HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Physics-informed Neural Networkを用いた地下比抵抗構造解釈手法の高度化 : 地熱地域における適用可能性［論文内容及び審査の要旨］
Author(s)	青山, 健太郎
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(理学)
Dissertation Number	甲第16252号
Issue Date	2025-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/95380
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Kentaro_Aoyama_abstract.pdf, 論文内容の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称　博士（理　学）　氏　名　青山健太郎

学 位 論 文 題 名

Physics-informed Neural Network を用いた地下比抵抗構造解釈手法の高度化
―地熱地域における適用可能性―

（Advancing the Interpretation of Subsurface Resistivity Structure Using Physics-informed Neural Network: Applicability in Geothermal Fields）

地磁気・地電流法などの物理探査により推定された地熱地域の地下比抵抗構造は，キャップロックや熱水の流動経路，マグマだまりなどの地質構造を特定するのに役立つ．これは，岩石の比抵抗が，温度や間隙水の塩濃度，間隙率，粘土鉱物の含有量に大きく依存するためである．しかし，地下の比抵抗構造から温度などの分布を推定することは逆問題を解くことに相当し，比抵抗の情報のみからそれらの値の分布を一意に推定することはできない．一方，この地下比抵抗構造の解釈に存する非一意性は依然として大きな課題であるものの，地熱探査では，検層データを訓練データとしてニューラルネットワーク（NN）に学習させることにより，概ね 20%以下の相対誤差で，ターゲットとなる領域における温度を，比抵抗から推定できることが明らかになりつつある．ただし，NN は，観測点から離れた地点の物理量を推定する際，物理的に妥当でない値を出力してしまうことが課題である．そこで，本研究では，従来の NN に，物理法則に関する制約条件を損失関数として加えた Physics-informed Neural Network（PINN）を実装し，これを用いて，地下比抵抗構造から温度などの分布を，より高い確度および精度で予測することができるかどうか検証した．順問題が解けなければ逆問題も解けないため，温度などから比抵抗を計算するためのフォワードモデリングも PINN の実装に際して必要となる．特に，火山や地熱地域には，スメクタイトに富むキャップロックが存在することが多いため，スメクタイトを含む岩石のバルク導電率を，幅広い条件で計算することのできる手法を開発する必要がある．そこで，本研究では，幅広い温度（≤200°C），塩濃度（10^{-4}~5 mol kg^{-1}）において，NaCl 溶液，石英，スメクタイトが任意の割合で，任意の位置に配置された岩石のバルク導電率を計算することのできるシミュレータを開発した．このシミュレータは，成分の分布に異方性を与えることで，スメクタイトを含むコア試料の物性試験で測定されたバルク導電率を再現することができた．また，成分をランダムに分布させた条件でバルク導電率を計算したところ，岩石がスメクタイトを含むと，塩濃度や間隙率の増加に伴い，部分的にバルク導電率が減少する領域が現れることがわかった．さらに，NaCl 溶液とスメクタイトの体積分率の和が 0.1 となるとき，岩石の端から端を結ぶ電流の経路が形成され始めることも確認できた．

次に，PINN を用いて，比抵抗構造から温度などの分布を，高い確度および精度で推定すること

ができるか検証した. PINN には, (1) 質量保存則, (2) エネルギー保存則, (3) 地下比抵抗の値と, 温度などの出力変数からフォワード計算した比抵抗の値の一致度, (4) スメクタイトが熱力学的に安定な温度条件という四つの物理法則に関する損失項を組み込んだ. (3) で組み込んだバルク導電率を計算する関数は, シミュレータに与えた入出力値の組み合わせを訓練データとして NN に学習させることで近似した. この PINN が従来の NN と比べて高い確度および精度で, 比抵抗構造を解釈することができるかどうか, 熱水流動シミュレータにより生成したシンセティックデータを用いて検証した. その結果, 本研究で実装した PINN は, 従来の NN と比べて, 特に浸透率とスメクタイトの体積分率について, 高い予測性能を持つことがわかった.

本研究で実装した PINN は, 地熱地域における地下比抵抗構造の解釈に適用されることが期待されるが, 実際の火山や地熱地域に適用する際には, (1) PINN に組み込んだ物理法則の高度化, (2) 限られた時間および予算で多項目の観測データを取得する手法の開発, (3) 様々な種類のシンセティックデータを用いた検証の三項目について, 今後の研究が必要であると考えられる.