

地熱システムをモデリングする新手法の開発

—自然法則×機械学習による地下の特徴の理解—

概要

京都大学大学院工学研究科附属工学基盤教育研究センターの石塚師也講師は、九州大学大学院工学研究院地球資源システム工学部門の石須慶一助教、産業技術総合研究所再生可能エネルギー研究センター地熱研究チームの渡邊教弘主任研究員、山谷祐介研究チーム長、東北大学流体科学研究所の鈴木杏奈准教授、ローレンス・バークレー国立研究所の万代俊之博士研究員（研究当時）らと共同で、地熱地域で得られた観測データを基に、地熱システムをモデル化し、地下の高温域および高透水領域の分布、地熱流体の流動経路と移動量等を予測する新たな機械学習手法を開発しました。

地熱資源開発においては、観測データを基に直接は見ることでない地下の状態や資源の分布を把握する（モデル化する）ことが重要です。このような課題に対して、近年機械学習を応用した手法開発が行われてきましたが、限られた観測データ量において得られたモデルの信頼性に課題がありました。本研究では、観測データに加えて地熱システムの自然法則を学習させ、効率的な学習を行うための解析戦略を研究することで、多量の観測データを用いなくとも、物理的妥当性の高いモデリングを可能としました（図1）。開発した手法は、我が国の代表的な地熱地域における3次元の数値モデルに適用し、現実的な地熱モデルにおいても有効であることが示されました。本手法は、地熱資源開発の促進や地熱システムの理解に向けた活用が期待されます。

本研究成果は2025年7月23日に、国際学術誌「*Journal of Geophysical Research – Machine Learning and Computation*」にオンライン掲載されました。

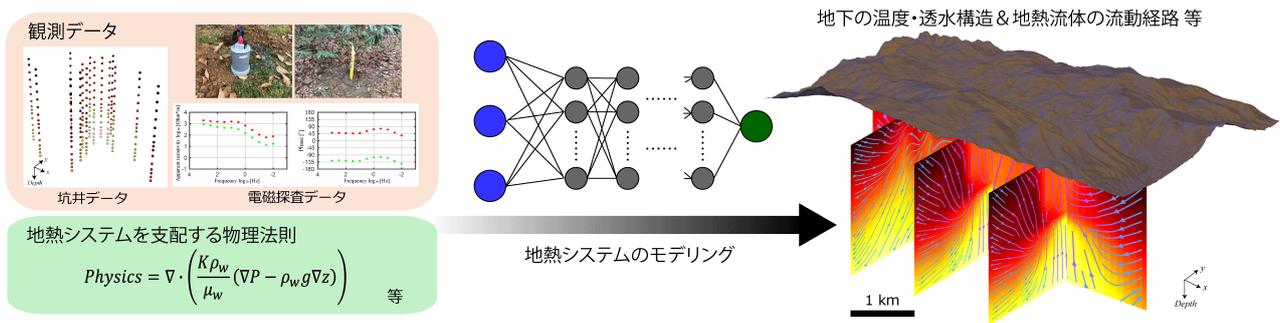


図1. 観測データと物理法則を学習する機械学習による地熱システムのモデリングの概念図

1. 背景

地熱資源は、我が国に多くの資源ポテンシャルがあり、発電時の二酸化炭素排出量が少なく、なおかつ安定した発電が可能なエネルギー資源です。地熱資源の開発では、地熱貯留層と呼ばれる地下の高温かつ透水性の高い（水などの流体が通りやすい）領域を掘削して熱水を取り出すことで発電に利用します。そのため、地熱資源を定量的に評価し、持続的に利用するには、地下の温度・透水構造および、地熱流体の移動経路等を把握することが重要です。とりわけ、観測データを基に温度や圧力分布、透水構造等をモデリングすることにより、地熱システム^{*1}の特徴を定量的に把握することが可能であり、観測データを基にしたモデリング手法の高度化は喫緊の課題です。

一般には、数値シミュレーションを用いて観測データに合う数値モデルを求めることにより、地下のモデリングが行われます。従来の手法は、信頼性が高いものの、多数の数値シミュレーションを行う必要があるために計算負荷が高く、さらに最適解を求めるには様々な先験情報を要することが指摘されていました。機械学習を用いる手法は、このような制約を解決し得る手法としてこれまでも提案されてきましたが、従来の機械学習によるアプローチでは多量のデータを必要とします。ただし、観測データ量は限られていることが多く、このような条件下で機械学習によって得られた地熱モデルには信頼性に課題がありました。

2. 研究手法・成果

本研究では、Physics-informed ニューラルネットワーク^{*2}と呼ばれるアプローチを応用し、観測データに加えて、地熱システムの物理法則も学習することによって、観測データを満たしつつ、自然法則に従う地熱システムをモデル化する手法の開発を行いました。本研究では、観測データとして坑井位置で得られる温度等のデータを考慮し、物理法則として、一般的に地熱システムの数値シミュレーションで用いられる法則と同様の保存則を考慮しました。ただし、これらの法則を記述する偏微分方程式を機械学習モデルに精度よく学習させることは容易ではありません。そのため、本研究では、保存則の勾配量を利用してこれらの方程式を学習するアルゴリズムを導入することで、物理法則に従った地熱モデルを得ることを可能にしました。開発した手法は、我が国の代表的な地熱地域である葛根田地熱地域の3次元の数値モデルに適用し、手法の妥当性を検証しました。従来の機械学習を基にした手法と比較して、本研究の手法を用いることで、特に温度と流体圧分布の予測精度が高く、さらには、本対象地域の特徴を反映した流体の移動経路を得られることを示しました（図2）。従来手法との差は、特に多量ではない坑井データ数（本研究では10坑井）を想定した場合において、特に顕著でした。これらの結果は、地熱システムのモデリングにおいて、機械学習に自然法則を学習させる手法の有効性と実用可能性を世界に先駆けて示したものです。

さらに、本研究では、坑井データに加えて、地磁気地電流法（Magnetotelluric法、MT法）^{*3}で得られた電磁探査データも併せて学習することを提案しました。これにより、地熱貯留層を含めた観測データに感度が高い領域の浸透率構造の精度を向上でき、さらには対象領域全体の温度・圧力の分布を精緻化できることを示しました。地熱地域では、MT法による電磁探査データが取得されていることが多く、今後、坑井データと探査データを統合した地下の特徴の理解の深化が期待されます。

3. 波及効果、今後の予定

●**地熱資源開発の促進**：開発された手法は、地熱開発地域や地熱資源の有望域における温度・透水域の分布や熱水流動経路を把握する手法として活用されることが期待されます。

●**多種観測データを統合した地熱システムの理解**：観測手法の発展に伴い、多種のデータが取得可能となる中、

様々な種類の観測データを統合して地熱システムの理解を深化する手法として本手法が活用されることが期待されます。

●**機械学習を用いた地球システムのモデリング手法発展の礎**：本研究は、自然現象を学習させる機械学習の特徴や課題を示しています。近年は様々な分野で、機械学習を応用したモデリングの機運が高まっており、本研究がこのような手法の発展の礎となり、従来の数値シミュレーションでは困難であった地球内部の現象理解を促進することが期待されます。

本研究では、機械学習を用いた新しいモデリング手法の有効性と実用性を示しました。本研究により、限られた観測データ量における有効性が示されたものの、観測データの種類や精度、配置によっては、精度よく予測することが難しい（不確実性の高い）領域もあり、そのような不確実性の定量化は今後の課題です。また、多様な地熱システムが存在することを鑑みると、今後より多様な基礎法則や地質条件を考慮した研究を進めることで、手法の有効性が益々高まることが期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

本成果の一部は、NEDO（国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構）の委託業務（JPNP21001）の結果得られたものです。また、本研究の一部は JSPS 科学研究費基盤研究（B）（JP23K26601）の支援を受けて行われました。

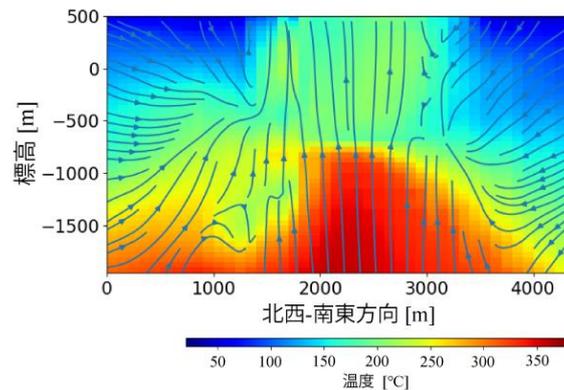


図2. 開発した手法によって得られた温度分布および地熱流体の流動経路の例（北西-東西方向の断面図）

<用語解説>

- *1. 地熱システム：地下の熱輸送と流体移動に伴って形成される熱水システム
- *2. Physics-informed ニューラルネットワーク：偏微分方程式で記述される物理法則を損失関数に組み込むことで、物理法則に沿った予測を得るニューラルネットワーク
- *3. 地磁気地電流法（Magnetotelluric 法、MT 法）：自然磁場の擾乱に伴う地磁気および地電流を観測し、地下の比抵抗構造を求める電磁探査手法

<研究者のコメント>

AI の活用は様々な分野で進んでおり、既存手法には無い多くの利点があると考えられます。一方で、AI が対象となる分野で真にブレイクスルーとなるには、「信頼される AI」となり得るかがポイントになると考え、この研究を着想しました。資源・エネルギーの有効活用・持続可能な利用が喫緊の課題であることは論を俟たず、

このような新たな手法が課題解決の道筋を探る一助になることを願っています。また、研究を実行する過程においては、様々な方からのサポートがあり、今回の論文掲載に結び付きました。この場を借りて御礼申し上げます。(石塚 師也)

<論文タイトルと著者>

タイトル：Reliable and practical inverse modeling of natural-state geothermal systems using physics-informed neural networks: Three-dimensional model construction and assimilation with magnetotelluric data

(物理法則を考慮したニューラルネットワークを用いた信頼性と実用性のある自然状態地熱システムのインバースモデリング：3次元のモデル構築と電磁探査データの同化)

著者：Kazuya Ishitsuka, Keiichi Ishizu, Norihiro Watanabe, Yusuke Yamaya, Anna Suzuki, Toshiyuki Bandai, Yusuke Ohta, Toru Mogi, Hiroshi Asanuma, Tatsuya Kajiwara, Takeshi Sugimoto

掲載誌：*Journal of Geophysical Research – Machine Learning and Computation*

DOI：10.1029/2025JH000683