

- 果実の内部品質判定(第2報), 農業機械誌, Vol. 40, No. 3 pp. 375-379 (1978).
- 15) E. E. Jr. Finney: Dynamic elastic properties of some fruits during growth and development, J. agric. Engng Res. Vol. 12, No.4, pp. 249-259 (1967).
- 16) J. A. Abotto, G. S. Bachman, J. V. Fitzgerald and F. J. Matusik: Acoustic vibration for detecting textural quality of apples, Proc. Amer. Soc. Hort. Sci. Vol. 93, pp. 725-737 (1968).
- 17) 中馬豊・志賀徹・疋田慶夫: 振動・衝撃利用による果実の内部品質判定(第1報), 農業機械誌, Vol. 39, No. 3, pp. 335-341 (1977).
- 18) 法貴誠・伊藤信孝: 超音波による大豆の力学的特性の測定, 農業機械誌, Vol. 36, No. 4, pp. 555-557 (1975).
- 19) 中馬豊・キョウセイ・岩元陸夫: 果実の光学的性質とその選別工程への利用(第1報), 農業機械誌, Vol. 35, No. 4, pp. 416-423 (1974).
- 20) 中馬豊・河野澄夫・キョウセイ: 果実の光学的性質とその選別工程への利用(第2報), 農業機械誌, Vol. 37, No. 4, pp. 587-592 (1976).
- 21) 中馬豊・志賀徹・守田和夫: 光反射利用による温州ミカンの選別自動化に関する研究(第1報), 農業機械誌, Vol. 40, No. 3, pp. 389-395 (1978).
- 22) 桜井靖久: 光の医学への応用, 計測と制御, Vol. 20, No. 9, pp. 40-44 (1981).
- 23) 丹羽登・佐下橋市太郎・寺西昭男・橋本康・保立和夫・吉田安徳『ライフサイエンスを測る』オーム社, 1983, p. 2-4.
- 24) 丹羽登『超音波計測』昭晃社, 1982, p. 5.
- 25) 橋本康: 植物生体情報と環境の計測[7], 農業及び園芸, Vol. 57, No. 10, pp. 101-105 (1982).
- 26) 中馬豊・中司敬: 果実・野菜の光学的性質とその選別工程への利用(第4報), 農業機械誌, Vol. 38, No. 2, pp. 217-223 (1976).
- 27) 中馬豊・大浦正伸: 新 DLE 装置による農産物の選別に関する研究, 農業機械誌, Vol. 43, No. 4, pp. 575-580 (1982).
- 28) モモの熟度判定への抗抗値の利用, 農業及び園芸, Vol. 41, No. 12, pp. 1829 (1966).
- 29) 小林一・三輪精博・後藤滋: X線による結球ソサイの収穫時期判定に関する研究, 農業機械開西支報, Vol. 36, pp. 38-40 (1974).
- 30) D. H. Lenker and P. A. Adrian: Use of X-ray for selecting mature lettuce heads, Trans. of ASAE, Vol. 14, No. 5, pp. 894-898 (1971).
- 31) R. E. Garrett and W. K. Talley: Use of gamma ray transmission in selecting lettuce for harvest, Trans. of ASAE, Vol. 13, No. 6, pp. 820-823 (1970).
- 32) 土井淳多: パターン処理による農作物のオンライン自動計測, 農業機械誌, Vol. 38, No. 3, pp. 353-358 (1976).
- 33) 小平俊実: ビデオセンサによる青果物選果システム, 冷凍, Vol. 57, No. 661, pp. 1151-1154 (1982).
- 34) 梅田重夫・チャウビンダック・毛利健太郎: 農産物の形状解析, 農業機械誌, Vol. 43, No. 4, pp. 599-604 (1982).
- 35) 高辻正基・橋本康・鶴岡久『野菜工場の技術と経済性』シーエムシー, 1983, p. 69, p. 175.
- 36) 西村功・川村恒夫・森田一恵・他: 果菜類の物性(第4報), 農業機械 42 回講要旨, pp. 101 (1983).

〈森本哲夫〉

第4節 リモートセンシング

人類最初の人工衛星スプートニク1号が、1957年に打上げられて以来、人工衛星からの地球観測の発達は目覚ましく、地球観測衛星ランドサットを始め、数多くの人工衛星が地球探査の目的で打上げられている^{1,2)}。これらの衛星から系統的な地球表面の反復観測データが送られてきており、わが国でも、ランドサット、NOAA、GMS(ひまわり)などの画像データが直接受信され、容易に入手できるようになっている^{2,3)}。このような状況において、わが国の農業の分野においても、近年、リモートセンシングに関する関心が急速に高まっており、今後の農業政策に重要な役割を果たすものと期待されている。

他方、機械化農業あるいは施設農業、さらに一步考え方を進めた植物工場⁴⁾と言った未来型の農業において、植物の生育・生理反応を非破壊、非接触で、画像情報として遠隔計測し、収量や質の向上、あるいは生産コストの低減に利用することなどが考えられている^{5,6)}。また、未来型の農業には、作業用ロボットのセンサとしてのパターン計測技術の開発も含まれている。これらの画像計測は、通常使われる意味でのリモートセンシングには属さないが、農業の

第4章 生体情報の計測とそのモデル

分野では、技術的に共通する点が多く、互いに関係する情報も多いので、広義のリモートセンシングとして統一的に考えた方が良いでしょう。

本節では、以上のような観点からリモートセンシングについて解説する。

1 農業における役割

農業におけるリモートセンシングの利用分野の一覧を表-1に示す。ここでは、現在実際に利用されている分野だけでなく、将来利用が予想される分野も併記した。

表-1 農業におけるリモートセンシングの利用分野

- ・ 作付面積の推定
- ・ 作物の収量予測
- ・ 作物の生育管理
- ・ 病虫害・環境汚染害の防除
- ・ 農作業の自動化
- ・ 土壌分類および管理
- ・ 栽培技術の開発
- ・ 育種
- ・ 農作業用教育システム
- ・ その他

人工衛星からのリモートセンシングは、観測機器の分解能が、1982年に打上げられたランドサット4号の農業への利用を特に考慮したTM (Thematic Mapper)でも約30mであり、また、観測周期が16日である。それゆえ、地球規模あるいは大規模農業地域における作付面積の調査、収量予測、その他の農業に関する情報を得るには有効であるが、わが国のように雨が多く耕作面積の狭い集約農業地域では、得られる情報に限界がある。しかし、航空機からのリモートセンシングに比べて、姿勢、高度、速度が比較的安定している、一度に広範囲の観測ができる、定期的に繰返し観測ができるなどの点に特徴があり⁷⁾、今後、新しいデータソースとして普及することが期待されている。その際、従来の航空機によるリモートセンシングや、地上でのランドトランスの情報との関係を十分に吟味することにより、利用範囲をより拡大することができよう。

航空機からのリモートセンシングは、人工衛星からのそれに比べて、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年毎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、林相図の作成やその他に利用している⁸⁾。これらの写真は、一般利用者が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、その都度、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。

地上でのリモートセンシングは、大別して2つの利用形態に分けることができる。1つは、人工衛星や航空機による広域リモートセンシングの補助的な役割であり、ランドトランスやフィールド調査への利用である。たとえば、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よう。また、フィールド調査のための移動計測車により、任意の場所での画像データを得ることもできよう。この種のリモートセンシングは、今後、画像処理装置の低廉化と相俟って発展することが予想され、人工衛星や航空機からのリモートセンシングの信頼性を飛躍的に改善するであろう。

ほかに施設農業における利用が考えられる。この種のリモートセンシングは、現在まだ画像計測およびその処理装置が高価であるのと、この分野がその緒についたところで、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を行っている段階であるので、実用には至っていない。しかし、最近の画像処理装置の発展や低廉化は、やがて、この分野のリモートセンシングも飛躍的に発展させるであろう。施設農業において、マイクロコンピュータが実用段階に入った今日、栽培者の目に代わって、画像センサが用いられる時代が間近のように思える。その時、栽培者は、ロボットに置き換えられ、形態情報や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、省力化、エネルギーの効率的利用が図られるであろう。また、この分野への知識工学を応用したシステム制御の導入にも、画像センサは大きな役割を果たすであろう。

2 リモートセンシングの原理

2.1 電磁波の伝える情報⁹⁾

リモートセンサにより画像としてとらえられるものは、物質の表面からの電磁波である。電磁波は、周波数、振幅、伝搬方向および波面の4つの量を決めると規定される。周波数は広い意味での物の色を意味し、伝搬方向が空間的な配置や形を与える。振幅はその空間的な情報の濃淡を与え、反射における波面の変化もまた空間的な情報となる。このことから、リモートセンシングにおいては、振幅、伝搬

方向、波面の中に含まれる空間的な情報と、周波数に含まれる広い意味での色の情報とがともに重要であることがわかる。それゆえ、リモートセンシング用のセンサは、広い範囲を高分解能で測るとともに、いろいろな波長、すなわち、マルチスペクトルバンドで同時に測るという両面が要求される。

2.2 利用される電磁波の波長範囲

人間の目は、電磁波のうちで非常に狭い波長領域（可視光）のみを感じ、対象に関する情報を得ている。リモートセンシングにおいては、可視光だけでなく、広い波長範囲にわたる電磁波を検知する画像センサを用いて、人間の目では見ることでできない波長での対象に関する情報を得ることができる。図-1に、電磁波の波長と各波長域における

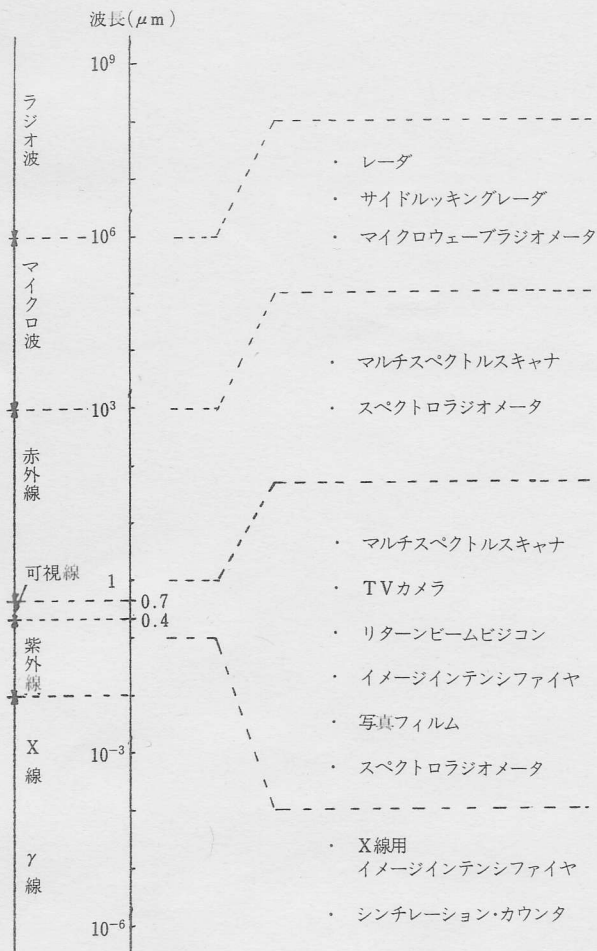


図-1 電磁波の波長と各波長域における代表的なセンサ

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、および対象とセンサ間に介在する大気の影響が小さいことが必要である。このため、人工衛星や航空機からのリモートセンシングでは、主として近紫外から熱赤外およびマイクロ波領域が使用さ

れている。

2.3 物質の分光特性と得られる情報

物質は、電磁波の各波長において特有の反射あるいは放射特性を持っている。ここでは、近紫外から熱赤外およびマイクロ波領域について述べる。

2.3.1 近紫外から近赤外領域

この波長領域は、生物の営みにとって最も重要な太陽光に関係する領域であり、人間の目は、この領域の可視光を検知し、対象を認識している。この意味から、この波長領域は、リモートセンシングにおいて特に重要である。図-2に、地上に到達する太陽光の分光特性を示す。太陽光は、

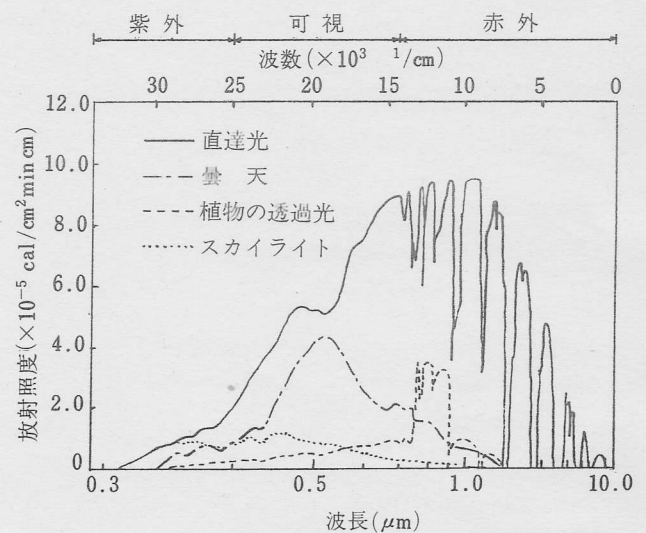


図-2 地上に到達する太陽光の分光特性 (Gates et al¹⁰)

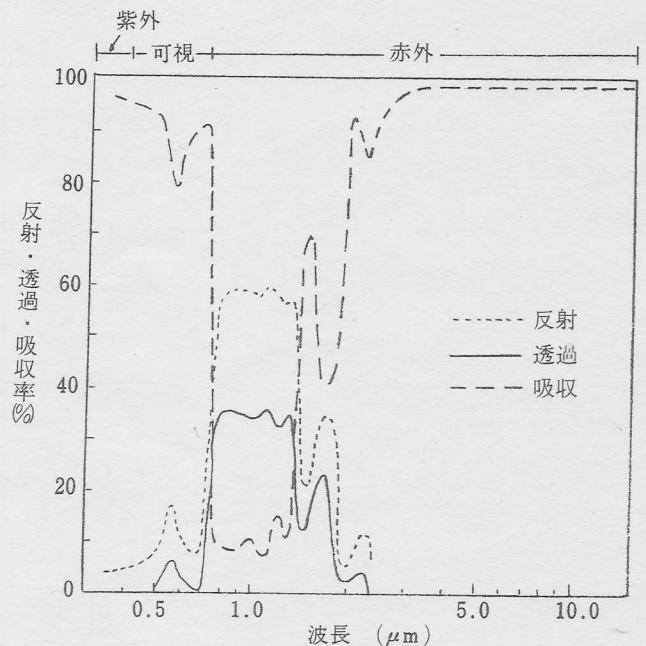


図-3 健全な植物葉の分光反射・透過および吸収特性 (植物：セイヨウキョウチクトウ) (Gates et al¹⁰)

第4章 生体情報の計測とそのモデル

約 6000 K の黒体放射に近似できるが、地上に到達するまでに大気における吸収や散乱により図のような分光特性になる。また、人工照明における光源も、可視から近赤外領域にエネルギーの中心波長があるものが用いられている。

図-3 に、健全な植物葉の分光反射、透過および吸収特性を示す。植物葉に入射した光は、組織で吸収あるいは乱反射される。このため、この領域の分光特性は、葉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。図-4~図-6 に、植物の種類、器管、生育状態、水分状態などによる分光反射特性の違いを示す。概して、種類や生育状態の違いは、植物色素の吸収に関する可視光が、また、水分状態は、構造や水の吸収に関する近赤外光が情報の伝達に関与していることがわかる。また、0.8μm 以下の領域は、植物の生理反応にとって重要であり、光合成や光形態形成のような生理反応に関しての光の吸収や蛍光、遅延蛍光などを発することが知られている。それゆえ、この波長領域は、植物生育の特微量や生理反応に関する情報を得るのに重要である。

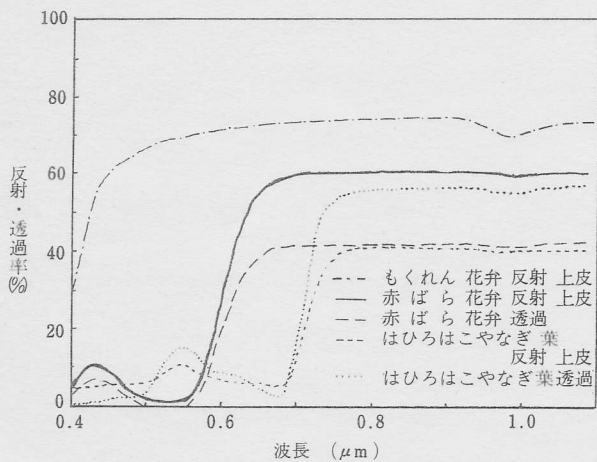


図-4 植物の種類および器管による分光特性の違い (Gates et al¹⁰⁾)

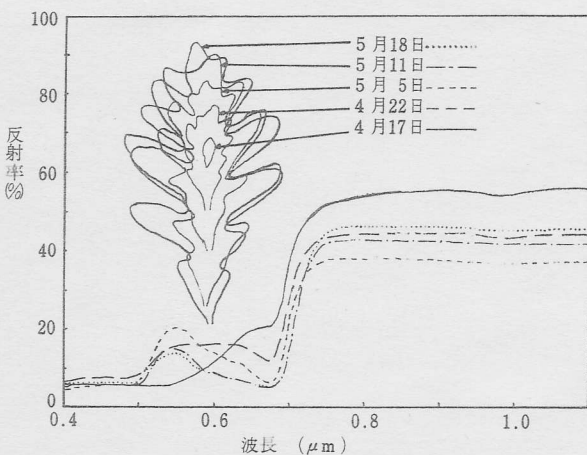


図-5 植物の生育状態による分光特性の違い (植物: コナラ属) (Gates et al¹⁰⁾)

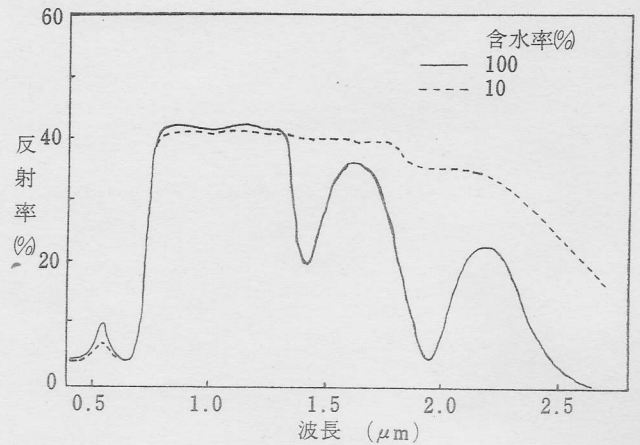


図-6 植物の水分状態による分光反射特性の違い (植物: 豆) (Knippling¹¹⁾)

図-7 に、土の種類あるいは水分状態による分光反射特性の違いを示す。土の分光反射特性は、土の構造、水分状態、固相の構成成分などにより異なるので、この波長域は、土の状態を知るための情報としても重要である。

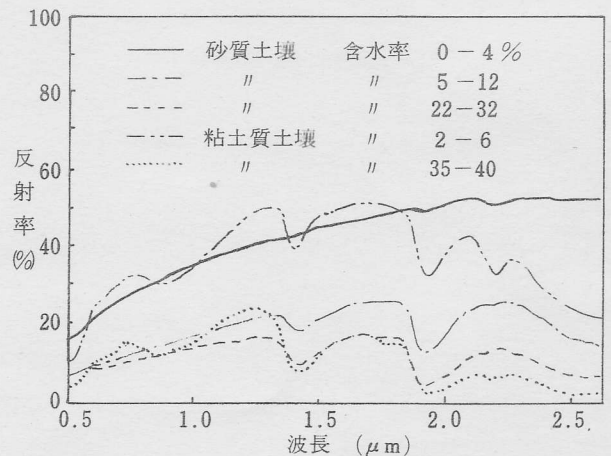


図-7 土壌の含水率の違いによる分光反射特性の違い (Hoffer and Johannsen¹²⁾)

以上、農業において関係の深い植物や土の分光特性について述べたが、個々の物質は種々様々な分光特性を持っている。これらの分光特性の違いは、リモートセンシングにおいて、実際に、土地被覆、植物種、病虫害、その他の分類や評価に利用されている。

2.3.2 熱赤外領域

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 λ の電磁波の強度を W_λ とすると、

$$W_{\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 \{ \exp(C_2/\lambda T) - 1 \}} \dots\dots\dots(1)$$

が成立する。ここで、C₁ および C₂ は、光速その他に関係

する定数である。式(1)を図化したのが図-8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

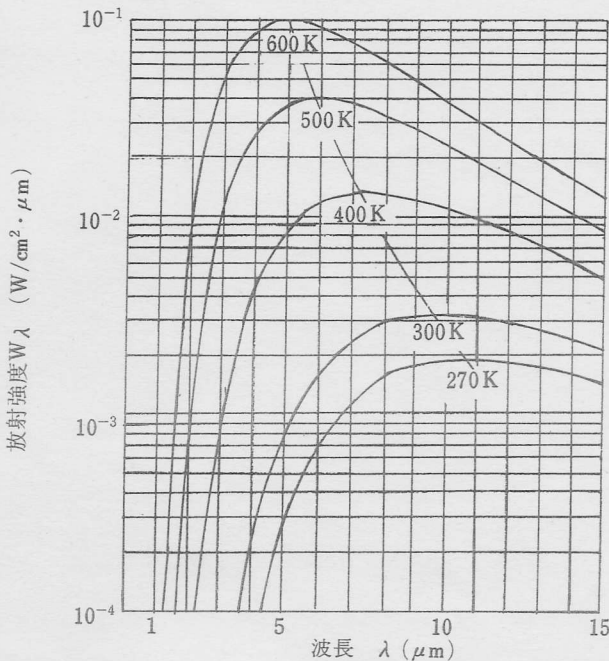


図-8 黒体放射の分光強度 (日本電子提供)

最大になる波長 λ_{max} は短波長側にずれる。 $\lambda_{max}(\mu m)$ は、式(1)から

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} \dots\dots\dots(2)$$

となる。また、全放射強度 W_0 は、式(1)を波長 λ で積分して、

$$W_0 = \sigma T^4 \dots\dots\dots(3)$$

となり、絶対温度の4乗に比例する。ここで、 σ はステファン・ボルツマン定数である。一般の物体の放射は、波長による強度分布が黒体放射とは異なる。しかし、放射強度 W を物体と同じ温度の黒体放射を標準にとり、それに放射率 ϵ を掛けた次式で表すと便利であり、通常、 ϵ の大きい値の物体に対しては有効である。

$$W = \epsilon \sigma T^4 \dots\dots\dots(4)$$

図-8 からわかるように、地上の常温の物体からの放射の中心波長は $10\mu m$ 付近であり、この波長領域では、太陽からの放射は無視できる。また、 $8 \sim 13\mu m$ の領域は、大気による散乱や吸収も少なく、大気の窓と呼ばれる波長領域である。それゆえ、リモートセンシングでは、この波長領域の放射を計測し、対象の温度を推定する。特に、農業に関係する植物、土、水などの物質のこの波長領域の放射率は、植物で $0.95 \sim 0.99$ 、土で $0.92 \sim 0.95$ 、水で約 0.96 であり1に近い。このため、この波長領域の放射を計測することにより、これらの物質の正確な表面温度を推定することができる。

2.3.3 マイクロ波領域^{1,13)}

近紫外から熱赤外領域の電磁波は、雲や雨などを透過しないので、これらの電磁波を使うリモートセンシングでは、天候上の制約が大きい。しかし、マイクロ波は、雲や雨を通すので、天候に影響されない特徴がある。

マイクロ波においても、自然界の物質は、その温度に対応した電波を放射している。電波領域におけるプランクの法則によれば、放射率 ϵ の物質の単位表面積、単位周波数、単位立体角当りの放射電力 B は、

$$B = \frac{2\kappa\epsilon T}{\lambda^2} \dots\dots\dots(5)$$

で近似的に与えられる。ここで、 κ はボルツマン定数である。熱放射をある周波数帯域で測定する場合の放射電力 W は、

$$W = \int B d\lambda \propto \epsilon T \dots\dots\dots(6)$$

となり、放射率と絶対温度の積に比例する。また、 $T_B = \epsilon T$ を輝度温度あるいは等価温度という。

マイクロ波における物体の放射率は、その表面の温度、粗さ、誘電特性、成分組成のほか、測定周波数、波面その他数多くのパラメータの関数である。したがって、対象の輝度温度を受動型センサを用いて測定することにより、単に表面温度の分布を測ること以外に、放射率の変化を媒介にして対象の状態に関する知識を得ることができる。しかし、マイクロ波は、波長が長いため、一般にあまり高い分解能を期待することはできない。

マイクロ波では、上述の受動型センサの他に、自ら発射した電波が、対象物に反射、散乱されて戻ってきたものを受信測定する能動型センサが使用できる。送信電力 P_t であるマイクロ波の対象物からの後方散乱受信電力 P_r は、ソーダ方程式によって、

$$P_r = \int_A \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \sigma^0 \frac{A_r}{4\pi R^2} dA \dots\dots\dots(7)$$

で与えられる。通常送受信アンテナは同一であるので、

$$A_r = \frac{G_t \lambda^2}{4\pi} \dots\dots\dots(8)$$

の関係を用いて、

$$P_r = P_t \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \int_A \sigma^0 \frac{G_t^2}{R^4} dA \dots\dots\dots(9)$$

で与えられる。ここで、 G_t 、 R 、 A_r 、 A 、 σ^0 は、それぞれ、アンテナ利得、アンテナと測定対象との距離、受信アンテナの開口面積、照射領域、単位面積当たりの散乱断面積(または散乱係数)である。散乱係数は、測定対象の表面および表面に近い内部の状態(粗さなど)、物体の性質(誘電率など)、電波の周波数、波面その他に関係する。それゆえ、

第4章 生体情報の計測とそのモデル

能動型センサを用いて、測定対象物の散乱係数を測定することによって、その対象物の状態に関する情報を得ることができる。農業において、これらのマイクロ波の計測は、土の組成、含水率、植生の分布などに関する情報を提供する。

3 リモートセンサ

3.1 センサの種類

各々の使用目的に応じて、種々のリモートセンサが開発されている。これらを、計測方式に基づいて分類したのが図-9である。リモートセンサは、対象から反射または放

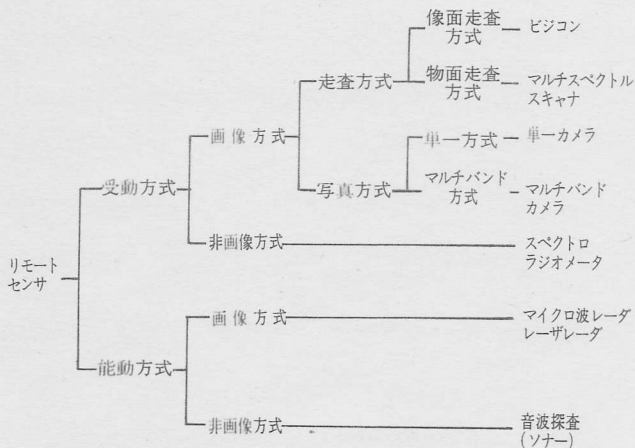


図-9 リモートセンサの分類

射された電磁波エネルギーを測定するが、太陽光などの自然界に存在する電磁波を利用する受動方式と、レーザ光やマイクロ波などの電磁波を自ら発射し、その反射波を測定する能動方式に大別することができる。以下に、その用途別にいくつかのセンサについて述べる。

3.2 人工衛星に搭載されるセンサ

地球観測用の人工衛星は、今日までに、ランドサット、シーサット、NOAA など数多く打上げられている。これらの衛星に搭載されるセンサとしては、TV カメラ、スキャナ、レーダ、分光計、放射計など多種多様である。ここでは、農業における利用に関係の深い人工衛星であるランドサットのセンサについてふれる。

ランドサットは、1号が1972年に打上げられて以来、1975年に2号、1978年に3号、1982年に4号が打上げられており、現在は、2~4号が活動している。これらのランドサットには、マルチスペクトルスキャナ(MSS)、リターンビームビジコン(RBV)、セマティック・マップ(TM)などが搭載されており、各衛星は16~18日の周期で同じ地域

を観測している。

3.2.1 マルチスペクトルスキャナ^{7,14,15)}

MSSは、対象を走査してマルチスペクトル画像データを得る装置である。図-10に、ランドサットのMSSの地

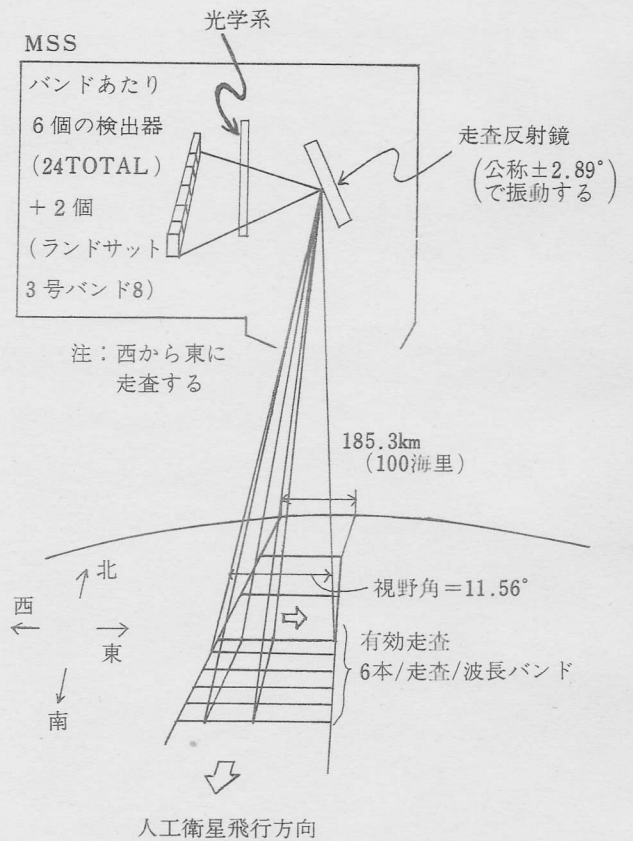


図-10 ランドサットのMSSの地上走査パターン
(地球観測データ利用ハンドブック¹⁴⁾より)

上走査パターンを示す。この装置は、進行方向と直角に鏡を振動させて地上を約185kmの幅で走査し、地上からの電磁波を分光器で分光した後光電素子により電気信号に変換するように設計されている。

表-2にランドサット1~4号のMSSの基本性能を示す。バンド4~6には光電子増倍管、バンド7にはシリコンフォートダイオードが各6個使用されており、鏡の1回の走査により6本の走査線のデータが得られる。3号の

表-2 ランドサットのMSSの基本性能^{14,15)}

項目	数値等	備考
波長帯	バンド4: 0.5~0.6 μm	可視(緑~橙)
	5: 0.6~0.7	"(橙~赤)
	6: 0.7~0.8	近赤外
	7: 0.8~1.1	"
	8: 10.4~12.6	熱赤外 (3号のみ故障中)
観測範囲	185 × 185 km ²	
解像度	83m(可視近赤外)	地表面瞬時視野 (IFOV)

MSS のみにあるバンド 8 には、2 個の HgCdTe が検出器として使用されているが、打上げ以来不調で、現在運用を中止している。なお、バンド 4～7 で識別できる地表上の大きさ（地表分解能）は、約 80 m である。

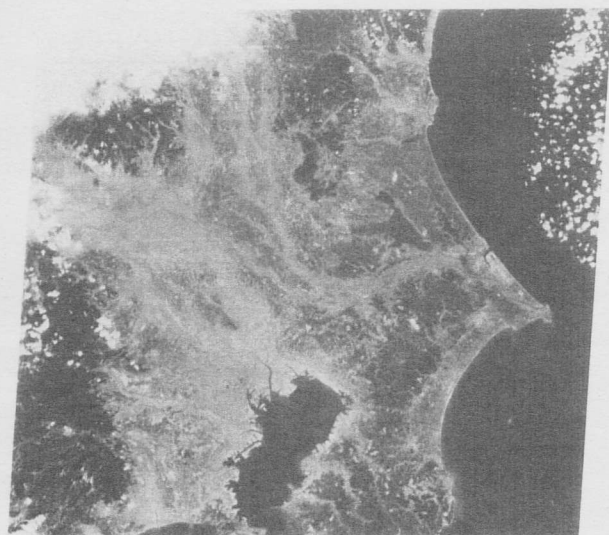
写真-1 に、関東地方の MSS により撮影されたバンド 4～7 のスペクトル画像の例を示す。これらのバンドの画像には以下のような特徴がある。バンド 4 は、緑から橙色の波長帯の画像であり、比較的コントラストが低い。そして、人間の目で認識する濃淡に最も近い。また、エアロゾルや薄雲などの散乱の影響を受けやすく、海や湖の浅い水底の情報を得ることができるが、水が濁っている場合には、

浮遊物や懸濁物の状態を反映する。

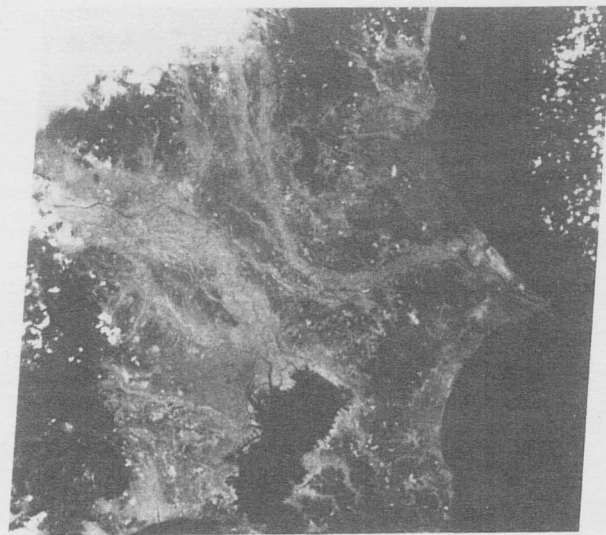
バンド 5 は、赤色の波長帯の画像であり、市街地や乾燥した裸地などは明るく、森林や海は暗く観察される。バンド 4 に比較して、大気中での散乱の影響は少ない。

バンド 6、7 は、人間の目には感じない近赤外の波長帯である。森林を含めた陸域は、雲や地形による影と河川、湖などを除いて明るく見え、逆に海面は暗く見える。波長帯は、水域と陸域の境界線の抽出や影を利用した地形の読み取りに利用される。大気中の散乱の影響が小さく、コントラストが非常に高いのが特徴である。

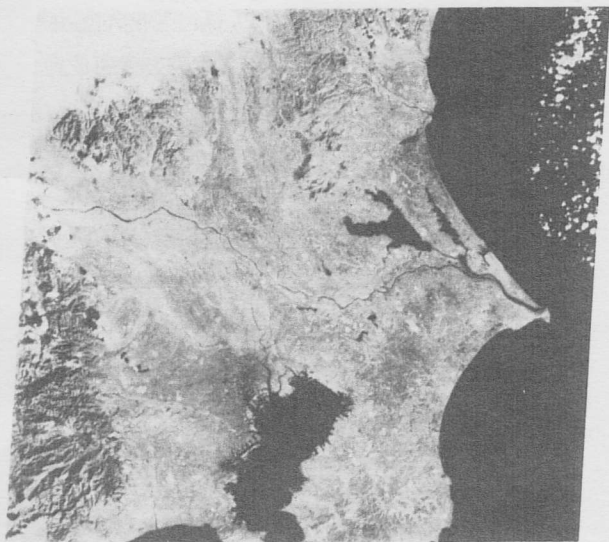
3.2.2 リターンビームビジョン^{7,14)}



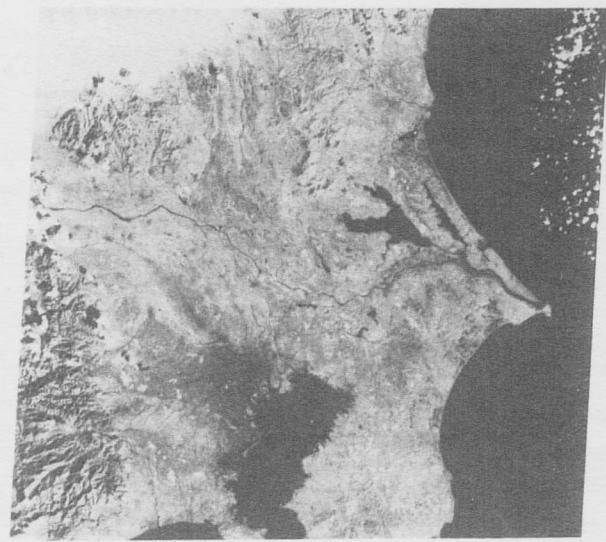
(a)バンド 4



(b)バンド 5



(c)バンド 6



(d)バンド 7

写真-1 ランドサット MSS により撮影された関東地方のスペクトル画像（宇宙開発事業団提供）

第4章 生体情報の計測とそのモデル

RBV は、高解像度ビジコンに電子増倍部が付けられた構造になっている。光電導面に電荷が蓄積され、これを電子ビームで走査し、さらに、折り返された電子ビームを2次電子増倍して信号を取り出す。したがって、約0.47~0.83 μm の波長帯で高感度の信号検出が可能である。ランドサット1, 2号には3台のRBVにより185 \times 185 km^2 のマルチスペクトル画像(0.475~0.575 μm , 0.580~0.680 μm , 0.690~0.830 μm)を得るシステムが搭載され、3号には2台のパンクロマチックカメラ(0.505~0.750 μm)により1台当たり98 \times 98 km^2 の隣接した範囲を撮影するシステムが搭載されている。なお、RBVは、MSSの約2倍の解像力を持っているが、シェーディングによる画面の部分的な濃度むらがシェーディング補正処理後も残留するため、地表の輝度変化と区別する必要がある。

3.2.3 セマティック・マップ¹⁵⁾

TMは、ランドサット4号に搭載されているセンサで、MSSの性能をさらに向上させたものである。図-11に、

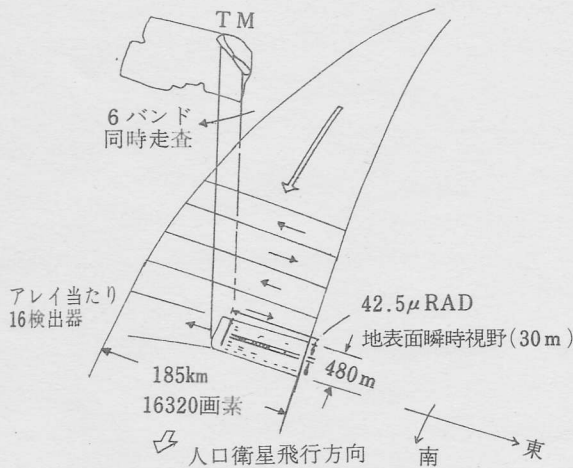


図-11 ランドサット4号搭載 TM の地上走査パターン (Salomonson¹⁵⁾)

TMの地上走査パターンを示す。TMもMSS同様対物面走査方式のセンサで、軌道方向の走査は衛星の運動により、それと直角方向の走査はTM内で行う。可視域は3バンド、近赤外3バンド、熱赤外1バンドを有し、705 kmの高度から地上を約185 kmの幅で走査する。表-3にTMの基本性能を示す。このセンサのバンドは、図-3~図-6の植物の分光反射特性と比較してもわかるように、緑の反射が大きい帯域(バンド2)、クロロフィルの吸収帯域(バンド3)、近赤外の反射が大きい帯域(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。また、解像度もバンド1~5および7で30 m、バンド6で120 mであることから、現在まだわが国での受信

表-3 ランドサット4号のTMの基本性能

(Salomonson¹⁵⁾)

項目	数値等	備考
波長帯	バンド1: 0.45~0.52 μm	
	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	
観測範囲	185 km	
解像度	30 m(バンド1~5,7)	地表面瞬時視野 (IFOV)
	120 m(バンド6)	

体制は整っていないが、今後、MSS以上に農業に関係する有用な情報を提供するものと期待されている。

3.3 航空機に搭載されるセンサ

航空機は、機種を変えることにより、その高度を数百~数万 mまで選択することができ、搭載されるセンサも、人工衛星同様に多種多様である。ここでは、その主なものについて簡単に述べる。

3.3.1 航空カメラ⁸⁾

対象を2次元的に記録することのできる写真は、有効な観測手段の1つである。航空カメラとしては、航測カメラやマルチバンドカメラなどがある。航測カメラは、地形測量や地図作成などに用いられるもので、解像力が高く、歪みが少ない高精度カメラである。マルチバンドカメラは、フィルムとフィルタの種類を組み合わせるマルチスペクトル写真を得るために用いる。方式としては、マルチカメラ方式、マルチレンズ方式、ビームスプリット方式などがある。現在、最もよく用いられているマルチバンドカメラは、4バンドのもので、普通青、緑、赤および赤外の帯域が利用される。しかし、フィルムの感光特性は、赤外線フィルムを用いても0.25~0.9 μm 程度で、MSSに比べて利用帯域が狭い。また、画像解析する場合SNが悪くなる。

3.3.2 マルチスペクトルスキャナ⁷⁾

航空機用のMSSも基本原理はランドサットのそれと同じである。ただし、航空機用のMSSは、チャンネル数が多く、高度が低いので、地上分解能が高く、地上走査幅が狭くなる。たとえば、デグラスDS-1250の場合、チャンネル数は11で、高度が1 kmであれば、分解能および走査幅は、それぞれ、2.5 m、1.6 kmである。

3.3.3 サイドルッキングレーダ^{7,13)}

サイドルッキングレーダ (Side Looking Airborne Radar, SLAR) は、マイクロ波を利用した能動方式のレーダセンサであって、航空機上のアンテナから進行方向に直角に電波を発射し、地表物体からの反射波を同じアンテナで受信する。反射波が戻ってくるまでの時間差が大きいほど遠方の物体からの反射波となるから、航空機の進行と合せて2次元の画像を得ることができる。このレーダには、実開口式と合成開口式 SAR (Synthetic Aperture Radar) がある。実開口式では、測定対象までの距離を R、波長 λ 、アンテナ径を D とすると、分解能 δ は、

$$\delta = \frac{\lambda R}{D} \dots\dots\dots(10)$$

で与えられる。これは、 $\lambda=1\text{cm}$ で $D=50\text{cm}$ のアンテナを使った場合、高度 1 km で地上分解能 20 m、高度 1000 km で 20 km に相当する。これは、高い高度を飛ぶ衛星に用いるには不利であり、光学センサの分解能に比べて見劣りする。これに対して、SAR では、パルスエコー方式とホログラフィ技術を巧みに組合せて、その分解能を式(10)の制約から解放し、 $\delta=D$ となるように改善している。実際には、S/N の関係で分解能の改善には限界があるが、写真に劣らないほどの高い分解能の画像が得られている。たとえば、シーサット 1 号の SAR では、高度 800 km の軌道上から地上分解能 $25 \times 25 \text{ m}^2$ の映像が得られている。

その他航空機に搭載されるセンサは、可視、赤外、マイクロ波領域の放射計、TV カメラ、レーザーけい光センサ、相関分光計など様々である。

3.4 地上で使用されるセンサ

地上で使用されるセンサも、その用途に応じて種々多様である。ここでは、フィールド調査や施設農業における計測機と接続したオンライン計測に有用であろうと考えられるいくつかの可搬型のセンサについて述べる。

3.4.1 計測用 TV カメラ

近紫外から近赤外領域を対象とし、オンラインで計測機と接続できる画像センサとしては、撮像管あるいは固体撮像素子を用いた TV カメラがある。現在、一般に用いられる TV カメラの多くは撮像管を使用したものである。この種のカメラには、 $0.2 \sim 2 \mu\text{m}$ まで種々の分光感度特性を有するものがあり、最近、計測用に図形歪、画像安定度、シェーディングなどを補正したものが市販されている。図-12 に、代表的な撮像管の分光感度特性を、また、表-4 に、その他の特性の一覧を示す。各撮像管は、感度、解像度、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必要がある。また、さらに感度が必要な場合には、イ

表-4 撮像管の特性一覧 (浜松ホトニクス提供)

撮 像 管	特 性					
	分光感度	解像度	感度	残像	焼付	r 特性
可視ビジコン	可視	高	中	中	有り	0.65
カルニコン	可視	高	高	中	なし	0.95
シリコンビジコン	可視~近赤外	中	高	小	なし	1
赤外ビジコン	可視~赤外	中	中	大	有り	0.55~0.7
プランビコン	可視	高	中	極小	なし	0.95
S I T	可視	中	超高	中	なし	1
紫外ビジコン	紫外~可視	高	高	中	なし	0.95
サチコン	可視	高	中	極小	なし	0.95
ニュービコン	可視	高	高	中	なし	1

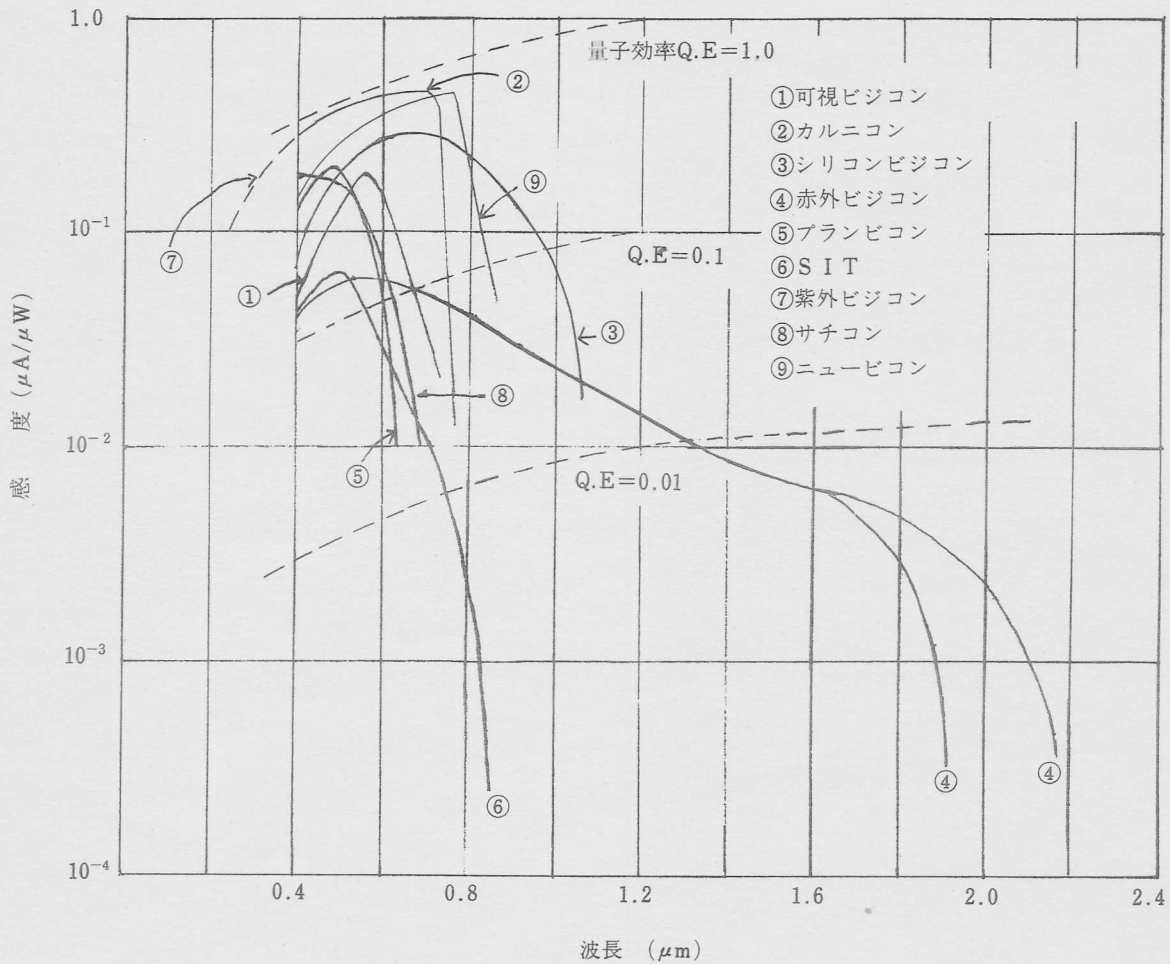
メージインテンシファイヤ (I. I.) を TV カメラに接続するとよい。

他方、固体撮像素子を用いた TV カメラ¹⁶⁾ は、現在商品化がその緒についたばかりであるが、小型軽量化、低電圧低電力、高信頼性、長寿命、さらに焼付残像がなく、色再現性、色均一性が期待できる。また、デジタル走査を行えば、位置指定が正確にできる特徴があり、2次元の情報処理やパターン認識への応用、あるいは、位置指定が正確にできる特徴を活用した各種の計測に利用でき、農業分野への活用が期待できる。

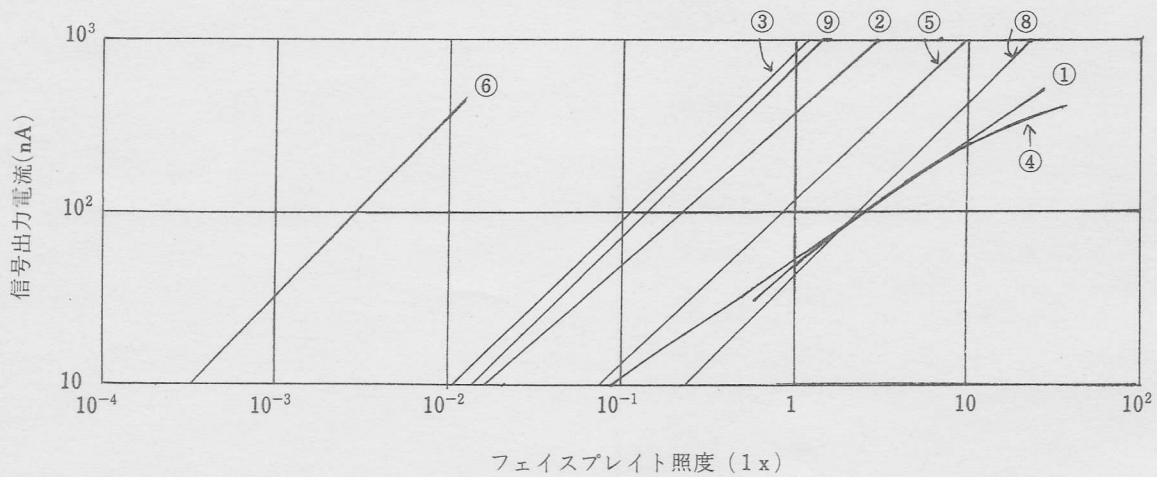
これらの TV カメラと各種光学フィルタを組合せることにより容易にマルチスペクトル画像を得ることができる。この特殊な場合が、RGB 画像の合成によるカラー画像である。カラー画像は、人間の目の色調との対応による解析には適しているが、物質の分光特性との対応による解析には、スペクトル画像をそのまま用いるのが合理的である。

3.4.2 赤外線カメラ

光・機械走査型カメラは、人工衛星や航空機に搭載されているスキャナを小型化したものと考えてよい。それゆえ、原理的には、検出器として、フォトマル ($0.2 \sim 0.9 \mu\text{m}$)、シリコンフォトダイオード ($0.4 \sim 1.1 \mu\text{m}$)、PbS ($0.6 \sim 2.5 \mu\text{m}$)、InSb ($1 \sim 5 \mu\text{m}$)、HgCdTe ($5 \sim 14 \mu\text{m}$) などを用いることにより、近紫外から熱赤外領域まで比較的広い波長領域をカバーできるが、光学機械系の走査により画像を得る方式であるので、装置が複雑で高価になる。それゆえ、TV カメラで計測できる波長領域でのこのカメラの必要性はないが、温度計測のための熱赤外領域の高い精度での計測は、現在のところこの方式に頼らざるをえない。InSb や HgCdTe の検出器を用いた物体の表面温度計測用のサーモグラフィ装置が市販されており、計測機とオンラインで接続したシステムも見られる^{17,18)}。しかし、熱赤外領域にお



(a) 分光感度特性



(b) 光変換特性

図-12 撮像管の分光感度特性および光変換特性 (浜松ホトニクス提供)

いても、ターゲットに焦電材料を用いた赤外ビジコン管や固体撮像素子を用いた電子走査式の赤外線カメラも発表されてきており¹⁹⁾、農業における利用を考えた場合、今後の分野の研究開発の進展が期待される。

4 人工衛星による地球観測システム¹⁴⁾

人工衛星による地球観測システムは、地球観測衛星およびその管制のための部門と受信、記録、処理、保存検索、

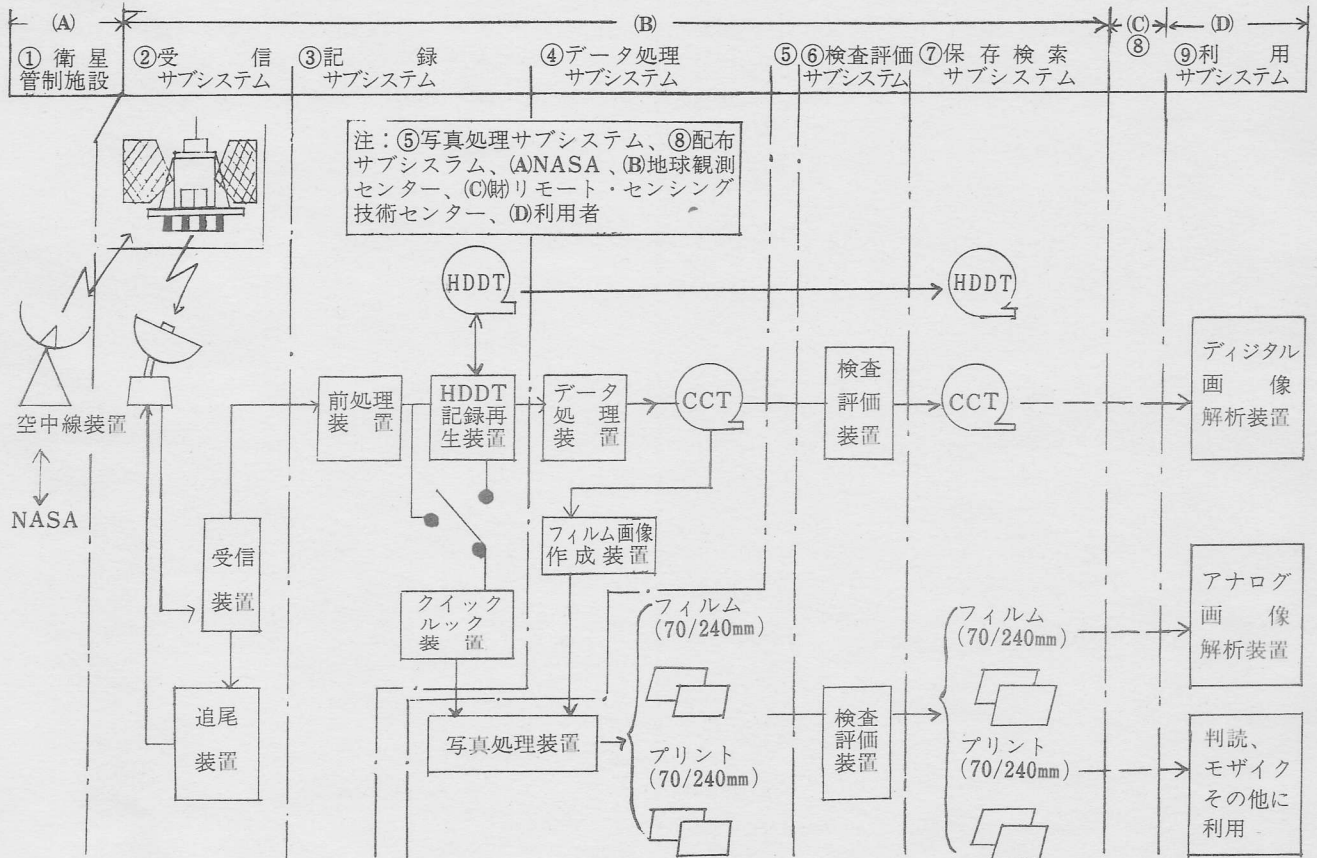


図-13 ランドサットによるわが国の地球観測システム (地球観測データ利用ハンドブック¹⁴⁾より)

配布などに関係する部門に大別される。図-13にランドサットを対象としたわが国の地球観測システムの概念図を示

表-5 ランドサットデータの配布一覧表

(リモートセンシング技術センタ提供)

品名		フォーマット等	データコード	単位数量	価格(円)
白黒写真	MSS 白黒 70ミリ フィルムポジ	1: 3,369,000	11	各バンド別 1枚	5,100
	MSS 白黒 70ミリ フィルムネガ	1: 3,369,000	12	各バンド別 1枚	5,100
	MSS 白黒 240ミリ フィルムポジ	1: 1,000,000	15	各バンド別 1枚	5,500
	MSS 白黒 240ミリ フィルムネガ	1: 1,000,000	16	各バンド別 1枚	5,500
	MSS 白黒 240ミリ ペーパーポジ	1: 1,000,000	17	各バンド別 1枚	5,200
	RBV 白黒 70ミリ フィルムポジ	1: 1,685,300	21	各サブシーン別 1枚	3,400
	RBV 白黒 70ミリ フィルムネガ	1: 1,685,300	22	各サブシーン別 1枚	3,400
	RBV 白黒 240ミリ フィルムポジ	1: 500,000	25	各サブシーン別 1枚	3,800
	RBV 白黒 240ミリ フィルムネガ	1: 500,000	26	各サブシーン別 1枚	3,800
	RBV 白黒 240ミリ ペーパーポジ	1: 500,000	27	各サブシーン別 1枚	3,500
擬似カラー写真	MSS フォールスカラー 240ミリ フィルムポジ	1: 1,000,000	35	各シーン 1枚	13,000
	MSS フォールスカラー 240ミリ ペーパーポジ	1: 1,000,000	37	各シーン 1枚	12,000
	MSS ナチュラルカラー 240ミリ フィルムポジ	1: 1,000,000	45	各シーン 1枚	13,000
	MSS ナチュラルカラー 240ミリ ペーパーポジ	1: 1,000,000	47	各シーン 1枚	12,000
磁気テープ	MSS CCT 9トラック 1600 bpi	BSQ フォーマット	75	各シーン1セット 2巻	80,000
	MSS CCT 9トラック 1600 bpi	BIL フォーマット	76	各シーン1セット 2巻	80,000
	RBV CCT 9トラック 1600 bpi	SSQ フォーマット	85	各サブシーン	30,000

*カラー写真はバンド別の白黒写真を加色合成したもので、4バンド青、5バンド緑、6または7バンド赤の合成をフォールスカラー(赤外カラー)、4バンド青、5バンド赤、6または7バンド緑の合成をナチュラルカラーと呼び取扱っている。(昭和57年10月1日現在)

第4章 生体情報の計測とそのモデル

す。1978年宇宙開発事業団地球観測センタが設置され、1979年以降、衛星管制をNASA(米国航空宇宙局)が行い、受信からデータの保存・検索までを地球観測センタ、データの配布をリモートセンシング技術センタ(Tel. 03-403-1761)が行っている。

表-5に、ランドサットデータの配布一覧とその1982年10月現在の価格を示す。なお、詳細は、ランドサットデータの利用のために「地球観測データ利用ハンドブック」(宇宙開発事業団地球観測センター編集)があるので参照されたい。また、NOAAおよびひまわりの気象衛星データは、日本気象協会(Tel. 03-212-2071)から一般に配布されている。

航空機の観測システムについては、ここでは省略する。なお、航空機を用いたリモートセンシングの観測計画の立て方、得られる画像データなどについての詳細は文献⁸⁾を参照されたい。

5 画像処理システム

5.1 画像処理システムの進歩

従来、リモートセンシングにより得られる画像データは膨大な量になるため、複雑な計算処理を行おうとすれば、大型の汎用計算機を用いる必要があった。しかし、最近の画像処理装置に関するハードウェアの進歩は目覚しく、

装置は小型化かつ高速化されつつある。図-14に各種の画像処理システムの演算速度とシステムコストの比較を示す。並列アレイ演算装置や並列画像演算装置など画像処理

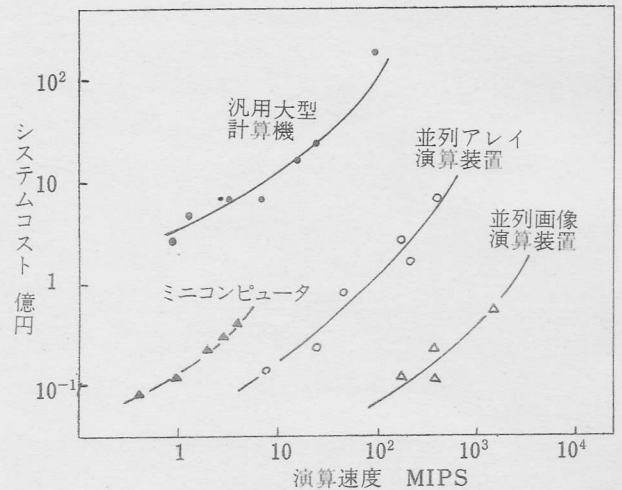


図-14 画像処理システムの演算速度とシステムコスト(森²⁰⁾)

専用装置においては、高速処理機能を持ち低価格の装置の提供が可能になってきたことを示している。このことは、施設農業やフィールド調査のための専用の画像計測処理装置の将来における実用化の可能性を与える。

5.2 汎用大型計算機と接続した画像処理システム²¹⁾

汎用大型計算機は、新しい複雑なアルゴリズムを開発するには必要不可欠である。図-15に国立公害研究所の汎用

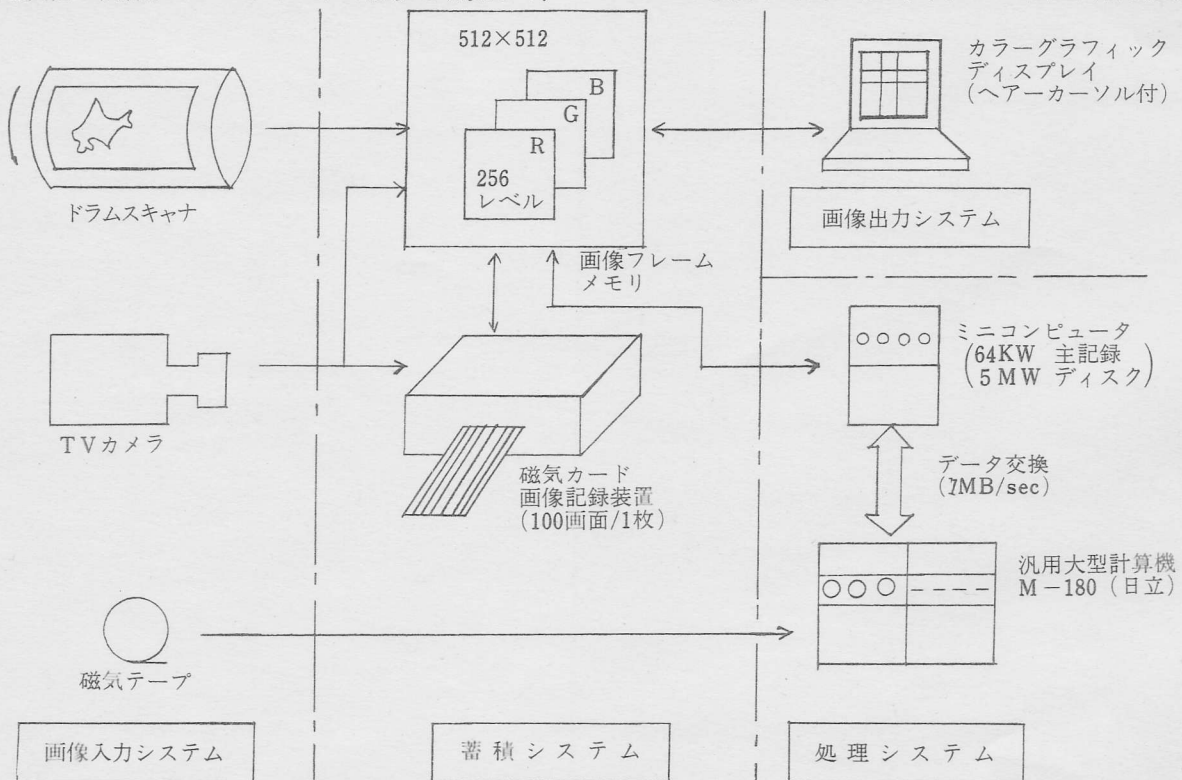


図-15 汎用大型計算機と接続した画像処理システムの例(Yasuoka and Miyazaki²¹⁾)

大型計算機と高速のバスで接続した画像処理システム (IPSEN) を示す。このシステムは、主に航空機や人工衛星、レーザレーダなどのリモートセンシングにより得られる画像データから環境情報を効率的に抽出し、処理、解析、蓄積するための方式を開発することを目的として作られたものである。それゆえ、全システムが1つの仕事に専従せず、画像データの入出力、処理などを並列して実行できるよう機能の分散化を図っていること、また、処理においても、低次処理、高次処理が独立して実行できるように小型計算機と大型計算機による分化を行っていること、さらに、表示方式の多様化、操作性の簡単化を図り、操作者が対話的に処理が進められるよう配慮されていることなどが特徴である。

5.3 可搬型の画像計測処理システム^{6,22)}

フィールド調査や施設農業に利用するための画像処理装置は、複雑な計算処理を行うというよりも、可搬性とリアルタイム性が要求される。それゆえ、実用システムでは、必要基本処理のハードウェア化や並列画像演算機能を最大限に取り込んだ安価なシステムが望まれる。しかし、現在のところ、この分野は研究開発の緒についたところであるため、研究者が研究目的のために独自に開発したシステムで、専用機化はなされていない。

図-16に、国立公害研究所で開発した植物の生育・生理

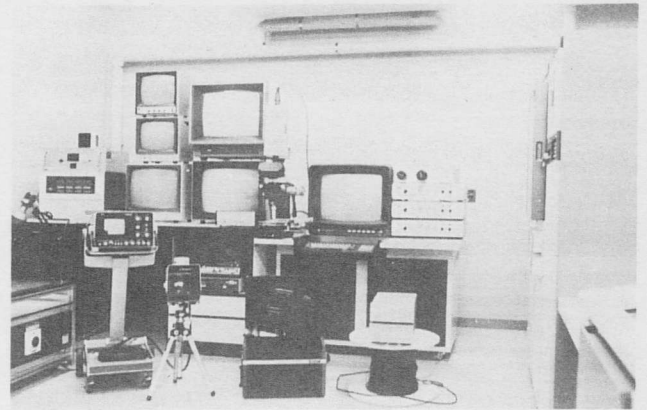


写真-2 画像計測処理システムの概観

反応の評価のための可搬型の画像計測処理システムの機器構成図を、写真-2に、概観を示す。このシステムは、種々の目的に応じることのできる汎用システムとして設計されているが、現場での使用や制御のためのセンサとして利用できるように、可搬性とリアルタイム性に特に配慮がなされている。画像センサとしては、図-12および表-4に示した各種撮像管およびI.I.を持つ計測用TVカメラと、温度計測のための走査型赤外線カメラ(8~13μm, HgCdTe, 液体窒素冷却)が接続されている。これらの画像センサは、形状、色つや、繁茂状態、生体温度、蛍光、その他の計測・評価すべき植物の生育・生理状態の特徴量に応じて使い分けることができる。また、生育している状態での植物の顕微鏡像の計測が可能なりモートコントロー

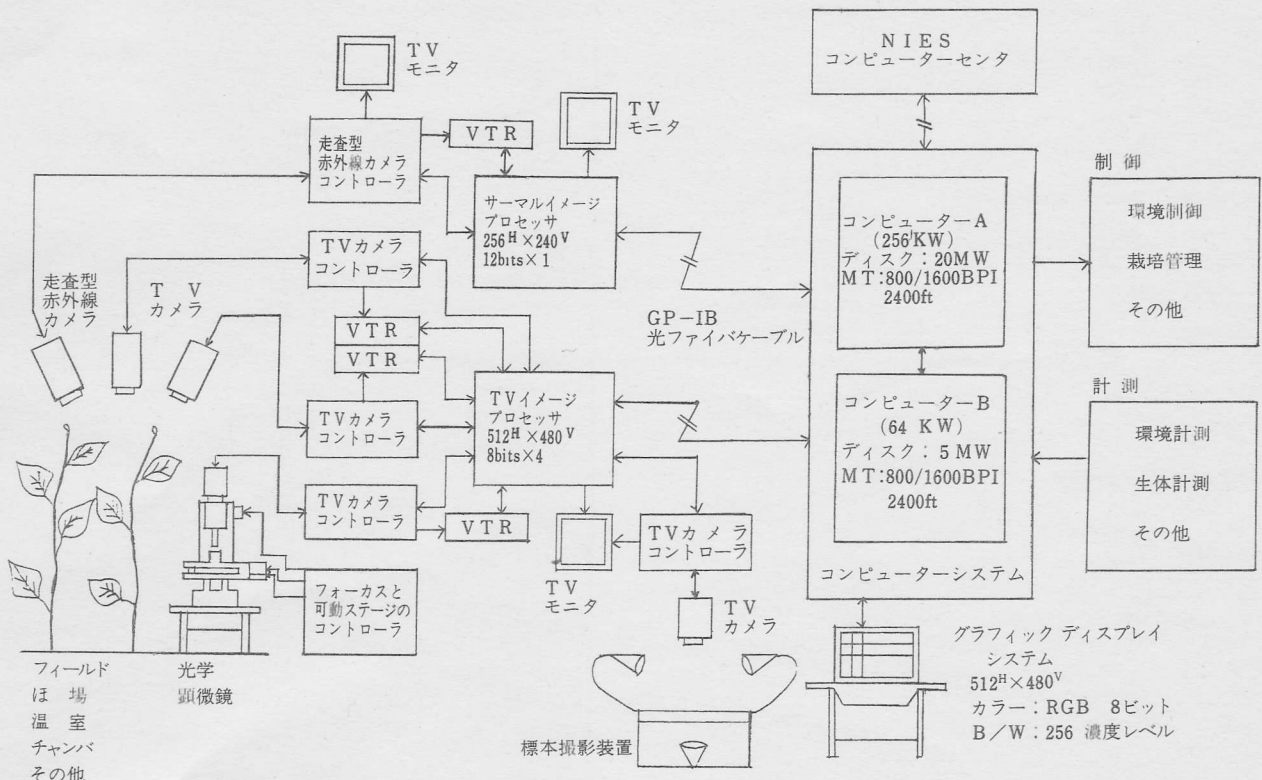


図-16 植物の生育・生理反応の評価のための可搬型画像計測システムの例 (Omasa et al²²⁾)

第4章 生体情報の計測とそのモデル

ル光学顕微鏡システムが接続されている²³⁾。

画像センサからの信号は、サーマルあるいはTVイメージプロセッサでデジタル化され、ノイズ除去、シェーディング補正、その他の前処理を行った後、計算機システム(ホスト計算機)に転送される。イメージプロセッサは、基本処理がハードウェア化されており、これらの処理をリアルタイムで行うことができる。特に、TVイメージプロセッサは、画像処理専用的高速演算機能を有している(図-17)。

また、これらのプロセッサは、小型軽量で、簡単な画像処理パッケージを内蔵しており、計算機システムとの接続なしに現場での画像解析が可能である。イメージプロセッサと計算機システムは、光ファイバケーブルを用いたGP-IBにより、約1 km離れた場所からの画像データを、25 kbyte/sで中継器なしに伝送することができる。また、さらに延長を必要とする場合には、中継器の接続も容易である。なお、S/Nが悪くなるが、カメラからの信号を現場でのVTRに記録し、改めて再生画像をこのシステムを用いてバッチ処理することも可能である。写真-3に、研究所構内の実験圃場に設置された観測棟と圃場内の計測室に設置されたイメージプロセッサの概観を示す。このシステムを用いて、圃場で生育している植物の定期的な観測とオンラインでの生育評価が可能である。ここで述べたシステムは、

目的に応じたコンポーネントの組替えが可能であり、最小システムは、現在においてすでに数百万円で実装可能である。それゆえ、今後の実用システムの製作のための模範となるであろう。

6 広域リモートセンシングの応用

人工衛星や航空機からの広域リモートセンシングの農業への応用は、土地利用分類、病虫害調査、収量予測など様々である。ここでは、最近注目されているランドサットの画像データの農業への利用に関係する2, 3の例をあげる。

6.1 土地被覆分類

農地の作付面積の調査や収量予測を行う場合、土地被覆分類を行う必要がある。図-18に、スペクトル画像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、結果に客観性を持たせるために、統計的分類法が用いられる²⁴⁾。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、距離分類法や最尤分類法などの教師あり分類法が有効

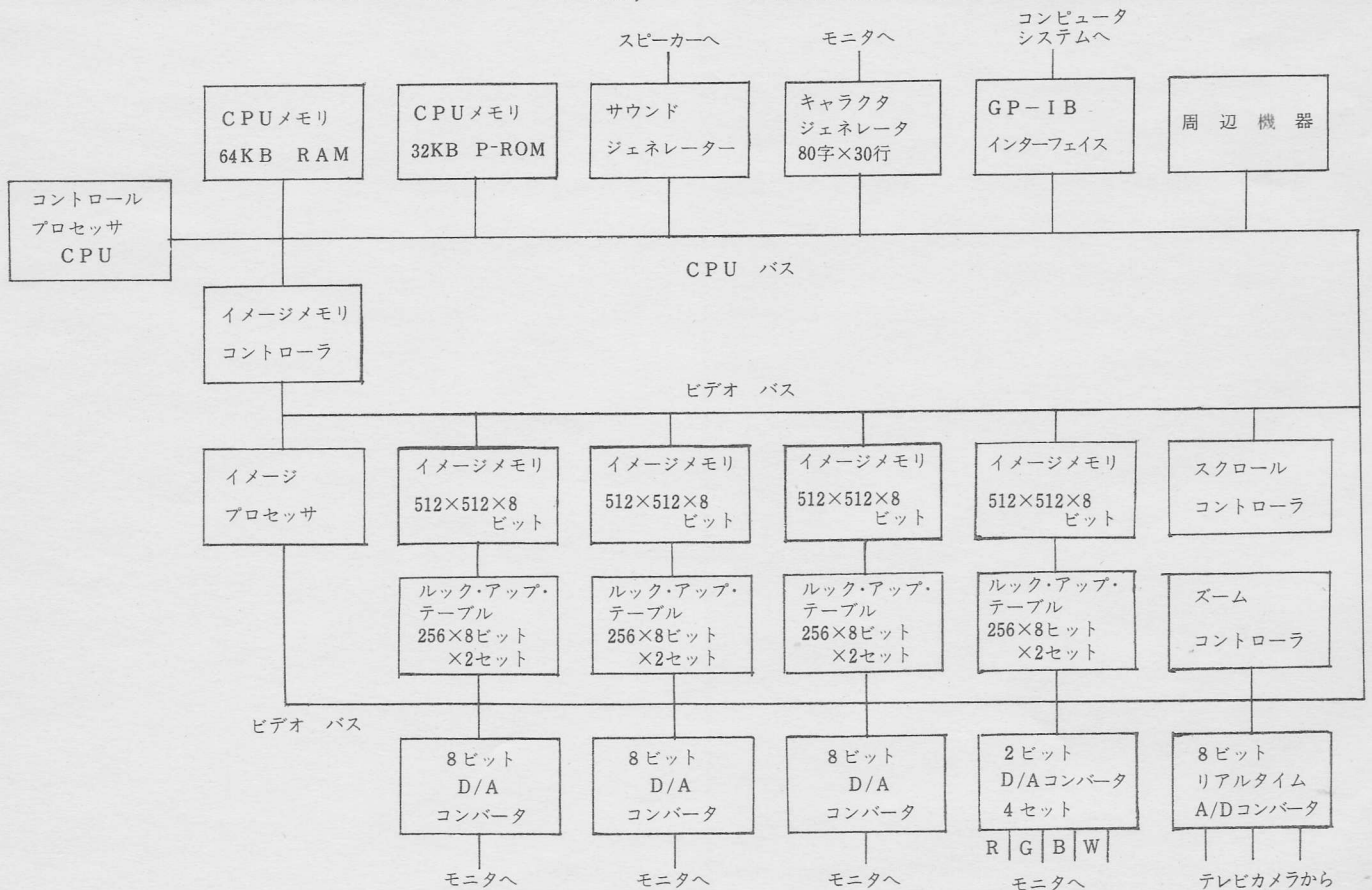
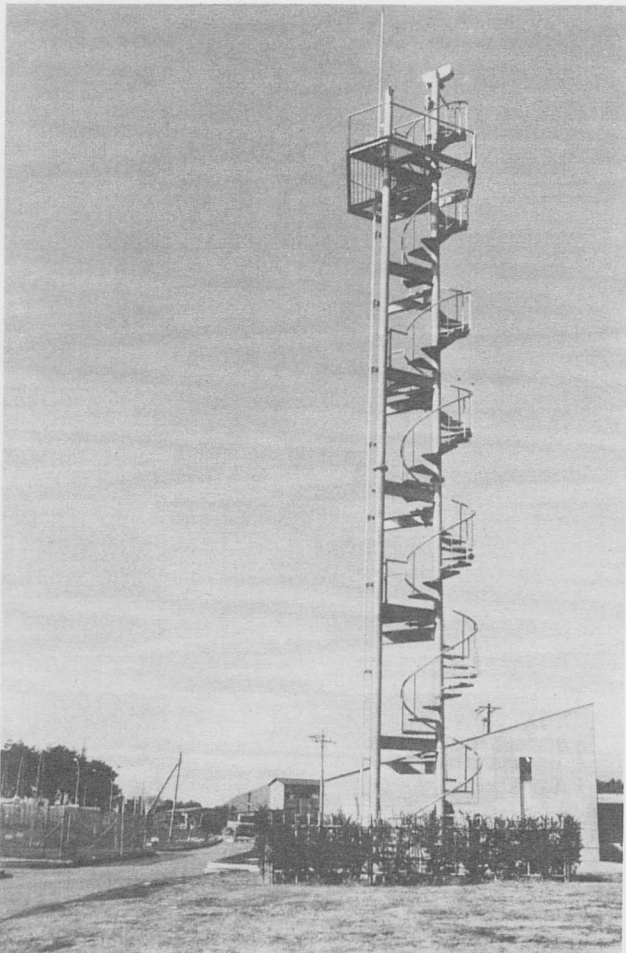


図-17 TV イメージプロセッサ (柏木研究所提供)



(a)観測棟

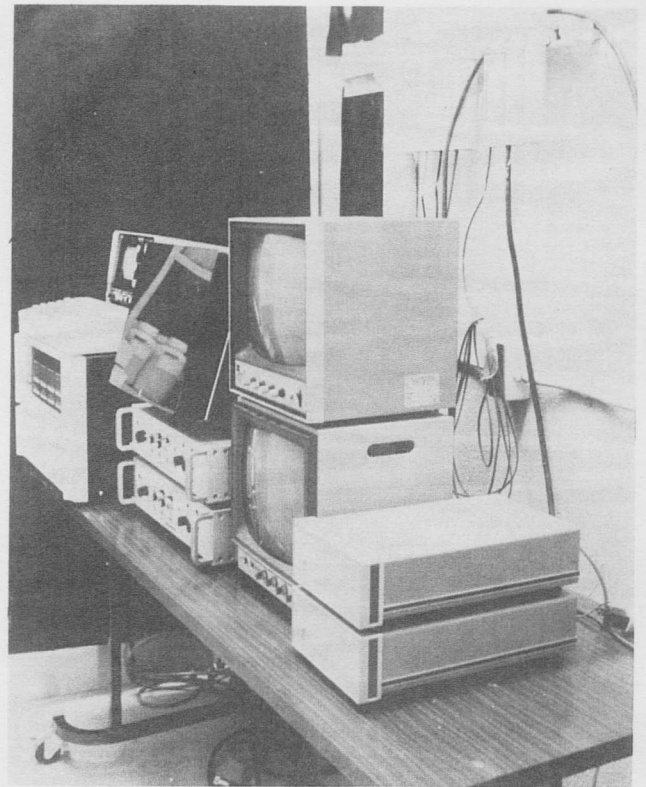


写真-3 実験圃場に設置された観測棟と圃場内計測室に設置されたイメージプロセッサの概観

である。

写真-4 に、ランドサットの画像データを用いた土地被覆分類の例を示す。この例では、ランドサットの画像データを、航空写真をもとに設定した特徴空間のトレーニングデータに基づいて距離分類法により分類し、さらに、既存の土地利用メッシュデータを加味して、現況図を作成している。ランドサットの画像データは解像度が悪いので、わが国のような作付面積の狭い耕地の分類には、詳細度を増すために、このような既存の土地利用に関するデータとの対比による分類が有効である。そして、このような手法が確立されるならば、既存の土地利用データとの対比が容易にでき、ランドサットの定期的な繰返し観測により土地利用の日常的な変化を知ることができよう。²⁵⁾

6.2 LACIE プロジェクトにおける小麦の収量予測²⁶⁾

多くの主要な穀物生産地域における 1970 年代初期の異常気象は、世界の食糧の供給と需要の関係をくずし、食糧事情を悪化させた。特に、ソ連は政府の日常の食生活の向上の政策を遂行するために、冬穀物地域の異常気象による

減収を、世界的規模での穀物の買付けにより補った。その結果、世界の食糧の備蓄を今世紀における最低のレベルに減少させた。このような世界の食糧事情の悪化は、人工衛星の実用的利用の流れと相俟って、人工衛星を利用した世界的規模での作物の収量予測を推進する原動力となった。LACIE (The Large Area Crop Inventory Experiment) プロジェクトは、このような背景で、アメリカの USDA (農務省)、NASA (航空宇宙局) および NOAA (海洋大気庁) により 1975 年から実施された広域穀物収量予測の実用化実験である。このプロジェクトの最終目標は 1980 年代の初めまでに、世界の主要な作物の収量予測を 10% 以内の誤差で行うことにあるが、ここでは、1975~1978 年にわたって行われた小麦の収量予測実験について簡単に述べる。

各国の小麦の収量の推定は、その国の中での気候、地力、技術的水準、その他生産力に関係するポテンシャルが比較的等しい地域に分けて行われた。これらの地域 i における小麦の収量 P_i は、その地域の作付け面積を A_i 、単位面積当たりの収量を Y_i とすると、

$$P_i = A_i Y_i \quad \dots\dots\dots(11)$$

で与えられる。国土全体にわたる全収量 P_c は、これらすべての地域の収量の総和

$$P_c = \sum_{i=1}^n P_i \quad \dots\dots\dots(12)$$

第4章 生体情報の計測とそのモデル

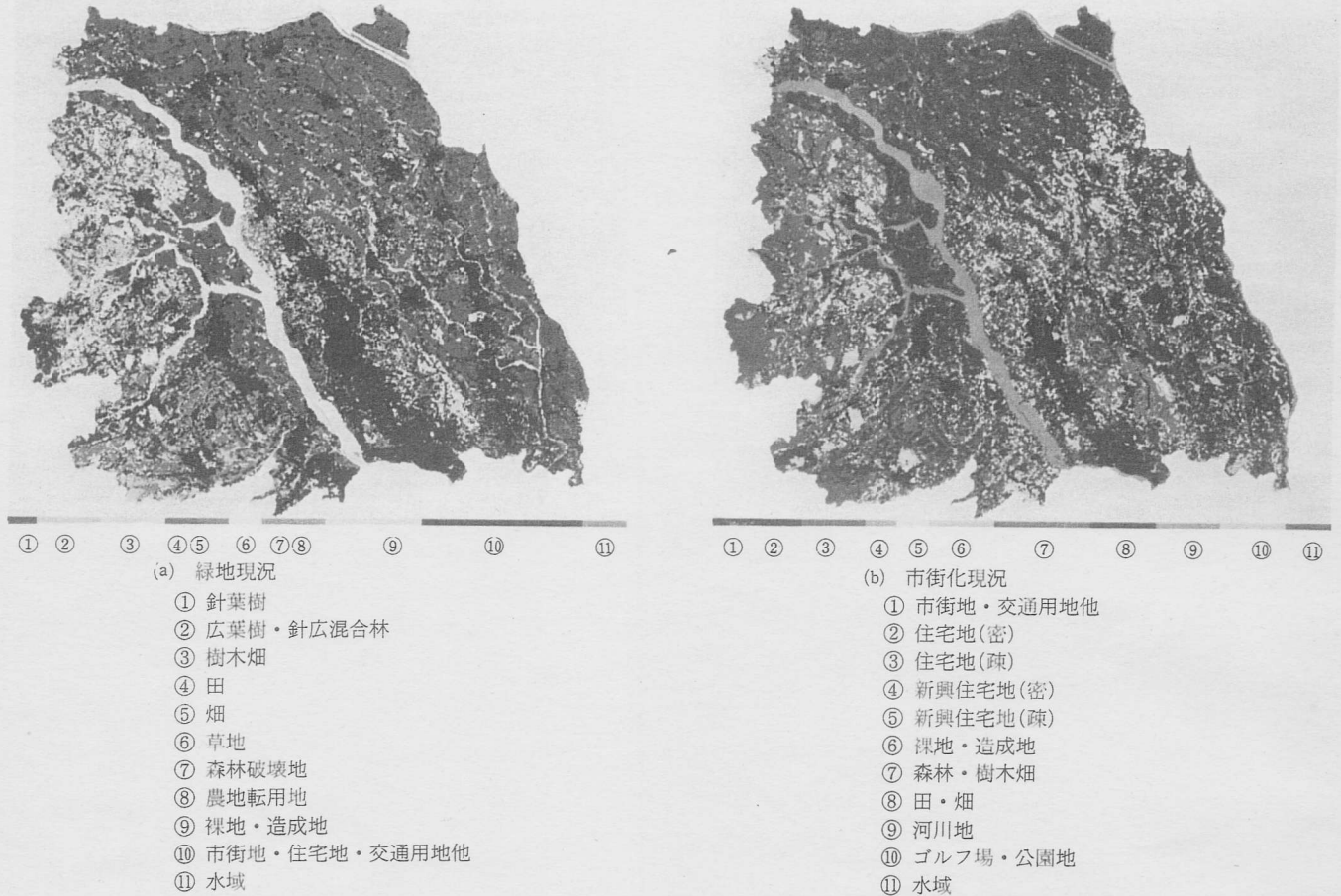


写真-4 ランドサットの画像データを用いた土地被覆分類の例 (リモートセンシング技術センタ・竹内博士提供²⁵⁾)

である。ランドサットや全地域気象ネットワークのデータが、各地域における小麦の作付面積、出穂日、生育状態、作柄などの推定に利用された。収量の推定は、Thompson²⁷⁾やNOAA (1973) による小麦の収量と気象の統計データにもとづく回帰モデルを LACIE プロジェクトのために改良した手法が用いられた。

実験は、まず最初に各種の統計データの整ったアメリカの大平原をモデル地域として推定手法の検討が行われ、その後、カナダ、ソ連に拡大された。さらに、ブラジル、オーストラリア、インド、アルゼンチンといった世界の主要な小麦地域にも適用された。これらの実験の結果、大平原およびソ連の小麦の収量が、それぞれ 112 kg/ha、131 kg/



(a) 1979年9月(普通年)



(b) 1980年(冷害年)

写真-5 青森地方の米の収穫時期におけるランドサット MSS 画像(原画は、カラー画像)(東海大学、下田博士提供²⁹⁾)

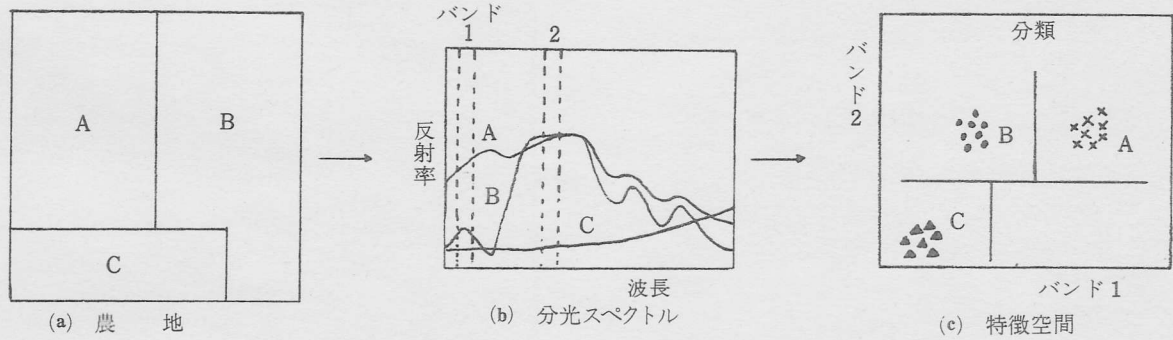
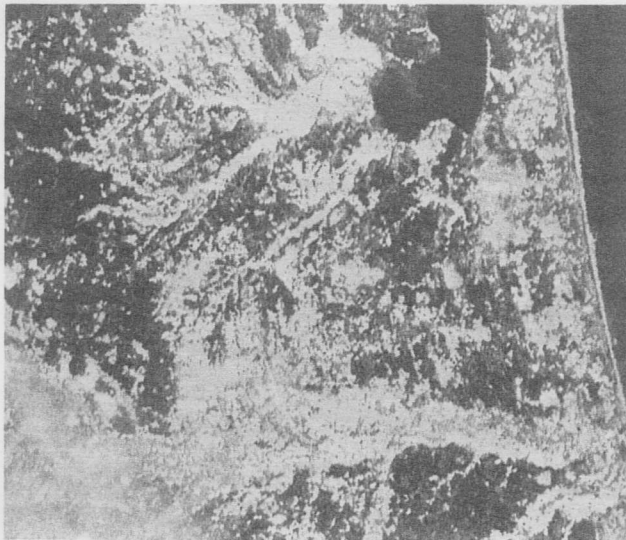


図-18 スペクトル画像による土地被覆分類の概念



(a) 1979年9月(普通年)



(b) 1980年9月(冷害年)

写真-6 写真-5から推定された稲作のでき具合(東海大学, 下田博士提供²⁹⁾)
(田において白く示された部分が普通の状態, 黒の部分が凶作の状態を示す。)

haの標準誤差で推定でき, また, 北アメリカにおける小麦の出穂日が冬小麦で約5日, 春小麦で約4日の誤差で予想できた。

このLACIEプロジェクトの成功に刺激されて, ヨーロッパやわが国でも, 最近人工衛星を利用した穀物の収量予測に関する研究が盛んになってきている²⁸⁾。

6.3 わが国における米の収量予測²⁹⁾

わが国における最も重要な穀物は米である。ランドサットの画像データを用いての米の収量予測に関する研究も最近行われるようになってきている。写真-5は, 1979年と冷害年であった1980年の青森地方の収穫時期のランドサットの画像(原画は, カラー画像)である。冷害年であった1980年の稲は, 収穫時期になっても青立ちの状態にあり, 黄色く色付いた1979年の状態とは異なっていた。この違いにより写真-5では, 1979年の田の部分に比べて1980年のその方が暗く表れている。

これらの画像の明るさの違いを利用して, 稲作のでき具合を推定したのが写真-6である。田において白く示さ

れた部分が普通の状態, 黒の部分が凶作の状態を示す。1980年は, この地方のほとんどが凶作であったことがわかる。このようにランドサットの画像データを用いて, 収穫時期におけるおおよその稲作のでき具合を推定することができる。

しかし, 米の収量を前もって予測するには, ランドサットによる観測体制だけでは現在のところ不十分である。稲作は, 夏期の1~2カ月の天候が収量に大きく影響を与え, また, 日本列島が南北に長いいため収穫時期が地域によって異なる。このため, 短い周期での観測が必要であるが, ランドサットの観測周期が長く, 予測に必要な適確な情報が得られないのが現状である。今後, 日本の稲作の特殊性にあった情報の利用法あるいは解析手法の開発が必要であろう。

7 植物の生育・生理反応の画像計測

広域リモートセンシングでは, 観測体制および観測精度の点から, わが国での農業への利用という面で制約がある。

第4章 生体情報の計測とそのモデル

地上でのリモートセンシングは、この欠点を補うとともに新しい施設農業への利用が期待される。しかし、現状では、画像計測システムが高価なこと、また、画像計測そのものが農業にとっては新しい手法で、利用できる植物の生育・生理反応が整理されていないために、実用化には至っていない。そこで、ここでは、現在の農業へすぐ利用できるということではなく、もっと基礎的な立場で、植物の生育・生理反応に関する画像情報を非破壊、非接触でいかに得るかという観点から、画像計測の例について述べる。

7.1 植物温度の画像計測

7.1.1 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1つである³⁰⁾。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、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³¹⁾。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。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に関する情報を得ることができる³⁰⁻³⁵⁾。

7.1.2 赤外線カメラによる植物温度の計測の原理と精度³⁶⁾

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。

$$R(\lambda, T) = \epsilon(\lambda, T)W(\lambda, T) + [1 - \epsilon(\lambda, T)]E(\lambda, T_s) \quad \dots\dots(13)$$

ここで、 λ 、 $\epsilon(\lambda, T)$ 、 $W(\lambda, T)$ 、 $E(\lambda, T_s)$ 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 $\lambda_1 < \lambda < \lambda_2$ 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。

$$V_T(T, T_s) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda)R(\lambda, T)d\lambda \\ \approx \bar{\epsilon}(T)V_w(T) + [1 - \bar{\epsilon}(T)]V_E(T_s) \quad \dots\dots(14)$$

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。

$$\bar{\epsilon}(T) = \left\{ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon(\lambda, T)f(\lambda)W(\lambda, T)d\lambda / \left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda)W(\lambda, T)d\lambda \right] \right\} \quad \dots\dots(15)$$

$$V_w(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda)W(\lambda, T)d\lambda \quad \dots\dots(16)$$

$$V_E(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda)E(\lambda, T_s)d\lambda \quad \dots\dots(17)$$

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。

$$V_w(T) = [V_T(T, T_s) - V_E(T_s)] / \bar{\epsilon}(T) + V_E(T_s) \quad \dots\dots(18)$$

$V_w(T)$ は、温度 T なる黒体の放射を計測した時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(18)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。先にも述べたように、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。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(13)によれば放射率により変るが、式(18)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、晴れた空や農業施設内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、画像センサーの感度波長として8~13 μm を選べば、極めて小さく無視できる。

7.1.3 植物温度の計測例⁶⁾

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。図-19に温室内で、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、写真-7に、図-19の矢印(↓)2(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

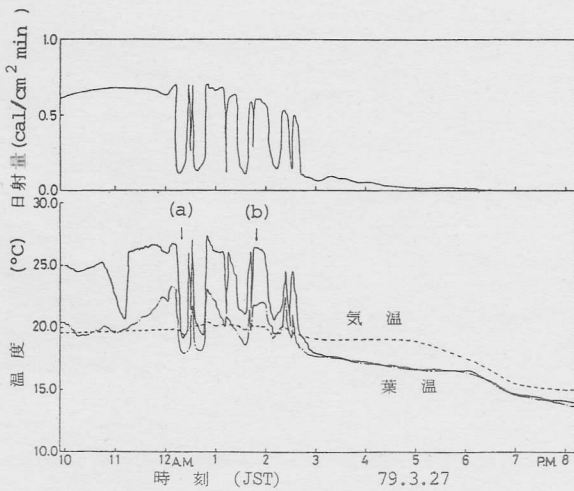


図-19 温室内のホウレンソウ葉温(—;日当たり部位,---;日陰部位), 気温および日射量の日変化(湿度, 風速は, それぞれ, 70% RH, 0.4 m/sである) (大政・相賀⁶⁾)

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。写真-7の葉温画像によると, 葉温の最高と最低で約 10°C の差が見られた。

次に, 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表-6 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°C の差が認められた。これは, 葉形の違いによる日射の当たる量, 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。

7.1.4 気孔反応とガス交換量の推定³²⁻³⁴⁾

植物は, 蒸散, 光合成, 呼吸などの自らの生命維持に必

表-6 温室内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°C, 70%RH, 0.7cal/cm²min, 0.4 m/sである) (大政・相賀⁶⁾)

植 物	最大葉気温差°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

要な活動のための物質の交換を, 気孔を介して大気とのあいだで行っている。大気汚染地域では, その際, 汚染ガスも気孔を介して侵入し, 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。ここでは, 一例として, 植物反応の基本となる葉の局所部位における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。

$$W_x = \left\{ \alpha_p E_{s_x} + \epsilon (E_{w_x} - 2\sigma T_{lx}^4) + 2\rho C_p (T_a - T_{lx}) / \Gamma_{KA_x} \right\} / L \quad \dots\dots(19)$$

ここで, E_s , E_w , α_p , ϵ , T_l , T_a , σ , ρ , C_p , Γ_{KA} , L は,

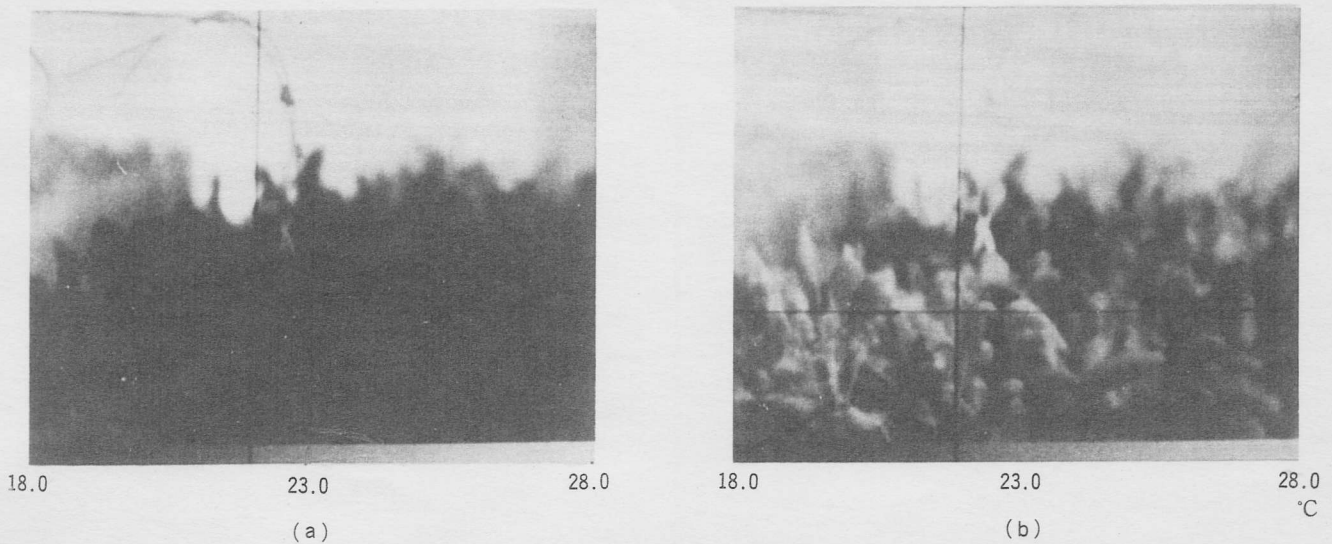


写真-7 図-19の矢印(↓)(a), (b)の時刻における葉温画像 (大政, 相賀⁶⁾)

第4章 生体情報の計測とそのモデル

それぞれ、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 $\geq 3\mu\text{m}$)、短波放射の吸収係数、長波の放射率、葉温、気温、ステファン・ボルツマンの常数、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、式(19)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、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。

$$r_{wsx} = 2\{X_{sx}(T_{lx}) - \phi X_s(T_a)\} / W_x - (K/D_w)^{2/3} r_{kax} \quad \dots\dots\dots(20)$$

ここで、 $X_s(T)$ 、 ϕ 、 K 、 D_w は、それぞれ、 $T^\circ\text{C}$ における飽和蒸気密度、相対湿度、空気の温度伝導率、水蒸気と空気との分子拡散係数である。他方、植物のガス交換速度 Q_x および積算ガス吸収量 Q_{intx} は、次式により推定することができる。

$$Q_{intx} = \int_0^T Q_x dt \quad \dots\dots\dots(21)$$

$$Q_x = 2(P_a - P_{lx}) / (r_{gax} + r_{gsx}) \quad \dots\dots\dots(22)$$

ただし、

$$r_{gax} = (x/D_g)^{2/3} r_{kax} \quad \dots\dots\dots(23)$$

$$r_{gsx} = (D_w/D_g) r_{wsx} \quad \dots\dots\dots(24)$$

ここで、 P_a 、 P_{lx} 、 r_{gax} 、 r_{gsx} 、 T 、 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、気孔抵抗、被暴時間、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_{lx} 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り変化する。特に、光合成・呼吸に関係する CO_2 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。たとえば、昼間、気孔底界面でのガス濃度は、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。

他方、 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_2 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-7に、水蒸気、 CO_2 、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、表-7には、参考のために Holmgren et al (1965)³⁸⁾ の方法により計算した葉肉抵抗 r_M を付記した。表-7によれば、水蒸気および NO_2 、 O_3 、 SO_2 、 PAN 、 HF 、 Cl_2 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

表-7 気孔底界面でのガス濃度および葉肉抵抗 (大政³⁷⁾)

ガスの種類	P_l/P_a	葉肉抵抗 r_M
H_2O	-	0 s/cm
NO_2	0	0
O_3	0	0
SO_2	0	0
PAN	0	0
HF	0	0
Cl_2	0	0
CO_2	-	0.5~10 (以上)
NO	0.9以上	15以上
CO	0.9以上	15以上

大きく、蒸散速度あるいは、汚染ガスの吸収速度は、気孔抵抗を含めた気相での拡散にのみ支配されることを示している。他方、 CO_2 、 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。

写真-8は、汚染ガス (SO_2) に被暴したヒマワリ葉の葉温分布の変化と上記のモデルを用いて推定した気孔抵抗、蒸散速度、 SO_2 吸収速度の葉面分布の例である。 SO_2 の暴露に伴う気孔の閉鎖のために、気孔抵抗が増大し、蒸散速度および SO_2 吸収速度が減少する傾向があった。

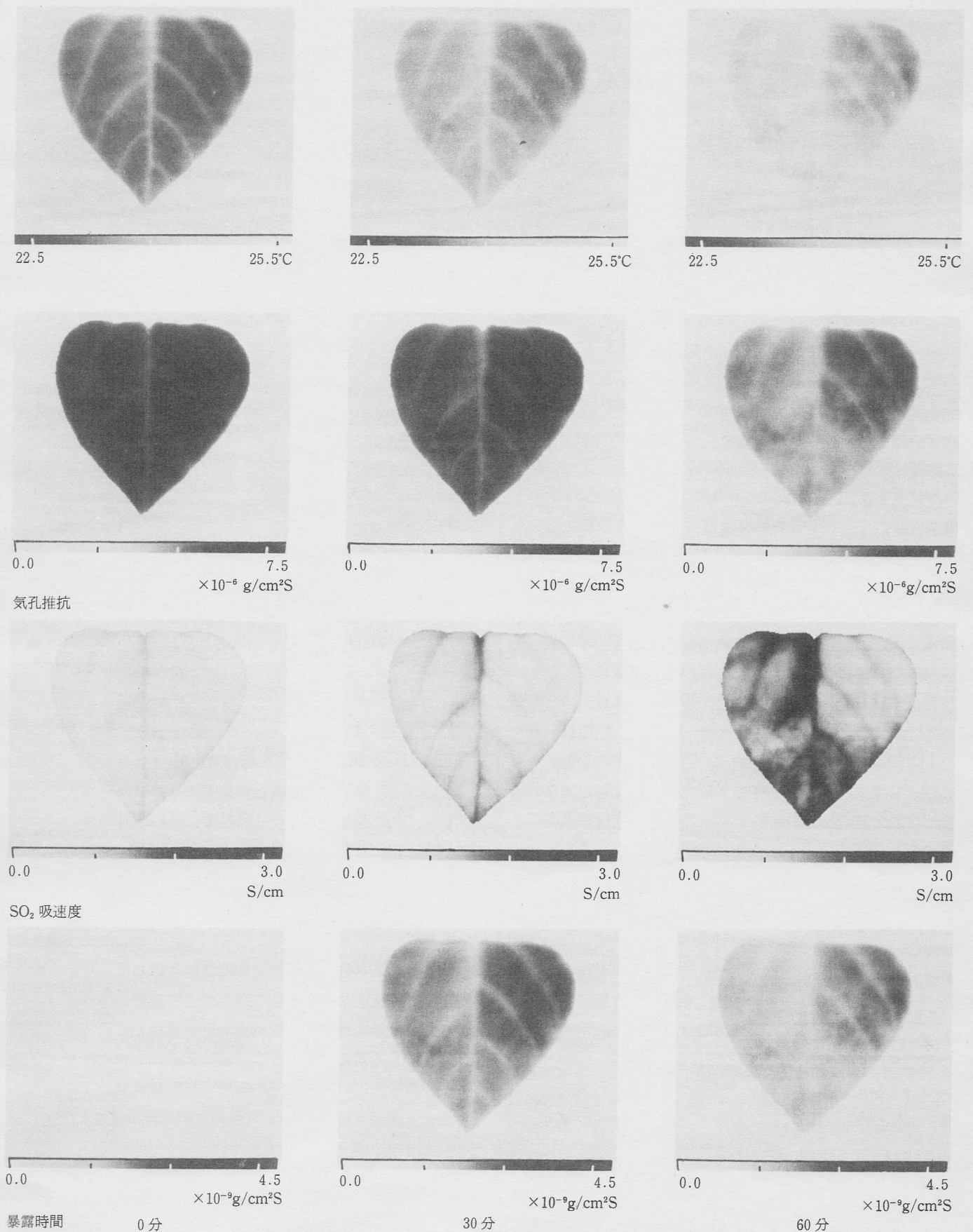
ここで述べた手法は、今後、フィールドや施設内において、リモートセンシングにより植物群落と大気とのあいだのガス交換量や気孔反応を推定する手がかりを与える。

7.2 植物生育の特徴量の計測と評価

7.2.1 植物生育の特徴量と画像処理

先に述べた TV カメラや赤外線カメラを用いれば、人間が見ることのできない不可視領域の画像を得ることができ。また、色ガラスあるいは干渉フィルタの使用により、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解析、マルチスペクトル解析、その他の手法を用いて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、病虫害徴などの人間が認識し、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言える。

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



暴露時間 0分 30分 60分
 写真-8 汚染ガス(SO_2)に被曝したヒマワリ葉の葉温分布の変化と葉温分布から推定した蒸散速度、気孔抵抗、 SO_2 吸収速度の葉面分布
 (Omasa *et al*³⁵⁾)

第4章 生体情報の計測とそのモデル

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。

7.2.2 植物の生長の計測と評価

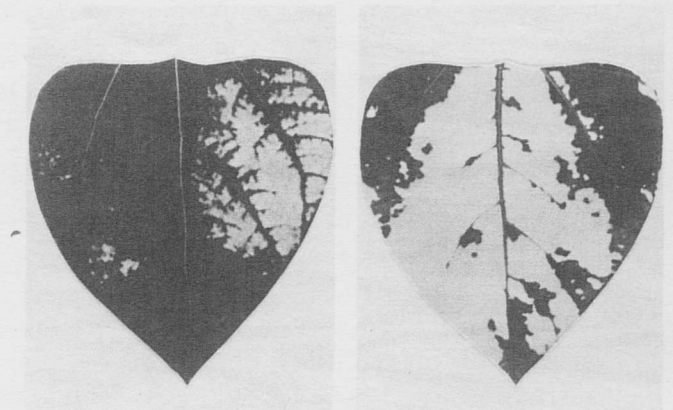
植物の生長は、組織の細胞分裂と伸長により生じるが、その速度は、器管、部位により異なり、各生育ステージで変化する。Erickson and Silk³⁹⁾ は、オナモミ属の葉を3日間連続で写真撮影し、個々の写真の約250の点の x, y 座標を、計算機に連結したデジタル化装置で記録し、個々の点の生長の速度と方向を計算し、解析した。その結果、葉柄に近い部位の方が先端部よりも生長率が大きいこと、生長がほぼ等方性であることを示している。このように、植物器管の生長速度の空間的、時間的変化を調べることは、植物の生育過程を理解する基礎となる。

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⁴⁰⁾。この手法は、図-18で述べた手法を植物群落の生長状態の評価に適用したものである。植物葉の分光反射特性は、図-3~図-6からもわかるように、 $0.8\sim 1.2\mu\text{m}$ の波長領域で大きい。それゆえ、湿った土などの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、乾物量、草丈などを推定できる。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。このため、画像のバンド比などを用いる手法による改善が試みられている。

7.2.3 植物葉に発現する可視障害の評価^{35),41)}

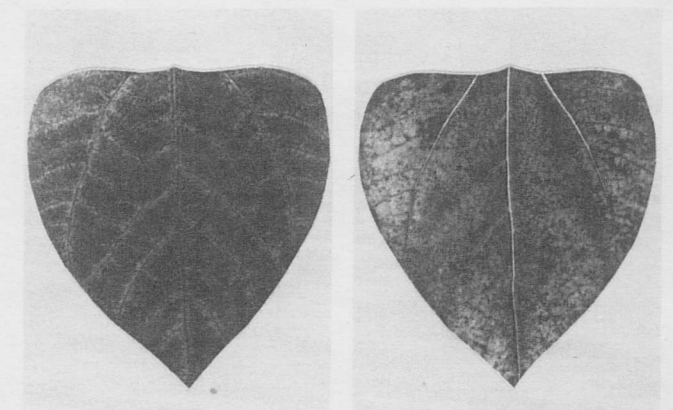
病虫害や大気汚染害などの可視障害の症状は、その原因により異なり特徴的である。それゆえ、障害が発現した植物葉を画像処理することにより、その原因と程度を知ることができる。ここでは、大気汚染ガスの可視障害を例に、障害の程度の評価手法について述べる。

ヒマワリの典型的な SO_2 、 NO_2 、および O_3 被害葉を写真-9に示す。この写真において、正常な領域は黒く、可視障害発現領域は白く表される。 SO_2 および NO_2 被害葉には比較的ブロードな可視障害が発現し、 O_3 被害葉には斑点状の薄い可視障害が発現しているのが観察される。可視障害葉と正常葉のスペクトル特性を比較するために、一定の光条件の標本撮影装置に葉片($2\times 2\text{cm}^2$)を置き、その



(a) SO_2 被害葉

(b) NO_2 被害葉



(c) O_3 被害葉

(d) O_3 被害葉

写真-9 ヒマワリの典型的な SO_2 、 NO_2 および O_3 被害葉の写真 (Omasa *et al.*^{33,34)})

反射を種々の干渉フィルタ(中心波長 μm (半値幅 μm), $0.45(0.03)$, $0.55(0.01)$, $0.67(0.01)$, $0.78(0.01)$, $0.90(0.01)$)を通してシリコンビジコンカメラで測定し、その濃度平均値を計算した。

図-20に正常葉および SO_2 あるいは NO_2 被害葉の正常領域と被害領域のスペクトル特性を示す。 $0.45\mu\text{m}$ 、 $0.55\mu\text{m}$ 、 $0.67\mu\text{m}$ の帯域において、被害葉の正常領域と被害領域のスペクトル特性は異なっていた。しかし、正常葉と被害葉の正常領域のスペクトル特性は一致していた。このことから、 SO_2 および NO_2 被害葉の可視障害の程度は、スペクトル画像を閾値濃度により正常領域と被害領域に2値化し、葉面積に対する被害領域の面積比を求めることにより評価できる。スペクトル帯域は、正常領域および被害領域の濃度平均値の差が大きく、正常領域の標準誤差が小さい $0.67\mu\text{m}$ が最も有効である。

他方、 O_3 被害葉は、 SO_2 や NO_2 被害葉のような被害領域と正常領域に2値的に分かれるのではなく、斑点状の可視障害として現れるために被害領域の面積比を指標とした評価よりは、スペクトル画像の濃度平均値を指標とした方

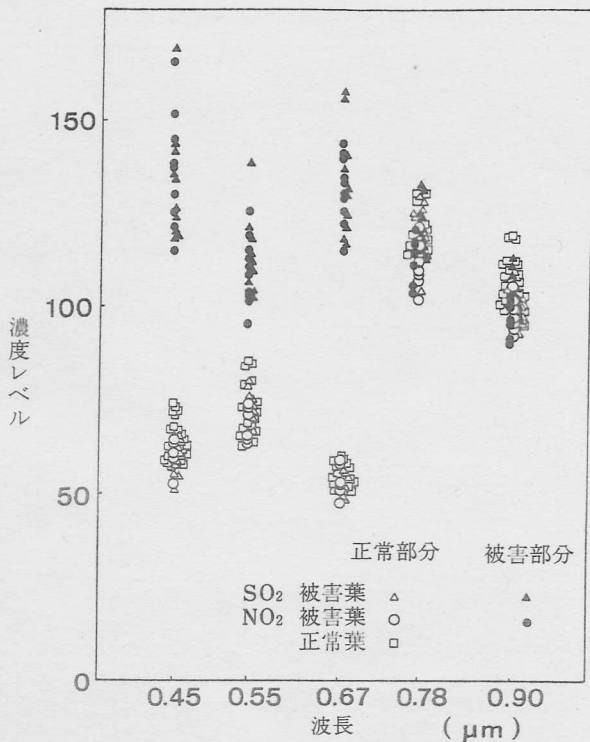


図-20 正常葉および SO₂ あるいは NO₂ 被害葉の正常領域と被害領域のスペクトル特性 (Omasa et al³⁵⁾)

が有効である。(図-21)。可視障害は、植物色素の退色により生じることが知られており、退色する植物色素の主要な成分の1つにクロロフィルがある。

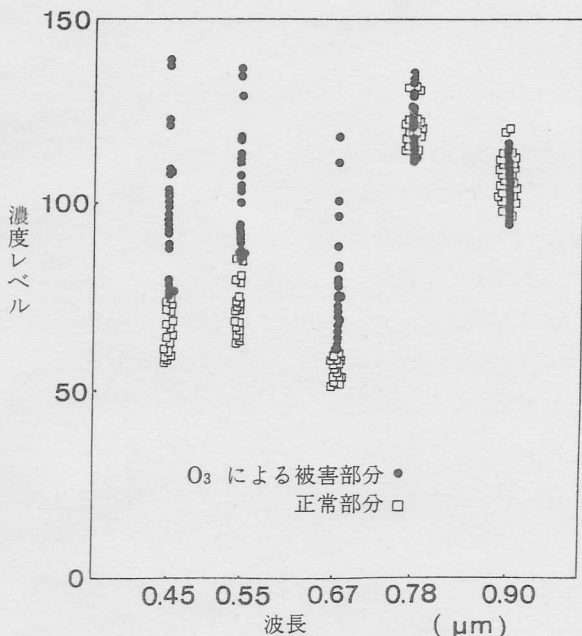


図-21 正常葉および O₃ 被害葉のスペクトル特性 (Omasa et al³⁵⁾)

そこで、ヒマワリ葉片の全クロロフィル含有量 C_{hl} とスペクトル画像の濃度平均値を G_{av} あるいはバンド比 Br との関係調べた。その結果を表-8に示す。最も相関が高いのは、 $Br=0.55/0.90$ の場合で、相関係数は -0.95 、回帰

表-8 正常葉および、SO₂、NO₂、O₃ 被害葉の全クロロフィル含有量とスペクトル画像の濃度平均値あるいはバンド比との関係

(Omasa et al³⁵⁾)

波長・バンド比	相関係数	標準誤差
μm		$\mu\text{g}/\text{cm}^2$
0.45	-0.91	5.6
0.55	-0.89	6.1
0.67	-0.87	6.7
0.78	-0.09	-
0.90	0.03	-
0.45/0.90	-0.93	5.1
0.55/0.90	-0.95	4.2
0.67/0.90	-0.88	6.4
0.78/0.90	-0.20	-
0.45/0.78	-0.91	5.7
0.55/0.78	-0.91	5.8
0.67/0.78	-0.86	6.9
0.45/0.67	0.16	-
0.55/0.67	0.60	10.9
0.45/0.55	-0.78	8.5

直線は $C_{hl} = -69.6Br + 82.6 (\mu\text{g}/\text{cm}^2)$ で与えられた。なお、この回帰直線をもとに、クロロフィル含有量を推定する際の標準誤差は、 $4.2\mu\text{g}/\text{cm}^2$ であった。O₃ 被害葉の可視障害の程度は、この回帰直線により被害葉のクロロフィル含有量を推定し、正常葉の平均含有量に対する比から評価できる。

一般に、病虫害や複合汚染により生じる可視障害は、上記の2つの症状が混合している場合が多い。それゆえ、ここで述べた2つの評価手法を併用することが必要であろう。また、ここで述べた手法はフィールドや施設内の病虫害や環境汚染害のリモートセンシングによる評価にも適用できよう。

終わりに、貴重な写真および資料を御提供頂いた東海大学下田陽久博士、リモートセンシング技術センター竹内章司博士、日本電子(株)サーモビュアグループ、浜松ホトニクス(株)計測用 TV グループ、(株)柏木研究所大橋三男氏、また貴重な助言を賜った国立公害研究所安岡善文博士に深謝する。

<参考文献>

- 1) R. G. Reeves (ed.) : Manual of Remote Sensing Vol 1, American Society of Photogrammetry (1975).

第4章 生体情報の計測とそのモデル

- 2) 豊田弘道ほか：センサが地球をみるまで，計測と制御，21：43-51 (1982)。
- 3) 石上 博：衛星データ配布システムと利用実績，写真測量とリモートセンシング 特集号 I, 6-13(1981)。
- 4) 高辻正基：野菜工場の進展，計測と制御 22：522-528 (1983)。
- 5) 橋本 康：植物生体情報による植物生育プロセスの制御，遺伝，35(1)：18-24 (1981)。
- 6) 大政謙次・相賀一郎：画像処理による植物の生育・生理反応の評価，遺伝，35(1)：25-31 (1981)。
- 7) 藤村貞夫・興石 肇：航空機と人工衛星によるリモートセンシングのセンサシステム，計測と制御，15：568-580 (1976)。
- 8) 日本リモートセンシング研究会編：画像の処理と解析，共立出版 (1981)。
- 9) 広沢春任：リモートセンシングにおける画像情報，電子通信学会誌，58：865-872 (1975)。
- 10) D. M. Gates et al.：Spectral Properties of Plants. *Appl. Opt.*, 4：11-20 (1965)。
- 11) E. B. Knipping：Physical and Physiological Basis for the Reflectance of Visible and Near-Infrared Radiation from Vegetation. *Remote Sensing Environ.* 1：155-159 (1970)。
- 12) R. M. Hoffer and C. J. Johannsen：Ecological Potential in Spectral Signature Analysis：In "Remote Sensing in Ecology". Univ. of Georgia Press, pp. 1-16 (1969)。
- 13) 畚野信義：合成開口レーダ，リモートセンシング学会誌，1：49-107 (1981)。
- 14) リモートセンシング技術センタ編：地球観測データ利用ハンドブック，宇宙開発事業団地球観測センタ (1982)。
- 15) V. V. Salomonson：地球観測衛星ランドサット D，システム概要，宇宙開発事業団地球観測センタ (1979)。
- 16) 井上 譲・藤田 努：ビデオカメラ，電子通信学会誌，66：121-128 (1983)。
- 17) 橋本 康・丹羽 登：植物葉面情報の画像処理，画像工学コンファレンス，9：51-54 (1978)。
- 18) K. Omasa et al.：Measurement of the Thermal Pattern of Plant Leaves under Fumigation with Air Pollutant. *Res. Rep. Natl. Inst. Environ. Stud. No. 11* 239-247 (1980)。
- 19) 山香英三：赤外イメージセンサの動向，計測と制御，19：751-759 (1980)。
- 20) 森 健一：ディジタル画像処理のハードウェア技術，電子通信学会誌，59：1201-1207 (1976)。
- 21) Y. Yasuoka and T. Miyazaki：IPSEN-An Image Processing System for Environmental Analysis and Evaluation. *Proc. of 5th Intr. Conference on Pattern Recognition.* 745-749 (1980)。
- 22) K. Omasa et al.：Image Instrumentation for Evaluating the Effects of Environmental Pollution on Plants. In "Encyclopedia of Systems and Control" Editor-in-Chief M. Singh. Pergamon Press (1984) in press.
- 23) K. Omasa et al.：Observation of Stomatal Movements of Intact Plants Using an Image Instrumentation System with a Light Microscope. *Plant Cell Physiol.* 24：281-288 (1983)。
- 24) 大松 繁他：リモートセンシングの水質汚染問題への適用，システムと制御，24：238-247 (1980)。
- 25) 竹内 章司：ランドサットデータと国土数値情報を併用した現況図作成の試み，日本写真測量学会昭和57年度年次学術講演会論文集，57-60 (1982)。
- 26) J. D. Hill et al.：LACIE-An Application of Meteorology for United States and Foreign Wheat Assessment. *J. Appl. Met.* 19：22-34 (1980)。
- 27) L. M. Thompson：Weather and Technology in the Production of Wheat in the United States. *J. Soil Water Conserv.* 24：219-224. (1969)。
- 28) A. Berg (ed.)：Application of Remote Sensing to Agricultural Production Forecasting. A. A. Balkema (1981)。
- 29) 下田陽久：稲の生育「宇宙からみた日本列島」NHK編，日本放送出版協会 pp. 106-109 (1982)。
- 30) J. Berry and O. Björkman：Photosynthetic Response and Adaptation to Temperature in Higher Plants. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 31：491-543 (1980)。
- 31) 橋本 康：サーモグラフィを利用した植物体温分布の計測「ライフサイエンスを測る」丹羽 登編，オーム社，pp. 139-149 (1983)。
- 32) 大政謙次他：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-，計測自動制御学会論文集，17：657-663 (1981)。
- 33) K. Omasa et al.：A Quantitative Analysis of the Relationships between SO₂ or NO₂ Sorption and Their Acute Effects on Plants Leaves Using Image Instrumentation. *Environ. Control Biol.* 19：59-67 (1981)。
- 34) K. Omasa et al.：A Quantitative Analysis of the Relationships between O₃ Sorption and Its Acute

- Effects on Plants Leaves Using Image Instrumentation. *ibid.* 19 : 85-92 (1981).
- 35) K. Omasa et al. : Image Instrumentation for Evaluating the Effects of Air Pollutants on Plants. *Acta IMEKO 1982. Vol 3. Akademiai Kiado*, pp. 303-312 (1982).
- 36) 滝内・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 : 482-488 (1977).
- 37) 大政謙次 : 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).
- 38) P. Holmgren et al. : Resistance to Carbondioxide and Water Vapour Transfer in Leaves of Different Plant Species. *Physiol. Plant.*, 18 : 557-573 (1965).
- 39) R. O. Erickson and W. K. Silk : The Kinematics of Plant Growth. *Sci. American*, 242(5) : 102-113 (1980).
- 40) T. Matsui and H. Eguchi : Image Processing of Plants for Evaluation of Growth in Relation to Environment Control. *Acta Horticulturae* 87 : 283-290 (1978).
- 41) K. Omasa et al. : Image Instrumentation of Plants Exposed to Air Pollutants (4) Methods for Automatic Evaluation of the Degree of Necrotic and Chlorotic Visible Injury. *Res. Rep. Natl. Inst. Environ. Stud.* (1984) in press.

<大政謙次>

第5節 作物の収量予測モデル

1 モデルのシミュレーション言語

1.1 モデルとシミュレーション

作物の長時間 (long-term ; 日とか週単位) の生育をモデル化し, コンピュータシミュレーションにより種々の予測が行われている。特にアメリカ, イギリス, オランダ等で盛んである¹⁾²⁾。最近では短時間 (Short-term ; 時間とか, 分単位) の生育モデルまで考慮されつつある³⁾⁴⁾。

その起原は Forrester の World Model まで逆のぼることができよう。これは農業とは別の膨大なタイムモデルであった。コンピュータでシミュレートするにしてもきわめて複雑であり, このようなことが契機になり, タイムモデル専用のシミュレーション言語が開発された。この線に沿ったシミュレーションパッケージとしては, DYNAMO, や CSMP が有名である⁵⁾。

特に IBM の CSMP (Continuous System Modelling Program) は IBM 7090 用に開発された DSL (Digital Simulation Language) -90 を基本に, IBM System/360 用に改善されたもので, その後出力機器関係やファンクションナブル・ブロックなどにより優れた機能を持たせた CSMP III とともにタイムモデルのシミュレーションに威力を発揮している。

CSMP は一口で言うと, 従来のアナログコンピュータによるシミュレーションの長所をデジタルコンピュータで容易に行いうるプログラム・パッケージといった方がご理解いただけると思う。シミュレーションの歴史はアナログにあり, 特に時間変数の微分方程式などアナログコンピュータの前身ともいえるべき微分解析器により解かれていた。その長所は, 加算積分器を用い, 複雑なシステムを多くの積分要素で表わし, 電気系と物理系のアナロジーをふんだんに使って, 物理系の動態をシミュレーションにより求めるところにある。

さらに詳しくいうと, 系を多くの伝達関数に分割し, それぞれの伝達関数を電気回路で置きかえていくわけである。これはどちらかという自動制御系の話しに近くなる。というのは制御系は最も手の入り組んだタイムモデルの一つであり, 複雑な系を1次遅れ, 2次遅れなどの伝達関数の集合として扱うからである。いまある状態変数を x , 操作量を u とすると, 制御するという事は次式を意味する。

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu$$

ここでもし変数が多変数であれば x , u はベクトルで, A , B もマトリックスで与えられることとなる。制御をせず, 成り行きにまかせると, $u=0$ を意味するので,

$$\frac{dx}{dt} = Ax$$

Forrester はタイムモデルを上記の関係をフルに活用して記述しようとしたわけである。すなわち, 左辺の速度変数をパルプ形の記号で, 右辺の状態変数を長方形の記号で, さらに関連するものとして物質の供給源を雲形の記号で, 物質やエネルギーの流れを実線で, そして情報の流れを点線で表わし, 全体像を1種の流れ図 (チャート) で表わすこ