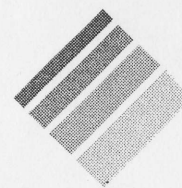


口絵8 ベラルゴニウム(ペラルゴニウム)の根のMRI断層像 (p.183参照)。明所に置かれた根(A', B')の方が暗所の根(A, B)よりも濃度レベルが低い。これは、明所の方が蒸散が多く、根の含水量が少なくなったことに原因している。(P.J.Kramer氏提供)



口絵9 赤外カラー写真による土地被覆分類(p.191参照)。作物の種類や生育状態によって色調が異なっている。(アジア航測提供)



# 植物の計測と診断

大政謙次  
近藤矩朗 編  
井上頼直

朝倉書店

となる。ここで、 $E$ : 水蒸気フラックス,  $C$ :  $\text{CO}_2$  フラックス,  $\rho$ : 空気密度,  $q$ : 比湿,  $c$ :  $\text{CO}_2$  濃度である。

この方法は、平均の期間を適当にとってやれば大気の安定度の影響を受けず、しかも1高度の測定でフラックスが求まるという点で、これまでの2つの方法より優れている。

図4.14は、三次元の風速成分(鉛直成分  $w$ , 水平成分  $x, y$ )を測定できる超音波風速温度計(海上電気, PAT-311 A型)で、この測器で  $w$  が実測できるが、さらに  $x, y$  の実測値から水平風速  $u = \sqrt{x^2 + y^2}$  および主風向  $\theta = \tan^{-1}(x/y)$  が計算できる<sup>9)</sup>。図4.15は、赤外線吸収方式の炭酸ガス・水蒸気変動計(アドバンスシステム, Model-E009型)で、この2組の測器の組合せによる同時観測により  $w, c, q$  を測定し、 $E$  および  $C$  を算出できる<sup>10,11)</sup>。ただし、 $E$  の算出についてはキャリブレーションの方法になお若干の問題が残されている。

(古藤田一雄・杉田倫明)

#### 引用文献

- 1) 大政謙次(1979). 国立公害研究所研究報告, 第10号, 367-385.
- 2) Thom, A.S.(1975) Vegetation and the Atmosphere (ed. Monteith, J.L.), Vol. 1, pp. 57-109, Academic Press.
- 3) Monteith, J.L. (ed.) (1975, 1976). Vegetation and the Atmosphere, Vol. 1, 2, p. 278, p. 439, Academic Press.
- 4) 矢吹万寿(編著)(1985). 農業環境調節工学, 朝倉書店.
- 5) Nakagawa, S. (1984). Environmental Research Center Papers, No.4, p.87, ERC, University of Tsukuba.
- 6) 古藤田一雄(1980). 筑波大学水理実験センター報告, 第4号, 1-9.
- 7) 杉田倫明, 古藤田一雄(1984). 筑波大学水理実験センター報告, 第8号, 83-94.
- 8) 林陽生, 古藤田一雄(1976). 筑波大学水理実験センター報告, 第3号, 81-88.
- 9) 古藤田一雄, 佐倉保夫, 林陽生, 甲斐憲次(1978). 筑波大学水理実験センター報告, 第2号, 65-89.
- 10) 大滝英治, 松井哲司, 瀬尾琢郎(1985). 農業気象, 41(1): 1-7.
- 11) 光田寧他(1986). 天気, 33(12): 625-631.

## 5. 画像計測とリモートセンシング

### 5.1 植物情報の画像化の必要性和現状

生物を研究対象とする分野では、生体からいかに多くの情報を得るかが学問の出発点になっている。古くから、それぞれの目的に応じて固有の技術が開発されてきたが、最近のエレクトロニクスの進歩は得られる情報量を飛躍的に増大させた。特に、生体の二次元あるいは三次元の情報を非破壊で得ることを目的とした画像計測技術の発達には目覚ましいものがある。医学の分野では、患者の診断のために表層像、顕微鏡像、X線像、RI (radioisotope) 像、超音波像などを対象とした計測技術が実用化されており、また、コンピューター断層撮影法(CT; computed tomography)の技術の発達にもなって、単に形態学的情報だけでなく機能的生理学的情報をもつ断層像も得られるようになってきている<sup>1)</sup>。

一方、植物の分野でも、細胞、個体、あるいは小規模な群落を対象に、医学の分野と同様、より多くの生体情報を得ることを目的とした種々の画像計測技術が開発されてきている<sup>2-5)</sup>。

そして、生理学や生理生態学といった基礎研究の分野で生体反応のメカニズムを解明するのに利用されている。また、これらの基礎研究で得られた知見をもとに、植物の生育状態や病虫害、生理障害、環境汚染害な

などを診断することが可能になってきている。さらに、最近話題になっているバイオテクノロジーの分野でも、育種、細胞融合、遺伝子組換えなどにより得られた植物を、生理反応と関連づけて、発芽時あるいは培養植物の段階で効率的にスク

表 5.1 植物生体画像計測の主な利用分野

・病虫害, 生理障害, 環境汚染害などの診断
・植物の生長予測と栽培管理
・バイオテクノロジー(主にスクリーニング)
・農作業の自動化(ロボティクス)
・環境浄化能力の診断
・植物診断や栽培管理のための教育システム
・広域リモートセンシングの補助
・その他, 生理学, 生態学, 農学, 環境科学, 宇宙科学などの分野の研究

リーニングするのに画像計測技術が有効的に利用できる。

表5.1に植物生体画像計測の将来も含めた利用分野の一覧を示す。植物学、農学、環境科学、宇宙科学、教育学などの基礎から応用に及ぶ多くの分野での利用が期待できる。

植物群落を対象とした人工衛星や航空機による広域リモートセンシングの発達にも目覚ましいものがある<sup>6-8)</sup>。そして、農作物の作付け面積の調査や収量予測、さらに植生や生態系の変遷などを調べるのに利用されている。最近、ランドサットに農業や植生調査への利用を特に考慮した波長帯と約30mの解像度を有するTM (thematic mapper) が搭載され、この分野での利用の拡大が期待されている。しかし、広域リモートセンシングは、大規模な植物群落を対象としたものであるので得られる生体情報には限界がある。それゆえ、その利用分野を広げるためにも、補助手段として、細胞レベルの生理学と広域リモートセンシングにより得られる情報を結びつける植物個体あるいは小規模な群落を対象とした画像計測技術が重要となる。

引用文献

- 1) 尾上守夫(編)(1982). 医用画像処理, 朝倉書店.
- 2) 大政謙次, 相賀一郎(1981). 遺伝, 35(1): 25-31.
- 3) 丹羽 登(編)(1983). ライフサイエンスを測る, オーム社.
- 4) Omasa, K. and Aiga, I. (1987). Systems and Control Encyclopedia (ed. Singh, M. ), pp. 1516-1552, Pergamon Press.
- 5) Kramer, P. J. et al. (eds.). Scientific Instruments in Physiological Plant Ecology, Academic Press. (in press)
- 6) キヤノンイメージ編集室(編)(1975). Remote Sensing, 泰流社.
- 7) Colwell, R.N. (1983). Manual of Remote Sensing I, II, Amer. Soc. Photogrammetry.
- 8) 大政謙次(1984). 新農業システム総合技術(高辻正基 他編), pp. 459-483, R & D プランニング.

5.2 画像センサの選択と処理システム

a. 画像センサと得られる生体情報

人間の目は、電磁波のうちで非常に狭い波長域(可視光)のみを感じ、対象に関する情報を得ている。画像計測や広域リモートセンシングにおいては、種々の波長域の電磁波(あるいは音波)を検知するセンサや高感度センサを用いて、人間の目では得ることのできない情報を得ることができる<sup>1)</sup>。図5.1に、電磁波(音

波)の波長と各波長域における代表的なセンサを示す。これらのセンサを用いた実際の計測においては、対象に関する情報を担うべき電磁波が能動的にせよ受動的にせよ存在することが必要である。最近では、環境からの電磁波を利用した受

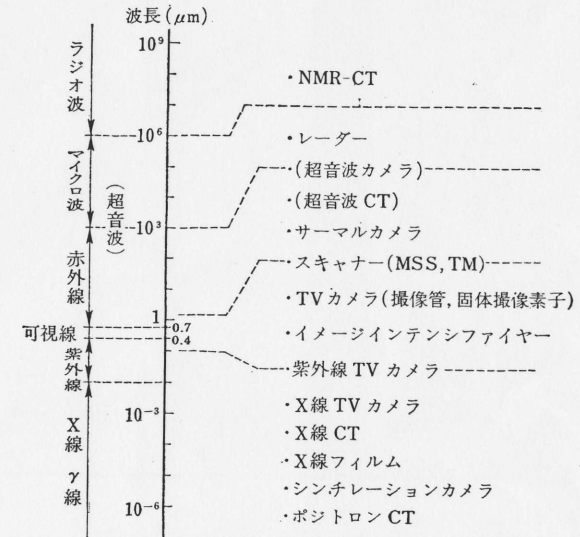


図 5.1 電磁波(あるいは音波)の波長と各波長域における代表的な画像センサ

表 5.2 植物生体情報と利用できる画像計測技術

植物生体情報	画像計測装置
生長・形状・群落構造	マルチスペクトルカメラ (TV, スキャナー), 立体計測カメラ (ステレオ法, モアレ法), 超音波カメラ, CT (X線, NMR, 超音波)
植物温度・蒸散・ガス吸収	サーマルカメラ (含スキャナー)
気孔反応	サーマルカメラ, 顕微画像計測装置
光合成活性	特殊な高感度スペクトルカメラ
可視害・植物色素・色つや	マルチスペクトルカメラ (TV, スキャナー), 赤外カラーフィルム
細胞・細胞内小器官	顕微画像計測装置
生体内部の構造・生理機能	X線 CT (年輪, 内部腐食), NMR-CT (含水量, 吸水能力, 水ポテンシャル), ポジトロン CT (生体関連元素の移動, 代謝), X線 TV カメラ, シンチレーションカメラ

動方式の計測だけでなく、電磁波を照射して生体情報を得る能動方式の計測技術が発達してきている。この方式による計測は、一般に生体環境に影響を与えるという欠点はあるが、特定の生理生化学反応に関する情報を選択的に得ることができるという特徴がある。また、RI, 顕微鏡, CTなどの技術と組み合わせることに

より、微小領域、内部状態、生体の代謝過程など、単なる表層の計測では得られない情報を得ることもできる。表5.2に、植物生体情報と利用できる画像計測技術の一覧を示す。この中には、植物を対象として独自に開発された技術の他に、医用あるいは工業用に開発され、植物の分野にも応用できるものも含まれている。代表的な植物生体情報の画像計測技術については、5.3節以降で詳述する。

### b. 画像処理システム

画像計測により得られるデータ量は膨大である。例えば、1枚のカラー写真をデジタル画像として表示することを考える。人間の目で、原画に見劣りしない画像を得ようとすると、赤(R)、緑(G)、青(B)、3枚の画像に分割して、縦横、それぞれ512画素、256階調程度の情報量が必要である。これを計算機で用いる単位であるバイト(byte)であらわすと約786KBとなり、パーソナルコンピュータ(パソコン)などでよく用いるフロッピーディスクのおおよそ1枚分の容量に相当する。動画像や三次元像を対象とする場合には、取り扱う情報量が飛躍的に増大する。しかし、最近の32ビットスーパーパソコンやアレイプロセッサに代表される計算機技術および大容量記憶媒体としての光ディスク技術の進歩には目を見張るものがあり、従来は大型計算機に頼っていた複雑な計算を小型の画像処理システムで行えるようになってきた。また、画像処理のためのソフトウェアの環境も整備されてきており、SPIDER(-IIを含めるとFORTRAN77のサブ

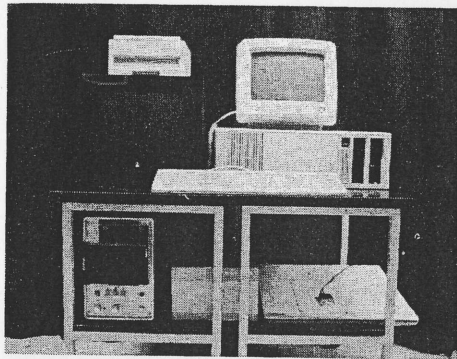


図 5.2 可搬型高速画像処理システム

ルーチン数で約700種)など、移植性の良い画像処理ソフトウェアのパッケージも市販されている<sup>2)</sup>。

可搬型の高速度画像処理システムの例として、筆者らが開発しているシステムの写真を図5.2に示す。このシステムは、アレイプロセッサをもち、浮動小数点演算の高速度処理が可能なスーパーパソコン(MASSCOMP MC5400)、簡単な画像処理機能をもつカラーグラフィックディスプレイ(柏木研究所 nexus 6400)、および大容量の画像記録が可能な追記型

の光ディスク装置(松下電送 CU-15, DU-15)で構成される。

ホスト計算機として採用したMC5400は、小型軽量で、モトローラ社のMC68020(16.7MHz)を基本にした32ビットバーチャルCPU(central processing unit)をもち、OS(operating system)として、リアルタイム性を強化したUNIX(AT & T System V+Berkeley 4.2BSD)を採用しているので画像の計測処理に適している。また、C, FORTRAN77, Franz LISP, Common LISP, Prologなど多くの言語が使用でき、ソフトウェアの移植性がよい。画像処理に必要な浮動小数点演算の高速度処理のために、標準のMC68881(0.1Linpack MFLOPS; 1.1MWhets/s)に加えて、パイプライン処理による倍精度高速プロセッサ(FPA-1; 0.6Linpack MFLOPS; 3.5 MWhets/s)と単精度の内蔵型アレイプロセッサ(VA-1; 14MFLOPS)を装備した。特にアレイプロセッサは、約250本のライブラリーを有しており、例えば1,024点の加乗算を160 $\mu$ s、複素FFTを4.5msで実行できる。このため、MC68881に比べて数倍から数十倍の処理速度を実現でき、CTの再構成処理などの複雑な演算も迅速に処理できる。

カラーグラフィックディスプレイは、512 $\times$ 512 $\times$ 8ビットの画像専用メモリーを4枚もっており、そのうちの任意の3枚をカラー画像(約1,670万色同時表現; RGB各8ビット)として表示することができる対話型のディスプレイで、ズーム、スクロール、作図といった機能も有している。また、8あるいは16ビットの高速度整数演算機能を有しており、画像の平滑化、空間フィルター、フレーム間の加減乗算、セグメンテーションなど、表示のために必要な各種の処理を1/30秒から数秒で行うことができる。これは、汎用ミニコンの数倍から数百倍の処理能力であり、簡単な画像処理であれば、この装置だけで行うことも可能である。ホスト計算機とグラフィックディスプレイは、画像データおよびディスプレイの制御コマンドの送受信のためにGP-IBバス(100KB/s)で接続されている。画像データの取込みは、RGBやNTSC方式のTV画像であればディスプレイに接続されている画像専用的高速A/D変換器で、その他についてはホスト計算機に接続されている汎用の高速A/D変換器あるいはGP-IBバスを介して行われる。例えばTV画像の場合、1/30秒で1枚の画像をデジタル化でき、ノイズ処理、シェーディング補正、濃度レベル変換などの前処理をディスプレイに内蔵されているプロセッサを用いてリアルタイムで行うことができる。

画像データの保存には、ディスプレイに接続されている追記型の光ディスク装

置を用いる。1枚の光ディスク(1.2GB)には、約5,500枚(512×480×8ビット)のデジタル画像を記録することができ、ディスプレイとの間で、書込み(2.7秒)および読出し(1.4秒)を高速で行うことが可能である。画像ファイルを束ねるディレクトリーはツリー構造になっており、画像データベースの構築のためのファイルの検索や編集を容易にしている。近年の光ディスク技術の発達には目覚ましいものがあり、近い将来、実用的な消去可能型の装置も市販されよう。また、再生専用の光ディスク技術と組み合わせれば、作成した画像データベースを安価な価格で普及させることができよう。

上記で述べた汎用型の高速度画像処理システムは、計算機やグラフィックディスプレイが安くなったとはいえ、現在のところまだ高価である。しかし、処理速度と表示色の数をあまり気にしないのであれば、最近32ビットのワークステーションが普及し、安いものは百万円程度で入手できるようになってきているので、これにSPIDERのような汎用の画像処理ソフトウェアを移植すれば、たいてい目的には対処できる。また、VLSI技術の進歩により、アレイプロセッサ並みの能力をもつ単一チップ実時間信号処理プロセッサも現実のものになってきている(例えば、NEC77230, 東芝T9506)。近い将来、汎用型の高速度画像処理システムが安価に手に入るようになり、名実ともにパーソナルになるろう。

#### 引用文献

- 1) 樋渡潤二(監修)(1979)。不可視情報の画像化、昭晃堂。
- 2) 高木幹雄 他(1985~1986)。O plus E, 67: 82, 80: 118。

### 5.3 TV 画像計測法

近紫外から近赤外の波長域(0.3~2 $\mu\text{m}$ )における植物の分光反射、透過、および吸収特性は、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、生体情報として重要である<sup>1)</sup>。特に0.8 $\mu\text{m}$ 以下の波長域では、3.1節でも述べたように光合成、光形態形成、気孔反応など多くの生理反応に関係して、光を吸収し、蛍光を発することが知られている。また、人間の目で感じる波長もこの領域であり、生長、形状、群落構造、可視害など、植物生育の特徴量に関する情報を得るのに重要である。TV画像計測法は、TVカメラに種々の光学フィルターを装着したスペクトルカメラ(その特殊なものがRGBの合成によ

るカラーカメラ)やステレオ法、モアレ法などによる立体計測カメラを用いて、植物の生理情報や生育の特徴量を得ようとするものである。また、光学顕微鏡と組み合わせ、細胞レベルでの形態的あるいは生理的な情報を得ることもできる。なお、X線のような生体内部の透視を目的とした手法は5.5節で触れる。

#### a. TVカメラの種類と特徴

近紫外から近赤外の波長域を対象としたTVカメラには、撮像管あるいは固体撮像素子を用いたものが市販されている。撮像管を用いたカメラには、0.2~2 $\mu\text{m}$ まで種々の分光感度特性を有し、計測用に凶形ひずみ、画像安定度、シェーディングなどを補正したものがある。また各撮像管は、感度、暗電流、残像などの特性に特徴があり、目的に応じて選択することができる<sup>2)</sup>。他方、固体撮像素子を用いたカメラは、固体カメラあるいは撮像板カメラと呼ばれ、撮像管に代わる次世代のカメラとして研究開発が進められている<sup>3)</sup>。最近、CCD(charge coupled device)やMOS(metal-oxide-silicon)などの撮像素子を用いた0.4~1.1 $\mu\text{m}$ に感度を有するカメラが市販されており、カラー用では、放送用規格のものも出回ってきている。これらの固体カメラは、一般的に撮像管に比べて解像度は悪いが、小型軽量、低電圧低消費電力、高信頼性、長寿命が期待できる。また焼きつけがなく、残像が少ないので、高速現象の計測や位置指定が正確にできる特徴を生かした各種の計測に利用できる。

夜間や微弱光の計測には、SIT(silicon intensifier target)カメラの使用やイメージンテンシファイアの装着が必要である。特にイメージンテンシファイアを用いれば、画質は悪いが、人間の目では見えない照度においても被写体の観測が可能である。なお市販の計測用TVカメラの走査方式には、わが国のTV標準方式(M/NTSC)で用いられている1フレーム1/30秒で2:1のインターレースの方式のほか、高解像度を得るためにインターレースを変えたもの、高速現象の解析のために1フレームの走査時間を短くしたもの、またランダムアクセスを可能にしたものなどがある。

NTSC方式のカラーあるいは白黒画像の記録には、静止画の画質も向上してきている民生用のVTRがよく用いられる。しかし、解像度やS/Nの問題、タイムコードの正確さなどを考慮すると、高価であるがタイムベースコレクターやタイムコード記録機能をもつ放送用規格のものがよい。さらに高画質の記録を必

要とする場合やその他の方式の画像の記録は、カメラからのアナログ信号をデジタル信号に変換し、磁気テープや光ディスクなどの記憶装置に記録する必要がある。なお、VTR に比べてまだ画質や信頼性の点で劣るが、アナログ画像記録用の追記型光ディスク装置も市販されている。

### b. 野外での分光測定のためのスペクトララジオアナライザー

TV カメラの撮像管(素子)や装着する光学フィルターの選定のためには、光環境や被写体の分光特性を調べる必要がある。図5.3に、野外での分光測定のためのスペクトララジオアナライザー<sup>4)</sup>と校正のための標準光源の写真を示す。この装置は、0.250~0.900  $\mu\text{m}$  (Ch 1; 検知器にはフォトマル R636 を使用)を1秒、0.850~2.50  $\mu\text{m}$  (Ch 2; PbS セル)を5秒で高速走査する回折格子の分光器および分光器の制御と測定データの解析のための信号処理器に分かれる。

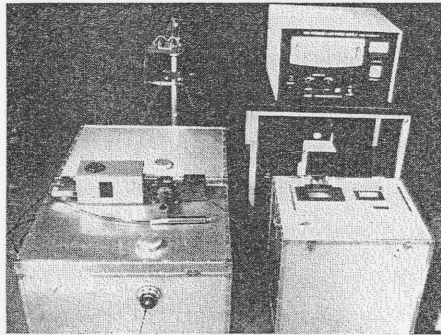


図 5.3 スペクトララジオアナライザーと標準光源<sup>4)</sup>

分光器は感度と S/N の向上のために検知器を電子冷却しており、その測定精度は Ch1 で  $\pm 1\text{nm}$ 、Ch2 で  $\pm 3\text{nm}$  である。また、迷光はダブルモノクロ方式の採用により  $1 \times 10^{-4}$  である。分光器への光の導入は光ファイバーにより行われ、先端にミラー集光器あるいは積分球アタッチメントを取り付けることができる。集光器は離れた場所 (0.8~ $\infty$  m) にある被写体の反射スペクトル特性の測定に、また積分球アタッチメントは、内蔵の光源と積分球を用いて分光反射率や透過率を測定するのに使用される (図5.4)。信号処理器は、現場での操作性を考慮してデータ収集および解析に必要な基本処理能力を内蔵させ、CRT (cathode ray tube) ディスプレイとの対話形式で処理が可能ないように設計されている。測定されたデータは、標準光源の検定値データに基づき自動校正され、カセットの磁気テープに保存される。また、弱光下の測定に対してデータ積算収集機能を有し、分光器のスリット幅の選択と組み合わせて測定光量に対するダイナミックレンジを拡大させている。さらに、測定データ間の四則演算、係数の乗算、指定された波

長領域のエネルギーの計算などの機能を付加している。

図5.5に、積分球アタッチメントを用いた植物葉の正常部位と可視障害部位の分光反射率の測定例を示す。正常部位において、0.7  $\mu\text{m}$  以下で植物色素の吸収



図 5.4 積分球アタッチメントによる測定<sup>4)</sup>

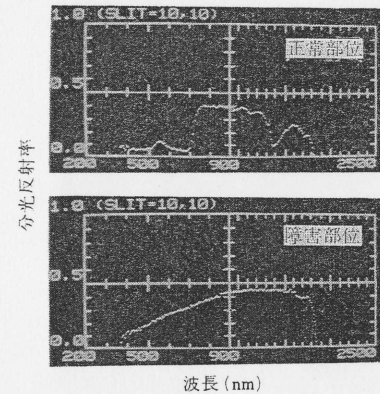


図 5.5 積分球アタッチメントを用いた植物葉の分光反射率の測定例<sup>4)</sup>

により、1.4  $\mu\text{m}$  (1.9  $\mu\text{m}$  の吸収帯は測定不可) で水の吸収により反射率が小さくなる。しかし、可視障害部位 (乾燥状態) では、これらの波長域の反射率は大きい。ただし、乾燥していない部位では近赤外域の水による吸収が残る。光ファイバーは、Ch1に UV グレードのもの、Ch2に近赤外域で水による吸収がないものを使用している。このアタッチメントによる測定は、光源 (タングステンハロゲンランプ) のエネルギー特性、光ファイバーの透過特性、積分球の反射特性などにより 0.4~1.8  $\mu\text{m}$  の範囲の測定に限定されるが、約3%の誤差で分光反射率や透過率を求めることができる。一方、ミラー集光器での測定では、用いる光ファイバーの特性にもよるが、0.25~2.3  $\mu\text{m}$  の波長域の測定が可能である。なお、分光測定の際の注意事項については3.1節 b 項を参照されたい。

### c. 植物の生長や形態の画像計測

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。それゆえ、植物器官の生長速度の空間的、時間的変化を調べる必要がある。生長計測で重要なことは、背景から

対象とする器官を分離抽出することである。野外で生育している植物群落を例にとってみると、植物の分光反射率は、背景となる土壌に比べて可視域で小さく、 $0.8\sim 1.3\mu\text{m}$ の近赤外で大きいという特徴がある<sup>1)</sup>。それゆえ、土壌で生育している植物群落の抽出は近赤外域のスペクトル画像を用いて容易に行えるが、表面計測であるので隠れた部分が残る。しかし、複数の方向から群落を計測し、抽出

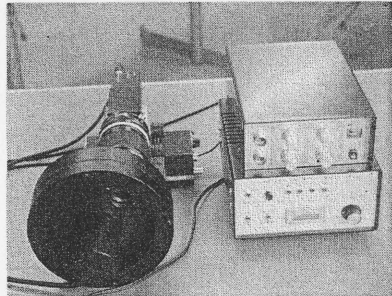


図 5.6 マルチスペクトル TV カメラ

した二値化画像のマトリックス要素を計算することにより、葉面積、葉面積指数、乾物重、草丈などの群落生長の特徴量を推定できる<sup>5)</sup>。また、精度は悪いが、群落の反射光の強度を測定することによっても群落生長の特徴量を推定することが可能である<sup>6)</sup>。

図 5.6 は、筆者が植物の生長や可視害

の画像計測のために開発したマルチスペ

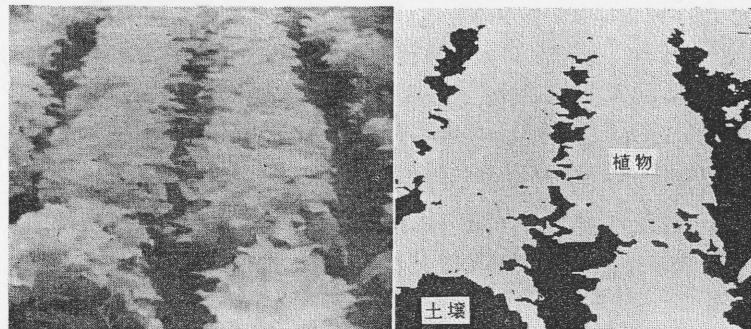
クトル TV カメラの写真である。TV カメラの前面に回転式のフィルター自動

交換機能をもつアタッチメントを装着することにより、4バンドのスペクトル画像

を得ることができる。目的に応じて任意の撮像管(素子)と光学フィルターの組

合せを選ぶことができるが、植物を対象とする場合には、可視から近赤外域( $0.4$

$\sim 1.1\mu\text{m}$ )に感度を有するシリコンビジョン管や CCD 撮像素子と、 $0.45\mu\text{m}$ ,



スペクトル画像 ( $0.90\mu\text{m}$ )

二値化画像

図 5.7 サツマイモ群落のスペクトル画像と抽出された植物領域

$0.55\mu\text{m}$ ,  $0.67\mu\text{m}$ ,  $0.90\mu\text{m}$  に中心波長をもつ干渉フィルター (半値幅:  $0.01\sim 0.03\mu\text{m}$ ) を組み合わせるとよい。図 5.7 に、圃場で生育している植物群落の近

赤外域 ( $0.90\mu\text{m}$ ) のスペクトル画像と二値化処理により抽出された植物領域を示す。スペクトル画像を利用すれば簡単な処理により背景から植物群落を抽出でき、その形状や生長を解析できる。葉、花卉、果実、その他の器官の抽出や生長解析にもスペクトル画像計測は有効な手段となる。また破壊計測ではあるが、根長の計測にも Newman 法<sup>7)</sup> などを利用した TV 画像計測法が用いられている。

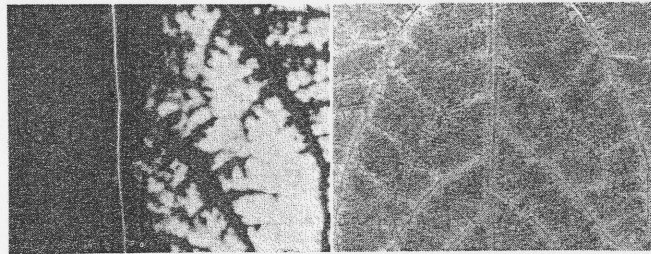
他方、TV カメラを用いた形状の立体計測の手法としては、ステレオ法や走査モアレ法がある<sup>8)</sup>。ステレオ法は、複数の方向から得られた画像を三角測量の原理に基づいて三次元座標に変換することにより立体像を得るものであるが、複雑な形状をもつ対象に対しては実用的でない。走査モアレ法は、観測格子を用いず、基準格子の被写体上で変形された像(変形格子像)を観測格子に相当する仮想格子線上の点でサンプリングすることによってモアレ縞を等高線画像として得る手法であり、モアレ縞の生成と計測を同時に行うことができる。この手法による立体形状の自動計測処理も行われているが、表面的に見えるあまり複雑でない被写体の形状を表示するに過ぎない。また、群落内部の構造や土壌中の根など表面計測で得られない情報は、CT など他の方法によって調べざるを得ない。

#### d. 可視害の画像計測

壊死状可視害は、病虫害、生理障害、環境汚染害などにおいてみられる最も顕著な症状の一つである。植物種による違いはあるが、正常部位の  $0.7\mu\text{m}$  以下の波長域ではクロロフィルやカロチノイドなどの植物色素の吸収により、また  $1.4$  および  $1.9\mu\text{m}$  の波長域では水の吸収により分光反射率が小さくなる(図 5.5 参照)。しかし、障害部位では色素に関係する可視域の分光反射率に変化が見られ、また葉の乾燥にともない水の吸収波長域の反射率も大きくなる。

一般に壊死状可視害は、葉面で障害領域と正常領域に二値的に分かれる場合と葉の全面が薄く脱色する場合とに分けられる(図 5.8)。前者の場合、障害領域を抽出し、葉面積に対する障害領域の面積比として評価する手法が有効である<sup>9)</sup>。障害領域抽出のための波長域は、正常領域と障害領域の分光反射率の差が大きい  $0.67\mu\text{m}$  の帯域が最もよい。他方、葉の全面が薄く脱色する場合には、植物色素、特にクロロフィル含有量と対応づけて評価する手法が有効である<sup>9,10)</sup>。実際にクロロフィル含有量を線形回帰式で推定する場合には、 $0.55\mu\text{m}$  のスペクトル画像が有効であり、光源や画像センサに原因するデータのばらつきは  $0.90\mu\text{m}$  のスペ

クトル画像との比を求めることにより補正できる（相関係数0.95<sup>9)</sup>。壊死状可視害は可視害をひきおこす原因によってその症状が異なるので、障害の原因を推



SO<sub>2</sub> 障害葉 O<sub>3</sub> 障害葉

図 5.8 典型的な壊死状可視害

定するのにも利用できる。この他、鏡面反射偏向スペクトル画像計測により葉面の水滲障害や色つやなどの要因も評価することができる<sup>11)</sup>。また、通常の生育状態のわずかな水分変化の計測には適さないが、1.4や1.9 $\mu\text{m}$ の水の吸収帯を利用して乾燥状態を知ることができる<sup>1)</sup>。

#### e. 光合成機能の画像計測

光合成の低下には、気孔の閉鎖に起因するもの他に、植物体内の生理活性それ自身の阻害がある。気孔反応の画像計測については次節で述べる熱赤外画像計測法があり、光合成の生理活性を調べる方法としてはクロロフィルの蛍光あるいは遅延発光（3.1節c, d項参照）を画像計測する方法がある。ここでは、筆者らが最近開発したクロロフィルの蛍光誘導期現象の動画像計測法<sup>12)</sup>を紹介する。この方法は、遅延発光の画像計測法（3.1節d項参照）に比べて画質が良く、得られる光合成反応に関する情報が多いのが特徴である。

クロロフィルの蛍光誘導期現象は、光化学系IIの電子受容体Qの酸化還元状態を反映し、電子伝達反応や光リン酸化反応などの各光合成過程の状態に影響されることが知られている<sup>13)</sup>、この蛍光誘導期現象を連続的に画像計測し、誘導期のOIDPSMT過程と関連づけて解析することができる動画像計測システムの写真を図5.9に示す。画像センサとしては、高感度で残像が少ないCCD撮像素子をもつTVカメラを改造し、使用した。蛍光の計測は、葉を15分程度暗条件下に置き、その後、青色光（0.4~0.6 $\mu\text{m}$ ）を照射し、0.683 $\mu\text{m}$ の干渉フィルター（半

値幅0.01 $\mu\text{m}$ ）を通して行った。このシステムでは、TVカメラとTV同期シャッターをもつ光源装置、タイムコード読取り書き込み機能をもった計算機制御の

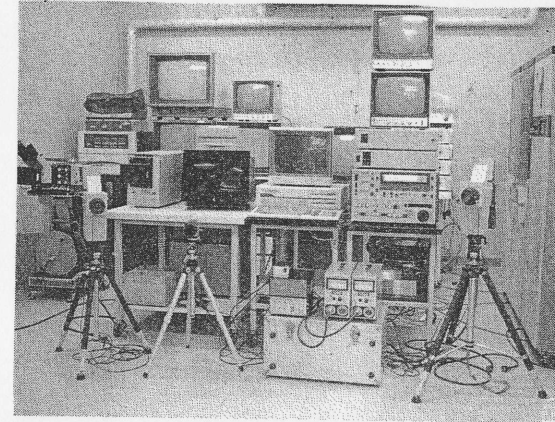
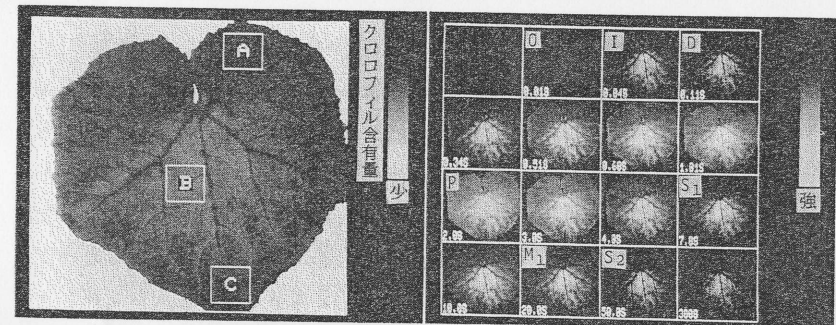


図 5.9 クロロフィル蛍光動画像計測システム<sup>12)</sup>

VTR, およびTVイメージプロセッサの組合せにより、1/60秒ごとの蛍光動画像を計測解析することができる。光源としてキセノンランプを使用し、特製の多重ND (neutral density) フィルターを装着することにより、照射光の強度の空間分布を均一にすることができた。光ディスク（1.2GB）が画像処理の高速化と画像データベースの構築のために使用された。



クロロフィル含有量の分布

クロロフィル蛍光動画像

図 5.10 キュウリのクロロフィル含有量の分布と蛍光動画像<sup>14)</sup>

図5.10に、キュウリの可視害葉のクロロフィル含有量の分布と蛍光動画像<sup>14)</sup>を示す。蛍光動画像の図中の数字は光照射後の時間（秒）である。部位Aに比



べてクロロフィル含有量の少ない B と C の領域は、最初の O および OI における立ち上がり大きい。O での蛍光は、アンテナクロロフィル間のエネルギー伝達の途中で発せられるもので、クロロフィル含有量が一定であればその蛍光強度は変化しないが、含有量の減少とともに増大する。蛍光解析の知見から、可視害がなく正常に機能している葉の場合、OI の過程は光化学系 II の初期電子受容体 Q の光還元を、DP は光化学系 II を介した水からの電子の流れによる Q の還元を、また PS<sub>2</sub> は光化学系 I の還元側の光活性化による Q の再酸化を反映している。一方、S<sub>1</sub>M<sub>1</sub>S<sub>2</sub> は光リン酸化反応に関与したチラコイド膜を介した高エネルギー状態やマグネシウムなどのイオンによる色素間エネルギー転移効率の変化などに影響される。それゆえ、蛍光動画計測により可視害の発現がみられない状態での光合成機能の画像診断が可能になる<sup>12)</sup> (口絵 3 参照)。

#### f. 気孔および細胞の顕微画像計測

細胞の光学顕微鏡による観察は生物学の分野において広く行われている。接眼レンズのかわりに TV カメラとモニターを利用すれば観察が容易になる。また、画像処理システムと接続すれば細胞あるいは細胞内小器官の形状、生長速度、色調、分光強度などの定量的解析ができる。SIT カメラやイメージインテンシファイアーは、弱光での観察や蛍光解析に威力を発揮する。ここでは、気孔とその周辺細胞の直接観察を例に顕微画像計測について述べる。

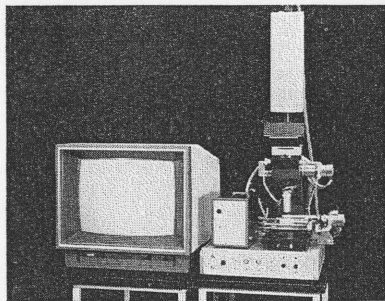


図 5.11 顕微画像計測システム<sup>15)</sup>

植物の生育環境下での気孔開閉運動の直接かつ連続的な観察は、一般の光学顕微鏡や走査型電子顕微鏡では困難であるが、図 5.11 に示す遠隔操作が可能な顕微画像計測システム<sup>15)</sup>を用いると可能になる。このシステムは、① 高倍率 (50 倍の対物レンズ + 3 倍の拡大レンズ; モニター上で約 1,600 倍) で広い作動距離 (約 13mm) をもつ光学顕微鏡、② 葉の両面を周辺大気と同じ環境に保つことができる可動式ステージ、③ 周囲からの微弱な照明でも観察が可能な SIT カメラ、④ 別室で観察するための高解像度、低ひずみの TV モニターと、カメラの感度や顕微鏡のフォーカス、視野などを

遠隔で調節するためのコントローラー、などで構成される。さらに、VTR や画像処理システムの接続も可能である。植物葉は光の透過性を良くするためにアクリル樹脂でつくられた可動式ステージの上に浮かすように置かれ、種々の環境の変化に対する気孔反応を、生育させながら長時間連続観察することができる。また、観察を非常に迅速に行うことができるので、多くのサンプルの処理にも適している。

図 5.12 は、同じ気孔を反射光で観察した後、直ちに透過性に切り換えて観察したものである。反射光で観察された気孔の開度と透過光でのそれは同じであり、反射光でも気孔の中央隙が観察できることがわかる。このシステムを用いると  $0.1 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$  (環境照度で 2klx) 以上の光強度をもつ気孔あるいは細胞の

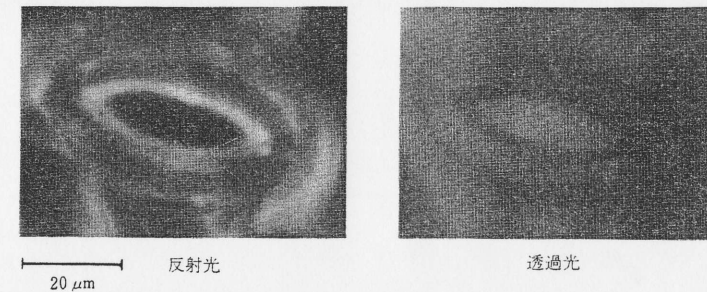


図 5.12 反射光と透過光により観察された気孔の比較<sup>15)</sup>

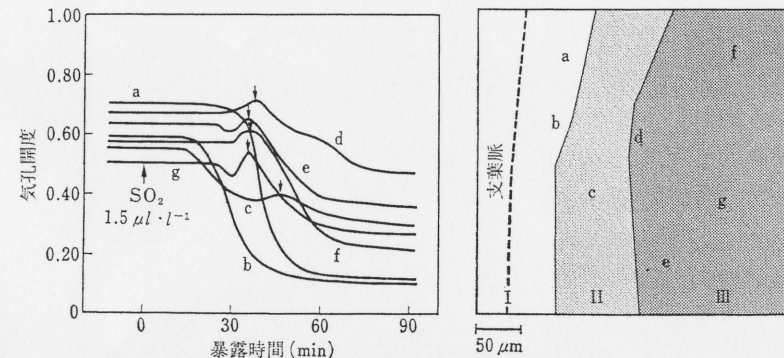


図 5.13 支葉脈周辺の隣接した気孔の SO<sub>2</sub> に対する反応<sup>17)</sup>

I: 細胞が正常な脹らみを保った領域  
II: 細胞の陥没のみが観察された領域  
III: 水滲が発現し、その後細胞の陥没が観察された領域  
a-f: 気孔; ↓, 水滲あるいは陥没が始まった時点

観察が可能である。また、画質は悪くなるが、このシステムにイメージインテンシファイアーを装着することにより、感度をさらに数桁上げることができる。このシステムの画像解像度は約 $1\mu\text{m}$ であるが、画像強調など画像処理法と併用して、 $0.3\mu\text{m}$ の精度で気孔開度を測定することができる<sup>16)</sup>。

図5.13は、顕微画像計測システムを用いて観察された支葉脈周辺の隣接した気孔の $\text{SO}_2$ に対する反応の多様性を示す例である<sup>17)</sup>。領域Ⅲに、暴露後約35分経過した時点で水滲が発現した。そして、その後、水滲がひくと細胞の陥没が観察された。領域Ⅱでは水滲は認められず、陥没だけが観察された。領域Ⅰでは、細胞は正常な膨らみを保った。気孔は、領域Ⅰでは単調に閉じたが、領域ⅡおよびⅢでは水滲や陥没の発現に関連して一時的に開く現象が観察された(図5.14)。こ

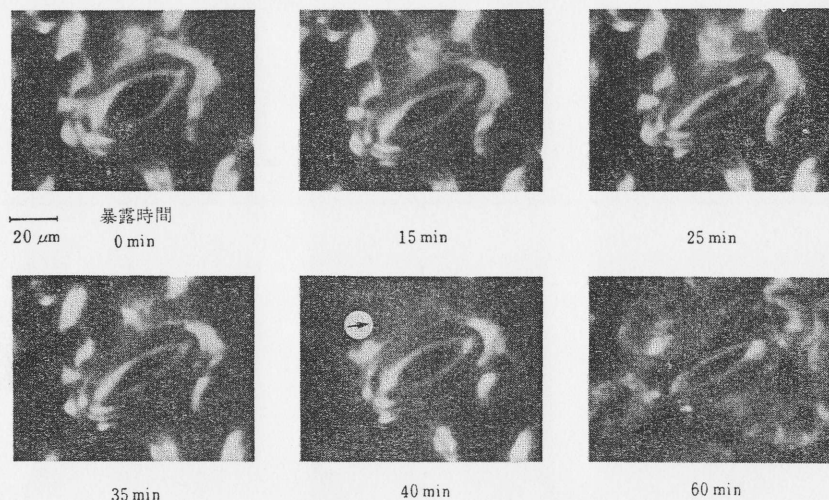


図 5.14  $\text{SO}_2$  により水滲が発現した気孔の連続顕微鏡写真<sup>17)</sup>  
40分の時点の矢印は水滲発現部位を示す。  
60分の時点では、細胞の陥没が観察される。

の原因は、水滲や陥没に関連しての孔辺細胞と周辺の表皮細胞の膨圧のバランスの変化による。このように、生育状態の気孔の連続観察は、ポロメーターや熱赤外画像計測による気孔拡散抵抗の計測では得られない個々の気孔の複雑な動きに関する情報を与える。また、細胞レベルでの障害の進行の解明にも有効である。この装置を用いて、種々の環境変化に対する気孔反応、植物種や生育状態の違いによる気孔開度と気孔拡散抵抗(1/気孔コンダクタンス)との関係などが調べら

れている<sup>15,18)</sup>。

#### 引用文献

- 1) Myers, V.I. et al. (1983). *Manual of Remote Sensing*, Vol. II (ed. Colwell, R.N.), pp. 2111-2228, Amer. Soc. Photogrammetry.
- 2) 大政謙次 (1984). 新農業システム総合技術(高辻正基 他編), pp. 459-483, R & D プランニング.
- 3) 大西和則 他 (1986). テレビジョン学会誌, 40: 1056-1097.
- 4) 大政謙次 他 (1982). 生物環境調節学会第20回大会講演要旨集, pp. 16-17.
- 5) Matsui, T. and Eguchi, H. (1978). *Acta Horticulturae*, 87: 283-290.
- 6) 青木正敏 他 (1986). 生物環境調節, 24: 33-39.
- 7) Newman, E.I. (1966). *J. Appl. Ecol.*, 3: 139-145.
- 8) 尾上守夫(編)(1982). 医用画像処理, pp. 435-451, 朝倉書店.
- 9) Omasa, K. et al. (1983). *Technological and Methodological Advances in Measurement*. Vol. 3 (ed. Striker, G. et al.), pp. 303-312, North Holland Publishing Co.
- 10) Benedict, H.M. and Swidler, R. (1961). *Science*, 133: 2015-2016.
- 11) Omasa, K. et al. (1984). *Res. Rep. Natl. Inst. Environ. Stud. Jpn.*, 66: 107-112.
- 12) Omasa, K. et al. (1987). *Plant Physiol.*, 84: 748-752.
- 13) Papageorgiou, G. (1975). *Bioenergetics of Photosynthesis* (ed. Govindjee), pp. 319-371, Academic Press.
- 14) 大政謙次 他 (1986). 植物生理学会 1936 年度年会講演要旨集, p. 58.
- 15) Omasa, K. et al. (1983). *Plant Cell Physiol.*, 24: 281-288.
- 16) Omasa, K. and Onoe, M. (1984). *Plant Cell Physiol.*, 25: 1379-1388.
- 17) Omasa, K. et al. (1985). *Plant Physiol.*, 79: 153-158.
- 18) Omasa, K. et al. *Scientific Instruments in Physiological Plant Ecology* (eds. Kramer, P.J. et al.), Academic Press. (in press)

#### 5.4 熱赤外画像計測法

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ひとつであり、気温、湿度、放射、気流などの熱環境要因や気孔の状態などの水蒸気の潜熱輸送にかかわる生理的要因に影響される<sup>1,2)</sup>。それゆえ、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り扱うことにより、気孔開閉運動、蒸散、光合成、汚染ガス吸収など植物の生理反応にかかわる情報を得ることができる<sup>3-6)</sup>。熱赤外画像計測法は、植物から放射される熱赤外域(5~14 $\mu\text{m}$ )の電磁波を計測し、植物温度やその中に含まれる生理情報を得ようとするものである。

## a. サーマルカメラの原理と特性

自然界に存在する物質は、その温度に対応した電磁波を放射している。プランクの法則によれば、黒体において、その表面の絶対温度を  $T$ 、そこから放射される波長  $\lambda$  の電磁波の分光放射強度を  $B(\lambda, T)$  とすると、

$$B(\lambda, T) = C_1 / [\lambda^5 \{ \exp(C_2 / \lambda T) - 1 \}] \quad (1)$$

が成立する。ここで、 $C_1$  および  $C_2$  は、光速などに関係する定数である。物体の表面温度が高くなればなるほど放射強度が増し、放射が最大になる波長  $\lambda_{\max}(T)$  は短波長側にずれる。 $\lambda_{\max}(T)$  ( $\mu\text{m}$ ) は (1) 式から、

$$\lambda_{\max}(T) = 2,897 / T \quad (2)$$

となり、地上の常温物体からの放射の中心波長は  $10 \mu\text{m}$  付近であることがわかる。また、全放射強度  $B_T(T)$  は、(1) 式を波長  $\lambda$  で積分すると、

$$B_T(T) = \sigma T^4 \quad (3)$$

となり、絶対温度の 4 乗に比例する。ここで、 $\sigma$  はステファン-ボルツマン定数である。

一般の物体からの放射は波長による強度分布が黒体放射とは異なる。温度  $T$ 、波長  $\lambda$  で、分光放射率が  $\varepsilon(\lambda, T)$  の物体表面からの分光放射強度  $R(\lambda, T)$  は、

$$R(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) B(\lambda, T) + \{1 - \varepsilon(\lambda, T)\} E(\lambda, T_s) \quad (4)$$

となり、表面の熱放射と周辺環境からの放射の表面反射との和で与えられる。ここで、 $E(\lambda, T_s)$  は、温度  $T_s$  なる周辺環境から物体表面への分光放射強度である。

有効波長域が  $\lambda_1 \leq \lambda \leq \lambda_2$  なる赤外線検出器において、物体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  $V_R(T, T_s)$  は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} V_R(T, T_s) &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) R(\lambda, T) d\lambda \\ &\approx \varepsilon(T) V_B(T) + \{1 - \varepsilon(T)\} V_E(T_s) \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $f(\lambda)$  は赤外線カメラ検出器の放射-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  $\varepsilon(T)$  および  $V_B(T)$ 、 $V_E(T)$  は次式で定義される。

$$\varepsilon(T) = \left\{ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda, T) f(\lambda) B(\lambda, T) d\lambda \right\} / \left\{ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) B(\lambda, T) d\lambda \right\} \quad (6)$$

$$V_B(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) B(\lambda, T) d\lambda \quad (7)$$

$$V_E(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) E(\lambda, T_s) d\lambda \quad (8)$$

検出器の出力電圧  $V_R(T, T_s)$  は、装置で得られるので、平均放射率  $\varepsilon(T)$  および周辺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、 $V_B(T)$  を得ることができる。

$$V_B(T) = \{V_R(T, T_s) - V_E(T_s)\} / \varepsilon(T) + V_E(T_s) \quad (9)$$

$V_B(T)$  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  $V_B(T)$  から物体温度  $T$  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。

現在、市販され普及しているサーマルカメラは、サーモグラフィ-装置とも呼ばれ、 $\text{InSb}(3.5 \sim 5.5 \mu\text{m})$  や  $\text{HgCdTe}(8 \sim 13 \mu\text{m})$  の検出素子として用いた光・機械走査型のものである<sup>7)</sup>。走査はプリズムやミラーの回転あるいは振動により行われるが、走査機構が集光系に対して物体側にあるかセンサ側にあるかで、対物面走査方式と映像面走査方式に分かれる。対物面走査方式は光軸のずれが小さく画像分解能の点で優れているが、走査機構が大型化し、1秒/画面程度の低速走査になる。一方、映像面走査方式では、プリズム回転方式などにより走査機構を小型化でき、TVカメラと同程度の高速映像を得ることが可能であるが、光軸のずれが大きく画像分解能は悪くなる。通常、感度とS/Nの向上のために検出素子を液体窒素(77K)で冷却するが、数時間ごとに液体窒素の補充が必要となり厄介である。このため、感度や解像度を多少犠牲にして、電子冷却により200K程度の冷却で使用する装置も市販されている。なお、次世代のサーマルカメラとして、現在、固体撮像素子を用いた電子走査式の画像センサの研究開発が進んでおり、今後の進展が期待される<sup>8)</sup>。

## b. 植物温度の計測

実際にサーマルカメラにより植物温度を計測する場合、(9)式における平均放射率  $\varepsilon(T)$  および周辺環境からの放射強度に相当する電圧  $V_E(T_s)$  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の値が得られており、ほぼ1に近い<sup>9)</sup>。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、(4)式によれば放射率により変わるが、(9)式における電圧  $V_E(T_s)$  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  $0.1^\circ\text{C}$  の精度で計測することが可能である。しかし、 $\varepsilon(T)$  と  $V_E(T_s)$  の調節機能がない装置で  $\varepsilon(T)=1.0$ 、 $V_E(T_s)=0$  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  $20^\circ\text{C}$  とすると、計測誤差は、 $\varepsilon(T)=0.95$  の植物を計測する場合、約  $1^\circ\text{C}$  である。なお、太陽からの放射による影響

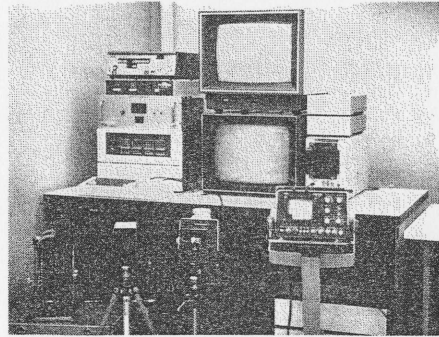


図 5.15 熱赤外画像計測システムと校正用黒体炉<sup>4)</sup>

や大気による散乱や吸収は、センサの感度波長としての大気の窓と呼ばれる  $8\sim 13\mu\text{m}$  を選べば、きわめて小さく無視できる。

図 5.15 に、筆者らが使用している熱赤外画像計測システム<sup>4)</sup>と校正用の黒体炉の写真を示す。サーマルカメラ(日本電子 JTG-IBL)は、温度分解能および解像度の点で優れている対物面走査方式で、検出素子として HgCdTe(液体窒素冷却)の

ものを採用した。サーマルカメラからの検出信号は、12ビット( $256^{\text{H}}\times 240^{\text{V}}$ 、量子化誤差  $0.0125^\circ\text{C}$ )のデジタル信号に変換され、ビデオプロセッサでノイズ処理や温度変換など簡単な処理が施され、ディスプレイに表示される。なお、5.2節で述べた汎用の高速画像処理システムと GP-IB バスで接続されており、複雑な処理にも高速で対処できる。また、野外での計測などのために VTR を介した解析も可能である。この装置の温度分解能、画像の均一性、ドリフトは、16回積算平均化処理の場合で、 $0.05^\circ\text{C}$ 、 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 、 $\pm 0.05^\circ\text{C}/4\text{h}$  程度である。また画像分解能は、黒体炉の表面を約  $5^\circ\text{C}$  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  $4\%$ ( $0.2^\circ\text{C}$ )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  $50^{\text{H}}\times 40^{\text{V}}$  程度である<sup>4)</sup>。なお、温度差が認識できる画像分解能は約 300lines である。この装置のその他の主な性能は、温度測定範囲が  $-40\sim 2,000^\circ\text{C}$ 、走査時間が 2秒(240lines)、焦点範囲が  $20\text{cm}\sim\infty$  である。校正のための黒体炉

(Electro Optical Industries PD1401X; 円錐多孔型, 検定熱電対付)は、0.99の放射率で、 $0.05^\circ\text{C}$ の精度のものを使用している。

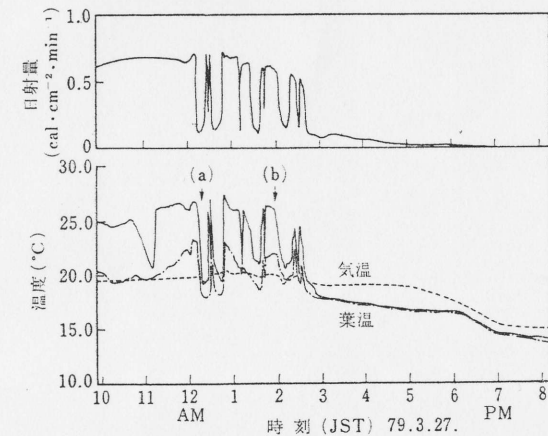


図 5.16 自然光型ファイトトロン温室内におけるホウレンソウ葉温(—; 日当り部位, - - -; 日陰部位), 気温および日射量の日変化<sup>10)</sup>. 湿度, 風速は, それぞれ  $70\% \text{RH}$ ,  $0.4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  である。

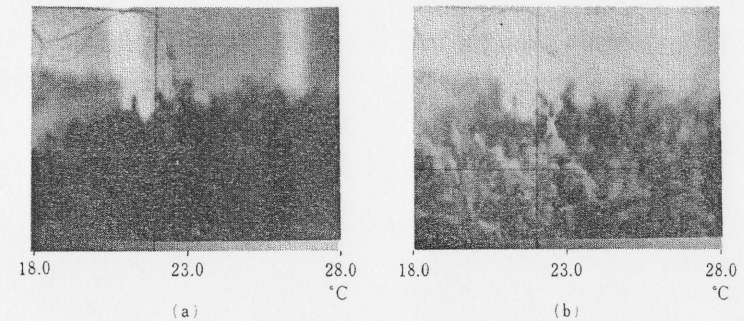


図 5.17 図 5.16 の矢印(↓)(a),(b)の時刻における葉温画像<sup>10)</sup>

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<sup>10)</sup>。図 5.16 に自然光型ファイトトロン温室内で、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ホ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。また図 5.17 に、図 5.16 の矢印(↓)(a),(b)の時刻における葉温画像を示す。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するが、その程度は太陽光に面している葉の方が大きい。図 5.17 の葉温画像による

と、葉温の最高と最低では約7°Cの差がみられた。

一方、植物の種類でも葉温に差が認められる(図5.18)。日射量や湿度など

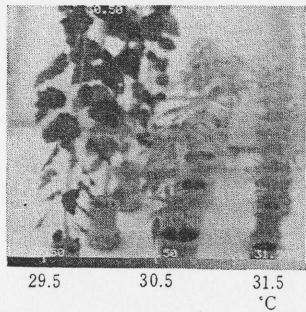


図5.18 植物種による葉温の違い。  
左からボブラ、シラカン、マサキ。  
人工気象室で正常に生育し、熱環境  
条件は一定に保たれている。

の熱環境条件が一定の条件下で種々の植物の最高葉気温差を調べたところ、最高で7°C程度の差が認められた<sup>10)</sup>。これは、植物種による気孔の構造や開度の違い、葉の形状に関する葉面境界層の違いなどで、蒸散能力に差があることに原因している。このような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サーマルカメラはきわめて有効である。

### c. 気孔反応とガス交換量の計測

植物は、蒸散、光合成、呼吸などの自らの生命維持に必要な活動のための水蒸気や炭酸ガス(CO<sub>2</sub>)の交換を、気孔を介して大気との間で行っている<sup>1,2)</sup>。その際、大気が汚染されていると、汚染ガスも気孔を通過して侵入し<sup>11)</sup>、種々の影響をもたらす。植物葉温と気温、湿度、放射、気流などの熱環境との関係を植物-熱環境系として体系的に取り扱うことにより、植物葉温から植物と大気とのガス交換量や気孔反応を推定することができる<sup>4,12)</sup>。そして、植物の生育状態の診断、大気浄化に適した植物種のスクリーニングや浄化能力の診断などに利用できる。以下にその基本となる葉の気孔反応とガス交換量の推定法について述べる。

表裏の温度が等しいと仮定できる薄く平らな葉の局所部位における熱収支から局所部位における蒸散速度  $W_x$  を求めると次式を得る。

$$W_x = \{\alpha_p E_s + \epsilon(E_{W_x} - 2\sigma T_{i_x}^4) + 2\rho C_p(T_a - T_{i_x})/r_{kax}\}/L \quad (10)$$

ここで、 $E_s$ 、 $E_{W_x}$ 、 $\alpha_p$ 、 $\epsilon$ 、 $T_i$ 、 $T_a$ 、 $\sigma$ 、 $\rho$ 、 $C_p$ 、 $r_{ka}$ 、 $L$ は、それぞれ環境からの短波放射(波長 $<3\mu\text{m}$ )、環境からの長波放射(波長 $>3\mu\text{m}$ )、短波放射の吸収係数、長波の放射率、葉温、気温、ステファン-ボルツマンの定数、空気の比重量、空気の定圧比熱、熱伝達に対する境界層抵抗、蒸発の潜熱である。添字  $x$  は、局所部位  $x$  での値を示す。気温、湿度、放射、気流などの熱環境要因を一定に保つとすれば、(10)式の右辺の変数は葉温  $T_{i_x}$  のみとなる。それゆえ、葉温以外のパラメーターを前もって決めておけば、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、次式に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。

$$r_{wsx} = 2\{X_{s_x}(T_{i_x}) - \phi X_s(T_a)\}/W_x - (\kappa/D_w)^{2/3} r_{kax} \quad (11)$$

ここで、 $X_s(T)$ 、 $\phi$ 、 $\kappa$ 、 $D_w$  は、それぞれ  $T$ (°C)における飽和水蒸気密度、相対湿度、空気の温度電導率、水蒸気と空気の分子拡散係数である。他方、植物のガス交換速度  $Q_x$  は次式により推定することができる。

$$Q_x = 2(P_a - P_{i_x})/(r_{gsx} + r_{gsx}) \quad (12)$$

ただし、

$$r_{gsx} = (\kappa/D_g)^{2/3} r_{kax} \quad (13)$$

$$r_{gsx} = (D_w/D_g)r_{wsx} \quad (14)$$

ここで、 $P_a$ 、 $P_{i_x}$ 、 $g_{gs}$ 、 $r_{gs}$ 、 $D_g$  は、それぞれ大気中のガス濃度、気孔底界面でのガス濃度、ガス拡散に対する境界層抵抗、気孔拡散抵抗、ガスと空気との分子拡散係数である。気孔底界面でのガス濃度  $P_{i_x}$  は、環境変化や植物組織における光合成、代謝、移動その他の生理作用によって変化する<sup>11)</sup>。特に光合成と呼吸に関するCO<sub>2</sub>については、光条件、ガス濃度、葉温、水分状態、種間差、生育状態、その他の環境要因、あるいは植物の生理的要因により著しく影響される。例えば、昼間、気孔底界面でのCO<sub>2</sub>濃度は、光合成により周辺大気よりも低い濃度に保たれるが、夜間、植物組織内で、光合成が停止し呼吸のみになると周辺大気よりも高くなる。

表5.3 気孔底界面でのガス濃度と葉肉抵抗<sup>11)</sup>

ガスの種類	$C_i/C_b$	$r_M(\text{s}\cdot\text{cm}^{-1})$
H <sub>2</sub> O	—	0
NO <sub>2</sub>	0	0
O <sub>3</sub>	0	0
SO <sub>2</sub>	0	0
PAN	0	0
HF	0	0
Cl <sub>2</sub>	0	0
CO <sub>2</sub>	—	0.5~10(以上)
NO	0.9 以上	15 以上
CO	0.9 以上	15 以上

注)  $C_i$ : 気孔底界面でのガス濃度、 $C_b$ : 葉間気層でのガス濃度、 $r_M$ : 葉肉抵抗。

一方、NO、COを除く汚染ガスや水蒸気の気孔底界面でのガス濃度は、CO<sub>2</sub>に比べて環境要因や生理的要因の影響をあまり受けない。表5.3に、水蒸気、CO<sub>2</sub>、汚染ガスについての気孔底界面でのガス濃度を示す。なお、参考のために葉肉抵抗も付記した。表5.3によれば、水蒸気およびNO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>、SO<sub>2</sub>、PAN、HF、Cl<sub>2</sub>などの汚染ガスに関しては、植物体内での代謝、移動等の生理機能が十分大きく、蒸散速度、あるいは汚染ガス吸収速度は気孔拡散抵抗を含めた気相での拡散にのみ支配される。他方、CO<sub>2</sub>、NO、COな

どのガスは、植物体内での生理機能が十分でなく、ガス吸収速度は、気相での拡散に加えて植物の生理機能にも影響される<sup>11)</sup>。

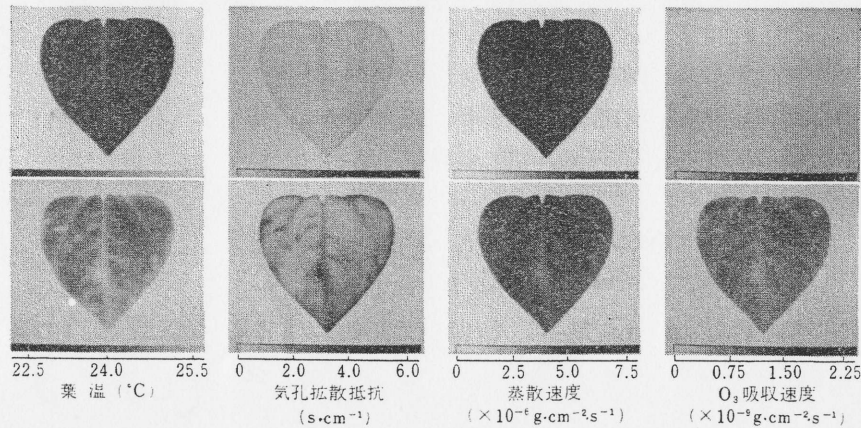


図 5.19  $O_3$ (1.2 ppm) に被曝したヒマワリ葉の葉温、気孔拡散抵抗、蒸散速度、 $O_2$  吸収速度の葉面分布の変化<sup>11)</sup> (上段: 暴露前, 下段: 暴露後 30 分)

図 5.19 に、汚染ガス ( $O_3$ ) に被曝したヒマワリ葉の葉温分布と上記のモデルを用いて推定した気孔拡散抵抗、蒸散速度、 $O_2$  吸収速度の葉面分布を示す<sup>12)</sup>。被曝にともなう気孔の閉鎖のために、気孔拡散抵抗が増加し、蒸散速度が減少した。しかし、その程度は葉面の各部位で不均一であった。この方法による蒸散速度および気孔拡散抵抗の推定精度は、それぞれ、 $2 \times 10^{-7} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $0.3 \text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$  であり、汚染ガスについても同程度の精度が期待できる<sup>4)</sup>。

野外で生育している植物群落を対象とする場合には、気孔拡散抵抗やガス交換量を葉温から正確に推定することは困難である。しかし、熱環境がある程度均一に保たれた条件下では、定性的ではあるが、葉温画像から植物群落の気孔反応やガス交換についての情報を得ることができる<sup>6, 13)</sup>。口絵 6A に畑の畝に植えられたサツマイモの葉温画像を示す。畝は 2 列で、サツマイモの葉温の方が畝間の土壌部の温度に比べて  $10 \sim 20^\circ\text{C}$  程度低い (気温約  $30^\circ\text{C}$ )。右側の畝が正常な状態、左側の畝が環境ストレスにより気孔が閉じ、蒸散および光合成能力が低下した状態である。右側の畝に比べて、左側の畝は  $5 \sim 10^\circ\text{C}$  程度高い。なお、肉眼では左側の畝もまったく正常に見える。植物種にもよるが、夏場生育する作物や街路樹であれば、風が弱く晴れた日で陰がない状態では、概して葉温が気温と同じか

それよりも低い温度であれば健全である (口絵 6B 参照)。サーマルカメラによる植物温度計測は、簡便で、可搬性に優れている。また、面的情報が得られるので、従来の微気象の計測やポロメーター (同化箱を含む) と組み合わせれば効果的に植物の診断ができる。

#### 引用文献

- 1) Monteith, J.L. (1973). Principles of Environmental Physics, Edward Arnold.
- 2) Jones, H.G. (1983). Plants and Microclimate, Cambridge University Press.
- 3) 滝内基広, 橋本 康 (1977). 計測自動制御学会論文集, 13: 482-488.
- 4) 大政謙次 他 (1981). 計測自動制御学会論文集, 17: 657-663.
- 5) Hashimoto, Y. et al. (1984). *Plant Physiol.*, 76: 266-269.
- 6) Omasa, K. and Aiga, I. (1987). Systems and Control Encyclopedia (ed. Singh, M.), pp. 1516-1522, Pergamon Press.
- 7) 仲山要二 (1978). 新しいセンサの技術開発と最適な選び方・使い方 下巻, pp. 1163-1202, 経営開発センター.
- 8) 大野二郎 (1985). 計測と制御, 24: 1101-1107.
- 9) Fuchs, M. and Tanner, C.B. (1966). *Agronomy J.*, 58: 597-601.
- 10) 大政謙次, 相賀一郎 (1981). 遺伝, 35(1): 25-31.
- 11) 大政謙次 (1979). 国立公害研究所研究報告, 10: 367-385; あるいは (1980). 環境情報科学, 9(2): 77-80.
- 12) Omasa, K. et al. (1981). *Environ. Control Biol.*, 19: 59-67, 85-92.
- 13) 大政謙次 (1986). 第 27 回大気汚染学会講演要旨集, p. 569.

#### 5.5 コンピューター断層撮影法

医学の分野で生まれ、目覚ましい発展をしているコンピューター断層撮影法 (CT; computed tomography) は、生体内の状態を破壊することなく調べることのできる有力な方法である<sup>1-3)</sup>。現在、臨床医学や産業用に広く普及している X 線 CT の開発者である Cormack と Hounsfield<sup>4)</sup> に 1979 年のノーベル医学・生理学賞が与えられたことからみても、この手法がいかに画期的であるかがわかる。最近では、X 線 CT の他に、ポジトロン CT を含む放射性同位元素 (RI; radioisotope) を利用する CT や超音波、核磁気共鳴 (NMR; nuclear magnetic resonance)、重粒子線、マイクロ波などのエネルギー媒体を用いる CT が盛んに研究され、その一部は実用段階に入っている。また、細胞のレベルを対象とした手法も開発されてきている。植物の分野でも、X 線 CT による立木の年輪や内部腐食の計測、NMR-CT (MRI; magnetic resonance imaging と呼ぶ) による植物の根系や吸水の計測などの研究が行われており、今後の発展が期待さ

れている。なお、植物葉など平面的な構造をもつ対象においては、従来の X 線や RI を用いた二次元的な投影画像計測法が利用できる<sup>3,5)</sup>。

a. 二次元的な投影画像計測

この方法は、CT ではないが、被写体を透過した X 線や生体内の RI からの放射線の分布を計測することにより、生体内の形態的あるいは生理生化学的な情報を得ようとするものであり、生物や医学の研究分野では広く普及している<sup>3,5)</sup>。X 線画像は、キャリアとしての X 線を三次元構造をもつ主体に投射し、二次元の投影像を計測することによって得られる。X 線フィルムによる写真撮影が解像度も良く一般的であるが、他に、イメージインテンシファイアーとビジコンとを組み合わせた X 線 TV カメラなどが使用できる。主に形態的な情報が得られ、種子の選別などに利用されている。

一方、RI を用いた画像計測は、生体内の生理生化学的な情報を得るのに有効である。生体を構成し、代謝に関係する RI を気孔あるいは根から吸収させ、RI

からの放射線をオートラジオグラフィにより写真撮影する手法がよく用いられる<sup>5)</sup>。図 5.20 は、<sup>32</sup>P(リン酸)を含む養液中で生育させたインゲンを水洗いした後乾燥させ、化学かぶりなどを防ぐために不透水性の薄膜で覆い、放射される β 線エネルギーの強弱を乳剤膜が塗布されている X 線フィルムで密着撮影したものである。黒い部位ほど <sup>32</sup>P の蓄積が多く、通路である茎と生長が著しい葉に、より多くの <sup>32</sup>P が蓄積されていることがわかる。この他にも植物の生育にとって重要な C などの RI 像も容易に得ることができる。

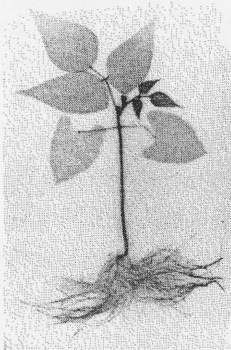


図 5.20

根から葉への <sup>32</sup>P(リン酸)の取込みを示すオートラジオグラム。黒い部分ほど <sup>32</sup>P の蓄積が多い。

オートラジオグラフィは個体だけでなく細胞や細胞内小器官の生理機能を調べるためにも有効である。しかし、非破壊で、動態 RI 像を迅速に得るには、高価

ではあるが、NaI(Tl) などの大型のシンチレーション結晶と二次元配置した多数の光電子増倍管を組み合わせた Anger 型のシンチレーションカメラを用いる必要がある。また生体の代謝機構の解明には、サイクロトロンにより、生体になじみのある <sup>11</sup>C, <sup>13</sup>N, <sup>15</sup>O, <sup>32</sup>P などの短寿命のポジトロン核種を発生させ、消滅

する際の γ 線を計測する手法が有効である。最近、ペビーサイクロトロンと呼ばれる小型の装置ができ、また CT 像も得られるようになってきている<sup>6)</sup>。

b. X 線 CT による立木の計測

臨床医学や産業用に広く普及している X 線 CT は、生体の内部構造の情報を得るのに適している。最近、野外計測に適した可搬型の装置も開発され、立木の年輪や内部腐食の計測診断に威力を発揮している<sup>7)</sup>。

X 線の投影像から再構成像を得る手法には種々の方法が提案されているが<sup>1-3)</sup>、理解しやすいのはフーリエの切断定理に基づくものである。図 5.21 にその概念を示す。

簡単に説明すると：

濃度分布  $f(x, y)$  の被写体の  $x$  軸と  $\theta$  の傾きをなす  $s$  軸への投影  $p(s, \theta)$  は、 $s$  軸に垂直な  $t$  軸を考えて次式で与えられる。

$$p(s, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) dt \tag{15}$$

一方、 $f(x, y)$  の二次元フーリエ変換  $F(u, v)$  は、定義により、

$$F(u, v) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \exp[-j2\pi(ux + vy)] dx dy \tag{16}$$

で与えられる。ここで、 $s = x \cos \theta + y \sin \theta$ ,  $t = -x \sin \theta + y \cos \theta$  を考慮して、 $p(s, \theta)$  の  $s$  に関する一次元フーリエ変換  $P(w, \theta)$  を求め整理すると、次式の関係が成立する。

$$\begin{aligned} P(w, \theta) &= \int_{-\infty}^{\infty} p(s, \theta) \exp(-j2\pi ws) ds \\ &= \iint_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \exp[-j2\pi w(x \cos \theta + y \sin \theta)] dx dy \\ &= F(w \cos \theta, w \sin \theta) \end{aligned} \tag{17}$$

この関係がフーリエの切断定理と呼ばれるもので、投影の一次元フーリエ変換は、原分布の二次元フーリエ変換を対応する角度で切った中心断面に等しいこと

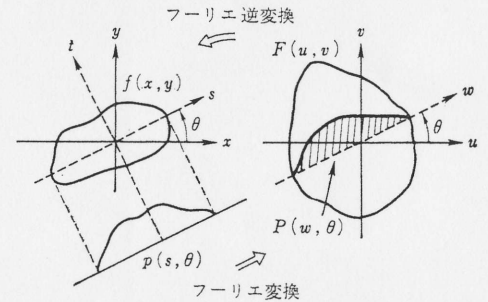


図 5.21 フーリエの切断定理

を意味している。したがって、各方向からの投影があれば  $F(u, v)$  が再生でき、それを次式により逆フーリエ変換すれば原画像が再現できる。

$$f(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} F(u, v) \exp[j2\pi(ux + vy)] du dv \quad (18)$$

いま、変数変換  $u = w \cos \theta$ ,  $v = w \sin \theta$  を行い、 $\theta$  に関する積分限界を半分にすると、

$$f(x, y) = \int_0^{\infty} |w| dw \int_0^{\pi} d\theta P(w, \theta) \exp(j2\pi ws) \quad (19)$$

積分の順序を変えると  $w$  に関する積分は、 $|w|P(w, \theta)$  の逆フーリエ変換である。これを  $q(s, \theta)$  とすると、

$$q(s, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} |w| P(w, \theta) \exp(j2\pi ws) dw \quad (20)$$

となり、結局、(19) 式は次式となる。

$$f(x, y) = \int_0^{\pi} q(s, \theta) d\theta \quad (21)$$

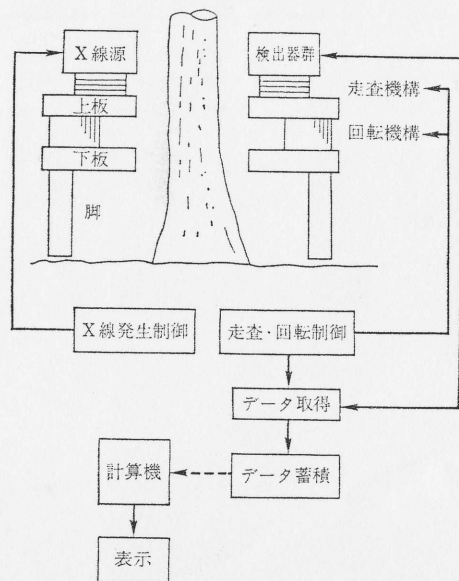


図 5.22 立木計測用 X 線 CT 装置の構成<sup>7)</sup>

台となる。上板は、周辺のギヤによる回転機構を介して下板に取り付けられ、同

(20) 式において、 $q$  は  $|w|$  と  $P$  との積の逆変換である。フーリエ変換の周波数領域における積は空間領域における畳み込み積分になるので、 $q$  は原投影  $p$  に、ぼけを除去するためのフィルタ  $|w|$  の逆変換を畳み込むことによって求められる。実際の処理は装置構成により異なり、いろいろの方法が提案されている。

図 5.22 に、尾上ら<sup>7)</sup>により開発された可搬型 X 線 CT 装置の構成を示す。装置の走査部は、U 字形の開口部をもつ上下 2 枚の板からなっている。下板には 4 本の調整可能な脚がついており、固定架

軸に回転できるようになっている。両者の開口部を合わせれば立木のような垂直に立った被測定物に側面からはめ込むことができる。上板には X 線源およびそれと対向する検出器群が線形または扇形走査できるようになっている。一走査が終わると前述の回転機構により上板を下板に対して数度回転する。これを再構成に十分な投影データが得られるまで繰り返す。これらの走査・回転およびデータ収集はすべてマイクロプロセッサで制御される。投影データはフロッピーディスクにいったん蓄積し、再構成のための計算は大型コンピュータで行われる。

図 7 はスギとヒノキの立木の再構成像である。X 線の吸収が大きい部分が白く、小さい部分が黒く示されているが、ヒノキでは年輪の強調のための処理が施されている。再構成像から、年輪のほか、水分状態の違いや節（スギ）などが認識できる。一般に切られて乾燥した木材では、春材と秋（夏）材の生長の違いによる材の密度差により X 線の吸収量に差があるので、容易に年輪を識別できる。しかし、立木では水が含まれているので年輪が認識しづらい。特に蒸散流の通路である辺材部は、心材部に比べて含水量が多く、その傾向が顕著である。このため、年輪の強調のための処理が必要となる。

年輪の形成は環境変化に大きく影響されるので、可搬型 X 線 CT を用いて立木の年輪を調べることで各年代の環境変化を調べることができよう。また、年輪以外に腐食や水分状態もわかるので、屋久杉や日光の杉並木といった保護が必要な天然記念物の生育状態の調査にも利用できよう。

### c. NMR-CT による根系と土壌水分の計測

原子核スピン系のもつ磁気モーメントと外部印加磁場との共鳴現象を利用した NMR 計測法は、種々の生体物質の化学組成や反応過程の分析手段として生物や医学の分野において広く利用されている(3.2 節参照)。また 1973 年、Lauterbur<sup>8)</sup> により線形磁場勾配を用いた NMR 映像法 (Zeugmatography) が発表されて以来、臨床医学の診断法としても注目されるようになった。この映像法の特徴は、X 線 CT のように単に生体の形態的な情報を与えるだけでなく、生理生化学的な情報を提供でき、また印加磁場の電気的な制御により簡単に任意の断面の映像を得ることができる点にある<sup>9)</sup>。最近では、超電導マグネットを用いた X 線 CT に負けない高解像像のものも開発されており、細胞レベルの映像化にも成功している<sup>10)</sup>。現在、市販されている NMR-CT は、プロトン(水素の原子核)を対象



として密度,  $T_1$  (スピン-格子緩和時間),  $T_2$  (スピン-スピン緩和時間) などに  
関する情報を得ることができる。

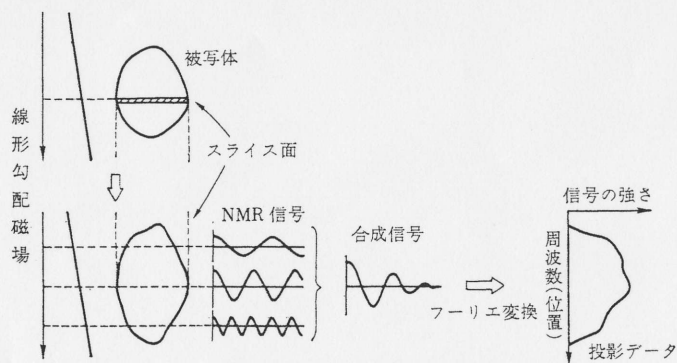


図 5.23 NMR 映像法の概念

図 5.23 に NMR 映像法の概念を示す。生体を構成する原子 (例えば水素) の原子核は、プラスの電荷をもち、地球のように自転 (スピン) している。磁場の中に置かれると、その強さに比例した周波数でコマのような首振り運動 (ラーモア歳差運動) をする。ここで、この歳差運動と同じ周波数の高周波磁場を加えると共鳴現象が生じ、原子核はそのエネルギーを吸収し、励起状態になる。そして、高周波磁場を切ると、吸収したエネルギーを放出しながら元の状態に戻る (緩和現象)。このときに原子核から放出されるエネルギーを FID (free induction decay) 信号や SE (spin echo) 信号として計測し、断層像をつくる。具体的には、静磁場に傾斜磁場を重ね合わせ、位置によって直線的に強さの異なる線形勾配磁場をつくる。この状態で特定の高周波磁場を加えると、ある断面の原子核だけが励起された状態になる (選択励起法)。そして、傾斜磁場を切り、励起断面上に新たな傾斜磁場を重畳させ、線形勾配磁場をつくる。このようにすると、出てくる信号はそれぞれの磁場の強さに対応した周波数の合成信号になる。この信号をフーリエ変換すると X 線 CT と同じ投影データが得られる。そして、励起断面上の線形勾配磁場の方向をかえていき、それぞれのデータを集め逆投影すると再構成像が得られる。この手法は投影再構成法と呼ばれているが、この他にも種々の映像法が提案されている<sup>9)</sup>。

高周波磁場の周波数は一般にラジオ波領域にあり、プロトンの場合、1T (テスラ) に対して 42.6 MHz である。高周波磁場の加え方には FID 信号を検出する

SR (saturation recovery; 飽和回復) 法や IR (inversion recovery; 反転回復) 法と SE 信号を検出する SE 法などがあるが、信号の検出が容易であり、FID 信号よりも豊富な情報を含んでいる SE 法がよく用いられる。この方法では、まず  $90^\circ$  パルスをかけて系を励起し、さらに  $\tau$  (エコー時間) だけ経過した後、 $180^\circ$  パルスをかける。すると、 $90^\circ$  パルスの後 FID 信号が、また  $180^\circ$  パルスの後さらに  $\tau$  経過したときにピークになるような SE 信号が検出される。SE 画像の強度  $I_{SE}$  は、エコーがでるときの磁化の  $xy$  成分に比例し、近似的に次式で与えられる。

$$I_{SE} = k \rho_p \exp(-2\tau/T_2) [1 - \exp(-T_r/T_1)] \quad (22)$$

ここで、 $k$ ,  $\rho_p$ ,  $T_r$  は、それぞれ比例定数、プロトン密度、パルス系列の繰返し時間である。 $I_{SE}$  は、 $\tau$  が十分小さい場合には、

$$I_{SE} = k \rho_p [1 - \exp(-T_r/T_1)] \quad (23)$$

となり、SR 法により得られる画像 (SR 画像) と一致する。ここで、 $T_1$  に比べて  $T_r$  を十分大きくとればプロトン密度を示す画像になる。一方、 $\tau$  を大きくすると  $\exp(-T_r/T_2)$  の項がきいてきて、 $T_2$  の影響がでてくる。この他、相や粘性に関係した情報を与える  $T_1$ ,  $T_2$  の純粋な画像を得ることもできるが、S/N

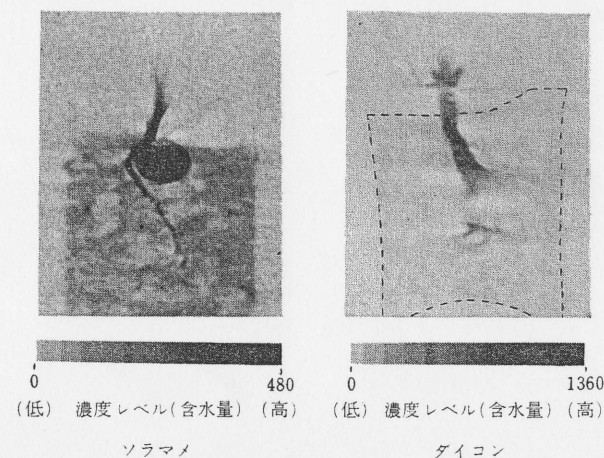


図 5.24 ポット植えの植物の NMR 画像<sup>11)</sup>

や計算時間の点からあまり得策ではない。

図 5.24 に、医用の NMR-CT を用いて測定したポット植えの植物の SR 画像

の例を示す。ソラマメの画像の濃度レベルは土壌のレベルに、ダイコンは根のレベルに調節されている。濃度レベルは、プロトン密度すなわち含水量に対応しており、植物体の方が土壌に比べて含水量が多いことがわかる。土壌水分の分布の違いは根の吸水と土壌構造の不均一さに、また根の水分分布は植物の障害や吸水状態に起因している<sup>11)</sup>。それゆえ、根や土壌水分の経時変化を計測することにより根の生理活性や吸水能力を知ることができよう。また、 $T_1$  や  $T_2$  を強調した画像により、水ポテンシャルと対応させた解析が可能になる。超電導の装置は、高い解像度の画像が得られるので細い根の生長計測や水分状態の診断に利用できる。最近、0.05mmの解像度を有する装置を用いて、蒸散により変化する1mm程度の根の断面の水分分布を計測した例も報告されている<sup>12)</sup> (口絵8)。なお、土壌で生育している根の計測に際しては、土の反磁性や強磁性による像のひずみに注意する必要がある<sup>13)</sup>。

#### 引用文献

- 1) 岩井喜典(編)(1979)。CT スキャナ, コロナ社。
- 2) Herman, G. T. (ed.). (1980). Image Reconstruction from Projections, Academic Press.
- 3) 尾上守夫(編)(1982)。医用画像処理, 朝倉書店。
- 4) Hounsfield, G. N. (1973). *Brit. J. Radio.*, **46**: 1016-1022.
- 5) 日本アイソトープ協会(編)(1984)。アイソトープ便覧 改訂3版, 丸善。
- 6) 田中栄一(1982)。応用物理, **51**: 272-278.
- 7) Onoe, M. et al. (1984). *Nuclear. Inst. Methods in Phys. Res.*, **221**: 213-220.
- 8) Lauterbur, P. C. (1973). *Nature*, **242**: 190-191.
- 9) 井上多聞(1982)。計測と制御, **21**: 939-948.
- 10) Aguayo, J. B. et al. (1986). *Nature*, **322**: 190-191.
- 11) Omasa, K. et al. (1985). *Environ. Control Biol.*, **23**: 99-102.
- 12) Brown, J. M. et al. (1986). *Plant Physiol.*, **82**: 1158-1160.
- 13) Bottomley, P. A. et al. (1986). *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **83**: 87-89.

### 5.6 広域リモートセンシング

航空機や人工衛星からの広域リモートセンシングは、農地、都市緑地、森林などの大規模な植物群落を対象とした植生調査、収量予測、活力度調査などに利用されている<sup>1-4)</sup>。TV画像計測法や熱赤外面像計測法で述べられた植物生体情報と可視から近赤外域の分光反射や熱赤外域における放射特性との関係に関する知見は、広域リモートセンシングにも利用できる。しかし、広域を対象とするために空間分解能が悪く、1画素の中に植物の群落や背景が混在した状態の空間的に

平均化された情報を含んでいるのが普通で、得られる生体情報には限界がある。このため、ランドトランスにより得られたデータと突き合わせが必要となる。ここでは、地球観測衛星ランドサットのマルチスペクトル画像と航空機による植生調査によく用いられる赤外カラー写真を例にとりあげる。また、人工衛星や航空機による広域リモートセンシングを補助するための地上でのリモートセンシングについても触れる。

#### a. 人工衛星からのリモートセンシング

地球観測用の人工衛星としては、1972年以来10余年の観測の歴史をもつアメリカのランドサット(LANDSAT)が有名である。現在、MSS(multispectral scanner)とTM(thematic mapper)を搭載した4号、5号が運用され、2機により8日周期で地球観測が実施されている<sup>5)</sup>。表5.4は、MSSとTMの基本性能である。MSS, TM共に、マルチスペクトル画像を提供するが、TMの方が

表 5.4 ランドサットのMSSとTMの基本性能

センサ	波長帯	備考
MSS	バンド 4: 0.5~0.6 $\mu\text{m}$	分解能(地表面瞬時視野) : 80 m 観測幅: 185 km
	5: 0.6~0.7	
	6: 0.7~0.8	
	7: 0.8~1.1	
TM	バンド 1: 0.45~0.52 $\mu\text{m}$	分解能(地表面瞬時視野) : バンド 1~5, 7 30 m : バンド 6 120 m 観測幅: 185 km
	2: 0.52~0.60	
	3: 0.63~0.69	
	4: 0.76~0.90	
	5: 1.55~1.75	
	6: 10.4 ~12.5	
	7: 2.08~2.35	

MSSよりも高性能で、分解能、バンドの数などの点で優れている。またTMの各バンドには、植物色素の吸収帯域(バンド1, 2, 3)、近赤外の反射の大きい帯域(バンド4)、水分状態に関係する帯域(バンド5)、植物温度を示す帯域(バンド6)といったように植物情報に関係する波長帯域が選ばれている。

図5.25は、関東地方のTMにより撮影されたバンド1~6のマルチスペクトル画像の例である。バンド1は青から緑色の波長帯の画像である。エアロゾルや薄雲などによる大気散乱の影響を最も受けやすいために、大気情報を提供する波

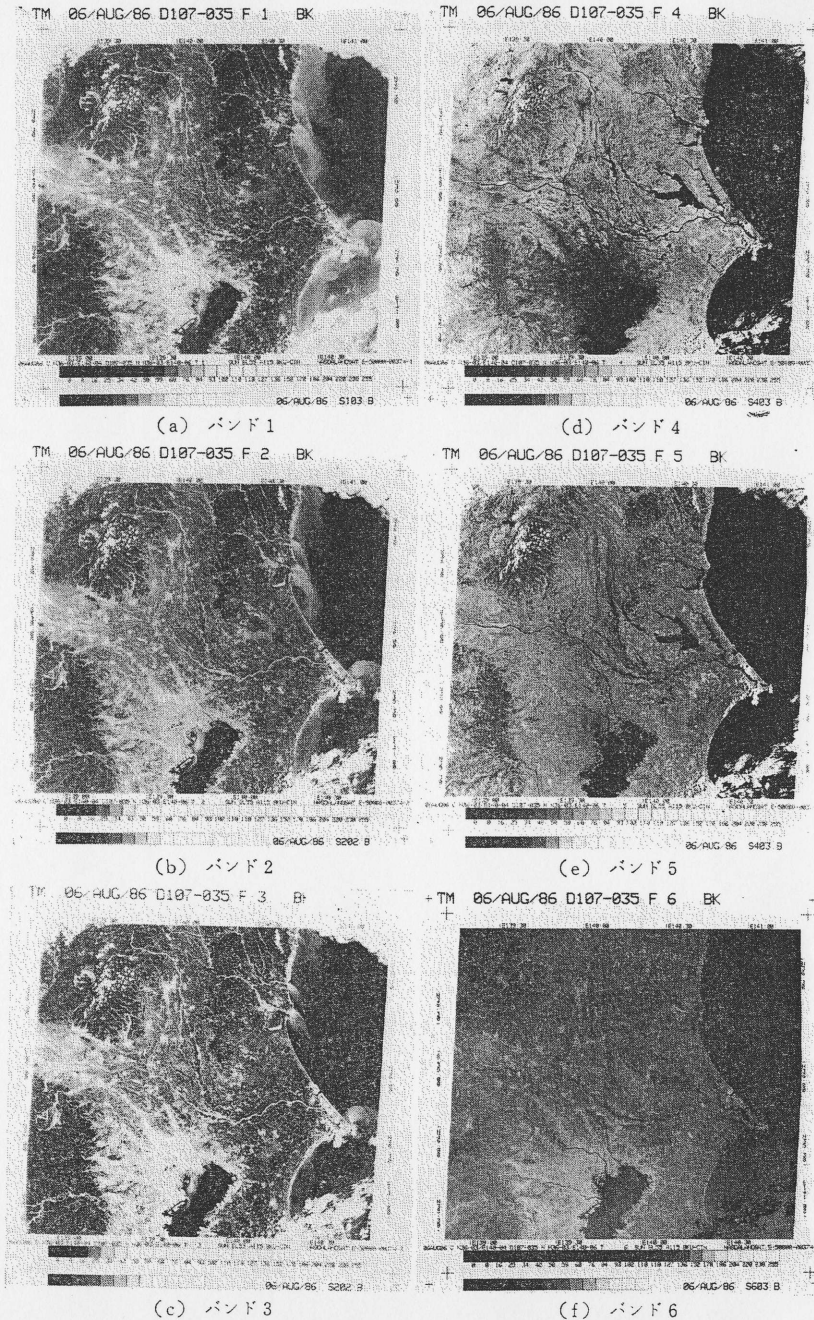


図 5.25 ランドサット TM により撮影された関東地方のマルチスペクトル画像

長として重要である。また、海や湖の浅い水底の情報を得ることもできるが、水が濁っている場合には浮遊物や懸濁物の状態を反映する。バンド 2 は緑色の波長帯である。バンド 1 と同じように大気散乱や水の濁りの影響を受けるが、その程度はバンド 1 に比べて小さい。バンド 3 は、主要な植物色素であるクロロフィルの吸収が大きい赤色の波長帯であるので、植物域が濃く、その他の陸域と明瞭に区別される。バンド 4 は植物からの反射の大きい近赤外の波長帯で、バンド 1~3 の場合とは逆に、植物域が白く、都市部が黒く見える。また、水域は黒く、濁りの影響がない。バンド 5 は、近赤外の水の吸収の影響を受ける波長帯であるので、植物や土壌の含水量を推定するのに利用できる。水陸の境界や小水路がはっきり識別でき、またバンド 4 の画像と比較して雲が白く、雪が黒ずんで映し出されるので、雲と雪の区別も可能である。バンド 6 は熱赤外の波長帯で、植物、地表面、水面の温度分布を知るのに適している。写真では、白い部分が温度が高く、黒い部分が低い。なお、熱水質地域の識別を目的としたバンド 7 の写真はここでは省略した。

リモートセンシングにより植生調査、収量予測、活力度調査などを行う場合、その前提として、土地被覆分類を行う必要がある。図 5.26 に、スペクトル画像

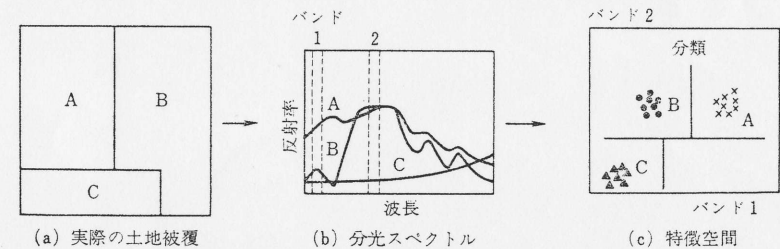


図 5.26 スペクトル画像による土地被覆分類の概念

を用いて土地被覆分類を行う場合の概念を示す。カテゴリーが少なく、各カテゴリーの濃度レベルが明確に分かれる場合には、ヒストグラムによる分類が簡単で有効である。しかし、通常このような例は稀であるので、結果に客観性をもたせるために統計的分類法が用いられる<sup>6)</sup>。土地被覆分類の場合、前もって分類に必要な情報を入手できることが多いので、判別関数法、最尤法、その他の教師付き分類法がよく用いられる。図 5.27 はランドサット MSS の画像データを植生分類に利用した例である<sup>7)</sup>。ここでは、各バンドの季節の違いによる情報を利用す

るために、MSSの各バンド×6時期からなる多次元データについて主成分分析を行い、得られた主成分スコアを使用して、探索的データ解析に基づく多重閾値

法により植生を分類した。

人工衛星を利用した農作物の広域作況調査の例としては、1974年から4年間にわたって実施されたアメリカのLACIE (Large Area Crop Inventory Experiment) 計画<sup>9)</sup>とそれに引き続き1980年から実施されたAgRISTARS (Agriculture and Resources Inventory Survey Through Aero-space Remote Sensing) 計画<sup>9)</sup>が有名である。

LACIE計画では、小麦を対象として衛星データを作目判読、作付面積の推定に利用し、世界中の小麦生産地帯での収量を予測した。これに対してAgRISTARS計画では、LACIE計画で得られた手法を小麦以外の主要穀物の収量予測に発展させ、さら

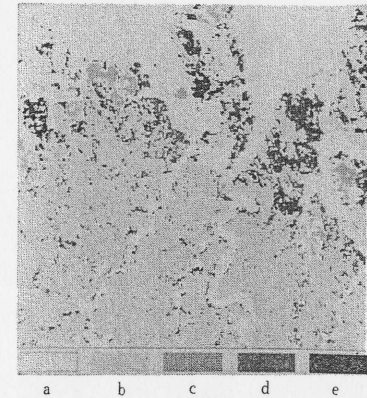


図 5.27 ランドサット MSS の画像データによる植生分類 (袴田博士提供)<sup>7)</sup>

a: 居住地・耕地, b: スギ・ヒノキ・サクラ林, c: 短草型植生, d: アカマツ林, e: クリ・コナラ林。

に衛星データを作物の生育情報を得るのに利用した。わが国では、このような大規模な農作物調査に利用した例はない。

ランドサットの画像データは、わが国では埼玉県鳩山町の宇宙開発事業団地球開発センターで受信処理され、リモートセンシング技術センター (RESTEC) から写真、電子計算機適合磁気テープ (CCT)、フロッピーディスクなどで一般に配布されている<sup>5)</sup>。また、世界中の配布センターからのデータも RESTEC を通して入手することができる。最近、ランドサット以外にも 10m の分解能をもった HRV (High Resolution Visible Instrument) を搭載したフランスの SPOT-1、海洋観測のために MESSR (Multispectral Electric Self Scanning Radiometer)、VTIR (Visible and Thermal Infrared Radiometer)、MSR (Microwave Scanning Radiometer) などを搭載したわが国の MOS-1 などが相次いで打ち上げられ、人工衛星による地球観測の体制が整備されてきている。また、気象衛星 NOAA (アメリカ) やひまわり (日本) の画像データも日本気象協会や東大生産技術研究所で配布サービスを行っている。

### b. 航空機からのリモートセンシング

航空機からのリモートセンシングは、飛行高度を数百から数万 m まで選択することができ、また搭載されるセンサも人工衛星以上に多種多様である<sup>2,10)</sup>。このため、解像度と融通性の面で優れている。実際に国土地理院や林野庁などでは、2~5年ごとに全国土の白黒あるいはカラーの航空写真を撮影しており、地形図、土地利用図、林相図の作成などに利用している。これらの写真は一般利用も容易に入手することができる。しかし、周期の短い反復観測やマルチスペクトル画像などの特殊な画像を必要とする場合には、そのつど、航空機をチャーターする必要が生じ、経費がかさむことは避けられない。マルチスペクトル画像の取扱いは、解像度が良くなることを除けば、ランドサットの場合と同じである。

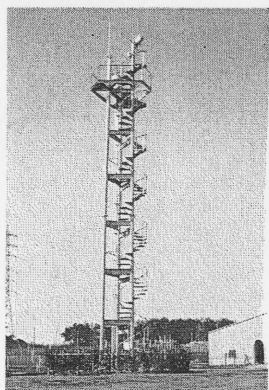
赤外カラー写真は、土地の被覆状態や植生の活力度 (植物色素の変化) が得られた写真から容易に判別できるので、航空機からのリモートセンシングではよく用いられる<sup>1,2)</sup>。赤外カラー写真で使用するフィルム (コダック エアロクローム インフラレッド 2443) は、緑 ( $<0.60 \mu\text{m}$ )、赤 ( $<0.70 \mu\text{m}$ )、および赤外 ( $<0.90 \mu\text{m}$ ) に感光する 3 層の乳剤で構成され、撮影の際、黄色のフィルターにより約  $0.50 \mu\text{m}$  以下の青の波長域は除去される。そして、これらの 3 層の乳剤に対して、それぞれ青、緑および赤の色が記録される。図 9 は、土地の被覆状態を調べるために航空機から撮影した赤外カラー写真の例である。この写真では、市街地や道路は灰色、緑地は赤色、川や裸地は深緑で示される。また、作物の種類や生育状態で色調が違っているのがわかる。

### c. 地上でのリモートセンシング

観測塔や移動計測車を用いた地上でのリモートセンシングでは、常時観測体制がとれ、現地での気象データなどと突き合わせながら画像データの解析ができるので、人工衛星や航空機による広域リモートセンシングでは得られない多くの情報を得ることができる。それゆえ、広域リモートセンシングのグランドトゥースの一手段として有用である。また、独自の目的をもったフィールド調査や施設農業にも利用できる。例えば、農耕地が一望できる小高い丘の上に設置した観測機器からは、常時、新しい画像データが提供され、生育診断が行えよう。また施設園芸などでは、生育診断のほか、栽培管理の自動化がはかれよう。

図 5.28 は、国立公害研究所の圃場実験施設の観測塔と移動計測車の写真であ

る。観測塔は圃場で栽培される作物の診断に、また移動計測車は街路樹の調査に利用されている。計測された画像データは、高速画像処理システムにより現場で



(a) 圃場実験施設の観測塔



(b) 移動計測車による街路樹の調査

図 5.28 国立公害研究所の圃場実験施設の観測塔と移動計測車

リアルタイム処理されるが、VTR に記録し、後で処理することも可能である。また離れた場所での計測には、光ファイバーを用いて高速で画像データを送ることができるデータ転送システムが用いられる。今後、気象観測を含めた地上観測体制が整備されると、広域リモートセンシングの信頼性も増し、より多くの情報提供と利用の拡大が期待できる。また、街路樹や公園など都市緑地の調査には移動計測車を用いた画像計測診断法が有効である。

(大政謙次)

#### 引用文献

- 1) キヤノンイメージ編集室(編)(1975). Remote Sensing, 泰流社.
- 2) Colwell, R.N. (1983). Manual of Remote Sensing, I, II, Amer. Soc. Photogrammetry.
- 3) 大政謙次(1984). 新農業システム総合技術(高辻正基 他編), pp.459-483, R & D プランニング.
- 4) 秋山 侃, 齋藤元也(1986). 農業土木学会誌, 54: 951-957.
- 5) 宇宙開発事業団 地球観測センター(編)(1986). 地球観測データ利用ハンドブック, リモートセンシング技術センター.
- 6) 和達清夫 他(編)(1976). リモートセンシング, 朝倉書店.
- 7) 袴田共之 他(1987). 国立公害研究所研究報告, 107: 133-153.
- 8) MacDonald, R.B. and Hall, F.G. (1980). Science, 208: 670-679.
- 9) National Aeronautics and Space Administration (1982). Agristars Annual Report—Fiscal Year 1980, AP-J0-04111, pp.1-59.
- 10) 日本リモートセンシング研究会(編)(1981). 画像の処理と解析, 共立出版.

## 6. 植物の診断

### 6.1 病害の診断

#### a. 病害, その診断と防除

動物と同様、植物も病気にかかる。病気は、その原因から伝染病と非伝染病に分けられる。伝染病には、ウイロイド、ウイルス、マイコプラズマ、細菌、放線菌、糸状菌、藻類、寄生植物などの生物寄生に原因するものがある。非伝染病には、土壌要因(養・水分の過不足あるいは不均衡、物理性の不良、酸度の不適正など)、気象要因(早・寒害、湿害、高温障害、落雷、暴風など)、産業公害(鉱毒、大気汚染、水質汚濁など)、その他農薬による薬害、作業機による損傷、植物由来の有害物質蓄積などに原因するものがある。

病気の種類は非常に多く、農作物では1種の作物につき数種類から数十種類に及ぶ。その症状はきわめて特徴的で、肉眼でも識別の容易なものから、類似していて識別困難なものまでさまざまである。

伝染病、非伝染病、いずれの場合にあっても、病気にかかった植物は放置すれば生育が衰えて枯死したり、農作物では減収したり品質が劣化して減益をまねく。したがって農作物の病気は、発生しないように予防したり、不幸にして発生をみたときはそれ以上被害が拡大しないよう防除する必要がある。特に、自ら増殖し、伝搬する能力を有する生物によりおこる伝染病の場合にはなおさらである。

病害防除の第一歩は正しい診断にある。診断を誤れば、どんなに念入りに対策を施しても効を奏するものではない。診断の目的は、病気の原因を知り、病状の進展、被害の見通し、さらには防除の要否から適切な防除方法まで指示できなければ、真の意味での診断とはいえない。

正しい診断のためには留意すべき3つの要件がある。第1は早期診断である。