

空間情報を考慮した非線形スペクトル分離法の 地質リモートセンシング画像への応用と精度検証

岸本将英*・久保大樹*・小池克明*

Application and Accuracy Verification of a Nonlinear Spectral Unmixing Method for Geologic Remote Sensing Imagery by Considering Spatial Information

Masahide Kishimoto*, 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 C1-2-214, Kyoto 615-8540, Japan. E-mail: kishimoto.masahide.75z@st.kyoto-u.ac.jp

キーワード：非線形スペクトル混合モデル，リモートセンシング画像解析，可視・反射赤外分光画像

Key words：Nonlinear spectral mixture model, Remote sensing image analysis, Visible and reflective infrared spectroscopic image

1. はじめに

地球観測衛星を用いたリモートセンシングは、広範囲にわたる金属鉱床や熱水変質鉱物の兆候を効率的に検出するために広く応用されている。新しい鉱床の発見が年々困難になる中で、地表面鉱物のより精密な識別が求められている。光学センサの空間分解能の制限から、一般にスペクトル画像の画素中には複数の地表物質が混在するため、地表面鉱物のより精密な識別には、観測されたスペクトル情報からどのような鉱物が混在しているかを逆解析的に求める画像処理法が必要となる。この画像処理法はスペクトル分離と呼ばれ、基本的なLSU (Linear Spectral Unmixing: 線形スペクトル分離)の他に、非線形的なスペクトル変動を考慮した手法についても注目されている (Bioucas-Dias et al., 2012)。また、TV 正則化やL2,1 正則化 (協調スパース正則化) のように、空間情報を融合した、より高度なスペクトル分離法も開発されている。

そこで本研究では、熱水変質鉱物をより正確に識別する手法を確立し、ハイパースペクトル画像データ活用の可能性を広げることを目的とする。そのため、熱水変質鉱物が顕著に分布する地域を対象に3種類のハイパースペクトル画像およびマルチスペクトル画像を用い、熱水変質鉱物の非線形的なスペクトル混合および空間情報に対応する新たなスペクトル分離法を適用した。対象地域の熱水変質鉱物の推定分布を比較することで、スペクトル画像と新たなスペクトル分離法の有効性を検証した。

2. 研究対象地域と解析データ

米国ネバダ州中部Cuprite地域を解析対象地域に選んだ。Cuprite地域周辺は、乾燥した気候で植生が疎らな半砂漠地帯であり、金銀銅を含む有用鉱物が産出されてきた。表層地質は、カンブリア紀から新第三紀までの種々の岩石からな

り、特に明礬石、カオリナイト、オパールなどの熱水変質鉱物が広範囲に分布する (Swayze et al., 2014)。Cuprite地域では、地質調査や多くのリモートセンシング解析によって表層地質の詳細な調査が行われており、解析手法を検証するのに最適である。

解析データとして、Hyperion, HISUI, AVIRISの光学センサによって撮影された3種類のスペクトル画像を用いた。Hyperion画像はアメリカ合衆国地質調査所(USGS)が提供するオンラインプラットフォーム「EarthExplorer」を経由して、雲量が最も少ない2011年9月19日撮影で、地形補正を含む幾何補正が施されたL1T画像を取得した。HISUI画像は雲量が最も少ない2021年10月1日に撮影され、地形補正を含まない基本的な幾何補正が施されたL1G画像であり、経済産業省の取り組みとして開発された衛星データプラットフォーム「Tellus」を経由して取得した。AVIRIS画像は衛星画像解析ソフトウェアENVIに付属するものであり、2011年8月8日に撮影された地表面反射スペクトル画像を使用した。ピクセルサイズはそれぞれ30 m, 20 m, 15.5 mである。比較を行いやすくするため、3種類のハイパースペクトル画像が重なる領域を解析領域に設定した。対象地域と解析領域および地表面鉱物分布を第1図に示す。また、スペクトル分離のために、USGSによって公開され、400 nm~2500 nmの波長範囲のスペクトルライブラリを利用した。このスペクトルデータを対象ハイパースペクトル画像のバンドに合わせるために、線形補間によってリサンプリングを行った。

3. 解析手法

3.1 スペクトル画像前処理法

本研究で使用したHyperion画像とHISUI画像に対し、それぞれの画像に特有のgainとoffsetを利用し、放射輝度変

換および大気上端反射率(TOA : Top of Atmosphere)への変換を行った. gain は Hyperion で VNIR : 2.5×10^{-2} , SWIR : 1.25×10^{-2} , HISUI で VNIR : 1.0×10^{-2} , SWIR : 3.2×10^{-3} であり, offset は Hyperion で VNIR : 0, SWIR : 0, HISUI で VNIR : -10.0, SWIR : -3.2 である. 次に ENVI の解析モジュールの一つである FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes)を用い, 大気の影響を除外した地表面反射スペクトルに変換した. さらに MNF (Minimum Noise Fraction)を用いてノイズ除去を行い, 解析データとした. AVIRIS 画像の提供データはすでに前処理が施されているため, 直接解析に用いた.

3.2 スペクトル分離法

基本的なスペクトル分離法である LSU は, 観測されたスペクトル情報が各端成分スペクトルの地表面鉱物含有率を重みとする線形結合であると仮定する. LSU はアルゴリズムが簡便で, 計算効率性に優れているという利点があるが, 地形や太陽照度による非線形効果に精度が大きく影響されるという欠点もある. 例えば室内実験によって, 照度の変化で LSU の推定精度が異なることが実証されており, センサプローブと対象試料の距離を 3 mm 離れただけの照度の変化が, RMSE (Root Mean Square error)基準で 7 倍以上の精度の差を生じさせる (岸本ほか, 2024). このような非線形効果を補正したスペクトル分離法として, 自然対数演算と連続体除去を組み合わせた LCR-CLSU (Log and Continuum Removal-Constrained Least Square Unmixing)が提案されている (Zhao et al., 2019). LCR-CLSU は電磁波の吸収が吸収物質の濃度と電磁波の経路長に正比例するというランベルト・ベールの法則を適用した自然対数演算, および非線形効果を効果的に補正しながら吸収特性を強調できる連続体除去が前処理として実施され, 前処理後のデータを用いて制約付きスペクトル分離を行う. 本研究では, USGS スペクトルライブラリを端成分として, L1 正則化によるスペクトル分離と画像全体の端成分を統一する性質を持つ L2,1 正則化によるスペクトル分離の比較を行った. また, ADMM (Alternating Direction Method of Multipliers : 交互方向乗数法)を計算アルゴリズムに用い, 計算負荷を軽減させた.

4. 結果および考察

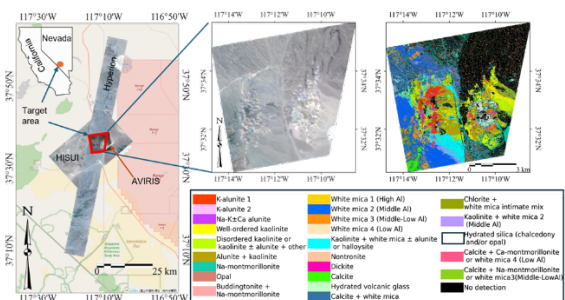
解析結果の一例として, Swayze et al. (2014)に基づくカオリナイトの地表分布と本研究による推定結果を第 2 図で比較する. いずれにおいても, Hyperion 画像による解析結果には線状のノイズが全体に現れているが, HISUI 画像と AVIRIS 画像による解析結果では, ノイズの少ない明瞭なカオリナイト分布が得られた. この結果は, Hyperion 画像の信号雑音比が HISUI 画像や AVIRIS 画像よりも大幅に小さいことに起因する.

一方, HISUI 画像と AVIRIS 画像を用いた解析結果にはカオリナイトなどの一部の鉱物において, 存在量の過小・過大推定の傾向が現れた. L2,1 正則化を用いた結果でも同様であった. カオリナイト抽出の困難さは Veganzones et al. (2014)でも指摘されており, 明礬石やその他の鉱物とカオリナイトの反射スペクトルの吸収パターンが類似していることが原因と考えられる. 他にも画像の不十分な前処理, あるいは衛星画像固有のノイズの影響も原因の可能性もある. Hyperion 画像は, 前処理に関する研究が蓄積されていることから, 不良バンドの除去や大気補正にセンサ情報をより詳細に組み込むことが可能であり, そのためセンサノイズの影響はあるものの, 比較的良好にカオリナイト分布を推定できたと考えられる. よって, 前処理をより精緻化するこ

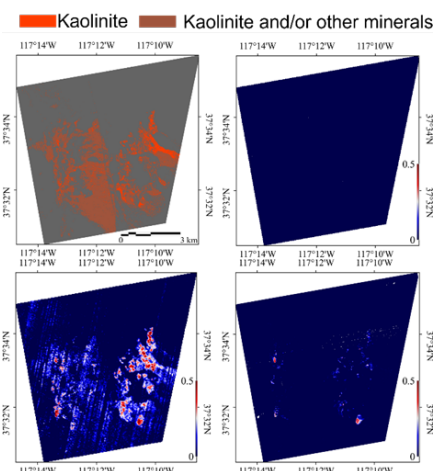
とで HISUI 画像からの推定精度を向上できる可能性はある.

5. まとめ

本研究では, ハイパースペクトル画像を用いて地表面鉱物の識別精度向上を目指し, 新たなスペクトル分離手法を適用した. その結果, 既知の鉱物分布と整合する識別結果が得られたが, 一部鉱物については存在量の過小評価や過大評価が認められた. この要因として, 反射スペクトルの類似性や衛星画像に対する前処理の不十分さが考えられる. これらの要因特定やさらなる改善手法を模索し, より正確な鉱物識別手法を確立することが今後の課題である.



第 1 図 対象地域と解析画像のまとめ. (a) Hyperion, HISUI, AVIRIS 画像データの CIE 1931 等色関数を用いた RGB 画像, (b) 解析対象領域における HISUI データの拡大画像, (c) Veganzones et al. (2014)による地表面鉱物分布図を(b)に重ねた図



第 2 図 Veganzones et al. (2014)に基づくカオリナイトの地表面鉱物分布 (a), および L1 正則化手法によるカオリナイトの地表面鉱物含有率分布 (b: Hyperion, c: HISUI, d: AVIRIS)

- Bioucas-Dias, J.M., Plaza, A., Dobigeon, N., Parente, M., Du, Q., Gader, P., Chanussot, J. (2012) Hyperspectral unmixing overview: Geometrical, statistical, and sparse regression-based approaches. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 5, pp. 354–379.
- 岸本将英・久保大樹・小池克明 (2024) 可視・反射赤外スペクトルからの特徴量選択による複合試料中の端成分鉱物含有率の推定精度向上. *情報地質*, vol. 35, pp. 67–82.
- Swayze, G.A., Clark, R.N., Goetz, A.F.H., Livo, K.E., Breit, G.N., Kruse, F.A., Sutley, S.J., Snee, L.W., Lowers, H.A., Post, J.L., Stoffregen, R.E., Ashley, R.P. (2014) Mapping advanced argillic alteration at Cuprite, Nevada, using imaging spectroscopy. *Economic Geology*, vol. 109, pp. 1179–1221.
- Zhao, H., Zhao, X. (2019) Nonlinear unmixing of minerals based on the log and continuum removal model. *European Journal of Remote Sensing*, vol. 52, pp. 277–293.