

9. 各波長における物質の特徴

9.1 水・植物・土壌の分光特性（スペクトル特性）

解説「水・植物・土壌の分光特性（スペクトル特性）」

ここでは、水・植物・土壌の分光特性（スペクトル特性）について説明します。図 9.1.1 に可視光線～短波長赤外線における水・植物・土壌の分光特性を示します。縦軸は反射率、横軸は波長になります。

【水】 0.35～0.8 μm の電磁波が入射すると弱いながら反射しますが、0.8 μm よりも波長の長い電磁波（赤外線側）はすべて水に吸収されます。

【植物】 0.40 μm と 0.65 μm 付近では 1.3 μm より波長の長い電磁波は植物中の水分によって吸収され、反射が弱くなります。

【土壌】 可視光線から短波長赤外線にかけて反射率が徐々に増加します。特に、短波長赤外線では水や植物に比べて土壌（鉱物・岩石）からの反射が強く、加えて粘土鉱物による特徴的な電磁波の吸収が見られます。

全体として水・植物・土壌はこのような分光特性（スペクトル特性）がありますが、植物や土壌（鉱物・岩石）の種類によって分光特性（スペクトル特性）はさらに変化します。リモートセンシングでは、物質によって異なる分光特性（スペクトル特性）を画像処理で強調することで植物や土壌（鉱物・岩石）の分類等を行っています。例えば、資源調査では鉱床生成に関係する変質帯に分布する粘土鉱物などを様々なスペクトル解析手法を用いて衛星データから抽出しています。

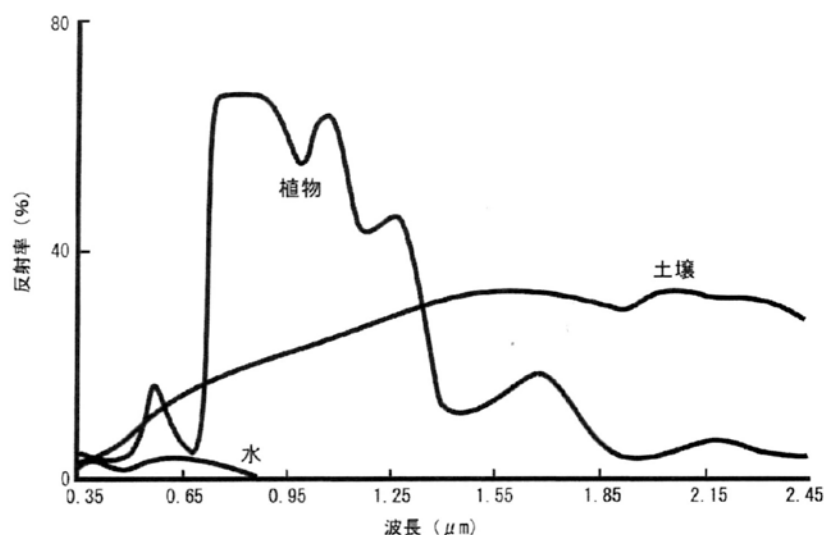


図 9.1.1 水・植物・土壌の分光特性（スペクトル特性）

9.2 可視光線～短波長赤外線の特徴

解説「植物の分光特性（スペクトル特性）」

植物の分光特性（スペクトル特性）は次のような特徴があります。

- ・ 0.45 μm 付近と 0.65 μm 付近にクロロフィル（葉緑素）による吸収を示します。
- ・ クロロフィルの吸収に挟まれた 0.5 μm 前後はやや強い反射を示します。
- ・ 0.7～1.3 μm にかけては細胞の構造に由来する強い反射を示します。
- ・ 約 1.3 μm より長い波長側は植物中の水分による吸収を示します。

この特徴はどの植物においても共通に見られます。加えて、地上にてスペクトルメータを用いて各種植物の分光特性（スペクトル特性）を調べた場合、植物の種類・葉の老若・水分・栄養状況などによって分光特性（スペクトル特性）が異なることがわかります。しかし、衛星のセンサは可視光線～近赤外線に数バンドしか持たないため、植物の種類を細かく区分することは難しいです。

また、植物を観測する場合には、観測する季節について留意する必要があります。植物の活動は周囲の自然環境や人間活動によって左右されます。例えば、日本では春に芽を出し・夏に葉を繁茂し・秋から初冬に葉を落とす落葉樹と、一年中葉をつけている常緑樹があります。また、稲作は春に田植え・夏に成長し・秋に収穫しますが、畑作は作物により収穫する季節が異なるため畑に植物が繁茂する時期もまちまちです。このように植物は季節変化が大きいので、衛星データを植生調査や農作物の調査等に用いる場合は、多時期のデータを活用することで分類精度等が向上します。

解説「植生指数」

衛星データのバンド間演算を用いて植物の活性度を推定した式を正規化植生指数（NDVI：Normalized Difference Vegetation Index，以下「植生指数」と省略）といいます。植生指数は、植物の分布や活性度（活動の度合い）を把握する場合に利用します。

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{R}) / (\text{NIR} + \text{R})$$

NIR：近赤外線のバンド（葉の構造に由来する強い反射を観測）

R：可視光線における赤色のバンド（クロロフィルによる吸収を観測）

- | | | |
|---------------|-----------|---------|
| ・ ASTER | NIR：バンド 3 | R：バンド 2 |
| ・ Landsat TM | NIR：バンド 4 | R：バンド 3 |
| ・ Landsat MSS | NIR：バンド 4 | R：バンド 2 |

植物が存在する場合、クロロフィルによる吸収で R の反射率が低下し、細胞の構造による強い反射で NIR の反射率が大きくなるため、植生指数は大きい値を取ります。一方、土壌や水が存在する場合、R と NIR の両方とも同じような反射率になるため、植生指数は小さくなります。また、植物が存在する場合でも、植物の活性度（植物がどの程度活発に活動しているか？）によって植生指数は変化します。例えば、落葉の時期は葉の中のクロロフィル量が減少して細胞の構造も変化するため、植生指数は低い値を取ります。

衛星データによる植物の様々な活動量を評価する研究が盛んに行われています。植生指数から植物被覆率、葉面積指数 (LAI)、バイオマス、クロロフィル量を推定するアルゴリズムの開発が行われています。最近では、これらのアルゴリズムを活用して炭素固定量を推定する研究も進められています。地球温暖化防止を目的に 1997 年に採択された京都議定書の発効に向けて二酸化炭素排出量取引の開始に向けた動きが見られており、その中で植物による二酸化炭素の吸収・炭素固定量を推定する研究は重要なテーマとなっています。

解説「水と雪氷の分光特性（スペクトル特性）」

水は液体・固体（雪・氷）・気体（水蒸気）として存在します。また、ミクロ的にみると、植物の葉などの細胞内では細胞水として、土壌・岩石・鉱物の中では空隙水や分子間の結合水として存在します。水の分光特性（スペクトル特性）は次のような特徴があります。

- ・ 清浄な水の場合、可視光線の電磁波を弱く反射し、近赤外線よりも長い波長の電磁波をすべて吸収します。また、 $0.48\mu\text{m}$ 付近の青色～緑色の電磁波を良く透過します。水が深いところまで青く見えるのはこの特性のためです。
- ・ 沈殿物や有機物が混入した水の場合、 $0.4\sim0.5\mu\text{m}$ の電磁波（青色～緑色）の反射が弱くなり、逆に $0.5\mu\text{m}$ より波長の長い電磁波（赤色～近赤外線）の反射がやや強くなります。また、全体に透過率が減少し、透過する電磁波もより長い波長側（黄色～赤色）にシフトします。水の透明度が低下して濁って見えるのはこの特性のためです。
- ・ 雪氷の場合、可視光線～近赤外線にて高い反射率を示しますが、短波長赤外線では反射率が低下します。一方、雲の場合、可視光線～短波長赤外線にて常に高い反射率を示します。この特徴を用いることで、雲と雪氷の識別が可能となります。
- ・ 土壌に空隙水が存在する場合、近赤外線よりも長い波長の電磁波を吸収する水の分光特性（スペクトル特性）の影響を受けます。そのため、乾いた土壌に比べて湿った土壌は反射率が低下し、全体に暗く見えます。代掻きを終えた水田が暗く見えるのはこの特性のためです。
- ・ 岩石や粘土鉱物に存在する分子間の結合水は特定の波長域の電磁波を吸収することから、岩石・粘土鉱物の識別において重要な働きを示します。

解説「変質鉱物の分光特性（スペクトル特性）」

岩石は鉱物の集合体であり、岩石の分光特性（スペクトル特性）を知るためには鉱物の分光特性（スペクトル特性）を知ることが必要です。加えて、岩石の主要構成要素である珪酸塩鉱物は可視光線～短波長赤外線の波長域において顕著な分光特性（スペクトル特性）を持たないため、風化・変質によって二次的に生じた変質鉱物の分光特性（スペクトル特性）が岩石全体の分光特性（スペクトル特性）を示すことが多いです。

図 9.2.1 に短波長赤外線における変質鉱物の分光特性（スペクトル特性）を示します。二次的に生じた変質鉱物の例としては、次のようなものがあります。

- ・水分子 (H_2O) と水酸化イオン (OH^-) による振動

水分子を持つ鉱物が岩石中に存在すると、水分子の振動による電磁波の吸収位置が「 $1.4\mu\text{m}$, $1.9\mu\text{m}$ 」付近に現れます。また、水酸化イオンと金属イオンが結合した粘土鉱物（例：石膏，モンモリロナイト・カオリナイト・緑泥石・明ばん石）が岩石中に存在すると、水酸化イオンと金属イオンが結合した場合の振動による電磁波の吸収位置が「 $2.2\mu\text{m}$, $2.3\mu\text{m}$, $2.4\mu\text{m}$ 」付近に現れます。

- ・炭酸イオン (CO_3^{2-}) による振動

炭酸イオンを持つ鉱物（例：方解石）が岩石中に存在すると、炭酸イオンの振動による電磁波の吸収位置が「 $2.5\mu\text{m}$, $2.35\mu\text{m}$, $2.15\mu\text{m}$, $2.0\mu\text{m}$ 」付近に現れます。

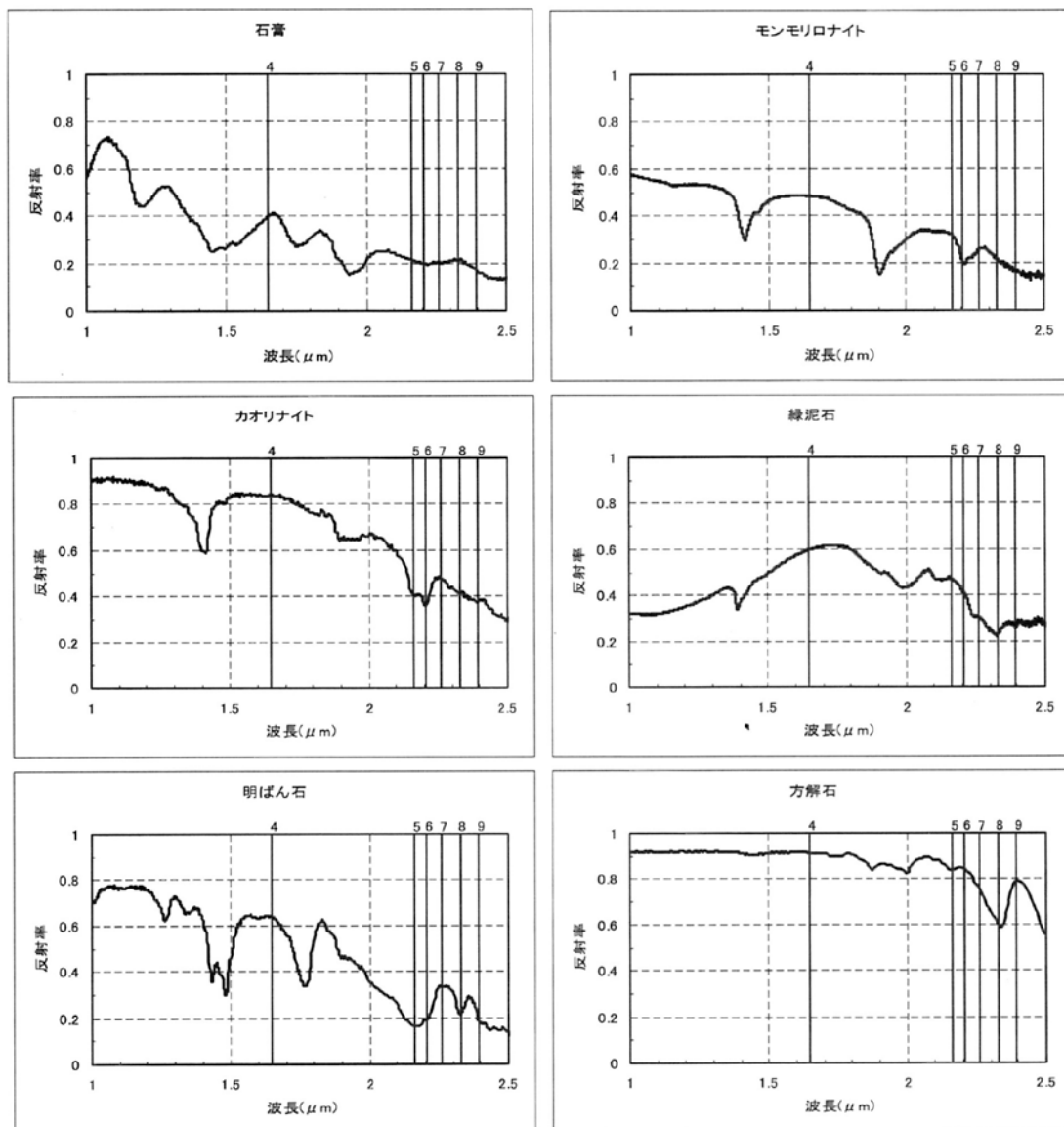


図 9.2.1 短波長赤外線における変質鉱物の分光特性（スペクトル特性）

* 図の中の数字（4～9）は，ASTER のバンド 4～9

解説「ASTER・Landsat TMと変質鉱物の区分」

リモートセンシングでは、水分子・水酸化イオン・炭酸イオンによる電磁波の吸収を用いて変質鉱物の区分を行います。これまで、変質鉱物ごとに電磁波の吸収の特徴について述べましたが、最後に ASTER と Landsat TM のバンドの配置と水酸化イオンや炭酸イオンによる電磁波の吸収位置との関係について説明します。

Landsat TM は $2.0 \sim 2.5 \mu\text{m}$ に 1 つしかバンドが存在しないため、水酸化イオンと炭酸イオンによる電磁波の吸収位置を区別することができません。そのため、Landsat TM では変質鉱物の分布する領域は「変質帯」として抽出されます。一方、ASTER は $2.0 \sim 2.5 \mu\text{m}$ に 5 つのバンドが存在するため、水分子・水酸化イオンと炭酸イオンなどによる電磁波の吸収位置を区別することができます。そのため、ASTER では電磁波の吸収位置を用いた変質鉱物の区分が可能となります。

9.3 熱赤外線の特徴

解説「熱赤外線の特徴」

熱赤外線では、珪酸塩鉱物や酸塩鉱物などの存在により、分子の伸縮振動によって電磁波が吸収されて放射率が小さくなります。特に、珪酸塩鉱物は地殻の主要鉱物であり、熱赤外線における岩石の分光特性（スペクトル特性）に顕著な影響を与えます。

珪酸塩鉱物は SiO_4 四面体の構造によって次のように分類されます。

・ネソ珪酸塩（例：かんらん石、ざくろ石）	Si-O 密度小	Si 含有量大
・ソロ珪酸塩（例：緑簾石）		↑
・シクロ珪酸塩（例：ベリル、電気石）		
・イノ珪酸塩（例：輝石、角閃石）		
・フィロ珪酸塩（例：雲母、緑泥石）		↓
・テクト珪酸塩（例：長石、石英）	Si-O 密度大	Si 含有量小

珪酸塩鉱物は Si-O の密度が増加すると共に、結合力も強くなります。また、 $8.5 \mu\text{m} \sim 12.0 \mu\text{m}$ では、 SiO_4 四面体の構造の変化によって放射率の極小の位置が移動します。放射率の極小の位置は、Si-O の密度が小さいネソ珪酸塩では長い波長側（約 $11.5 \mu\text{m}$ ）、Si-O の密度が大きいテクト珪酸塩では短い波長側（約 $9.0 \mu\text{m}$ ）になります。

図 9.3.1、図 9.3.2 に熱赤外線における火成岩と堆積岩の分光特性（スペクトル特性）を示します。

・火成岩

かんらん石（ネソ珪酸塩）や輝石・角閃石（イノ珪酸塩）が多く含まれる玄武岩やはんれい岩（塩基性岩）の場合、放射率の極小の位置は約 $10 \sim 11 \mu\text{m}$ 付近に現れます。一方、雲母（フィロ珪酸塩）や石英・長石（テクト珪酸塩）が多く含まれる流紋岩や花崗岩（酸性岩）の場合、放射率の極小の位置は約 $9 \mu\text{m}$ 前後に現れます。安山岩や閃

緑岩（中性岩）は、両者の中間的な特徴を示します。

- ・堆積岩

石英・長石（テクト珪酸塩）などを多く含む碎屑性堆積岩では、放射率の極小の位置は $9.0\mu\text{m}$ 付近に現れます。また、炭酸塩岩では CO_3 の振動により $11.2\mu\text{m}$ 付近に放射率の極小が現れます。

- ・土壌

土壌は主に石英や長石（テクト珪酸塩）を多く含んでいることから、放射率の極小の位置は $9.0\mu\text{m}$ 付近に現れます。ただし、土壌中の含水率や粘土・シルト・有機物の含有率が増加すると、分光コントラストが低下します。

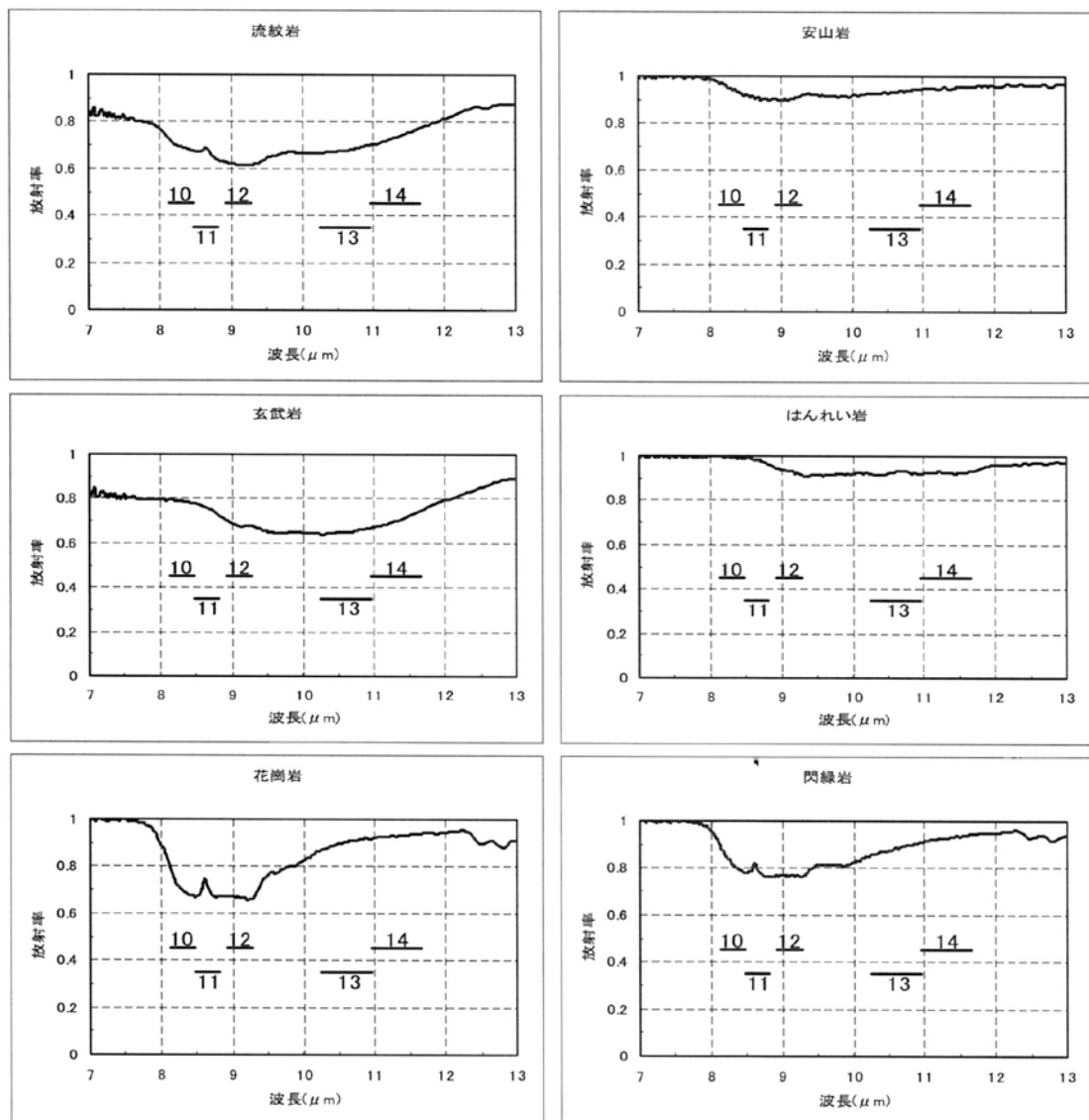


図 9.3.1 熱赤外線における火成岩の分光特性（スペクトル特性）

* 図の中の数字（10～14）は、ASTER のバンド 10～14

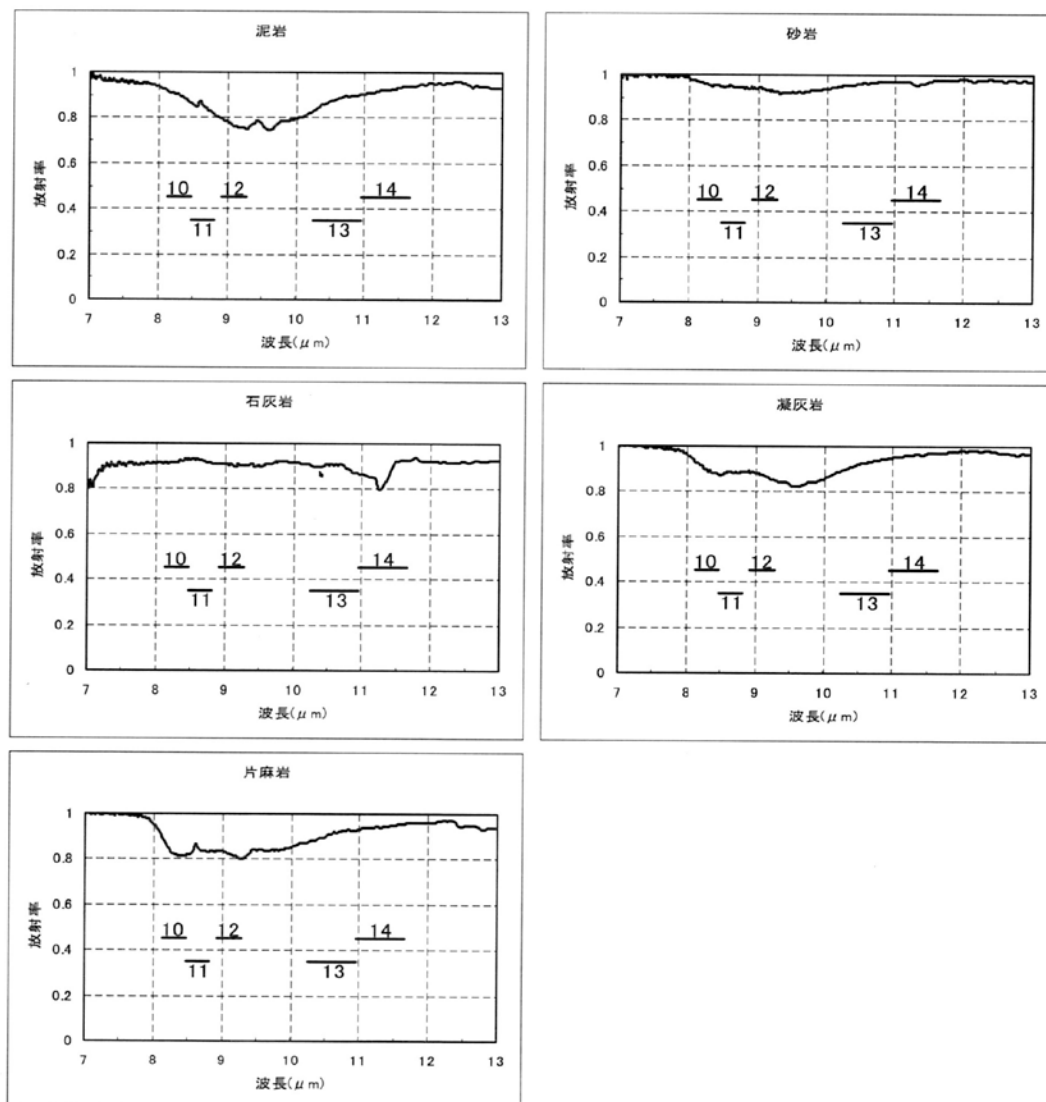


図 9.3.2 熱赤外線における堆積岩の分光特性（スペクトル特性）

* 図の中の数字（10～14）は ASTER のバンド 10～14

解説「衛星データから温度を読み取る」

物質はその温度に対応した電磁波を放射しています。ASTER ではバンド 10～14, Landsat_TM ではバンド 6 が熱赤外線の電磁波を観測しており、各バンドの衛星データを用いることで地表面の温度を調べることができます。衛星データから得られる温度情報は、火山活動に伴う地温分布とその変化の観測、地熱および温泉の探知、工場からの廃熱やヒートアイランド現象などの観測に活用されます。

また、ASTER や Landsat TM による衛星データは、地球から放射された電磁波のエネルギーを 0～255 の 256 段階による輝度値 (DN 値) で表しています (*1)。このことから、衛星データから相対的に温度が高い・低いという状況を判読することはできますが、温度その

ものを抽出することができません。衛星データから温度を抽出するためには、輝度値を放射輝度に変換した後に放射率と温度に分離する必要があります(*2)。

*1 : ASTER バンド 10~14 の生データは 16 ビット (65536 (2^{16}) 段階) の画像として配布されますが、本書に付属する画像処理ソフトウェア「MIRIN_Kid's」は 8 ビットデータのみに対応するため、CD-ROM に収録されている衛星データはすべて 8 ビットデータになっています。

*2 : 詳しくは「3.4 放射伝達方程式 『地表面温度と放射率の分離について』」をご参照ください。

9.4 土地被覆分類について

解説「土地被覆分類について」

衛星データによる土地被覆分類は、水・植物・土（岩石）・人工構造物などによって分光特性（スペクトル特性）が異なる点を利用して解析を行います。土地被覆分類の手法はいくつか存在しますが、本ソフトウェアでは「教師付き分類による最尤法」を採用しています。図 9.4.1 に教師付き分類による最尤法を用いた土地被覆分類の流れを示します。はじめに、土地被覆分類では分類項目を決める必要があります。図 9.4.1 では、分類項目として「水域・草地・樹木・裸地・都市・構造物」を設定しています。次に、分類項目ごとに教師領域となるエリアを画像の中から選択し、教師領域を作成します。そして、各教師領域から抽出された画素情報を元に、最尤法という統計手法を用いて画像中の各画素がどの項目に分類されるかを決定します。このような処理を経て分類項目ごとに色分けされた画像を土地被覆分類画像といいます。なお、最尤法の詳細については数学（統計）の教科書をご参照ください。

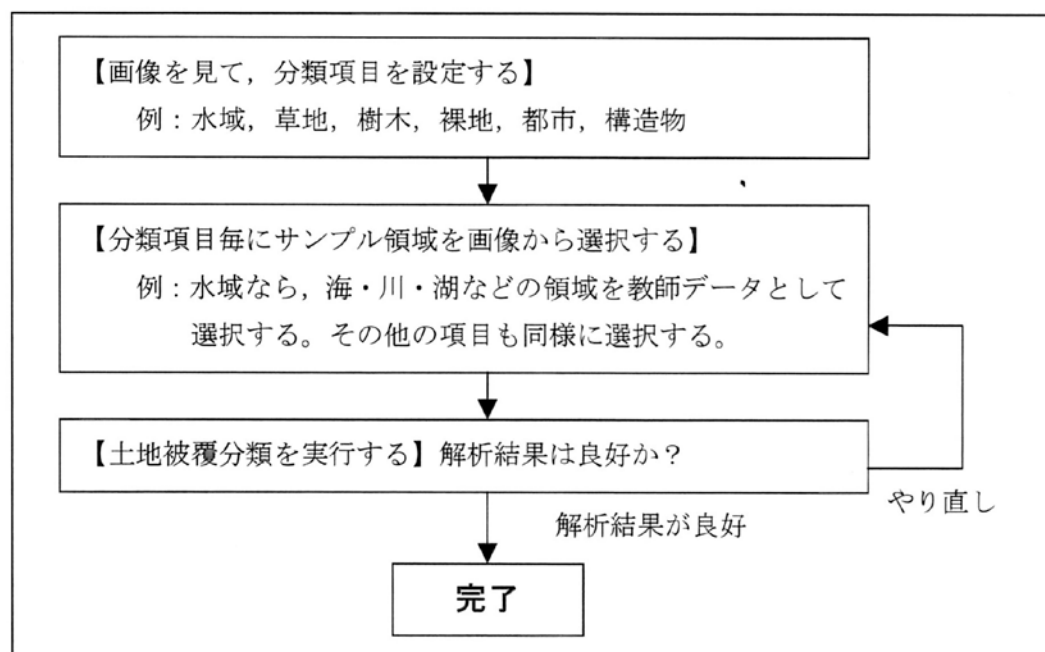


図 9.4.1 土地被覆分類の流れ