

空間的分布則を考量した機械学習による 日本全域 3 次元地温分布モデリングと地熱資源量評価への応用

家木優成*・小池克明*・久保大樹*

3D temperature-distribution modeling over Japan Island by machine learning considering spatial correlation law with application to geothermal resources assessment

Yusei Ieki*, Katsuaki Koike* and Taiki Kubo*

*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: ieki.yusei.73v@st.kyoto-u.ac.jp

キーワード：ニューラルネットワーク，温度検層データ，キュリー点，臨界点

Key words: neural network, temperature logging data, curie point, critical point

1. はじめに

温室効果ガス排出量削減のために，日本では再生可能エネルギーの 1 つである地熱を用いた発電の促進が重要な課題となっており，特に発電量の大きい超臨界発電が注目されている．しかしながら，長いリードタイムや開発コストとリスクの大きさなどがこの促進を阻害しているとともに，超臨界発電に適した場所の特定も困難な状況にある．これらの解決を図るには，日本列島全域で地下深部までの地温分布を明らかにすることが不可欠であり，これは地熱資源賦存量の正確な評価と開発コスト低減に貢献できる．地温分布推定には温度検層データが用いられるが，データの深度範囲と地点数が限られており，クリギングなどによる従来の推定法では，深部まで適切には推定できない．これを可能にするために，本研究では Deep Neural Network (DNN) に注目し，この有効性を検証した．

2. 解析手法

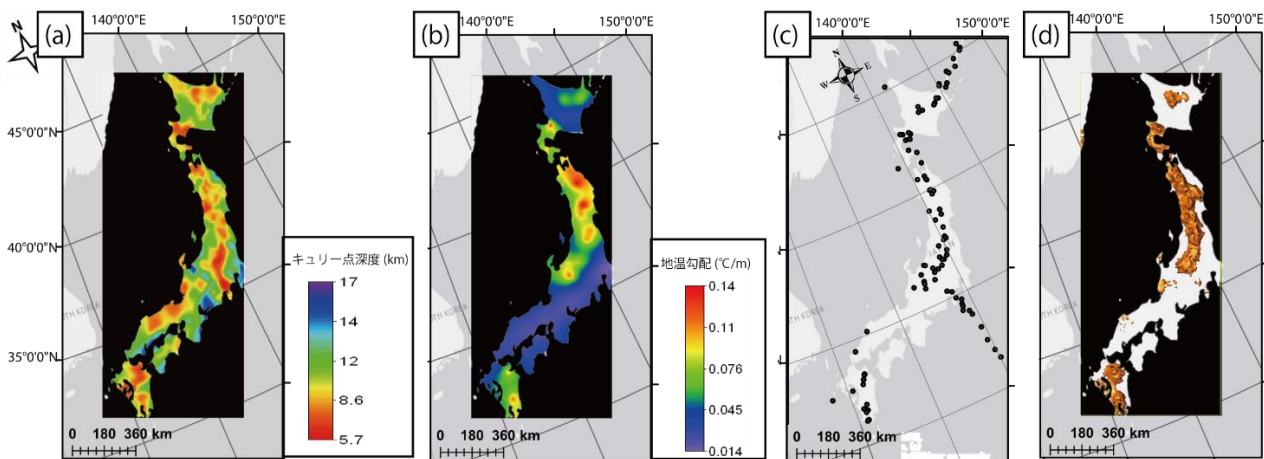
2.1 Deep Neural Network

本研究における DNN は入力層，3 つの中間層，出力層の 5 層構造とし，中間層のユニット数はいずれも 128 と設定した．Gu ほか(1997)によれば，座標を入力データ，測定値を出力データとするネットワークを構築することで，任意の地点での値を推定できる．そこで，本研究でも入力データには (x, y, z) 座標をそれぞれ標準化した値，教師データには対数変換した温度検層データを標準化して用いた．最適化手法には Adam，活性化関数には ReLU を選んだ．

DNN における学習では，教師データ（温度検層データ） t_i と出力値 t_i^* の誤差が最小となるようにユニット間を繋ぐ重み係数を更新する．その誤差は損失関数 E と呼ばれ，式 (1) で定義される．

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - t_i^*)^2 \quad (1)$$

ここで n はデータ数である．



第 1 図 (a)キュリー点深度分布，(b)地温勾配分布，(c)活火山分布，および DNN による (d)臨界点等値面図。

2.2 精度評価方法

得られた結果の推定精度を、本研究では Hold-out 法を用いて評価した。Hold-out 法とはデータを訓練用データと検証用データに分け、訓練用データでモデル学習を行い、検証用データでモデルの性能を評価するという方法である。また、訓練用データと検証用データの分割法としては 2 つの方法を採用した。すなわち、内挿評価として、ボーリング地点ごとにランダムで訓練用の温度検層データ (90%) と検証用データ (10%) に分割する方法、および外挿評価として、検層データの浅い部分 (90%) と深い部分 (10%) をそれぞれ訓練用、検証用データに分割する方法である。評価関数としては二乗平均平方根誤差である RMSE (Root Mean Square Error) を利用した。

2.3 キュリー点深度

岩石は一般に磁性を有しており、岩石の磁気的性質は誘導磁化のほかに、岩石そのものに存在する磁気成分である残留磁化がある。岩石の磁化は温度の上昇とともに減少し、キュリー点と呼ばれる温度を超えると磁性を失う。すなわち、キュリー点深度とは、岩石が磁性を失う温度に達する深度を意味する。キュリー点深度は、最も一般的な強磁性鉱物である磁鉄鉱のキュリー点温度 (約 580°C) に支配されると考えられている。すなわち、キュリー点深度を明らかにすることで、約 580°C に到達する深度を求めることができる。本研究では、新エネルギー総合開発機構 (NEDO) の調査によって得られたキュリー点等深線図を利用し、普通クリギング (OK) による補間で日本全体のキュリー点深度分布を明らかにした。これを DNN の訓練用データに追加し、キュリー点深度を考慮した地温分布の推定を試みた。

2.4 特徴量エンジニアリング

本研究では DNN の入力層に位置情報である (x, y, z) 座標に加えて、標高データ、ボーリング深度、地温勾配、火山からの距離、キュリー点深度、最近傍点の地温といった 6 つの特徴量をそれぞれ標準化して追加した。位置情報の一つである z 座標は、標高データとボーリング深度の差である相互作用変数とみなせる。また、地温勾配は、温度検層データの深度方向変化の傾きを最小二乗法によって求め、OK により補間した。火山からの距離としては、第 1 図(c)に示す活火山からの最短距離を用いた。キュリー点深度については、第 1 図(a)に示すキュリー点深度分布の深度を入力した。最近傍点の地温については、空間的に近い地点ほど値が類似しているという一般的特徴をモデルに組み込むために、推定点・実測点において最も近傍にあるデータの地温を入力した。

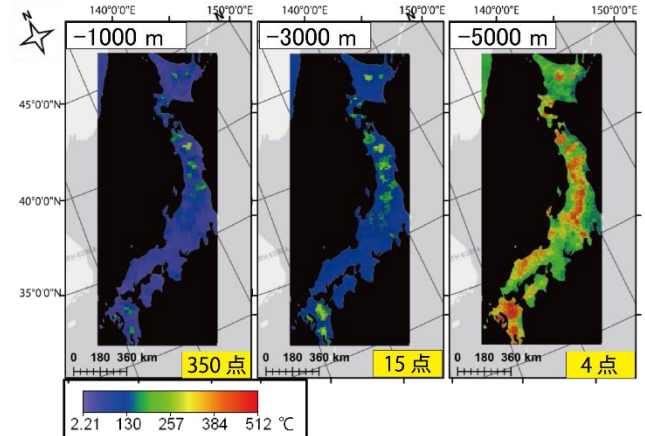
3. 結果

キュリー点深度の考慮と特徴量エンジニアリングの有効性を検証するために、第 1 図(d)に水の臨界点 (374 °C, 22.1 MPa) の推定等値面図、第 2 図に標高別推定地温分布図とそれぞれの標高まで到達しているボーリング地点数を示す。推定に DNN を用いた結果を以下では model_1 と称す。推定臨界点等値面図からは、キュリー点深度を考慮することで、検層データを大きく超えた高温域の地温も推定できていることがわかる。このモデルにより、那須火山帯付近が最も浅く、標高-3800m で臨界点に到達することを明らかにできた。

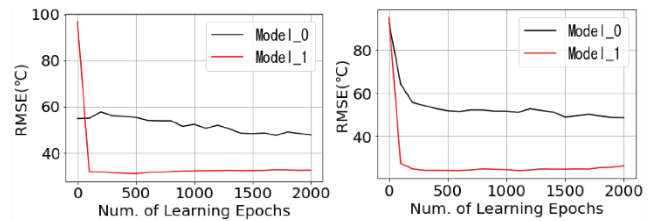
また、標高別推定地温分布図により、-3000m まで到達しているボーリング地点数がわずか 15 点であるにもかかわらず、-3000m 以深でも適切に推定できていることが明らかである。さらに、第 1 図(a)のキュリー点深度分布と第 1 図(b)の地温勾配分布、第 1 図(c)の活火山分布と比較すると、

それぞれの特徴を考慮できていることがわかる。

次に、特徴量を位置情報である (x, y, z) のみとし、キュリー点深度を考慮していない DNN モデル (これを model_0 と称する) と model_1 の内挿・外挿評価の学習曲線を比較する (第 3 図)。これによると、内挿、外挿のいずれにおいても、キュリー点深度の考慮と特徴量エンジニアリングによって推定精度が格段に向上していることが確かめられる。



第 2 図 DNN による標高別推定地温分布図と各標高まで到達しているボーリング地点数。



第 3 図 内挿(左)と外挿(右)に対する検証用データの学習曲線。

4. まとめ

本研究ではキュリー点深度の考慮と特徴量エンジニアリングを行った DNN を用いて、日本全域における三次元地温分布推定を試みた。その結果、キュリー点深度と特徴量エンジニアリングの有効性を確認できたとともに、地点数や深度範囲が限られた温度検層データから地下深部までの地温分布の推定が適切に行えることがわかった。また、このモデルにより那須火山帯付近が最も浅く臨界点に到達し、その位置は標高-3800m 程度であり、これ以外でも活火山付近において臨界点に到達すると推定できた。

文 献

- 大久保泰邦 (1984) 全国のキュリー点解析結果. 地質ニュース, no. 362, pp. 12-17.
- Gu, B., Koike, K. and Ohmi, M. (1997) Distribution analysis of metalliferous vein using artificial neural network. 情報地質, vol. 8, pp. 15-21.
- JOGMEC 地熱データベース: <https://geothermal-db-web.jogmec.go.jp/>
- Koike, K., Matsuda, S. and Gu, B. (2001) Evaluation of interpolation accuracy of neural kriging with application to temperature-distribution analysis. *Mathematical Geology*, vol. 33, pp. 421-448.
- (独)日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター: 日本の坑井温度プロフィールデータベース(データ集) <http://www.jaea.go.jp/04/tono/siryou/welltempdb.html>