

高植被率地域における熱水起源資源推定へのリモートセンシングの適用性

小池 克明*・Arie Naftali Hawu Hede**・久保 大樹*・Asep Saepuloh**・櫻井 繁樹***

Availability of Remote Sensing to Estimating Hydrothermal-Originated Recourses in Thickly Vegetated Areas

Katsuaki Koike*, Arie Naftali Hawu Hede**, Taiki Kubo*, Asep Saepuloh** and Shigeki Sakurai***

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

**バンドン工科大学 Institute Technology of Bandung, Indonesia, Ganesha 10, Bandung 40132, Indonesia.

***京都大学大学院総合生存学館 Graduate School of Advanced Integrated Studies in Human Survivability, Kyoto University, 1 Nakaadachi-cho, Yoshida, Kyoto 606-8306, Japan.

キーワード: 植生指標, 光学センサ衛星画像, 金属鉱床, リニアメント, 熱水流動亀裂

Key words: Vegetation index, Optical sensor satellite image, Metal deposit, Lineament, hydrothermal flow fracture

1. はじめに

熱水に関連した鉱物・エネルギー資源は変質帯形成や熱水流動のパスとなる亀裂を伴う。これらは衛星画像上で変質鉱物特有の反射スペクトル, および直線的な地形的特徴であるリニアメントとして現れることが多いので, 熱水起源資源の一次探査にはこれまで衛星リモートセンシングが広く用いられてきた。しかし, 反射スペクトルの利用は地表に岩石や鉱物が露出していることが前提となり, 必然的に乾燥, 半乾燥地域が対象に選ばれる。よって, 日本のような厚い植生で覆われた地域では地下に潜在する鉱床をリモートセンシングで見出すことは不可能に近い。しかし, 金属鉱床が地表近くに存在すれば植生の種類や生育に影響を及ぼすことが知られている。また, このような地域でも地形に断裂系の特徴を見出すことはできる。そこで本研究では, 高植被率地域における熱水起源資源推定に有効となる植生指標とリニアメント解析法について検討するとともに, 3つのケーススタディによってそれらの有効性の検証を試みた。

2. 植生指標の改良

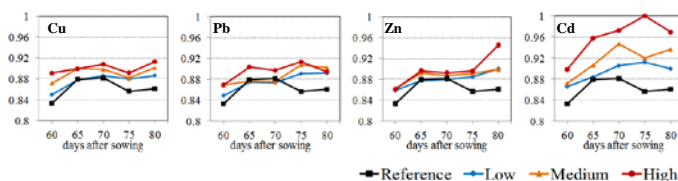
重金属の吸収が植物の生理的活性を阻害し, 葉の未成長や白化などの現象が生じる。このようなストレス負荷や季節変化などに伴う植生の活性度を反射率から定量化するのが植生指標VIである。その中で, 正規化植生指標NDVIがこれまで最も広く用いられてきた。これは可視域赤と近赤外域での反射率(それぞれ R , N と表す)の差に

基づき, レッドエッジでの反射率増加の程度を表す。

さらに, 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での反射率に顕著に現れることを考慮して, 次式のVIを定義し, これをVIGS (Hede et al., 2015) と称した。

$$VIGS = w_1 \left(\frac{G-R}{G+R} \right) + w_2 \left(\frac{N-R}{N+R} \right) + w_3 \left(\frac{N-S_1}{N+S_1} \right) + w_4 \left(\frac{N-S_2}{N+S_2} \right)$$

ここで $w_1 \sim w_4$ は重み係数, S_1, S_2 は2つの短波長赤外バンドでの反射率である。第2項はNDVIに相当する。VIGSの検証として土壌に重金属溶液を含ませ, 溶液濃度を低, 中, 高に分けてコマツナの培養実験を行った (Hede et al., 2015)。Cu, Pb, Zn, Cdを用いた結果, 濃度の高低に整合してVIGS値は増加する傾向が確かめられた (第1図)。NDVIと濃度との関連は, これよりも不明瞭であった。



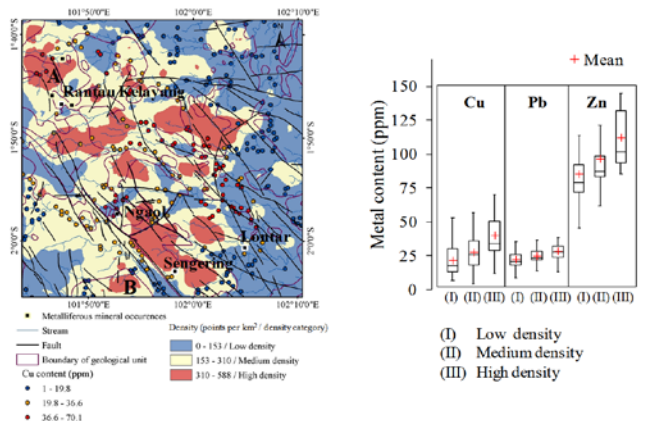
第1図 種蒔きからの経過時間と金属濃度別のVIGS値の変化

3. 熱水起源金属鉱床域へのVIGSの適用

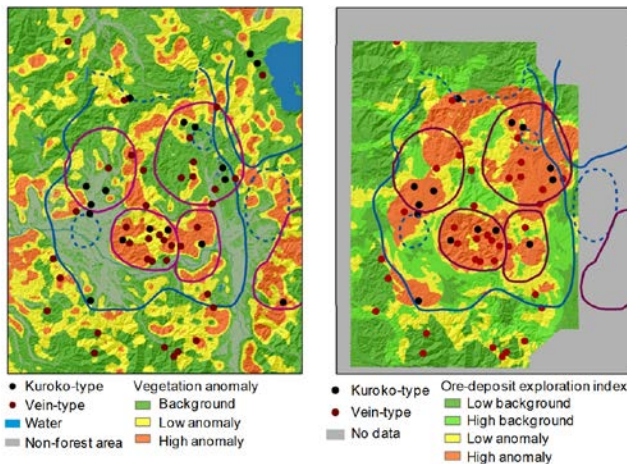
VIGSをまず, スマトラ島中央にある斑岩銅鉱床域 $50 \times 50 \text{ km}^2$ のLandsat ETM+画像に適用した。VIGS値の平均 m と標準偏差 σ から異常値を定義し, 単位面積当たりの

異常値をとる画素数を求め、この密度を低、中、高に区分した。その結果、高密度クラス分布は土壤中のCu、Pb、Zn高濃度部の位置と概ね対応し、各密度クラスでの金属濃度は、密度の順に増加する傾向にあるのが明らかになった(第2図)。当地域の植生の季節変化は小さいため、1シーンの画像からでもこのような妥当な結果が得られた。

次のケーススタディは40×40 km²の北鹿地域(秋田県)であり、ここは黒鉱鉱床が多く分布し、海底火山活動に起因する陥没が環状構造として地形に現れるという特徴がある。植生の季節変化が大きいので、雲量が0%に近い7月~10月の5つのETM+シーンを選択し、各画素でのVIGSのmをσで除した比Zを植生異常検出に用いた。Zの分布から地形効果、スパイク状の急激な変化、トレンド成分を除き、残差成分ΔZのmとσからΔZを通常、低異常、高異常の3つに分類した(Hede et al., 2017)。その結果、高異常が環状構造を示し、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である(第3図)。当地域では重力異常、変質指数、デイサイト溶岩との位置関係などの多変量データ解析に基づいて、鉱床ポテンシャル図が作成されている(鈴木, 2003)。この高異常帯はΔZよりも広く、過大評価されており、特に南部の鉱脈型鉱床との位置的整合性がΔZよりも劣ることが第3図からわかる。これからもVIGSの有効性が確かめられる。



第2図 VIGS 異常値の低、中、高密度クラス分布と各測点での土壤中 Cu 濃度(左)、および各密度クラスでの金属濃度分布(右)

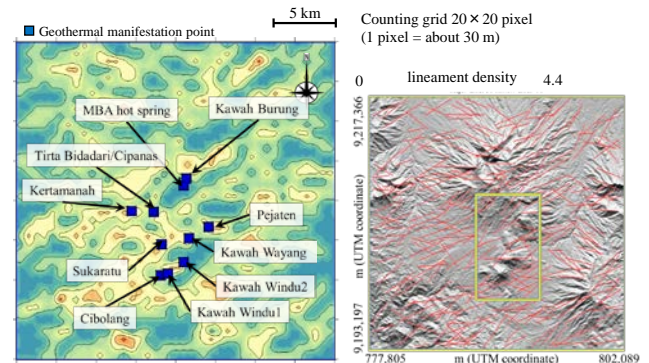


第3図 北鹿地域での VIGS に基づく植生の通常、低異常、高異常クラスの分布(左)と種々の地質データに基づく鉱床存在指標クラスの分布(右)、および黒鉱鉱床・鉱脈型鉱床の位置の重ね合わせ

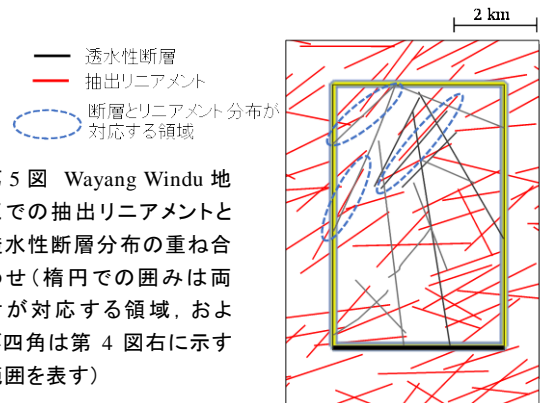
4. リニアメント解析による熱水パス亀裂の推定

リニアメント解析の地熱資源探査への応用としてバンドンの南方35kmに位置し、227MWの地熱発電所が稼働しているWayang Windu地区を対象とした。解析にはデジタル地形モデル (DEM) の多方位陰影データから Segment Tracing Algorithm (STA) によってリニアメントを抽出する手法 (Masoud and Koike, 2001) を適用した。DEMには30mメッシュのSRTM-1を用いた。

リニアメントの抽出結果とその分布密度を第4図に示す。現地で確認されている噴気帯や温泉などの地熱兆候地の分布を密度図に重ねると、その多くがリニアメントの密集部と対応していることがわかる。また、地形判読やボーリング調査によって分布が推定されている透水性断層と抽出されたリニアメントを重ねると、北東-南西走向の断層と特に良い対応が見出される(第5図)。透水性断層は地熱貯留層の形成に寄与する要素であり、これをDEMデータなどの広域情報から簡便かつ精度良く特定できれば、地熱発電のための生産井の配置に適した蒸気スポット抽出に大きく貢献することが期待できる。



第4図 Wayang Windu 地区での多方位 DEM 陰影データからのリニアメント(右)、およびその密度と地熱兆候地の重ね合わせ(左)



第5図 Wayang Windu 地区での抽出リニアメントと透水性断層分布の重ね合わせ(楕円で囲みは両者が対応する領域、および四角は第4図右に示す範囲を表す)

5. まとめ

高植被率の地域でも VIGS によれば斑岩銅鉱床や黒鉱床などに起因した植生ストレスを見出すことができ、STA によるリニアメント解析で地熱貯留層からの熱水パスに関連する亀裂を抽出できる可能性を示した。

文献

Hede, A. N. H., Kashiwaya, K., Koike, K., and Sakurai, S. (2015) *Remote Sensing of Environment*, vol. 171, pp. 83-97.
 Hede, A. N. H., Koike, K., Kashiwaya, K., Sakurai, S., Yamada, R. and Singer, D. A. (2017) *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol. 18, doi:10.1002/2016GC006501.
 Masoud, A. A. and Koike, K. (2011) *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 66, no. 6, pp. 818-832.
 鈴木徹 (2003) *資源と素材*, vol. 119, nos. 4/5, pp. 149-154.