

# 研究終了報告書

## 「AIで拓く地球資源の分布と性状の解析」

研究期間：2020年12月～2023年3月

研究者：石塚 師也

### 1. 研究のねらい

地熱発電は、地下深くの高温の熱水(地熱資源)を掘削し、発電を行う。地熱発電は、温室効果ガス排出量が比較的少なく、安定した発電出力が可能であり、なおかつ地熱資源は我が国に多くの資源量が存在していると考えられるため、有望なエネルギー資源である。しかしながら、現状で利用されている地熱資源は、存在すると考えられる一部にとどまる。これは、取得データから地熱資源の分布を予測することが難しいことが要因の1つと考えられる。また、地震や火山活動などの地下で発生する自然現象の理解においても、地下の状態推定は欠かせない。そのため、地殻の状態や物性の分布を推定することは、地球資源学や固体地球科学分野における大きな研究テーマの1つと言える。

特に地熱資源の分布を予測する問題は、熱水系モデリングと呼ばれ、従来は数値シミュレーションによる物理モデルの逆解析により行われてきた。この方法は、物理モデルを用いるため、物理則に従った予測値を得ることができるという利点はあるものの、推定可能な問題とするために地下構造や不均質性、構成方程式を単純化することが多く、加えて数値シミュレーションに用いることによる離散化による課題が存在する。

近年では、熱水系モデリングに深層学習を用いたアプローチ手法が提案されつつある。この手法は、坑井位置で直接観測される値とそれ以外の空間的に得ることのできる観測値の関係を学習させ、坑井以外の位置において観測値を基に温度を予測する方法である。この方法はより少ない仮定で温度分布の予測ができる点が強みであり、深層学習の発展とともに、多くの成功事例が出された。ただし、予測された温度は、必ずしも物理法則を満たすわけではなく、現実的に起こり得る値になることが保証されない点が課題であった。

本研究では、地下の温度や物性の分布の推定のためにAIを活用する。開発するAIは、上記の課題をふまえて、物理法則に則った予測を可能にすることで、「信頼されるAI」を創出する。また、開発したAIに入力する物性値を効率的に取得する方法として、岩石のX線CT画像を用いて岩石の物理的特性を推定するデジタルロック技術を改良し、現状でAIに用いるデータが十分に取得されていない地域においても、入力データを取得可能とする。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

フィールドスケールで得られた観測値から、温度や浸透率等の分布を予測する手法として、“シミュレーションデータを事前分布として用いる手法”および、“物理則に従った予測値を得るAI”を開発した。これらは、従来の深層学習を用いた手法と比較して、精度よく、なおかつ物理則に従った予測値を得られることが分かった。また、この開発手法を基に、専門的な先験知識と物理則を融合できるAIを開発した。加えて、岩石物性を従来よりも効率的に取得できるよう、デジタルロックによる岩石物性計算手法を改良した。

## (2) 詳細

## 研究テーマ A「AI 活用によるフィールドスケールでの温度分布の推定」

## A-1. 深層学習の訓練データとして物理モデルを用いる手法の開発

深層学習と物理モデルの融合として、深層学習の訓練データを数値シミュレーションによって作成することを考えた。検討の結果、予測するモデルパラメータの数が少ないほど、またモデルパラメータの不確実性が少ないほど予測性能が上がるのが分かった。この検討結果は、モデルパラメータの不確実性を下げる戦略が必要であることを示している。一方、必要な訓練データの数はそれほど多くなく、モデルパラメータの不確実性を一定程度に絞り込むことができれば、数値シミュレーションの実行は現実的に行える可能性がある。

訓練データを作成する場合のモデルパラメータの不確実性は、対象地域および周辺の地質および地球物理的なデータから推測することが想定される。本研究では、この不確実性の絞り込みをより定量的に行う方法を提案した(図 1)。訓練データを次元削減することで、訓練データの相対的な類似度(距離)を保存したまま低次元空間に落とし込むことができる。これにより、対象とする観測データと訓練データとの類似度を可視化し、観測データと類似する訓練データを定量的に選択する手法を開発した(図 1)。

疑似データに対して、開発した手法により訓練データを選定し、開発手法の検証を行った。その結果、訓練データを選定することによって予測誤差が低下し、開発した手法の有効性を確認した。また、予測を行う際にデータに含まれるランダムな誤差成分や先験情報に起因する不確実性を Metropolis-Hastings 法を用いて定量化するプログラムを構築した。

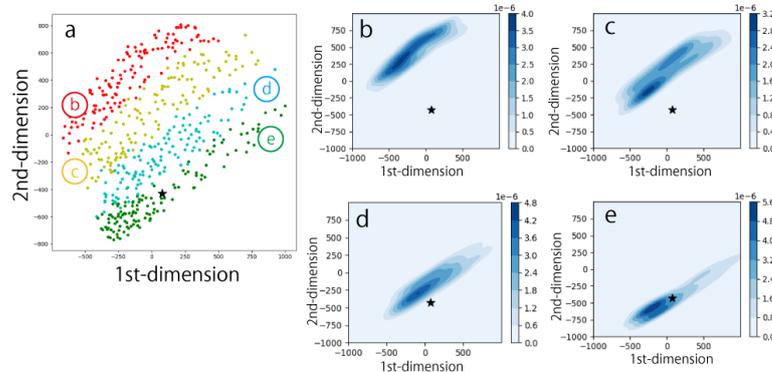


図 1. 訓練データの選定例. (a) 2次元上に投影した訓練データ(各点)と観測データ(黒星印). 各訓練データは、貯留層の浸透率の値で4つの区部にわけた場合に区分ごとに色分けしている. (b)、(c)、(d)、(e) 訓練データ各区分における相対的確率分布および観測データの位置. この確率分布を基に観測データの各区分における発生確率を計算し、適切な訓練データを絞り込む.

## A-2. 物理法則に則った温度・浸透率分布を推定する AI の開発

数値シミュレーションで作成した訓練データをニューラルネットで学習することで、大よそ物理法則に則った温度分布を予測できる可能性が高くなるが、物理法則に従うことは必ずしも保証されない。本研究では、Physics-informed ニューラルネット(PINN)と呼ばれるフレームワークを熱水系モデリングに拡張することで、物理法則に従った予測値が出力されるようにした。PINN では、損

失関数に構成則および境界条件を組み込む。特に微分方程式で記述される構成則を用いることが特徴である。

図 2 は、PINN で予測した温度、圧力、浸透率の空間分布と、参照値との差を示す。また、既存のアプローチとの比較として、損失関数に物理法則を組み込まないニューラルネット(NN)の予測値および参照値との差も示している。図 2 で鉛直方向に示した黒点線および白点線は、疑似的に設定した坑井の位置であり、この位置では温度、圧力、浸透率が計測されているとした。PINN と NN とも坑井周辺ではより正確な値が予測されており、坑井から離れるほど予測値の誤差が増大することが分かるが、NN の予測値と比較して、PINN の予測値の誤差の方が小さいことが見て取れる。また、質量保存則およびエネルギー保存則の誤差を計算したところ、PINN の予測値は、NN の予測値と比較して小さくなった。これは、PINN によって、これらの保存則がより満たされる予測値が得られたことを示している。また、このような深度方向の値を推定する坑井配置だけでなく、水平方向の外挿領域を予測するように坑井を配置した場合においても手法を検証したところ、同様に予測誤差および保存則の誤差が低減できることを示した。

加えて、本研究では、観測データとして、坑井データのみならず、広域に得られる物理探査データの 1 つである比抵抗分布を用いる効果を検証した。検討の結果、特に浸透率の誤差が低下することが分かった。これは、岩石の比抵抗が浸透率に感度が高いことに起因すると考えられる。浸透率は、今回用いた観測値の中で最も取得することが難しい観測値であり、浸透率があまり取得されていない地熱地域も存在する。そのような場合、比抵抗分布を用いることで、浸透率の予測値の精度を向上できることが分かり、本手法がより多くの地熱地域で有効であることを示唆した。

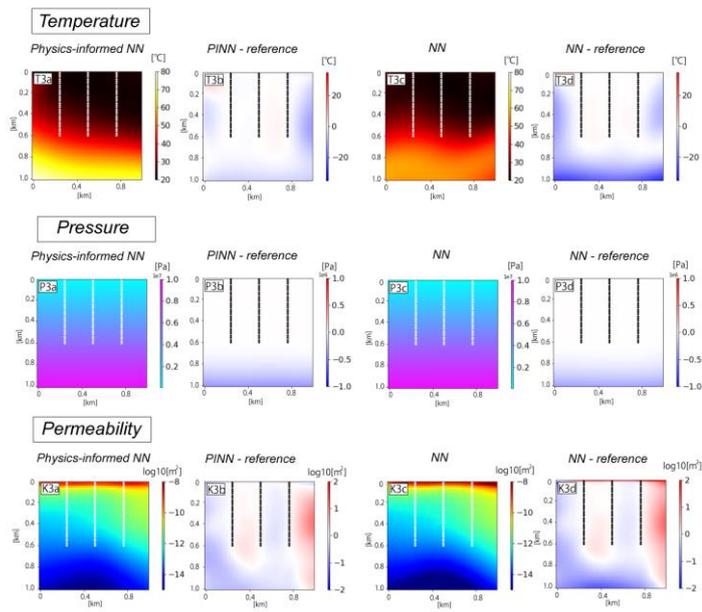


図 2. Physics-informed ニューラルネット(Physics-informed NN) および物理法則を用いないニューラルネット(NN)で予測した温度(T3a、T3c)、圧力(P3a、P3c)、浸透率分布(K3a、K3c)および、予測値と参照値の差(T3b、T3d、P3b、P3d、K3b、K3d)。黒点線および白点線は疑似的な坑井の位置を表し、坑井位置では温度、圧力、浸透率が観測されているとした。

## 研究テーマB「デジタルロックを用いた岩石物性取得手法の開発」

本研究では、従来デジタルロックの構築に用いられてきたセグメント処理の結果が適用手法によって変わり、なおかつ計算値が過大評価される傾向にあるという点に着目した。このセグメント処理の課題を解決できれば、例えば坑井に沿って取得された岩石コアに対して、より効率的に岩石物性を計算できる可能性がある。一方、近年ではセグメントを行わない手法が提案され、標準試料であるベレア砂岩の弾性波速度の推定に有効であることが示された。しかしながら、様々な岩種への有効性や弾性波速度以外の岩石物性への有効性は明らかでなかった。そこで、本研究では、ベレア砂岩に加え、より細粒の(空隙径分布の小さい)砂岩である白浜砂岩に適用し、弾性波速度を精度よく検証できるか検討を行った。

弾性波速度の計算を行った結果、ベレア砂岩では先行研究と同様に手法の有効性を確認できた。一方、白浜砂岩では、同じ手法を適用した場合では、精度よく弾性波速度を計算することができなかった。これは、X線CT画像の空間解像度よりも白浜砂岩の多くの空隙径が小さいためと考え、白浜砂岩の空隙径分布の実測値を基に、各ボクセルに与える密度および弾性定数に修正を加えた。これにより実測値と整合的な弾性波速度を得ることが可能となった。このように従来の手法に空隙径の測定結果を組み込むことによって、様々な空隙径をもつ岩石に本手法が適用可能であることを示した。本手法は、弾性波速度だけでなく、様々な岩石物性についても同様の手法で取得可能になる可能性があり、岩石物性の取得効率を改善できると考えている。

## 3. 今後の展開

今後の展開として、既開発の地熱フィールドに本開発手法を適用し、手法の利点や特徴を明らかにしたい。実際の地熱フィールドへの適用を進めることによって、実利用として開発手法を評価することができ、手法の改良につなげるとともに、我が国および世界中の地熱フィールドで本開発手法が利用される最初の一步としたい。

## 4. 自己評価

## 4-1. 研究目標の達成状況

地球資源学分野における「信頼されるAI」の創出を目指して研究を進めた。本研究により、AIを用いながら、物理法則に一定程度従う予測値を得られることができる手法を提案できたと考えている。また、当該分野での岩石物性データの取得がAIの入力として十分なデータ量を得られていないという課題を改善するため、デジタルロック技術を用いた岩石物性計算手法を開発し、当該分野へのAIの有効性を高めることができたと考えている。

地下の温度や浸透率分布を推定する地熱システムのモデリングにおいて、これまで数値シミュレーションの逆解析か、AIによるアプローチの相反するアプローチを選択する必要があり、双方に利点と欠点がある状況であったが、開発したAIにより、これらのアプローチは融合し得て、互いの課題を相補的に補うことが可能であることを示したことは大きな成果と考えている。本研究の成果によって、世界に先駆けて、地球資源学分野における本開発手法の利点と特徴を示すことができていると考えている。

## 4-2. 研究成果の科学技術および社会・経済への波及効果

研究成果は、地球資源学分野における特徴的な課題に対しての有効性を示したが、同様

に地殻を対象とする地震や火山活動といった自然現象の理解にも役立てることができると考えている。さらに、様々な分野でこれまで数値シミュレーションの逆解析により、モデリングが行われてきたが、本研究で開発した手法は、数値シミュレーションの逆解析の課題を解決し得るアプローチとして、インバースモデリングを必要とする様々な学術分野への波及が期待できる。また、社会・経済への波及効果としては、地熱資源等のエネルギー資源開発分野への実利用が期待できると考えている。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 2件

1. <a href="#">Ishitsuka, K., Lin, W., Kamiya, N., Nara, Y.</a> , Materials Transactions. 2022, 1555–1522.
概要: セグメンテーションを用いないデジタルロック構築手法を改良することで、様々な空隙径分布を有する岩石に適用できることを示した。
2. <a href="#">Ishitsuka, K., Lin, W.</a> , Applied Energy. 2023, 120855.
概要: 地熱システムの逆解析(モデリング)において Physics-informed ニューラルネットを用いた手法を提案し、手法の特徴と利点を示した。

### (2) 特許出願

該当なし

### (3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

招待講演

- [1] [石塚師也](#)ほか, 深部地熱資源評価における AI の活用, 資源地質学会第 71 年会講演会—鉱床探査技術の最先端, S-06, 2022.

学会発表

- [2] [石塚師也](#), Physics-informed ニューラルネットワークを用いた地下深部の温度・浸透率構造の推定手法の開発, 第 33 回日本情報地質学会講演会, 021-022 頁, 2022.
- [3] [嶋章裕](#), [石塚師也](#), [林為人](#), [Elvar Bjarkason](#), [鈴木杏奈](#), 地熱系シミュレーションのパラメータ推定手法の開発: 深層学習を用いたアプローチ, 第 33 回日本情報地質学会講演会, 023-024 頁, 2022.
- [4] [Ishitsuka, K.](#) Temperature estimation at depth by physics-informed neural network: accuracy evaluation with 2D numerical data, Japan Geoscience Union Meeting 2022, SCG51-P06 2022.
- [5] [石塚師也](#), 重力項を考慮した Physics-informed ニューラルネットワークの定常地下水流動系での検証, 資源・素材学会 2022 年度春季大会, 1K0301-05-05, 2022.