

リモートセンシング技術を応用した実験的な鉱物同定手法の開発

久保 大樹*・小池 克明*

Development of mineral identification method at lab scale by an application of remote sensing technique

Taiki Kubo* and Katsuaki Koike*

*京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 Department of Urban Management,
Graduate School of Engineering, Kyoto University, Katsura C1-2-215, Kyoto 615-8540, Japan.
E-mail: kubo.taiki.3n@kyoto-u.ac.jp (Kubo)

キーワード：リモートセンシング，分光放射計，粘土鉱物，反射スペクトル，スペクトル分解
Key words: Remote sensing, Spectroradiometer, Clay mineral, Reflection spectrum, Spectral unmixing

1. はじめに

土壌や岩石に含まれる鉱物の種類や量比を迅速かつ簡便に判別することは、土木工学や資源探査など様々な分野において必要とされる技術であり、非破壊・非接触な手法であればさらにその需要は拡大する。衛星リモートセンシングにおいて広く用いられる鉱物指数など、物質の分光反射特性を利用した解析は、前述の条件に適した手法であると言える。各種鉱物は形状や構成元素によって固有の反射スペクトルを有しており、それらの違いによって種類や量比の判別を行うことができる。近年、センサ類の著しい小型・高性能化に伴って、ハンディタイプの分光放射計や赤外域まで撮影可能なカメラの開発が進み、ラボスケールで運用可能なサイズと価格の製品が次々と登場している。本研究では、このような測定装置類を用いた、いわば『ラボスケールでの衛星リモートセンシング解析』によって、迅速・簡便かつ非破壊・非接触な鉱物同定システムの開発を目指した。しかしながら、衛星リモートセンシング解析の対象は主に広域における概査であり、それ単体での解析精度はさほど高いものではない。そのため、ラボスケールで必要とされる測定精度を得るためには、種々の条件での試料の測定と検証が必要となる。本発表では、前述の目的のため、主にハンディタイプの分光放射計を用いて様々な状態の岩石や土壌試料の反射スペクトルの変化を測定し、それに基づく試験的な定量手法について議論する。

2. 測定装置の概要

測定には Malvern Panalytical (旧 ASD Inc.) の ASD FieldSpec (以下 FieldSpec) を用いた。FieldSpec は 350 nm から 2500 nm までの連続分光計測が可能な可搬型の可視・近赤外分光放射計である。ASTER や Landsat といった光学センサを搭載した人工衛星によって取得された地表の反射スペクトルと、実際の計測対象物のスペクトルの対応を検証する目的 (Ground truth) で、野外や室内での測定に広く用いられている。光源は FieldSpec 付属、あるいは市販のハロゲンランプを使用し、測定前に白色板を使ったホワイトバランスの校正を行った。また、測定時にはセンサプローブを固定台に設置し、測定対象物との距離が変化しないように注意を払った。

3. 合成スペクトル分解の実験的検証

リモートセンシング解析に用いられる衛星画像は、1 ピクセル内に異なる波長に対する地表物質の反射率が格納された多次元データである。ピクセル内に複数の物質が存在する場合、観測値は各物質の分光反射特性の組み合わせられた合成スペクトルとなり、このようなピクセルは *mixel* (ミクセル) と呼ばれる (長澤ほか, 2007)。合成スペクトルの分解を行い、*mixel* 内に含まれる物質の種類や割合を求める *Spectral unmixing* は衛星画像を用いた主要な解析のひとつである。

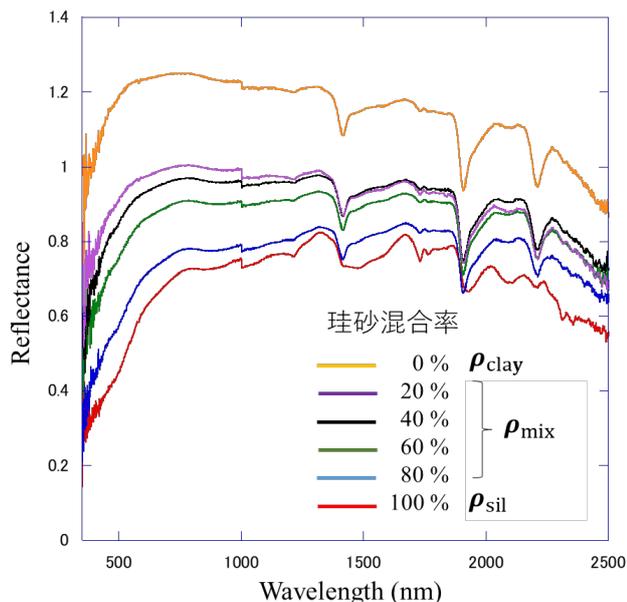
この概念がラボスケールでの実測値に対しても適用できることを確かめるため、FieldSpec を用いた実験を行った。実験では、粉末状の精製ベントナイトと珪砂、および両者の混合試料を作成し、それぞれの反射スペクトル (ρ_{clay} , ρ_{sil} , ρ_{mix}) を計測した。混合試料は重量比に基づいて混合率を段階的に変化させている。計測結果から、 ρ_{mix} は珪砂の混合率が大きくなるにつれて ρ_{clay} から ρ_{sil} に類似した形状に近づいていることがわかった (第 1 図)。最も単純な *Spectral unmixing* 手法である線形分離の概念が適用できるとすれば、各反射スペクトルの関係は次式によって表せる。

$$\rho_{\text{mix}} = x_1 \rho_{\text{clay}} + x_2 \rho_{\text{sil}} \quad (1)$$

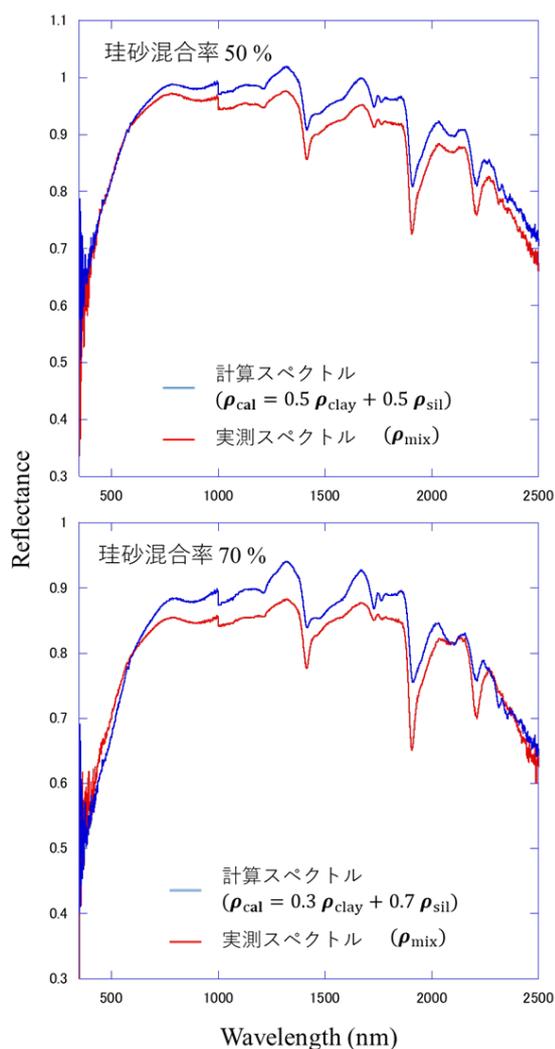
ここで x_1 , x_2 はそれぞれの物質の存在率に比例する重み係数であり、 $x_1 + x_2 = 1$ となる。これに従い、 ρ_{clay} と ρ_{sil} にそれぞれの混合率を重み係数として乗じて足し合わせた計算スペクトル (ρ_{cal}) と、珪砂混合率 50% と 70% の実測スペクトル (ρ_{mix}) を比較した結果を第 2 図に表す。いずれの場合も両者のスペクトル形状はよく類似しており、 ρ_{mix} は二つの反射スペクトルの線形結合による合成スペクトルであると言える。

以上の結果を踏まえ、各混合試料の重み係数を ρ_{clay} と ρ_{sil} から算出することを試みる。式(1)および重み係数の制約から、計算上の合成スペクトルと実測スペクトルの差分 f は式(2)で表すことができる。

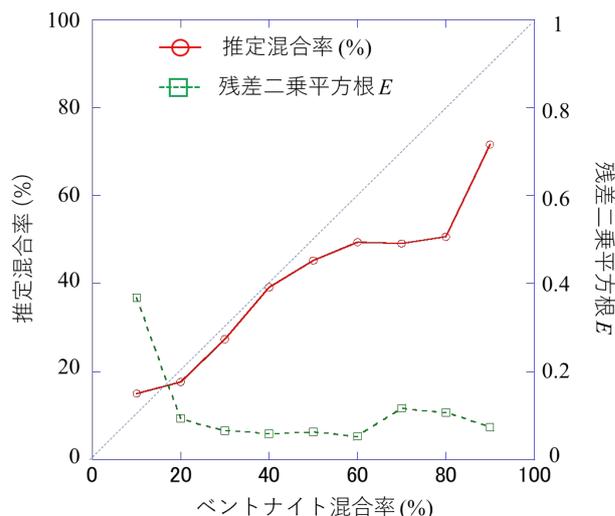
$$f = x_1 (\rho_{\text{clay}} - \rho_{\text{sil}}) - \rho_{\text{cal}} \quad (2)$$



第1図 粉末状のベントナイト，珪砂，および混合率を段階的に変化した試料の実測反射スペクトル。



第2図 線形結合によって求めた計算スペクトルと実測スペクトルの比較。上図が珪砂混合率50%，下図が珪砂混合率70%。



第3図 最急降下法を用いて求めた各混合試料中のベントナイトの推定混合率と実混合率の比較。緑の破線は残差の二乗平方根 E の変化を表す。

この差分の二乗平方根 E を最小化する変数 x_1 を勾配法の一つである最急降下法によって求める。今回はリモートセンシング解析で使用される既存の計算プログラムを流用するため、実測スペクトルから ASTER の VNIR・SWIR センサに対応する9つの波長帯(小池・古宇田, 2016)を用いた。求めた x_1 の値を推定混合率として、結果を第3図に表す。混合率10%の場合を除き、全体に E の値は小さく、適切に重み係数の推定ができていることが確かめられる。推定混合率と実混合率は特に混合率40%までよく対応しており、全体の相関係数は0.96である。混合率50%以降では過小評価となっているが、実測スペクトルには室内の湿度や温度変化、試料とセンサのわずかな距離の変化など諸種の観測誤差が含まれており、これらを補正することができればより精度の高い量比の推定を行うことができると考えられる。

4. まとめ

本研究では衛星リモートセンシング解析のノウハウを応用し、ラボスケールで利用できる迅速かつ簡便な鉱物同定手法を開発するために、混合試料を用いた実験的検討を行った。これによって、混合試料の反射スペクトルは混合された物質の反射スペクトルの合成であることが確かめられた。この事実に基づき Spectral unmixing 手法を適用して、ベントナイトの推定混合率を求めた結果、相関係数0.96と高い推定精度を得ることができた。

しかしながら、鉱物の判別や量比の推定を行うためには、対象とする鉱物の純粋な反射スペクトル情報が必要となる。また、実際の土壌や岩石はより多くの物質が混合した状態であり、さらには含水率や粒径など複雑な条件の違いがある。実用的な鉱物同定システムへ発展させるためには、鉱物反射スペクトルのライブラリ情報の蓄積と、さらなる検証作業が必要とされる。

文献

- 長澤良太・原慶太郎・金子正美 (2007) 自然環境解析のためのリモートセンシング・GISハンドブック, 古今書院, 256 p.
 小池克明・古宇田亮一 (2016) 金属鉱物・地熱資源探査へのリモートセンシング応用技術とその最近の動向. *Journal of MMIJ*, vol.132, no.6, pp. 96-113.