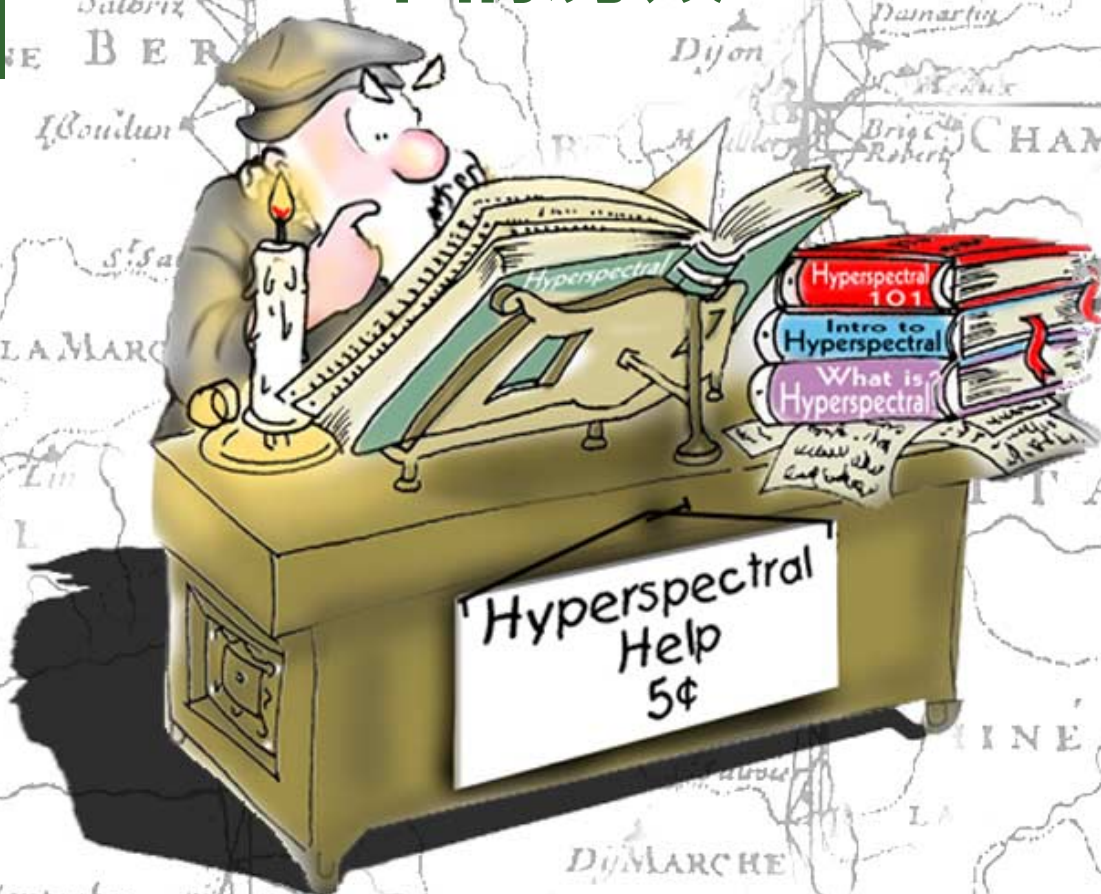


TNT 入門



ハイパースペクトル 画像分類



with

TNTmips®

TNTedit™ and TNTview®

はじめに

過去十年もの間、ハイパースペクトル画像処理は活発な研究開発の分野でした。また、ハイパースペクトル画像は研究者だけが利用できるものでした。最近、商業目的の航空機搭載ハイパースペクトル画像処理システムが出現し、人工衛星に搭載されたセンサーの打ち上げによって、ハイパースペクトル画像処理は遠隔探査の主流になりつつあります。ハイパースペクトル画像は資源管理、農業、鉱物探査、環境監視などの様々な分野に適用されています。しかし、ハイパースペクトル画像を効果的に利用するには、データの性質や限界、およびそれらの処理や解釈についての様々なアプローチの仕方を理解しておくことが必要です。この冊子はハイパースペクトル画像処理という分野の基本概念の手引きとなることを目的としています。

サンプルデータ この冊子の中の図には、ネバダ州のカブライトのハイパースペクトル・シーンを分析した結果を示しているものがあります。このシーンはNASA ジェット推進研究所によって運営されているAVIRIS (航空機搭載可視/赤外画像処理スペクトルメータ) を使用して得たものです。同じシーンがもう一方の冊子、『TNT入門：ハイパースペクトル画像の解析』の練習問題でも使用されています。マイクロイメージ社のウェブサイトからこのシーンがTNTmipsプロジェクト・ファイル・フォーマットで(関連するサンプル・データとともに)ダウンロードできますし、マイクロイメージ社に問い合わせいただければ、無料でCD-Rを入手することもできます。

その他の資料 この冊子は、ハイパースペクトル画像処理の一般的な入門書を目的としています。TNTmipsでは、ハイパースペクトル画像はHyperspectral Analysis (ハイパースペクトル解析) 処理 (TNTmipsのメインメニューよりProcess/Raster/Hyperspectral Analysisを選択してください。) により処理され、解析されます。この処理についての紹介は『TNT入門：ハイパースペクトル画像の解析』をご覧ください。また背景の情報を知りたい場合は『TNT入門：環境リモートセンシング入門 (RSE; Introduction to Remote Sensing of Environment)』をご覧ください。

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。この冊子ではどちらも“TNTmips”として扱っております。プロフェッショナル・バージョン(ハードウェアキーが必要となります)をご購入していませんでしたら、TNTmipsはTNTliteモードで動きます。この場合は、オブジェクトサイズが制限され、エクスポートができません。

Randall B. Smith 博士 2001年9月17日

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ウェブ・サイト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、このウェブ・サイトからは、『TNT入門』のその他のテーマに関する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>

ハイパースペクトル画像処理へようこそ

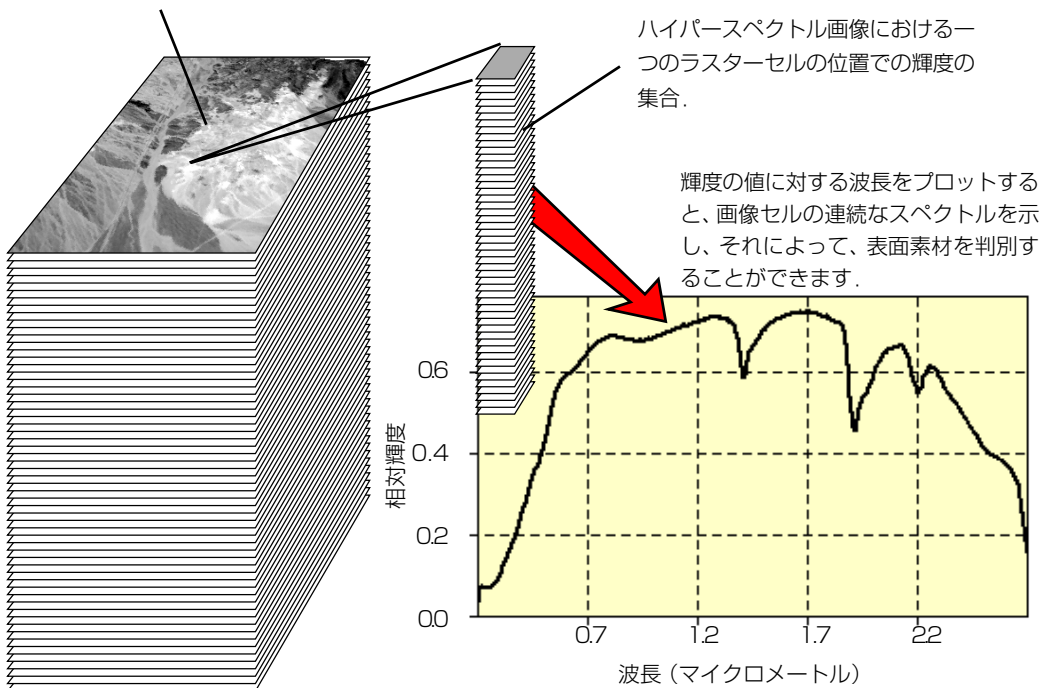
Landsat Thematic MapperやSPOT XSなどのマルチスペクトル遠隔センサーは、幾つかの比較的幅広い波長帯域で画像を撮影します。一方、ハイパースペクトル遠隔センサーは、それと同時に数十から数百もの幅が狭く隣接するスペクトル帯域で画像を収集します。これらの計測によって、下図のように各々の画像セルについての連続なスペクトルを得ることを可能にします。センサー、大気や地形の影響を除去した後、地表にある特定の植生なのか、あるいは鉱床を示唆する特徴的な鉱物なのかを判断するためにこれらの画像はフィールドあるいは実験室での反射スペクトルと比較されます。

ハイパースペクトル画像はさまざまなデータを含んでいますが、それらを解釈するには地表物質のどのような性質を計測しようとしているのか、そしてそれらが実際にハイパースペクトルセンサーによる計測にどう関係しているめかということを完全に把握することが要求されます。



ハイパースペクトルセンサーの技術的背景は4ページに示されています。5ページから10ページでは自然に存在する物質のスペクトル反射、 n 次元スペクトル空間内のベクトルとしてのスペクトル、そしてスペクトルの混合にこれらの概念が紹介されています。画像内で計測された放射の値に寄与する要素について11ページから13ページに示されています。そのあとに、放射から反射へ変換する方法を14ページから15ページに示します。ハイパースペクトル画像を分析する方法について、16ページから21ページに述べられています。そして、22ページから23ページには、参考文献が書かれています。

たくさんの細く隣接した波長帯域に同時に撮影した画像。



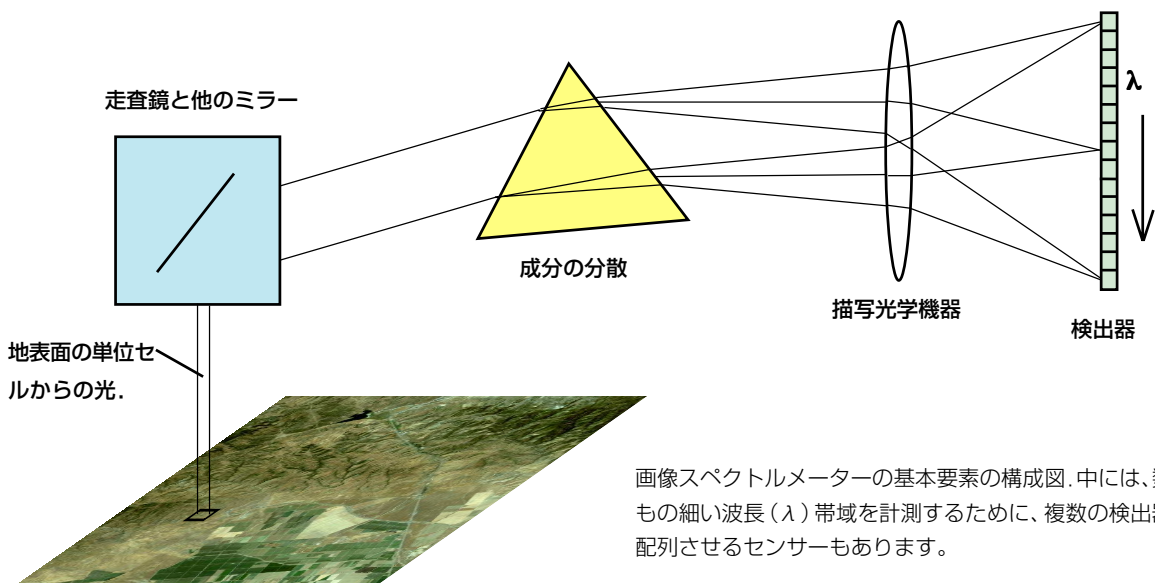
画像処理スペクトルメーター

ハイパースペクトル画像は、描写**スペクトルメーター**という機器を使って、データ収集されます。これらの複雑なセンサーの発展には、互いに関係するが異なる2つの技術が収束しています。それは、**分光学**と地球および惑星の表面の**遠隔画像処理**です。

分光学とは、物質が放電したり、反射された光や波長の違いによるエネルギーを研究する学問です。光学的リモート・センシングの分野に適用し、分光学では地球の表面の物質によって散漫に反射（散乱）される太陽光のスペクトルを扱います。スペクトルメーター（あるいはスペクトルラジオメーター）と呼ばれる機器は、地面における、あるいは、実験室での試料から反射された光の測定に使われます。スペクトル

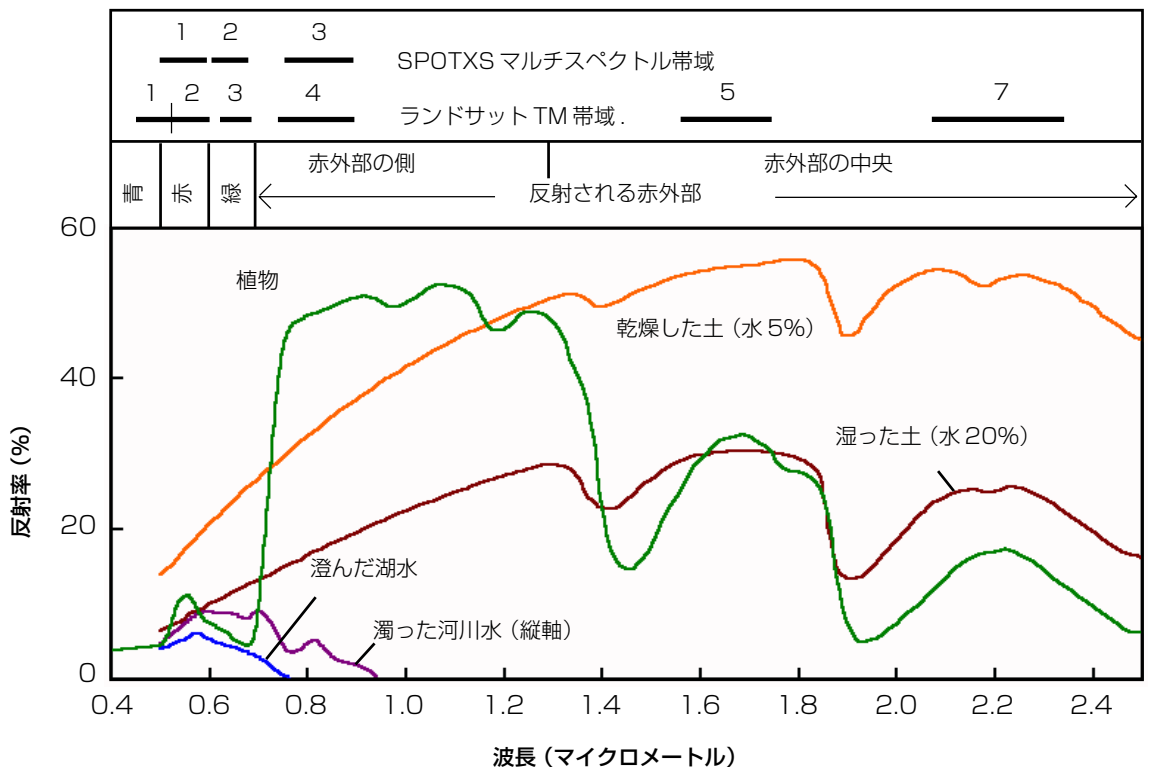
メーターに内在する格子やプリズムのような光学分散要素は、この光をたくさんの細く隣接する波長帯域に分け、各帯域のエネルギーは別々の検出器により測定されます。数百あるいは数千ほどの検出器を使う事により、スペクトルメーターで0.01マイクロメートルという細さの帯域まで、スペクトルで計測することができます。通常は、最低でも0.4から2.4マイクロメートル（可視光線から赤外線の波長領域）といったところです。

遠隔描写装置は、地球表面上の多くの隣接するエリアで反射される光に焦点をあて、計測するように設計されています。多くのデジタル描写装置では、規則的な幾何パターンにそってセンサープラットフォームが動くとともに、小区間での連続的な測定をし、画像として組み立てる処理を行います。現在、検出器の設計の制限やデータ記憶装置および通信、画像処理の要求により、描画装置は1つあるいは少数の比較的広い波長帯域に規制されています。これらの分野は最近の発展により地面におけるスペクトルメーターに匹敵するほどのスペクトル範囲と解像度を持つ描写装置を設計することができました。



スペクトルの反射率

反射光の分光光学で、我々が獲得したい基本的な性質は**スペクトルの反射率**、すなわち、波長の関数とした入射エネルギーと入射エネルギーの比です。ある波長におけるエネルギーはそれぞれ異なる割合で散乱、あるいは吸収されるので、ほとんどの物質の反射率は、波長によってさまざまである。異なる物質のスペクトル反射率曲線（縦軸：反射率、横軸：波長）を比較すると、反射率が一樣でないことは下図に示すように明らかである。スペクトル曲線が下方へ明らかに屈折しているのは、物質が入射エネルギーを選択的に吸収するような波長領域を示します。これらの特徴は、一般に**吸収領域**（それとは別のマルチスペクトルあるいはハイパースペクトル画像の**画像帯域**と混同しないように）と呼ばれています。スペクトル曲線および吸収帯域の位置と強度といったグラフ全体の形によって、多くの場合、異なる物質と判定し、識別するのに利用できます。例えば、植物は赤外部の側の領域でより高い反射率を示し、赤光では土壌より低い反射率を示します。



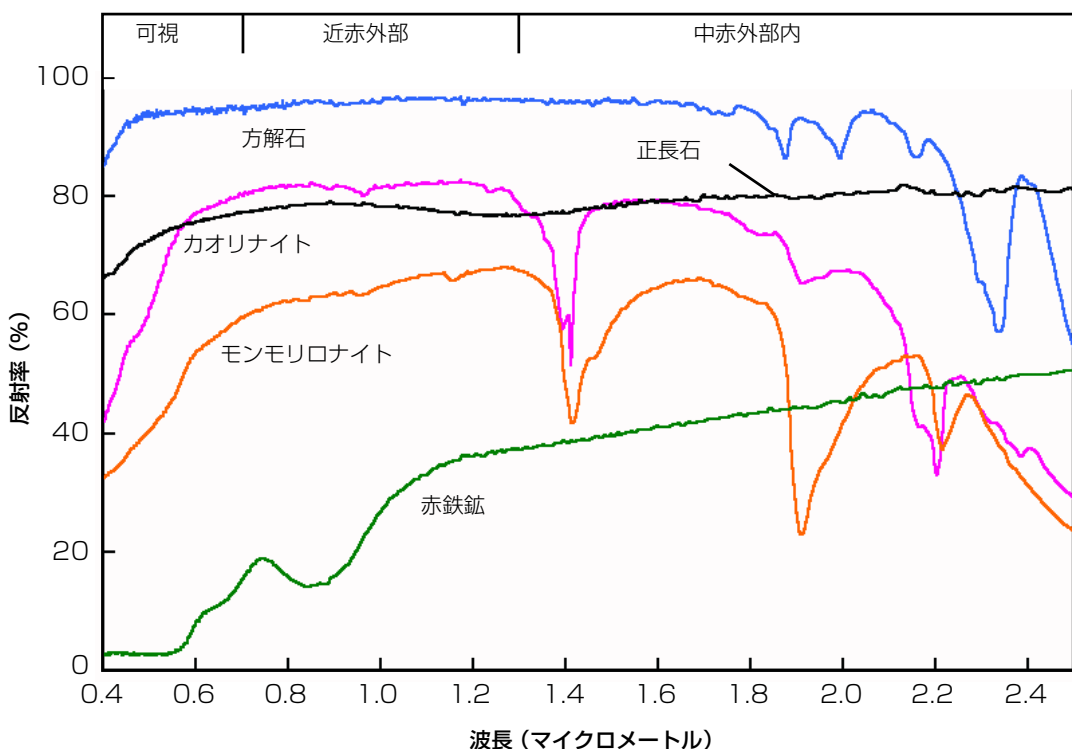
地球表面にあるいくつかの一般的な物質の可視光線から赤外部までのスペクトル反射率曲線。いくつかのマルチスペクトル衛星リモート・センサーに使われたスペクトル帯域を比較のため上部に示します。反射率は0から1.0までとる単位のない量あるいはこのグラフのように百分率で表します。試料のスペクトル計測をフィールドあるいは実験室で行う場合、入射エネルギーの値もその物質の反射率を計算するのに必要です。これらの値は、直接的に、または、スペクトル反射率が既知の標準試料から（試料と同じ照射条件において）反射される光の計測によって計測されます。

鉱物スペクトル

鉱物のような無機物では、化学組成や結晶構造がスペクトル曲線の形や明瞭な吸収帯域の存在と位置を決めます。ある特定の波長が吸収されるのは、特定の化学元素およびイオンの存在、イオン化した元素、結晶構造によって一部支配される元素同士の化学的な結合が存在することによる。

これらの影響の例を示すためにいくつかの一般的な鉱物のスペクトルを下図に示しています。

赤鉄鉱（酸化鉄の鉱物のひとつ）のスペクトルでは、可視光領域での強い吸収は鉄イオン (Fe^{3+}) によって起こります。石灰石の主要成分である方解石では、1.8から2.4 μm （マイクロメートル）の間にある吸収帯域の連なりは、炭酸イオン (CO_3^{2-}) が原因である。カオリナイトとモンモリロナイトは共に土壤に含まれる粘土鉱物として一般的です。両スペクトルともに1.4 μm 付近に強い吸収帯域があり、それに続きカオリナイトの方は、水酸化物イオン ($\text{OH} \cdot 1$) によって1.9 μm の弱い帯域が、モンモリロナイトの方は、含水粘土 (?) の中の間隙水の分子による1.9 μm の強い帯域があります。これらの例とは対照的に、みかげ石内の主鉱物である正長石は、可視部から中赤外部内のスペクトル領域に著しい吸収の特徴は見られません。

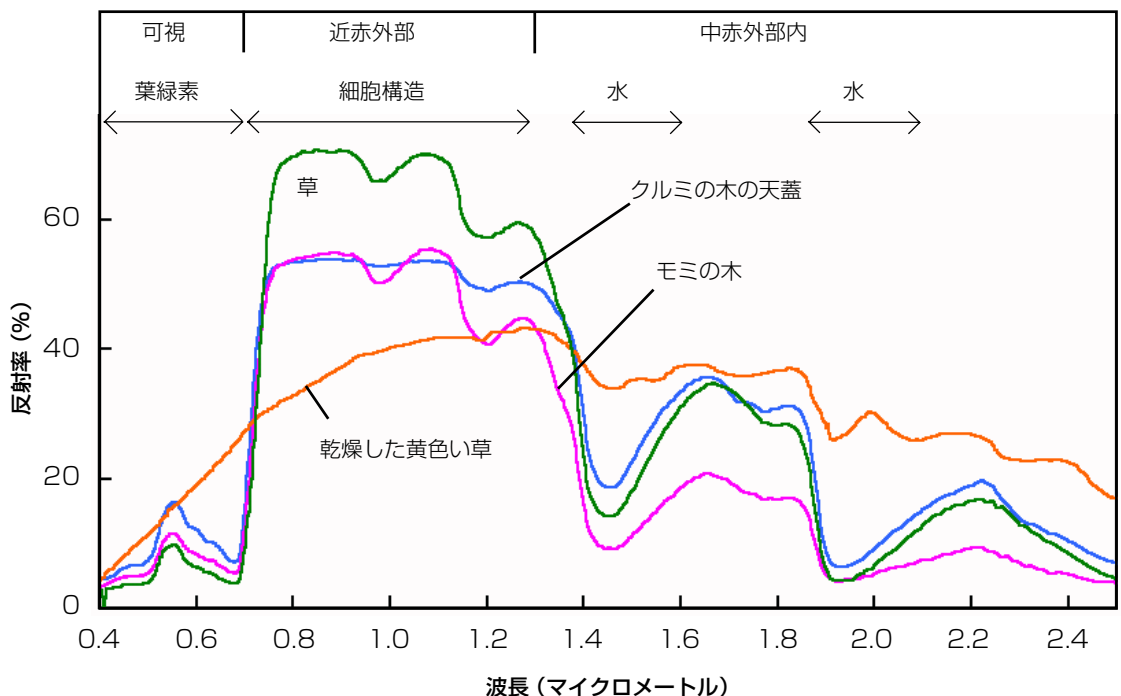


いくつかの代表的な鉱物の反射スペクトル（岩石や土壌の主成分である天然化学化合物）。

植物スペクトル

映えた緑色植物のスペクトル反射率曲線も、植物の様々な性質によって区別できるような特徴的な形をしています。スペクトルの可視部では、曲線の形は葉緑素や他の葉の色素による吸収効果に支配されています。葉緑素は可視光を非常に強く吸収しますが、緑の光よりも青や赤い波長を強く吸収し、緑の波長領域に特徴のある反射率のピークを作ります。その結果、映えた植物は緑色をしているようにみえるのです。反射率は、赤色から近赤外部の波長（時に**赤の端**とされることがある）の境界にかけてほとんどの植物が40%から50%付近まで急激に上昇します。近赤外部の側の高い反射率は、主に葉の内部の細胞構造との相互作用によるものです。余剰のエネルギーのほとんどは、天蓋の中の下部の葉に送られ、互いに作用するのです。葉の構造は植物の種によって大きく異なり、また、植物のストレスの結果として変化することもあります。従って、種の型および植物のストレス、天蓋の状態、すべてが近赤外部の反射率の測定に影響を及ぼします。波長が1.3 μm を越えると、1.4と1.9 μm 付近の2つの明白な水分吸収帯域を除いて、波長が大きくなるにつれて反射率が減少します。

成長期の終わりに、葉は水分と葉緑素を失います。近赤外部の反射率は減少し、赤の反射率は増加します。そして、おなじみの秋の黄色や茶色や赤の葉の色が作られます。

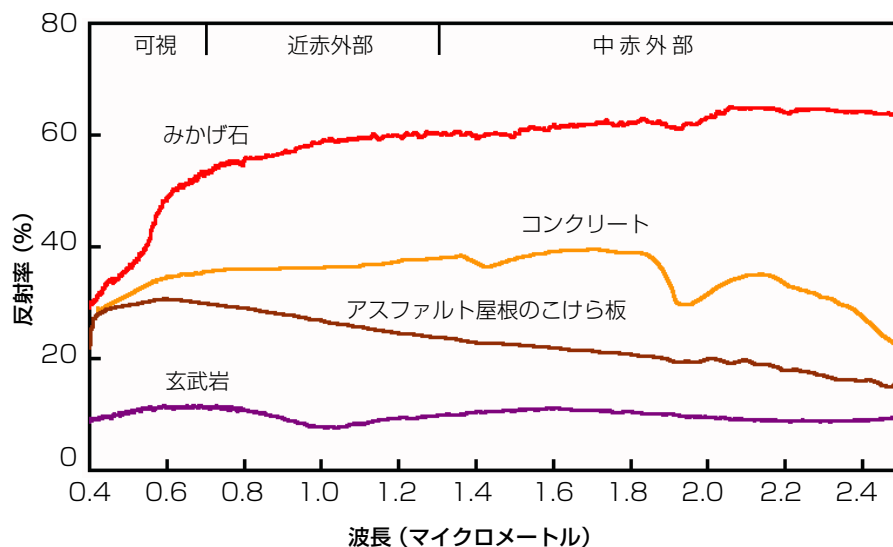


異なった型の緑色植物の反射率スペクトルと、老衰した（乾燥した黄色い）葉のスペクトル曲線の比較。緑色植物のスペクトル曲線の異なる部分があるのは、一番上に示すように植物の構成要素が異なるためである。

スペクトルのライブラリ

天然の、あるいは人工の物質の反射率スペクトルのいくつかのライブラリは、公開されています。これらのライブラリはハイパースペクトルおよびマルチスペクトル画像の解釈を手助けとなり得る参照スペクトルのソースを供給しています。

ASTER スペクトルライブラリ このライブラリは宇宙空間を運ばれる進歩的な熱放射と反射放射計 (ASTER; Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) という画像処理支援プログラムの一部を NASA が利用できるようにしたものです。NASA のジェット推進研究所 (Jet Propulsion Laboratory)、ジョン・ホプキンス大学、そして米国地質学調査 (Reston) によるスペクトルの編集も含まれます。現在、ASTER スペクトルライブラリにはおよそ鉱物そして岩石、土壌、人工合成物質、水、雪を含む 2000 種のスペクトルがあります。スペクトルの多くは、0.4 から 14 μm の全波長領域に対応しております。そのライブラリは URL: <<http://asterwebjpl.nasa.gov/>>、を通じてアクセスできます。カテゴリーでスペクトルを検索することができ、検索したスペクトルはどれでもそのグラフを見ることができ、さらにテキストファイルとして個々のスペクトルのデータをダウンロードすることもできます。これらのスペクトルは TNTmips のスペクトルライブラリにインポートすることもできます。上に示すウェブアドレスから、ASTER スペクトルライブラリの CD-ROM を無償で注文することもできます。



ASTER スペクトルライブラリからのサンプルスペクトル。ASTER は、計画中の人工衛星 EOS AM-1 のライブラリの一つになり、NASA の地球科学事業計画の一環として、可視部から熱赤外部の波長領域の 14 チャンネルで画像データを記録します。

USGS スペクトルライブラリ コロラド州、デンバー米国地質学調査分光学研究所は、鉱物および一部の植物約 500 種の反射率スペクトルのライブラリを、波長領域を 0.2 から 3.0 μm として編集しました。このライブラリにオンライン・アクセスできます。

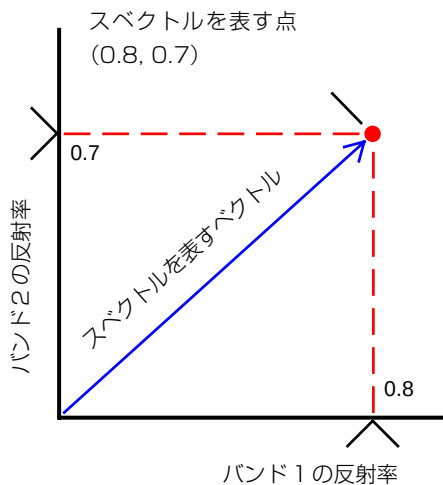
URL: <<http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib04/spectral-lib04.html>>

オンラインで、個々のスペクトルについて見たり、ライブラリを丸ごとダウンロードしたりできます。USGS スペクトル・ライブラリは、標準参考ライブラリとして TNTmips のハイパースペクトル分析過程にも含まれています。

スペクトル空間におけるスペクトルのプロット

前出ページのスペクトルのプロットは、異なった物質間のスペクトル特性の違い、特に、ほんのわずかのスペクトルだけを比較するときの違いを視覚化するために便利な方法を提供しています。スペクトルのプロットはハイパースペクトル画像を調べるのに使う重要な道具です。しかし、コンピュータが多くのスペクトルの中でどのように比較し識別するかを理解する場合には、スペクトルを表すほかの概念上の方法を考えてみると便利です。

反射率スペクトルは一組の反射率の値で構成されます。それぞれのスペクトルチャンネル(バンド)につき一つの値が割り当てられます。これらのチャンネルそれぞれが、スペクトルチャンネル(バンド)の数を n



仮想的2バンド ($n=2$) のスペクトル反射率の N 次元プロット。

としたときに、仮想的な n 次元スペクトル空間上の次元の一つとして考えられます。それぞれの座標軸上にそれぞれのスペクトルチャンネルに対して計測された反射率の値をプロットすれば、これらの座標を使ってスペクトル空間内に、特定のスペクトルを数学的に代表する点の位置を指定することができます。2バンドの簡単な例を図に示します。また、示された点は座標系の原点が始点のベクトルの終点として数学的に捉えることもできます。同じ形ではあるが全般的な反射率(アルベド)が異なるスペクトルは、向きが同じで始点から終点までの距離が異なるベクトルとしてプロットされます。短いスペクトルのベクトルは暗いスペクトルを表し、長いスペクトルのベクトルは明るいスペクトルを表します。

3つ以上の波長帯域を持つ一つの画像に対して、そのようなプロットを視覚化することは難しいかもしれませんが、非常に多くの互いに垂直に交わる座標軸によって定義される高次元スペクトル空間を構成することは数学的には可能です。考えられたそれぞれのスペクトルは、この n 次元スペクトル空間内に位置します。スペクトル間の類似性は、これらの位置の相対的な近さ(スペクトル距離)か、スペクトルベクトル間の角度の大きさによって判断できます。

前出の様々な物質のスペクトル反射率曲線は、 $\bar{\mu}$ 平均値 $\bar{\mu}$ か $\bar{\mu}$ 典型例 $\bar{\mu}$ を表しています。全ての天然素材は、これらの反射率スペクトルの可変性を生じさせる構成と構造に関して可変性を示します。1つの物質に関する多くの例からスペクトルを得れば、結果のスペクトルの点は、ある一箇所の位置にプロットされるというよりもむしろ、 n 次元スペクトル空間の小さな塊として定義されるでしょう。

空間解像度と混合スペクトル

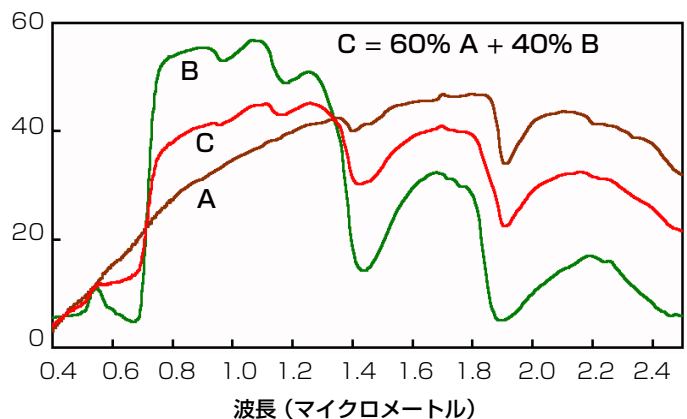
画像スペクトルメータは、地表面における多くの小さなパッチのスペクトルを計測します。それらはハイパースペクトル画像内で1つのピクセル（ラスタ・セル）として表されます。1つのスペクトル計測値のセットによってあらわされる地表エリアの大きさは、画像の空間解像度を定義し、それはセンサデザインと表面上におけるセンサの高度によって左右されます。例えば、AVIRIS（航空機搭載可視/赤外画像処理スペクトルメータ）はその典型的な高度、20kmを飛行の際に20mの空間解像度を持っていますが、高度4kmの場合は、解像度は4mになります。

地表解像度セル・サイズが大きいとき、一つ以上の物質がセンサによって計測される個々のスペクトルに影響する可能性が大きくなります。結果として生じたものは**複合**あるいは**混合**スペクトルで、混合に影響するモピュアモスペクトルを**エンドメンバー**スペクトルと呼びます。

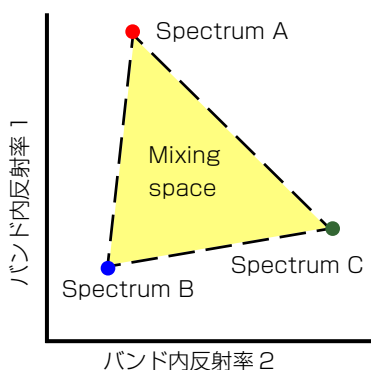
スペクトル混合は巨視的である場合と、密接な場合とがあります。巨視的な混合の場合、それぞれの反射された光子は1つの表面物質のみと相互作用します。物質に反射したエネルギーは、ピクセル内の面積が複合スペクトルに対する

物質の影響度に正比例するように加算されていきます。そのような線形な混合の一例が上に示されており、植生と土から成るピクセルを表しています。スペクトル空間では個々のエンドメンバースペクトルは、混合線の終わりの部分（2つのエンドメンバーの場合）もしくは混合空間の角（3つ以上のエンドメンバーの場合）を定義します。後でエンドメンバー部分がどのようにして計算されるかを説明します。密接な場合、

土壌中の鉱物粒子の微視的な混合のように、単体の光子は複数の物質と相互作用します。このような混合物は性質が非線型のため解明するのが困難です。



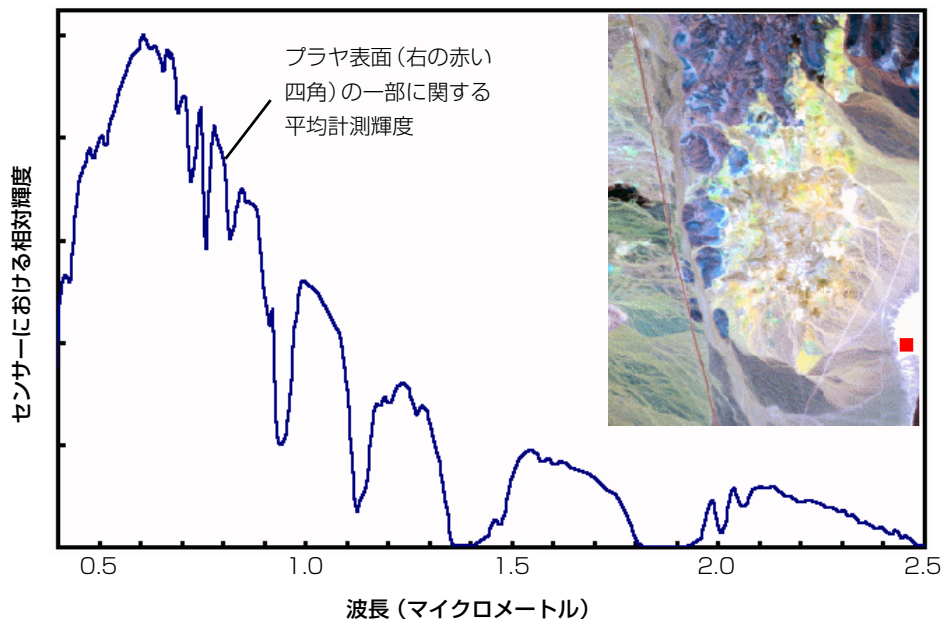
二つのスペクトルの線形混合からなる混合スペクトルの例: A (乾燥した土) と B (緑の草原)



仮想的2バンドの場合の3エンドメンバースペクトルのn次元プロット。A,B,Cのみの混合から成る全てのスペクトルは混合空間内になくてもなりません。

放射輝度と反射率

前ページの説明から、スペクトル反射率が航空機搭載または衛星搭載ハイパースペクトルセンサを用いて厳密に又正確に計測したい地物の特性であることは明らかなはずです。しかし、以下に示される輝度のスペクトルに注目してください。これはネバダ州カプライトのシーンにおいて、明るい枯渇した湖底の表面を AVIRIS によって計測した 25 画像スペクトルの平均を表しています。入力スペクトルはセンサ効果に対してオンボード校正データを用いて調整されていますが、他の変換は行われていません。



このスペクトルには以前に示された反射率スペクトルの図とあまり類似性が見られません。これはセンサが単に各波長バンドに関してセンサに到達した光量を計測しただけだからです(スペクトル放射率)。これは高度 20km の場合です。地表面物質のスペクトル反射率はこれらの計測値に影響する要素の 1 つに過ぎません。サンプルエリアのスペクトル反射率曲線は、実際には比較的平らで特徴がありません。

表面反射率に加え、リモートセンサによって計測されたスペクトル放射輝度は入射太陽エネルギーのスペクトルと、大気中をこのエネルギーが上向きまたは下向きに通過する際の相互作用、地上でのそれぞれのエリアの放射形状、センサ・システムの性格によって左右されます。これらの追加要素は地物のスペクトル反射率を正確に取得するのに影響を与えるだけではなく、個々の画像セル間における比較を妨げる、付加的なシーン内可変性を生みます。これら要因に関しては次の 2 ページにわたってより詳しく説明しています。

照度要因

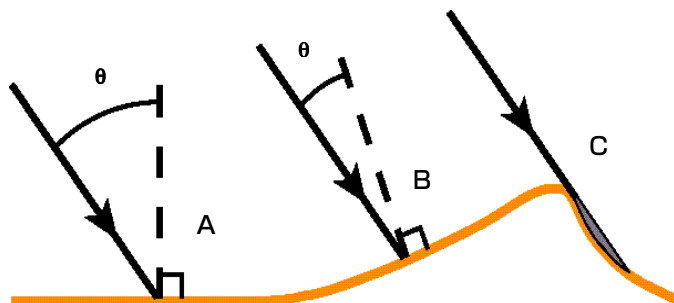
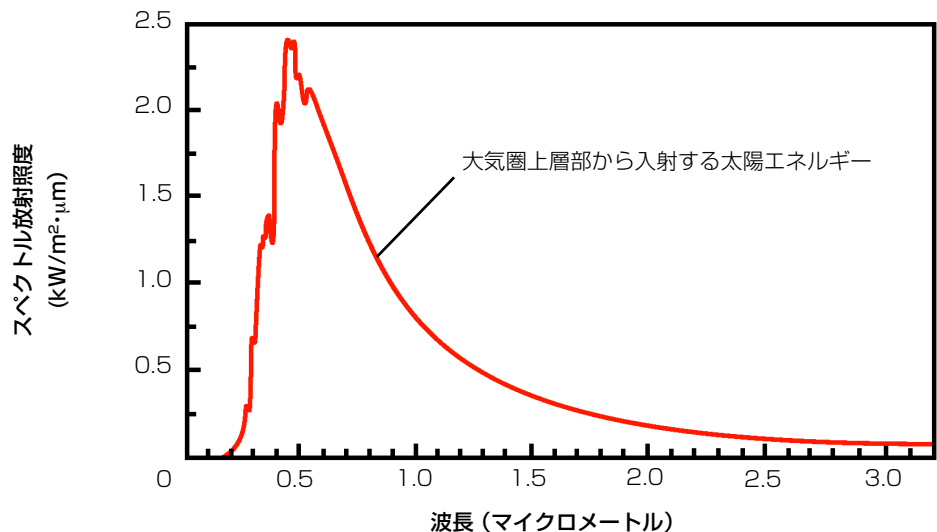
照度源 下の図は地球の大気圏上層部における典型的な太陽光放射照度曲線です。

入射太陽エネルギーは波長によって大きく変化し、可視波長域で最大になります。画像の放射輝度値を反射率に変換するために、画像が得られた時に入射した太陽エネルギースペクトルを知る必要があります。仮定したり、他の値から間接的に導いたりして把握しなければなりません。

照度幾何学 地上

エリアによって反射されたエネルギーの量は、太陽エネルギーがどれだけそのエリアを照らしているかによって決まります。またそれは、**入射角**によって定まります：地表面に直行する線とエネルギー入射方向とがなす角。明確に

は、それぞれの波長において受け止められたエネルギー (E_g) は入射角の Cosine によって変化します。: E_o が入射エネルギー量るとき、 $E_g = E_o \cdot \cos \theta$ 。すなわち、いかなる地表面によって受け止められたエネルギーも季節や1日の時間経過に伴う太陽の高さによって、変化します。もし地形が平らでなければ、受け止められるエネルギーは地面の勾配や方向の違いによって画像間で即座に変化します。

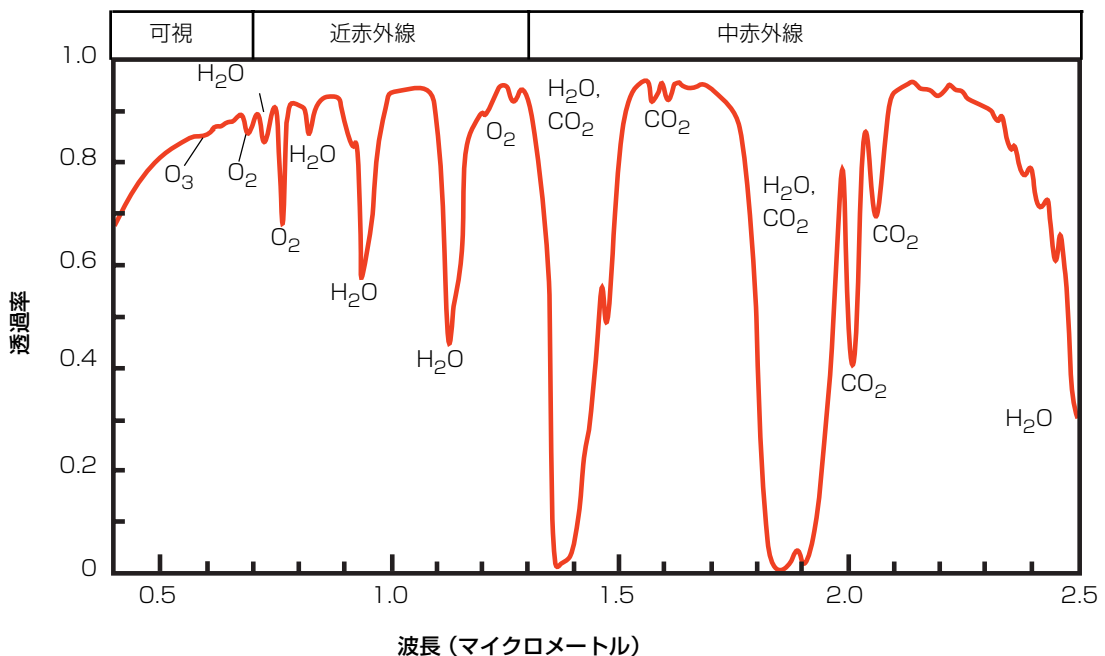


照度の差は A、B と影 (C) のように異なる入射角 (θ) によって生じます。

影 1つのエリアで受け止められる照明量は影によっても減少します。地形な特徴や雲によって生じた影は隣接する画像セルを含むエリアに影響を及ぼします。木々、作物の列、露出した岩盤やその他の小さな物体も個々の画像セルを制限する影を生じさせます。これらは両方とも影響されるピクセルに関する全波長の計測輝度を小さくする効果を持っています。

大気効果とセンサ効果

大気効果 比較的クリアな大気でさえ、入反射太陽エネルギーと互いに影響し合います。特定の波長に対してこのような影響は地面に到達する入射エネルギー量を低減させ、更に航空機や人工衛星に搭載したセンサに到達する反射エネルギー量も低減させます。大気の透過率は特定の気体による吸収や気体分子や微粒子による散乱によって低減されます。これらの効果を合成すると以下に示される透過率曲線が作られます。1.4と1.9 μm 付近の著しい吸収特性は水蒸気と二酸化炭素によるもので、入反射エネルギーのほとんど全てを低減させてしまいます。従って、この波長域付近の画像バンドからは役立つ情報はほとんど得られません。大気によって上方に散乱された光の効果はこの曲線には示されていません。この散乱された光は可視光と近赤外線波長域のセンサで測定される放射輝度に付加されています。これを光路輝度 (path radiance) と呼びます。一つのシーン内エリア間においても、大気条件が空間的に変化している場合や、地表面に大気を通る放射の光路長が変化する程の著しい高度差がある場合は、大気効果が異なることがあります。



典型的な大気条件における大気透過率と波長の関係。透過率は地表面に到達する入射太陽エネルギーの割合。表示されている気体による吸収は著しい曲線の降下を起こしています。一方、散乱は近赤外線から中赤外線の波長域において透過率をなだらかに降下させています。

センサ効果 センサはそれぞれの波長域で計測された放射輝度を“コード化された”放射輝度値を示す電子信号に転換します。この電子信号は不連続の整数値にスケール化され、量子化されています。整列した検知器間での変動と検知器での一時的変動は、元の計測値をスケール化し、オフセットして比較できる値にすることを必要とします。

反射率変換 I

スペクトルを参照反射スペクトルと直接比較するためには、画像内のコード化された放射輝度値を反射率に転換する必要があります。包括的な変換を行うには太陽源スペクトル、太陽角と地形による光効果、大気伝達とセンサ・ゲインが必要です。数学的には地表面反射スペクトルとこれらの効果を掛ける（波長毎波長基礎とする）ことにより観測放射輝度スペクトルが作り出されます。他に2つの効果が加算されるかたちで放射輝度スペクトルに影響します：センサ・オフセット（内部計器ノイズ）と大気の散乱による光路輝度。一般的に用いられるいくつかの反射率変換法は以下と後のページで説明しています。画像から得られる情報のみを用いる方法もありますし、表面反射特性と画像が撮影された時間の気象条件という変化する情報を必要とする方法もあります。

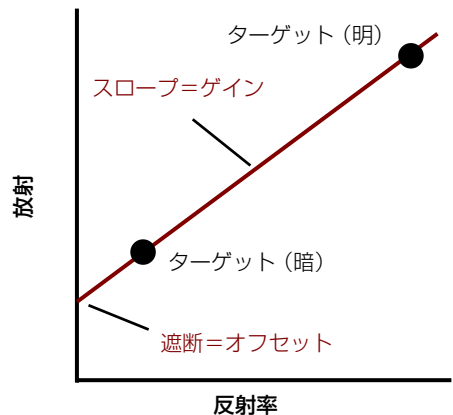
フラット・フィールド変換 この画像を基本とする方法は、画像が比較的平らなスペクトル反射曲線を持つ均一的なエリアを含んでいることが必要です。このようなエリアの平均スペクトルは太陽放射照度、大気の散乱と吸収の合成効果によって決定されていると考えられます。シーンは個々の画像スペクトルを均一エリアの平均スペクトルで割ることによって“相対”反射率に変換されます。選択された均一エリアは変換における画像ノイズ効果を低減させるために明るくなければなりません。自然地形における大半の物質は完全に平らな反射スペクトルを持たないため、多くの場合これに適した均一エリアを見つけるのは困難です。砂漠、水がなくなり塩で覆われた湖床などは比較的平らなスペクトルを持ち、都会では人工的に造成されたコンクリートなどがあります。均一エリアのスペクトル内の著しいスペクトル吸収特性はすべて、算出された相対反射スペクトル内に偽の特性を生み出します。シーン内に著しい高度変化がある場合は、変換されたスペクトルは地形影と大気光路差の残差効果にも組み入れられます。

平均相対反射率変換 この方法は平均スペクトルで割ることによって画像スペクトルを正規化しますが平均スペクトルを画像全体から算出します。平均スペクトルを算出する前に個々の画像スペクトルの放射輝度値はそれらの和が画像全体において一定になるようスケール化されます。この調整は地形影や他の輝度変化の大部分を除去します。この方法はスペクトル反射特性の空間内変化が打ち消し合うほど充分に不均一であると仮定しています。そのため、上述したフラット・フィールド・スペクトルと似た平均スペクトルが得られます。この仮定は全てのシーンで正しいわけではなく、正しくない場合は偽のスペクトル特性を含む相対反射スペクトルを作り出してしまいます。

反射率変換 II

前のページで説明した画像を基にした変換法は画像スペクトルに乗法的な影響を与えます。この方法を用いた大半の研究は大気光路輝度の加算効果が最小となる短波赤外線スペクトル ($2.0 \sim 2.5 \mu\text{m}$) を利用した鉱物地図作成に重点を置いています。しかし、解析されるスペクトルが可視光線と赤外線付近を含んでいる場合は、光路輝度効果を見捨てることはできません。シーンに暗い物質や深い地形影が含まれている場合は、各バンド内の最小輝度値 (または影領域の平均値) を求め、その値をバンド内の各ピクセルから引くことによっておおよその補正を行うことができます。

実験線による方法 ハイパースペクトル画像を利用しているフィールド研究者は普通、画像エリア内の現場で観測した反射率の値を用いて画像データを反射率に変換しています。フィールド反射率スペクトルは二つ以上の均一な地上ターゲットエリアから得なければなりません。ターゲットエリアは大きく異なる輝度を持ち、画像内で認識できるだけの大きさがなければなりません。ターゲットエリアの画像放射輝度と地上反射率の値を用いて、個々の画像バンドにおける放射輝度と反射率を関連付ける一次方程式を得ることが出来ます。放射輝度と反射率のプロットで、計算された直線の傾きは積化放射輝度率(ゲイン)の合成効果をあらわす値を示し、放射輝度軸との交点は加算要素(オフセット)を表します。そして、これらの値は各画像バンドを見せかけの反射率に変換するのに用いられます。変換は起こりうるシーン内の地形効果(影とい大気光路長の差)を考慮していないため、最終的な値は“見せかけ”反射率として考えられます。



既知のターゲット反射率を用いた単独画像バンドの反射率変換パラメータ

モデルによる方法 放射伝達コンピュータモデルは太陽放射照度スペクトルのシミュレートから始め、太陽高度 (シーンの日時から導かれる) や大気の散乱と吸収によるシーン放射輝度効果を算出します。実際の大気条件観測値が得られない場合、ユーザーは散乱を引き起こす物質の量や分布等のいくつかの入力パラメータを仮定しなければなりません。よく混ざった気体 (CO_2 と O_2) による吸収はシーン内において均一であると仮定されますが、水蒸気による吸収は通常、変化するものとしてと仮定されます。水蒸気による吸収効果は水吸収バンドを含むスペクトル部分を活用し、それぞれの画像ピクセルにおいて個別に推測され補正されます。しかし、最終的な見せかけの反射率の値には地形影効果も組み入れられます。

画像解析方法

以下の表は現在研究や商業用に使われているいくつかのイメージングスペクトロメータを並べたものです。これらのセンサによって作り出されたハイパースペクトル画像は解析者に課題を与えます。それらは表面物質のスペクトル特性を特徴付けるのに必要である高いスペクトル解像度をあたえますが、1シーンのデータ量は莫大であることがあります。隣接した二つの波長バンド間のスペクトル情報における違いは、普通は非常に小さく、よってそれらのグレースケール画像はほぼ同じに見えます。そのため、シーン内のデータの大部分が余分なものに思えますが、埋め込まれていることによって実際に表面物質を見分ける際に不可欠な情報となります。ハイパースペクトルシーンの基本的な情報を可視化して解析するための適切な道具とアプローチを見つけることは、活発な研究分野となっています。

ハイパースペクトル画像解析を行うためのアプローチの大半が、個々のバンド又はバンドグループ内における空間的な変動ではなく、個々の画像セルのスペクトル情報に集中しています。マルチスペクトル画像に良く使われる統計的分類法(クラスター分析)もハイパースペクトル画像に活用できますが、それらの高い次元(Landgrebe,印刷中)に対応できるように適応させなければなりません。より複雑な方法は、スペクトル解析と空間解析を組み合わせています。後のページではよく知られたハイパースペクトル画像のスペクトル成分解析法のいくつかを詳しく説明します。

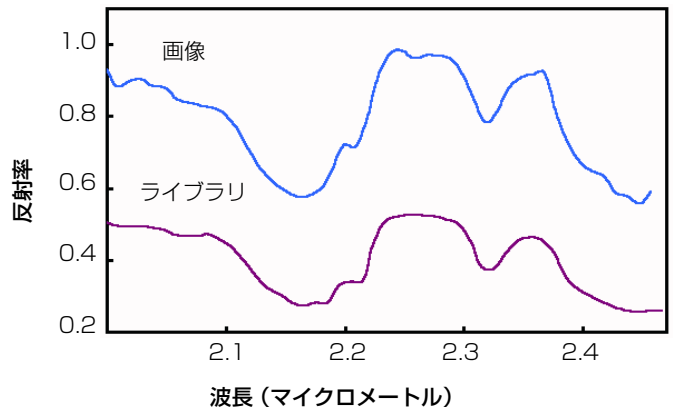
研究用と商業用イメージングスペクトロメータの例

センサー	開発元	国	バンド番号	波長範囲 (μm)
AVIRIS	NASA	米国	224	0.4-2.5
AISA	(有) Spectral Imaging	フィンランド	286	0.45-0.9
CASI	Itres Research	カナダ	288	0.43-0.87
DAIS2115	(株) CER	米国	211	0.4-12.0
HYMAP	(株) Integrated Spectronics Pty	オーストラリア	128	0.4-2.45
PROBE-1	(有) Earth Search Sciences	米国	128	0.4-2.45

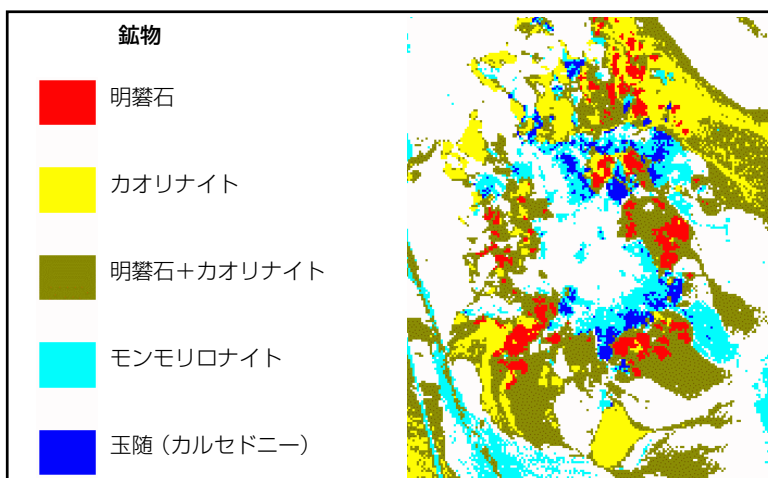
個別画像スペクトルのマッチング

ハイパースペクトル画像を解析する一つのアプローチとして、個別の画像スペクトルとスペクトルライブラリ内のある一つの参照反射スペクトルとをそれぞれマッチングさせる方法があります。このアプローチには画像スペクトルから反射率への正確な変換が必要です。シーンが広範囲にわたる基本的には一つの純粋な物質からなるエリアを含んでおり、なおかつその物質に対応する反射スペクトルが参照ライブラリに存在する場合、最良の結果をもたらします。観測されたスペクトルは、普通、多くの類似した参照スペクトルと様々な度合いでマッチングしています。マッチングした参照スペクトルはどれだけ上手く適合しているかといった規準を用いて、ランク付けされなければなりません。ここで、最も良く適合しているものが“winner”として選定されます。

ハイパースペクトルシーンのほとんどが異なる物質の空間的に混合している多くの画像ピクセル (10 ページ参照) を含んでいるためにスペクトルマッチングは複雑になります。出来上がった合成画像スペクトルはあらゆる度合いで多種の“ピュア”参照スペクトルとマッチングします。そして、それは実際には存在しない物質のスペクトルを含んでいる可能性もあります。もし最も良くマッチングした参照スペクトルが画像スペクトルに充分適合していれば、この物質がおそらく混合物を支配していると考えられ、ピクセルもこの物質に定められます。もし参照スペクトルが十分なマッチングを得られなければ、優勢物質がないと考えられ、ピクセルは指定されないままにしておかなければなりません。結果は、以下に示されるような大半の画像セルに対する優勢物質を表現する画像の“物質地図”です。マッチングを向上させるために、サンプル混合スペクトルをライブラリ内に含むことも可能ですが、一般的には参照ライブラリ内に全ての可能性のある (全ての混合物配分) 混合物を含むことはできません。



サンプル画像スペクトルとマッチングしたUSGSスペクトルライブラリ内の鉱物アルナイト (フィット度=0.91)

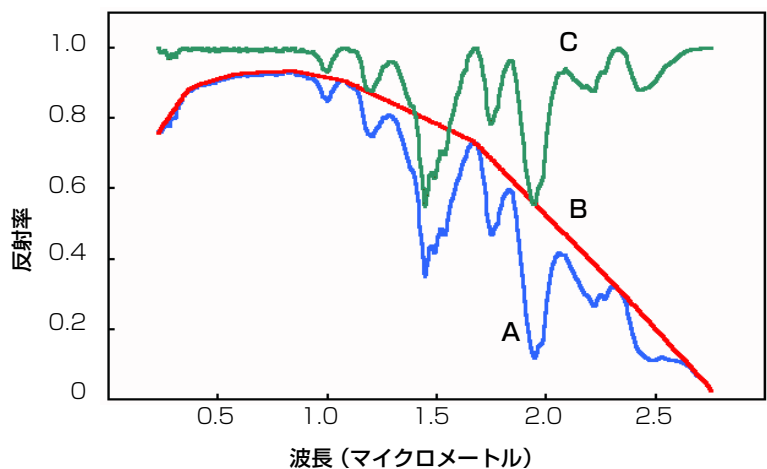


USGS スペクトルライブラリで画像スペクトルを鉱物スペクトルにマッチングすることによって作られた、カプライト AVIRIS シーンの部分鉱物地図。白い地域は選択された参照スペクトルとの十分なマッチングが得られなかった部分であり、左には割り当てられていません。

スペクトルマッチングの方法

反射スペクトルの形状は通常二つの成分に分離することが可能です: 幅広く、スペクトルの一般形状を定義付けるなだらかな変化領域と狭く、谷の様な吸収特性領域。この区別は、画像スペクトルを参照スペクトルにマッチングさせる二つの異なったアプローチにつながります。

鉱物のような大半の純粋物質は、位置、強度(深さ)、吸収特性の形状などによって認識されます。一つの一般的なマッチング法では、個々の参照スペクトルの候補の中で吸収特性のみを用いてマッチングを行い、他のスペクトル部分は無視します。したがって、波長域のユニークなセットがその吸収特性の位置をもとに決定された個々の参照候補に対して検査されます。スペクトルの局所的な位置と勾配は吸収特性の強さや勾配に影響します。そのため、これらのパラメータは通常連続体、つまりスペクトル一般形状の上限、に対し相対的に決定されます。連続体は各波長サブセットに対して算出され、各スペクトルチャンネルの反射率を対応する連続体値で割ることによって削除されます。そして吸収特性は算出された値(深さと深さ半分に对应する幅を含む)のセットを用いることによって、あるいは特性の完全な形状を用いることによりマッチングされます。このような手順のタイプは U.S. Geological Survey Spectroscopy Lab (Clark and others, 1990) の研究者達によって熟練したシステムに組織化されています。



いくつもの吸収特性を含む鉱物 gypsum の反射スペクトル(A)。カーブBはスペクトルの連続体をあらわし、Cは連続体削除後のスペクトルです。

岩盤、土、のような多くの他の物質は吸収特性の特徴に欠けています。このようなスペクトル

は全体の形状によって特徴づけられます。マッチングではスペクトル全体(大気吸収によって著しく影響を受けたノイズ画像バンドは除外)、または全ての候補物質に対する均一な波長のサブセットが活用されます。マッチングの1つのアプローチは、画像スペクトル(二乗誤差の和のルートで量化される)との反射率(バンド毎バンド)の差が最小であるスペクトルを探す方法です。もう一つのアプローチでは各スペクトルをスペクトル空間内のベクトルとして扱い、観測された画像スペクトルと成す角が最小になる参照スペクトルを見つけます。

線形分離

線形分離は単純なスペクトル調和へのもう一つのアプローチです。これの基礎となる前提条件は、シーンがほぼ一定のスペクトル特性をもつ比較的少数の一般的な物質を含んでいることです。さらに、シーン内のスペクトル変動の大部分はこれらの一般的なエンドメンバー要素が様々な割合で空間的に混合している部分です。もしエンドメンバースペクトルを認識することが出来れば、各ピクセルのスペクトルを数学的に“分離”し、各エンドメンバー物質の相対的な量を知ることが出来ます。

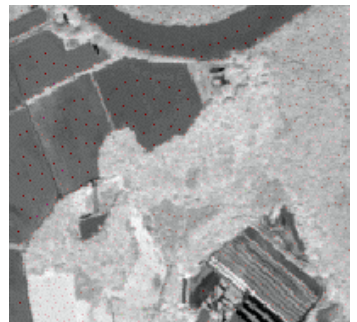
分離手順は画像スペクトルをエンドメンバースペクトル存在比の和として、その合計が1.0となる様にモデル化します。最も良く適合する一部分のセットは前ページで説明したものと同じスペクトルマッチングを用いて見つけることができます。各エンドメンバーの部分画像は多くの情報を簡単に解釈したり修正したりできる形に集約します。各ピクセルの残差誤差を示す画像は、選択されたエンドメンバーセットからでは適切にモデル化できないシーンの部分を認識させてくれます。

線形分離の課題は地表面にある実際の物理的要素に対応するスペクトルエンドメンバーセットを同定することです。エンドメンバーは、フィールド情報を用いた画像から定義することが可能であり、次ページで説明する実験的選択方法を用いることもできます。

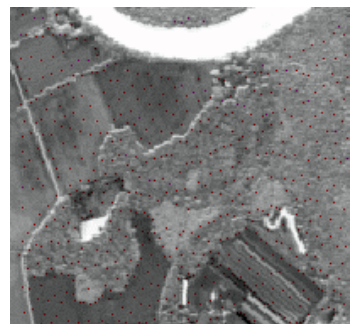
あるいは、参照ライブラリからエンドメンバー反射スペクトルを選択することもできますが、このアプローチでは画像が反射率に正確に変換される必要があります。実際の物質スペクトルと混合することのできる“影”エンドメンバーを定義することによって、明暗の変化は直接混合モデルに組み込むことが可能になります。影のスペクトルは画像内の深い影の部分から直接得ることができます。右の例で示されるように深い影の無い場合、濃いアスファルト面や深い水域のスペクトルは影スペクトルとして近似することができます。



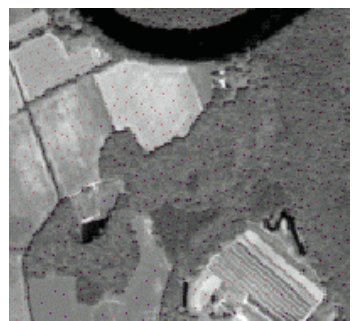
森、作物のない畑とある畑、川を含む AVIRIS シーンの一部。カラー赤外線バンドの混合（植生は赤です）で表されています。線形分離からの部分画像を以下に示す。



植生部分



水 / 影部分

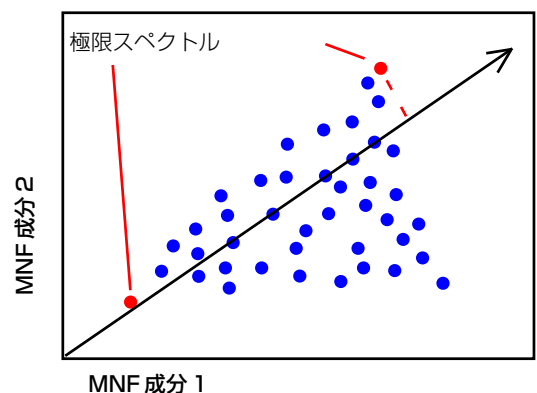


土部分

画像エンドメンバーの定義

ハイパースペクトル画像からスペクトルエンドメンバーが定義される際、個々の画像エンドメンバーはそれが代表する物理的物質の最大量を持たなければなりません。(理想的には、各エンドメンバーは単一の純粋な物質であると良いのですが、画像内には各エンドメンバーの“ピュア”ピクセルが存在しない可能性があります。) もしも画像スペクトルが n 次元の散布図の点として表されていたとしたら、エンドメンバーはスペクトル点集合の隅の先端に対応するはずです。

画像エンドメンバーの候補を独立させるためのある一つの通常手順はいくつかのステップを要します。隣接するスペクトルバンド間には強い相関が存在するため、Minimum Noise Fraction (MNF) 変換を用いて少数のノイズのない成分を保つことにより、始めにデータセットの次元を減らすことが可能です。MNF変換 (Green, et al. 1988) とは出力成分が画像内容量の順に並ぶように各画像バンドのノイズ量を推測し、平等化するノイズ調整主成分変換です。次に、自動化された手順が MNF 成分に適応され、 n 次元データ集団の周辺の極限スペクトルを見つけます。このような手順の一つに Pixel Purity Index (PPI) があげられます。それは座標空間の原点から外に向かって広がる一連のランダムな方向を調査します。各テスト方向に対して、スペクトル点はテストベクトル上に投影され、極限スペクトル (Low と High) は記録されます。方向がテストされていくと共に、この処理は各画像セルが極限として検出された回数を集計します。結果の PPI ラスタで高い値を示したピクセルは基本的には MNF データ集団の隅に対応します。第三のステップでは、回転 n 次元散布図内で見える MNF データセットからピクセルを選択するために PPI ラスタを用います (TNTmips Hyperspectral Analysis 処理内の n-Dimensional Visualizer などを用いて)。さまざまな方向から PPI スペクトル集団を見ることによって、解析者は重要な方向を見定め、それらの方向で極限となるスペクトル点をマークし、マークされたセルの画像内を保存することが可能になります。最後に、オリジナルのハイパースペクトル画像上にマークされたセル画像を重ね、画像スペクトルを選択し調査するためのガイドとして用いられます。最良のエンドメンバースペクトルの候補はその後、ハイパースペクトル画像を分離するために利用するスペクトルライブラリ内に保存されます。

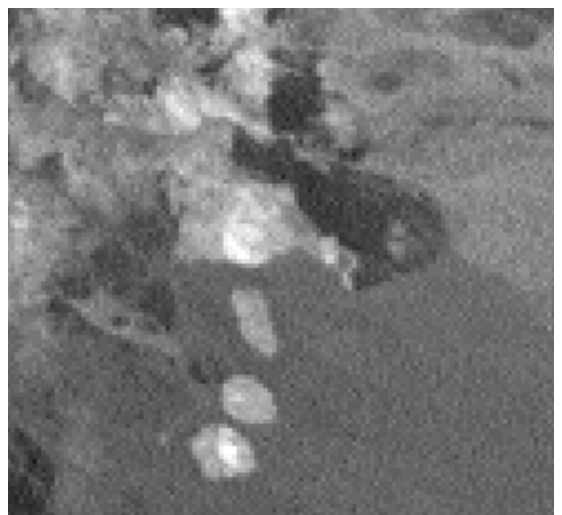
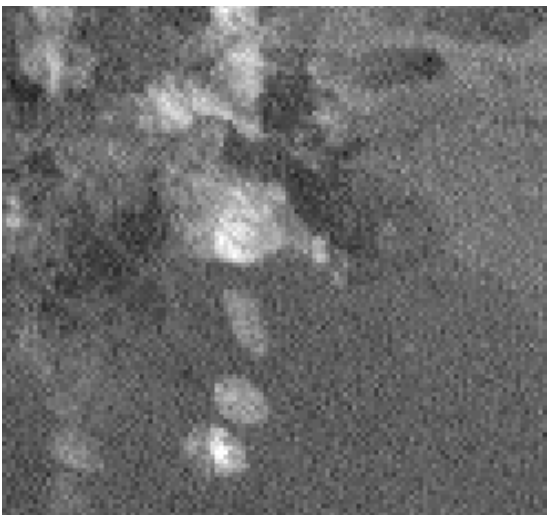


PixelPurityIndex手順によってテストされたランダムベクトル方向 (矢印) のひとつを表わす簡単な2成分プロット。全てのスペクトル点は各テストベクトル上に投影され、極限点は記録されます。

部分分離

いくつかのハイパースペクトル画像アプリケーションはシーン内における全てのエンドメンバーの存在比を求めることを必要としません。そのかわり、目的は1つのターゲット物質の存在とその量を求めることです。この場合完全な部分分離は不必要です。各ピクセルはターゲットスペクトルシグネチャの潜在的な混合物や、シーン内における他の全ての物質を表すコンポジットシグネチャとして扱うことができます。ターゲット成分の量を探すが、部分分離の問題となります。

未知のスペクトルの背景に対するターゲットスペクトルを見つけ出す方法はマッチトフィルタとして一般的に知られており、この語はラジオ信号処理から来たものです。正射サブスペース投影法と制限エネルギー最小法 (Farrand and Harsanyi, 1994) を含む様々な**マッチトフィルタ**アルゴリズムが開発されています。これらのアプローチの全ては、背景を最小化しながらターゲットスペクトルによる影響を強調するために、画像スペクトルの数学的な変換を行います。幾何学的な意味では、マッチトフィルタ法はターゲットスペクトルの全域における量を示す反面、背景の変性を“隠してしまう”といった n 次元スペクトル空間の投影法を見つけることです。ほとんどの場合、背景に影響するスペクトルは不明ですので、ほとんどのマッチトフィルタは、画像そのものから合成背景シグネチャを推定するために統計的手法を用います。ターゲット物質がまばらで、背景シグネチャにはたいして影響しない場合のみ成功する方法もあります。修正されたマッチトフィルタ法ではスペクトルそのものではなく、スペクトルの派生物を用いることによって異なった全体の輝度を持つスペクトルのマッチングを改善します。



カブライト AVIRIS シーンの一部で、マッチトフィルタ (左) と派生マッチトフィルタ (右) によって作り出された部分画像。ターゲット画像スペクトルは鉱物、アルナイトを表しています。明るい部分はアルナイトの多い部分のピクセルです。派生マッチトフィルタによって作られた画像はより少ない画像ノイズと、明瞭な境界線、アルナイトの存在比が異なるエリア間のより良いコントラストを示します。

参考文献

概要

- Kruse, F.A. (1999). Visible-Infrared Sensors and Case Studies. In Renz, Andrew N. (ed), *Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing* (3rd ed.), Vol 3. New York: John Wiley & Sons, pp. 567-611.
- Landgrebe, David (in press). Information Extraction Principles and Methods for Multispectral and Hyperspectral Image Data. In Chen, C.H. (ed.), *Information Processing for Remote Sensing*. River Edge, NJ: World Scientific Publishing Company. Manuscript available for download at <http://dynamo.ecn.purdue.edu/~landgreb/publications.html>.
- Vane, Gregg, Duval, J.E., and Wellman, J.B. (1993). Imaging Spectroscopy of the Earth and Other Solar System Bodies. In Pieters, Carle M. and Englert, Peter A.J. (eds.), *Remote Geochemical Analysis: Elemental and Mineralogic Composition*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, pp. 121-143.
- Vane, Gregg, and Goetz, A.F.H. (1988). Terrestrial Imaging Spectroscopy. *Remote Sensing of Environment*, 24, pp. 1-29.

スペクトル反射

- Ben-Dor, E., Irons, J.R., and Epema, G.F. (1999). Soil Reflectance. In Renz, Andrew N. (ed), *Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing* (3rd ed.), Vol 3. New York: John Wiley & Sons, pp. 111-188.
- Clark, Roger N. (1999). Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy. In Renz, Andrew N. (ed), *Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing* (3rd ed.), Vol 3. New York: John Wiley & Sons, pp. 3-58.
- Ustin, S.L., Smith, M.O., Jacquemoud, S., Verstraete, M., and Govaerts, Y. (1999). Geobotany: Vegetation Mapping for Earth Sciences. In Renz, Andrew N. (ed), *Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing* (3rd ed.), Vol 3. New York: John Wiley & Sons, pp. 189-248.

反射率変換

- Farrand, William H., Singer, R.B., and Merenyi, E., 1994, Retrieval of Apparent Surface Reflectance from AVIRIS Data: A Comparison of Empirical Line, Radiative Transfer, and Spectral Mixture Methods. *Remote Sensing of Environment*, 47, 311-321.
- Goetz, Alexander F.H., and Boardman, J.W. (1997). Atmospheric Corrections: On Deriving Surface Reflectance from Hyperspectral Imagers. In Descour, Michael R. and Shen, S.S. (eds.), *Imaging Spectrometry III: Proceedings of SPIE*, 3118, 14-22.
- van der Meer, Freek (1994). Calibration of Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer Data (AVIRIS) to Reflectance and Mineral Mapping in Hydrothermal Alteration Zones: An Example from the “Cuprite Mining District” *Geocarto International*, 3, 23-37.

ハイパースペクトル画像分析

- Adams, John B., Smith, M.O., and Gillespie, A.R. (1993). Imaging Spectroscopy: Interpretation Based on Spectral Mixture Analysis. In Pieters, Carle M. and Englert, Peter A.J. (eds.), *Remote Geochemical Analysis: Elemental and Mineralogic Composition*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, pp. 145-166.
- Clark, R.N., Gallagher, A.J., and Swayze, G.A. (1990). Material absorption band depth mapping of imaging spectrometer data using a complete band shape least-squares fit with library reference spectra. *Proceedings of the Second Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop*, JPL Publication 90-54, pp. 176-186.
- Cloutis, E.A., (1996). Hyperspectral Geological Remote Sensing: Evaluation of Analytical Techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 2215-2242.
- Farrand, William H., and Harsanyi, J.C. (1994). Mapping Distributed Geological and Botanical Targets through Constrained Energy Minimization. *Proceedings of the Tenth Thematic Conference on Geological Remote Sensing*, San Antonio, Texas, 9-12 May 1994, pp. I-419 - I-429.
- Green, Andrew A., Berman, M., Switzer, P., and Craig, M.D. (1988). A Transformation for Ordering Multispectral Data in Terms of Image Quality with Implications for Noise Removal. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 26, 65-74.
- Mustard, John F., and Sunshine, J.M. (1999). Spectral Analysis for Earth Science: Investigations Using Remote Sensing Data. In Renz, Andrew N. (ed), *Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing* (3rd ed.), Vol 3. New York: John Wiley & Sons, pp. 251-306.

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・サイトに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・オブジェクトから構成されるプロジェクトデータを生成、ジオリファレンス、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。TNTedit は多くの種類の商用、非商用データフォーマットの地理空間データにアクセスできます。
- TNTview** TNTview には、TNTmips とまったく同様の強力な表示機能があります。TNTmips の演算処理機能や加工機能を必要としないユーザに最適です。
- 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、さまざまなプラットフォームのコンピュータに対応できます。
- TNTserver** TNTserver を使うと TNTatlas のデータをインターネットやイントラネットで公開することができます。ウェブ・ブラウザおよび TNTclient Java アプレットを使って地理データ・アトラスを操作して下さい。
- TNTlite** TNTlite は、学生や小規模プロジェクトを行う専門家向けの TNTmips 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、TNTlite の入った CD を『TNT 入門』の冊子と共に注文することもできます。

索引

minimum noise fraction 変換	20	水～	5
pixel purity 指数	20	ライブラリの中の～	8
吸収		スペクトル空間	9
大気	13, 18	スペクトル調和	17, 18
バンド	5-7	スペクトル反射	5-11
影	12	～の定義	5
画像スペクトロメータ	4, 10, 16	カーブへの変換 スペクトル参照 ...	14-15
空間解像度	10	スペクトル放射	11
散乱	4, 5, 13	スペクトルメータ	4, 5
照明	11, 12	スペクトルライブラリ	8
スペクトル		線形分離	19-21
～エンドメンバー	19, 20	センサ効果	13
～画像	3, 17-20	大気による	
～のプロット	9	吸収	13, 18
～反射率	5-11	散乱	13
鉱物～	6	太陽放射	12
混合～	10	調和フィルタ	21
植物～	7	分光光学	4
太陽～	12	連続体	18
土壌～	5		



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