

分光リモートセンシングによる 環境モニタリング

東京大学大学院 農学生命科学研究科

大政謙次

宇宙航空研究開発機構 地球観測研究センター

大山博史

1. はじめに

計測対象から反射あるいは放射される電磁波を分光し、その分光波長特性から対象に関する様々な情報を得ようとする分光リモートセンシングは、大気や陸域の環境観測、気象予測、災害監視、地図作製、農業、森林管理など、多くの分野で利用されている¹⁻⁶⁾。特に、環境分野においては、地域の環境問題の他、地球温暖化や長距離越境大気汚染、オゾン層破壊、砂漠化、森林破壊、生物多様性保護など、地球環境問題に関する条約が締結され、GEOSS(Global Earth Observation System of Systems)やIPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)やIGBP(International Geosphere-Biosphere Program)などの国際的活動と連携して、分光リモートセンシングの利用が盛んである。そこで、ここでは、分光リモートセンシングの技術的發展について述べるとともに、大気環境や陸域環境のモニタリングへの利用について簡単に紹介する。

2. 分光リモートセンシングの技術的發展とその利用

人工衛星からのリモートセンシングに使用されるセンサの技術的發展は、高空間解像度化、多チャンネル・高波長分解能化、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、コンボジット利用などである¹⁻⁶⁾。例えば、高解像陸域観測の目的で2001年に打ち上げられた米国の商用衛星であるQuickBirdは、パンクロマチック画像(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。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、NASAのVegetation Canopy Lidar(VCL)計画は、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ADEOS-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。大気環境観測では、地球温暖化に関する CO₂・メタンやグローバル大気汚染、オゾン層の観測などを目的とした高波長分解能分光センサ(例えば, GOSAT(観測波長 0.758-0.775 μ m (波長分解能 0.5cm⁻¹), 1.56-1.72, 1.92-2.08, 5.56-14.3 μ m (0.27cm⁻¹) JAXA&NIES2009年打上), Aura OMI(観測波長 0.27-0.5 μ m (0.5nm) NASA2004年打上)がある。なお, 上記で紹介した衛星の中には既に運用を中止したもの, あるいは財政的, 技術的問題から計画の変更が予定されているものもあり, 今後, 目的を絞った衛星の小型化や商用化の方向も模索されている。

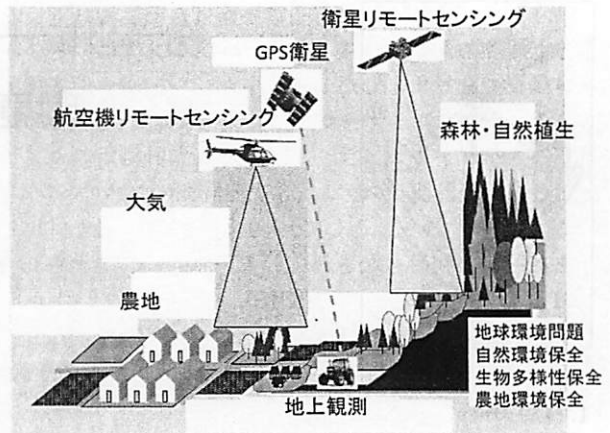


図1 階層のリモートセンシングの概念図

このような人工衛星からの分光リモートセンシングの発達により, 様々な分野で利用拡大がなされてきたが, 観測周期や雲の影響などの問題もあり, 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有効とされる¹⁻⁶⁾(図1)。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, 1m 程度の空間解像度で, 可視から近赤外(0.43~1.0 μ m)を 512 バンドで計測できるハイパースペクトルセンサ, 20cm 程度の距離精度で地表面の 3次元計測が可能なレンジライダーなどがある。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により, より多

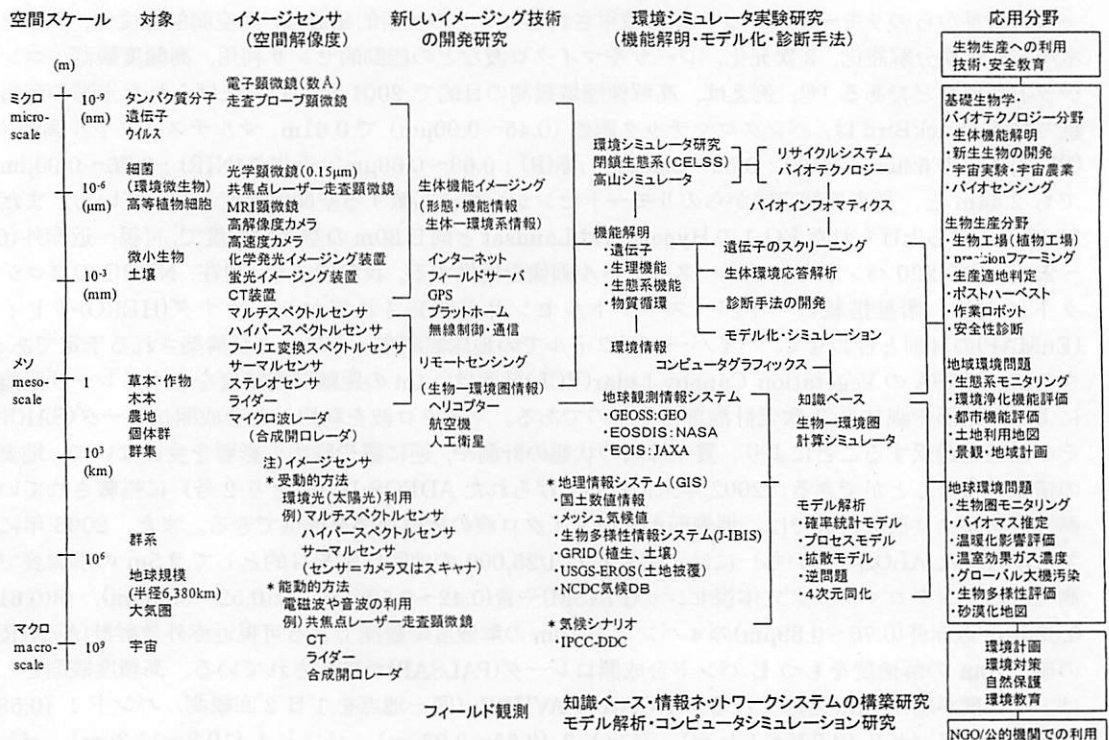


図2 イメージング(リモートセンシング)技術と農業・環境分野における情報利用の流れ図

くの、より有用な情報を得ることができる。

地上観測のための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、バイオイメージングの分野を含んでいる^{3,7,8)}。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、人工衛星や航空機と併用した階層的リモートセンシング用途だけでなく、単独使用での利用もなされている。さらに、これらの分野では、インターネットなどの情報通信技術(ICT)や地理情報システム(GIS)、全地球測位システム(GPS)など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イメージング(リモートセンシング)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、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。

3. 大気環境モニタリング

分光リモートセンシングによる大気の観測では、大気中の空気分子や浮遊粒子状物質(エアロゾル)による光の吸収や散乱を利用する。地球大気を構成する各空気分子は固有の波長で光を吸収するため、例えば太陽を光源とする場合、太陽光が大気を透過して地上に到達するまでに吸収された特定の波長の光量から吸収体である大気中の分子の数を求めることができる。有害な紫外線を吸収してくれるオゾン(O₃)の観測ではドブソン分光光度計が1920年代から使用されており、これは太陽から入射する紫外線のうちオゾンによって吸収される波長と比較的吸収されない波長の2波長を選択し、その相対強度を測定する⁹⁾。このとき、測器で測定された2波長の相対強度が、大気中に存在するオゾン量とともに変動することを利用して、地上から大気上端までの垂直気柱内にどれだけオゾンが存在するか(カラム量)を決定することができる。また、回折格子分光計やフーリエ変換分光計(Fourier transform spectrometer: FTS)を用いて太陽のスペクトルを測定し、吸収された光量から分子の数を算出する方法がある。FTSは単素子で広い波長領域を一度に観測できるため、多種類の分子を同時に観測できるという特性を持っている。また、高い波長分解能でスペクトルを測定できる市販の装置が利用されるようになり、FTSによって高分解能で測定された太陽直達光のスペクトルから0.25%より良い精度で大気微量成分のカラム量を導出できるようになった¹⁰⁾。現在、温室効果ガスのカラム量を観測するネットワーク(Total Carbon Column Observing Network)が、世界の約20カ所に設置された高分解能FTSによって構築され、炭素循環の研究や人工衛星から観測されるデータの検証などに利用されている。各高度における吸収線の線幅の違いから、大気中の分子の高度分布に関する情報を導出することも可能である。また、スカイラジオメータのような放射計で太陽直達光と天空散乱光の強さを波長別に測定し、大気中のエアロゾルの光学的厚さ、粒径分布、散乱や吸収の特性等を算出することができる。太陽以外の光源を利用する場合として、分子自身から放射されるミリ波を分光して高分解能でスペクトルを測定し、スペクトルの幅が高度(気圧)によって異なることを利用して高度分布を求める方法がある。また、レーザライダーのように、自らレーザを射出して大気中のエアロゾルや分子によって後方散乱された光を検出し、散乱体までの距離や散乱体の特性、レーザ光が通過する間の分子による吸収を測定する方法もある。表1に代表的な大気成分とリモートセンシングによるその観測方法を示す。

表1 リモートセンシング技術を用いた大気観測

大気成分	計測方法
温室効果ガス (CO ₂ , CH ₄)	吸収分光計測
	ライダー計測
	吸収分光計測
成層圏 O ₃	ライダー計測
	ミリ波放射計測
	吸収分光計測
大気汚染物質 (対流圏 O ₃ 等)	ライダー計測
	ライダー計測
	ライダー計測
エアロゾル	天空散乱光計測

これらの地上に設置された分光測器は高い精度で観測ができるが、世界各地に満遍なく配置することは不可能であり、測器間の比較校正や精度維持のために多くの労力を必要とする。また、例えば大気汚染物質は地上観測ネットワークでも直接観測が行われているが、光化学スモッグなどの大気汚染は広域化が進んでおり、特に越境汚染が影響している場合などは、都市域に集中的に分布している地上観測ネットワークでは対応できず、直接観測に加えて衛星観測による広域的な観測が必要であろう。そこで人工衛星に測器を搭載し、1つの測器で全球の濃度分布などが導出されるようになってきた。オゾンについては、太陽の紫外領域の散乱光を観測するオゾン全量計 TOMS シリーズによりオゾン全量の全球分布が観測されてきた。TOMS シリーズは OMI によって引き継がれている。日本の人工衛星 ADEOS および ADEOS-II にそれぞれ搭載された ILAS および ILAS-II では、人工衛星の日の出と日の入り時に大気を透過する太陽の赤外領域のスペクトルを掩蔽観測することによってオゾンの高度分布を観測した。また、オゾン層破壊と関連のある物質 (HNO₃, ClONO₂ 等) を観測し、オゾン層破壊の規模やメカニズムの解明に取り組んだ。ADEOS に搭載された IMG では地球表面や大気から熱放射される赤外領域のスペクトルから一酸化炭素やオゾンカラム量の全球観測が行われた^{11,12)}。大気汚染物質である対流圏オゾンの実態を調べるために、衛星に搭載された紫外センサからオゾン全量に加えて対流圏のオゾン量を導出する試みが行われるようになってきた¹³⁾。また、赤外センサ IASI, TES, AIRS などからも対流圏のオゾンの観測が行われている。IASI や TES からは、他にもアンモニアやメタノールといった大気汚染物質の全球分布が導出されている。鉛直分解能は限られているが、都市域と周辺部の空間分布の違いや、気候と関連した長期的な変動を検出できるようになってきている。一方、温室効果ガスの観測を専門に行う日本の温室効果ガス観測技術衛星 (GOSAT) が 2009 年 1 月に打ち上げられた。GOSAT は約 100 分かけて地球を一周し、3 日間で地球全体をカバーして大気中の二酸化炭素 (CO₂) やメタン (CH₄) などの温室効果ガスの全球分布を観測する。GOSAT のデータを用いた解析により、地表面での CO₂ の収支 (月別吸収・排出量分布) を精度良く推定することを目的としている。

GOSAT は TANSO-FTS と TANSO-CAI という 2 つの測器を搭載しており¹⁴⁾、TANSO-FTS は短波長赤外領域の太陽の地表面散乱光と熱赤外領域における地表面や大気からの放射を観測している。TANSO-FTS は短波長赤外領域に 3 つのバンド (0.758–0.775, 1.56–1.72, 1.92–2.08 μm) を持ち、それぞれ 2 つの直交する偏光成分のスペクトルを観測する。一方、熱赤外領域に 1 つのバンド (5.56–14.3 μm) を持っている。4 バンド (中心波長 0.380, 0.674, 0.870, 1.60 μm) を備えた雲・エアロゾルセンサ TANSO-CAI は、TANSO-FTS 視野中の雲の有無や大気中のエアロゾルに関する情報を推定するために使用されている。TANSO-FTS の概念図を図 3 に示す。TANSO-FTS は、二光束干渉計による分光計であり、TANSO-FTS に入射した光はビームスプリッタ (半透鏡) により透過する光と反射する光に分けられる。それぞれ別々のコーナーキューブミラーで反射された光がビームスプリッタで合成されて検出器側に出力される。ここで、スイングアームが動くことによって 2 つの光束の光路差が変化するため、光路差の関数として干渉縞が生成される。これをインターフェログラムと呼ぶ。干渉計により変動

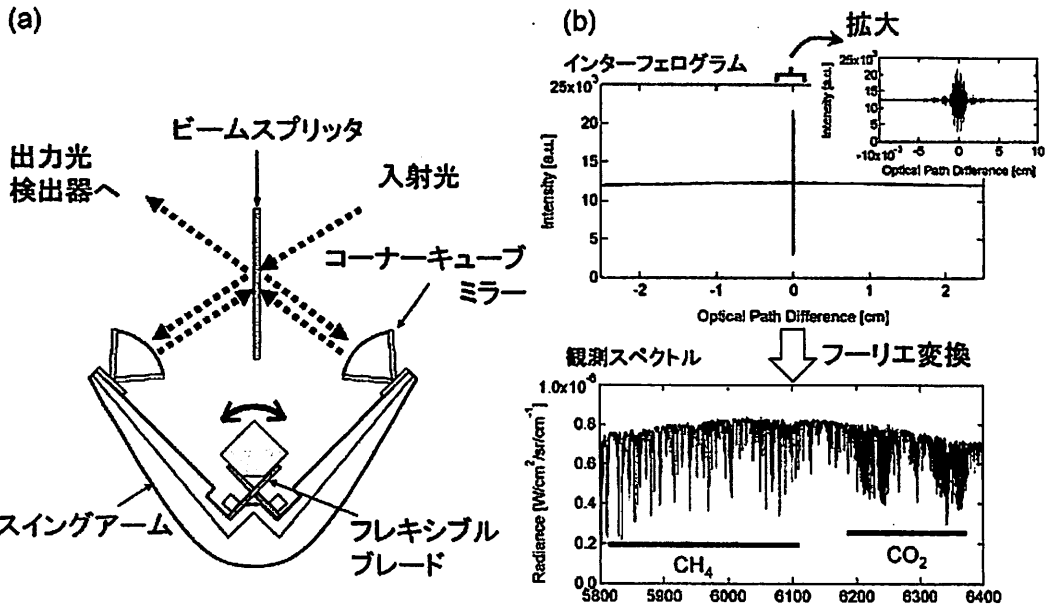


図3 (a) TANSO-FTSの概略図と (b) TANSO-FTSで測定されたインターフェログラムと観測スペクトル

された入射光は、集光位置に設置された視野絞りにより視野の大きさが決定される（15.8 mrad：高度0 kmにおいて直径約10.5km）。続いてダイクロミックフィルタで短波長側のバンドから順に4波長帯に分離され、さらに短波長赤外域の3波長帯ではそれぞれ偏光プリズムで2つの偏光に分けられて検出器に入る。このようにして得られたインターフェログラムを複素フーリエ変換することによって、入射した光源のスペクトルを測定することができる。

TANSO-FTSで測定されたスペクトルから観測対象である大気微量成分濃度を求めるために、Optimal Estimation Method¹⁵⁾に基づいて逆問題を解く方法が主に使用されている。これは、気圧・気温などの気象の再解析データやこれまでにわかっている大気微量成分濃度に関する情報を初期値として、太陽光または熱放射の大気中での放射伝達過程を計算することによりTANSO-FTSで観測されるスペクトルをシミュレートする。そして、観測スペクトルとシミュレートされたスペクトルの残差が最小になるように初期値を調節して、最適な解を求める方法である。GOSATでは短波長赤外領域のスペクトルから大気中のCO₂やCH₄のカラム平均濃度（CO₂またはCH₄のカラム量を乾燥空気のカラム量で割ったもの）の全球分布を導出し¹⁶⁾、高次プロダクトとして一般公開している。観測の誤差要因となる大気中の雲やエアロゾルの検出・補正を行うために、大気中の濃度が既知の酸素の同時観測を行っている。これまでの解析から、CO₂のカラム平均濃度は春に北半球中高緯度で高濃度となり南半球との濃度差が5 ppm以上あることや、夏には両半球の濃度差が小さく（数 ppm程度）なっていることが観測されている。CO₂、CH₄のカラム平均濃度ともに地上の検証データに対して負のバイアスを持っているが、そのバイアスを補正した後では目標としていた1%程度の精度で導出できていることが示されている¹⁷⁾。また、熱赤外領域のスペクトルからは、大気中のCO₂、CH₄に加えてO₃やH₂Oなどの高度分布に関する情報を導出することができる。オゾンに関しては、2011年冬の北極圏上空の異常低温に起因して発生した2011年春の北極圏上空における低濃度オゾンを観測することができている。図4に2009年4月6-8日の対流圏オゾンの全球分布を示す。アメリカ南部、中国東部の都市域やインドを含む北半球の中緯度に対流圏オゾンの高濃度帯が発生している様子が観測されている。これを時間的に詳細に見ることによって、対流圏オゾンの時間的・空間的な変動の詳細が理解されて行くだろう。

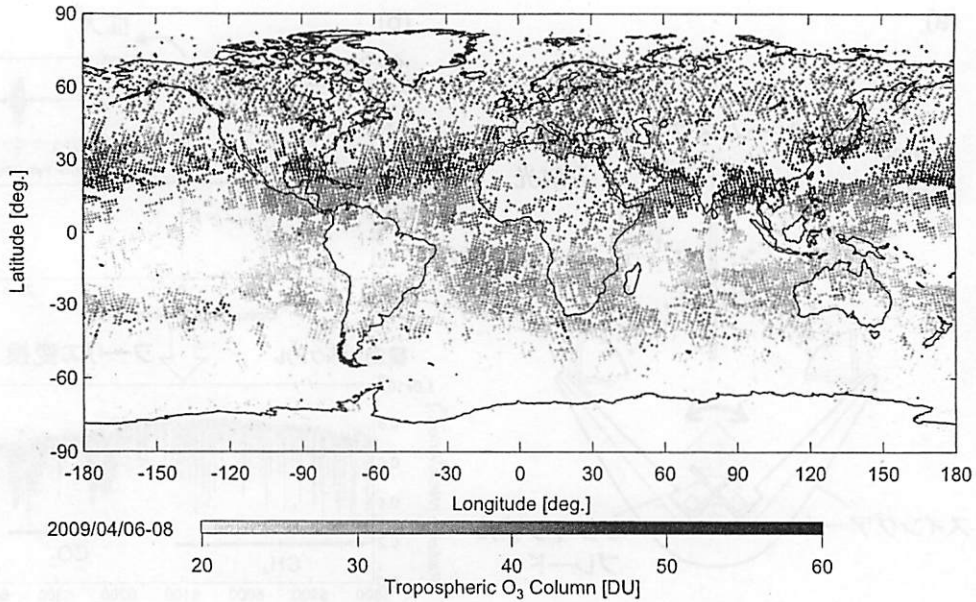


図4 TANSO-FTSで観測された2009年4月6-8日の対流圏オゾンカラム量の全球分布。空白域は主に雲により観測できなかった地点。

4. 陸域環境モニタリング

陸域環境のモニタリングにおいては、植生や土壌、水、その他の陸域を構成する分光反射特性の解析が有用である。図5に、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, $\text{NDSI} = \frac{\text{R}_{\text{GREEN}} - \text{R}_{1600}}{\text{R}_{\text{GREEN}} + \text{R}_{1600}}$, 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。

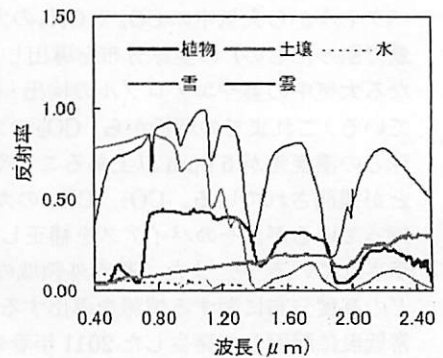


図5 可視から近赤外域の植物葉(正常)や土壌、水、雪、雲などの分光反射特性の例

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=average (R ₅₀₀ to R ₆₀₀)	Gamon (1999)
Simple Ratio Index (SR)	SR=R ₅₁₀ /R ₆₇₀	Rouse <i>et al.</i> (1973) & Sellers (1985)
Modified Red Edge SR (MSR ₂₀₂)	MSR ₂₀₂ =(R ₇₁₀ -R ₄₁₅)/(R ₇₀₅ -R ₄₁₅)	Sims & Gamon (2002) & Datt (1999)
Vogelmann Red Edge Index (VOG1, VOG2 & VOG3)	VOG1=R ₇₁₀ /R ₇₂₀ VOG2=(R ₇₁₀ -R ₇₁₅)/(R ₇₁₅ +R ₇₂₀) VOG3=(R ₇₁₀ -R ₇₁₅)/(R ₇₁₅ +R ₇₂₀)	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 ₇₁₀	Curran <i>et al.</i> (1995)
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	NDVI=(R ₈₁₀ -R ₆₇₀)/(R ₈₁₀ +R ₆₇₀)	Rouse <i>et al.</i> (1973) & Sellers (1985)
Enhanced Vegetation Index (EVI)	EVI=2.5((R ₈₁₀ -R ₆₇₀)/(R ₈₁₀ +R ₆₇₀ +6R ₄₁₅ -7.5R ₂₁₃ +1))	Huete <i>et al.</i> (1997)
Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI)	ARVI=(R ₈₁₀ -(2R ₆₇₀ -R ₄₁₅))/(R ₈₁₀ +(2R ₆₇₀ -R ₄₁₅))	Kaufman <i>et al.</i> (1996)
Red Edge NDVI (NDVI _{red})	NDVI _{red} =(R ₇₁₀ -R ₇₂₀)/(R ₇₁₀ +R ₇₂₀)	Gitelson & Merzlyak (1994)
Modified Red Edge NDVI (MNDVI ₇₀₅)	MNDVI ₇₀₅ =(R ₇₁₀ -R ₇₀₅)/(R ₇₁₀ +R ₇₀₅ +2R ₄₁₅)	Datt (1999) & Sims and Gamon (2002)
Renormalized Difference Vegetation Index (RDVI)	RDVI=(R ₈₁₀ -R ₆₇₀)/(R ₈₁₀ +R ₆₇₀) ^{1/2}	Rougeau & Breon (1995)
Triangular Vegetation Index (TVI)	TVI=0.5(120(R ₇₁₀ -R ₅₅₀)/(R ₅₅₀ +200(R ₆₇₀ -R ₅₅₀)))	Broge & Leblanc (2000)
Modified Triangular Vegetation Index (MTVI1 & MTVI2)	MTVI1=1.2(1.2(R ₅₀₀ -R ₅₅₀)-2.5(R ₆₇₀ -R ₅₅₀)) MTVI2=1.5(1.2(R ₅₀₀ -R ₅₅₀)-2.5(R ₆₇₀ -R ₅₅₀))/(2R ₅₀₀ +1) ² -(6R ₅₀₀ -5R ₅₅₀) ^{1/2} -0.5 ^{1/2}	Haboudance <i>et al.</i> (2004)
Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)	SAVI=(1+L)(R ₈₁₀ -R ₆₇₀)/(R ₈₁₀ +R ₆₇₀ +L), where L=(0,1)	Huete (1988) & Qi <i>et al.</i> (1994)
Improved SAVI (mSAVI)	mSAVI=(1/2)(2R ₈₁₀ +1-((2R ₈₁₀ +1) ² -8(R ₈₁₀ -R ₆₇₀))) ^{1/2}	Qi <i>et al.</i> (1994)
Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index (OSAVI)	OSAVI=(1+0.16)(R ₈₁₀ -R ₆₇₀)/(R ₈₁₀ +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 ₇₀₀ -R ₆₇₀)-0.2(R ₇₀₀ -R ₅₅₀))/(R ₇₀₀ -R ₆₇₀) MCARI ₁ =1.2(2.5(R ₆₈₀ -R ₆₇₀)-1.3(R ₆₈₀ -R ₅₅₀)) MCARI ₂ =1.5(2.5(R ₆₈₀ -R ₆₇₀)-1.3(R ₆₈₀ -R ₅₅₀))/(2R ₆₈₀ +1) ² -(6R ₆₈₀ -5R ₆₇₀) ^{1/2} -0.5 ^{1/2}	Daughtry <i>et al.</i> (2000) Haboudance <i>et al.</i> (2004)
Transformed CARI (TCARD)	TCARD=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 +R ₄₃₀)	Peñuelas <i>et al.</i> (1994)
Normalized Difference Nitrogen Index (NDNI)	NDNI=(log(1/R ₁₅₁₀)-log(1/R ₁₆₅₀))/(log(1/R ₁₅₁₀)+log(1/R ₁₆₅₀))	Serrano <i>et al.</i> (2002) & Fourty <i>et al.</i> (1996)
Normalized Difference Lignin Index (NDLI)	NDLI=(log(1/R ₁₇₅₀)-log(1/R ₁₆₅₀))/(log(1/R ₁₇₅₀)+log(1/R ₁₆₅₀))	Serrano <i>et al.</i> (2002) & Melillo <i>et al.</i> (1982)
Cellulose Absorption Index (CAI)	CAI=0.5(R ₂₀₀₀ -R ₂₂₀₀)/R ₂₁₅₀	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 ₄₁₀)-(1/R ₄₃₀) CRI2=(1/R ₅₁₀)-(1/R ₇₀₀)	Gitelson <i>et al.</i> (2002)
Anthocyanin Reflectance Index (ARI1 & ARI2)	ARI1=(1/R ₅₃₀)-(1/R ₇₀₀) ARI2=R ₈₀₀ ((1/R ₅₃₀)-(1/R ₇₀₀))	Gitelson <i>et al.</i> (2001)
Photochemical Reflectance Index (PRI)	PRI=(R ₅₃₁ -R ₅₇₀)/(R ₅₃₁ +R ₅₇₀)	Gamon <i>et al.</i> (1992, 1997)
Structure Insensitive Pigment Index (SIP)	SIP=(R ₈₀₀ -R ₄₁₅)/(R ₈₀₀ +R ₆₈₀)	Peñuelas <i>et al.</i> (1995)
Zarco-Tejada & Miller (ZM)	ZM=R ₇₁₀ /R ₇₁₅	Zarco-Tejada <i>et al.</i> (2001)
Normalized Phaeophytization Index (NPQI)	NPQI=(R ₄₁₅ -R ₄₃₅)/(R ₄₁₅ +R ₄₃₅)	Barnes <i>et al.</i> (1992)
Carter Indices (Ctr1 & Ctr2)	Ctr1=R ₆₉₅ /R ₇₀₀ Ctr2=R ₆₉₅ /R ₇₀₀	Carter (1994) Carter <i>et al.</i> (1996)
キャノピー含水率		
Water Band Index (WBI)	WBI=R ₉₀₀ /R ₉₇₀	Peñuelas <i>et al.</i> (1995) & Champagne <i>et al.</i> (2001)
Normalized Difference Water Index (NDWI)	NDWI=(R ₈₅₇ -R ₁₂₄₁)/(R ₈₅₇ +R ₁₂₄₁)	Gao (1995)
Moisture Stress Index (MSI)	MSI=R ₁₅₉₀ /R ₈₁₀	Hunt <i>et al.</i> (1989) & Ceccato <i>et al.</i> (2001)
Normalized Difference Infrared Index (NDII)	NDII=(R ₈₁₀ -R ₁₆₄₀)/(R ₈₁₀ +R ₁₆₄₀)	Hardisky <i>et al.</i> (1983) & Jackson <i>et al.</i> (2004)

注1) 図中のR₄₁₅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) 分類は従行的に行ったもので、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。

図6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¹⁸⁾。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

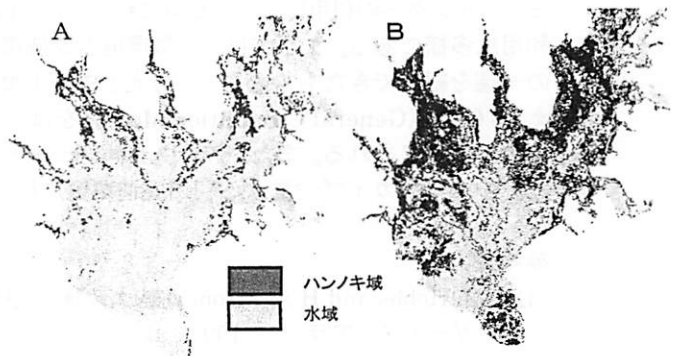


図6 ランドサットMSSとTMを用いた釧路湿原の水域の減少とハンノキ域の増加の評価¹⁸⁾。A: 1979年, B: 1996年

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 7 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(熱赤外面像:波長 8~12 μ m)の例

である¹⁹⁾。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 $^{\circ}$ Cと低く、枯れたアカマツやスギでは 28.0~29.0 $^{\circ}$ 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 $^{\circ}$ 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 $^{\circ}$ 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。なお、広域や標高差があるような対象で、気温や植生の繁茂度が違う場合には、植生の繁茂度の指標である正規化植生指数(NDVI、表 1 参照)と(地表面温度-気温)との関係を図式化し、同じ NDVI 値における(地表面温度-気温)を指標化して用いることが有用である²⁰⁾。

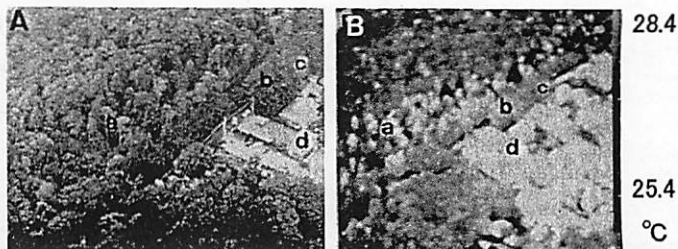


図 7 首都圏のオゾン濃度が高い地域における寺社林のヘリコプターから撮影された航空写真(A)と温度画像(B)¹⁹⁾

5. おわりに

ここでは、分光リモートセンシングの技術的發展について述べるとともに、大気環境や陸域環境のモニタリングへの利用について簡単に紹介した。図 2 に示したように、分光リモートセンシングの利用は多様である。ここでは、大気環境と陸域環境のモニタリングを例に、環境分野における利用の一端を紹介できたものと思う。分光リモートセンシングでは、新しいセンシング技術の開発に加えて、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の同化、統合が必要とされる。また、クラウドコンピュータやインターネットなどの情報通信技術を利用したデータアーカイブや更なる利用促進が望まれている。

参考文献

- 1) R.J. Hobbs and H.A. Mooney(編)大政謙次他(監訳): 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. 1993
- 2) A. N. Rencz (ed.): Remote Sensing for the Earth Sciences. John Wiley & Sons. 1999
- 3) K. Omasa et al.: Precision agriculture. In CIGR Handbook of Agricultural Engineering. Vol VI. Information Technology. (A. Munack, ed.) pp 217-244. ASABE. 2006
- 4) 大政謙次編著: 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. 2007

- 5) K. Omasa et al.: 3D lidar imaging for detecting and understanding plant responses and canopy structure. *J. Exp. Bot.* 58: 881-98. 2007
- 6) H.G. Jones and R.A. Vaughan: *Remote Sensing of Vegetation*. Oxford University Press. 2010
- 7) 大政謙次・近藤矩朗・井上頼直(編著): *植物の計測と診断*. 朝倉書店 1988
- 8) K. Omasa: Image instrumentation methods of plant analysis. In *Modern Methods of Plant Analysis*. New Ser. Vol. 11 (H.F. Linskens and J.F. Jackson, eds.) pp203-243, Springer. 1990
- 9) G.M.B. Dobson: A photo-electric spectrometer for measuring the amount of atmospheric ozone. *Proc. Phys. Soc.* 43:324-339, 1931
- 10) D. Wunch et al.: The Total Carbon Column Observing Network (TCCON). *Phil. Trans. R. Soc. A*, 369:2087-2112, 2011
- 11) J. Hadji-Lazaro et al.: Cloud filter for CO retrieval from IMG infrared spectra using ECMWF temperatures and POLDER cloud data. *Geophys. Res. Lett.*, 28:2397-2400. 2001
- 12) S. Turquety et al.: First satellite ozone distributions retrieved from nadir high-resolution infrared spectr. *Geophys. Res. Lett.* 29:2198. 2002
- 13) J. Fishman and J.C. Larsen: Distribution of total ozone and stratospheric ozone in the tropics: Implications for the distribution of tropospheric ozone. *J. Geophys. Res.* 92(D6): 6627-6634. 1987
- 14) A. Kuze et al.: Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring. *Appl. Opt.* 48: 6733-6733, 2009
- 15) C. D. Rodgers: *Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice*. Singapore: World Scientific. 2000
- 16) Y. Yoshida et al.: Retrieval algorithm for CO₂ and CH₄ column abundances from short-wavelength infrared spectral observations by the Greenhouse gases observing satellite. *Atmos. Meas. Tech.* 4:717-734, 2011
- 17) I. Morino et al.: Preliminary validation of column-averaged volume mixing ratios of carbon dioxide and methane retrieved from GOSAT short-wavelength infrared spectra. *Atmos. Meas. Tech.* 4:1061-1076. 2011
- 18) K. Oki et al.: 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. 2005
- 19) 大政謙次他: 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. 1993
- 20) 清水 庸他: リモートセンシングによる植生衰退状況のモニタリング. *遺伝*. 65(2):65-70. 2011.

参考：人工衛星と搭載されたセンサの略語

ADEOS: ADvanced Earth Observing Satellite

AIRS: Atmospheric InfraRed Sounder

GOSAT: Greenhouse gases Observing SATellite

IASI: Infrared Atmospheric Sounding Interferometer

ILAS: Improved Limb Atmospheric Spectrometer

IMG: Interferometric Monitor Greenhouse gases

OMI: Ozone Monitoring Instrument

TANSO-CAI: Thermal And Near-infrared Sensor for carbon Observation-Cloud and Aerosol Imager

TANSO-FTS: Thermal And Near-infrared Sensor for carbon observation-Fourier Transform

Spectrometer

TES: Tropospheric Emission Spectrometer

TOMS: Total Ozone Measurement Spectrometer



大政謙次 OMASA, Kenji

東京大学大学院農学生命科学研究科 教授

〒113-8657 東京都文京区弥生 1-1-1



大山博史 OHYAMA, Hirofumi

宇宙航空研究開発機構 地球観測研究センター 宇宙航空プロジェクト研究員

〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1