

画像処理による植物の生育・生理反応の評価

大政 謙次・相賀 一郎

まえがき

農業において、栽培者は、植物の各生育段階における形状、色つや、繁茂状態、病虫害徴などの生育の特徴量を観察し、長年の経験と勘に基づいて栽培管理を行なっている。植物生育の計算機制御、すなわち植物の工場栽培とでもいべき発想は、栽培者の目を計測機器に置き換え、作業を自動化するとともに、栽培者の目では得ることのできない有効な生理情報に基づく植物生育の最適制御により生産性の向上とエネルギーの効率的利用を図ろうとするものである。栽培者の代わりに生育の特徴量を計測・評価すること、さらに有効な生理情報を得ることなどは、計測対象である植物が空間的広がりを持つことから、画像として取り扱うことが必要である。

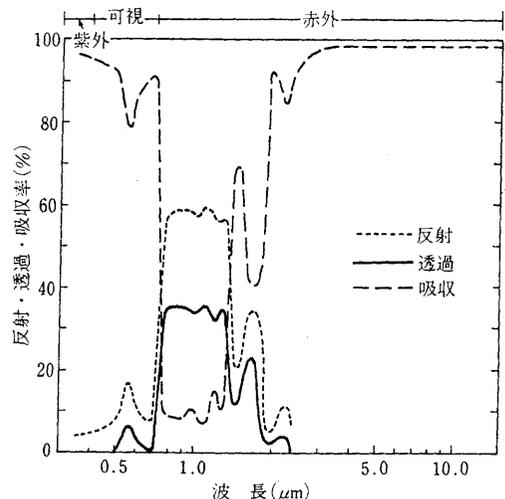
他方、環境保全あるいは環境計画といった分野においても、乱開発や大気汚染などの環境変化による植物への影響の評価は、専門家の経験と知識に基づいた観察によるのが一般的である。しかし、将来における環境アセスメントの必要性にかんがみ、影響評価の手法として、客観的で保存のきく、また大量のサンプル処理が可能な手法の開発が必要である。この意味で、農業分野におけると同様、植物の生育・生理反応の評価を対象とした画像の計測処理手法の開発が望まれる。

植物の生育・生理反応の画像計測およびその処理手法の開発は、現在、その緒についたところといえる。現状では、植物生体から非破壊、非接触でいかに多くの生理情報を得るか、また、形状、色つや、繁茂状態、その他の生育の特徴量の計測・評価手法の開発研究の段階であるが、ここでは、筆者らの研究を中心として、植物生育・生理反応の評価のための画像の計測処理の問題について述べる。

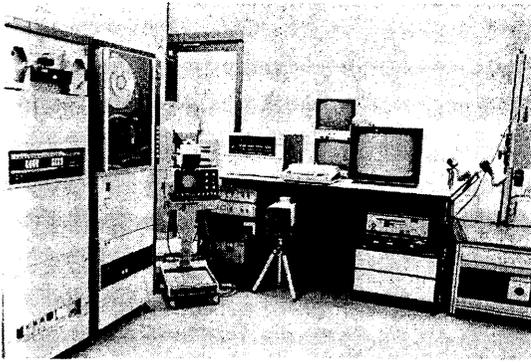
1. 画像センサーと処理システム

1) 画像センサーの選択

植物葉の近紫外から熱赤外領域における分光反射、透過および吸収特性の一例を第1図に示す¹⁾。近紫外から近赤外領域(2 μm 以下)の特性は、植物の表面あるいは内部の構造、含有色素の種類および量、水分状態などに影響される。とくに、0.75 μm 以下の領域は、植物の生理反応にとって重要であり、光合成反応や光形態形成反応のような生理反応に関係しての光の吸収やケイ光を発することが知られている^{2,3)}。また、人間の目が感じる波長もこの領域であり、植物生育の特徴量や生理反応に関する情報を得るのに重要である。熱赤外領域(10 μm 付近)では、環境からの電磁波は、植物にほぼ吸収されるが、ステファン・ボルツマンの法則によれば、植物の絶対温度の4乗に比例した電磁波が放射され



第1図 植物葉の分光反射、透過および吸収特性の例(植物:セイヨウキョウチクトウ)¹⁾。



第3図 画像計測処理システムの概観.

は、計算機からの信号により制御される。信号の流れについてみると、赤外線カメラからの検出信号は、ビデオプロセッサでデジタル信号 ($256^H \times 230^V$, 量子化誤差 0.0125°C) に変換され、温度パターンとしてカラーモニタ (16色) に表示されると共にホストの計算機に伝送される。計算機とビデオプロセッサは、GP-IBバスで接続されており、ビデオプロセッサからのデータを計算機に伝送するだけでなく、計算機で処理された結果をビデオプロセッサに伝送し、カラーモニターに表示することができる。

他方、ビジコンカメラからの信号は、ビデオ A/D 変換器や GP-IB, あるいはビデオ I/O インターフェイスを介して、8ビット (標準 $256^H \times 256^V$) のデジタル画像として計算機に伝送される。光ファイバケーブルを用いた GP-IB バス方式の採用により、ほ場など数百mを越える場所からの画像データを伝送することができる。ビジコンカメラは、複数台の接続が可能であり、植物群落の立体画像やマルチスペクトル画像を得ることができる。計算機は、磁気テープやカートリッジ磁気ディスクなどの記憶装置を持っており、実験目的に応じて、リアルタイムあるいはバッチでの処理が可能である。また、磁気テープにより、当研究所の大型計算機での処理も可能である。この処理システムは、VTR や写真などの記憶装置を用いることにより、フィールドでの観測データの解析にも利用できる。

植物の生育・生理反応の評価のための画像計測処理システムの例として当研究所のシステムについて述べた。収集される画像データが膨大な量であるため、今後、現場での実用システムの開発にあたっては、上記のような研究を目的としたシステムにより

得られた成果をもとに、必要基本処理のハードウェア化、並列画像演算装置化、アナログ処理の導入などにより、演算処理の高速化と価格の低廉化を図る必要があろう。また、安価な画像センサーである写真や点計測装置の活用が必要であらう。

2. 植物温度の画像計測

1) 植物温度の計測の必要性

植物の各生育段階における生理反応において、植物温度は、反応を支配する主要な要因の一つである^{9,10}。植物温度は、気温、湿度、放射、気流などの熱環境要因や気孔の状態、その他の水蒸気の潜熱輸送にかかわる生理的要因にも影響されるので^{11,12}、植物の生育と温度との関係を正しく評価するためには、植物温度の画像計測が必要不可欠である。また、植物温度と熱環境との関係を植物-熱環境系として体系的に取扱うことにより、気孔開閉運動や蒸散などの植物の生理反応にかかわる情報を面領域で定量的に得ることができる¹³。また、物質拡散の相似性を利用して、植物の光合成や汚染ガス吸収量を知ることができる^{13,14}。ここでは、これらの基礎となる赤外線カメラによる植物温度の計測法と若干の計測例について述べる。

2) 赤外線カメラによる植物温度の計測の原理と精度⁷⁾

植物表面の赤外線の分光放射強度 $R(\lambda, T)$ は、表面の熱放射と周囲環境からの放射の表面反射との和で与えられる。

$$R(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \cdot W(\lambda, T) + [1 - \varepsilon(\lambda, T)] \cdot E(\lambda, T_s) \quad (1)$$

ここで、 λ , $\varepsilon(\lambda, T)$, $W(\lambda, T)$, $E(\lambda, T_s)$ は、それぞれ、波長、温度 T の植物表面の分光放射率、温度 T なる黒体の分光放射強度、温度 T_s なる周囲環境から植物表面への分光放射強度である。

有効波長域 $\lambda_1 \leq \lambda \leq \lambda_2$ なる赤外線検出器において、植物表面からの放射強度 $R(\lambda, T)$ を計測すると、検出器の出力電圧 $V_T(T, T_s)$ は次式で与えられる。

$$V_T(T, T_s) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) \cdot R(\lambda, T) d\lambda \simeq \bar{\varepsilon}(T) \cdot V_W(T) + [1 - \bar{\varepsilon}(T)] \cdot V_E(T_s) \quad (2)$$

ここで、 $f(\lambda)$ は、赤外線カメラの検出器の放射-

電気変換率, 内部増幅器の増幅率, 気体, レンズ, フィルターなどの透過および反射率などを考慮した係数であり, また, 平均放射率 $\bar{\epsilon}(T)$ および $V_W(T)$, $V_E(T)$ は, 次式で定義される.

$$\bar{\epsilon}(T) = \frac{\left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon(\lambda, T) \cdot f(\lambda) \cdot W(\lambda, T) d\lambda \right]}{\left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) \cdot W(\lambda, T) d\lambda \right]} \quad (3)$$

$$V_W(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) \cdot W(\lambda, T) d\lambda \quad (4)$$

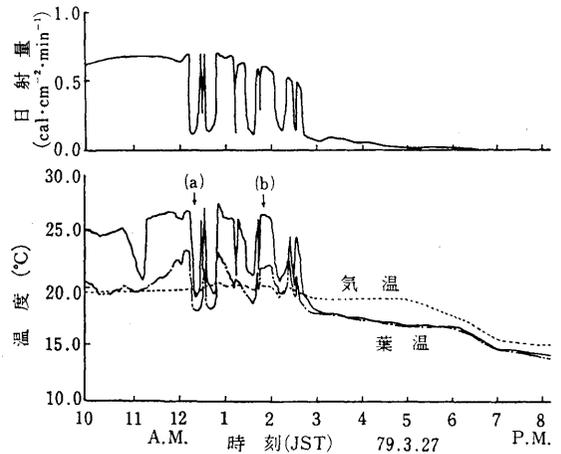
$$V_E(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) \cdot E(\lambda, T_s) d\lambda \quad (5)$$

検出器の出力電圧 $V_T(T, T_s)$ は, 装置で得られるので, 平均放射率 $\bar{\epsilon}(T)$ および周囲環境からの放射強度に相当する電圧 $V_E(T)$ を前もって計測しておき, 設定してやれば, $V_W(T)$ を得ることができる.

$$V_W(T) = [V_T(T, T_s) - V_E(T_s)] / [\bar{\epsilon}(T) + V_E(T_s)] \quad (6)$$

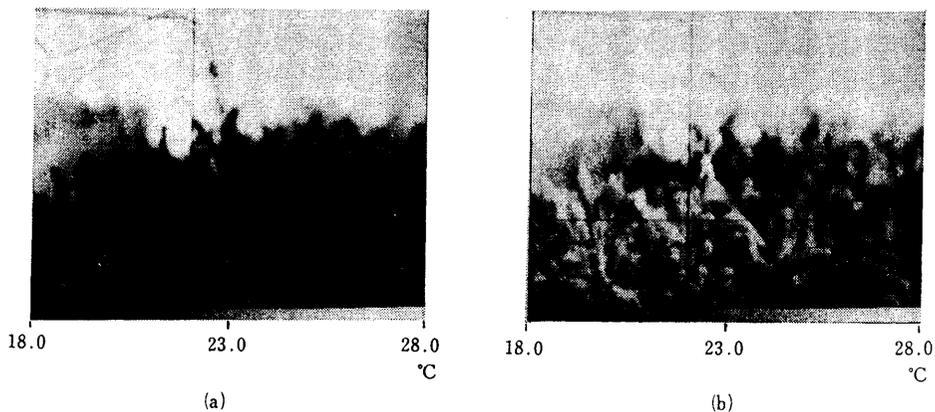
$V_W(T)$ は, 温度 T なる黒体の放射を計測したときの検出器の出力電圧で定義されるので, 黒体に対する校正曲線を求めておけば, $V_W(T)$ から植物温度 T を得ることができる. なお, $f(\lambda)$ の特性の変化に対しては, 基準黒体温度を常時モニターすることにより校正することができる.

実際に赤外線カメラにより植物温度を計測する場合, 式(6)における平均放射率 $\bar{\epsilon}(T)$ および周囲環境からの放射強度に相当する電圧 $V_E(T)$ を知る必要がある. 植物葉の平均放射率は, 植物の種類や生育状態などにより若干異なるが, 0.95~0.99 の値



第4図 自然光型ファイトトロン温室内におけるハウレンソウ葉温(—); 日当たり部位, - - -; 日陰部位), 気温および日射量の日変化. 温度, 風速は, それぞれ, 70%RH, $0.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ である.

が得られており, ほぼ1に近い^{1,4,5)}. 植物が群落をなしているような場合には, 放射率の指向特性や多重反射の効果を考慮する必要があるが, 上記の値と同程度と考えてよい. 周囲環境からの放射の影響の程度は, 式(1)によれば放射率により変わるが, 式(6)における電圧 $V_E(T)$ を環境からの放射強度に合わせて適切に調節することにより補正される. この操作により, 植物温度を 0.1°C の精度で計測することが可能である. しかし, $\bar{\epsilon}(T)$ と $V_E(T)$ の調節機能がない装置で, $\bar{\epsilon}(T)=1.0$, $V_E(T)=0$ とし, 晴れた空や人工環境室の放射環境を仮定して, 植物と環境との温度差を 20°C とすると, 計測誤差は, $\bar{\epsilon}(T)=0.95$ の植物を計測する場合, 約 1°C である. また, 太陽からの放射による影響は, 画像セン



第5図 第4図の矢印(↓)(a), (b)の時刻における葉温画像.

サーの感度波長として $8\sim 13\ \mu\text{m}$ を選べば、極めて小さく無視できる。

3) 植物温度の計測例

植物温度は、先にも述べたように、熱環境要因や生理的要因により著しく変化する。また、植物の種類によっても異なる。第4図に自然光型ファイトトン温室内で、気温、湿度、風速などの環境要因が一定の条件下で生育しているハウレンソウの太陽光に面している葉と陰になっている葉の代表的な温度を示す。また、第5図に、第4図の矢印(↓)(a)、(b)の時刻における葉温を画像計測した例を示す。太陽光に面している葉は温度が高く、陰になっている葉は温度が低い。日射量の変化に対応して葉温が急激に変化したが、その程度は、太陽光に面している葉の方が大きかった。第5図の葉温画像によると、葉温の最高と最低で約 $10\ ^\circ\text{C}$ の差がみられた。つぎに、同じ温室内で、種々の植物について計測した葉温画像から求めた最高葉温と気温との差を第1表に示す。日射量が一定であったにもかかわらず、植物が異なることにより約 $7\ ^\circ\text{C}$ の差が認められた。これは、葉形の違いによる日射のあたる量、葉面境界層の違い、葉の気孔の構造や開度の違いなどが原因しているものと考えられる。このように、熱環境要因や生理的要因により変化する植物温度を計測するのに、赤外線カメラを用いた画像計測手法は極めて有効である。

第1表 自然光型ファイトトン温室における種々の植物の最大葉気温差・気温、湿度、日射量、風速はそれぞれ、 $25\ ^\circ\text{C}$ 、 $70\ \text{RH}$ 、 $0.7\ \text{cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $0.4\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ である。

植物	最大葉気温差 $^\circ\text{C}$
トウモロコシ	7.8
インゲン	5.8
トウゴマ	3.9
赤カブ	2.3
トマト	2.2
ダイコン	1.4
ナス	1.2
イネ	0.8

また、今後、植物の各生育段階における生理反応と植物温度との関係の解析・評価や工場栽培、環境影響評価といった分野において、蒸散、光合成、大気汚染ガス吸収などの大気と植物とのあいだのガス交換量の空間分布を得る有効な手段として効果を発揮するであろう。

3. 植物生育の特徴量の計測と評価

1) 植物生育の特徴量と画像処理

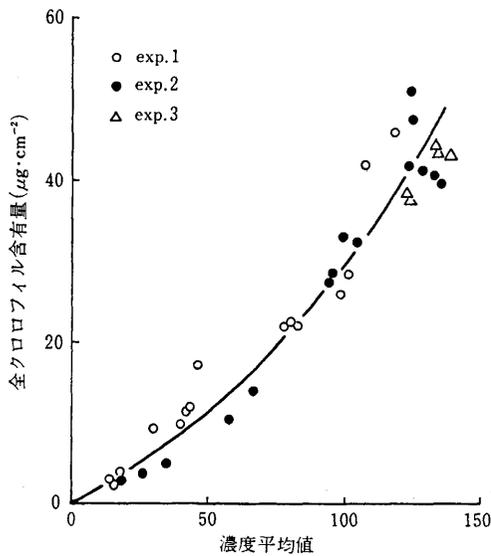
先に述べた画像センサーを用いれば、人間が見ることのできない紫外あるいは赤外領域の画像を得ることができる。また、色ガラスあるいは干渉フィルターなどの使用により、任意のスペクトルの画像を得ることができる。計算機による画像処理は、これらの可視あるいは不可視の画像に含まれる植物生育の特徴をテクスチャー解析、マルチスペクトル解析、その他の手法を用いて計測・評価しようとするものである。植物生育の特徴量として何を選ぶかは目的によって異なるが、形状、色つや、繁茂状態、病虫害徴など人間が認識し、生育の評価に用いているものは、計算機による画像処理においても、計測・評価すべき重要な特徴量といえる。

しかし、計算機による画像処理においては、さらに、植物色素の含有量、生長速度、水分状態、光合成量といった植物の生育・生理反応に直接かかわる新たな特徴量の導入も可能である。また、計算機は、大量の健全なデータの中からごくわずかな異常を見出すスクリーニング的な仕事や複数の画像の比較などが得意であり、これらの特徴を生かした生育の特徴量の計測および評価の手法の開発が必要である。以下に、画像処理の植物生育の特徴量の計測・評価への2~3の適用例について述べる。

2) 植物の生長の計測と評価

植物の生長は、組織の細胞分裂と伸長により生じるが、その速度は、器官、部位により異なり、各生育ステージで変化する。Erickson and Silk¹⁵⁾ は、オナモミ属の葉を3日間連続で写真撮影し、個々の写真の約250の点の x 、 y 座標を、計算機に連結したデジタル化装置で記録し、個々の点の生長の速度と方向を計算し、解析した。その結果、葉柄に近い部位の方が先端部よりも生長率が大きいこと、生長がほぼ等方性であることを示している。このように、植物器官の生長速度の空間的、時間的変化を調べることは、植物の生育過程を理解する基礎となる。

他方、植物群落の生長状態の評価にも画像処理による手法が試みられている¹⁶⁾。この手法は、植物葉の分光反射特性が、 $0.8\sim 1.2\ \mu\text{m}$ の波長領域で大きい(第1図)ことを利用したものである。湿った土



第6図 スペクトル画像(ネガフィルム)の濃度平均値とクロロフィル含有量との関係(干渉フィルタ:中心波長; 0.67 μm , 半値幅 0.01 μm).

など比較的この領域の反射の小さい場所で栽培している植物群落は、この波長領域のスペクトル画像を適切なスライスレベルで2値化すれば、背景から分離抽出できる。また、このようにして得られた2値化画像(背景; 0, 植物; 1)のマトリックス要素の和を計算することにより、葉面積、生体重、乾物重、草大などを推定できる。この手法は、簡単で実用的と考えられるが、背景が乾いた土や草などが生えて、反射が大きい場合や植物群落内に影ができる場合などには適用できない。

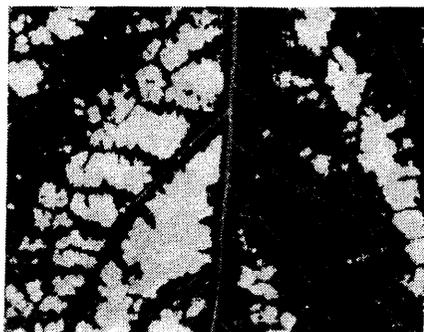
3) 植物葉に発現する可視障害の評価¹⁷⁾

病虫害や大気汚染害などの可視障害の症状は、そ

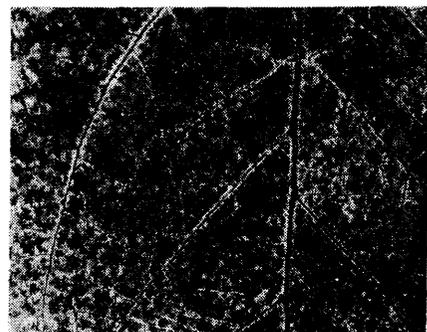
の原因により異なり特徴的である。それゆえ、可視障害が発現した葉を画像処理することにより、その原因と程度を知ることができる。可視障害は、植物色素の退色により生じるが、退色する植物色素の主要な成分の一つにクロロフィルがある。一定の拡散した光条件の標本撮影装置で、植物葉の表面の反射をクロロフィルの吸収帯に中心波長をもつ干渉フィルター(中心波長 0.67 μm , 半値幅 0.01 μm)を通して撮影することにより、クロロフィル含有量の葉面分布を得ることができる。

第6図に、この方法により撮影したヒマワリ葉のネガフィルムの濃度平均値とクロロフィル含有量の関係を示す。濃度平均値とクロロフィル含有量の間には正の相関関係が認められる。濃度平均値は、ネガフィルムの解析であるので、その値が小さいほど、葉面反射が大きいことを示す。実験は、3回に分けて行ない、エイジ、葉位、障害の程度が異なる葉を選んで解析したが、得られた結果に差異は認められない。

第7図に主要な大気汚染ガスである SO_2 あるいは O_3 に被曝し、可視障害が発現したヒマワリ葉のクロロフィル含有量の葉面分布パターンを示す。この画像の中で正常な部位は、クロロフィルによる光の吸収が大きいので黒く、可視障害発現部位は、吸収が小さく反射が大きいので白く表わされる。 SO_2 被害葉には葉肉部に比較的ブロードな可視障害が発現し、 O_3 被害葉には葉脈上に薄い可視障害が発現しているのが観察される。この撮影は、障害の症状が比較的安定した状態で行なう必要があり、また、植物の種類が異なる場合には、濃度平均値とクロロ



SO_2 被害葉



O_3 被害葉

第7図 SO_2 あるいは O_3 により可視障害が発現したヒマワリ葉のクロロフィル含有量の葉面分布パターン。

フィル含有量の関係を示す特性曲線が変わるなどの点に注意する必要がある。しかし、この手法を用いれば、安価で容易にクロロフィル含有量の葉面分布を得ることができ、また、画像処理により、濃度平均値や障害部分の面積を求めることができるので、病虫害や大気汚染害の可視障害の程度の自動計測に有効であろう。

他方、可視障害の症状の評価は、同様の方法で、種々のフィルタを通して撮影されたマルチスペクトル画像を統計的に解析することにより行なうことができる。たとえば、基本的な統計量である平均値とヒストグラムを用いれば、SO₂ 被害葉と O₃ 被害葉の識別が可能である。

む す び

植物の生育・生理反応の評価のための画像の計測・処理について概説した。工業あるいは医学の分野における画像の計測処理技術は、ここ 10 年ぐらいの間に急速に進展した。農業の分野においても、今後、農業の工業化と相まって画像の計測処理の必要性が高まるであろう。また、環境保全あるいは環境計画の分野においても、客観的な評価に基づく植物指標の導入や環境変化による植物影響データの保存という観点から、画像の計測処理による評価法の開発が必要とされる。今後、これらの分野における画像の計測処理は、単に工学的な手法の開発だけでなく、植物の生育・生理反応と関連づけた手法の開発が望まれる。この分野はようやくその緒についたところであり、今後解決すべき問題がきわめて多い。

最後に、常日ごろ御指導をたまわっている愛媛大学農学部の橋本 康助教授、協同研究者の当研究所技術部の安保文彰氏、および画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)サーモビュアグループ、浜松テレビ(株)計測用 TV グループ、三菱電機(株)・協栄産業(株)電子計算機グループにこの機をかりて心からの謝意を表する。

文 献

- 1) Gates, D. M., H. J. Keegan, J. C. Schleter and V. R. Weidner: Spectral properties of plants. *Appl. Opt.*, 4, 11-20 (1965).

- 2) Siegelman, H. W. and W. L. Butler: Properties of phytochrome. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 16, 383-392 (1965).
- 3) Trebst, A. and M. Avron (ed.): *Encyclopedia of plant physiology*, New series Vol. 5, Photosynthesis I. Springer-Verlag (1977).
- 4) Fuchs, M. and C. B. Tanner: Infrared thermometry of vegetation. *Agronomy J.*, 58, 597-601 (1966).
- 5) 滝内基弘・橋本 康: 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, 482-488 (1977).
- 6) Shiraishi, M., Y. Hashimoto and S. Kuraishi: Cyclic variations of stomatal aperture observed under the scanning electron microscope. *Plant and Cell Physiol.*, 19, 637-645 (1978).
- 7) Omasa, K., 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. No. 11*, 239-247 (1980).
- 8) 橋本 康・五百木啓三・船田 周・丹羽 登・杉 二郎: 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).
- 9) 日本生物環境調節学会編: *生物環境調節ハンドブック*. 東京大学出版会, 46-54 (1973).
- 10) Berry, J. and O. Björkman: Photosynthetic response and adaptation to temperature in higher plants. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 31, 491-543 (1980).
- 11) Raschke, K.: Heat transfer between the plant and the environment. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 11, 111-126 (1960).
- 12) Monteith, J. L.: *Principles of environmental physics*. Edward Arnold (1973).
- 13) 大政謙次・安保文彰・相賀一郎・橋本 康: 大気汚染環境下の植物の画像計測—熱赤外面像に含まれる生体情報の定量化について—. 第19回計測自動制御学会学術講演会予稿集, 515-516 (1980).
- 14) 橋本 康・桑原典和・野中佳昭・船田 周: 植物生育のプロセス同定とその最適制御(IX). 葉温と光合成との関係. *生物環境調節*, 18, 85-91 (1980).
- 15) Erickson, R. O. and W. K. Silk: The kinematics of plant growth. *Sci. American*, 242(5), 102-113 (1980).
- 16) Matsui, T. and H. Eguchi: Image processing of plants for evaluation of growth in relation to environment control. *Acta Horticulturae (Potential productivity in protected cultivation)*, 87, 283-290 (1978).
- 17) Omasa, K., F. Abo, Y. Hashimoto and I. Aiga: Evaluation of air pollution injury to plants by image processing. *Res. Rep. Natl. Inst. Environ. Stud. No. 11*, 249-254 (1980).

(おおまさ けんじ・あいが いろろう, 国立公害研究所)