

農業・環境分野における 先端的画像情報利用

—ファイトイメージングからリモートセンシングまで—

東京大学 大学院

農学生命科学研究科 教授

大政 謙次 編著

社団法人 農業電化協会

第1章

農業・環境分野における イメージング情報の多角的利用

1. はじめに

農業・環境分野における画像情報の利用は多様であり、その技術の進歩には著しいものがある。これは、コンピューターやイメージングセンサー、GPS (Global Positioning System) などの要素技術の進歩と低廉化に加えて、広域情報の解析に適したリモートセンシング画像や地理情報などの画像情報が、地理情報システム (GIS : Geographic Information System) や地球環境観測の一環として整備されてきたことが大きい。また、インターネットなどの情報通信技術の発達とともに、環境分野だけでなく農業の分野でも画像情報を積極的に利用する試みがなされている。そして、最近では、持続的な環境保全型の農業への利用に加えて、品質や安全性に関連した分野でも画像情報の利用の試みが盛んである。ここでは、これらの農業・環境分野での画像情報の利用、特に、リモートセンシングや機能イメージングなどの画像計測 (イメージング) 情報に関連した利用について簡単に紹介する。

2. イメージング情報の利用が期待される分野

表1に、農業・環境分野におけるイメージング情報の利用が期待される分野の一覧を示す。生物生産の分野において、プレシジョン・アグリカルチャーやIT農業をめざした技術の進歩はめざましい。例えば、ポストハーベストの分野では、野菜や果実、穀物などの選別、加工処理などを自動化する目的で、新しい技術が開発され、広く利用されている。また、農作業用ロボットや種苗生産、栽培管理の自動化などに、イメージング情報を利用する試みが盛んに行われている。特に、フィールドサーバなど、インターネットなどの情報通信技術 (IT) と組み合わせたシステムの開発に、生産現場だけでなく、ポストハーベストや流通レベルでも多大な期待がある。さらに、バイオテクノロジーとそれに関連する基礎生物学の分野でも、遺伝子のスクリーニングや

遺伝子情報を含む生体機能の解明と診断への画像情報の利用が急速に拡大している。

また、地球にやさしく、安全性を考慮した環境低負荷型農業をめざして、プレシジョン・ファーミングやアグロフォレストリー、リサイクル型農業などが注目されている。これらの農法の発展には、それぞれに関連する技術の開発に加えて、近接あるいは広域リモートセンシングによる植物や農業生態系のモニタリング手法の開発、得られた情報を利用した植物や生態系のモデ

ル化や評価管理手法の開発、営農マネジメントを含めたGISシステムの構築などが不可欠とされる。

さらに、環境分野として、上記の環境保全型農業に加えて、IGBP (International Geosphere-Biosphere Program) やIPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)、GEOSS (Global Earth Observation System of Systems)、The Millennium Ecosystem Assessmentなどの国際的な動きに関連して、農地や森林、水域、生態系などのモニタリングやアセスメント、管理などのために、人工衛星や航空機からの広域リモートセンシングやGISの積極的な利用が求められている。また、地域環境計画や景観シミュレーションなどの計学分野での利用や、都市緑化のための緑化植物の選別や環境改善機能の評価などへの利用も重要である。その他、基礎生物学分野における生体機能解明への利用や反応が眼でみえる利点を生かした教育分野への利用、農山漁村における画像情報を利用したユビキタスネットワーク化への利用、災害早期警報・緊急対応システムにおける利用などが期待される。

図1は、生物生産や環境、教育研究分野へのイメージング情報の利用の概念図であ

表1 イメージング情報の利用が期待される農業・環境分野

<p>(生物生産関係：プレシジョン・アグリカルチャー・IT農業)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・栽培植物、飼育動物、培養組織などの診断 ・栽培管理、飼育管理、組織培養などの自動化 ・環境低負荷型農業と農業生態系管理 ・生産適地判定 ・収穫、選別、加工などの自動化 ・遺伝子工学機器の自動化 ・安全性診断と適正生産管理、流通システム管理 <p>(環境関係)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・生態系機能と生産力のモニタリング ・環境汚染の影響と改善機能の評価 ・緑化植物の選別と管理 ・生物多様性の評価と保全 ・土地被覆遷移のモニタリングと地図作製 ・地域計画 ・景観シミュレーション ・環境アセスメントと環境管理 ・地球観測・地球環境問題への対応 <p>(その他)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・生体機能解明 (基礎生物学、遺伝子情報を含む) ・観測とモデルの4次元同化 ・CELSS (宇宙生物学) ・教育システム (各関連分野) ・農山漁村のユビキタスネットワーク ・災害早期警報・緊急対応システム
--

る。リモートセンシングや生物・生態系などの機能イメージングによって得られたイメージング情報は、ネットワーク情報管理システムを介してデータベースに保存され、利用される。データベースには、イメージングによって得られたデータ以外に、現場での計測・分析データや、国や地方公共団

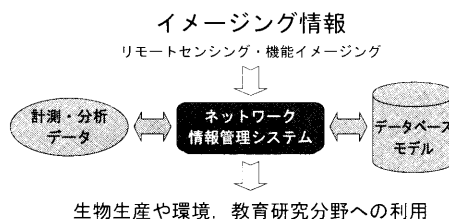


図1 イメージング情報の利用の概念図

体、研究機関、民間企業、さらに国際機関などにより作成された様々な既存データなどが含まれる。また、解析、評価、予測などには各種モデルが利用される。

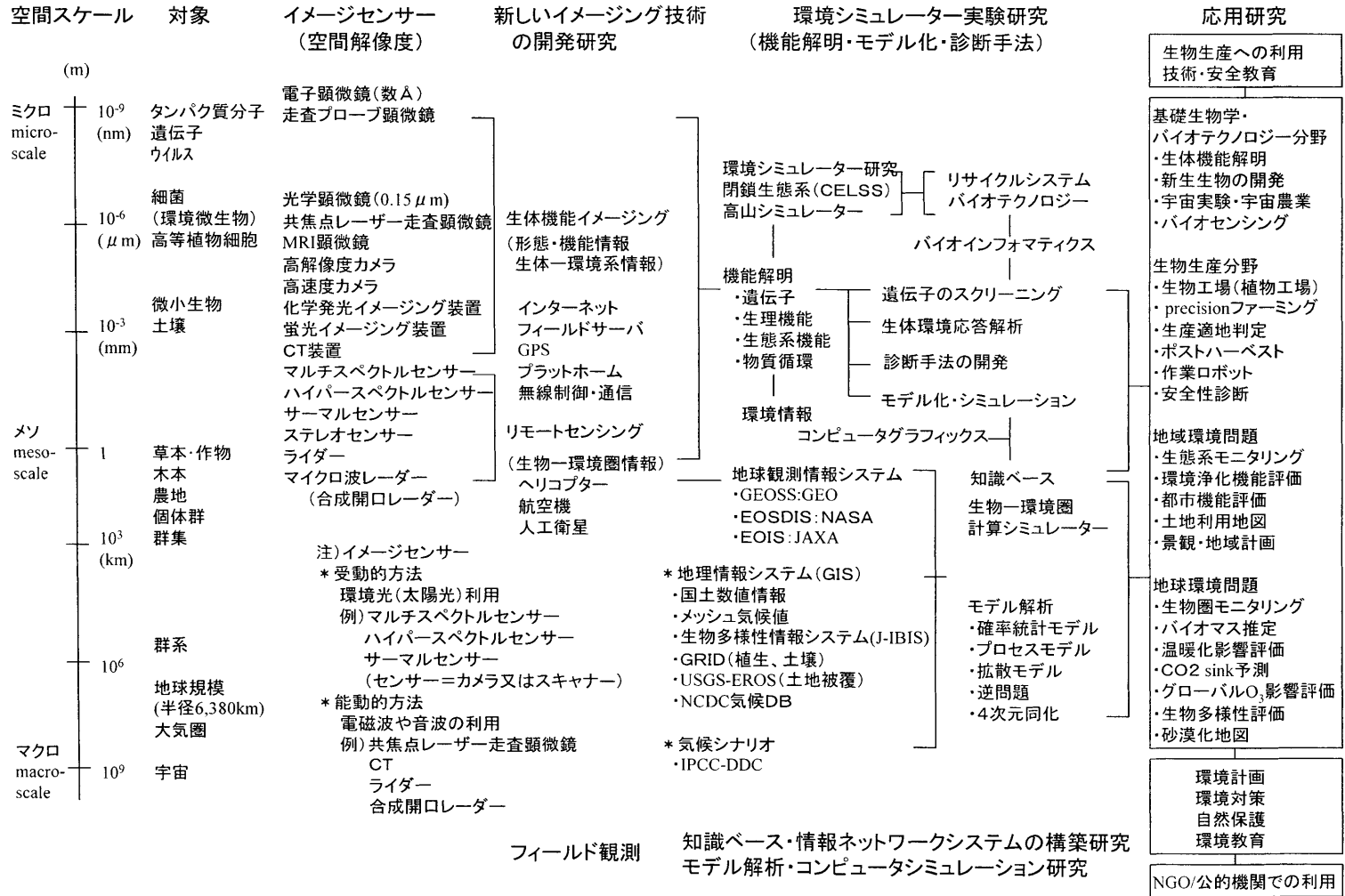
3. イメージング技術の技術的トレンドとその利用

表2に、広域リモートセンシング（生態系・群落）、生体機能イメージング（近接

表2 代表的なイメージング技術と得られる情報

分野（対象）	代表的なイメージング技術	取得可能な情報
広域リモートセンシング （生態系・群落）	空中写真（赤外線、高解像度等） マルチスペクトルスキャナー（可視～熱赤外線） ハイパースペクトルスキャナー（可視～近赤外線） ステレオスキャナー（可視線） マイクロ波レーダー（合成開口等） ライダー（レンジ、蛍光等）	景観・地形 土地被覆状態・土地利用 生態系機能・被害・収量 種構成・生物季節・群落構造 バイオマス・物質循環 土壌種・状態
生体機能イメージング （含近接リモートセンシング） （個体群・個体・種苗・細胞）	3次元形状イメージングシステム（ステレオ、ライダー等） スペクトルイメージングシステム（紫外～近赤外線） ハイパースペクトルイメージングシステム（上同） サーマルカメラ（含顕微鏡） 蛍光イメージングシステム（LIF、Chl 蛍光等） CTシステム（X線、MRI、超音波等） 顕微鏡システム（共焦点、走査プローブ等）	位置・形状・構造 器官生長・バイオマス 色調・含有色素・成分 気孔反応・蒸散 光合成・ガス交換 生体内成分・機能 細胞構造・機能・遺伝子情報
ポストハーベスト用イメージング （野菜・果実・穀類等）	CCDカメラ（カラー、紫外～近赤外、反射、透過） 3次元形状イメージングシステム（光切断法等） 化学発光イメージングシステム CTシステム（X線、MRI等） 軟X線装置 +高速画像処理	大きさ（代表径、長さ等） 外観品質（形、色、傷等） 品質劣化（酸化） 内部品質（空洞、浮皮、腐敗、成分等）

図2 イメージング情報の取得と利用の流れ図



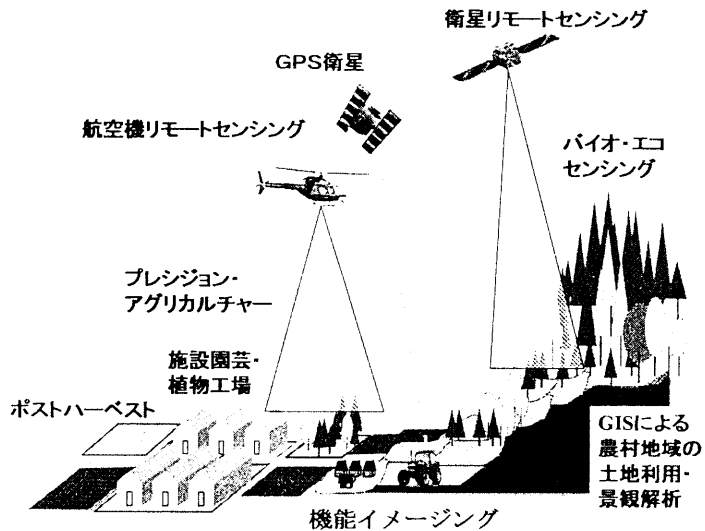


図3 農業分野におけるイメージング情報利用の概念図

リモートセンシングを含む)、ポストハーベストなどの分野の代表的なイメージング技術とこれらのイメージング技術から取得可能な情報を示す。また、図2には農業・環境分野におけるイメージング情報の取得と利用の流れを、図3には農業分野におけるイメージング技術の利用の概念図を示す。

広域リモートセンシングは、主に人工衛星や航空機からのイメージング技術であり、実際に耕地面積の広い欧米などでは、Landsat や SPOT、気象衛星などの可視から近赤外、および熱赤外の衛星画像データが、土地被覆状態や収量予測、気象予測、農業経営などに利用されてきた。人工衛星や航空機に搭載されるセンサーの技術的トレンドは、高空間解像度化、多チャンネル化、3次元イメージング、レーザーやマイクロ波などの能動的センサー利用、高頻度観測、コンポジット利用などである。例えば、2001年に打ち上げられた米国の商用衛星である QuickBird は、パナクロ画像 (0.45 ~ 0.90 μm) で0.61m、マルチスペクトル画像 (青(B): 0.45 ~ 0.52 μm 、緑(G): 0.52 ~ 0.60 μm 、赤(R): 0.63 ~ 0.69 μm 、近赤外 (NIR) : 0.76 ~ 0.90 μm) でも2.44mと、従来の航空機からのリモートセンシングに匹敵する空間解像度を有している。また、2000年に打ち上げられた EO-1の Hyperion は Landsat と同じ30mの空間解像度で、可視~近赤外 (0.4 ~ 2.5 μm) の220バンドのハイパースペクトル画像を提供する。

さらに、現在、打ち上げが検討されている Vegetation Canopy Lidar (VCL) は、1 mの距離計測精度を有するレーザー距離計によって地形や森林の3次元計測を行う計画になっている。マイクロ波を利用した合成開口レーダー (SAR) は、その波長を選択することにより、雲や降雨の状態の計測や、逆に雲や降雨の影響を受けないで、地表面の情報を得ることができる。2002年末に打ち上げられた ADIOS-II(みどり2号)

に搭載されている高性能マイクロ波放射計では、地表面からのマイクロ波の放射画像を提供できる。また、2006年に打ち上げられた ALOS (だいち) には、全世界の 1/25,000の地図作製を目的として2.5m の解像度で観測できるパンクロマチック立体視センサー (PRISM) や青 (0.42 ~ 0.50 μm)、緑 (0.52 ~ 0.60 μm)、赤 (0.61 ~ 0.69 μm)、近赤外 (0.76 ~ 0.89 μm) の 4 バンドを10m の解像度で観測できる可視近赤外放射計 (AVNIR-2) の他、10m の解像度をもつ L バンド合成開口レーダー (PALSAR) が搭載されている。高頻度観測としては、解像度が約1.1km と悪くなるが NOAA の AVHRR (同一地点を 1 日 2 回観測、バンド 1 (0.58 ~ 0.68 μm)、バンド 2 (0.725 ~ 1.1 μm)、バンド 3 (3.55 ~ 3.93 μm)、バンド 4 (10.3 ~ 11.3 μm)、バンド 5 (11.5 ~ 12.5 μm)) や EOS (NASA) の MODIS (2 日に 1 回観測、0.4 ~ 14.5 μm (36 バンド)、解像度 250m (2 バンド)、500m (5 バンド)、1000m (29 バンド)) がよく利用されている。

このような人工衛星からのリモートセンシングの発達により、従来、衛星画像では困難とされていた我が国の小面積の耕地でも、実用的な利用が可能になってきた。特に、栽培や農薬肥料などの最適管理のためのプレシジョン・ファーミングでは、GPS や GIS との併用利用による実用化が期待されている。しかし、人工衛星からのリモートセンシングには、観測周期や雲の影響などの問題があり、より自由度のあるプラットフォームからのリモートセンシングとの併用利用が必要である。航空機に搭載されているリモートセンサーには、20cm 程度の空間解像度を有するマルチバンドセンサーや 2 m の空間解像度で、可視から近赤外 (0.43 ~ 1.0 μm) を 512 バンドで計測できるハイパースペクトルセンサーなどがある。さらに、無線ヘリコプターやバルーン、農作業車からの近接リモートセンシングを加えた階層的なコンポジットリモートセンシングにより、より多くの、より有用な情報を得ることができる。

4. イメージング技術の利用例

図 4 は、可視から近赤外域の植物葉 (正常) や土壌、水、雪、雲などの分光反射特性の例を示す。植物や土壌ではその種類や含水量、生育状態などによって分光反射特性が変化する。特に、植物はクロロフィルなどの光合成色素のために可視域で反射が小さく、0.7 μm 以上で急激に反射が大きくなる特徴があり、含有色素量が変わると大きく分光波長特性が変化する。また、1.45 μm と 1.94 μm 付近には水の大きな吸収帯があり、反射が小さくなる。青から緑色の波長はエアロゾルや薄雲などによる大気散乱の影響を受けやすく、地表面の正確な情報を得るには大気補正が不可欠である。この波長では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。1.6 μm 付近の近赤外域では、雲の反射が大きく、雪からの反射が小さいので、雲と雪の区別が可能である。地表面における雪被覆状態の定量化のために、正規化雪指数 (Normalized Difference Snow Index、 $\text{NDSI} = (R_{\text{GREEN}} - R_{\text{1000}}) /$

($R_{GREEN} + R_{1600}$)、添え字は波長(色とnm)が提案されており、MODISのバンド4と6、LANDSAT TMのバンド2と5が計算のために利用される。また、植生の活力度、構造、色素や成分の含有量、生物化学的特性、含水量など、目的に応じて多くの指数が提案されており(表3参照)、植生の機能診断や種分類、土地被覆分類などにも利用される。このように、リモートセンシングでは、分光反射特性の違いを利用して、様々な情報を得ることができる。

図5は、ランドサットMSSとTMを用いて解析した釧路湿原の乾燥化の影響を示す。釧路湿原では、湿原内を流れる釧路川や雪裡川上流の河岸の直線化工事が原因と考えられる洪水が1994年に発生し、上流の土砂が湿原内に堆積した。このため、その後、湿原が乾燥化し、ハンノキが繁茂した。図は、1979年(A)と1996年(B)の湿原内の水域とハンノキ域の分布図の比較である。ここでは、空間分解能が80mのMSS画像と

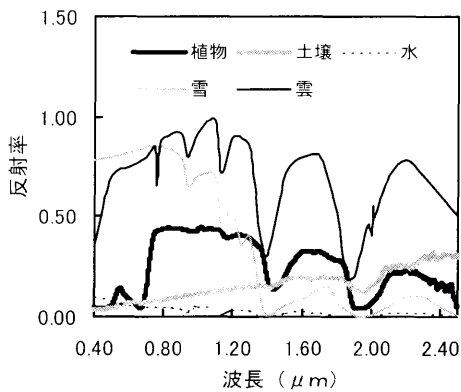


図4 植物(正常)や土壌、水、雪、雲の代表的分光反射特性

30mのTM画像の幾何補正を行い、ISODATA法によって3分類し、水域とハンノキ域を決定した。この分類結果と別途TM画像から推定した洪水域を比較すると、洪水の後、ハンノキ域が増大し、その地域は洪水があった地域とほぼ一致していた。このように、衛星画像を用いれば、広域での土地被覆の状態の変化を容易に調べることができる。

図6は、航空機搭載の高空間分解能マルチバンドセンサー(LH Systems ADS40)

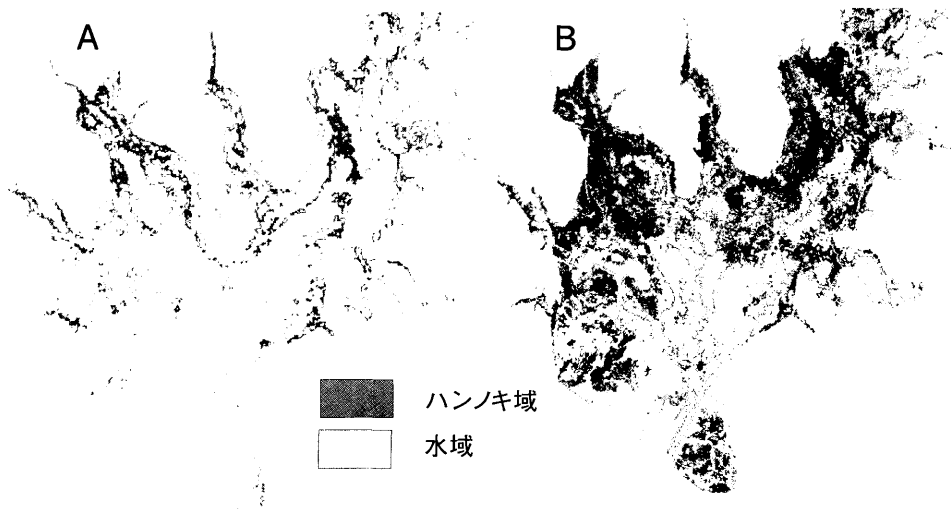


図5 ランドサットMSSとTMを用いた釧路湿原の水域の減少とハンノキ域の増加の評価⁹⁾。A:1979年、B:1996年

表3 リモートセンシングで用いられる植生指数一覧

植生指数	計算式	文献
植生の活力度・構造		
Sum Green Index (SG)	$SG = \text{average}(R_{500} \text{ to } R_{600})$	Gamon (1999)
Simple Ratio Index (SR)	$SR = R_{NIR} / R_{RED}$	Rouse <i>et al.</i> (1973) & Sellers (1985)
Modified Red Edge SR (MSR705)	$MSR_{705} = (R_{750} - R_{445}) / (R_{705} - R_{445})$	Sims & Gamon (2002) & Datt (1999)
Vogelmann Red Edge Index (VOG1, VOG2 & VOG3)	$VOG1 = R_{740} / R_{720}$ $VOG2 = (R_{724} - R_{747}) / (R_{715} + R_{724})$ $VOG3 = (R_{734} - R_{747}) / (R_{715} + R_{724})$	Vogelmann <i>et al.</i> (1993) & Zarco-Tejada <i>et al.</i> (1999)
Red Edge Position Index (REP)	REP=the wavelength of steepest slope from R_{690} to R_{740}	Curran <i>et al.</i> (1995)
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	$NDVI = (R_{NIR} - R_{RED}) / (R_{NIR} + R_{RED})$	Rouse <i>et al.</i> (1973) & Sellers (1985)
Enhanced Vegetation Index (EVI)	$EVI = 2.5 \cdot ((R_{NIR} - R_{RED}) / (R_{NIR} + 6R_{RED} - 7.5R_{BLUE} + 1))$	Huete <i>et al.</i> (1997)
Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI)	$ARVI = (R_{NIR} - (2R_{RED} - R_{BLUE})) / (R_{NIR} + (2R_{RED} - R_{BLUE}))$	Kaufman <i>et al.</i> (1996)
Red Edge NDVI (NDVI ₇₀₅)	$NDVI_{705} = (R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705})$	Gitelson & Merzlyak (1994)
Modified Red Edge NDVI (MNDVI ₇₀₅)	$MNDVI_{705} = (R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705} - 2R_{445})$	Datt (1999) & Sims and Gamon (2002)
Renormalized Difference Vegetation Index (RDVI)	$RDVI = (R_{800} - R_{670}) / (R_{800} + R_{670})^{1/2}$	Rougean & Breon (1995)
Triangular Vegetation Index (TVI)	$TVI = 0.5(120(R_{750} - R_{550}) - 200(R_{670} - R_{550}))$	Broge & Leblanc (2000)
Modified Triangular Vegetation Index (MTVII & MTVI2)	$MTVII = 1.2(1.2(R_{800} - R_{550}) - 2.5(R_{670} - R_{550}))$ $MTVI2 = 1.5(1.2(R_{800} - R_{550}) - 2.5(R_{670} - R_{550})) / ((2R_{800} + 1)^2 - (6R_{800} - 5R_{670}^{1/2}) - 0.5)^{1/2}$	Haboudance <i>et al.</i> (2004)
Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)	$SAVI = (1+L)(R_{800} - R_{670}) / (R_{800} + R_{670} + L)$, where $L = (0,1)$	Huete (1988) & Qi <i>et al.</i> (1994)
Improved SAVI (mSAVI)	$mSAVI = (1/2)(2R_{800} + 1 - ((2R_{800} + 1)^2 - 8(R_{800} - R_{670}))^{1/2})$	Qi <i>et al.</i> (1994)
Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index (OSAVI)	$OSAVI = (1+0.16)(R_{800} - R_{670}) / (R_{800} + R_{670} + 0.16)$	Rondeaux <i>et al.</i> (1996)
植物色素・成分・生物化学		
Simple Ratio Pigment Index (SRPI)	$SRPI = R_{430} / R_{680}$	Peñuelas <i>et al.</i> (1995)
Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index (MCARI, MCARI ₁ & MCARI ₂)	$MCARI = ((R_{710} - R_{670}) - 0.2(R_{710} - R_{550})) (R_{710} / R_{670})$ $MCARI_1 = 1.2(2.5(R_{800} - R_{670}) - 1.3(R_{800} - R_{550}))$ $MCARI_2 = 1.5(2.5(R_{800} - R_{670}) - 1.3(R_{800} - R_{550})) / ((2R_{800} + 1)^2 - (6R_{800} - 5R_{670}^{1/2}) - 0.5)^{1/2}$	Daughtry <i>et al.</i> (2000) Haboudance <i>et al.</i> (2004)
Transformed CARI (TCARI)	$TCARI = 3((R_{700} - R_{670}) - 0.2(R_{700} - R_{550})) (R_{700} / R_{670})$	Haboudance <i>et al.</i> (2002)
Normalized Pigment Chlorophyll Index (NPCI)	$NPCI = (R_{680} - R_{430}) / (R_{680} + 430)$	Peñuelas <i>et al.</i> (1994)
Normalized Difference Nitrogen Index (NDNI)	$NDNI = (\log(1/R_{1510}) - \log(1/R_{1680})) / (\log(1/R_{1510}) + \log(1/R_{1680}))$	Serrano <i>et al.</i> (2002) & Fourty <i>et al.</i> (1996)
Normalized Difference Lignin Index (NDLI)	$NDLI = (\log(1/R_{1754}) - \log(1/R_{1680})) / (\log(1/R_{1754}) + \log(1/R_{1680}))$	Serrano <i>et al.</i> (2002) & Melillo <i>et al.</i> (1982)
Cellulose Absorption Index (CAI)	$CAI = 0.5(R_{2000} - R_{2200}) / R_{2100}$	Daughtry (2001) & Daughtry <i>et al.</i> (2004)
Plant Senescence Reflectance Index (PSRI)	$PSRI = (R_{680} - R_{500}) / R_{750}$	Merzlyak <i>et al.</i> (1999)
Carotenoid Reflectance Index (CRI1 & CRI2)	$CRI1 = (1/R_{510}) - (1/R_{550})$ $CRI2 = (1/R_{510}) - (1/R_{700})$	Gitelson <i>et al.</i> (2002)
Anthocyanin Reflectance Index (ARI1 & ARI2)	$ARI1 = (1/R_{550}) - (1/R_{700})$	Gitelson <i>et al.</i> (2001)

Photochemical Reflectance Index (PRI)	$ARI2 = R_{900} \cdot ((1/R_{550}) - (1/R_{700}))$
Structure Insensitive Pigment Index (SIPI)	$FPI = (R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570})$
Zarco-Tejada & Miller (ZM)	$SIPI = (R_{667} - R_{445}) / (R_{667} + R_{445})$
Normalized Phaeophytinization Index (NPKI)	$ZM = R_{750} / R_{710}$
Carter Indices (Ctri1 & Ctri2)	$NPKI = (R_{415} - R_{435}) / (R_{415} + R_{435})$
Lichtenthaler indices (Lic1 & Lic2)	$Ctri1 = R_{667} / R_{430}$
Gitelson & Merzlyak (GM1 & GM2)	$Ctri2 = R_{667} / R_{710}$
キャノピー含水量	$Lic1 = (R_{667} - R_{660}) / (R_{667} + R_{660})$
Water Band Index (WBI)	$Lic2 = R_{447} / R_{660}$
Normalized Difference Water Index (NDWI)	$GM1 = R_{1550} / R_{3500}$
Moisture Stress Index (MSI)	$GM2 = R_{1550} / R_{700}$
Normalized Difference Infrared Index (NDII)	$WBI = R_{930} / R_{970}$
	$NDWI = (R_{667} - R_{1241}) / (R_{667} + R_{1241})$
	$MSI = R_{1550} / R_{815}$
	$NDII = (R_{815} - R_{1640}) / (R_{815} + R_{1640})$

注1) 図中のR_{***}は、数字で表される波長 (nm) における反射であることを表している。
 注2) 分類は便宜的に行ったもので、目的によっては他の分類の指数として用いられることもある。

Gamon *et al.* (1992, 1997)
 Peñuelas *et al.* (1995)
 Zarco-Tejada *et al.* (2001)
 Barnes *et al.* (1992)
 Carter (1994)
 Carter *et al.* (1996)
 Lichtenthaler *et al.* (1996)
 Gitelson & Merzlyak (1997)
 Penuelas *et al.* (1995) & Champagne *et al.* (2001)
 Gao (1995)
 Hunt *et al.* (1989) & Ceccato *et al.* (2001)
 Hardisky *et al.* (1983) & Jackson *et al.* (2004)

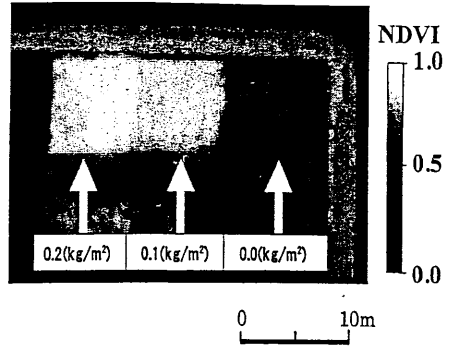


図6 航空機搭載の高空間分解能マルチバンドセンサー(LH Systems ADS40)により得られたスペクトル画像から推定されたNDVIによるコムギの生育診断¹⁹⁾。このマルチバンドセンサーは4つのバンド(B: 0.43~0.49 μ m, G: 0.535~0.585 μ m, R: 0.61~0.66 μ m, NIR: 0.835~0.885 μ m)を有しており、空間分解能は20cmである

により得られたスペクトル画像から算出された正規化植生指数 (NDVI、表3参照) によるコムギの生育診断の例である。このコムギ畑は、窒素肥料の施肥量の違いにより3つの区に分かれている。NDVI値が大きいくほど栄養生長がよいことを示すが、左側の区のコムギは、生長が早い風が弱く、突風ですぐ倒れる傾向があった。生殖生長も含めた総合的な生育では中央の区が最適で、右側の区では肥料不足によって生育が悪かった。この結果は、生育管理のためには、各々の生育ステージでの観測が必要であることを示唆している。

図7は、航空機搭載のハイパースペクトルセンサー (Spectral Imaging AISA) で得られたスペクトル画像から得られた農地の分光反射特性の例である。農地にはスイカやカボチャ、トウモロコシ、マ

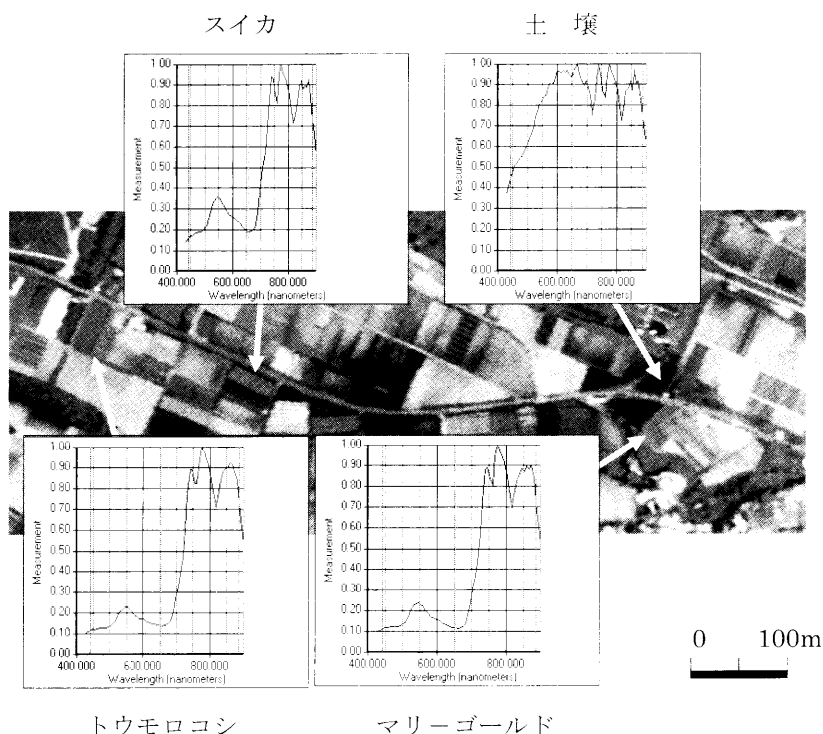


図7 航空機搭載のハイパースペクトルセンサー (Spectral Imaging, AISA) で得られたスペクトル画像から解析された農地の分光反射特性¹⁹⁾。このセンサーは、70バンド (0.40 ~ 0.97 μ m) を有しており、空間解像度は約2mである

リーゴールドなどが栽培されている。スペクトル画像から、農地の区画が区分でき、また、栽培種によってその分光反射特性が異なっていることがわかる。このことから、土壌や植物といった簡単な土地被覆状態の分類だけでなく、栽培種の分類やその生育状態の診断への利用が可能であることがわかる。図8はその分類例である。幾つかの方法を比較したが、NDVIにより植生とその他を分類した後、スペクトル特徴抽出法としてDBFE (Decision Boundary Feature Extraction)、分類法としてECHO (Extraction and Classification of Homogeneous Objects) を用いたものが最も分類精度 (=93.3% : Kappa=0.924) がよかった。なお、ハイパースペクトルリモートセンシングでは、任意の波長のスペクトル画像を選択できるので、表3に示すような様々な植生指数を計算することができる。

図9は、首都圏のオゾン濃度が高い地域における寺社林のヘリコプターから撮影された航空写真と温度画像 (熱赤外画像 : 波長8 ~ 12 μ m) の例である。撮影は樹木の活力度が高く、6月の熱環境が比較的均一な状態に保たれている曇天で、微風の日を選んで行った。このような熱環境状態での観測では、葉温の違いは気孔を介しての蒸散潜熱の違いを反映し、葉温から蒸散能力や気孔閉鎖の状態を診断できる。図の航空写真では、色調や形態の違いから、樹種の違いや枯れたアカマツ (図中 a) や先枯

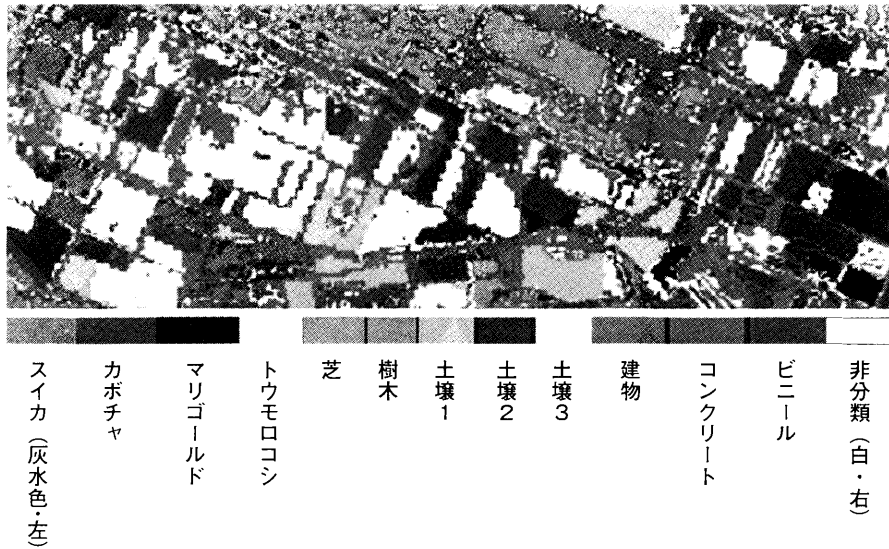


図8 図7の地域の植物種および土地被覆分類の例⁶⁾

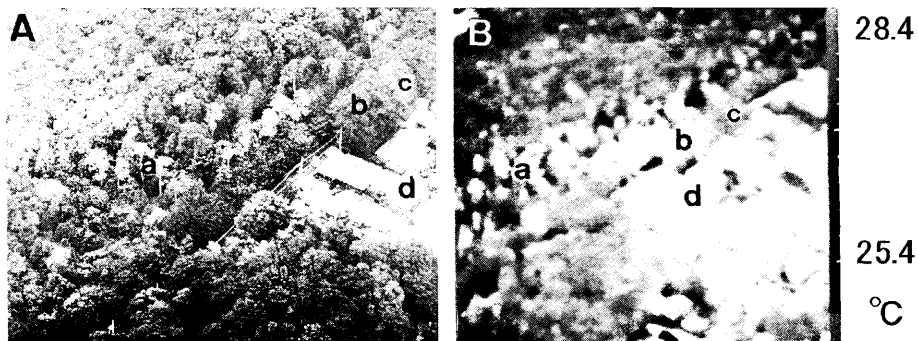


図9 首都圏のオゾン濃度が高い地域における寺社林のヘリコプターから撮影された航空写真(A)と温度画像(B)²¹⁾

れしたスギを認識することができた。温度画像をみると、樹木の温度は、樹種や日当たりの違い、被害の状態などで異なっていたが、比較的健全な境内の内側のクスギ、コナラ、エゴノキを中心とした広葉樹林では26.5～28.0℃と低く、枯れたアカマツやスギでは28.0～29.0℃と高かった。また、葉形異状が認められた道路沿いのケヤキ(b)は、異状が認められなかったムクノキやシラカシ(c)に比べて、0.5℃程度温度が高かった。なお、家屋(d)や道路、駐車場、裸地などは、枯れた樹木よりもさらに高温(別の温度画像によれば35℃以上)を示した。このような大都市周辺では、大気汚染に加えて、都市化に伴う地下水位の低下などにより、樹勢が弱り、松食い虫による被害やスギの先枯れ被害が発生している。温度画像のリモートセンシングでは、このような可視被害だけでなく、航空写真では認識できない気孔閉鎖などの不可視の軽微な影響を早期に発見できる利点がある。また、緑地の気候緩和機能の評価にも有用である。

一方、生体機能イメージングは、遺伝子や細胞レベルから個体群を対象とした近接リモートセンシングまで、使用目的によって多種多様である。生体（または生態）機能解明や環境応答解析などの研究目的のためだけでなく、広域リモートセンシングの補助（階層的リモートセンシング）として、また、植物被害の診断、農作業用ロボットや植物生産ラインの視覚センサー、さらにバイオテクノロジー関連技術としても使用される。さらに、プレシジョン・アグリカルチャーの実用化のためにも有用である。この分野の技術的トレンドも、広域リモートセンシングの場合と同様、高空間解像度化、ハイパースペクトル化、3次元イメージングやレーザーやマイクロ波などの能動的センサーの利用などである。しかし、生物生産分野では、計測装置の低廉化やコンパクト化、利便化、また、携帯端末などを利用したユビキタスネットワーク化なども重要である。

生体機能イメージングにおける高解像度化の極限は、細胞機能や遺伝子などの分子レベルでの非破壊計測であり、このため、蛍光色素などを利用した共焦点レーザー顕微鏡や走査プローブ顕微鏡などの技術が発達してきている。また、X線や核磁気共鳴（NMR）などを用いた細胞や組織レベルでの3次元構造と成分・機能情報を得るCTシステムや、生体内に存在するクロロフィルa蛍光などのスペクトル画像を計測することにより光合成反応などに関する情報を得るシステム、遅延蛍光や化学発光などを計測するシステムなども開発されている。レーザーを利用した3次元形状イメージングやLIF（Laser Induced Fluorescence）蛍光イメージングなどは、能動的な計測技術である。ハイパースペクトルイメージングシステムは、顕微鏡レベルから近接リモートセンシングまでに利用でき、多くの生理的・生態的な情報を得ることができる。ハイパースペクトル画像解析においては、分光成分分析に用いるケモメトリックスの解析手法の利用が有用である。

図10は、分光ミラー／フィルターを内蔵したマルチスペクトルカメラと、このカメラを用いて計測されたイネのスペクトル画像である。このカメラでは、4バンド（B：0.40～0.52 μm 、G：0.48～0.60 μm 、R：0.60～0.72 μm 、NIR：0.70～1.1 μm ）のスペクトル画像とその合成画像を得ることができる。植物葉は、図4において述べたように、クロロフィルやカロチノイドなどの光合成色素の吸収により、0.4～0.7 μm の可視域の反射が小さく、また、葉温上昇を防ぐために0.75 μm 以上の近赤外域では、大きな反射特性を示す。特に、青や赤の帯域で吸収が大きく、図10の画像でみられるように葉が黒く写る。緑の帯域では、青や赤の帯域に比べて多少反射が大きい。稲穂は可視域で葉よりも反射が大きく、特に赤の帯域で顕著である。このため、マルチスペクトル画像は、作物や果樹などの器官の抽出やその生育診断に使用できる。

プレシジョン・ファーミングにおいては、計測されたスペクトル画像から、植物や土壌の成分を分析することが期待されているが、実際に微量成分の量などを計測する

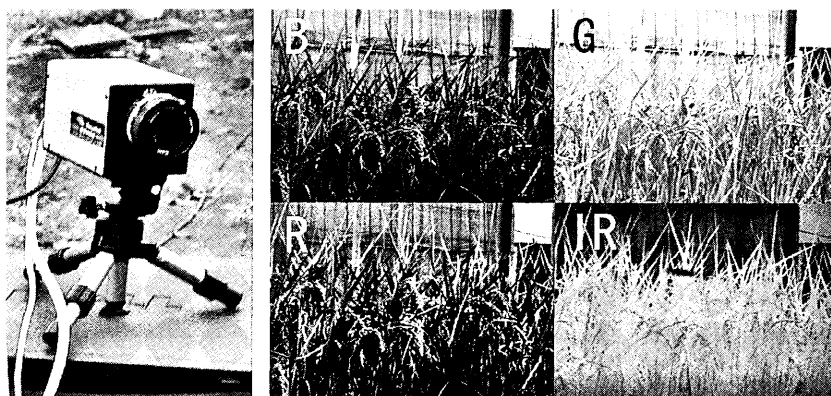


図10 分光ミラー／フィルター内蔵のマルチスペクトルカメラ（DuncanTech MS3100）と計測されたイネのスペクトル画像. B：0.40～0.52 μm 、G：0.48～0.60 μm 、R：0.60～0.72 μm 、NIR：0.70～1.1 μm

には限界があることにも注意を要する。例えば、生葉での計測では、生体内の状態や反応によっては、他の波長を用いた方が有用な場合がある。光合成に関するクロロフィル a の濃度を推定する場合、吸収帯である青や赤の波長を用いるよりは、緑と近赤外の比（0.55 μm / 0.90 μm ）を用いた方が、相関が高く、推定誤差が小さい。この傾向は、クロロフィル a の濃度が大きいほど顕著である。また、水ストレスの影響や窒素施肥効果をみる場合にもこのことがいえる。葉が枯れるような乾燥状態では、診断に水の吸収帯を利用するのが有用であるが、通常の生育状態における萎れ程度の水ストレス（-1.0MPa 以上）では、葉からの反射スペクトルのバンド比でみると余り差がみられない。それゆえ、水ストレスの診断には、形状変化の計測の方が有効である。窒素施肥の場合、生体内の窒素含有量の増加とともに、クロロフィルの含有量が変化する。このため、施肥効果をみるには、窒素の吸収帯よりも、0.55 μm と近赤外域の比や0.75 μm 付近の吸収エッジの変化（シフト）など、クロロフィル含有量と関係する波長の画像を解析した方が有効である。なお、含有色素や微量成分の量を推定する場合、画像濃度との関係を相関解析により求める方法をよく用いるが、相関係数が0.9以上であっても、実際には上下限值に数倍の差が生じるので、定量的な成分分析に利用するときには注意を要する。この場合、誤差評価には標準誤差や決定係数を用いる方がよい。また、土壌の微量成分の量を推定する場合には、水ストレスの場合と同様、検量線の範囲が適切かどうかの確認と上記の誤差を考慮した解析が必要である。これらの点に注意すれば、スペクトル画像の解析は、得られる情報が多く、安価で、かつ、コンパクト、高速処理が可能な装置開発が可能なことから、農業・環境分野での実用的な利用が期待される。なお、植物や土壌の解析には、表3に示した植生指数の中で目的にあったものを選ぶことも有用である。

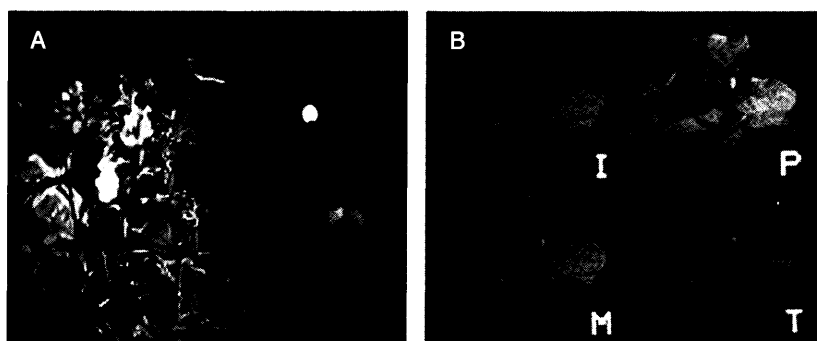


図11 LIF イメージングシステム (A) とクロロフィル a の蛍光誘導期の画像 (B)¹³⁾。図 A では LIF イメージングシステムにより植物にレーザー光が照射されている。図 B の画像は蛍光誘導期現象 (Kautsky Effect) における O (origin)、P (peak)、M (maximum)、T (terminal steady-state) の各時点のものである

図11は、筆者らが開発したアルゴンレーザーを光学的にスキャンし、クロロフィル a の蛍光誘導期現象 (Kautsky Effect) を遠隔で計測できる LIFT (Laser Induced Fluorescence Transients) イメージングシステムである。レーザー光を、ポリゴンとガルバノの両スキャナーを用いて、面的に照射するシステムで、このシステムを用いた蛍光誘導期現象の計測例が示されている。この計測により、光合成反応系の画像診断が可能である。また、クロロフィル a 蛍光を利用した診断には、蛍光誘導期現象を用いるものの他に、強い飽和パルス光を照射し、光化学的なクエンチングと非光化学的なクエンチングとに分離して解析する方法が開発され、最近では、ポータブル型の装置や変動光の下でも計測可能なように、パルス変調 (PAM) 化した装置も開発されている (第2章参照)。

3次元形状イメージングには、スキャニングライダーや光切断法などの能動的な方法とステレオ法や shape-from-x と呼ばれる受動的な方法がある。前者は、計測のためにレーザーなどの計測光を用いるので、高価ではあるが、被写体のテクスチャーや環境光の影響を受けることなく精度のよい計測ができる。後者は、計測光を用いないので装置的には安価であるが、被写体のテクスチャーや環境光が精度に影響を与える。図12は、能動的な手法である高分解能可搬型スキャニングライダー (第8章参照) を用いた植物 (ナス) の生育過程の計測例である。使用したライダーは、三角測量に基づく光切断法の原理 (光プローブ法) により測距を行うもので、距離精度は、計測距離が3.5mの時で約0.5mm、10mの時で約5mmであった。図は、幾つかの方向から計測した距離画像をコンピューターグラフィックスの手法を用いて3次元構築し、同時に計測されたカラー画像をテクスチャーマッピングしたものである。

図13は、除草剤の一種であるバスタ (グルフォシネイト液剤) 処理後の植物への影響を、ナチュラルカラー、クロロフィル蛍光 (Kautsky Effect の peak)、温度、P R I

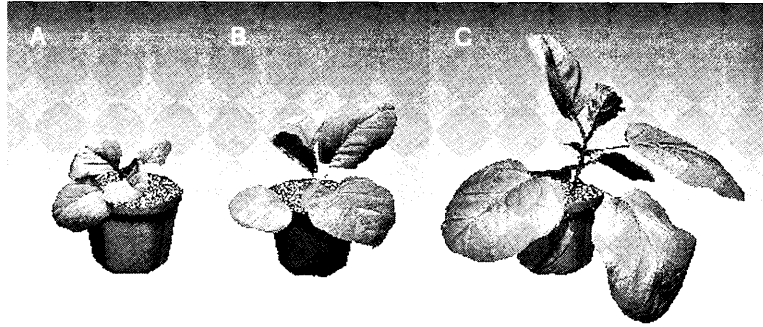


図12 高分解能可搬型スキャングライダー（光プローブ法）を用いた植物（ナス）の生育過程のテクスチャマッピング画像¹⁷⁾。A：播種後34日、B：42日、C：52日

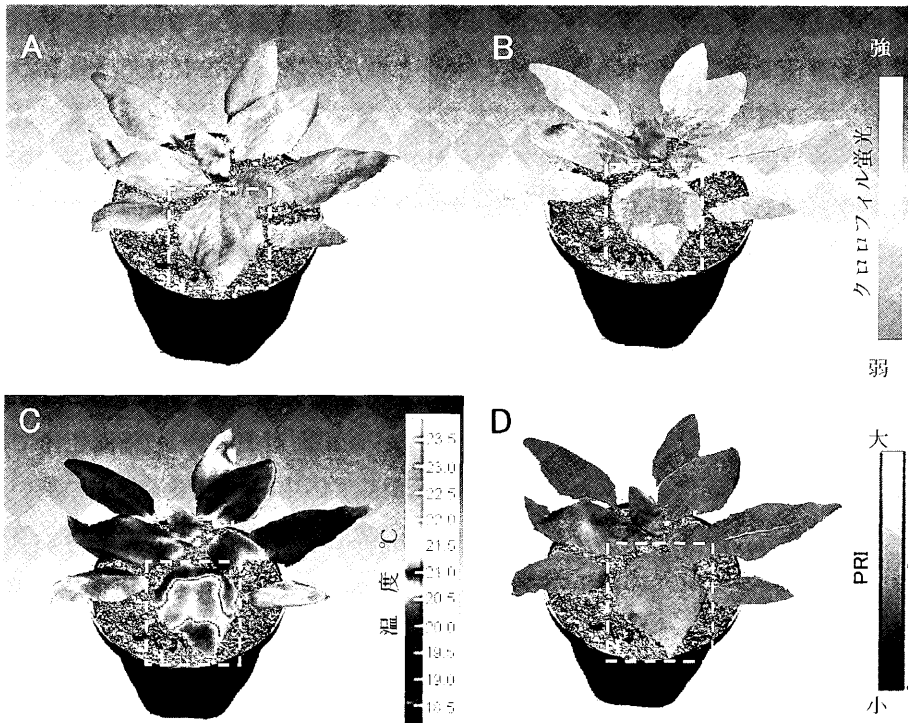


図13 除草剤の一種であるバスタ（グルフォシネイト液剤）処理後の植物（ヒマワリ）への影響の3次元画像における比較¹⁷⁾。A：ナチュラルカラー画像、B：クロロフィル蛍光画像（Kautsky Effectのpeak）、C：温度画像、D：PRI（Photochemical Reflectance Index）画像。AとBは処理後約10時間、CとDは処理後1.5時間経過した時点の画像である

（Photochemical Reflectance Index）の3次元画像において比較したものである。これらの3次元画像は、上記の高分解能可搬型スキャングライダーにより計測した3次元形状画像に、同時に計測したナチュラルカラー、クロロフィル蛍光、温度および

PR I (表3参照)の各画像を合成したものである。方形の点線で囲った葉の一部にバスタ処理を行った。ナチュラルカラー画像とPR I画像には影響が現れなかったが、クロロフィル蛍光画像と葉温画像には影響が現れた。これは、バスタに含まれるグルフォシネイトによって、植物葉内で生成されるアンモニアの代謝機能が阻害され、葉内のアンモニア濃度が上昇し、光合成反応の阻害や気孔の開鎖が引き起こされたことによる。10時間程度の実験期間内には可視害は発現しなかったが、数日後には可視害が発現した。クロロフィル蛍光誘導期現象における蛍光強度変化は、主に光合成における光化学反応系II(PSII)の電子受容体 Q_A の酸化還元状態と吸収した光エネルギーのキサントフィルサイクルでの熱放散能力によって決定される。特に、 Q_A の酸化還元状態は、PSII同士の励起エネルギー移動やPSIIの不均一性、プラストキノンプールの大きさにも影響を受けるが、マンガングラスタ(水分解と酸素発生)から Q_A への電子の供給や光化学反応系I(PSI)以降の電子伝達速度(フェロドキシナー-NADP還元酵素を介しての $NADP-H_2$ の生成とカルビンサイクルや光呼吸などでの還元力としての利用)に関係する。このため、クロロフィル蛍光誘導期現象の計測により、光合成反応に関する情報を得ることができる。蛍光誘導期現象のpeakPでの蛍光強度は、電子の供給により Q_A が還元されると大きくなり、炭酸固定などによりPSI以降で電子が消費されると小さくなる。また、高エネルギー状態の生成により熱放散が大きくなると小さくなる。バスタ処理によるpeakPでの蛍光強度の低下は、光合成や熱放散により電子が消費されたというよりは、酸素発生系などのPSIIの阻害により Q_A の還元が押さえられたことによると推察される。一方、PR Iはキサントフィルサイクルにおける集光クロロフィルタンパク質(LHCII)の補助色素であるキサントフィル類の変化を表すとされ、環境光から反応中心への集光効率の高いピオラキサニンから、高エネルギー状態の生成に伴い、集光効率の低い、アンテラキサニン、ゼアキサニンへの脱エポキシ化と負の相関関係があるとされる。しかし、バスタ処理によるPR Iへの影響は認められなかった。PR Iは、葉傾斜角や葉色など、反射率に関係する他の要因によっても変化し、情報として必ずしもキサントフィル類の変化だけを表しているとは限らないことに注意を要する。

ポストハーベスト分野は、生物生産分野の中で、イメージングの実用化が最もすすんでいる。ライン実装のために、高速処理が求められるが、画像としての計測項目は限定され、大きさ(代表径、長さなど)や外観品質(形、色、傷など)が主で計測項目となる。内部品質の一部(空洞、浮皮、腐敗など)についても、X線CTや透過光などによりイメージングされているが、成分(糖度、酸度など)や熟度についても画像化の研究が進められている。例えば、農家から集荷されたミカンの階級等級自動選別システムでは、コンテナで運ばれた果実は、ダンパーによりローラーコンベア上を進み、整列ベルト、整列ローラーによって1列に並べられる。その後、果実は、近赤

外光を中心に照射するランプを用いて、数波長の解析を行うことにより、糖度、酸度の計測を行う。次に、X線画像により浮皮、スアガリの検査を行い、さらにカラーCCDカメラを用いて外観検査を行う。得られた画像を処理し、寸法、色、形状、傷および病気などに関わる特徴量を抽出した後、各果実の階級および等級を判定する。現在、全国の集荷場にこのようなシステムが実際に導入されている（第4章参照）。また、野菜などの調整システムや保存状態の診断にも、イメージングが積極的に利用されつつある。

5. おわりに

ここでは、農業・環境分野におけるイメージング情報の利用、特にリモートセンシングや機能イメージングなどのイメージング情報に関連した利用について簡単に紹介した。表1に示したように、農業・環境の分野における画像情報の利用は多様である。ここでは、その全てを紹介することはできないが、バイオテクノロジーやポストハーベスト、家畜診断などの高い収益性を有する分野では、実用的な機能イメージング技術の積極的な開発が行われている。また、植物工場やプレシジョン・ファーミングのような栽培管理の分野でも、高生産性や環境保全型農業のために、自動栽培システムや農作業ロボットに搭載したイメージングセンサーの開発やGPS/GISと組み合わせたリモートセンシングの研究が盛んに行われている。さらに、環境分野では、地球環境や地域環境のモニタリングと影響評価、そして計画や保全のために、リモートセンシングなどの利用が盛んである。そして、GCM (General Circulation Model) をはじめとした様々なモデルや空間情報と統合したGEOSSの必要性が叫ばれている。一方、今後、このようなイメージング情報は、インターネットなどの情報通信技術の普及によって、上記の分野だけでなく、農業教育や環境教育などの分野も含めた多分野での利用拡大が期待される。

〈参考文献〉

- 1) Colwell, R.N. (ed.) (1983) Manual of Remote Sensing, 2nd Ed. Vol.II. Amer. Soc. Photogrammetry.
- 2) Govindjee and L. Nedbal (2000) Seeing is believing. Photosynthetica 38:481-482.
- 3) Häder, D-P. (2000) Image Analysis: Methods and Applications. 2nd ed. CRC Press.
- 4) Hobbs, R.J. and H.A. Mooney (編) 大政謙次他 (監訳) (1993) 生物圏機能のリモートセンシング. シュプリンガー・フェアラーク.
- 5) 熊谷進・局博一・大政謙次・遺伝普及会 (編) (2006) 科学は食のリスクをどこまで減らせるかー食の安全科学一. 遺伝別冊19.
- 6) Lu, S., K. Oki, Y. Shimizu and K. Omasa (2006) Comparison between several feature extraction/classification methods for mapping complicated agricultural land use patches using airborne hyperspectral data. Int. J. Remote Sens. in press.

- 7) 宮脇敦史 (編) (2000) GFP とバイオイメージング. 羊土社.
- 8) Munack, A. (ed.) (2006) CIGR Handbook of Agricultural Engineering. Vol VI. Information Technology. ASABE. 231-244.
- 9) Oki, K., T. Awadu, H. Oguma and K. Omasa (2005) Spatial assessment of the alder tree in Kushiro Mire, Japan using remotely sensed imagery - Effects of the surrounding land use on Kushiro Mire. Environ. Monitor. Assess. 109: 243-253.
- 10) Omasa, K. (1990) Image instrumentation methods of plant analysis. In Modern Methods of Plant Analysis. New Ser. Vol.11 (H.F. Linskens and J.F. Jackson, eds.) 203-243. Springer.
- 11) 大政謙次 (1994) 新しい農業気象・環境の科学 (日本農業気象学会編) 149-173 養賢堂.
- 12) 大政謙次 (1994) 細胞・組織機能の計測と診断. 計測と制御 33:855-862.
- 13) Omasa, K. (1998) Image instrumentation of chlorophyll a fluorescence. SPIE 3382:91-99.
- 14) Omasa, K. (2000) 3D color video microscopy of intact plants. In Image Analysis: Methods and Applications, 2nd ed. (D.P. Häder, ed) 257-273. CRC Press.
- 15) Omasa, K. (2006) Precision agriculture. Image sensing and phytobiological information. In: CIGR Handbook of Agricultural Engineering. Vol VI. Information Technology. (Munack, A. ed.) ASABE. 217-231.
- 16) Omasa, K. and J.G. Croxdale (1992) Image analysis of stomatal movements and gas exchange. In Image Analysis in Biology. (D.-P. Häder, ed.) 171-193. CRC Press.
- 17) Omasa, K., F. Hosoi and A. Konishi (2006) 3D lidar imaging for detecting and understanding plant responses and canopy structure. J. Exp. Bot. in press and published in electric version Oct 9.
- 18) 大政謙次・近藤矩朗・井上頼直 (編著) (1988) 植物の計測と診断. 朝倉書店 155-192.
- 19) Omasa, K., K. Oki and T. Suhama (2006) Precision agriculture. Remote sensing from satellite and aircraft. In: CIGR Handbook of Agricultural Engineering. Vol VI. Information Technology. (A. Munack, ed.) 231-244 ASABE.
- 20) Omasa, K., H. Saji, S. Youssefian and N. Kondo (eds) (2002) Air Pollution and Plant Biotechnology. Springer.
- 21) 大政謙次・清水英幸・小川和雄・増喜彰久 (1993) サーモグラフィ装置によるヘリコプターからの樹木の診断. 生物環境調節. 31:161-168.
- 22) 尾上守夫・池内克史・羽蔵弘之 (編) : 3次元映像ハンドブック. 朝倉書店.
- 23) 岡野利明・星岳彦・大政謙次他 (2000) 農業における新しい情報化技術. 農業電化協会.
- 24) Papageorgiou, G.C. and Govindjee (eds) (2004) Chlorophyll a Fluorescence: A Signature of Photosynthesis. Springer.
- 25) Rencz, A.N. (ed.) (1999) Remote Sensing for the Earth Sciences. John Wiley & Sons.
- 26) 塩光輝 (2001) 農業IT革命. 農文協.
- 27) 曾我部正博・臼倉治郎 (1998) バイオイメージング. 共立出版.
- 28) 恒川篤志 (2005) 緑地環境のモニタリングと評価. 朝倉書店.