

衛星画像からの地熱変質帯の抽出と熱水パス推定への応用

内倉 里沙*・柏谷 公希*・多田 洋平*・久保 大樹*・小池 克明*・櫻井 繁樹**

Extraction of Hydrothermal Alteration Zones from Satellite Imagery with Application to Estimation of Fluid Paths

Risa Uchikura*, Koki Kashiwaya*, Yohei Tada*, Taiki Kubo*,
Katsuaki Koike* 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 : uchikura.risa.65e@kyoto-u.ac.jp (Uchikura)

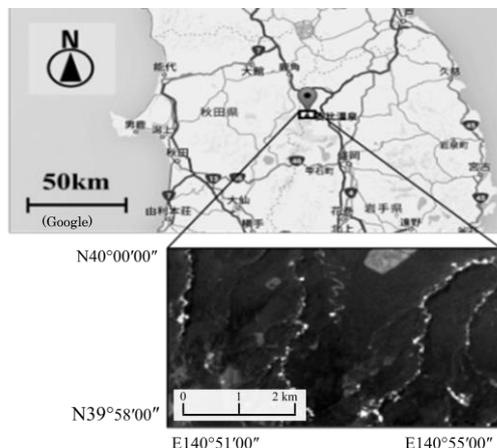
** 京都大学大学院総合生存学館総合生存学専攻 Graduate School of Advanced Integrated Studies in Human Survivability, Kyoto University, 1 Yoshida-Nakaadachi-cho Sakyo-ku, Kyoto 606-8306, Japan.

キーワード：安比地区, 熱水変質鉱物, ISODATA 法, Landsat 8 号画像, リモートセンシング

Key words: Appi area, Hydrothermal alteration mineral, ISODATA method, Landsat 8 image, Remote sensing

1. はじめに

米国, インドネシアに次ぐ世界第三位の地熱資源保有国である我が国において, 近年, 地熱発電は持続可能なエネルギーとして注目されている. しかし, 我が国は豊富な地熱資源を保有しているにも関わらず, 地熱発電としての利用はその探査コストと開発リスクのために限られている. 地熱開発の促進のためには, 地熱発電に適した場所の特定, および地熱資源胚胎のポテンシャル評価を低コストで行い, 大規模熱水系の存在に関連する地表兆候を的確に見出すことが重要となる. ところが, 火山地帯では火口周辺以外は地表が植生に覆われており, 地表兆候を露頭調査で見出すことは困難である. ここに広域地球観測法である衛星リモートセンシングの適用が考えられる.



第 1 図 モデルサイトとした岩手県八幡平市安比地区と Landsat 8 号画像

地下の熱源から亀裂を通して熱水のパスがあり, 熱水が地表近くまで上昇すると, 地表面の鉱物組成は熱水の温度と化学組成に影響を受ける (van der Meer *et al.*, 2014). これらの変質鉱物は特定の波長帯で反射率の吸収を起こすため, 衛星画像から地表面の熱水変質鉱物を抽出することが可能となる.

これらの背景をもとに, 本研究では地熱資源探査の初期段階として, リモートセンシング技術を用いた広域における地表面の熱水変質帯を抽出し, 地熱発電の有望地域を特定できる技術の開発を目的とした.

2. 対象地域

本研究では, 岩手県八幡平市に位置する安比温泉を含む南北約 3.7km, 東西約 5.7km の領域を対象に選んだ. 安比地区は地熱発電の有望サイトとして, 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) により調査が進められている. この領域を含む, 2015 年 8 月 6 日に撮影された Landsat 8 号画像を用いて大気補正と地形補正を行った後, 熱水変質帯の抽出のために教師なし分類法による画像分類を行った. また, 現地調査により採取した岩石試料の X 線回折分析 (XRD) により, 鉱物組成を明らかにした.

3. 解析手法

3.1 衛星画像データの地形補正

山間部の地形による衛星画像のコントラストの差を軽減するために, C 補正を適用して地形補正を行った. ここで, θ_p : 傾斜, θ_z : 太陽天頂角, ϕ_a : 太陽方位角, ϕ_o : アスペクト角とすると, 斜面の照度 IL は

$$IL = \cos \theta_p \cos \theta_z + \sin \theta_p \sin \theta_z \cos(\phi_a - \phi_o) \quad (1)$$

と表される. 式(1)と式(2)を用いて, 傾斜面の放射輝度 L_T を水平面の放射輝度 L_H に変換する.

$$L_H = L_T \left(\frac{\cos \theta_z + c_k}{IL + c_k} \right) \tag{2}$$

$$c_k = \frac{b_k}{m_k}, \quad L_T = b_k + m_k IL$$

3.2 画像分類法

対象を K 個のクラスに分類する K-means 法の一つである ISODATA 法 (Ball and Hall, 1965) を用いて画像分類を行った。

$\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_N]^T$ で N 次元特徴空間に属するデータセットに対して、初期クラス数を K_0 として各バンドのクラスごとの平均ベクトルを無作為に割り振り、各ピクセルを最も距離が近いクラスに分類する。クラスに属するピクセル数がしきい値未満の場合、そのクラスの平均ベクトルを消去して再度分類を行う。次に、分類されたピクセルからクラスの平均ベクトルを計算する。これらの操作でクラス数が増減し、 $K \leq \frac{K_0}{2}$ となり、クラス内の分散が閾値を超える場合はクラスを 2 つに分割する。あるいは、 $K > 2K_0$ となり、クラス間の平均ベクトルの距離が小さければ、それらのクラスを一つにまとめる。分類には OLI センサによる可視域から短波長赤外域のバンド 1 ~ 7 のデータを用いた。

4. 結果と考察

ISODATA 法ではクラス数の設定も重要となる。分類結果と既往の表層地質図との対応を基準にしたところ、クラス数 5 で良い対応がみられたので、これによる分類結果を以下で用いた。分類結果を第 2 図、各バンドのクラス別平均 DN (画素の輝度レベル) を第 3 図に示す。岩石試料の XRD 結果 (第 1 表) からは代表的な熱水変質鉱物の一種である曹長石や緑泥石 (Henley and Ellis, 1984) の存在が確認でき、深部から浅部に連続した熱水系の発達が存在する可能性が示唆された。

可視域であるバンド 1 ~ 4 の DN においてはクラス間の差は小さく、近赤外域 (波長範囲 0.845 ~ 0.885 μm) のバンド 5 と短波長赤外域 (同 1.56 ~ 1.66 μm) のバンド 6 に差が現れている。近赤外では植生の反射率が最も大きくなるので、植生に関連するバンド 5 と 6 での DN の大小関係が分類結果に強く影響していると考えられる。そこで、植生の被覆密度や活性度の目安として正規化植生指標 (NDVI) を求めた (第 4 図) と、斜面域の NDVI の差が大きかった。

第 1 表の変質鉱物を含む露頭は、クラス 1 と 2 に分類された。水酸基を含む熱水変質鉱物はバンド 7 で反射率が低下するので、このこととクラス 1, 2 における DN の特徴は整合的である。また、第 2 図のクラス分布と第 4 図の NDVI マップとを比較すると、NDVI が低い領域の大部分が、クラス 1, 2 と対応することが見出せる。熱水変質帯や噴気帯が存在すると、地熱ガスや土壌の酸性化により植生密度や活性度が低下することが考えられる。よって、河川を除くクラス 1, 2 の領域で、NDVI が特に小さい領域には、熱水パスが存在する可能性が示唆される。熱水系の存在と植生状態との関係をさらに明確にするためには、植物の成長を左右する、標高差・傾斜による日照の程度や大木類の他感作用など、地熱以外の影響も考慮する必要がある。

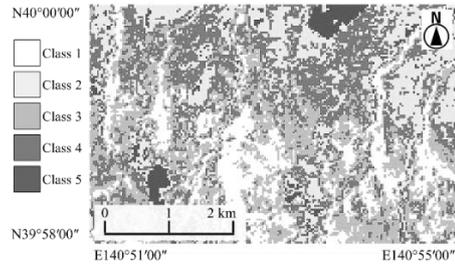
5. まとめ

ISODATA 法による Landsat 8 号画像分類と岩石試料の

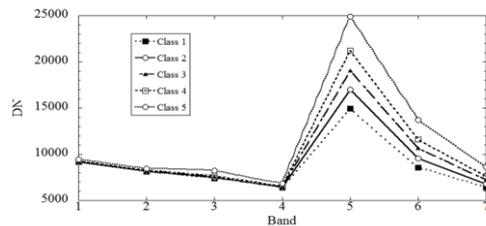
XRD 分析により、ISODATA 法による分類結果と熱水変質鉱物の反射スペクトルとの類似性と、植生指標の小ささが熱水変質帯の抽出に有効であることが示唆された。画像の分類精度を向上させるために、主要鉱物の反射スペクトルを教師データとし、地表面の熱水変質鉱物と、そこにノイズとして加えられた植生の影響を分離する、あるいは植生を熱水変質帯存在の指標の一つとして利用する手法の開発を行う予定である。

文 献

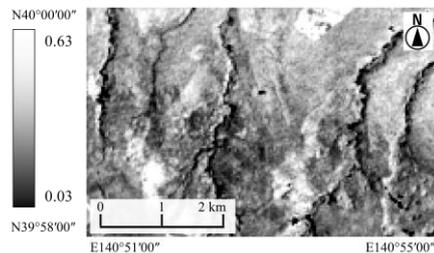
Ball, G. H. and Hall, D. J. (1965) ISODATA a Novel Method of Data Analysis and Pattern Classification. *Stanford Research Institute*, pp.32-41.
 Henley, R. W. and Ellis, A. J. (1984) Geothermal Systems Ancient and Modern: A Geochemical Review. *Earth-Science Reviews*, vol.19, pp.1-50.
 van der Meer, F., Hecker, C., van Ruitenbeek, F., van der Werff, H., de Wijkerslooth, C. and Wechsler, C. (2014) Geologic remote sensing for geothermal exploration. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol.33, pp. 255-269.



第 2 図 ISODATA 法を用いた教師なし分類結果



第 3 図 クラス別平均 DN



第 4 図 NDVI による植生指標マップ

第 1 表 XRD によって同定された鉱物

化学式	鉱物名
$\text{Mg}_{2.5}\text{Fe}_{1.65}\text{Al}_{1.5}\text{Si}_{2.2}\text{Al}_{1.8}\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	緑泥石
$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	曹長石
FeS_2	黄鉄鉱
SiO_2	石英
$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$	カオリナイト
$(\text{Na}_{0.58}\text{K}_{0.42})(\text{Al}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6)$	ソーダ明礬石