

# 衛星画像の反射スペクトル情報に基づく鉱物・地熱資源の存在可能性評価への 新たなアプローチ

小池 克明\*・久保 大樹\*・池内 翔哉\*\*・藤田 佑希也\*\*\*・岸本 将英\*

## New Approaches to Potential Assessments of Mineral and Geothermal Resources based on Reflectance Spectra Information of Satellite Imagery

Katsuaki Koike\*, Taiki Kubo\*, Shoya Ikeuchi\*\*, Yukiya Fujita\*\*\* and Masahide Kishimoto\*

\*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, Kyoto 615-8540, Japan.

E-mail: koike.katsuaki.5x@kyoto-u.ac.jp

\*\*住友商事(株) Sumitomo Corp., Otomachi, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8601, Japan.

\*\*\*INPEX(株) INPEX Corp., Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107-6332, Japan.

キーワード: 植生指数, 斑岩銅鉱床, カオリナイト, 反射率吸収

Key words: Vegetation index, Porphyry copper deposit, Kaolinite, Reflectance absorption

### 1. はじめに

銅、ニッケルなどの金属資源や大規模出力で設備利用率が格段に高い再生可能エネルギーである地熱資源の需要は急増しており、今後ますます必要となる見通しである。一方で新規の鉱床発見は難しくなり、地熱資源の探査と発電可能性評価にも高いコストと長い時間を要するという問題も顕在化している。そのため広域から資源有望域を高精度で絞り込めるリモートセンシング技術の精緻化が一層求められる。そこで筆者らの研究グループでは、衛星画像の反射スペクトル情報を用いて鉱物・地熱資源の存在可能性を評価できる指標の開発を進めてきた。その中で本稿では新たな3つのアプローチを紹介し、それらの有効性と今後の発展性について検討する。

### 2. 植生ストレスの検知と鉱物・地熱資源域への適用

風化によって鉱床から溶出された金属成分が表層の土壌に濃集、あるいは地熱貯留層からの上昇流体によって土壌が酸性化という現象により、植物の生理的活性が阻害され、植生ストレスが生じることが以前より知られている。よって、植生ストレスを従来よりも高精度に検知できれば高植生被覆域でもリモートセンシングによる鉱物・地熱資源探査が可能になることが期待できる。

このアイデアのもと、ストレスによる葉の変色は可視域緑の反射率 $G$ に、および葉の水分量の相違は短波長赤外域(SWIR)での反射率に顕著に現れることを考慮して、従来の正規化植生指数NDVI(可視域赤と近赤外域での反射率 $R$ ,  $N$ との差で、レッドエッジでの反射率増加の程度を表す)に、2つのSWIRバンド(観測波長帯)での反射率と $N$ との差を加えた植生指数VIGSを提案した。黒鉱

床域で知られる秋田県北鹿地域の複数のLandsat ETM+シーンをを用いて、各画素でのVIGSの平均を標準偏差で除した比からトレンド成分を除き、残差成分を求めた。その結果、残差成分に基づく植生ストレスの高異常が鉱床形成に起因した環状構造を示し、黒鉱鉱床や鉱脈型鉱床の多くがそれに含まれるのが明らかになり、VIGSの有効性を確認できた(Hede *et al.*, 2017)。

VIGSはバンド数が限られているマルチスペクトル画像用であるが、バンド数が格段に多いハイパースペクトル画像に拡張したのが次式のVIBS(Kubo *et al.*, 2025)である。式中で $R_x$ は波長 $x$  nmでの反射率、 $m_i$ は $i$ 番目の項のバンド比の平均で $\sigma_i$ はその標準偏差、 $\Delta R_x$ は $x$  nmの前後2バンドの波長を用いた一次微分を表す。

$$VIBS = \left( \frac{R_{2274} - R_{671}}{R_{2274} + R_{671}} - m_1 \right) / \sigma_1 + \left( \frac{\Delta R_{707} - \Delta R_{737}}{\Delta R_{707} + \Delta R_{737}} - m_2 \right) / \sigma_2$$

この式の第1項は水分欠乏によるSWIRでの反射率増加を強調し、第2項はレッドエッジの短波長側への移動、すなわちブルーシフトを強調する。VIBSをインドネシアの地熱地帯Patuhaに適用した結果、高VIBS値は地熱兆候地や断層の分布と調和的であることが確かめられた(第1図)。日本の地熱地帯でも同様の対応関係が見出された。

### 3. 鉱物指数の組み合わせと斑岩銅鉱床域への適用

斑岩銅鉱床は銅の主要な供給源であり、帯状の変質帯構造を示すという特徴がある。チリ・ペルーでの斑岩銅鉱床の熱水変質帯形成の顕著さと鉱床規模の関係を明らかにするために、世界 ASTER 衛星画像データベース GRIAS を用い、熱水変質鉱物として明礬石、カオリナイト、絹雲母、方解石、緑泥石、緑簾石の6種を選び、ASTER画像からこれらの分布を抽出するための鉱物指数

(Ninomiya, 2003)に注目した。これらを ALI, KLI, SRI, CLI, CHI, EDI と表す。銅鉱量と鉱物指数との相関性を求めたところ、主に鉱床中央部に分布する明礬石・カオリナイト・絹雲母は正、主に鉱床辺縁部のプロピライト変質帯に分布する方解石・緑泥石・緑簾石は負の相関性を示した。そこで、正の相関の鉱物指数から負の相関の鉱物指数を引き、これを斑岩銅鉱床指数 PCI と称した。

$$PCI = (ALI + KLI + SRI) - (CLI + CHI + EDI)$$

PCI は主要鉱山付近で高い値を示すとともに、銅鉱量が多いほど概ね増大するという傾向が確かめられた。さらに PCI 値の空間微分から勾配を求めた。その一例として大規模鉱床である Escondida 鉱山周辺での PCI 値と勾配の分布を第 2 図で比較する。PCI 値分布よりも勾配図の方が値のコントラストが大きくなり、急勾配の部分が鉱床主要部の境界に対応するという特徴が見出された。

#### 4. カオリナイトの生成起源の識別と鉱床との関連付け

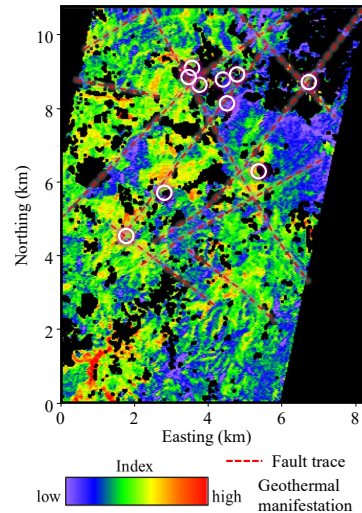
上記のようにカオリナイトは代表的な熱水変質鉱物であるが、風化による生成鉱物でもある。リモートセンシング画像から識別できるカオリナイトの生成起源：熱水変質か風化か、熱水変質であれば鉱床生成に伴うか否かが特定できれば、鉱物・地熱資源探査を精緻化できる可能性もある。このアイデアのもと、風化起源、熱水変質起源で菱刈鉱山などの熱水鉱床に伴う、伴わない地熱地帯での 20 種のカオリナイト試料を収集し、可視～SWIRIでの反射スペクトル測定と XRD 分析を行った。XRD スペクトルからはシェラー式による粒径指標、および回折ピーク強度比に基づく結晶性指標 AGFI を算出した。

解析の結果、Al-OH 吸収が生じる 2200 nm 付近での反射スペクトルの 2 次微分と 3 次微分は試料間で異なり、熱水鉱床起源試料では微分値のピーク高さや積分強度が増加する傾向が見出された。また、風化起源試料の粒径と AGFI は熱水起源よりも概ね小さく、結晶性が弱い。これらの結果に基づき、ピーク高さ、半値全幅、積分強度などをスペクトル指数として用い、これをハイパースペクトル EnMAP 画像に適用した。上記の Escondida 鉱山付近のスペクトル指数分布を第 3 図に示す。これから鉱床を中心に結晶性の高いカオリナイトが存在することが確認できる。風化起源のカオリナイト鉱床付近の EnMAP 画像ではスペクトル指数は全体的に低く、熱水鉱床の識別にカオリナイトに基づく本指数の有効性が示唆された。

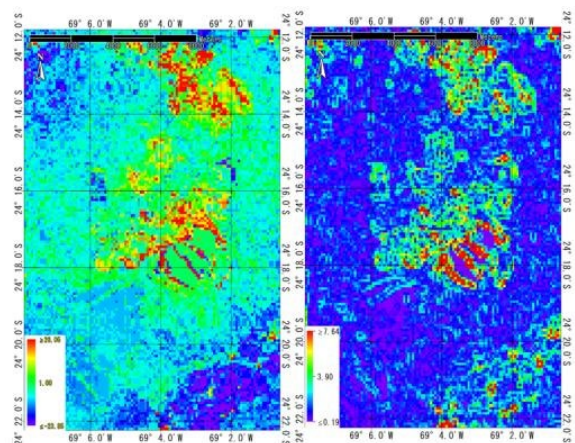
#### 5. まとめ

潜在する金属鉱床や地熱貯留層に起因した植生ストレスを従来よりも高精度で検知できる植生指数、帯状変質帯の各帯の主な鉱物を抽出するバンド比演算を組み合わせた斑岩銅鉱床指数、および熱水鉱床に伴うカオリナイトを識別し、その結晶性を評価するためのスペクトル指数を提案し、マルチおよびハイパースペクトル衛星画像に適用することで 3 つの指数の有効性を実証できた。これらの適用事例を増やし、さらに精度向上を図るのが今後の課題である。

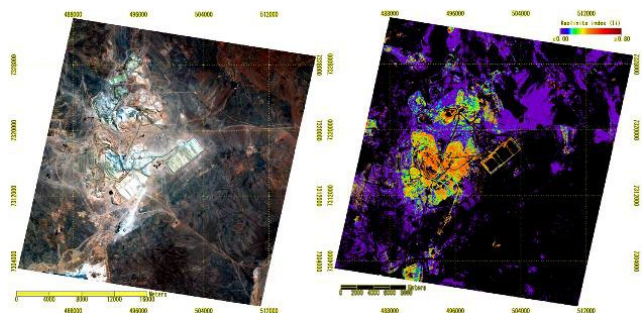
**謝辞:** GRIAS システムをご提供いただいた宇宙システム開発利用推進機構の立川哲史、鉱物指数について種々ご教示いただいた JX 金属探開(株)の三箇智二氏、および鉱山のカオリナイト試料をご提供いただいた北海道大学の米田哲郎名誉教授に深く御礼申し上げます。



第1図 インドネシア Patuha 地熱地帯での VIBS 値の分布 (Kubo *et al.*, 2025; 白丸は地熱兆候地, 破線は断層を表す)



第2図 Escondida 鉱山 (画像中央) 周辺域での PCI 値分布 (左) と勾配図 (右) の比較



第3図 Escondida 鉱山周辺の EnMAP の RGB 画像 (左) とスペクトル指数分布 (右: 寒色から暖色にかけて結晶性が增大する)

#### 文献

- Hede, A. N. H., Koike, K., Kashiwaya, K., Sakurai, S., Yamada, R. and Singer, D. A. (2017) How can satellite imagery be used for mineral exploration in thick vegetation areas?. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol.18, pp.1–13.
- Kubo, T., Gonnokami, H., Hede, A. N. H. and Koike, K. (2025) Combining vegetation index with mineral identification for detection of high-geothermal-potential zones using hyperspectral satellite data. *Geothermics*, vol.125, 103194.
- Ninomiya, Y. (2003) A stabilized vegetation index and several mineralogical indices defined for ASTER VNIR and SWIR data. *Proc. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, vol.3, pp.1552–1554.