

## ベイズ統計モデリングを用いた地熱地域の深部温度の推定

石塚師也\*・山谷祐介\*\*・渡邊教弘\*\*・小林洋介\*\*\*・茂木透\*\*\*\*・浅沼宏\*\*・  
梶原竜哉\*\*\*\*・杉本健\*\*\*\*・齋藤遼一\*\*\*\*

## Estimation of deep temperatures around a geothermal field using a Bayesian statistical modeling

Kazuya Ishitsuka\*, Yusuke Yamaya\*\*, Norihiro Watanabe\*\*, Yosuke Kobayashi\*\*\*, Toru Mogi\*\*\*\*,  
Hiroshi Asanuma\*\*, Tatsuya Kajiwara\*\*\*\*, Takeshi Sugimoto\*\*\*\* and Ryoichi Saito\*\*\*\*

\*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,  
C1-1-108 KyotoUniversity-Katsura, Nishikyo-ku, Kyoto 615-8540, Japan.

E-mail: ishitsuka.kazuya.4w@kyoto-u.ac.jp

\*\*産業技術総合研究所福島再生可能エネルギー研究所

Fukushima Renewable Energy Institute,  
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

\*\*\*室蘭工業大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Muroran Institute of Technology

\*\*\*\*東京工業大学理学院火山流体研究センター

Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology

\*\*\*\*地熱エンジニアリング株式会社 Geothermal Engineering, Co., Ltd.

キーワード：温度推定，超臨界地熱，ベイズ統計モデリング，比抵抗，葛根田地熱地域

**Key words** : Temperature estimation, Supercritical geothermal resources, Bayesian statistical modeling, Resistivity, Kakkonda geothermal field

### 1. はじめに

近年，深部に存在すると考えられる超臨界地熱資源の開発に向けて研究開発が進められている．超臨界地熱資源は，脆性延性遷移領域に存在すると考えられ，地熱資源は超臨界状態となっていることが予想される．この超臨界地熱資源のポテンシャル評価において，地下深部の温度分布の把握は重要であるが，対象深度まで掘削されている坑井は限られる．そのため，既存の温度検層データに加え，マグネトテルリク法で得られた比抵抗や地質情報を統合して，温度推定を行う方法が考えられる．

本研究では，温度検層データと比抵抗を統合して温度を推定する手法としてベイズ統計モデリングを用いた手法の開発を行った．この手法では，ベイズの定理によって，岩石物理モデルを介して，比抵抗等の観測値から温度等を対象とする値の推定を行う．ベイズの定理を用いることによって，既存のデータを基に把握されている先験情報や観測誤差等に対して，柔軟に解析で考慮することができる．

手法の特徴や推定誤差について把握するため，初めに疑似データを用いて解析を行った結果について述べる．続いて，実データに適用し，推定した温度の誤差を評価した結果を述べる．実データは，葛根田地熱地域で取得されたデータを用いた．葛根田地熱地域で掘削された坑井 WD-1a では約 3700 m の深さで 500°C 以上もの温度が観測されており (Ikeuchi et al., 1998)，このような深部で得られている温度データを用いて手法の検証を行った．

### 2. 温度推定手法の概要

マグネトテルリク法で得られている 3 次元的に得られている比抵抗  $\gamma$  は岩石物理モデル  $f_{RPM}$  と岩石物理モデルに含まれるパラメータ  $x$ ，観測誤差  $\varepsilon$  によって式(1)のように表すことができる．

$$\gamma = f_{RPM}(x) + \varepsilon \quad (1)$$

本研究では，岩石物理モデルは Glover et al. (2000) で提案されているモデルを用いた．このモデルでは，含水岩石の比抵抗は乾燥岩石および地殻流体の比抵抗と空隙率の関数となっている．先行研究での実験値を基に，乾燥岩石の比抵抗は温度に依存し，地殻流体の比抵抗は温度と圧力，塩濃度に依存する値とした．

観測された比抵抗  $\gamma$  からパラメータ  $x$  を推定する問題は，ベイズの定理を用いて，以下のように書き表すことができる．

$$P(x|\gamma) \propto P(\gamma|x)P(x) \quad (2)$$

ここで， $P(x|\gamma)$  は比抵抗  $\gamma$  が得られた場合のパラメータ  $x$  の事後確率分布を表し， $P(x|\gamma)$  を求めることで，パラメータ  $x$  の取り得る範囲や最も発生確率の高い値 (最大事後確率推定値) を得ることができる． $P(\gamma|x)$  は尤度と呼ばれ，パラメータ  $x$  が与えられた場合の比抵抗  $\gamma$  の確率分布を表す． $P(x)$  はパラメータ  $x$  の事前確率分布であり，パラメータの取り得る範囲などの先験情報を組み入れることができる．一般的に式(2)は解析的に解けない場合が多いため，マルコ

フ連鎖モンテカルロ (MCMC) 法等を用いて数値的に解かれる。本研究では、MCMC 法の 1 つであるハミルトニアンモンテカルロ法を用いた。

ただし、岩石物理モデルに含まれる全てのパラメータを比抵抗から求めることは、劣決定性のために難しい。また、比抵抗と温度の関係は一意には決まらず、温度推定を行う全ての深さ領域において式(2)を適用すると、多峰性分布が得られることが予想される。そのため、推定するパラメータは温度と空隙率とし、それ以外のパラメータは先験情報を基に与えた。また、既存坑井が得られている深さまでは温度検層データの空間補間によって温度分布を得て、それ以降の深さではベイズ統計モデリングにより温度を求めた。

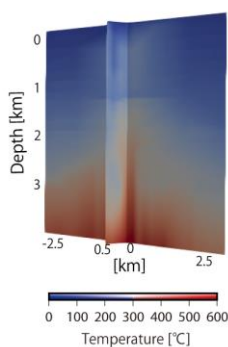
### 3. 疑似データを用いた手法の妥当性の検証

#### 3.1 疑似データの作成

開発した手法の妥当性を検証するため、葛根田地熱地域の自然状態の温度分布を模擬した数値シミュレーションモデル (Sakagawa et al., 2000) を基に疑似観測データを作成し、手法を適用した。疑似観測データとして比抵抗分布を作成し、温度検層データが得られている坑井位置は乱数で生成した。このとき坑井数の異なる疑似データセット (25, 50, 100 本) を作成することで、坑井数の違いによる推定誤差への影響を調べた。また、先験情報の不確かさによる推定誤差を調べるため、塩濃度等の確からしさが異なる先験情報を基に解析を行い、推定誤差の違いを調べた。

#### 3.2 検証結果

上述の疑似データを用いて解析を行ったところ、温度検層データの存在しない 3000 m 以深の温度推定誤差は約 11–20% となった (例えば、第 1 図)。また、高温域の位置等、全体的な温度分布は、数値シミュレーションモデルの温度と整合的であった。坑井数の異なる疑似データの推定結果を比較したところ、坑井数の増加に伴い、誤差が増加することが分かった。また、先験情報の確からしさは温度の推定誤差に影響を与えることが分かった。特に深部の地殻流体の塩濃度の先験情報が不正確な場合、本研究の検討では、温度推定誤差が 5–7% 増加した。



第 1 図 疑似データを用いて推定した温度分布の例 (坑井数 25 本の場合)。

### 4. 葛根田地熱地域への適用

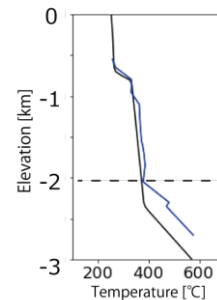
#### 4.1 用いたデータの概要

葛根田地熱発電所を含む約 4.3 km × 4.0 km の範囲を解析対象とした。また、深さ方向は、本研究で用いた岩石物理モデルの適用可能な温度圧力条件を考慮して標高-2.7 km までを推定対象とした。比抵抗データはマグネトテリク法によって得られた 3 次元比抵抗分布を用いた。塩濃度は、浅部では天水の影響を考慮して 0.5wt% とし、深さと

ともに上昇し、最大で 6.0wt% となると仮定した。

#### 3.2 温度推定結果

開発した手法を適用したところ、解析範囲中央部から東部にかけて比較的浅部に高温域が位置している箇所が推定された。また、ベイズ統計モデリングによって温度と同時に推定された空隙率分布は、深部では全体的な傾向として 0 から 0.05 の値を示しているものの、低比抵抗域と対応して若干高い空隙率を示すことが示唆された。また、推定した温度と深部まで掘削されている坑井の温度データとの比較を行ったところ、誤差の平均は 15.4% であった。また、WD-1a の標高-2.35 km 以深での温度推定誤差は 13.9% であった (第 2 図)。推定した温度は一定のバイアスはあるものの、WD-1a の温度の傾向を再現できていることが分かる (第 2 図)。



第 2 図 葛根田地熱地域 WD-1a 坑井での参照温度 (黒実線) および提案する手法によって推定された温度 (青実線)。図の点線以浅を空間補間によって推定し、点線以深をベイズ統計モデリングにより推定した。

### 5. まとめ

本研究では、ベイズ統計モデリングを用いて、地熱地域の深部の温度分布を推定する手法を開発した。開発した手法を疑似データに適用し、手法の妥当性の検証を行った。また、葛根田地熱地域のデータに適用を行い、深部の温度分布の推定を行った。今後、本研究で得られた知見を基により実用的な手法の開発が求められると考えている。

### 文 献

- Ikeuchi, K., Doi, N., Sakagawa, Y., Kamenosono, H., and Uchida, T. (1998) High-temperature measurement in well WD-1a and the thermal structure of the Kakkonda geothermal system, Japan, *Geothermics*, vol.27, no.5/6, pp.591-607.
- Glover, P. W. J., Hole, M. J., and Pous, J. (2000) A modified Archie's law for two conducting phases. *Earth and Planetary Science Letters*, vol.180, pp.369-383.
- Sakagawa, Y., Aoyama, K., Ikeuchi, K., Takahashi, M., Kato, O., and Doi, N. (2000) Natural state simulation of the Kakkonda geothermal field, Japan. *Proceedings World Geothermal Congress 2000*, pp.2839-2844.

### 謝辞

本研究は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の「超臨界地熱発電技術研究開発/超臨界地熱資源への調査井掘削に関する革新的技術開発/IAI による超臨界地熱資源評価・掘削技術」の一環として行われた。葛根田地熱地域のデータの多くは東北自然エネルギー(株)よりご提供頂いた。関係機関に厚く御礼申し上げる。