

農業・環境分野における高分解能・機能リモートセンシングの利用

大政 謙次

1. はじめに

農業・環境分野におけるリモートセンシングの利用は、生体画像計測と呼ばれるような近接のリモートセンシングから、人工衛星や航空機からの広域リモートセンシングまで多種多様であり、その技術の進歩には著しいものがある。農業分野では、プレジジョン・アグリカルチャーに代表されるように、農作業用ロボットや栽培管理の自動化のための技術として、また、持続的な環境保全型農業のための管理情報として、積極的な利用が考えられている。一方、環境分野でも、農業生態系も含めた地域や地球レベルでの環境・生態系のモニタリングや管理のために、また、最近では、地球温暖化に関連して、森林バイオマスの推定などのために、積極的な利用が試みられている。さらに、インターネットなどの情報通信技術 (ICT: Information and Communication Technology) の発達とともに、Web GIS (Web-based Geographic Information System) や無線のフィールド観測システムとして、これらの画像情報が身近に取得、利用できるようになってきた。2007年8月には、GISと衛星測位を一體的に推進することを目的とした地理空間情報活用推進基本法が公布され、今後、有線・無線の区別のないシームレスなユビキタスネットワーク環境の整備と併せて、リモートセンシング画像情報の更なる利用が期待されて

いる。ここでは、農業・環境分野のリモートセンシングの利用、特に、高分解能・機能リモートセンシングの利用について、筆者らの研究を中心に紹介する。なお、測量技術としても重要な3次元ライダー計測については、第16章に別途詳述する。

2. リモートセンシングの技術的トレンドと利用が期待される農業・環境分野

(表-1)に、リモートセンシングの代表的なセンサと取得可能な情報を示す。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観測技術であり、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次元化、レーザやマイクロ波などの能動的センサ利用、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、パンクロ画像 (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

(表-1) 代表的なリモートセンシング技術と得られる情報

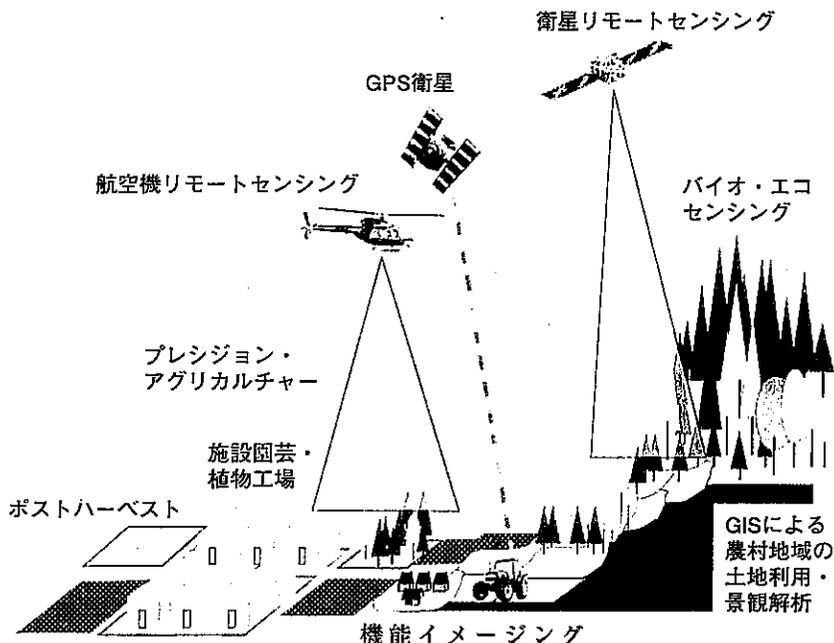
分野 (対象)	代表的なリモートセンシング技術	取得可能な情報
広域リモートセンシング (対象: 地球規模、地域、生態系)	空中デジタル写真 (高解像度等) マルチスペクトルスキャナ (可視~熱赤外線) ハイパースペクトルスキャナ (可視~近赤外線) ステレオスキャナ (可視線) マイクロ波レーダー (合成開口等) ライダー (レンジ、蛍光等)	景観・地形 土地被覆状態・土地利用 生態系機能・被害・収量 種構成・生物季節・群落構造 バイオマス・物質循環 土壌種・状態
生体機能イメージング (含近接リモートセンシング) (対象: 個体群・個体・細胞)	3次元形状イメージングシステム (ステレオ、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 (熱画像) 蛍光イメージングシステム (LIF、Chl蛍光等)	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

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。

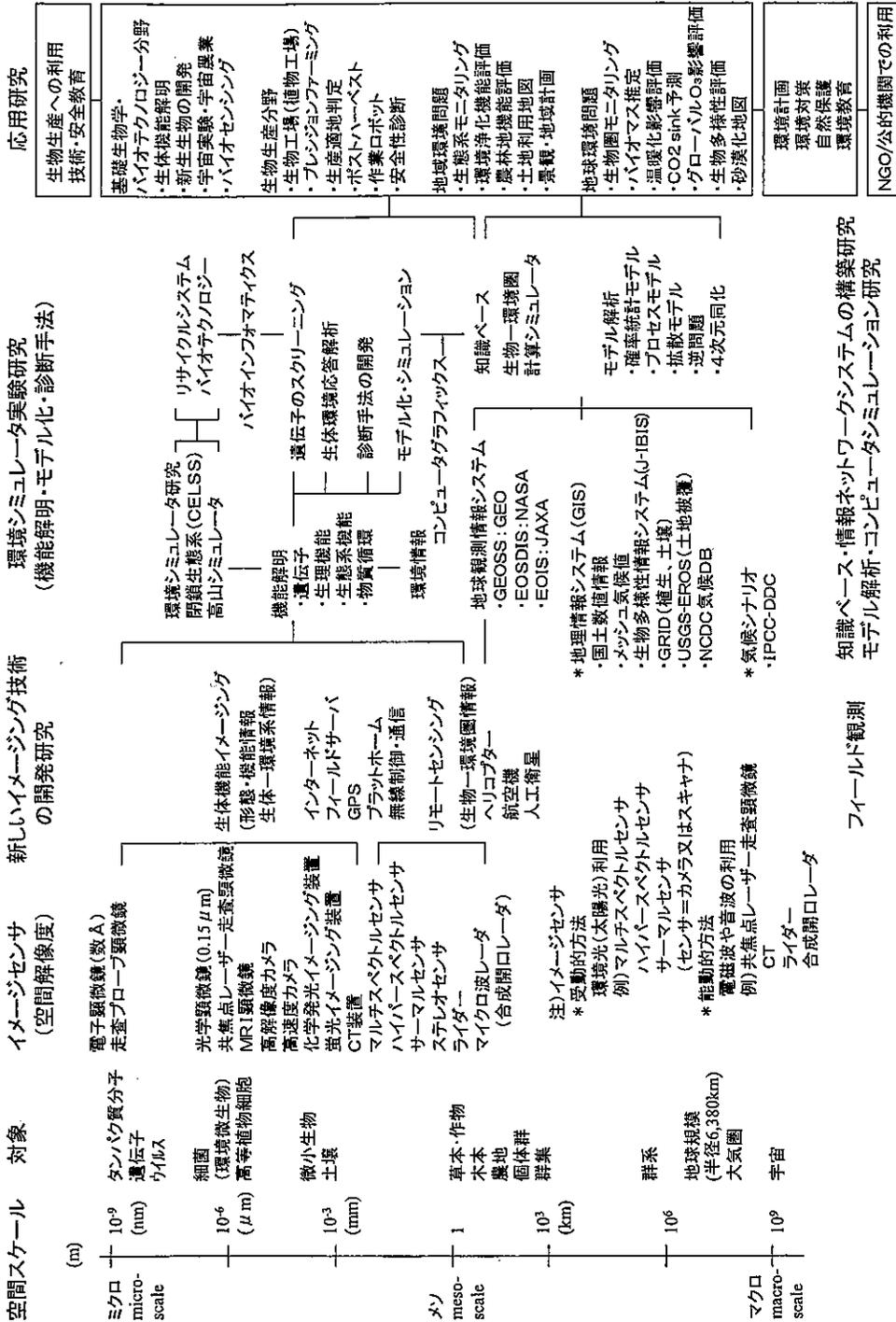
また、2000年に打ち上げられたEO-1のHyperionはLandsatと同じ30mの空間解像度で、可視～近赤外(0.4～2.5 μm)の220バンドのハイパースペクトル画像を提供する。我が国でも、現在、NEDOのプロジェクトにより、衛星搭載のハイパースペクトルセンサが開発されており、カナダ(HERO)やドイツ(EnMAP)の計画と合わせて、ハイパースペクトルでの地球観測ネットワークが構築される予定である。さらに、計画が延び延びになっているが、NASAで計画しているVegetation Canopy Lidar(VCL)は、1mの距離計測精度を有するレーザ距離計によって地形や森林の3次元計測を行うものである。マイクロ波を利用した合成開口レーダ(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(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(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。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、より自由度のある航空機や他の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とされる。航空機に搭載されているリモートセンサには、20cm程度の空間解像度を有するマルチバンドセンサや2m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などがある。さらに、無線ヘリコプターや飛行船、バルーン、計測車や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リモートセンシング(図-1)により、より多くの、より有用な情報を得ることができる。



(図-1) 階層的リモートセンシングの概念図



(図1-2) 分子レベルから地球規模のレベルまでのリモートセンシングを助むイメージング技術の開発・適地分野における情報利用の流れ図

ファイールド観測
知識ベース・情報ネットワークシステムの構築研究
モデル解析・コンピュータシミュレーション研究

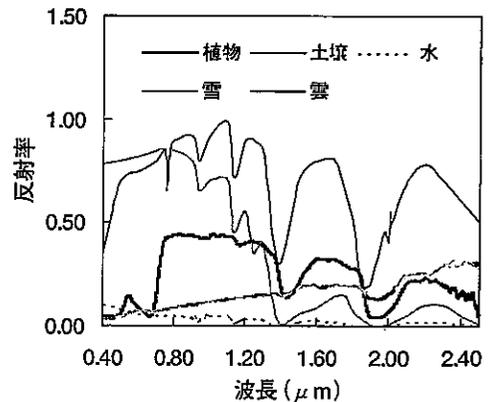
近接リモートセンシングは、葉のレベルから植物個体、あるいは小さなスケールの個体群までを対象としたリモートセンシングまで多種多様であり、生体画像計測を含んでいる。通常のカラーカメラのレベルから、可視から近赤外域を対象としたマルチバンドカメラやハイパースペクトルカメラ、また、熱画像計測用のカメラ、LIF (laser induced fluorescence) イメージングなどの蛍光計測システム、3次元計測のためのイメージングレンジライダーなど、様々なものが市販あるいは研究用に開発されている。そして、階層的リモートセンシングだけでなく、単独使用で、環境影響モニタリングや森林バイオマスの計測などの環境分野での利用、農作業用ロボットや種苗生産、栽培管理の自動化などの農業分野での利用など、様々な利用の試みがなされている。さらに、環境分野、農業分野を問わずインターネットなどの情報通信技術 (ICT) と組み合わせたシステムの開発に多大な期待がある。また、リモートセンシングということではないが、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、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生体画像情報の利用が急速に拡大している。

(図-2) に、分子レベルから地球規模のレベルまでのリモートセンシングを含むイメージング技術と農業・環境分野における情報利用の流れ図を示す。計測された画像情報は、実験室やフィールド観測により検証され、また、モデルや地理空間情報と同化することにより、(図-2) の右端の例に示したような農業・環境分野における様々な用途に利用される。農薬や肥料管理の最適化のためのプレシジョン・ファーミングなどの環境保全型農業やリサイクル型農業などにおいては、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やGPS (Global Positioning System)、Web-GIS、無線通信技術との併用によるユビキタス観測ネットワーク、さらに、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、営農マネジメントを含めたシステムの構築と有効利用が必要であろう。さらに、上記の環境保全型農業に加えて、IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)、IGBP (International Geosphere-Biosphere Program)、GEOSS (Global Earth Observation System of Systems) などの国際的な動きに関連して、農地や森林、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画分野での利用や、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などが期待される。

3. 高分解能・機能リモートセンシングの応用例

(図-3) 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、 $0.7\mu\text{m}$ 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、 $1.45\mu\text{m}$ と $1.94\mu\text{m}$ 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。 $1.6\mu\text{m}$ 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, $\text{NDSI} = (\text{R}_{\text{GREEN}} - \text{R}_{1600}) / (\text{R}_{\text{GREEN}} + \text{R}_{1600})$ 、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-2参照)、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-3) 植物 (正常) や土壌、水、雪、雲の代表的分光反射特性

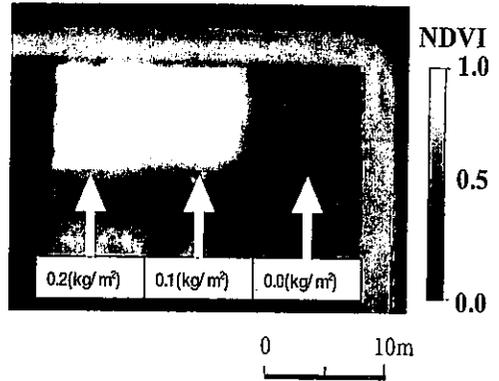
(表-2) リモートセンシングで用いられる植生指数一覧

植生指数	計算式	文献
植生の活力度・構造		
Sum Green Index (SG)	$SG = \text{average}(R_{660} \text{ to } R_{850})$	Gamon (1999)
Simple Ratio Index (SR)	$SR = R_{660}/R_{850}$	Rouse <i>et al.</i> (1973) & Sellers (1985)
Simple Ratio Index (SR)	$MSR_{705} = (R_{705}/R_{445}) / (R_{705}/R_{445})$	Sims & Gamon (2002) & Datt (1994)
Modified Red Edge SR (MSR ₇₀₅)	$VOG1 = R_{640}/R_{720}$	Vogelmann <i>et al.</i> (1993) & Zarco-Tejada <i>et al.</i> (1999)
Vogelmann Red Edge Index (VOG1, VOG2 & VOG3)	$VOG2 = (R_{750} - R_{670}) / (R_{715} + R_{735})$	
	$VOG3 = (R_{750} - R_{670}) / (R_{715} + R_{735})$	
Red Edge Position Index (REP)	REP = the wavelength of steepest slope from R_{650} 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)	$EVI = 2.5(R_{NIR} - R_{Red}) / (R_{NIR} + 6R_{Red} - 7.5R_{Blue} + 1)$	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 (RNDVI)	$RNDVI_{705} = (R_{705} - R_{670}) / (R_{705} + R_{670})$	Gitelson & Merzlyak (1994)
Modified Red Edge NDVI (MNDVI ₇₀₅)	$MNDVI_{705} = (R_{705} - R_{670}) / (R_{705} + R_{670})$	Datt (1999) & Sims and Gamon (2002)
Renormalized Difference Vegetation Index (RDVI)	$RDVI = (R_{NIR} - R_{Red}) / (R_{NIR} + R_{Red})^{1/2}$	Rougeau & Breon (1995)
Triangular Vegetation Index (TVI)	$TVI = 0.5(20(R_{670} - R_{650}) - 200(R_{670} - R_{650}) + (R_{NIR} - R_{Red})) / (R_{NIR} - R_{Red})$	Borge & Leblanc (2000)
Modified Triangular Vegetation Index (MTVII & MTTVI ₂)	$MTVII = 1.2(1.2(R_{670} - R_{650}) - 2.5(R_{670} - R_{650})) / (2(R_{670} - R_{650}) - (R_{NIR} - R_{Red}))$	Haboudance <i>et al.</i> (2004)
Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)	$SAVI = (1-L)(R_{NIR} - R_{Red}) / (R_{NIR} + R_{Red} + L)$, where $L = 0.1$	Huete (1988) & Qi <i>et al.</i> (1994)
Improved SAVI (mSAVI)	$mSAVI = (1/2)(2R_{NIR} - 1 - (2R_{Red} - 1)^2 - 8(R_{Red} - R_{670}))^{1/2}$	Qi <i>et al.</i> (1994)
Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index (OSAVI)	$OSAVI = (1 + 0.16)(R_{NIR} - R_{Red}) / (R_{NIR} + R_{Red} + 0.16)$	Rondeaux <i>et al.</i> (1996)
植物色素・成分・生物化学		
Simple Ratio Pigment Index (SRPI)	$SRPI = R_{670}/R_{650}$	Penuelas <i>et al.</i> (1995)
Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index (MCARI, MCARI1 & MCARI2)	$MCARI = (1 - R_{670}/R_{650}) - 0.2(R_{670} - R_{650}) / (R_{670}/R_{650})$	Daughtry <i>et al.</i> (2000)
Transformed CARI (TCAR)	$MCARI1 = 1.5(2.5(R_{670} - R_{650}) - 1.3(R_{670} - R_{650})) / (2R_{670} - 1)^2 - (6R_{670} - 5R_{670}^2) - 0.5)^{1/2}$	Haboudance <i>et al.</i> (2004)
Normalized Pigment Chlorophyll Index (NPC)	$TCAR2 = (R_{670} - R_{650}) - 0.2(R_{670} - R_{650}) / (R_{670}/R_{650})$	Haboudance <i>et al.</i> (2002)
Normalized Difference Nitrogen Index (NDNI)	$NPCI = (R_{670} - R_{650}) / (R_{670} + R_{650})$	Penuelas <i>et al.</i> (1994)
Normalized Difference Lignin Index (NDLI)	$NDLI = \log((R_{710}/R_{750}) - \log((R_{710}/R_{650})) / (\log((R_{710}/R_{650}) + \log((R_{710}/R_{650}))))$	Serrano <i>et al.</i> (2002) & Fourty <i>et al.</i> (1996)
Cellulose Absorption Index (CAI)	$NDLI = \log((R_{710}/R_{750}) - \log((R_{710}/R_{650})) / (\log((R_{710}/R_{650}) + \log((R_{710}/R_{650}))))$	Serrano <i>et al.</i> (2002) & Mehllo <i>et al.</i> (1982)
Plant Senescence Reflectance Index (PSRI)	$CAI = 0.5(R_{670} - R_{720}) / R_{720}$	Daughtry (2001) & Daughtry <i>et al.</i> (2004)
Carotenoid Reflectance Index (CRI1 & CRI2)	$PSRI = (R_{670} - R_{650}) / R_{650}$	Merzlyak <i>et al.</i> (1999)
Anthocyanin Reflectance Index (ARI1 & ARI2)	$CRI1 = (R_{670} - R_{650}) / (R_{670} - R_{650})$	Gitelson <i>et al.</i> (2002)
Photochemical Reflectance Index (PRI)	$CRI2 = (R_{670} - R_{650}) / (R_{670} - R_{650})$	Gitelson <i>et al.</i> (2001)
Structure Insensitive Pigment Index (SIP)	$ARI1 = (R_{670} - R_{650}) / (R_{670} - R_{650})$	Gamon <i>et al.</i> (1992, 1997)
Zarco-Tejada & Miller (ZM)	$ARI2 = R_{650} / (R_{650} - (R_{670} - R_{650}))$	Penuelas <i>et al.</i> (1995)
Normalized Photochlorization Index (NPQ)	$SIP = (R_{670} - R_{650}) / (R_{670} - R_{650})$	Zarco-Tejada <i>et al.</i> (1995)
Carter Indices (Ct1 & Ct2)	$ZM = R_{670}/R_{710}$	Barnes <i>et al.</i> (1992)
	$NPQ = (C_{415} - R_{650}) / (C_{415} + R_{650})$	Carter (1994)
	$Ct1 = R_{650}/R_{720}$	Carter <i>et al.</i> (1996)
	$Ct2 = R_{650}/R_{670}$	Lichtenthaler <i>et al.</i> (1996)
	$Lic1 = (R_{670} - R_{650}) / (R_{670} - R_{650})$	Gitelson & Merzlyak (1997)
	$Lic2 = R_{640}/R_{650}$	
	$GM1 = R_{650}/R_{650}$	
	$GM2 = R_{670}/R_{650}$	
キャノピー含水率		
Water Band Index (WBI)	$WBI = R_{670}/R_{700}$	Penuelas <i>et al.</i> (1995) & Champagne <i>et al.</i> (2001)
Normalized Difference Water Index (NDWI)	$NDWI = (R_{670} - R_{1240}) / (R_{670} + R_{1240})$	Gao (1996)
Moisture Stress Index (MSI)	$MSI = R_{650}/R_{615}$	Hunt <i>et al.</i> (1989) & Ceccato <i>et al.</i> (2001)
Normalized Difference Infrared Index (NDII)	$NDII = (R_{670} - R_{1650}) / (R_{670} + R_{1650})$	Hardisky <i>et al.</i> (1983) & Jackson <i>et al.</i> (2004)

注1) 図中のR₆₇₀は、数字で表される波長(nm)における反射率であることを表している。
 注2) 分類は便宜上に行なったもので、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。

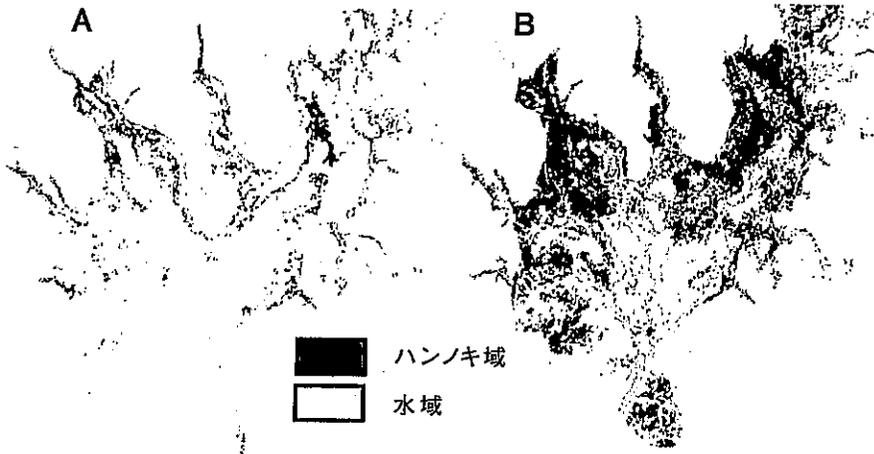
(図-4)は、ランドサットMSSとTMを用いて解析した釧路湿原の乾燥化の影響を示す。釧路湿原では、湿原内を流れる釧路川や雪裡川上流の河岸の直線化工事が原因と考えられる洪水が1994年に発生し、上流の土砂が湿原内に堆積した。このため、その後、湿原が乾燥化し、ハンノキが繁茂した。図は、1979年(A)と1996年(B)の湿原内の水域とハンノキ域の分布図の比較である。ここでは、空間分解能が80mのMSS画像と30mのTM画像の幾何補正を行い、ISODATA法によって3分類し、水域とハンノキ域を決定した。この分類結果と別途TM画像から推定した洪水域を比較すると、洪水の後、ハンノキ域が増大し、その地域は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-5)は、航空機搭載の高空間分解能マルチバンドセンサ(LH Systems ADS40)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-2参照)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、生長が早いのが風に弱く、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。

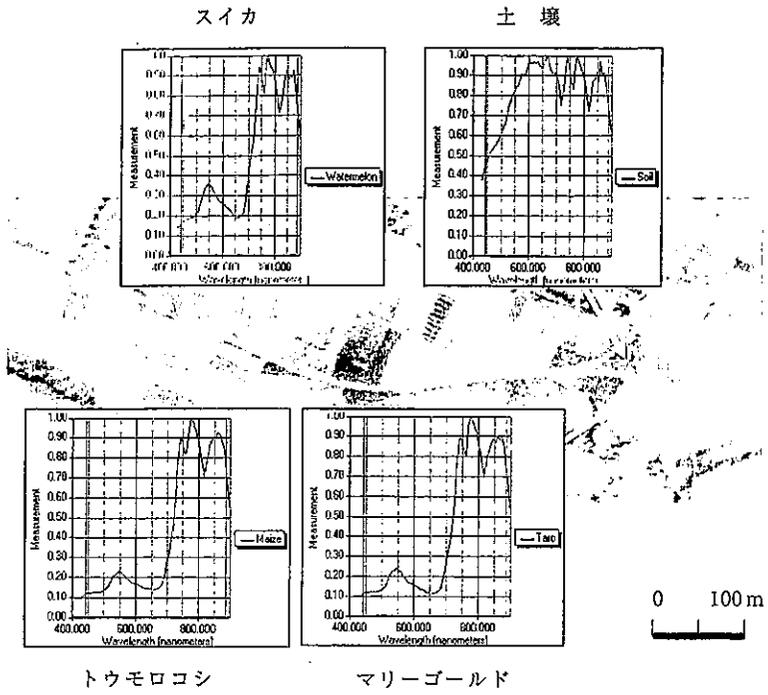


(図-5) 航空機搭載の高空間分解能マルチバンドセンサ(LH Systems ADS40)により得られたスペクトル画像から推定されたNDVIによるコムギの生育診断¹⁴⁾。このマルチバンドセンサは4つのバンド(B:0.43~0.49 μ m、G:0.535~0.585 μ m、R:0.61~0.66 μ m、NIR:0.835~0.885 μ m)を有しており、空間分解能は20cmである。

(図-6)は、航空機搭載のハイパースペクトルセンサ(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



(図-4) 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⁵⁾。A:1979年、B:1996年。



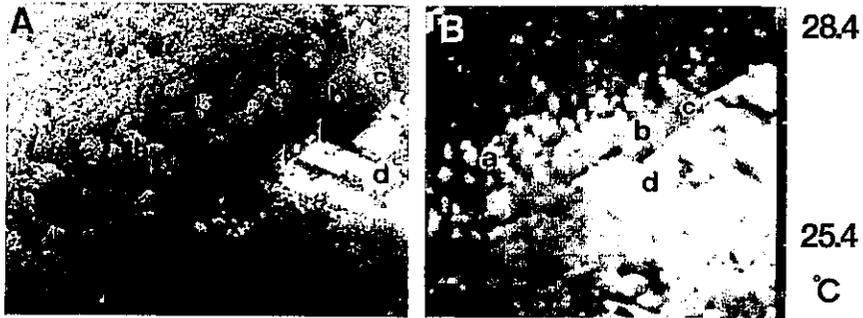
(図-6) 航空機搭載のハイパースペクトルセンサ (Spectral Imaging, AISA) で得られたスペクトル画像から解析された農地の分光反射特性¹⁴⁾。このセンサは、70バンド (400~970nm) を有しており、空間解像度は約 2m である。

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-7) 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-2) 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-7) (図-6) の地域の植物種および土地被覆分類の例⁴⁾



(図一八) 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) ¹⁶⁾。

(図一八) 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 μm) 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ヌギ、コナラ、エゴノキを中心とした広葉樹林では 26.5~28.0 $^{\circ}\text{C}$ と低く、枯れたアカマツやスギでは 28.0~29.0 $^{\circ}\text{C}$ 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 $^{\circ}\text{C}$ 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 $^{\circ}\text{C}$ 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、生体画像計測は、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 (又は生態) 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 (階層の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、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、プレジジョン・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やマイクロ波などの能動的センサの利用などである。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。

(図一九) は、分光ミラー/フィルタを内蔵したマル



(図一九) 分光ミラー/フィルタ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 。

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-3)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-9)の画像で見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が、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。

プレジジョン・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。光合成に関係するクロロフィル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の濃度が大きい程顕著である。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(-10MPa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も変化する。このため、施肥効果をみるには、窒素の吸収帯よりも、550nmと近赤外域の比や750nm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、実際には上下限値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-2)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。このとき、ハイパースペクトル画像は、任意の波長を容易に取り出せることから、種々の植生指数を容易に計算でき、多くの生理的・生態的な情報を得ることができる。なお、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。

4. おわりに

ここでは、農業・環境分野におけるリモートセンシングの利用、特に、高分解能・機能リモートセンシングに関連した利用について簡単に紹介した。第16章で紹介する3次元ライダー計測技術と併せて、(表-1)に示したように、農業・環境の分野における生体画像計測(含む近接リモートセンシング)や航空機や人工衛星を利用したリモートセンシングの利用は多様である。今後、プレジジョン・アグリカルチャーに代表されるように、農作業用ロボットや栽培管理の自動化のための技術として、また、持続的な環境保全型農業のための管理情報として、積極的な利用が考えられる。一方、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の利用は盛んである。そして、GCM (General Circulation Model)をはじめとした様々なモデルや地理空間情報と統合したGEOSSの必要性が叫ばれている。今後、高分解能・機能リモートセンシングは、このような分野においても、有力な手法として、発展していくことが期待される。また、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にも有用である。

参考文献

- 1) Colwell, R.N. (ed.) (1983) Manual of Remote Sensing. 2nd Ed. Vol.II. Amer. Soc. Photogrammetry
- 2) 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
- 3) 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—食の安全科学—。遺伝別冊19
- 4) Lu, S., K. Oki, Y. Shimizu and K. Omasa (2007) Comparison between several feature extraction/classification methods for mapping complicated agricultural land use patches using airborne hyperspectral data. Int. J. Remote Sens. 28:963-984.

- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 大政謙次編著 (2007) 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—農業電化協会
- 10) Omasa, K. (2006) Precision agriculture. Image sensing and phytobiological information. In *CIGR Handbook of Agricultural Engineering*. Vol VI. Information Technology. (A. Munack, ed.) ASABE. 217-231
- 11) Omasa, K. and J.G. Croxdale (1992) Image analysis of stomatal movements and gas exchange. In *Image Analysis in Biology*. (D.-P. Häfer, ed.) 171-193, CRC Press
- 12) 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.
- 13) 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
- 14) 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.
- 15) Omasa, K., H. Saji, S. Youssefian and N. Kondo (eds.) (2002) *Air Pollution and Plant Biotechnology*. Springer
- 16) 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.
- 17) 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
- 18) Rencz, A.N. (ed.) (1999) *Remote Sensing for the Earth Sciences*. John Wiley & Sons
- 19) 塩光輝 (2001) 農業IT革命. 農文協
- 20) 恒川篤志 (2005) 緑地環境のモニタリングと評価. 朝倉書店