾配 $(T_2 - T_1)/(z_2 - z_1)$ の実測値、空気の熱容量 ($\rho_a \cdot c_p$) から求めることができる。

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

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 ($\text{J g}^{-1} \text{°C}^{-1}$)

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

苗個体群上における潜熱輸送速度(H_l)は、式(1)で求めた 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))。

$$H_1 = \lambda \cdot E$$

(5)

H_1 : 潜熱輸送速度 (W m^{-2})

λ : 蒸発潜熱 (J g^{-1})

4. 結果および考察

4.1 計測時の環境要素

計測日の苗個体群直上における短波放射束密度、苗個体群上 100 mm における気温、相対湿度、 CO_2 濃度および風速の日変化を Fig. 3 に示す。

4.2 蒸発散速度

苗個体群の重量の日変化を Fig. 4 に示す。苗個体群の 20 分間の重量変化から求めた苗個体群の蒸発散速度の日変化を Fig. 5 に示す。時刻 9:00 に苗個体群の重量が増加しているのは、この時刻に灌水を行ったためである。灌水によるノイズのため、蒸発散速度は時

Fig. 3 Diurnal changes in shortwave radiation, air temperature, relative humidity, CO_2 concentration and wind speed in the greenhouse.

Data are shown as running average for 20 min. Measurements of air temperature, relative humidity and CO_2 concentration were made at z_2 .

刻 8:40 から 9:30 の間で欠測とした。

4.3 拡散係数

苗個体群上の 2 高度 z_1, z_2 間の絶対湿度差の日変化を Fig. 6 に示す。絶対湿度差と蒸発散速度 (Fig. 5) から式(2)を用いて求めた拡散係数の日変化を Fig. 7 に示す。拡散係数は夜間約 $2.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 、日中約 $1.0 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ であった。これは分子拡散係数 (オーダー: $10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) の $10^2 \sim 10^3$ 倍の大きさである。従って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の拡散係数として用いることが可能であることが確認できた。風洞内での苗個体群上における拡散係数

Fig. 4 Diurnal change in weight of the plug sheet.

Fig. 5 Diurnal change in evapotranspiration rate of the plug sheets.

Data are shown as running average for 20 min.

Fig. 6 Diurnal change in absolute humidity difference between the two heights, z_1 and z_2 .

Data are shown as running average for 20 min.

Fig. 7 Diurnal change in diffusion coefficient above the plug sheets.

Fig. 8 Diurnal change in CO₂ concentration difference between the two heights, z_1 and z_2 .

Data are shown as running average for 20 min.

は風速 0.9 m s^{-1} のとき約 $7.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (Kim *et al.*, 1996), 野外でのソルゴー畑個体群上における拡散係数は風速 0.9 m s^{-1} のとき約 $12.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (Uchijima and Inoue, 1970) であることが報告されている。本研究では風速 0.9 m s^{-1} のとき拡散係数は約 $11.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ であり、これまでに報告されている拡散係数の範囲内にあった。

4.4 純光合成速度

苗個体群上の2高度 z_1, z_2 間の CO_2 濃度差の日変化を Fig. 8 に示す。 CO_2 濃度差と拡散係数 (Fig. 7) から式 (3) を用いて求めた純光合成速度の日変化を Fig. 9 に示す。純光合成速度の最大値は床面積あたり約 $0.6 \text{ mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、葉面積あたり約 $0.3 \text{ mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であった。Tatsumi and Hori (1969) が同化箱法で求めたトマト苗の純光合成速度の値は葉面積あたり $0.8 \text{ mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であり、本研究によって得られた純光合成速度の値はこれに比べ小さかった。Tatsumi and Hori (1969) の研究では同化箱内における通気量が比較的大きく、また個体レベルでの計測であったため、純光合成速度の値が個体群レベルでの値よりも大きくなったものと考えられる。

Fig. 9 Diurnal change in net photosynthetic rate of the plug sheets.

Fig. 10 Diurnal change in air temperature difference between the two heights, z_1 and z_2 .

Data are shown as running average for 20 min.

Fig. 11 Diurnal changes in sensible and latent heat transfer rates above the plug sheets.

4.5 顕熱および潜熱輸送速度

苗個体群上の2高度 z_1, z_2 間の気温差の日変化を Fig. 10 に示す。気温差と拡散係数 (Fig. 7) から式 (4) を用いて求めた顕熱輸送速度および、蒸発散速度 (Fig. 5) から求めた潜熱輸送速度の日変化を Fig. 11 に示す。日中、苗個体群に入射した短波放射エネルギーのうち約 15% が顕熱として、約 50% が潜熱として苗個体群上の大気中に輸送された。これらは、水田 (Research group of evapotranspiration, 1967) および大麦畑 (Oke, 1987) における値と比較的近い値であった。夜間、顕熱輸送速度は負の値となった。これは、苗個体群の蒸発散による潜熱輸送および苗個体群からの長波放射によって苗個体群の温度が苗個体群上の気温より低下し

たためであると考えられる。

5. 結 論

微気象学的方法と秤量法を応用することによって苗個体群の環境を乱さずに苗個体群の純光合成速度、蒸発散速度、潜熱輸送速度および顕熱輸送速度の連続計測が可能となった。これらの値は短波放射束密度、気温、相対湿度、CO₂濃度、風速などの環境要素の変動にともない変動した。セル成型苗生産における環境調節技術を確立するためには、これらの環境要素が苗個体群の純光合成速度、蒸発散速度、潜熱輸送速度および顕熱輸送速度に及ぼす影響を動的に解析する必要がある。

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の浅野伸行室長、中原正一氏、鈴木雅人氏、宮城 慎氏に謹んで感謝の意を表す。また、本論文をまとめるにあたり、有益な示唆をいただいた千葉大学園芸学部久保田智恵利博士に感謝の意を表す。

文 献

- Ikeda, K. 1978. Effect of light intensity on the photosynthesis of vegetable crops at the seedling stage. 1. Measurement of photosynthesis and effect of leaf position and growth stage on photosynthetic rate. (Japanese text with English abstract) *J. Agric. Sci. Tokyo Nogyo Daigaku*. (東京農業大学農学集報) **23**: 118-128.
- Inoue, E., Uchijima, Z., Udagawa, T., Horie, T., Kobayashi, K. 1968. Studies of energy and gas exchange within crop canopies (2)—CO₂ flux within and above a corn plant canopy—. (Japanese text with English abstract) *J. Agric. Meteorol.* **23**: 165-176.
- Kim, Y. H., Kozai, K., Kubota, C., Kitaya, Y. 1996. Design of a wind tunnel for plug seedlings production under artificial lighting. *Acta Hort.* **440**: 153-158.
- Kramer, P. J. 1983. *Water Relation of Plants*. Academic Press, Orlando, pp 489.
- Monteith, J. L., Unsworth, M. H. 1990. *Principles of Environmental Physics*. Ed. 2. Edward Arnold, London, pp 291.
- Munakata, K. 1970. On the Chamber Method of measuring the photosynthetic rate in field population. (Japanese text) *J. Agric. Meteorol.* **26**: 112-114.
- Oke, T. R. 1987. *Boundary Layer Climates*. Ed. 2. Methuen, New York, pp 435.
- Research group of evapotranspiration 1967. *Evapotranspiration from paddy field*. (Japanese text with English abstract) *J. Agric. Meteorol.* **22**: 149-157.
- Salisbury, F. B., Ross, C. W. 1991. *Plant Physiology*. Ed. 4. Wadsworth, Belmont, pp 682.
- Tatsumi, M., Hori, Y. 1969. Studies on the photosynthesis of vegetable crops I Photosynthesis of young plant of vegetables in relation to light intensity. (Japanese text with English abstract) *Bull. Hortic. Res. Stn.* (園芸試験場報告) **A 8**: 127-140.
- Uchijima, Z., Inoue, K. 1970. Studies of energy and gas exchange within crop canopies (9)—Simulation of CO₂ environment within a canopy—. (Japanese text with English abstract) *J. Agric. Meteorol.* **26**: 5-18.
- 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.
- Yabuki, K., Tamura, J., Oda, Y., Imazu, T. 1967. The effect of carbon dioxide concentration of atmosphere on growth of leaf beet with various plant densities. (Japanese text with English abstract) *J. Agric. Meteorol.* **23**: 25-29.