



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_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士（理 学） 氏 名 青 山 健 太 郎

審査担当者	主査	教 授	橋 本 武 志
	副査	教 授	青 山 裕
	副査	教 授	大 園 真 子
	副査	教 授	藤 田 清 士（大阪大学大学院工学研究科）

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)

博士学位論文審査等の結果について（報告）

マグネトテルリク法などの物理探査は、導電率の空間分布として地下をイメージングするが、地下に実際に存在する岩石中には鉱物、流体、空隙などが混在しており、巨視的に見た導電率（バルク導電率）は、温度、圧力、塩濃度、物質の量比や連結度等にも依存する。このため、バルク導電率のみから物質の組み合わせ、量比、状態を一意的に決定することは原理的に不可能である。本論文は、地熱地域への応用を念頭に置き、こうした非一意性の強い逆問題に Physics-informed Neural Network (PINN) を適用することで、温度分布や粘土鉱物量などの推定精度を向上させる手法について論じている。

本論文は大きく2つの部分から構成されている。前半（第2章）では、地熱地域における重要な構成物質のひとつである導電性粘土鉱物（スメクタイト）を含む岩石のバルク導電率を求めるシミュレータの開発について述べている。本研究では、スメクタイト、石英、塩水を任意の割合に設定し、それらの幾何学的配置やスメクタイトの表面伝導も考慮に入れ、バルク導電率を幅広い範囲で高精度に計算することに成功した。また、間隙率や塩濃度に対するバルク導電率の依存性に関する新たな知見も得られた。一方、後半（第3章）では、比抵抗（導電率の逆数）構造と坑井の物理検層データを既知として PINN に与え、温度、浸透率、粘土鉱物含有率などの分布を坑井データがない領域も含めて推定する手法について述べている。物理法則に基づく制約を加えることにより、本研究で実装した PINN は従来の手法よりも高い推定性能を示すことが確認された。前半部分は順問題のアプローチ、後半部分は逆問題のアプローチであり、論文全体として高い対称性を持つ構成となっている。

比抵抗構造の探査と解釈は、地震学・火山学分野でもその重要性が広く認識され、近年は機械学習を用いた研究手法も増えつつある。本研究のように、物理法則を拘束条件に加えることでニューラルネットワーク (NN) のブラックボックス化を回避しつつ、推定精度の向上を目指す PINN の応用は、現状では新規性・発展性が高いといえる。本研究では、前半で開発したバルク導電率シミュレータを用いてシンセティックデータを作成し、NN の学習データとして使用した。このアプローチにより、実際の地熱フィールドデータへのアクセスには多くの制約があり十分な学習デ

ータを得ることが難しいという問題を克服した点は、本研究の特色のひとつである。非一意的な逆問題に対して、正しい推定を得るために有効な既知情報や計算条件が検討され、一定の道筋が示されたことには重要な意義がある。先行研究では考慮されていなかったスメクタイトを取り扱えるようになった点にも本研究の新規性がある。また、鉱物の導電率異方性に加え、要素の異方的配置も同時に考慮できるバルク導電率シミュレータを構築したこと自体が、この分野における重要な進展である。

本研究で開発した手法は、スメクタイトを含む地層の比抵抗構造の解釈に有用であることから、地熱資源量評価だけでなく、火山活動の評価や地すべり面の特定などへの活用も期待される。また、PINN に組み込む物理法則を変更することで、スメクタイト以外の物質にも応用できる拡張性を持つ。

本論文では、地球科学分野における幅広い基礎知識と十分な専門知識に基づいて、的確な問題設定と解決手段の選択が行われ、論理的考察を通じて問題解決と新たな知見の集積が行われたことが認められる。また、研究成果の一部はすでに学術誌や学会発表を通じて世界に発信されていることも確認された。これらの過程は、自然史科学専攻の DP 基準にも見合うものであり、著者は、北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格があると認める。