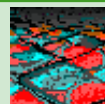
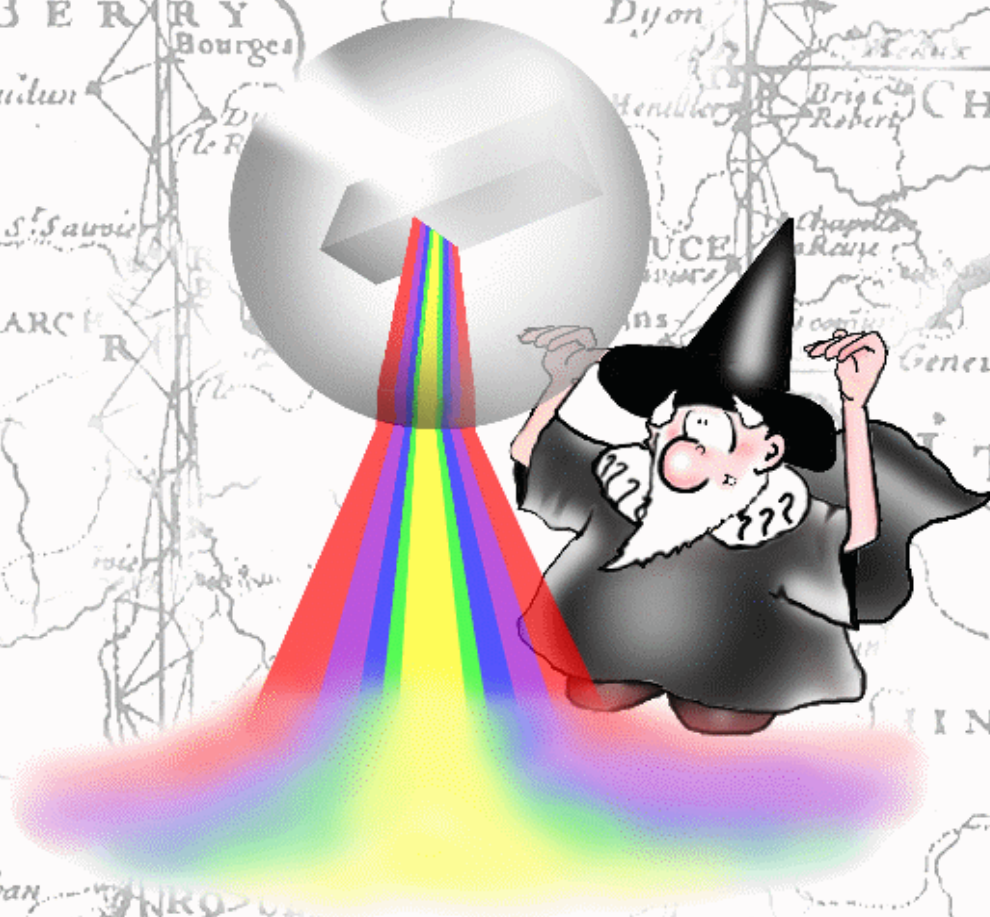


TNT 入門



環境リモートセンシング (RSE) の概要



with
TNTmips®

TNTview®

はじめに

航空機や衛星に搭載されたセンサで取得された画像は、地上の自然の地物や人工的な地物の地図作成や監視を行うための重要な情報源です。リモートセンシングにより得られた画像を解釈したり解析するためには、センサで実際に測定された特性と、調べようとしている地上の特性との間の関係を判断する過程を理解しておく必要があります。これらの関係についての知識がないと、正しい処理や解釈を行えません。本書では、地上の環境の地物のリモートセンシングに関する主な基本概念を簡単に説明します。

サンプルデータ 本書には、リモートセンシング画像の多くの例が示されています。TNT製品に添付されているサンプルデータにはこの他にもさまざまなサンプル画像が含まれています。TNT製品CDにアクセスできない場合は、マイクロイメージズ社のホームページからデータをダウンロードできます。特に、**CB_DATA**、**SF_DATA**、**BEREA**、**COMBRAS**Tデータ・コレクションには、みなさんに見たり調べたりしていただけるリモートセンシング画像のサンプルファイルが含まれています。

その他の資料 本書には、リモートセンシング画像の取得、処理、解釈に関する基本概念しか示されておりません。TNTmipsでは、どのタイプの画像も、『TNT入門：地理空間データの表示』で紹介した標準的な空間データ表示機能を使用して見ることができます。画像の処理、強調、解析には、この他にもTNTmipsのさまざまな機能を使用できます。このような機能のうち最も重要なもののいくつかについては、本書の該当するページでも触れている他、参照すべき『TNT入門』シリーズのパンフレットについても示しました。TNTmips リファレンス・マニュアルでも、これらの機能についての詳細を調べることができます。

TNTmips®とTNTlite® TNTmipsには2つのバージョンがあります。プロフェッショナル・バージョンのTNTmipsと、無料バージョンのTNTliteです。本書では、どちらのバージョンも「TNTmips」という名前で示されています。プロフェッショナル・バージョンにはハードウェア・キーが必要です。このキーがない場合、TNTmipsはTNTliteモードで動作し、オブジェクトのサイズが制約されるほか、書き出しも出来ません。

Randall B.Smith 博士、2001年8月27日

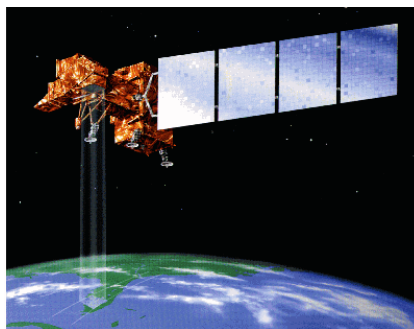
本書の一部のイラストでは、カラー・コピーでないと重要な点がわかりにくい場合があります。マイクロイメージズ社のホームページから本書を入手されれば、カラーで印刷したり表示できます。また、このホームページからは、その他のテーマに関する『TNT入門』シリーズの最新のマニュアルも入手できます。インストールガイド、サンプルデータ、および最新バージョンのTNTliteをダウンロードできます。アクセス先は次の通りです。

<http://www.microimages.com>

リモートセンシングの概要

リモートセンシングは、観測対象に物理的に接触しないセンサを使用して遠距離から情報を入手し解釈する技術です。読者のみなさんは認識されていないかもしれませんが、すでに親しんでいる多くの例があります。(人間も含めた)生物は、自分の環境を知覚するためさまざまな自然現象やエネルギー形態を利用できるように進化してきました。目は、可視光線という形の電磁エネルギーを検出します。耳は音響(音)エネルギーを検出し、鼻には高感度の化学物質受容器があって周囲の物体から放出され空气中に含まれている微量の化学物質に反応します。また、いくつかの研究によれば、渡り鳥は地球磁場の変化を感知できることが示されており、その驚くべきナビゲーション能力を説明する一つの要素となっています。

最も広い意味で言った場合、リモートセンシング技術は、航空機、衛星、宇宙船により我々の太陽系の惑星の表面や大気を観測する技術であると言えますが、最も多く研究対象となるのは地球です。慣習的には、リモートセンシングという用語は、地上の物体や大気による相互作用を受けた可視光線などの電磁エネルギーを検出し測定する方法であるという狭い定義になります。地球のリモートセンシングには、平面地図の作成や更新、天気予報、軍事情報の収集など、さまざまな目的があります。本書では、地球表面の環境と資源のリモートセンシングにテーマを絞っています。本書では、リモートセンシングによる画像の取得と解釈の基本となる物理的概念、さまざまなタイプのセンサから得られる画像の重要な特性、画像に含まれる情報を強調する一般的な画像処理方法について説明します。



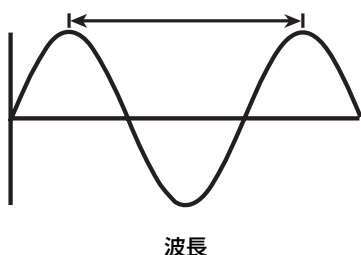
軌道上の Landsat 7 衛星をアーティストが描いたもの(情報提供: NASA)。1999 年後期に打ち上げられたこの衛星は、反射された可視光線と赤外線を使用してマルチスペクトル画像を取得します。

4～9 ページでは、電磁放射、および電磁放射と地上物体や

大気との相互作用について説明します。10～16 ページでは、画像の取得および画像の解像度(分解能)に関するさまざまな概念を説明します。17～23 ページでは、可視光線から中間赤外線までのスペクトル領域で取得された画像を中心に説明します。目視での画像の解釈、およびマルチスペクトル画像に含まれる情報の修正や強調に使用される一般的な処理についても説明します。23～24 ページでは、複数の日付に渡って取得された画像、および画像の空間的位置合わせと正規化について説明します。26～27 ページでは熱赤外線画像に関するいくつかの基本概念を学習し、28～29 ページではレーダー画像に関する基本概念を学習します。30 ページでは、異なるセンサの画像の合成の例を示します。31 ページには、リモートセンシングに関する他の情報源の一覧を示します。

電磁スペクトル

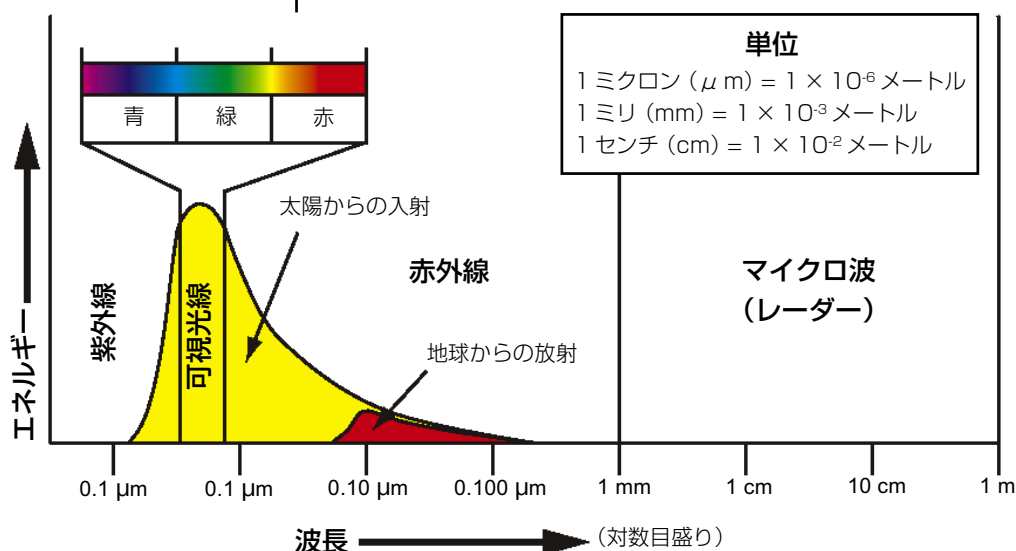
電磁放射はある面では光速で移動する波状のエネルギー変動です。この波は実際には、互いに直角をなし進行方向に直角な電場と磁場が組み合わせられたものです。



波形を表す基本要素の一つが**波長**であり、隣り合う山と山、あるいは谷と谷の距離を示します。リモートセンシングの場合、波長の測定単位としては**ミクロン**が最もよく使用され、1ミクロンは1/1,000,000メートルになります。電磁放射は波長範囲が非常に広いので、通常は対数目盛りで示されます。

リモートセンシングという分野は、太陽からの可視光線をエネルギー源に使用した航空写真から始まりました。しかし、可視光線は、エネルギーが高く波長の短いガンマ線からエネルギーが低く波長の長い電波までの範囲に渡って連続する電磁スペクトルのうちの、ほんのわずかの部分でしかありません。下図は、電磁スペクトルのうち地球表面のリモートセンシングに役立つ部分を示したものです。

地球は元々、太陽からの電磁放射に照らされています。太陽エネルギーが最も大きいのは可視光線の波長領域(0.4~0.7 μm)です。ほとんどの動物の視覚システムがこれらの波長を知覚できるようになっているのも不思議ではありません！可視光線には虹の中に見える全範囲の色が含まれていますが、リモートセンシングによる多くの調査では、波長領域を大まかに青、緑、赤に分けるだけで十分です。入って来る太陽エネルギーのうち、この他のかなりの部分は、目に見えない紫外線と赤外線放射です。太陽からの放射のうちスペクトルのマイクロ波領域まで伸びているのはほんのわずかの部分でしかありません。リモートセンシングに使用される画像撮影用レーダー・システムはマイクロ波を発生して放射し、地表からセンサに戻ってくる部分を信号として測定します。

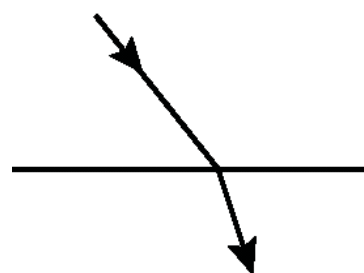


相互作用の過程

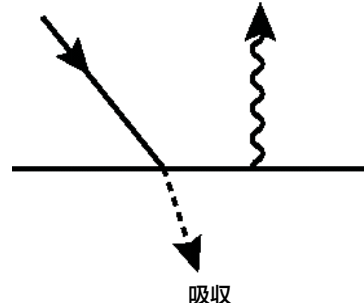
物体と EM エネルギーの 相互作用の過程

横の線は 2 つの物体の
境界を示します。

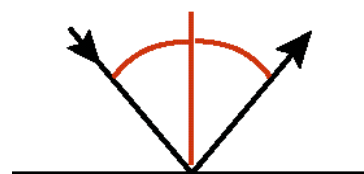
透過



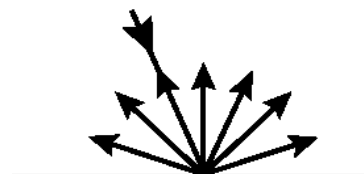
放出



鏡面反射



散乱 (乱反射)



リモートセンサは、地表との相互作用による電磁 (EM) 放射を測定します。物体との相互作用は、EM 放射の方向、強度、波長成分、偏光によって変化します。どのように変化するかは、EM 放射にさらされる物体の化学的組成や物理的構造によって異なります。したがって、地表との相互作用の結果生じる EM 放射の変化から、地表の物体の特性に関する大きな手がかりが得られます。

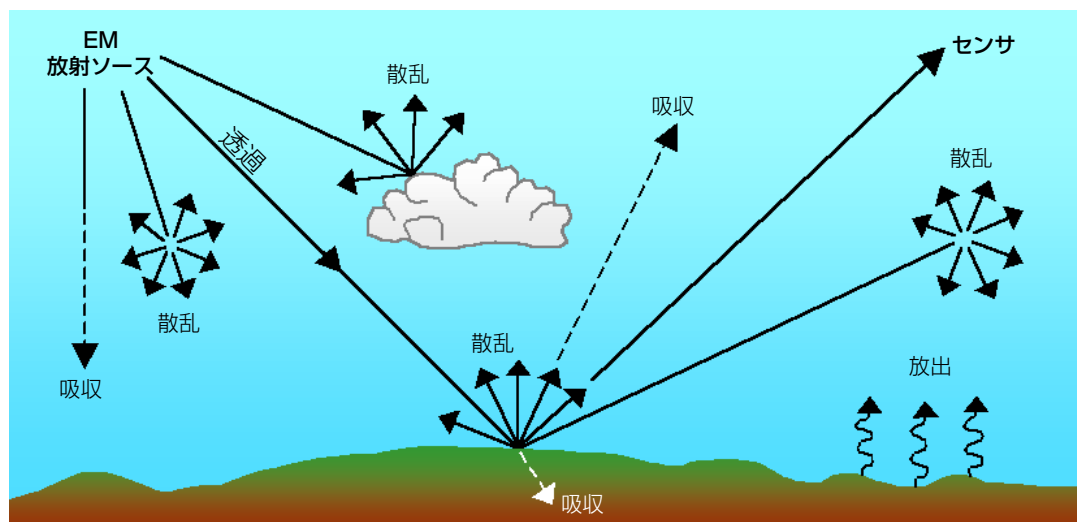
EM 放射と物体との間の基本的な相互作用を右の図に示します。電磁放射が**透過**する場合、電磁放射は物体の中 (または 2 つの物体の境界の間) を通り強度はあまり変化しません。また、物体が EM 放射を**吸収**することもあります。通常、吸収作用は波長によって異なり、特定の波長では他の波長より多くのエネルギーが吸収されます。吸収された EM 放射は熱エネルギーに変わり、物体の温度を上昇させます。この熱エネルギーの一部はさらに、物体の温度によって決まる特定の波長の EM 放射として放出されます。温度が低いほど、放出される放射の波長は長くなります。太陽で熱せられることにより、地表からは、より長い波長の赤外線放射という形でエネルギーが放出されます (前ページの図を参照)。このため、波長が $3 \mu\text{m}$ より大きい赤外線スペクトルの部分を通常、**熱赤外線領域**と呼びます。

地表などの境界に当たった電磁放射は、反射されることもあります。入射エネルギーの波長に比較できる程度のスケールで面が滑らかな場合は鏡面反射が起こり、大部分のエネルギーは入射角と同じ角度で一つの方向に反射します。表面が比較的粗い場合は、**散乱**、**乱反射**の原因になります。

リモートセンシングにおける相互作用の過程

相互作用過程の違いが航空画像や衛星画像の取得に与える影響を理解するため、反射された太陽放射を衛星センサで測定したものを解析してみましょう。太陽光線は、最初に大気中に入るとき、気体分子、浮遊するほこりの粒子、エアゾールに当たります。これらの物体は入射光の一部を散乱させますが、波長が短いほど大きな作用を受けます（昼間の空が青いのは、緑や赤の光に比べて青の光が選択的に散乱されるためです。また、雲が不透明なのは、小さな水滴で可視光線が散乱される程度が大きいからです）。その他の光はほとんどが地表まで届きますが、大気中のいくつかの気体は特定の波長を非常に強く吸収します（有害な紫外線放射をオゾンが吸収することは良く知られています）。このような影響を受ける結果、地表を照らす光は、太陽放射がさまざまなフィルタを通して地表に直接透過したものと、空のすべての部分からの散乱光が組み合わせられたものであり、散乱光は影の部分の照明に役立っています。

このようにさまざまな影響を受けた太陽放射は、地表に届くと、土、岩石の表面、植物、その他の物体に当たり、放射の一部がこれらの物体に吸収されます。吸収されるエネルギー量はそれぞれの物体ごとに波長によって異なりますが、その特性に特徴があるため、署名のような役割を果たすスペクトル・シングネチャができます（私たちが物体の**色**として知覚しているのも、可視光線が波長の違いにより選択的に吸収される現象によるものです）。吸収されなかった大部分の放射は大気中に乱反射（散乱）され、そのうちの一部は衛星の方向に向かいます。この上ってくる放射は大気中を通る間にさらに乱反射、吸収され、最終的にセンサで検出され測定されます。熱赤外線放射を検出できるセンサでは、太陽熱により地上物体から放出された放射も検出されます。

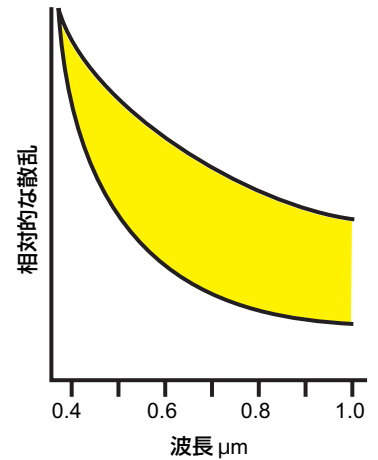


EM 放射に対する大気中と地表での代表的な相互作用

大気の影響

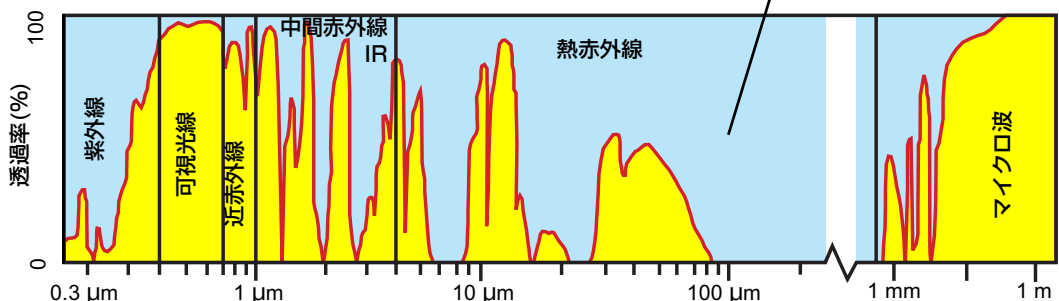
大気によるEM放射の散乱や吸収は、センサの設計、画像の処理や解釈に大きな影響を与えます。散乱の作用因の濃度が高いと、散乱により「かすみ」という視覚上の影響が現れます。かすみがあると、画像全体の輝度が高くなり、異なる地上物体の間のコントラストが小さくなります。大気がかすんでいると一部の光は上に向かって散乱し、この散乱過程の結果、放射の一部（**パスラジアン**と呼びます）がリモートセンサで記録されます。波長によって散乱の程度は異なるため、リモートセンシングされる画像に与えるパスラジアンスの影響も異なります。右の図に示すように、パスラジアンスの影響は波長が最も短い部分で最も大きく、波長が長くなるに従って急速に小さくなっていきます。複数の波長領域で画像を撮影すると、異なるパスラジアンスのために、さまざまな波長における輝度値の比較が複雑になります。パスラジアンに関する修正を簡単に行う方法については本書の後の部分で説明します。

大気の構成要素のうち太陽放射の効果的な吸収体となるのは、水蒸気、二酸化炭素、オゾンです。これらのガスは、それぞれが特定の波長領域のエネルギーを吸収する性質があります。いくつかの波長はほとんど完全に吸収されてしまいます。したがって、ほとんどの広帯域リモートセンサは、「大気ウィンドウ（吸収が最小で透過が最大であるこれらの波長領域）」の放射を検出できるように設計されています。



通常の大気状態（色の付いている部分）における散乱の範囲と波長の関係。散乱は、湿度や微粒子の量が大きくなると増加しますが、波長が長くなると減少します。ほとんどの場合、近赤外線より長い波長では散乱のために生じるパスラジアンは無視できる程度になります。

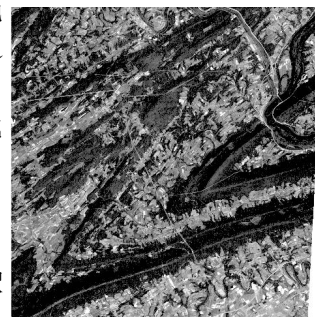
EM放射が大気を透過する程度が波長によって違うのは、大気中のガスによる吸収が波長によって異なるからです。リモートセンシングに適するのは、透過値が中程度以上である波長領域だけです。



EMRのソース、相互作用、センサ

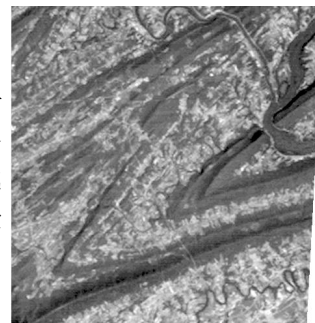
地表をモニタするために設計されたすべてのリモートセンシング・システムは、地上の地物により乱反射または放出されたエネルギーが基本になっています。現在のリモートセンシング・システムは電磁放射のソース、およびこのソースからのエネルギーと地表との相互作用により、3つのカテゴリに分類されます。

反射太陽放射センサ このセンサ・システムは、太陽放射のうち、地上の地物で乱反射（散乱）されて上に向かった分を検出します。有効な情報が得られる波長領域としては、紫外線、可視光線、近赤外線、中間赤外線があります。物体は波長によって異なる吸収パターンを持ち、このパターンはその物体の化学的組成や物理的構造に関係します。反射太陽放射センシング・システムは、このパターンが異なる物体を識別します。これらのシステムは、ソースである太陽光線に依存しているため、有効な画像が得られるのは昼間だけである上、大気の状態の変化や、1日のうちの時刻や季節による照明状態の変化は、解釈の上で大きな問題になる可能性があります。反射太陽放射リモートセンシング・システムは地球資源のモニタに最も広く使用されているタイプのシステムであり、本書で最も焦点を当てているのもこのタイプのシステムです。



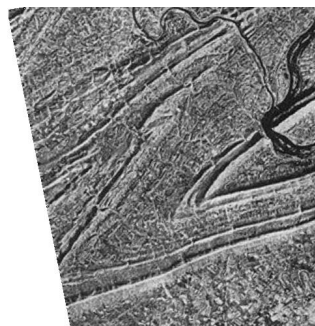
反射された赤による画像

熱赤外線センサ 地表の地物により放射された熱赤外線を検出できるセンサであり、これらの物体の熱特性に関する情報を調べることができます。反射太陽放射センサと同様このセンサも**受動的**システムであり、最終的にはエネルギー源である太陽放射に依存します。地表の地物の温度は1日のうちでも変化するため、熱赤外線システムは、画像を撮影する時刻によって大きな影響を受けます。



熱赤外線による画像

画像撮影用レーダー・センサ 自然のソースに依存しないこの「能動的」システムは、広帯域マイクロ波放射で地表を照明し、乱反射されてセンサに戻ってくるエネルギーを測定します。戻ってくるエネルギーからは、地表の粗さ、地表物体の含有水分、地表の形状などの情報が得られます。波長が長いマイクロ波は大気中での散乱がほとんどないため、地表を覆う厚い雲も透過します。このため、画像処理レーダーは、雲に覆われることが多い熱帯地域に特に有効です。

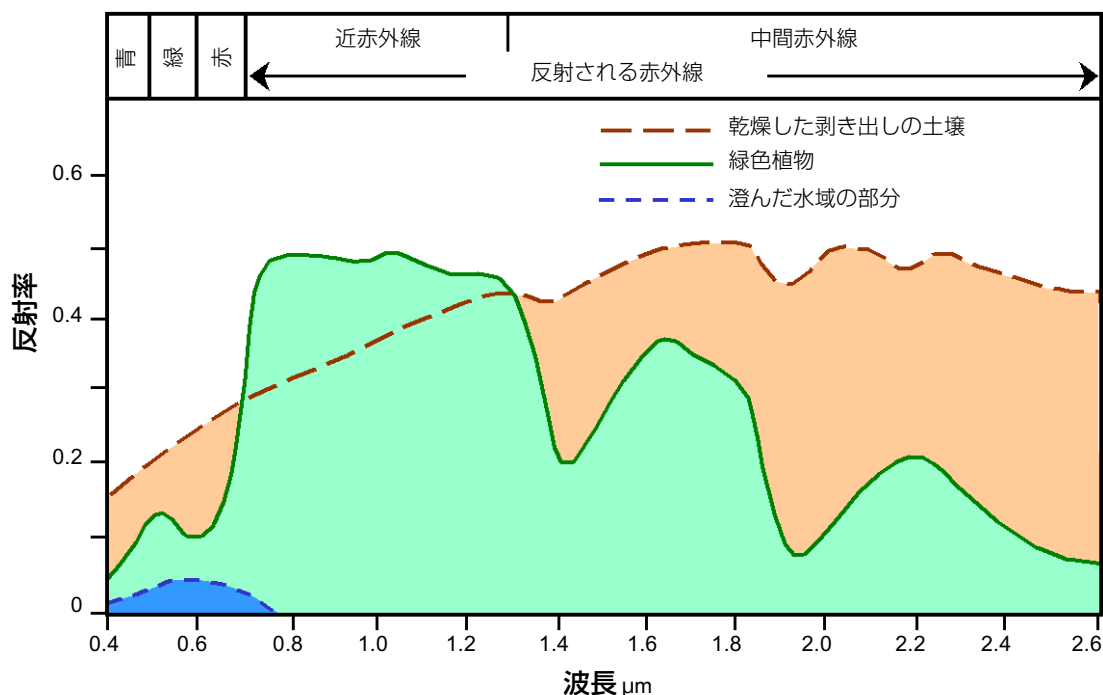


レーダーによる画像

スペクトル・シグネチャ

波長によって吸収特性が異なることでできるスペクトル・シグネチャからは、反射された太陽エネルギーの画像に含まれる異なる物体を識別するための鍵となる情報が得られます。これらのスペクトル・シグネチャを数量化するために使用される特性としては、入射エネルギーに対する反射エネルギーの比率を波長の関数として表現した**スペクトル反射率**というものが使用されます。さまざまな物体のスペクトル反射率を研究室やフィールドで測定しておき、画像を解釈する際の基準データとして使用することができます。下図の例は、自然界で非常に多く見られる3つの物体、すなわち乾いた土壌、緑色植物、水のスペクトル反射率曲線を対比して示したものです。

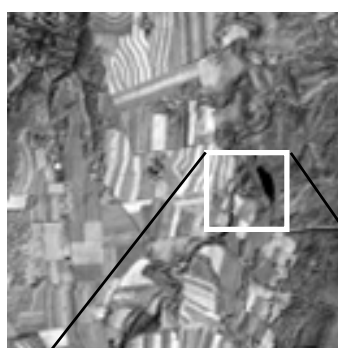
乾いた土壌の反射率は、可視光線、近赤外線領域に渡って一様に上昇していき、中間赤外線領域で最大になります。粘土鉱物による吸収に起因する小さな谷は中間赤外線領域にしかありません。緑色植物は、非常に異なるスペクトルを持っています。可視光線領域では反射率は比較的低いのですが、赤や青よりも緑の光の方が高く、人間の目に見える緑の色を作り出しています。可視光線の波長領域における緑色植物の反射率パターンは、緑色植物の光合成のための基本色素である葉緑素の選択的吸収によるものです。植物のスペクトルで最も目立つ特徴は、可視光線と近赤外線の境界部で反射率が急上昇することと、近赤外線の反射率が高いことです。赤外線放射は植物の葉の内部に達し、葉の複雑な内部構造で強く散乱されるため、反射率が高くなります。植物のスペクトルの中間赤外線領域の谷の部分には、水分による吸収が原因です。澄んだ水域部分があると、可視光線領域より長いすべての波長が効果的に吸収されるため、赤外線放射の反射率が低くなります。



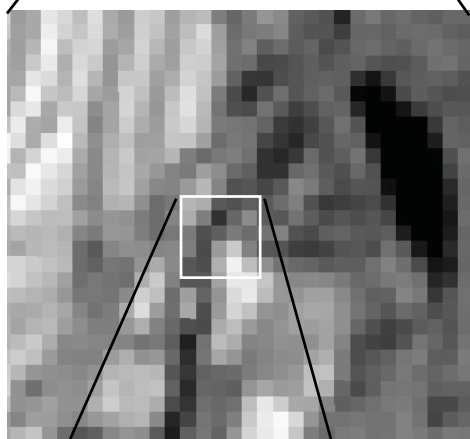
画像の取得

ここまでの部分では、航空機や衛星のセンサで測定される放射エネルギーが、放射ソースや、そのエネルギーと地表物体の間の相互作用、大気中のエネルギーの通過状態により影響を受けることを説明してきました。この他に、放射が当たる際の幾何条件（ソースの位置、地形の傾斜、傾斜の方向、陰のつき方）によっても、上に向かってくるエネルギーの輝度が影響を受ける可能性があります。これらの影響が合成されて、時刻や季節で、あるいは空間的に変化する「信号」になります。人間が解釈可能な画像を作成するには、リモートセンシング・システムでまず最初にこのエネルギーを検出して測定しなければなりません。

地表から戻ってくる電磁エネルギーは、航空写真の場合のような感光フィルムや、アレイ状の電子センサで検出することができます。写真のフィルムに当たる光は化学反応を起こしますが、このときの反応の程度はフィルム上の各点が受け取ったエネルギー量によって異なります。フィルムを現像すると、エネルギーのパターンの変化が視覚的に認識可能な明暗のパターンに変換されます。



電子的なセンサは、受け取ったエネルギー量に比例する強さの電気信号を発生します。アレイ内の各検出器からの信号は、電子的手段によりデジタル的な形で（一連の数値として）記録したり送信することができます。現代のデジタル・スチル・カメラやビデオ・カメラは、電子センサを使用した画像処理システムの例です。現代の衛星の画像処理システムもすべて、何らかの形の電子検出器を使用しています。



電子センサ・アレイにより得られた画像（またはデジタル的にスキャンされた写真）は、さまざまな輝度レベルを示す長方形の二次元数値配列から構成されます。それぞれの値は、画像内では四辺形の単位領域として表現される地表のある部分での平均輝度を示します。コンピュータ用語ではこの配列のことを通常はラスタと言い、単位となる四辺形の部分のことを**セル**または**ピクセル**と言います。コンピュータで表示されるときには、画像ラスタの輝度値が画面での表示輝度に変換されます。

115	111	71	67	74
111	89	52	77	95
87	66	74	87	80
89	64	102	125	90
70	65	113	144	119

空間解像度

画像または一連の画像の空間的、スペクトルの、時間的な構成要素のいずれから、地表の物質や状態の解釈に使用可能な情報が得られます。これらの特性のそれぞれについて、センサ・システムで生成される画像の解像度(分解能)を定義することができます。リモートセンシング画像から得られる情報は、画像に関するこれらの解像度(分解能)という因子により制約を受けます。

空間解像度は、画像の空間的な精細度を示す尺度であり、センサの設計や使用時の地上高度により決まります。リモート・センサを構成するそれぞれの検出器は、地上の有限面積の小区画から測定エネルギーを受け取ります。これらの個々の小区画が小さいほど、画像から解釈可能な空間情報の精細度は高くなります。デジタル画像の場合、空間解像度の表現としては、画像セルの地上でのサイズが最も多く使用されます。

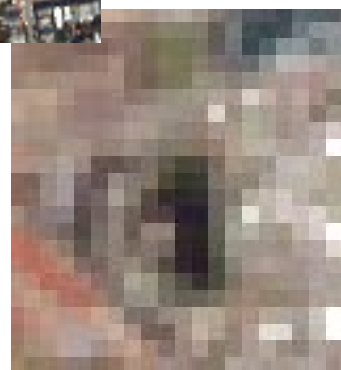
形状は、人間が画像内の物体を認識、識別する際に使用可能な視覚的要素です。通常、形状を認識できるのは、物体のサイズがセルのサイズより数倍大きい場合だけです。ただし、画像セルのサイズより小さい物体を「検出」できる場合もあります。このような物体でも、周囲に比べて輝度が十分高いか低い場合は、その物体が含まれる画像セルの平均輝度との差が大きくなり、輝度的に隣接するセルとのコントラストが強くなります。この物体が何であるかを識別することはできないかもしれませんが、周囲とは異なる何かがそこにあることはわかります。周囲の部分が比較的均一な場合は特にわかりやすくなります。空間的な状況により、道路や水路上の橋など、セルのサイズより細い直線的な地物も認識することができます。デジタル画像の中で検出できるか認識できるかについての、はっきりしたサイズ上の境界はありません。



上の画像は、カリフォルニア州サンフランシスコの一部を示す、Landsat Thematic Mapper によるシーンの一部です。この画像のセル・サイズは28.5mです。はっきり認識できるのは、比較的大きいビルや道路だけです。上の画像の四角で囲んだ部分の、セル・サイズ4mのIKONOS 画像を左下に示します。IKONOS 画像では、樹木や比較的小さいビル、狭い道路も

認識できます。下の画像

は、Thematic Mapper のシーンの四角で囲んだ部分を IKONOS 画像と同じ縮尺に拡大したものです。Landsat による画像のセルの方が大きいことがわかります。

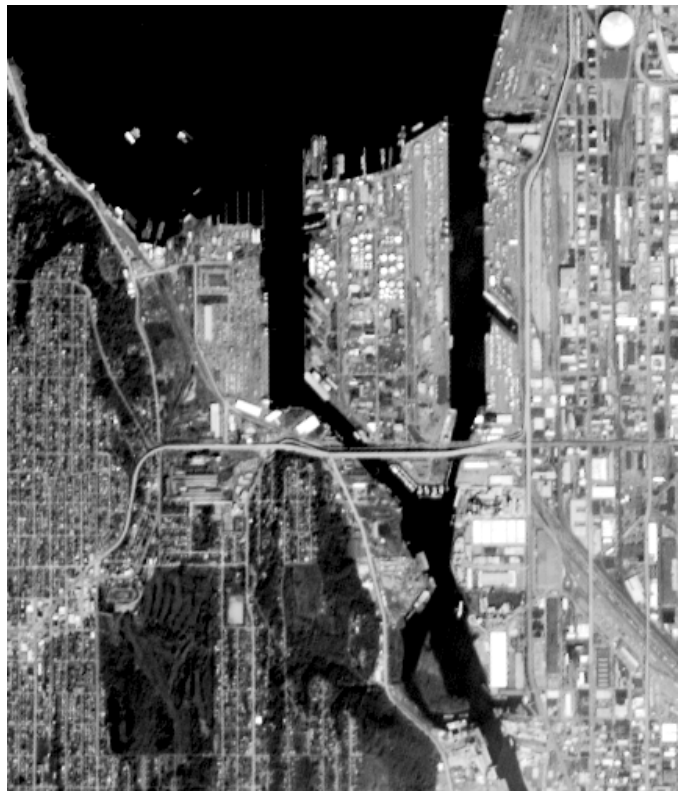


スペクトル分解能

リモートセンシング・システムのスペクトル分解能とは、測定した波長領域内の異なる部分を識別できる能力であると言えます。基本的には、スペクトル分解能は、測定される波長区間（バンド）の数および各区間の狭さの程度を示します。センサ・システムにより生成される「画像」は、非常に広い1つの波長バンドから構成される場合もありますし、少数の広いバンド群から構成される場合もありますし、多数の狭い波長バンド群から構成される場合もあります。通常、このような3種類の画像をそれぞれ、**全色画像**、**マルチスペクトル画像**、**ハイパースペクトル画像**と呼びます。

モノクロ・フィルムを使用して撮影される航空写真では、可視光（青、緑、赤）波長領域全体での平均的な応答が記録されます。このフィルムは目で見えるすべての色に反応するため、全色フィルムと呼ばれます。全色画像では、地上物体の総合的な視覚特性の空間的变化はわかりますが、スペクトルは区別できません。いくつかの衛星リモートセンシング・システムでは非常に広い1つのバンドが記録されますので、シーンの概要がわかります。通常は、搭載されている他のセンサよりも空間解像度が高くなっています。波長領域は異なりますが、このようなバンドも通常は全色バンドと呼ばれます。たとえば、最初の3台のSPOT衛星のセンサには、 $0.51\sim0.73\mu\text{m}$ のスペクトル領域（緑と赤の波長領域）を持つ全色バンドが含まれていました。マルチスペクトル・センサのバンドの解像度が20mなのに対し、このバンドの空間解像度は10mとなっています。NASAのLandsat 7衛星に搭載されたEnhanced Thematic Mapper Plusセンサの全色バンドは、 $0.52\sim0.90\mu\text{m}$ （緑、赤、近赤外線）というより広いスペクトル領域をカバーし、空間解像度は15mとなっています（このセンサのマルチスペクトル・バンドでは30m）。

ワシントン州シアトルの一部のSPOTによる全色画像。この画像バンドは、緑と赤の波長領域に渡ります。水や植物は暗く表示されているのに対し、最も明るく表示されている物体はビルの屋根や大きい円形のタンクです。

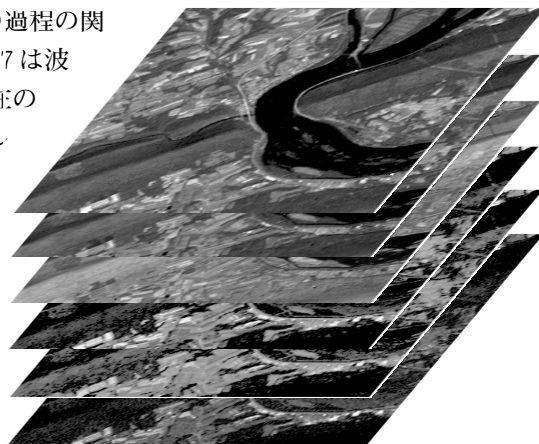


マルチスペクトル画像

地上環境のモニタ用に設計されたりモートセンシング・システムでは、スペクトル識別能力を向上させるため、少数の広い波長バンドで放射を検出するパラレル・センサ・アレイによるマルチスペクトル方式を採用しています。ほとんどの衛星システムでは、可視光線から中間赤外線波長領域で3～6個のスペクトル・バンドを使用しています。また、システムによっては、1つまたは複数の熱赤外線バンドも使用しています。特定の波長区間で信号性能を低下させる大気中の水蒸気による吸収の影響を避けるため、赤外線領域のバンド幅は制約を受けます(前ページの**大気の影響**の項を参照)。これらの広帯域マルチスペクトル・システムでは、さまざまなタイプの植物、岩、土壌、澄んだ水域、濁った水域、一部の人工物を識別することができます。

緑、赤、近赤外線のバンドを持つ3バンド・センサは、植物のある部分とない部分の識別に効果的です。フランスのSPOT (Système Probatoire d'Observation de la Terre) 衛星1、2、3号に搭載されたHRV センサ(空間解像度20m)はこのような設計になっています。一部の航空写真で使用されているカラー赤外線フィルムは、近赤外線を記録する赤の乳剤、赤の光を記録する緑の乳剤、緑の光を記録する青の乳剤により、同様のスペクトル領域をカバーします。Space ImagingのIKONOS衛星(解像度4m)やIndian Research SatellitesのIRS-1Aと1B(解像度36m)に搭載されたLISS II センサには、青のバンドが追加され、可視光線領域を完全にカバーし、自然色バンドのコンポジット画像を作成することができます。Landsat Thematic Mapper (Landsat 4および5)とEnhanced Thematic Mapper Plus (Landsat 7) センサには、中間赤外線(MIR)の2つのバンドが追加されています。Landsat TMのバンド5($1.55 \sim 1.75 \mu\text{m}$)とバンド7($2.08 \sim 2.35 \mu\text{m}$)は、植物や土壌の水分の変動に反応します。また、バンド7は、数種類の重要な鉱物に見られる特徴的なスペクトル吸収が含まれる領域もカバーします。追加されたTMバンド(バンド6)は、熱赤外線波長領域の一部($10.4 \sim 12.5 \mu\text{m}$)を記録します(センサ設計の過程の関係でバンド7の方が後から追加されたため、バンド6と7は波長順にはなっていません)。空間解像度が200m以上の現在のマルチスペクトル衛星センサ・システムをいくつか比較したものを、次ページに示します。

いわゆるハイパースペクトル・センサでは、スペクトル解像度をさらに向上させるため、隣接する何百個もの狭い(幅が $0.1\mu\text{m}$ 程度と小さい)波長バンドで測定を行います。これらのシステムに関する詳細は、『**ハイパースペクトル画像処理の概要**』というパンフレットを参照してください。



マルチスペクトル衛星センサ

プラットフォーム / センサ / 打ち上げ年	画像セルのサイズ	画像サイズ (軌道横断方向×軌道方向)	スペクトル・バンド	可視光線バンド (μm)	近赤外線バンド (μm)
Ikonos-2 VNIR 1999	4 m	11 × 11 km	4	B 0.45-0.52 G 0.52-0.60 R 0.63-0.69	0.76-0.90
Terra (EOS-AM-1) ASTER 1999	15 m (Vis, NIR) 30 m (MIR) 90 m (TIR)	60 × 60 km	14	G 0.52-0.60 R 0.63-0.69	0.76-0.86
SPOT 4 HRVIR (XS) 1999	20 m	60 × 60 km	4	G 0.50-0.59 R 0.61-0.68	0.79-0.89
SPOT 1, 2, 3 HRV (XS) 1986	20 m	60 × 60 km	3	G 0.50-0.59 R 0.61-0.68	0.79-0.89
IRS-1C, 1D LISS III 1995	23.6 m 70.8 m (MIR)	142 × 142 km 70 × 70 km Pan	3	G 0.52-0.59 R 0.62-0.68	0.77-0.86
Landsat 7 ETM+ 1999	30 m	185 × 170 km	7	B 0.45-0.515 G 0.525-0.605 R 0.63-0.69	0.75-0.90
Landsat 4, 5 TM 1982	30 m	185 × 170 km	7	B 0.45-0.52 G 0.52-0.60 R 0.63-0.69	0.76-0.90
IRS-1A, 1B LISS I, II 1988	36.25 m (LISSII) 72.5 m (LISS I)	148 × 148km	4	B 0.45-0.52 G 0.52-0.60 R 0.63-0.69	0.77-0.86
Landsat 4, 5 MSS 1982	79 m	185 × 185 km	4	G 0.5-0.6 R 0.6-0.7	0.7-0.8 0.8-0.9
IRS-1C, 1D WiFS 1995	189 m	810 × 810 km	2	R 0.62-0.68	0.77-0.86

Ikonos-2: Space imaging Inc., USA **IRS:** National Remote Sensing Agency, India **Terra, Landsat:** National Aeronautics and Space Administration (NASA), USA **Spot:** Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), France

マルチスペクトル衛星センサ (続き)

プラットフォーム / センサ / 打ち上げ年	中間赤外線バンド (μm)	熱赤外線バンド (μm)	全色バンド領域 (μm)	全色セルのサイズ	公称再帰周期*
Ikonos-2 VNIR 1999	None	None	0.45-0.90 B, G, R, NIR	1 m	11 days (2.9 days ⁺)
Terra (EOS-AM-1) ASTER 1999	1.60-1.70 2.145-2.185 2.185-2.225 2.235-2.285 2.295-2.365 2.36-2.43	8.125-8.475 8.475-8.825 8.925-9.275 10.25-10.95 10.95-11.65	None	X	16 days
SPOT 4 HRVIR (XS) 1999	1.58-1.75	None	0.61-0.68 R	10 m	26 days (5 days ⁺)
SPOT 1, 2, 3 HRV (XS) 1986	None	None	0.51-0.73 G, R	10 m	26 days (5 days ⁺)
IRS-1C, 1D LISS III 1995	1.55-1.70	None	0.50-0.75 G, R	5.8 m	24 days (5 days Pan ⁺)
Landsat 7 ETM+ 1999	1.55-1.75 2.09-2.35	10.40-12.50	0.52-0.90 G, R, NIR	15 m	16 days
Landsat 4, 5 TM 1982	1.55-1.75 2.08-2.35	10.40-12.50	None	X	16 days
IRS-1A, 1B LISS I, II 1988	None	None	None	X	22 days
Landsat 4, 5 MSS 1982	None	None	None	X	16 days
IRS-1C, 1D WiFS 1995	None	None	None	X	5 days

Import / Export (インポート / エクスポート) 機能を使用して、上記のどのセンサからも TNTmips のプロジェクト・ファイル・フォーマットで画像をインポートできます。各画像バンドが 1 つのラスタ・オブジェクトとして保存されます。

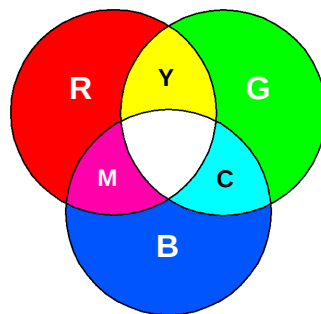
* 1 台の衛星による赤道での天底ビュー

† ポインティング機能あり

放射測定の分解能

センサ内の個々の検出器が受け取ったエネルギーをデジタル的に記録するためには、入って来るエネルギーの連続した領域を多数の離散的レベルに**量子化**あるいは分割して、整数値として記録する必要があります。現在の多くの衛星システムでは、データを256個のレベル（バイナリ符号体系による8ビット・データ）に量子化しています。ASTER センサの熱赤外線バンドは、4096個のレベル（12ビット）に量子化されています。記録可能なレベル数が多いほど、センサ・システムによる**放射測定**の分解能は高くなります。

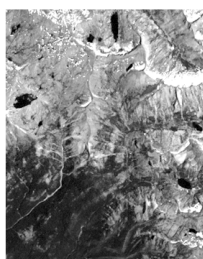
放射測定の分解能が高いと、マルチスペクトル画像のバンド群に含まれている数値をコンピュータで処理したり解析する上で有利です（最もよく使用されるいくつかの解析手順、バンド比率解析、スペクトル分類については、後で説明します）。マルチスペクトル画像を視覚的に分析する上でも、放射測定の分解能が高ければ、波長バンドを選択し組み合わせてカラーで表示や印刷を行えるので有利です。1つのバンドは、コンピュータのモニターで使用される3つのカラー・チャンネルである赤、緑、青のそれぞれに割り当てられます。混合色モデルを使用すると、これらの3原色をさまざまなレベルで組み合わせて微妙に異なる何百万もの色を作り出すことができます。



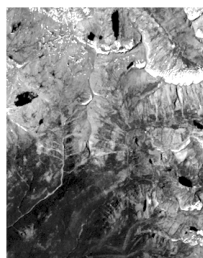
それぞれのセルごとに、選択されたバンドの輝度値によって赤、緑、青の値が決まり、これらを使用して表示される色が生成されます。各カラー・チャンネルに256個のレベルを使用すると、コンピュータ・ディスプレイ上で1600万色以上を生成することができます。実験によれば、人間の視覚システムは、ほぼ700万色を識別でき、空間的關係も良く認識できるようになっています。したがって、コンピュータによる解析の効果もさることながら、カラー表示されたマルチスペクトル画像を人間が視覚的に分析することもまた、画像を解釈する上でやはり有効です。

次ページには、2つのサンプル区域について Landsat Thematic Mapperから得られた可視光線から中間赤外線までの領域の個々のバンドの画像を示します。左側の画像は山岳部のものであり、森林（左下）、剥き出しの花崗岩、小さい澄んだ湖、雪の部分があります。右側の画像は農業地帯のものであり、原野と作物のある畑があり、左上には町が、右上には黄色の牧草地があります。それぞれの画像ペアの隣の文は、診断における各バンドのいくつかの用法を説明したものです。これらの6つの画像バンドを使用して多くの色の組み合わせが可能です。その後のページの図では、最も広く使用されている色の組み合わせの3つの例を示しました。

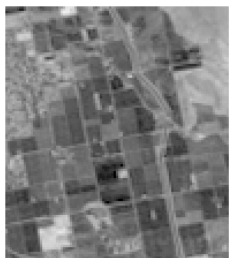
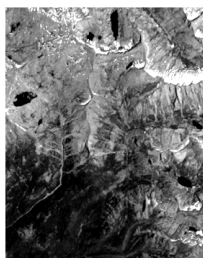
可視光線から中間赤外線までの画像バンド



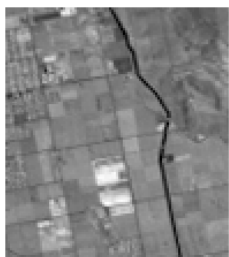
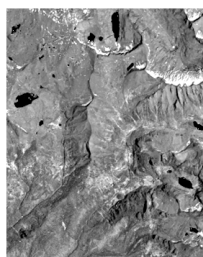
青(TM 1):浅い水域は最も良く貫通しますが、左の図の山岳部の湖は深いため、森林部と同様に暗く見えます。右側の画像の町や黄色の牧草地は、原野や耕作されている農地よりも明るく見えます。原野の輝度は、水分により大きく変化します。



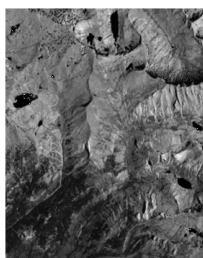
緑(TM 2):緑色植物により反射された可視光線が最も明るく見えますので、植物の活性度を評価したり、緑色の植物と黄色の植物を区別したい場合に役立ちます。ただし、森林部はやはり剥き出しの岩や土壌より暗いことに注意してください。雪は可視光線から近赤外線まで全体に分布しているため非常に明るくみえます。



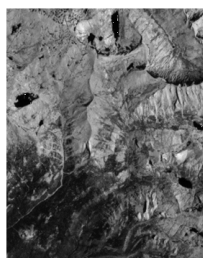
赤(TM 3):葉緑素による強力な吸収のため、他の可視光線バンドの場合よりも緑色植物が暗く見えます。この吸収の程度を利用して、植物の種類を識別することができます。赤のバンドは、土壌の色や、鉄の色による赤みがかった岩石の判別にも重要な役目を果たします。このような部分は鉱床と関係している場合もよくあります。



近赤外線(TM 4):どの可視光線バンドよりも、緑色植物がはるかに明るく見えます。農地の画像の中で、少数の非常に明るい畑は、作物の頂部が最も成長している部分を示します。灌漑用水も非常にはっきり見えますが、これは、水の部分では吸収が強く、作物のある明るい畑との間のコントラストが強くなるからです。



中間赤外線、1.55～1.75 μ m(TM 5):水、氷、雪により強く吸収されるため、山岳部の画像の湖と雪の部分は暗く表示されます。雲では反射されるため、雲と雪の識別には有効です。土壌の水分にも敏感に反応するため、農地の画像の中の灌漑されて間もない畑は暗く見えます。

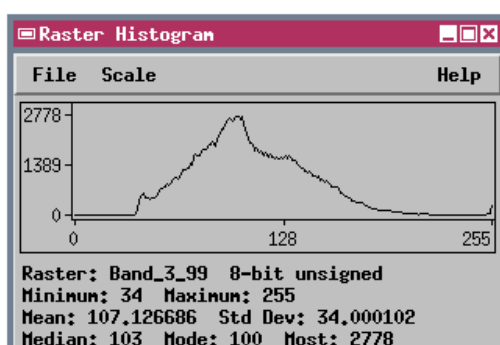


中間赤外線、2.08～2.35 μ m(TM 7):TMバンド5と似ていますが、粘土鉱物の部分で吸収が見られます。TMバンド5よりも、多量の粘土を含む物体ほど暗く表示されます。粘土質の土壌や、粘土を多く含む通常は経済効率の良い鉱床に対応している変質部分を識別するのに有効です。

単一画像バンドの解釈

個々の画像バンドを視覚的に調べることで、非常に役に立つ情報が得られます。人間の視覚は地上の地物の形状や大きさや空間的パターン(テクスチャ)を瞬時にチェックでき、解釈においては重要な役割を果たします。人間はまた、地形の遮光や陰影のパターンを瞬時にチェックして、これらから地形や照明の方向を認識できる能力も持っています。

画像バンドの最も重要な特性の一つは輝度レベルの分布であり、その表現には**ヒストグラム**が最も多く使用されます(画像のヒストグラムを見るには、TNTmips Spatial Data Display (空間データ表示) 処理の Histogram (ヒストグラム) ツールを使用します)。画像とそのヒストグラムの例を下図に示します。ヒスト



グラムの横軸は可能な輝度レベルの範囲(通常は0~255)を示し、縦軸はそれぞれの輝度を持つ画像セルの数を示します。このサンプル画像には非常に暗い部分や明るい部分もいくつかありますが、ほとんどのセルは中程度の輝度です。ヒストグラムの形状にもこのことが反映されており、中間の輝度範囲の付近

が最も高く広い山になっています。このヒストグラムの山の部分の幅が広いということは、このシーンの中の各部の輝度が大幅に異なることを示します。これよりも地表の状態が均一な部分の画像では輝度の変化は少なくなり、ヒストグラムの山の部分の幅は狭くなります。シーンの中に、輝度が異なるさまざまな地上物体を示す部分があると、ヒストグラムに複数の山が現れます。

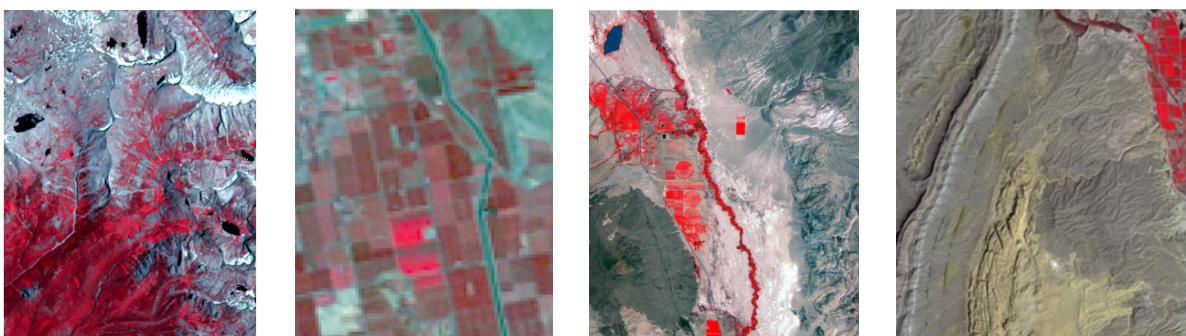
人間はこのように素晴らしい色識別能力を持っているのですが、グレースケール画像では20~30個程度の輝度レベルしか識別できません。したがって、**コントラスト**(地物間の輝度の相対的な差)が重要な画像属性となります。上のサンプル画像では輝度の範囲が広いため、比較的良好なコントラストが得られていますが、1つの画像バンド内では大部分のセルが比較的狭い輝度範囲に集中しており良好なコントラストが得られないのが普通です。TNTmips Spatial Data Display 処理の中の Contrast Enhancement (コントラスト強調) 処理を使用して輝度値をより広い表示輝度範囲に拡大すると、グレースケール(およびカラー)画像がわかりやすくなります(詳しくはパンフレット『TNT 入門: 色の調整』を参照してください)。

可視光線～中間赤外線バンドの色の組み合わせ

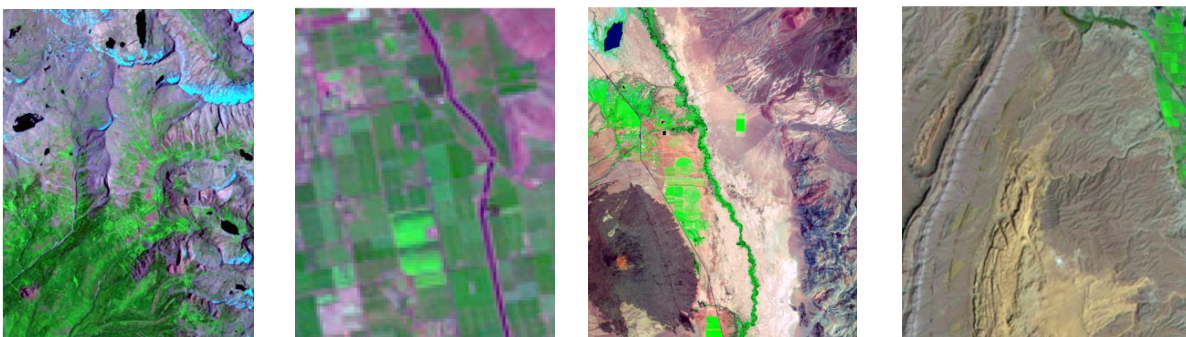
可視光線から中間赤外線までの領域のバンドの効果的な色の組み合わせを説明するため、4つの画像領域を下図に示します。左側の2つの画像セットは個別のバンドとして表示されており、前のページで説明したものです。3番目の画像セットは砂漠の谷の地域のものであり、中央には川岸部といくつかの灌漑された畑、左下には玄武岩を含む暗い噴石丘があります。4番目の画像セットは別の砂漠の地域のものであり、さまざまな種類の岩石が含まれ、右上には灌漑された畑があります。



赤 (TM 3) = R、緑 (TM 2) = G、青色 (TM 1) = B: 「自然の」色に似せたもの。3番目の画像の左上隅の小さな湖が、浮遊している沈殿物や藻類のために青緑になっていることに注意してください。



近赤外線 (TM 4) = R、赤 (TM 3) = G、緑 (TM 2) = B: カラー赤外線写真の色に似せたもの。健康な緑色植物は赤く見え、黄色の牧草地は青緑に見え、代表的な農地は青緑に見えます。雪は白、深い水域は黒く見えます。岩石物体群は通常、グレーから茶色までの色調になります。

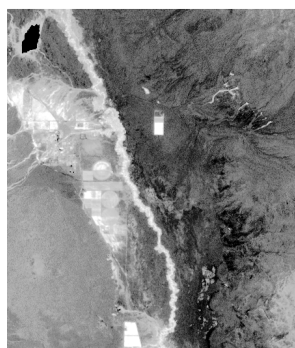


中間赤外線 (TM 7) = R、赤外線 (TM 4) = G、緑 (TM 2) = B: 健康な緑色植物は明るい緑色に見えます。黄色の牧草と代表的な農地はピンクからマゼンタの色調に見えます。雪は青白いシアン、深い水域は黒く見えます。岩石物体群は通常、茶色、グレー、ピンク、赤の色調になります。

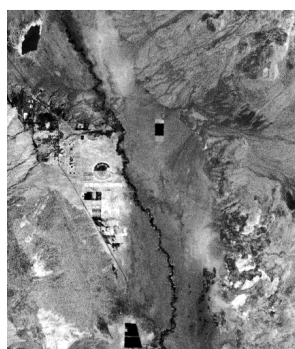
バンド比率

通常、航空画像には、影や、斜面の角度や向きの違いによる照明の違いが現れます。これらの影響のため、それぞれの地表物体の中でも画像内の場所により輝度が異なることがあります。このような変化は地形の3次元形状を視覚化するのには役立ちますが、スペクトル特性が似ている物体を認識するのには邪魔になります。2つのスペクトル・バンドを使用して**比率画像**を計算すると、これらの影響を除去して物体間のスペクトルの相違を強調することができます。シーンの各セルごとに、第1のバンドでの輝度値を第2のバンドでの輝度値で除算することで比率値が求められます。陰影による影響はすべての画像バンドでほぼ一定であるため、2つのバンド値で除算を行うことで陰影の影響を効果的に打ち消すことができます。TNTmipsでは、Predefined Raster Combination (定義済みラスタの組み合わせ) 処理を使用してバンド比率を計算することができます。詳細は、『**TNT入門：ラスタ演算**』で説明しています。

バンド比率は、鉱物の調査や植生状態の地図化などに広く利用されてきました。特定の物体が存在する部分が強調されるようなバンドが選択されます。解析を行う人は、物体で良く反射される(明るく表示される)1つの波長バンドと、物体で良く吸収される(暗く表示される)別の波長バンドを選択します。通常は、反射率の大きい方のバンドが比率計算の分子に使用されますので、目標とする物体がある部分では比率値が高く(1.0より大きく)なり、比率画像の中では明るく表示されます。



Ratio NIR/RED



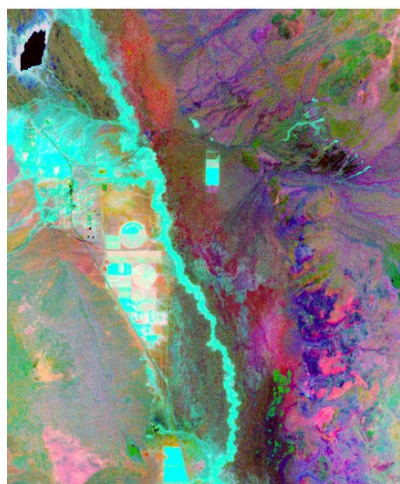
Ratio TM3/RM1

近赤外線 (NIR) と赤のバンドの比率 (TM4/TM3) は、植生やその条件を地図化するのに役立ちます。健康な植物ではこの比率が大きくなりますが、弱っている植物や黄色がかっている植物や耕作されていない部分では比率が小さく(近赤外線の値が小さく、赤の値が大きく)なります。地質調査学者は、複数のLandsat Thematic Mapperバンドの比率を使用して、鉱床があることの多い変質部分の地図化に役立っています。青 (TM 1) に対する赤 (TM3) のバンド比率では、多くの変質部分に見られる赤みがかった酸化鉄鉱物が目立つように表示されます。ほとんどすべての鉱物は、より短い波長の中間赤外線バンド (TM5) で良く反射しますが、変質部分に多く含まれる高陵石などの粘度鉱物は、より長い波長の中間赤外線バンド (TM7) で吸収される特性を持っています。したがって、TM7に対するTM5の比率を取ると、粘度鉱物、および石灰石や苦灰石を構成する炭酸塩鉱物が明るく表示されます。左の図の比率画像を、前ページの3番目の画像セットのカラー・コンポジットと比較してください。

正規差分植生指標 (NDVI)

単純なバンド比率画像は非常に有効ではありますが、不利な点もいくつかあります。第1に、特定のバンドだけに何らかのセンサ・ノイズがあった場合は、比率計算により増幅されてしまいます(センサによるこのような不自然な部分が、受信する画像バンドから除去されるように事前に処理されていれば理想的ですが...)。また、計算される値の範囲と分布にも問題がありますが、これについて NIR / RED の比率の場合で説明しましょう。比率値の範囲は、1.0 より小さい小数値 (NIR が RED より少ない場合) から 1.0 よりはるかに大きい値 (NIR が RED より大きい場合) に渡ります。値がこのように変化することから、基本的に 8 ビット整数データ値で動作する古い画像処理システムで解釈、スケーリング、コントラスト強調を行う際にいくつかの問題があります (TNTmips では、浮動小数点ラスタ形式で分数の比率値を直接操作したり、さまざまなコントラスト強調方法にフルにアクセスすることができます)。

正規化差分指標は、このような問題を避けるために単純な比率計算を修正したものです。2つのバンドの対応するセル値をまず減算し、さらにこの差分を2つの輝度値の和で除算して正規化します (TNTmips では、Predefined Raster Combination (定義済みラスタの組み合わせ) 処理を使用して自動的に正規化差分指標を計算することができます)。正規化を行うと、通常は、センサ・ノイズに関係する不自然な点が少なくなる他、照明状態による影響がほとんど除去されます。最も広く使用されている例が、 $(\text{NIR}-\text{RED})/(\text{NIR}+\text{RED})$ の計算により得られる Normalized Difference Vegetation Index (NDVI: 正規差分植生指標) です。生の指標値の範囲は -1 ~ +1 になり、データ範囲は 0 を中心に対称 (NIR = RED) になるため、解釈やスケーリングが容易になります。右に示す山岳部のシーンの NDVI 画像を、前ページのカラー・コンポジット画像と比較してください。左下の森林部は非常に明るく、植物のない暗い部分との違いが良くわかります。



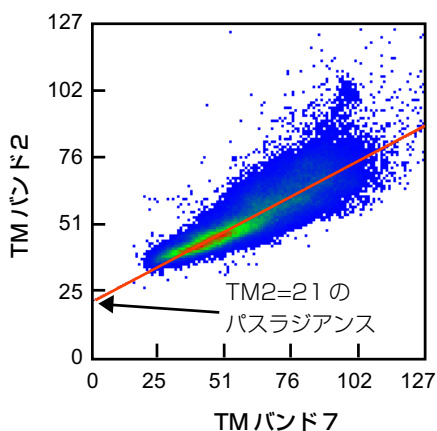
さまざまな比率画像や正規差分画像を組み合わせることでカラー・コンポジット画像にし、視覚的に解釈することができます。左に示すカラー画像は、R=TM3/TM1、G=TM4/TM3、B=TM7/TM5 を使用した3つの比率画像を組み合わせたものです。植物のある部分は明るい青緑で、鉄の色による赤みがあった部分はピンクからオレンジの色調で、その他の岩石や土壌物質はそれぞれのスペクトル特性の微妙な違いを示すさまざまな色相で表示されます。

かすみ (パスラジアンズ) の除去

バンド比率画像や正規差分画像を計算する場合は、その前にバンドの輝度値を調整して大気中のパスラジアンズによる影響を除去しておく必要があります。かすんだ大気による散乱があると、画像バンド内の各セルに輝度成分が加算されることを思い出してください。シーン内で大気の状態が均一であれば（常にそうであるとは限りません！）、特定のバンドの各セルの輝度が同程度ずつ大きくなり、バンドのヒストグラム全体が一様に大きい値の方にシフトすると考えられます。このような付加的な効果は波長が大きくなるにしたがって小さくなりますので、生の輝度値を使用して比率（特に青や緑のバンドが関係する場合の比率）を計算すると、地形上の陰影を完全に除去できないために間違った結果を与える可能性があります。

パスラジアンズの影響に関するバンド値の調整は、数学的には簡単であり、各セルから適当な値を減算するだけです（TNTmips では、Predefined Raster Combinations（定義済みラスタの組み合わせ）処理の中の Scale/Offset（スケール/オフセット）という算術演算を使用してこの計算を行うことができます。倍率を 1.0 にしパスラジアンズを負のオフセットとして設定してください）。ところで、減算すべき値はどのようにしたらわかるのでしょうか？

幸運にも、画像自体からパスラジアンズの値を推測する簡単な方法がいくつかあります。右側の画像の谷の壁面の部分のように完全に陰になる部分が画像内にある場合、この陰になった部分の輝度はパスラジアンズだけによって決まるはずです。TNTmips の Spatial Data Display（空間データ表示）処理の Dita Tips（データティップ）ツールや Examine Raster（ラスタのチェック）ツールを使用すると、陰の部分の値を調べることができます。完全に陰になる部分がない場合は、澄んだ深い水域を暗い部分として使用できます。ただ、この方法で危険なのは、選択したセルの中に実際には地表の輝度による成分が含まれて



いる可能性があることです（部分的に陰になっている部分や濁った水域など）。このような場合は減算する値が大きくなり過ぎてしまいます。Landsat TMバンドの場合は、Raster Correlation（ラスタの相関）ツールを使用して、選択したバンドの輝度と、パスラジアンズが本質的に0になるべきより長い波長の中間赤外線バンド(TM7)の輝度値のスカッタープロットを表示することで、より信頼性の高い推測値を得ることができます。パスラジアンズがある場合、(Regression Line (回帰線) オプションを使用して自動的に計算される) 分布する点群の最適近似線はプロットの原点を通りませんが、より短い波長のバンドの軸との交点から、そのバンドのおよそのパスラジアンズ値がわかります（左図）。

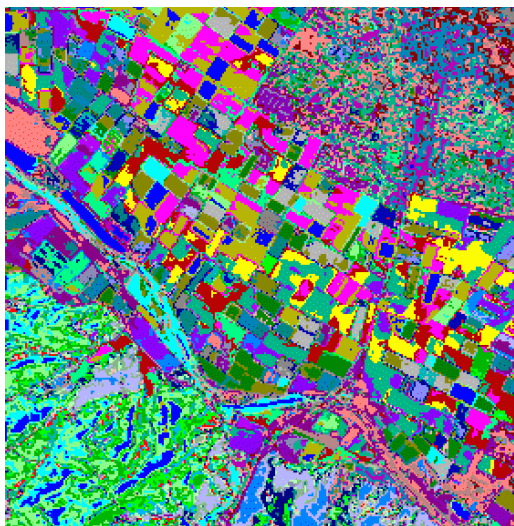
スペクトル分類

コンピュータによる画像解析におけるもう一つのポピュラーな方法がスペクトル分類です。マルチスペクトル画像では、さまざまな波長バンドの輝度値で各画像セルごとにスペクトル情報がコード化されますが、これを**スペクトルのパターン**と考えることができます。スペクトル分類法では、空間的な関係や対応付けを重視せず、これらのスペクトル・パターン群に基づいて画像セルを分類しようとしています。

マルチスペクトル画像の1つのセルのスペクトル・パターンを調べるには、それぞれの波長バンドの輝度値を別々の座標軸にプロットして仮想「スペクトル空間」内に点を位置決めします。このスペクトル空間では分類に使用される各画像バンドごとに1つの次元があります。ほとんどの分類方法では、このスペクトル空間内の点の間の距離に関するいくつかの尺度を使用してスペクトル・パターンの類似性を評価します。スペクトル・パターンがスペクトル空間内で近い位置にあるセルは、似たスペクトルの特徴を持ち、同じ地表物体を表している可能性が高くなります。



Red=TM7、Green=TM4、Blue=TM2のLandsat Thematic Mapperのカラー・コンポジット画像。このシーンでは、牧場の一方の側には市街地(右上)が、反対側には草に覆われた丘(左下)が見えます。

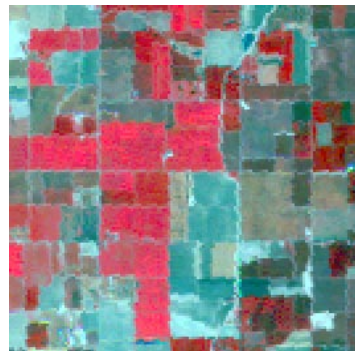
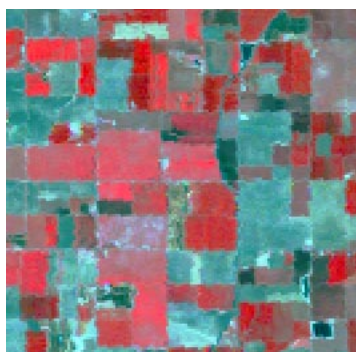


上図のシーンに対して熱赤外線バンド以外の6つのLandsat TMバンドで教師なし分類を行った結果。それぞれの色が個々のクラスを示しています。

教師付き分類の場合、解析者は、希望するスペクトル・クラスを示す既知の地表物体を一連の「トレーニング領域」として画像内で指定します。分類アルゴリズムは、それぞれのトレーニング・クラスに対して平均的なスペクトル・パターンを計算し、その他の画像セルを最も類似性の高いクラスに割り当てます。教師なし分類の場合、このアルゴリズムは、任意の画像セル・サンプルから独自のスペクトル・クラスを求め、クラス割り当て処理を行います。TNTmipsでは、Automatic Classification (自動分類) 処理を使用していずれのタイプの分類処理も行行うことができます。この処理については、パンフレット『TNT入門：画像の分類』で説明しています。

時間的分解能

地表の環境はダイナミックであり、秒単位から10年単位、あるいはさらに長いスパンで変化しています。自然の生態系や作物に影響を与える、植物の成長の季節的サイクルは重要な例です。植物の成長期を通じて繰り返し撮影された同じ地域の画像があると、私たちが植物や作物の種類を認識したり区別するのに役立ちます。また、画像の時系列は、この他の自然界のプロセスや人間の活動による地表の地物の変化の監視にも使用することができます。このような一連の画像を分離する時間的間隔は、画像シーケンスの**時間的分解能**を規定するものと考えられます。



カリフォルニア中部の農業地帯のLandsat TMによるこの一連の画像は、一つの成長期内で4月27日(左)、6月30日(中)、10月20日(右)に撮影されたものです。この4-3-2バンドの組み合わせでは、植物は赤で、剥き出しの土壌は青～緑の色調で示されています。一部の畑では4月から6月の間に作物の頂部が大きくなり、10月になる前に一部が収穫されています。

地上監視衛星のほとんどは、地球の両極に近い部分を通る低い地球軌道上(地上650～850km)にあります。1日に地球が自転する間に衛星は軌道を何周も回り、軌道パラメータと帯の幅により、地上の同じ点を次に通過するまでの時間的周期が決まります。たとえば個々のLandsat衛星の繰り返し周期は16日です。(SPOTシリーズのように)オフセットした軌道に二重に衛星を配置するのも、この繰り返し周期を短くする方法です。SPOTやIKONOSのような衛星では、軌道の軌跡から横にずれた方向に向けることが可能なセンサも搭載しているため、軌道の繰り返し周期よりも短い2、3日以内の周期で同じ部分の画像を撮影することができます。このように頻度が高いため、農業従事者は成長期の間、毎週の衛星画像を使用して自分の作物の状態に関する情報を得ることができます。

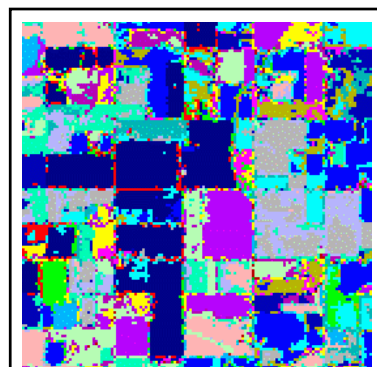


1985年(左)と1999年(右)のLandsat TM画像には、カリフォルニア州Tracyの市街地が拡大していった様子が記録されています。

画像間の空間的位置合わせと正規化

簡単な視覚的比較でも、画像時系列(または異なるセンサ群による画像)から定性的な解釈を行うことはできます。これに対し異なる日付の情報を結合して1つのカラー・コンボジット表示にしたい場合や、スペクトル分類のような定量的な分析を行いたい場合は、まず何よりも、画像が空間的に位置合わせされ、スペクトル的に正規化されていることが必要です。

空間的に位置合わせされているとは、異なる画像間で対応するセルが正しく識別され、サイズが一致し、地上の同じ区域がサンプリングされている状態を意味します。一連の画像を位置合わせするには、いくつかのステップが必要です。通常はまず最初に、画像を**ジオリファレンス処理**し、各画像内で地図座標がわかっている一連の制御点を特定します。制御点の座標は、ジオリファレンス処理した別の画像から得る場合もありますし、Global Positioning System (GPS: 全地球位置識別システム) レシーバを使用して現場で収集した一連の位置から得る場合もあります。TNTmipsでは、Georeference (ジオリファレンス) 処理 (Edit / Georeference (編集 / ジオリファレンス)) で制御点が割り当てられます。Georeference 処理の使用方法に関する段階的な説明はパンフレット『**TNT 入門: ジオリファレンス処理**』を参照してください。すべての画像をジオリファレンス処理すると、Automatic Resampling (自動再サンプリング) 処理 (Process / Raster / Resample / Automatic (処理 / ラスタ / 再サンプリング/自動)) を使用して各画像を共通の地図座標系とセル・サイズに投影することができます。この処理に関する詳細は、パンフレット『**TNT 入門: 画像の幾何補正**』を参照してください。



各日付ごとに6つのLandsat TMバンドを使用して、前のページの画像に示された部分を分類処理した結果

異なる日に撮影された同じ領域の画像でも、地上位置と地表物体が同じであるにもかかわらず輝度値が異なることがあります。これは、センサのキャリブレーション状態や大気の状態、照明の状態が異なるからです。前述のパスラジアンズの補正を行うと、大気の状態やセンサ・オフセットに起因する日付による違いはほとんど除去されます。この他の、センサのゲインや照明による違いを補正するには、画像バンドの値に倍率を掛けてスケールし直す必要があります。シーンに含まれる地上物体のスペクトル測定がすでに行われている場合は、実際の反射率値に合わせて画像をスケールし直すことができます(スペクトルのキャリブレーション)。その場所のスペクトルがない場合は、1つの画像を「基準」として選択し、この画像の状態に一致するように他の画像をスケールし直します(画像正規化)。1つの正規化処理が可能であるためには、スペクトル特性が期間内に変化していない識別可能な地物(擬似不変地物と呼びます)がシーンの中に存在することが必要です。このような地物に適する候補としては、アスファルトやコンクリートなどの人工物、あるいは深い水域や乾燥した剥き出しの土壌などの自然物体があります。この方法による正規化処理については、パンフレット『**TNT 入門: ラスタ演算**』で概要を説明しています。

熱赤外線画像

熱赤外線画像により、受動的リモートセンシング技術の可能性がさらに広がります。熱赤外線画像からは、地表の温度や地上物体の熱特性に関する情報が得られます。熱赤外線画像の用途としては、岩石の種類、土壌や土壌水分の変化の地図化、植生状態や海洋の氷、海流のパターンの監視など、さまざまなものが考えられます。この他、山火事や火山活動、発電所から河川や湖に放出される熱水の流れ出しパターンのような通常と異なる熱源を監視するなどのドラマチックな状況にも熱赤外線画像を使用することができます。

通常の地表温度でも、地球の表面からは熱赤外線波長領域のEM放射が放出されます。ほとんどの熱赤外線画像は8～14 μm の波長で撮影され、この領域内に放射のピークがあります。太陽からの入射光のうちこれらの波長のものは、ほとんどすべてが地表で吸収されますので、反射された放射による影響はほとんどなく、この領域は良好な「大気ウィンドウ」(6、7ページを参照) にもなります。地球表面に対する自然の熱源としては、太陽エネルギーと地熱エネルギー(岩石内の放射性元素の崩壊により発生する熱)があります。地熱による加熱量は非常に小さく、広い範囲ではほぼ均一であるため、ほとんどの画像の場合は、太陽による加熱が温度変化の主因です。太陽による毎日の加熱状態は、地表物体の物理的、熱的特性や、地形(太陽の方向に向いている斜面はより多くの太陽エネルギーを吸収します)、雲、風などの影響を受けます。



米国カンサス州の、この年の夏季の午前半ばの時間帯の熱赤外線画像では、温度の低い河川の表面、樹木のある両側の帯状部分、全面が作物で覆われた農地が暗く表示されています。明るい原野の部分は剥き出しの土壌です。Landsat 7 ETM+により、バンド6、地上解像度 60m で撮影。

熱赤外線画像の輝度値からは地上のさまざまな部分から放出されるエネルギー量がわかりますが、このエネルギー量は、物体の温度によってだけでなく「放射率」という特性によっても異なります。放射率とは、**黒体**という理想的な放出と吸収を行う仮想物体と比較した場合の、物体のエネルギー放射効率を示します。放射率は、特定の温度において実際の物体から放出される放射エネルギーの量と、同じ温度において黒体から放出されるエネルギー量の比として定義されます。放射率は波長によって異なるため、反射率スペクトルと同様に放射率スペクトルでも物体が特徴付けられます。自然の物体はほとんどが、比較的強力なエミッターです。8～12 μm の波長領域における平均放射率値は、花崗岩の場合の0.815から純水の場合の0.993まで、さまざまです。

熱プロセスと特性

熱赤外線画像と、反射された太陽放射により生成されるお馴染みの画像の間には、いくつかの類似点があります。どちらの画像でも、放射と物体との間の瞬間的な相互作用過程を決定する物体特性(熱赤外線画像の場合は放射率、反射太陽放射画像の場合は反射率)の空間的变化がわかります。また、どちらの画像においても、地形の影響が現れるほか、熱赤外線画像では温度変化の影響が、反射画像の場合は照明の違いによる影響が現れます。ただし、熱赤外線画像の方が解釈は複雑になります。これは、その他の物体特性により地表温度が空間的にも変化するからです。これらの温度変化は、目に見える地表より下の場所で起こる直には現れない過程にも関係してきます。

すべての地上物体の温度は、太陽による加熱とその後の夜間冷却という1日のサイクルの中で変化しますが、物体により、この1日のサイクルに対する反応が異なります。太陽放射の多くの部分を反射する明るい色の物体に比べ、暗い色の物体は入射する放射をより多く吸収し温度が上昇する性質があります。また、2つの物体が同じ量の放射を吸収したとしても、到達し得る最高温度が両者で異なる場合もあります。その理由の一つは、物体により**熱容量**が異なることにあります(一定の温度上昇のために必要な熱量が異なります)。しかし、地表が加熱されているときは地下の温度の低い部分に熱が伝達され、夜間冷却ではこの逆の現象が起こります。太陽による1日のサイクルにおける温度変化は、地下30cmまで及びます。密度や熱伝導性の違いのために熱伝導率が物体によって異なるため、この垂直方向での熱交換も温度の空間的な違いの原因になります。これらの影響は、温度変化に対する抵抗を示す**熱慣性**という特性で表されます。熱慣性は、密度、熱容量、熱伝導度の関数になります。

地表物体は赤外線放射を常時放出していますので、熱赤外線画像は昼夜を問わず撮影できます。日中の温度上昇が遅く周囲よりも温度が低い物体は夜間での温度低下も遅いため、夜間の画像では周囲より温度が高くなります。熱赤外線画像を正しく解釈するためには、画像の撮影時刻、その場所の地形、その場所にあると思われる物体の熱特性についてよくわかっていることが必要です。



この、北部エリトリアと紅海の夜間の熱赤外線画像では、陸地よりも海域の方が温度が高いため、右上の部分が明るくなっています。陸地部の輝度の変化は熱特性の違いによるものですが、地形もある程度関係しています。

レーダー画像

画像撮影用レーダー・システムはリモートセンシング画像作成のための強力な情報源であり、昼夜を問わず、天候に左右されずに画像を撮影することができます。レーダー画像は、地形や地質構造、土壌のタイプ、植生や作物、大洋の氷や油層部分などの地図化に使用されます。航空機に搭載された商用システムや研究用システムが数十年使用されてきている他、現在では2つの衛星システムが稼動しています（カナダの Radarsat、ヨーロッパ Space Agency の ERS-1）。

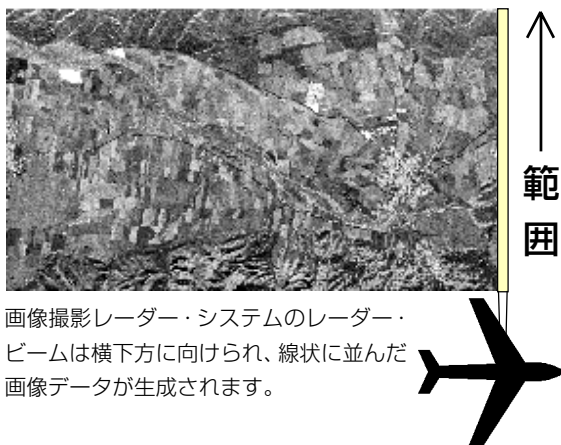
レーダー画像は、他のタイプの画像に比べると、ユニークで変わった様子に見えます。レーダー画像は粒子状である上、地上の地物も空間的に大きく歪んで見えます。すべてのリモートセンシング・システムと同様、レーダー画像の解釈においても、関連する EMR の相互作用や撮影の際の幾何条件に関する理解が重要になります。

画像撮影用レーダー・システムは、アンテナを使用してマイクロ波エネルギーを飛行経路の横下方に送信します（下図を参照）。レーダー・ビームが地上の地物に当たると、エネルギーがさまざまな方向に乱反射され、センサ・プラットフォーム

フォームに向かって戻ってきたエネルギーの強度をレーダー・アンテナで受信して測定します。（湖や道路のように）滑らかで平らな面では、入射エネルギーのほとんどをセンサとは違う方向に反射します。このため、レーダー画像では平らな面は暗く表示されます。マイクロ波の波長と同等な程度の高さの凹凸がある粗い面では、これよりも多くのエネルギーがセンサに戻ってくるため、より明るく見えます（画像撮影レーダー・システムで通常使用される波長の範囲は 0.8cm ～ 1m です）。センサの方を向いた斜面も、方向のずれた斜面よりは明るく見え、逆向きの急斜面は完全に陰になります。このように、レーダーの輝度の変化の主因をなすのは、地形と地表の粗さです。



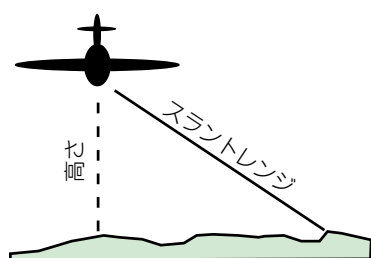
このレーダー画像の右半分には丘状の地形が多く、左半分は平らな地形になっています。左側の端には広い網目状の水路があり、その両側に農地があります。左下と右上の部分の住居地域には、明るい色の植物と構造物、暗い色の街路が見えます。



画像撮影レーダー・システムのレーダー・ビームは横下方に向けられ、線状に並んだ画像データが生成されます。

レーダー画像における幾何条件

画像撮影レーダー・システムは非常に短い(10～50マイクロ秒)パルス状のマイクロ波エネルギーを送出し、散乱により戻ってくる変化するエネルギー信号を受信します。送信される各パルスは、飛行経路に直角な方向の狭い帯状の部分横切るように方向が制御されます。このようなパルス・モードが必要なのは、システムが、戻ってくる信号の強度だけでなく往復の時間も計測しているからです。マイクロ波は光の速度で進みますので、戻ってくる信号の各部分の往復時間をそのまま変換すれば、**スラントレンジ** (slant range) という反射物体までの直線距離になります(下図を参照)。ほとんどのレーダー・システムで最初に生成される画像では、レンジ方向(軌跡を横断する方向)に戻るレーダーの位置はスラントレンジの方向によって決まります。レーダーの反射角度はレンジ方向によって変わりますので、スラントレンジ画像の水平方向の縮尺は一定ではありません。画像内の飛行線に近い部分(近いレンジ)にある地物は、遠いレンジにある地物に比べて縮んで見えます。センサの高さ、および地面が平らであるという前提条件を使用すると、スラントレンジ画像を処理することで、戻ってくるレーダーのほぼ正確な水平位置を求めることができます。この結果得られるのが**地上レンジ**画像です。TNTmipsには、ラスタ再サンプリング・オプションの一つとしてスラントレンジから地上レンジへの変換機能が用意されています(Process / Raster / Resample / Radar Slant to Ground (処理 / ラスタ / 再サンプリング / レーダーを傾斜から地上へ))。



レーダー・システムでは横方向を観測するという幾何条件から、画像内で地形の歪みが生じます。センサの方を向いた斜面は、向きのずれている斜面に比べると狭くなります。この結果、丘や峰は飛行経路の側に傾いているように見えます。このような**奥行短縮化** (foreshortening) は、右の画像の、センサの方(左側)を向いた、より明るい左側の斜面に現れています。前の斜面が急過ぎる場合は、頂部から戻ってくる信号が他のすべての信号より先に到着するため、前の斜面は完全に消えてしまいます(**かぶり** (layover) と言います)。このようなひずみを除去するには、地表の正確な標高モデルが必要です。



異なるセンサからのデータを組み合わせる

土、岩、水、植物、人工の地物などの、地球表面に普通に見られる、電磁放射との間の相互作用を決める物理特性が、それぞれ異なります。ここまでのページでは、放射スペクトルの3つの個別の要素である反射太陽放射（可視光線と赤外線）、放出熱赤外線、画像撮影レーダーを使用するリモートセンシング・システムについて説明してきました。これらのスペクトル領域でのEM放射と地表の地物との相互作用は異なるため、対応するそれぞれのセンサ・システムによって異なる一連の物理特性を測定しています。それぞれのシステム自身だけでも、地上物質は何であるかという情報とその状態に関する情報は得られますが、異なるセンサから得られた画像データを組み合わせるとはるかに多くのことがわかります。結合されたデータ・セットを解釈する際には、正確な定量的分析や、より定性的な視覚分析を行うことができます。後者のアプローチの例を下図に示します。

これらの画像は、カリフォルニア州 Salinas Valley の穀物畑の小部分（約 $1.5\text{km} \times 1.5\text{km}$ ）を示したものです。右のカラー画像に使用されたデータは、NASAの AVIRIS センサで 1998 年 10 月 8 日に撮影されたものです。このハイパースペクトル・センサは、可視光線から中間赤外線の領域の幅の狭い多数のスペクトル・バンドで画像を撮影します。右の画像のバンドの組み合わせでは、近赤外線から緑、青の波長領域のバンドを使用して、カラー赤外線画像を擬似的に作り出しています。赤い部分は植物のある部分であり、この場合は頂部が茂った作物のある畑を示します。



真中のレーダー画像のデータは、AVIRIS 画像の約 2 週間後の 1998 年 10 月 24 日に NASA の AIRSAR 画像撮影レーダー・システムによって撮影されたものです。この画像は波長 24cm のレーダーを使用して撮影され、地上レンジに変換されています。最も明るいレーダー戻り信号は、背の高い低木状の作物からのものです。中央の最も明るい畑はブロッコリー畑であり、下部中央にはブドウの木が垂直の棚に仕立てられたブドウ畑があります（AIRSAR データと AVIRIS データはどちらもジオリファレンス処理され、セル・サイズと地理的範囲が同じになるように再サンプリングされています）。



右の画像では、RGBI ラスタ表示処理を使用して、AVIRIS データと AIRSAR データが組み合わせられ、1 つの単一カラー画像になっています。この処理では、AVIRIS のカラー・バンドの組み合わせが色相・明度・彩度カラー空間に変換され、グレースケールの明度用に AIRSAR 画像を代用し、さらに変換して RGB カラー空間に戻して最終的な画像を作成しています（詳細は、『TNT 入門：色の調整』を参照してください）。作物の頂部（赤い色相）の程度と作物の構造状態（明度）により、組み合わせられた画像におけるそれぞれの畑の色に差ができます。



その他の参考資料

本書では、環境資源のリモートセンシングという、非常に奥が深く複雑な分野について概要を簡単に示しました。さらに深く研究してみたい方は、次に示す本をお奨めします。また、さまざまなオンライン形式の参考資料も利用できます。

入門用テキスト

Drury, S.A. (1993). *Image Interpretation in Geology* (2nd ed.) (地質学における画像の解釈 (第2版)). London: Chapman and Hall. 283p.

Lillesand, Thomas M. and Kiefer, Ralph W. (1994). *Remote Sensing and Image Interpretation* (3rd ed.) (リモートセンシングと画像の解釈 (第3版)). New York: John Wiley and Sons. 750p.

Sabins, Floyd F. (1997). *Remote Sensing: Principles and Interpretation* (3rd ed.) (リモートセンシング: 原理と解釈 (第3版)). New York: W.H. Freeman and Company. 494p.

上級者向けテキスト

Jensen, John R. (1996). *Introductory Digital Image Processing: a Remote Sensing Perspective* (2nd ed.) (デジタル画像処理入門: リモートセンシングの概要 (第2版)). Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall. 316p.

Rencz, Andrew N., ed (1999). *Remote Sensing for the Earth Sciences* (3rd ed.), Volume 3 (地球科学のためのリモートセンシング (第3版)、第3巻). New York: John Wiley and Sons. 707p.

Schowengerdt, Robert A. (1997). *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing* (2nd ed.) (リモートセンシング: 画像処理のモデルと方法 (第2版)). New York: Academic Press. 522p.

インターネット上の参考資料

The WWW Virtual Library: Remote Sensing (WWW 仮想ライブラリ: リモートセンシング)

<http://mango2.vtt.fi:84/tte/research/tte1/tte14/virtual/>

衛星データの入手先、雑誌やオンライン出版物、リモートセンシング関係の各種の団体や企業その他の組織へのさまざまなリンクが載っています。

Remote Sensing Tutorial created by the Goddard Space Flight Center (ゴダード宇宙飛行センターが作成したリモートセンシングに関するチュートリアル)

<http://rst.gsfc.nasa.gov>

熱赤外線画像やレーダー画像を含むリモートセンシングのあらゆる面をカバーしたアプリケーション指向のオンライン・チュートリアルです。多数のサンプル画像も載っています。

Remote Sensing Tutorials created by the Canada Centre for Remote Sensing (カナダ・リモートセンシング・センターが作成したリモートセンシングに関するチュートリアル)

http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/learn/learn_e.html

リモートセンシングの基礎、レーダーや立体視、デジタル画像解析に関するオンライン・チュートリアルです。

地理空間解析のための先進的ソフトウェア

マイクロイメージズ社は、地理空間データの視覚化、解析、出版用の高度な処理を行う、専門家向けソフトウェアを提供しています。製品に関する詳細は、マイクロイメージズ社にお問い合わせになるか、ウェブサイトへアクセスしてください。

- TNTmips** TNTmipsは、GIS、画像解析、CAD、TIN、デスクトップマッピング、地理空間データベース管理機能を完全に統合した専門家のためのシステムです。
- TNTedit** TNTeditは、ベクタ、画像、CAD、TIN、リレーショナルデータベース・オブジェクトなどさまざまな形式のプロジェクトデータを生成、ジオリファレンス処理、編集するための、専門家のための対話的ツールを提供します。
- TNTview** TNTviewには、TNTmipsと同じ強力な表示機能があり、TNTmipsのような技術的な処理や準備のための機能を必要としないユーザーに最適です。
- TNTatlas** TNTatlasを使用すると、自分で作成した空間プロジェクトデータをCD-ROMにプレスして、低コストで出版や配布ができます。TNTatlasのCDは、ポピュラーなすべてのコンピュータ・プラットフォームで使用できます。
- TNTserver** TNTserverを使用すると、インターネットやイントラネット上にTNTatlasを公開することができます。地理データ地図を見るにはウェブ・ブラウザやTNTclient Java アプレットを使用します。
- TNTlite** TNTlite は、学生や小規模プロジェクトを行う専門家向けの無料バージョンです。マイクロイメージズ社のウェブサイトからTNTliteをダウンロードできますし、CDを注文することもできます。

索引

吸収	5-9,13,26	バンド比率画像	20,21
大気		スペクトル反射率	9
大気による吸収	6,7,13	反射太陽放射	6,8,27
大気による散乱	6,7,22	反射	
航空写真	4,10,12,13	乱反射 散乱の項を参照	
大気ウィンドウ	7,26	鏡面反射	5
カラー表示	16,19,21	解像度（分解能）	
電磁スペクトル	4	放射測定分解能	16
放出	5,8,26,27	空間解像度	11,12
かすみ	7,22	スペクトル分解能	11,12
照明の影響	8,10,20,21	時間的分解能	11,24
解釈処理	5~8	粗さ（面の）	8,28,29
マルチスペクトル画像	12,13,19,23	散乱	5-9,22
マルチスペクトル・センサの表	14-15	影	6,20,22,28
スペクトルの正規化	25	空間的位置合わせ	25
正規差分指標	21	スペクトル分類	23,25
全色バンド	12	スペクトル・シグネチャ	9
バスラジアンズ	7,22	熱赤外線	5,8,13,16,26,27
量子化	16	地形による陰影	20,22
画像撮影用レーダー	4,8,28,29	視覚的な解析と解釈	16,17,18



MicroImages, Inc.

11th Floor – Sharp Tower
206 North 13th Street
Lincoln, Nebraska 68508-1347 USA

電話 : (402) 477-9554
email : info@microimages.com
FAX : (402) 477-9559
インターネット : www.microimages.com

[翻訳]



株式会社 オープン GIS

〒130-0001 東京都墨田区吾妻橋 1-19-14 紀伊国屋ビル 1F

Kinokuniya Bld. 1F, 1-19-14 Azumabashi, Sumida-ku, Tokyo 130-0001, JAPAN

TEL (03) 3623-2851 FAX (03) 3623-3025