

大気汚染環境下の植物の画像計測†

—熱赤外画像に含まれる生体情報の定量化について—

大政 謙次*・安保 文彰*・相賀 一郎*・橋本 康**

Image Instrumentation of Plants Exposed to Air Pollutants —Quantification of Physiological Information Included in Thermal Infrared Images—

Kenji OMASA*, Fumiaki ABO*, Ichiro AIGA* and Yasushi HASHIMOTO**

Heat and mass transfer on a leaf were examined from the standpoint of evaluating distributional patterns of physiological informations such as transpiration rate, stomatal resistance and air pollutant sorptions from leaf temperature distribution measured by an instrumentation system of thermal infrared images, and models for the evaluating were derived. Furthermore, parameters of the models, accuracies of environmental controls and measurements on the leaf and so on were examined by experiments. As a result, transpiration rate and stomatal resistance to water vapor diffusion on the leaf were evaluated within accuracies of $0.02 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ and $0.3 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-1}$, respectively. Accuracies of sorption rates of air pollutants such as SO_2 , NO_2 , O_3 and PAN will be applied correspondingly to that of transpiration rate from an analogy between the models for the evaluating transpiration rate and sorption rates of these air pollutants. Finally, changes in distributions of physiological informations mentioned above were evaluated from the changes in distribution of leaf temperature during SO_2 exposure.

1. はじめに

近年、植物の生産、大気汚染による植物影響、植物の大気汚染浄化機能などの植物と環境との関係を調べる研究分野において、生育している植物個体から、植

物の生育、生理反応、物質輸送などにかかわる生体情報を非破壊、非接触で計測する手法の開発の必要性が報告されている^{1)~3)}。特に、これらの生体情報を2次元あるいは3次元の画像情報として計測評価する手法の開発は、緒についたところといえる。

植物の葉温は、光合成や呼吸などの生理反応の重要な律速因子であるが、生体の水収支や物質輸送とも関連し、生体情報として重要である^{3)~7)}。物体の表面温度を計測する装置としては、サーモグラフィがあり、Cetas⁸⁾により、実際に表面温度を計測する際の問題点が検討されている。Schurer⁹⁾は、この装置を葉面の温度分布の観察に適用している。最近、橋本ら^{10), 11)}、大政ら³⁾は、膨大な画像情報を処理し、面領域における高精度の生体情報を得るために、走査型赤外線カメラと計算機を接続した熱赤外画像計測システムを導入し、葉温分布を計測した。そして、得られた葉温分布から気孔開閉運動、蒸散、汚染ガス吸収などの生体情報の葉面分布に関する定性的特性が得られると報告している。しかし、これらの生体情報を定量化するためには、推定モデルおよび実験装置全般の特性に関する十分な吟味が必要であり、この方向に沿って定量化の手法について検討した報告はみあたらなかった。本論文では、上記の点を考慮して、葉温分布から定量的に気孔開閉運動、蒸散速度、汚染ガス吸収速度などの生体情報の葉面分布を得る手法について検討した。

2. 植物生体情報の定量化のための原理

葉温分布から定量的に気孔開閉運動、蒸散速度、汚染ガス吸収速度などの生体情報の葉面分布を得るための推定モデルは、葉の局所部位における物質輸送や熱収支について十分検討され、モデルにおけるパラメータが実験的に求められるように配慮されている必要がある。しかし、このような観点から生体情報の葉面分

† 第19回計測自動制御学会学術講演会で発表(昭55・8)

* 国立公害研究所 茨城県筑波郡谷田部町小野川 16-2

** 愛媛大学農学部 松山市樽味 3-5-7

* The National Institute for Environmental Studies, Tsukuba-gun, Ibaraki

** Faculty of Agriculture, Ehime University, Matsuyama

(Received August 27, 1980)

(Revised February 26, 1981)

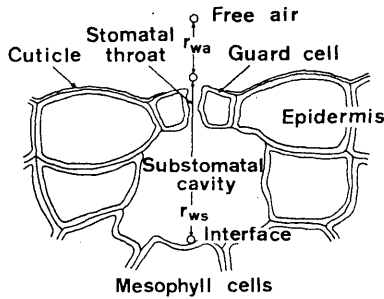


Fig. 1 Schematic cross-section of a stoma

布を推定するモデルについて総合的に検討した報告はみあたらない。そこで、これらの点を考慮した生体情報の葉面分布の推定モデルについて検討した。

2.1 植物葉の局所部位における物質輸送モデル

植物の葉が蒸散を行っているとき、水は気孔底の細胞壁で蒸発し、呼吸腔 (substomatal cavity)、気孔、葉面境界層を通して自由大気へと拡散する (Fig. 1)。蒸散のモデルについては、Bange¹²⁾ が Fick の法則に基づくモデルを提案して以来、数多くの報告がみられるが^{13), 14)}、葉の局所部位における蒸散モデルとして確立していない。しかし、基本的には、葉の局所部位においても蒸散のフラックスは、自由大気と気孔底界面との間の水蒸気密度差とその間の拡散抵抗により支配されるので、ここでは、推定モデルにおけるパラメータを実験的に求めることができるようにとの観点から、葉の表裏の温度、気孔および境界層の状態を同じと仮定し、葉の局所部位における蒸散速度 W_x ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) を次式で与えた。

$$W_x = \frac{2\{X_{sx}(T_{lx}) - \varphi X_s(T_a)\}}{r_{wax} + r_{wsx}} \quad (1)$$

ここで、 T_{lx} ($^{\circ}\text{C}$)、 $X_{sx}(T_{lx})$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)、 r_{wax} ($\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$)、 r_{wsx} ($\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$) は、それぞれ、葉の局所部位における葉温、飽和水蒸気密度、水蒸気拡散に対する境界層抵抗、気孔抵抗であり、 T_a ($^{\circ}\text{C}$)、 φ 、 $X_s(T_a)$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) は、環境制御装置内大気温度、相対湿度および T_a ($^{\circ}\text{C}$) の大気における飽和水蒸気密度である。

他方、大気汚染環境下の汚染ガスは、水蒸気とは逆の経路を経て植物組織に至る。汚染ガスの輸送モデルには、一般に植物組織における反応や移動などを考慮する必要がある^{15)~17)}。ここでは、蒸散モデルと対比させるために、自由大気から気孔底界面に至るまでの輸送モデルを考え、植物組織における反応や移動などの影響は、気孔底界面でのガス濃度で代表させた。そして、葉の局所部位における汚染ガスの吸収速度 Q_x ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) を次式で与えた。

$$Q_x = \frac{2(P_a - P_{lx})}{r_{gax} + r_{gsx}} \quad (2)$$

ただし、

$$\frac{r_{gax}}{r_{wax}} = \left(\frac{D_w}{D_g}\right)^{2/3} \quad (3)$$

$$\frac{r_{gsx}}{r_{wsx}} = \frac{D_w}{D_g} \quad (4)$$

ここで、 P_{lx} ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)、 r_{gax} ($\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$)、 r_{gsx} ($\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$) は、それぞれ、対象とする汚染ガスに関する葉の局所部位における気孔底界面でのガス濃度、境界層抵抗、気孔抵抗であり、 P_a ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) は、装置内大気中のガス濃度、 D_w ($\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$)、 D_g ($\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$) は、それぞれ、空気中での水蒸気および汚染ガスの分子拡散係数で、 D_w は $0.249 \text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ (25°C)、 D_g は SO_2 の場合 $0.129 \text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ (25°C) である。なお、気孔底界面でのガス濃度 P_{lx} は、主要な汚染ガスである SO_2 、 NO_2 、 O_3 、PAN などについては、植物体内での代謝、移動などの生理機能が十分大きく、 $P_{lx} \approx 0$ と仮定することができる^{18)~21)}。

2.2 植物葉の局所部位における熱収支

葉温から気孔開閉運動、蒸散速度、汚染ガス吸収速度などの情報を得るためには、葉の局所部位における熱収支について検討する必要がある。ここでは、葉の局所部位における熱収支を、先に述べた蒸散あるいは汚染ガス吸収モデルと対比して検討するために、表裏の温度が等しい薄く平らな葉を仮定し、次式で与えた。

$$c_l w_l \frac{dT_{lx}}{dt} = E_x + S_x - L W_x + M_x + G_x \quad (5)$$

ここで、 E_x ($\text{cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、 S_x ($\text{cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、 M_x ($\text{cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、 G_x ($\text{cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、 c_l ($\text{cal}\cdot\text{g}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)、 w_l ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$)、 t (s)、 L ($\text{cal}\cdot\text{g}^{-1}$) は、それぞれ、葉の局所部位における純放射、対流による顕熱伝達、反応熱、他の部位からの熱伝導、比熱、重量、時間、蒸発の潜熱である。なお、 L は $583.3 \text{ cal}\cdot\text{g}^{-1}$ (25°C) である。

(5)式において純放射 E_x は

$$E_x = \alpha_p E_{sx} + \varepsilon \{E_{wx} - 2\sigma(273.15 + T_{lx})^4\} \quad (6)$$

また、対流による顕熱伝達 S_x は

$$S_x = \frac{2\rho c_p (T_a - T_{lx})}{r_{kax}} \quad (7)$$

で与えた。ここで、 E_{sx} ($\text{cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、 E_{wx} ($\text{cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、 r_{kax} ($\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$)、 α_p 、 ε 、 σ ($\text{cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-4}$)、 ρ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)、 c_p ($\text{cal}\cdot\text{g}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$) は、それぞれ、葉の局所部位における環境からの短波放射 (波長 $\leq 3 \mu\text{m}$)、環境からの長波放射 (波長 $> 3 \mu\text{m}$)、熱伝達に対する境界層抵抗、短波放射の吸収係数、長波の放射率、ス

テファン・ボルツマンの常数, 空気の比重量, 空気の定圧比熱である。なお, σ は $1.354 \times 10^{-12} \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-4}$, ρc_p は $0.285 \times 10^{-3} \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{C}^{-1}$ (25°C) である。

水蒸気の拡散と熱伝達に対する境界層抵抗の比 r_{wax}/r_{kax} は, 境界層における熱輸送と物質輸送の相似性から, (3)式に対応して次式で与えた。

$$\frac{r_{wax}}{r_{kax}} = \left(\frac{\kappa}{D_w} \right)^{2/3} \quad (8)$$

ここで, κ ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) は空気の温度伝導率で, $0.222 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (25°C) である。

光合成や呼吸などの生理作用による反応熱 M_x は, 通常, 短波放射の 2~3% 以下である^{4,14)}。蓄熱 $c_l w_l dT_{lx}/dt$ はロシアヒマワリのような薄い葉の植物において, たとえば, $0.2^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ の葉温変化の場合, 蒸散の潜熱や純放射の 2~3% 程度である。また, 他の部位からの熱伝導 G_x は, $0.5 \text{ cm}\phi$ の部位に周辺から $1^\circ\text{C} \cdot \text{cm}^{-1}$ の温度勾配で熱伝導が生じてい

$$W_x = \frac{\alpha_p E_{sx} + \varepsilon \{ E_{wx} - 2\sigma(273.15 + T_{lx})^4 \} + 2\rho c_p (T_a - T_{lx})/r_{kax}}{L} \quad (10)$$

大気の温湿度, 放射, 気流などの環境条件を一定に保つとすれば, (10)式の右辺の変数は葉温 T_{lx} のみとなる。それゆえ, 葉温以外のパラメータを前もって求めておけば, 葉温を計測することにより蒸散速度を推定することができる。さらに, (1)式および(8)式より, 気孔開度の指標である水蒸気拡散に対する気孔抵抗 r_{wsx} を推定することができる。

$$r_{wsx} = \frac{2\{X_{sx}(T_{lx}) - \varphi X_s(T_a)\}}{W_x} - \left(\frac{\kappa}{D_w} \right)^{2/3} r_{kax} \quad (11)$$

また, 汚染ガスの拡散に対する気孔抵抗 r_{gsx} および境界層抵抗 r_{gax} は, (3), (4)式および(8)式の関係より求めることができる。そして, 気孔底界面でのガス濃度の取扱いが簡単な SO_2 , NO_2 , O_3 , PAN などの汚染ガスの吸収速度 Q_x は, ここで得られた値を(2)式に代入することにより推定することができる。

3. 計測装置の概要と特性

3.1 熱赤外面像計測システム

熱赤外面像計測システムのブロック線図を Fig. 2 に示す。ここで用いた赤外線カメラは, 対物面走査方式で, 検出素子は, HgCdTe (8~13 μm , 液体窒素冷却) である。赤外線カメラからの検出信号は, ビデオプロセッサの入力ユニットで 12 ビット ($256^H \times 240^V$,

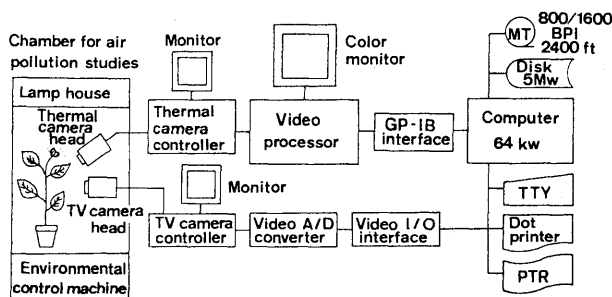


Fig. 2 Block diagram of a system for image instrumentation of plants

る場合を仮定すると 5% 程度である。通常, 汚染環境下の植物葉において, $c_l w_l dT_{lx}/dt$ および G_x の値は, 上記の場合に比べて同程度かそれ以下である。それゆえ, $M_x, G_x, c_l w_l dT_{lx}/dt$ の項は無視することができ, (5)式は次式のように簡略化される。

$$E_x + S_x - LW_x = 0 \quad (9)$$

(9)式に, (6), (7)式を代入し, 葉の局所部位における蒸散速度を求めると次式を得る。

量子化誤差 0.0125°C) のデジタル信号に変換された後, 画像処理部で解析される。なお, この装置には, 葉面に発現する可視害の評価のための計測用ビコンカメラが接続されている。

赤外線カメラの検出信号のノイズ処理は, 積算平均化処理により行った。たとえば, 16 回積算平均化処理の場合, 常温の黒体の計測において, 温度分解能, 画像の均一性, ドリフトは, それぞれ, 0.05°C , $\pm 0.1^\circ\text{C}$, $\pm 0.05^\circ\text{C}/4 \text{ hr}$ であった。また, 画像分解能は, 黒体炉の表面を約 5°C 温度の異なる種々のスリットで覆って黒体炉とスリットの温度差を計測した結果, 最も分解能が悪い格子状の温度分布の場合, 計測誤差を 4%

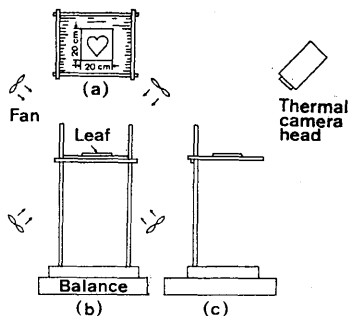


Fig. 3 Schematic diagram of an apparatus for fixing a leaf. Environmental conditions on the leaf were maintained constant

(0.2°C)以内に納めようとすると、1画面の画像の有効な画素数は $50^H \times 40^V$ 程度であった。

3.2 環境要因の制御装置

実験には、当研究所に設置されている汚染ガス暴露実験用の環境制御装置²²⁾を用いた。装置内大気の大気温度および汚染ガス濃度の制御精度は、それぞれ、 $\pm 0.15^\circ\text{C}$ 、 $\pm 1\% \text{RH}$ 、 $\pm 0.04 \text{ volppm}$ 以内であった。装置内には、植物葉あるいは黒体モデル葉を水平に固定するための固定装置と葉面において均一な気流を得るため攪拌ファンを設置した (Fig. 3)。植物葉あるいは黒体モデル葉は、葉形に切り抜かれた $20 \times 20 \text{ cm}^2$ の合成樹脂の薄い板に接着され、Fig. 3 (a)のようにてぐす (釣糸)を張った固定面に置かれた。光源としては、約 800 nm 以上の熱線を除去する熱線カットフィルタを付けた陽光ランプを用いたが、葉面への短波放射の直達を防ぐために、光源と固定装置との間の空気層に散乱膜を入れた。また、装置内の壁面は、黒色のウールペーパーおよび寒冷紗で覆った。以上の処置により、固定装置にセットされた葉面での短波放射の分布は、平均値の $\pm 2\%$ 以内であった。また、乾面あるいは湿面状態の黒体モデル葉(黒色のウールペーパー)の温度分布を、気流の状態を調節することにより、葉のごく周辺部を除いて $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 以内に保つことができた。このことは、局所境界層抵抗が葉面の部位の違いに関係なく、一定として取扱いうることを示している。なお、葉面の気流状態は、片側湿面のモデル葉の蒸散速度を重量法で測定し、両面が同じ値を示すように調節した。

3.3 その他の計測機器

本実験において使用した計測機器は、温度；基準ガラス製温度計(精度 $\pm 0.03^\circ\text{C}$)、 $0.1 \text{ mm } \phi_{cc}$ 熱電対、湿度；露点湿度計(EG & G社製660型、露点精度 $\pm 0.2^\circ\text{C}$)、短波放射；日射計(英弘精機社製MS-42型、ライカー社製LI-185)、 SO_2 濃度；パルス螢光式 SO_2 分析計(サーモエレクトロン社製43改良型)、重量；電子天秤(メトラー社製PK 16, PL 3000, 秤量限界 0.1 g)である。

4. 定量化の際の問題点および精度の実験的検討

4.1 植物葉および黒体モデル葉の短波放射の吸収率と長波の放射率

播種後3~6週間のロシアヒマワリの葉と黒体モデル葉の短波放射の平均吸収率 α_p は、日射計MS-42型(有効波長域；ca. $0.4 \sim 3 \mu\text{m}$)を用いて計測した結果、ヒマワリ葉で 0.68 ± 0.03 、黒体モデル葉で 0.98

± 0.02 であった。長波の平均放射率 ε は、赤外線カメラを用いて計測した結果³⁾、ヒマワリ葉、黒体モデル葉共に 0.98 ± 0.02 であった。なお、赤外線カメラの有効波長域は $8 \sim 13 \mu\text{m}$ であるが、植物葉の分光反射特性が、 $3 \mu\text{m}$ 以上においてはほぼ一定であることから^{6), 23)}、赤外線カメラでの計測により得られた値は、長波の平均放射率とみなせる。また、正常な葉と2時間程度 SO_2 に被曝した葉の放射率を比較したが差異は認められなかった。

4.2 葉温計測における周囲環境の影響

赤外線カメラは、葉温計測において周囲環境からの放射の影響を補正する機能を有しているが³⁾、環境からの放射が不均一な場合には誤差を生じる。そこで、装置内での葉温計測における周囲環境の影響について検討した。実験は、赤外線カメラを水平に固定し、葉面をカメラ面に対して、 $60^\circ \sim 60^\circ$ まで変化させ、熱電対と赤外線カメラにより得られる温度の比較を行った。葉面とカメラ面の角度を変えることにより、葉面は異なった装置内表面からの放射を受ける。この実験の結果、赤外線カメラと熱電対の温度指示値の差は葉面とカメラ面の角度の違いにかかわらず $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 以内であった。

4.3 環境からの長波放射と境界層抵抗の推定

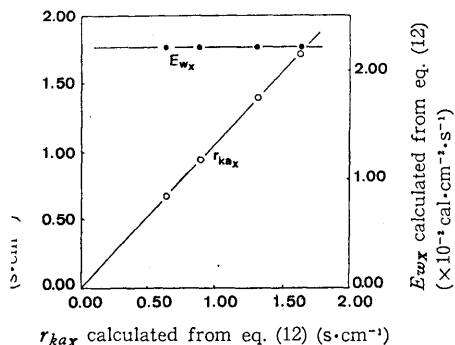
(9)式に(6)、(7)式を代入すると次式の熱収支式を得る。

$$\alpha_p E_{sx} + \varepsilon E_{wx} - 2\varepsilon\sigma(273.15 + T_{lx})^4 + \frac{2\rho c_p(T_a - T_{lx})}{r_{kax}} - LW_x = 0 \quad (12)$$

先に述べた環境要因の制御装置の特性から、固定装置にセットされた黒体モデル葉の葉温、蒸散速度、境界層抵抗、環境からの放射などは、葉面全域にわたって一定である。それゆえ、(12)式を1枚の葉の熱収支式と考えれば、葉温、蒸散速度および環境からの短波放射は直接計測できるので、乾面あるいは一様に湿らせた湿面状態の黒体モデル葉について計測されたこれらの値を(12)式に代入し、連立させて解くことにより環境からの長波放射 E_{wx} と熱伝達に対する境界層抵抗 r_{kax} を推定できる。この方法による推定精度を検討するために、 r_{kax} については、十分水を含ませた湿面状態の黒体モデル葉の葉温、蒸散速度等を計測し、(8)式を $r_{wsx} = 0 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-1}$ と仮定した(1)式に代入して得られる次式により推定した値と比較した。

$$r_{kax} = \frac{2\{X_{sx}(T_{lx}) - \phi X_s(T_a)\}}{W_x(\kappa/D_w)^{2/3}} \quad (13)$$

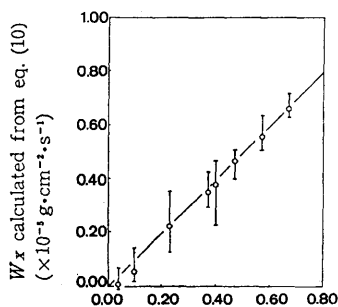
Fig. 4にその結果を示す。(12)式により得られた値のほうが(13)式により得られた値に比べて小さい傾向



4.4 Accuracies in evaluating boundary layer resistance on the leaf to heat transfer (r_{kaX}) and longwave radiation from environment (E_{wX})

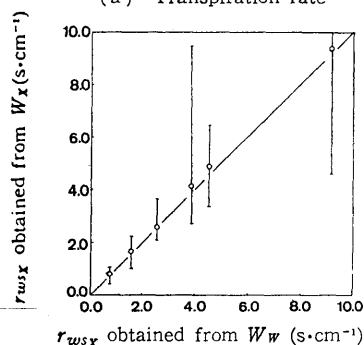
Conditions: $T_a=25.0^\circ\text{C}$, $\phi=59-62\%$ RH, $E_{sX}=2.91-3.01\times 10^{-3}\text{ cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$

ったが、その差は $0.1\text{ s}\cdot\text{cm}^{-1}$ 以内であった。他種々の r_{kaX} の状態において、(12)式により推定する E_{wX} を比較したが、その差は、 $1\times 10^{-4}\text{ cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以内であった。



W_w obtained by the weighing method ($\times 10^{-3}\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)

(a) Transpiration rate



)) Stomatal resistance to water vapor diffusion

Fig. 5 Accuracies in evaluating transpiration rate (W_x) and stomatal resistance to water vapor diffusion (r_{wsX})

Conditions and parameters: $T_a=24.9-25.4^\circ\text{C}$, $\phi=58-60\%$ RH, $r_{kaX}=1.64\text{ s}\cdot\text{cm}^{-1}$, $E_{sX}=3.01\times 10^{-3}\text{ cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (ca. 30 klx), $E_{wX}=22.21\times 10^{-3}\text{ cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$

$\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以内であった。

4.4 植物生体情報の定量化の精度

先に述べた定量化の原理に基づく推定の精度を検討するために、ロシアヒマワリの1枚の葉の蒸散速度と水蒸気拡散に対する気孔抵抗について、重量法により求めた値と比較した。その結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5 (a) は、重量法により得られた蒸散速度 W_w と (10)式により推定された蒸散速度 W_x の比較である。 W_x は、葉温が葉の部位により異なるのである幅をもっており、図中ではその幅を記号 I で、葉面全体の平均値を \circ で表わした。 W_w は、葉1枚の平均値であるので、 W_x との比較は平均値で行った。蒸散速度が、 $0.1\times 10^{-5}\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下の場合には葉に萎れが生じ、若干変色していた。このような場合を除けば、 W_w と W_x の平均値との差は、 $0.02\times 10^{-5}\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以内であった。Fig. 5 (b) は、ここで得られた W_w と W_x を (11)式に代入し計算した水蒸気拡散に対する気孔抵抗 r_{wsX} の比較である。 r_{wsX} が $10\text{ s}\cdot\text{cm}^{-1}$ 以下の場合には、 W_w と W_x の平均値から得られた r_{wsX} の差は $0.3\text{ s}\cdot\text{cm}^{-1}$ 以内であった。葉散速度や気孔抵抗の推定精度は、設定される環境条件により変わると予想されるが、ここで得られた結果から、通常の設定条件では十分な精度が期待できる。また、 SO_2 , NO_2 , O_3 , PAN などの汚染ガスの吸収についても、蒸散速度の推定モデルとの相似性から、蒸散速度の精度に準じた精度での定量化が期待できる。

5. 汚染環境下の植物の葉温計測と生体情報の定量化

熱赤外画像計測システムによる葉の温度分布の計測と植物生体情報の定量化の具体的な適用例として、 SO_2 に被曝した植物葉の反応について述べる。固定装

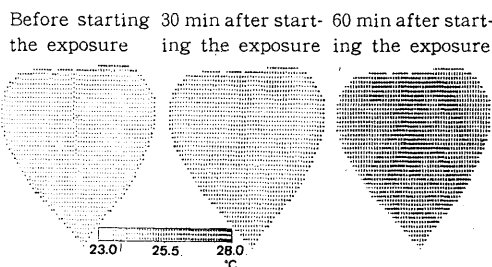
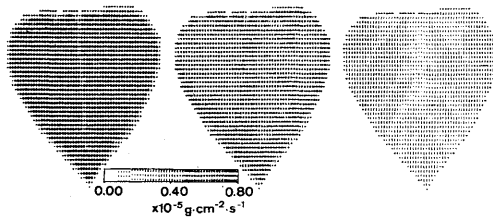
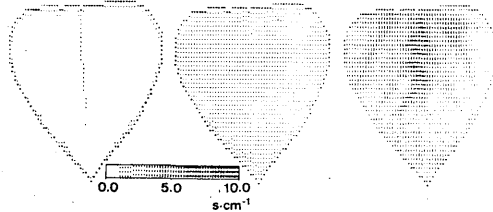
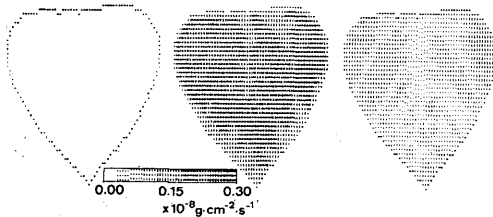


Fig. 6 An example of changes in temperature distribution of a sunflower leaf during SO_2 exposure
Conditions: $T_a=25.1^\circ\text{C}$, $\phi=69\%$ RH, $r_{kaX}=0.875\text{ s}\cdot\text{cm}^{-1}$, $E_{sX}=2.91\times 10^{-3}\text{ cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, $E_{wX}=22.13\times 10^{-3}\text{ cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. $P_a=1.5\text{ vol-ppm}$

Transpiration rate



Stomatal resistance to water vapor diffusion

SO₂ sorption rate

Before starting the exposure 30 min after starting the exposure 60 min after starting the exposure

Fig. 7 Changes in distributions of transpiration rate, stomatal resistance to water vapor diffusion and SO₂ sorption rate obtained from the leaf temperature distributions in Fig. 6

置にロシアヒマワリの葉をセットし、大気の時湿度、環境からの放射、境界層抵抗などの環境要因を一定の条件に調節し、葉温が十分安定した後、1.5 volppmのSO₂を暴露し、その後の葉温分布の変化を計測した。

Fig. 6 に結果の一例を示す。SO₂の暴露開始前に23.4~24.5°Cであった葉温が、時間の経過に伴って上昇し、暴露開始後60min経過した時点で、24.7~26.8°Cになった。暴露開始後60minの時点での葉温上昇は、最も変化が大きい部位で3.1°C、最も小さい部位で1.1°Cであった。これらの葉温分布から推定した蒸散速度、水蒸気拡散に対する気孔抵抗およびSO₂吸収速度の葉面分布を**Fig. 7**に示す。暴露開始前の蒸散速度、気孔抵抗、SO₂吸収速度は、それぞれ、 $0.56\sim 0.72 \times 10^{-5} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $0.6\sim 1.5 \text{ s}\cdot\text{cm}^{-1}$ 、 $0.0\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ であったが、暴露開始後60minの時点では $0.19\sim 0.52 \times 10^{-5} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $1.8\sim 9.1 \text{ s}\cdot\text{cm}^{-1}$ 、 $0.04\sim 0.17 \times 10^{-8} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ になった。SO₂の暴露

時間の経過に伴って気孔開度の指標である気孔抵抗が大きくなり、蒸散速度、SO₂吸収速度が共に減少した。しかし、その程度は、葉の部位により異なり不均一であった。このことは、SO₂に対する気孔の感受性が葉の部位により異なることを示しており、気孔開閉のメカニズムの解明に新たな知見を与える。また、SO₂は、植物体内に吸収された後、光合成等の生理機能を低下させ、植物色素のブリーチや細胞破壊をもたらす。これらの現象の発生の程度は、葉の局所部位により異なるが、ここで述べた方法の導入により、局所吸収量との関係からこれらの現象を解析することが可能になった。

6. おわりに

本論文では、葉の局所部位における熱および物質の輸送について検討し、葉温分布から蒸散速度、気孔抵抗、汚染ガス吸収速度などの生体情報の葉面分布を推定するモデルを導いた。そして、実際に、これらの生体情報を定量化する際の諸問題について実験的検討を行い、蒸散速度および水蒸気拡散に対する気孔抵抗を $0.02 \times 10^{-5} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $0.3 \text{ s}\cdot\text{cm}^{-1}$ の精度で推定することができた。また、主要な汚染ガスであるSO₂、NO₂、O₃、PANなどの吸収速度の推定精度は、蒸散速度と汚染ガス吸収速度の推定モデルの相似性から、蒸散速度のそれに準ずるものと考えられた。最後に、SO₂に被曝した植物葉の反応について検討したが、ここで述べた面積域での生体情報の定量化の手法が、気孔開閉のメカニズムや植物葉の被害と汚染ガス吸収との関係、さらには、汚染ガスに対する生理的な抵抗性の解明に有効であることが示唆された。今後、この手法は、汚染環境下の植物反応の解析だけでなく、植物の生産、その他、植物における物質輸送にかかわる現象の解析に利用できるものと考えられる。

最後に、本研究のための熱赤外面像計測システムの製作にあたり協力を受けた日本電子(株)サーモビューグループ、三菱電機(株)・協栄産業(株)電子計算機グループに心からの謝意を表す。

参考文献

- 1) 橋本: 作物生体情報の電子的計測とは[1]~[3], 農業および園芸, 53, 483/488, 627/630, 739/744 (1978)
- 2) 高辻, 金子, 鶴岡: 植物計測と工場栽培, 計測と制御, 18-4, 336/344 (1979)
- 3) K. Omasa, F. Abo, Y. Hashimoto and I. Aiga: Measurement of the Thermal Pattern of Plant Leaves under Fumigation with Air Pollutant. Res. Rep. Natl. Inst. Environ. Stud., 11, 239/247 (1980)
- 4) K. Raschke: Heat Transfer between the Plant and the Environment, Ann. Rev. Plant Physiol., 11,

- 111/126 (1960)
- 5) 古谷, 宮地, 玖村編: 物質の交換と輸送, 195/253 朝倉書店 (1972)
 - 6) 堀内, 橋本: 放射温度計による葉温測定と植物生体情報との関連, 計測自動制御学会論文集, 13-5, 482/488 (1977)
 - 7) M. Shiraishi, Y. Hashimoto and S. Kuraishi: Cyclic Variations of Stomatal Aperture Observed under the Scanning Electron Microscope, *Plant and Cell Physiol.*, **19**, 637/645 (1978)
 - 8) T. C. Cetas: Practical Thermometry with a Thermographic Camera Calibration, Transmittance, and Emittance Measurements, *Rev. Sci. Instrum.*, **49**, 245/254 (1978)
 - 9) K. Schurer: Thermography in Agricultural Engineering, *Bibl. Radiol.*, **6**, 249/254 (1975)
 - 10) 橋本, 五百木, 船田, 丹羽, 杉: 植物生育のプロセス同定とその最適制御 (VI) 葉温の画像処理, *生物環境調節*, **17**, 27/33 (1979)
 - 11) 橋本, 五百木, 金子, 船田, 杉: 植物生育のプロセス同定とその最適制御 (VII) 葉温分布と気孔開度との関係, *生物環境調節*, **18**, 57/65 (1980)
 - 12) C. G. J. Bange: On the Quantitative Explanation of Stomatal Transpiration, *Acta. Bot. Neerl.*, **2**, 255/297 (1953)
 - 13) D. M. Gates: Transpiration and Leaf Temperature, *Ann. Rev. Plant Physiol.*, **19**, 211/238 (1968)
 - 14) J. L. Monteith: Principles of Environmental Physics, Edward Arnold (1973)
 - 15) J. H. Bennet, A. C. Hill and D. M. Gates: A Model for Gaseous Pollutant Sorption by Leaves, *J. Air Pollut. Control Assoc.*, **23**, 957/962 (1973)
 - 16) M. H. Unsworth, P. V. Biscoe and V. Black: Analysis of Gas Exchange between Plants and Polluted Atmospheres, Effects of Air Pollutants on Plants (T. A. Mansfield), 5/16, Cambridge University Press (1976)
 - 17) R. A. O'Dell, M. Taheri and R. L. Kabel: A Model for Uptake of Pollutants by Vegetation, *J. Air Pollut. Control Assoc.*, **27**, 1104/1109 (1977)
 - 18) 大政, 安保: 植物による大気汚染物質の収着に関する研究 (I) SO_2 の局所収着と可視障害発現との関係, *農業気象*, **34**, 51/58 (1978)
 - 19) 大政, 安保, 名取, 戸塚: 植物による大気汚染物質の収着に関する研究 (II) NO_2 , O_3 あるいは $\text{NO}_2 + \text{O}_3$ 暴露下における収着について, *農業気象*, **35**, 77/83 (1979)
 - 20) 大政: 汚染された大気と植物とのあいだのガス交換, *環境情報科学*, **9-2**, 77/80 (1980)
 - 21) 野内: 植物葉によるオゾン・PAN の収着(吸収)速度に関する研究, *東京都公害研究所年報*, 77/83 (1980)
 - 22) 相賀, 大政, 小林: 国立公害研究所植物実験用環境調節施設, 最新空調設備・空調方式実例集, 315/363, 経営開発センタ (1980)
 - 23) D. M. Gates, H. J. Keegan, J. C. Schleiter and V. R. Weidner: Spectral Properties of Plants, *Appl. Optics*, **4**, 11/20 (1965)