

地熱資源探査とモデリングへの数理・情報地質学の貢献

小池 克明*・富田 昇平*

Contribution of Geomathematics and Geoinformatics to Geothermal Resource Exploration and Modeling

Katsuaki Koike* and Shohei Albert Tomita*

*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

キーワード：地温，地球統計学，機械学習，リモートセンシング

Key words: Subsurface temperature, Geostatistics, Machine learning, Remote sensing

1. はじめに

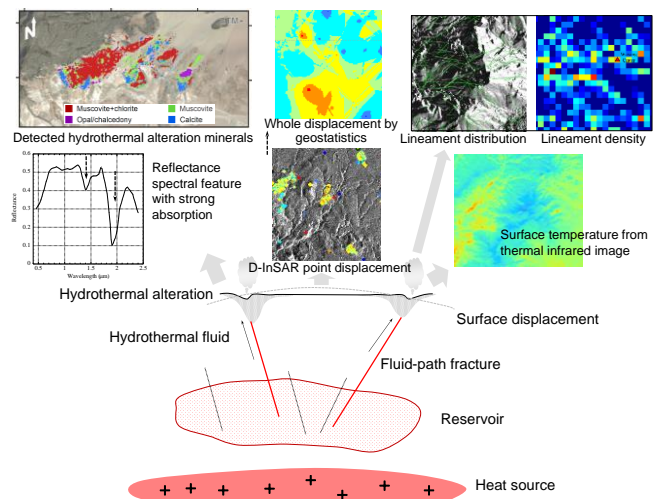
Springer 社は種々の分野での Encyclopedia シリーズを出版しており，数理地球科学でも Sagar ら 4 氏をエディターとして，Encyclopedia of Mathematical Geosciences の編集が進められている．これに数理地球科学を網羅する数多くのトピックスが選ばれ，既に一部はオンライン出版されている (<https://doi.org/10.1007/978-3-030-26050-7>)．筆頭著者は「Rock Fracture Pattern and Modeling」と「Geothermal Energy」の執筆を担当し，前者はオンライン掲載され，後者は受理後，印刷中である．「Geothermal Energy」では地熱資源の探査とモデリングのために，①地熱系での地質と地温分布，②リモートセンシングによる地表温度・熱水変質鉱物分布・断裂系分布・地表変位，③熱水流動解析に焦点を当て，これらへの数理・情報地質学の応用について述べた．本稿では，第1図に概要を示す②を中心として簡単に内容を紹介します．③は Tomita *et al.* (2020) のような数値シミュレーションであり，地質，物性，亀裂の適切な分布モデル構築が重要になる．これに空間モデリング法を応用するが，本稿では省略する．

2. 地質と地温分布の3次元モデリング

地熱システム解明の一つに，ボーリング柱状図を用いた地質分布，検層データを用いた地温分布の推定があげられる．前者の例として，地質データを年代と岩相によって分類し，カテゴリーデータをバイナリーデータに変換するとともに，そのデータセットの空間モデリングから各地質の出現確率を求めることが行われている．各点で出現確率が最大となる地質を選ぶことで地質分布モデルを作成できる．これにより，断層の位置と形状，貯留層の分布などを推定できるようになる．

後者に用いられる方法は地球統計学，ベイズ推論 (Ishitsuka *et al.*, 2021)，深層学習型ニューラルネットワーク (DNN) などの機械学習 (Koike *et al.*, 2001) である．

DNN の応用として，各検層データの位置情報に加え，地温勾配，キュリー点深度などを入力データに用い，日本全域の標高-5000 m までの地温分布を推定した例があげられる．対象領域の大きさに比べてデータ密度が格段に小さく，深度範囲も短いというスパースなデータ分布状態である．-5000m まで到達している坑井はわずか 4 地点であるにもかかわらず，超広域の地温分布を適切に推定でき，水の臨界点に到達する標高分布などを求められる．この成果は超臨界発電の適地選定などに利用できる．



第1図 リモートセンシングによる地表温度・熱水変質鉱物分布・断裂系分布・地表変位の概要

3. リモートセンシングの応用

3.1 地表温度異常の抽出

地熱資源探査への最も代表的なリモートセンシング応用は，熱赤外データ (TIR) を利用した地表温度の推定，および噴気帯，温泉湧出などの地表地熱兆候に起因した温度異常域の抽出である．地表温度推定に用いられる物

理はプランクの法則であり、物質の放射率がわかれば、黒体の分光放射輝度から地表温度に変換できる。これを利用し、多くのLandsat 8 TIR画像シーンを画像撮影日や標高の影響を軽減しながらモザイク処理して、北海道全域での地表温度分布を明らかにした例がある (Tian *et al.*, 2015)。温度異常域は活火山や温泉地などに対応した。

また、TIR データに基づく広域推定温度、観測点での実測データと推定温度をクリギング計算で組み合わせることで推定値を観測値と一致させられ、観測日の相違、大気効果などを軽減でき、温度異常抽出精度が向上する。

3.2 熱水変質鉱物の抽出と分布のマッピング

地熱フィールドでは高温で特有の化学成分をもった熱水・蒸気と岩石との化学反応により、変質鉱物が生成される。可視・反射赤外域における地表の反射スペクトルで、反射率が急低下する波長域と吸収パターンは、熱水変質鉱物を識別するのに最も重要な情報源となる。これは電子の電荷移動や分子の固有振動に起因し、これらに要するエネルギーと電磁波のエネルギーとが調和するためである。対象鉱物の標準反射スペクトルとのマッチングにより、鉱物を識別できる。しかし、Landsat シリーズや ASTER などのマルチスペクトル衛星データではバンド数が 10 以下と限られ、マッチングのための情報が少ない。一方、Hyperion などのハイパースペクトル画像は 200 以上のバンドを有するが、観測範囲は格段に狭い。

そこで、互いのメリットを活用するために、ハイパースペクトル変換法 PHITA (Hoang and Koike, 2017) が提案された。これは、マルチスペクトルとハイパースペクトルデータの各バンドでの反射率を多変量回帰式で関連付け、ベイズ推論、および誤差とパラメータ数のバランスから最適な関連式を選定する。変換精度を高めるために、地表地質情報も組み込む。PHITA をアメリカネバダ州の地熱資源域での Landsat TM, ETM+, OLI, EO-1 ALI データに適用し、これらを Hyperion データに変換した。白雲母・方解石・オパールなどの識別に必要な短波長赤外域のバンドは上記の衛星データには一つしかないため、これまで識別は不可能であった。しかし PHITA によれば、Hyperion の範囲外でも 95% 以上の正解率でこれらの鉱物分布を明らかにでき、その有効性を実証できた。

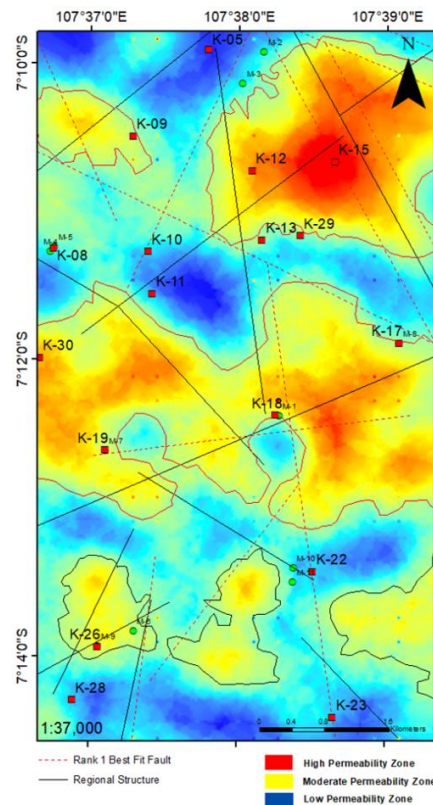
3.3 リニアメントに基づく断裂系解析

地熱資源は貯留層の断裂に胚胎することが一般的であるとともに、透水性の高い断裂は熱水の上昇パスを形成するので、方向、密度、連続性、透水性などに関する断裂系の解明は重要である。広域的な断裂系の把握にリニアメントが以前より用いられてきた。そのケーススタディとして、インドネシア西ジャワ州のWayang Windu地熱地区を対象とした。リニアメントは数値地形モデル (DEM) の多方位陰影画像から抽出した。次にリニアメント分布密度を求め、これを副変数とした共変量逐次ガウスシミュレーションを適用し、限られた測点でのラドン濃度データから領域全体にわたる濃度分布推定を行った (Heriawan *et al.*, 2021)。これと Fuzzy Logic Approach により、地表下浅層部の透水性を区分した (第2図)。比較的透水性の高いエリアは数カ所に大別でき、貯留層の断裂系卓越部と熱水の上昇域を推定できるようになる。

3.4 地表変位の連続化による貯留層タイプの推定

熱源であるマグマ周辺の温度・圧力変化は微小な地形変化をもたらす。また、地表変位の大きさは貯留層空隙

内の主な流体がガス、あるいは熱水かにも依存する。地表変位は差分干渉 SAR 処理 (D-InSAR) によって明らかにできる。上記の Wayang Windu 地区を対象として、PS-InSAR を Sentinel 衛星データに適用した。PS とは、散乱強度やマイクロ波の位相特性が常に一定している地表物体を意味する。しかし、植生に覆われた範囲での PS の点数は少なく、地表変位を計測できる画素は点在する。これに地球統計学を適用することで、コヒーレンスが小さく干渉していない部分でも地表変位を連続的に推定できるようになった (Sabrian *et al.*, 2021)。対象地区では、北部は沈降、南部は隆起と変動のパターンが異なることがわかった。これは北部-蒸気卓越型、南部-熱水卓越型という貯留層中の流体相の相違に起因すると解釈した。



第2図 インドネシア西ジャワ州Wayang Windu地熱地区でのラドン濃度とリニアメント密度を用いた Fuzzy Logic Approachによる浅層部の透水性推定分布。Kはラドン濃度測定点、丸は地熱兆候地、点線は高透水性断層(推定)、実線は広域断層を表す。

4. まとめ

地熱系での地質と地温分布、広域的な地表温度・熱水変質鉱物分布・断裂系分布・地表変位、熱水流動シミュレーションに数理・情報地質学が貢献できる例を述べた。これらの解明は地熱資源の利用促進に加えて、地殻の構造や変動などに関する理解の深化に役立つと考えられる。

文献

- Heriawan, M.N., Syafi'i, A. A., Saepuloh, A., Kubo, T., and Koike, K. (2021) *Natural Resources Research*, vol. 30, pp. 2989–3015.
- Hoang, N. T. and Koike, K. (2017) *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 133, pp. 157–173.
- Ishitsuka, K., Kobayashi, Y., Watanabe, N. *et al.* (2021) *Natural Resources Research*, vol. 30, pp. 3289–3314.
- Koike, K., Matsuda, S., and Gu, B. (2001) *Mathematical Geology*, vol. 33, pp. 421–448.
- Sabrian, P. G., Saepuloh, A., Kashiwaya, K., and Koike, K. (2021) *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 416: 107272.
- Tian, B., Wang, L., Kashiwaya, K., and Koike, K. (2015) *Remote Sensing*, vol. 7, pp. 2647–2667.
- Tomita, S. A., Koike, K., Goto, T.-N., and Suzuki, K. (2020) *Geophysical Research Letters*, vol. 47, no. 20, e2020GL088681.