

ハイパースペクトル衛星画像解析とラドン測定による 高植生被覆地域での地熱流体上昇地点の絞り込み

久保 大樹*・権守 宏明*・Mohamad Nur Heriawan**・Irwan Iskandar**・小池 克明*

Specification of upflow points of geothermal fluids in highly vegetated area by hyperspectral satellite imagery analysis and radon survey

Taiki Kubo*, Hiroaki Gonnokami*, Mohamad Nur Heriawan**, Irwan Iskandar** 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)

**バンドン工科大学, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No.10, Lb. Siliwangi, Cobleng,
Kota Bandung, Jawa Barat 40132, Indonesia.

キーワード：熱水変質，リニアメント，リモートセンシング，スペクトル分解，植生指標

Key words: Hydrothermal alteration, Lineament Remote sensing, Spectral unmixing, Vegetation index

1. はじめに

地熱地帯では地熱貯留層に繋がる透水性亀裂を通して地熱流体が上昇することにより、温泉や噴気などの地熱兆候地が生じる。また、熱水や蒸気によって変質した岩石の分布も、地熱系の広がりや過去の活動履歴を把握するのに重要な情報となる。そのため地熱資源探査の広域概査において衛星リモートセンシングは極めて有効な手段となる。しかしながら植生の厚い地域では、衛星搭載型光学センサの空間分解能の制限から、衛星画像の1ピクセル中に植生などの複数の地表物質の情報が混在し、目的とする変質鉱物の情報を抽出するための画像処理法が必要となる。またピクセルの大部分を植生が占める場合には、その下に分布する地形や地質の情報を取得することは困難である。

そこで本研究では、厚い植生で覆われた地熱地域から地熱兆候地を抽出することを目的とし、波長分解能の高い衛星画像を用い、変質鉱物および植生の分光反射特性を利用する2つの手法を植生被覆量に応じて適用した。さらに、地熱流体の上昇に伴って濃度が増加すると考えられる地殻ガス中のラドン濃度と組み合わせることにより、地熱流体パスを形成している亀裂分布の特定を試みた。

2. 測定地域とデータの概要

本研究では、インドネシア国内の代表的な地熱兆候地域である西ジャワ州の Patuha 地熱地域（以下、PaGF）を対象とした。PaGF では、Patuha 山山頂付近に噴気帯や mud pool を伴う火口湖の Kawah Putih が存在する。他にも複数の温泉や噴気帯が確認されており、明礬石やカオリナイトで主に構成される熱水変質帯が広く分布する。また山地の大部分は樹木で覆われ、平地では茶などのプランテーション農業が盛んな高植生被覆地熱地域である（第1図）。

解析には衛星搭載型ハイパースペクトルセンサ Hyperion により撮影された衛星画像を用いた。Hyperion は資源探査で広く用いられるマルチスペクトルセンサ画像に比べて波長分解能が高く、356–2577 nm の波長域に 242 もの連続するバンドを有する。本解析で用いたシーンは、2003年1月10日撮影の path : 122, row : 65 で、雲量は 0% である。

3. ハイパースペクトル画像解析

ノイズ除去を含む前処理を施した Hyperion 画像に対し、SMACC を用いて各画素の反射スペクトルを構成する端成分を特定し、それらを教師データとして代表的なスペクトル分離法である線形分離法 (LSU) を適用した。ここで得た植生スペクトルの重み係数に閾値を設定することで、対象地域を植生域と非植生域に分類した。

生育環境のストレスを受けた植生は反射スペクトル異常を示すことが知られており、720 nm 付近の急激な反射率増加であるレッドエッジが短波長側に移動するというブルーシフト、可視域のクロロフィル吸収帯における反射率増加、および近赤外・短波長赤外域での反射率増加が現れる。一方で Hyperion 画像では植生の種類や斜面方向の違いによっても反射スペクトルは変化し、特に可視・近赤外域におけるこれらの影響は顕著である。そこで本研究では、ブルーシフト、および短波長赤外域での反射率増加を強調する新規植生指数 (VIBS: Vegetation Index considering Blue shift and Shortwave infrared) を考案し、次式のように定義した。

$$\text{VIBS} = \left(\frac{\rho_{2274} - \rho_{671}}{\rho_{2274} + \rho_{671}} - m_1 \right) / \sigma_1 + \left(\frac{\Delta\rho_{707} - \Delta\rho_{737}}{\Delta\rho_{707} + \Delta\rho_{737}} - m_2 \right) / \sigma_2 \quad (1)$$



第1図 Patuha 地熱地区 (PaGF) の位置 (左)、地熱発電所と代表的な噴気帯である Kawah Putih (右)。

ここで m_1 , σ_1 は $\frac{\rho_{2274}-\rho_{671}}{\rho_{2274}+\rho_{671}}$ の平均と標準偏差, m_2 , σ_2 は $\frac{\Delta\rho_{707}-\Delta\rho_{737}}{\Delta\rho_{707}+\Delta\rho_{737}}$ の平均と標準偏差を表す. 対象地域内の植生域では VIBS により植生異常帯を抽出, 非植生域では LSU により変質鉱物の重み係数から熱水変質帯を抽出した.

植生域での VIBS 値, 非植生域でのカオリナイトの重み係数分布を, 同地域の熱水流動モデルと合わせて第 2 図で比較する. 第 2 図(a)の赤色で示す地域は地熱兆候が地表付近に現れていることを示唆し, 黒円で示した地熱兆候地の多くがこれに整合する. また第 2 図(b)には, Kawah Putih では地熱貯留層から鉛直方向に上昇する熱水が供給されており, その熱水が標高 1500~2000 m の領域で北西方向(図中の B)へ水平に流れていることが確認できる. 比較的高温の温泉である Cimanggu や Walini では, この湧出により植生がストレスを受け, 顕著な反射スペクトル異常を起こしていると考えられる. 一方で, 解析結果でも Cimanggu や Walini に対応する箇所で広範囲に植生異常帯と熱水変質帯が抽出されており, これらの結果は地質情報と整合的である.

また, VIBS 値の高い領域は対象領域の既知の断層上に部分的に重なっていることから, 断層全体ではなくその一部が高透水性のパスとして機能している可能性が示唆される.

4. 熱水上昇地点の推定

ハイパースペクトル画像解析によって得られた地表の地熱兆候を他種の解析結果と組み合わせることにより, 熱水上昇地点の抽出を試みた.

まず, インドネシア地理空間情報局によって公開されている解像度 7 m の数値地形モデル『DEMNAS』から多方位陰影図を作成し, 線素追跡アルゴリズム (STA : Masoud and Koike, 2011) を適用することでリニアメント抽出を行った (第 3 図). 得られたリニアメント分布図から, グリッド間隔 400 m の密度分布マップを作成し, ハイパースペクトル画像の解析結果と比較する. その結果, カオリナイト指数が高い値を示す対象地域北東部はリニアメント分布密度の大きい領域と一致していることがわかり, 深部からの地熱流体の流動経路となる透水性亀裂の存在が示唆された.

また, PaGF では 2020 年 7 月より, 半導体型ラドン測定器である RAD7 (DURRIDGE 社) を用いた地殻ガス中のラドン濃度のモニタリング測定を継続的に実施している. 計測箇所は 17 点で, 温泉など既知の地熱兆候点や断層交点などに深度約 2 m の計測井を設置した. 全測点での平均ラドン濃度は約 2500 Bq/m³ であり, 同じく西ジャワ州の主要な地熱地帯である Wayang Windu 地熱地域と比較すると半分程度の値を示している (Heriawan *et al.*, 2020). ラドン濃度の分布は, 対象領域北部の温泉地帯周辺が全体平均よりも高い値を示しており, これはハイパースペクトル画像解析やリニアメント抽出の結果と整合的である. 以上の結果をまとめると, PaGF においては領域北部が主要な地熱流体上昇域である可能性が高い.

5. まとめ

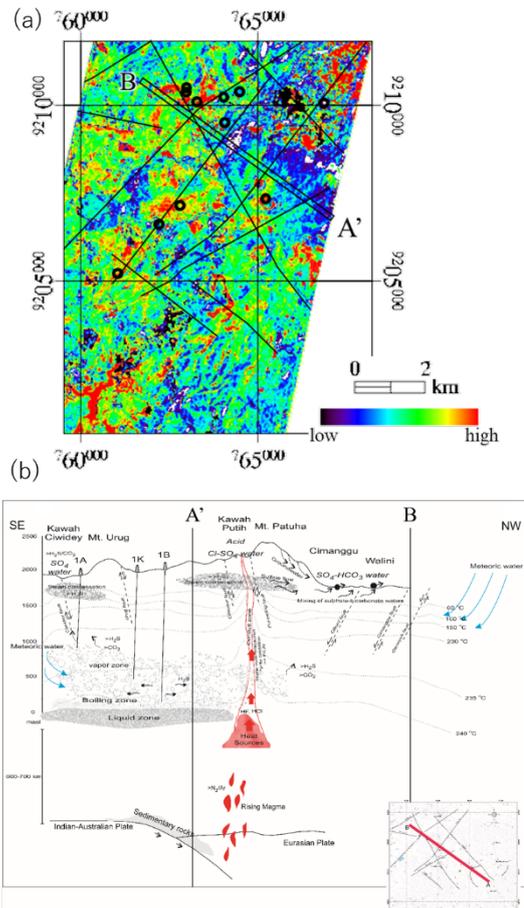
本研究では, 衛星画像解析により植生の厚い地域での地熱兆候地を高精度に抽出することを目的とし, 植生の反射スペクトル異常を強調する新規の植生指数 VIBS を考案し, その有効性を検証した. VIBS と LSU を統合した解析により抽出した地点は多くの既知の地熱兆候地と一致し, 同地域の熱水流動モデルとの比較からも, 地質情報に整合していることが確認できた. さらにリニアメント抽出やラドン濃度測定の結果との統合により, 対象地域北部が主要な地熱流体の上昇域であることが示唆された.

文献

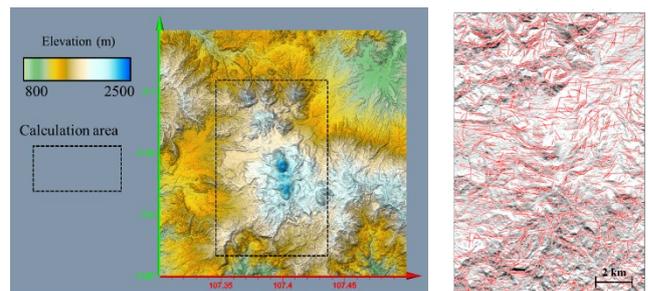
Heriawan, M. N., Syafi'i, A. A., Saepuloh, A., Kubo, T. and Koike, K. (2020) Detection of near-surface permeable zones based on spatial correlation between radon gas concentration and DTM-derived lineament density. *Natural Resources Research*, <https://doi.org/10.1007/s11053-020-09718-z>.

Masoud, A. and Koike, K. (2011) Auto-detection and integration of tectonically significant lineaments from SRTM DEM and remotely-sensed geophysical data. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 66, no. 6, pp. 818–832.

Rahayudin, Y., Kashiwaya, K., Tada, Y., Iskandar, I., Koike, K., Atmaja, R. W. and Herdianita, N. R. (2020) On the origin and evolution of geothermal fluids in the Patuha Geothermal Field, Indonesia based on geochemical and stable isotope data. *Applied Geochemistry*, vol. 114, pp. 1–13.



第 2 図 PaGF における解析結果 (a) VIBS 値およびカオリナイトの重み係数分布 (黒円は既知の地熱兆候地) と (b) Rahayudin *et al.* (2020) による熱水流動システムの概念図.



第 3 図 DEMNAS による PaGF の地形図 (左) と抽出されたリニアメント分布 (右) .