

熱水の上昇経路特定を目指した 地熱地帯での地球統計学的 3次元亀裂分布モデリング

池本 龍平*・久保 大樹*・Mohamad Nur Heriawan**・小池 克明*

3D geostatistical modeling of fracture distribution in geothermal area for specifying ascent fluid-flow paths

Ryuhei Ikemoto*, Taiki Kubo*, Mohamad Nur Heriawan** and Katsuaki Koike*

* 京都大学工学研究科, Graduate School of Engineering, Kyoto University, Kyoto University Katsura, Nishikyo-ku, Kyoto 615-8540. E-mail: ikemoto.ryuhei.33e@st.kyoto-u.ac.jp

** バンドン工科大学, Bandung Institute of Technology, Jl. Ganesa No.10, Lb. Siliwangi, Kecamatan Coblong, Kota Bandung, Jawa Barat 40132

キーワード: 亀裂系, 地球統計学, シミュレーション, 熱水流動, インドネシア

Key words: Fracture system, Geostatistics, Simulation, Hydrothermal fluid flow, Indonesia

1. はじめに

資源探査や地層処分など岩盤の工学的利用を行う様々な分野において、対象とする岩盤の亀裂分布の評価は重要とされている。特に低透水性岩盤では、透水性亀裂が水理特性に支配的な影響を及ぼすため、岩盤中の亀裂の空間分布を推定することは重要な課題の1つである。しかしながら、亀裂の観測情報は範囲・量ともに限られており、少ない観測情報を適切に補完しながら空間分布推定を行うことが必要とされている。情報を補完しつつ広域的な亀裂分布モデリングを可能にする手法として GEOFRAC (GEOstatistical FRACture simulation method)が提唱されている (Koike *et al.*, 2012)。この手法はボーリングや坑井調査などにより得られた亀裂の直接観測データから、地球統計学的手法を応用して亀裂の密度と方向(走向・傾斜)の空間分布を推定する。本研究では、GEOFRACを用い3次元亀裂分布モデリングを行うことで、地熱地帯における主要な熱水流動の上昇経路の推定を試みた。

2. 対象地域と解析データ

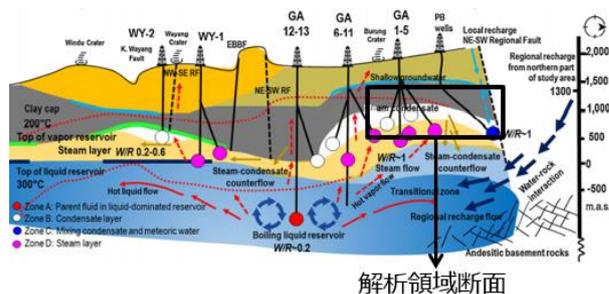
本研究では、インドネシアの西ジャワ州の州都である Bandung の南方約 35 km の標高 1500 m から 2000 m ほどの連山帯に位置している Wayang Windu 地熱地域 (以下、WWGF) を対象に選んだ (第1図)。WWGF は、インドネシア国内最大級の地熱発電所 (Star Energy Geothermal Ltd., 発電設備容量 227MW) が稼動しており、周辺には噴気や温泉など明瞭な地熱兆候が確認される活発な火山地域である。また、当地域では後期更新世の安山岩を基盤とした低透水性岩盤が多く分布している (Bogie *et al.*, 2008)。さらに、Alzwar *et al.* (1992)や Shoedarto *et al.* (2020)により断層分布、貯留層分布、熱水流動システム (第2図) が推定されており、これに基づくと解析領域内に蒸気卓越型の貯留層が存在すると考えられる。

解析領域は、東西 2000 m、南北 2800 m、垂直方向 900 m (標高 500 m~1400 m) の範囲と設定し、ボーリング調査

においてボアホールテレビ (BTV) 画像で観測された 4897 本の亀裂データ (位置座標, 方向) を使用した。



第1図 インドネシア ジャワ島での対象地域 (WWGF) の位置。



解析領域断面

第2図 Shoedarto *et al.* (2020)に基づく WWGF での熱水流動システムモデル (白色部が蒸気卓越型の貯留層)。

3. GEOFRAC による亀裂分布モデリングと考察

まず、観測データから計算した亀裂密度を測定値とし、逐次ガウスシミュレーション (SGS) によって亀裂密度分布モデルを作成した。このモデルに基づいて各セル内に得られた亀裂密度と同じ数の面素中心点を発生させた。

次に、観測データを走向により4つのグループに区分し、各データに所属クラスを表すバイナリーデータセットを与えた。これに主成分分析を適用し、面素中心点において主成分値を普通クリギング (OK) により補間することで、所

属クラスタを決定した。グループごとに計算した亀裂方向の積算確率分布とモンテカルロ法により、各面素中心点の方向（走向と傾斜）を割り当てた。

さらに、決定した座標と方向を基に直径 10 m の亀裂面素を作成し、2つの亀裂面素の中心間距離が 200 m、なす角が 12° 以下の条件で 2つの面素を連結させた。この操作をすべての面素に対して行い、亀裂面を形成した。

第 3 図に GEOFRAC により得られた亀裂空間分布モデル、およびシミュレーション亀裂分布と断層分布との比較を示す。ただし、ここでは結合面素数 150 個以上で、亀裂長が概ね 100 m 以上となる相対的に連続性の良いシミュレーション亀裂のみを表示している。さらに、視認性を高めるために、シミュレーション亀裂面はランダムに着色した半透明なポリゴンとして表現している。

亀裂の方向が断層に調和するような分布形態が第 3 図に表されている。このような亀裂は断層形成に関連していると推測され、シミュレーション亀裂と断層分布との整合性を確認できた。シミュレーション亀裂分布（第 3 図）と Heriawan *et al.* (2020) に基づくリニアメント密度分布（第 4 図）との比較では、リニアメントの高密度分布と亀裂分布の対応が一部で現れているので、亀裂系の一部が侵食地形として現れていると考えられる。

さらに、シミュレーション亀裂分布と地熱貯留層分布とを比較する（第 5 図）。上図はシミュレーション亀裂分布を西側から見た図であり、可視化条件を結合面素数 250 個以上、亀裂長 150 m 以上に限定している。下図は第 2 図の解析領域断面における蒸気卓越型の貯留層分布を簡略化したものである。シミュレーション亀裂分布は貯留層分布と対応していることがわかる。よって、既知の地質情報とシミュレーション結果との関連性から、シミュレーションの妥当性を検証できた。また、貯留層部に高角度の亀裂が密集していることから、亀裂分布の密集部が熱水流動の主要な上昇経路を形成していると解釈できる。

4. まとめと今後の課題

本研究では、インドネシアの地熱地帯を対象として、BTV 画像から得られた亀裂データを用い、地球統計的手法を応用した亀裂シミュレーション法である GEOFRAC により 3次元亀裂分布モデリングを行った。得られた亀裂分布モデルは既知の断層構造やリニアメント密度分布、地熱貯留層分布と整合しており、シミュレーションの妥当性を実証できたとともに、熱水流動の主要な上昇経路を推定することができた。今後は、亀裂分布モデリングをさらに精緻化できるようにプログラムを改善するとともに、亀裂分布と温度・圧力分布を統合し、熱水流動形態の解明を目指す。

文 献

Alzwar, M., Akbar, N. and Bachri, S. (1992) Geological map of the Garut and Pameungpeuk quadrangle, Jawa. Geological Research and Development Center.

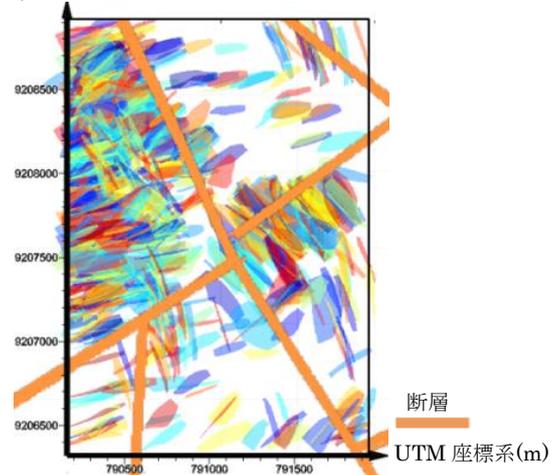
Bogie, I., Kusumah, Y. L. and Wisnandary, M. C. (2008) Overview of the Wayang Windu geothermal field, West Java, Indonesia. *Geothermics*, vol. 37, pp. 347-365.

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>.

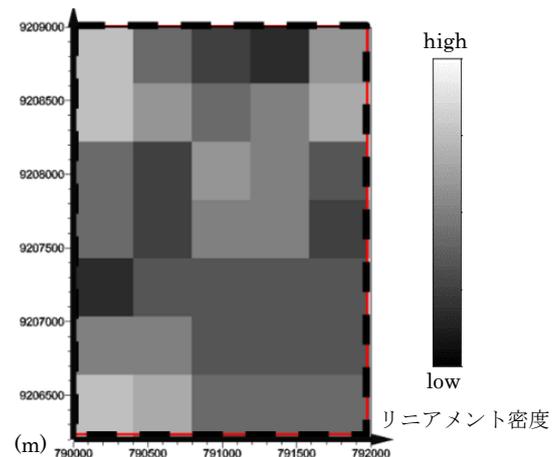
Koike, K., Kubo, T., Liu, C., Masoud, A., Amano, K., Kurihara, A., Matsuoka, T. and Lanyon, B. (2015) 3D

geostatistical modeling of fracture system in a granitic massif to characterize hydraulic properties and fracture distribution. *Tectonophysics*, vol. 660, pp. 1-16.

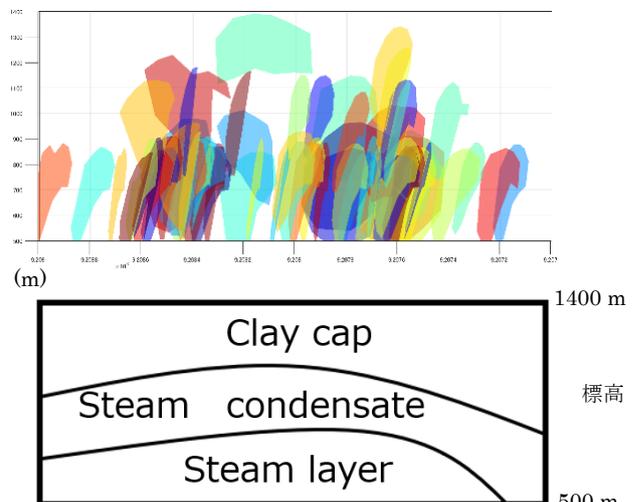
Shoedarto, R. M., Tada, Y., Kashiwaya, K., Koike, K. and Iskandar, I. (2020) Specifying recharge zones and mechanisms of the transitional geothermal field through hydrogen and oxygen isotope analyses with consideration of water-rock interaction. *Geothermics*, vol. 86, 101797.



第 3 図 断層分布とシミュレーション亀裂分布との重ね合わせ。



第 4 図 Heriawan *et al.* (2020) に基づくリニアメント密度分布。



第 5 図 連続性の良いシミュレーション亀裂分布 (上) と貯留層モデル (下) との比較。