

植生リモートセンシングを用いたカルデラ地形における地熱構造の推定

宮崎翔*・福田直也*・久保大樹*・小池克明*

Estimation of Geothermal structure Using Vegetation Remote sensing in a Caldera topography

Kakeru Miyazaki*, Naoya Hukuta*, 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, Kyoto 615-8540, Japan.
Email: miyazaki.kakeru.77x@st.kyoto-u.ac.jp

キーワード：ハイパースペクトル画像, 植生指数, 地熱資源探査, HISUI

Key words: hyperspectral image, vegetation index, geothermal exploration, HISUI

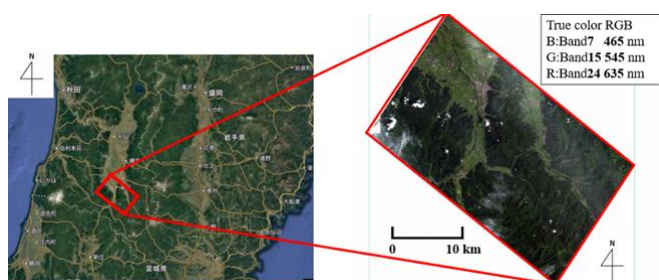
1. はじめに

日本の地熱資源量は 2,347 万 kW と世界第 3 位の地熱ポテンシャルを持ち、再生可能エネルギーとしての活用が期待されている。しかし、地熱発電設備容量は 2022 年 4 月時点で 51 万 kW と世界第 10 位にとどまっている(経済産業省, 2022)。地熱資源の利用が進んでいない一因として、調査・開発コストの高さがあげられる。その改善策として低コストかつ広域的な解析が可能な衛星リモートセンシングの活用が考えられる。しかしながら、日本の地熱地域の多くは植生に覆われており、衛星画像によって直接的に地表物性を解析することは困難である。

そこで本研究では、断層をパスとして上昇したガスや、地温・土壌の変質が植生に及ぼす影響に着目し、植生異常から地下に潜在する熱源の位置と広がりを見極めることを試みた。特に国内において地熱開発有望地となるカルデラ域に注目した。陥没型カルデラはその構造から中心部は堆積層に覆われて地熱兆候が少ないが、外縁部には断層が地表近くまで到達し、地熱兆候が現れている、という不均質な構造を示すことが想定される。植生リモートセンシングを用いてその不均質な地熱構造を捉える手法について検討した。また、植生の種類の違いや地形が本手法の有効性に及ぼす影響についても検討した。

2. 解析対象地域

本研究では秋田県湯沢市を解析対象に選んだ(第 1 図)。本地域は三途川カルデラと呼ばれる南北 20 km、東西 10 km



第 1 図 秋田県湯沢市南部と HISUI データの解析範囲

に及ぶ大規模な陥没型カルデラに位置しており、複数の地熱発電所が稼働しているという活発な地熱地域である。特に解析範囲南部に位置する上の岱・下の岱地域周辺の地熱域に注目した。南側に位置する上の岱地域では、多数の噴気帯や温泉が存在し、上の岱発電所が稼働するなど活発な地熱活動が確認されている。一方、北側の下の岱地域では、地表に明瞭な地熱兆候がほとんど見られないという不均質な地熱構造となっている。

3. 解析手法

3.1 植生指数

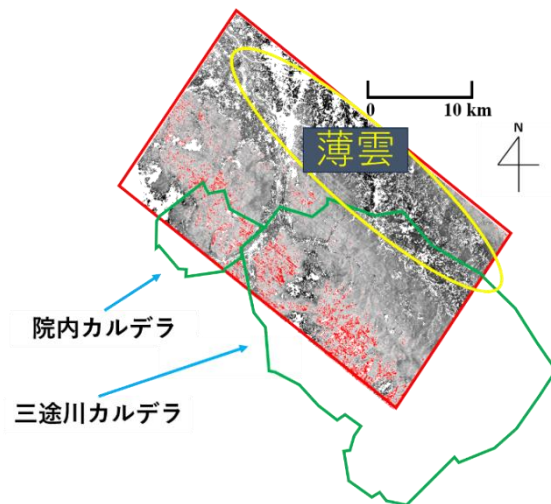
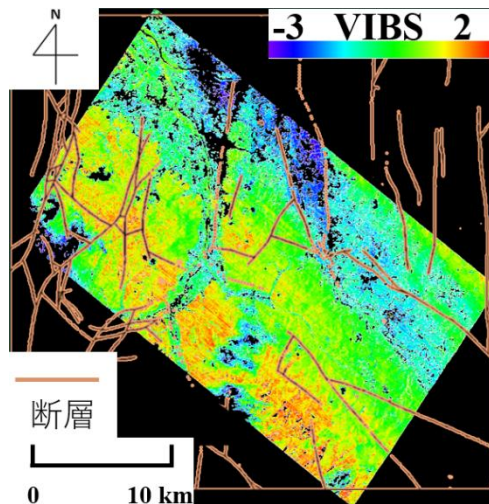
衛星画像として、ISS の日本実験棟「きぼう」に搭載されているハイパースペクトルセンサ HISUI (Hyperspectral Image SUite) の画像を用いた。HISUI データに、放射校正・大気補正・不良バンド除去・ノイズ除去・植生域抽出などの前処理を行った後に、植生ストレスの大小を評価する植生指数である VIBS (Vegetation Index considering Blue shift and Shortwave infrared: Kubo et al., 2025) を適用した。VIBS は式(1)によって求められる。ここで ρ_x は x nm の波長における反射率、 m_i は i 番目の項のバンド比の平均で σ_i はその標準偏差を表す。 $\Delta\rho_x$ は x nm の前後 2 バンドの波長を用いて一次微分を求めたものである。

$$\left(\frac{\rho_{2274} - \rho_{675}}{\rho_{2274} + \rho_{675}} - m_1 \right) / \sigma_1 + \left(\frac{\Delta\rho_{707} - \Delta\rho_{737}}{\Delta\rho_{707} + \Delta\rho_{737}} - m_2 \right) / \sigma_2 \quad (1)$$

植物は水分の欠乏により短波長赤外域 (SWIR) 全体で反射率が増加する (Yu et al., 2000)。VIBS の第 1 項は SWIR の長波長側のピークにおける反射率の強調を目的とする。波長 2274 nm は水分子による電磁波吸収に敏感なバンドである。 $(\Delta\rho_{707} - \Delta\rho_{737}) / (\Delta\rho_{707} + \Delta\rho_{737})$ の部分はブルーシフトと呼ばれる現象を強調する。ブルーシフトとは、植生がストレスを受けた際に生じる変化で、レッドエッジと呼ばれる 720nm 付近の反射率の急激な増加が短波長側、つまりブルー側へ移動する現象であり、クロロフィルの減少などが原因とされている (Rock et al., 1988)。

3.2 VIBS の解析対象地域への適用性

VIBS はインドネシアの地熱地域を対象として実験的に



第2図 (a)VIBS 値の分布と産総研地質 Navi による断層の重ね合わせ、および(b)VIBS 値の上位 5% 分布 (赤) とカルデラとの位置関係

求められた指標である。日本で適用する場合、その他の要因が VIBS の値に影響を与える可能性がある。そのため、インドネシアと異なる植生、および解析対象が山岳域であることを考慮し、異なる植生 (ブナ、ミズナラ、スギ・ヒノキ) の分布域ごとの VIBS 値を集計した結果、有意な差はみられなかった。次に HISUI 付属の DEM データに基づく標高や傾斜方位・傾斜量と VIBS 値にも有意な相関はなかった。よって、本地域における VIBS 分布は、植生の種類や地形にはよらず、地熱システムを反映するものと考えられる。

4. VIBS の適用結果および考察

VIBS 適用結果と産総研地質図 Navi による断層分布との重ね合わせを第2図(a)に示すが、断層と VIBS 値の高い部分が整合的であることがわかる。これより断層をパスとして地下深部から地熱流体が上昇し、地表の植生に熱的・化学的なストレスを及ぼしていることが示唆される。第2図(b)では VIBS 値の上位 5% と特に高い部分に該当する高ストレス域を強調し、カルデラ地形との位置関係を示す。VIBS 値の高い部分は院内カルデラと三途川カルデラの外縁部に広く分布する傾向が見られた。これはカルデラ地形での地熱兆候は外縁部に限られるという上記の特徴に合致する結果である。

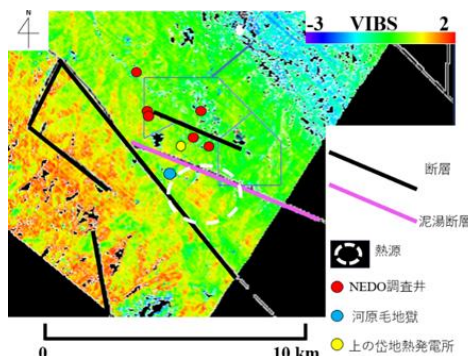
本研究で特に注目する上の岱・下の岱地域付近の VIBS 値分布を第3図に示す。黒色の領域は非植生域として除外した箇所である。泥湯断層を境として VIBS 値の低い北東部と高い南西部に区分されるという明瞭なコントラストが現れている。この要因として、断層と下の岱地域付近の湖底堆積層である三途川層の存在が考えられる。本地域の深部に

は MT 比抵抗構造から熱源の存在が推定されており (Ishizu et al., 2021), 付近の断層をパスとし地表まで地熱流体が上昇している可能性がある。すなわち、第3図南西部には断層が地表近くまで連続し、それらを流動パスとする地熱流体が地表の植生にストレスを及ぼすことで高い VIBS 値となったと考えられる。これに対して北東部は透水性の低い三途川層に覆われているため、地熱流体が地表近くまで上昇できず、低植生ストレスの低い VIBS 値となる。

以上により、植生指数 VIBS を用いた植生リモートセンシングによって、植生の種類や地形特徴の違いによる影響を軽減させながら、カルデラ特有の不均質な地熱構造を把握できる可能性が示された。

文 献

- Rock, B. N., Hoshizaki, T., and Miller, J. R. (1988) Comparison of in situ and airborne spectral measurements of the blue shift associated with forest decline. *Remote Sensing of Environment*. 24(1), 109–127.
- Ishizu, K., Ogawa, Y., Nunohara, K. et al., (2022) Estimation of spatial distribution and fluid fraction of a potential supercritical geothermal reservoir by magnetotelluric data: A case study from Yuzawa Geothermal Field, NE Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(2), e2021JB022911.
- 経済産業省: 地熱資源開発の現状について
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shigen_nenryo/pdf/022_04_00.pdf (accessed 2025-05-29)
- 産総研地質図 Navi
<https://gbank.gsj.jp/geonavi/geonavi.php> (accessed 2025-01-26)
- 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*, 125, 103194
- Yu, G. R., Miwa, T., Nakayama, K., Matsuoka, N. and Kon, H. (2000) A proposal for universal formulas for estimating leaf water status of herbaceous and woody plants based on spectral reflectance properties. *Plant Soil*, 227, 47–58.



第3図 上の岱・下の岱地域の VIBS 値の分布