

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K15219

研究課題名（和文）物理モデルと機械学習の融合による物性分布推定手法の高度化

研究課題名（英文）Improvement of the method to estimate physical property distribution by fusion of physical model and machine learning

研究代表者

石塚 師也 (Ishitsuka, Kazuya)

京都大学・工学研究科・講師

研究者番号：90756470

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：地球資源開発において空隙率等の地下の物性とその分布の推定は、可採埋蔵量の評価や掘削位置の選定等に大きな影響を与える。そのため、本研究では機械学習を基に地下の空隙率等の物性分布を推定する手法を開発した。開発した手法は、地熱地域で取得されたデータへ適用し、有効性を評価した。さらに、物性分布を推定するために必要な観測データがより効率的に取得できるようにデータ取得手法の高度化を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球資源開発において、空隙率等の地下の物性値の推定は不可欠である。本研究で開発した手法は、機械学習と物理モデルを組み合わせることによって、厳密な物理モデルが不明瞭な条件下でも一定程度の物理的な妥当性を考慮して、物性値を推定できるフレームワークを構築した。さらに、推定値のばらつきの評価を行い、どの範囲の推定値まで信頼がおけるか評価を可能とした。また、応力や弾性波速度、熱伝導率といった観測値をより効率的に取得する手法を開発し、従来よりも多くの地域や条件でデータ取得が可能となることが期待される。

研究成果の概要（英文）：In the Earth resource development, the estimations of subsurface physical properties and their distribution are important on the evaluation of the potentials of the resource and the selection of drilling locations. This study developed machine learning-based methods to estimate physical properties of the target area, such as porosities. The developed methods were examined by applying it to a geothermal field. The study further developed methods for measuring rocks to improve the quality and quantity of data, allowing the developed machine learning-based methods to be applied to promising areas of earth resources.

研究分野：地球資源工学

キーワード：ベイズ統計学 岩石物性 熱水システム 空隙率 機械学習

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

地球資源開発において、可採埋蔵量の評価や掘削位置の選定等のため、地下の物性分布が推定される。そのため、物性分布の推定手法の高度化は、重要である。物性分布の把握のため、一般的に、地質踏査や地表からの観測、試掘井の掘削等のデータ取得が行われ、空隙率や弾性定数等の推定が行われる。しかしながら、地下を扱う特性上、有限なデータ数と未知変数の多さに起因する不確かさ(不確実性)が必ず存在する。加えて、推定を行う際に仮定する物理モデルの妥当性が課題となる。

近年では、深層学習を用いた地熱地域の物性分布推定手法が開発された。この手法は、掘削井で得られた温度と観測値の関係を深層ニューラルネットワークで学習し、掘削井の無い箇所において、広域の観測値を基に温度を推定する手法である。この手法によって、物理モデルを厳密に仮定できないという課題を解決でき、今後の発展性に期待がもてる。しかしながら、物理モデルを基とした手法と同様に推定値の確からしさについては明らかでない。

2. 研究の目的

本研究では、既存手法の課題を解決する物性分布の推定手法はどのようなものかという課題について取り組んだ。すなわち、1点目は物性分布推定における確からしさ(不確実性)の定量化を可能とする手法はどのようなものである。そして、2点目は、上記の深層学習を基とした手法のように、厳密な物理モデルが不明瞭な条件下においても、物理的な妥当性を考慮できる手法はどのようなものである。特に、本研究では、物理モデルと機械学習の融合が、この問いにアプローチする有効な手法である考え、手法開発を行った。

3. 研究の方法

本研究では、地熱地域の空隙率分布の推定を対象として手法開発を行った。不確実性の定量化は、未知変数の確率分布の推定により実現できるため、ベイズ理論の枠組みで扱うことを考えた。ベイズ理論では、可能性のある未知数の範囲(事前分布)を基にモデルを多数計算することによって、各未知数の事後確率分布を評価することができる。また、観測データの確度の評価や空間密度の向上の重要性から、データ取得の高度化も行った。

4. 研究成果

(1) ベイズ理論を基にした空隙率分布等の不確実性の評価手法の開発

坑井で得られた検層データや鉱物の情報、マグネトテリク法によって得られた比抵抗分布を基に空隙率分布を推定する手法を開発した。対象地域の開発フェーズに伴うそれぞれの予測値の不確かさや観測データの誤差を事前分布として導入する、もしくは未知パラメータとして導入することにより、推定値の信頼区間として、不確実性を評価することを可能とした。さらに、空隙率分布だけでなく、間隙流体をH₂O-NaCl系と考えた場合のNaCl濃度の推定も行う手法を開発した(図1)。

開発した手法は、疑似データに適用し、手法の有効性を確認した。また、地熱地域で取得されたデータに適用したところ、既開発深度よりも深部により高塩濃度の間隙流体が存在することが示唆された。ただし、推定値は観測データの確度や位置に影響され、例えば観測データが過度に平滑化されている箇所では、推定精度が低下する。そのため、より高精度での推定には、観測データの確度や空間密度を向上することが重要である。

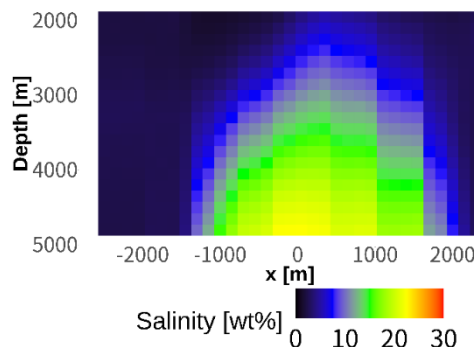


図1 疑似データより推定した塩濃度分布の例

(2) ベイズ理論と深層学習を組み合わせた空隙率分布等の推定手法の開発

本研究では、深層学習を用いて物性分布を推定する既存のアプローチを基に、観測データや先験情報の不確実性を考慮する手法を開発した。深層学習で観測データを学習する際に取り得る不確実性も含めて学習することで、誤差に頑強な推定手法を開発した。深層学習を用いることによって、観測データと未知変数をつなぐ物理モデルが不明瞭な場合においても、推定値を得られるようになるという利点がある。

開発した手法は疑似データを用いて、有効性を検証した。観測データや未知変数によって、考慮される影響が変わることが示され、どの程度厳密に不確実性を考慮するかは、データや未知変数の性質によることが分かった。そのため、感度分析等を用いて、観測データの重要性などを評価することで、本開発手法をより有効に用いることができると考えられる。

(3) 原位置応力の信頼区間を評価する手法の開発

非弾性ひずみ回復法を用いた応力推定値の不確実性の評価を可能とする手法開発を行った。原位置応力は、空隙率の評価においても重要になるが、得られた応力がどの程度の不確実性を有するかを定量的に評価する方法はこれまでには無かった。本研究では、ベイズ理論を基にした原位置応力の信頼区間を評価する解析手法を開発した。

この開発手法を検証するため、いくつかの異なる先験情報を仮定した解析を行った。解析手法の適用結果から、推定結果の不確実性はパラメータごとに異なることが分かった。特に対象岩石の弾性率を既知とした場合には、応力テンソルの非対角成分の不確実性が、他のパラメータと比較して小さくなることが分かった。感度分析により、この部分的な要因がパラメータの感度によることが示唆された。

(4) カuttingスを用いた岩石の熱伝導率の測定手法の開発

坑井の掘削時にコア試料が全ての深度区間で取得されることはほとんどない。一方でCuttingスは掘削時に入手可能なことが多いため、Cuttingスを用いて岩石の熱伝導率を測定できるようになれば、より空間的に高密度で熱伝導率の測定値を得ることが可能となる。本研究では、非常面熱源法を用いてCuttingスから熱伝導率を測定する手法の検討を行い、火山岩類のコアを実験室で崩して作成した疑似的なCuttingスおよび地熱地域で得られたCuttingスを用いて手法の有効性を検討した。

検討の結果、適切な岩石物理モデルを選択することで、10%以下の誤差でCuttingスからコア相当の熱伝導率を推定できることを示した。また、得られた熱伝導率は鉱物の含有率と相関があり、中でも石英の含有率と相関が強いことが示された。

(5) 熱水変質分布の分類手法の開発

地熱地域において熱水変質の種類は、岩石物性を決める大きな要因の1つとなっている。本研究では、坑井に沿って得られた鉱物指標を用いて、熱水変質の分類を行う手法を開発した。開発した手法は、教師無分類を用いて得られた各鉱物の量から分類を行うものであるが、異なる分類手法では僅かではあるが異なる分類結果が得られることが分かり、K平均法とガウス混合モデル、凝集型クラスタリングの分類結果を統合して解釈する方法を提案した。開発した手法は、地熱地域で取得されたデータに適用を行い、坑井ごとの熱水変質傾向の違いをより定量的に解釈できることを示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 石塚師也、林為人、神谷奈々、奈良禎太	4. 巻 71
2. 論文標題 セグメント処理を行わずに作成したデジタル岩石モデルを用いた空隙径分布の異なる砂岩のP波速度の計算	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 材料	6. 最初と最後の頁 235-242
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2472/jsms.71.235	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kazuya Ishitsuka, Yosuke Kobayashi, Norihiro Watanabe, Yusuke Yamaya, Elvar Bjarkason, Anna Suzuki, Toru Mogi, Hiroshi Asanuma, Tatsuya Kajiwara, Takeshi Sugimoto, Ryoichi Saito	4. 巻 30
2. 論文標題 Bayesian and neural network approaches to estimate deep temperature distribution for assessing a supercritical geothermal system: evaluation using a numerical model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Natural Resources Research	6. 最初と最後の頁 3289-3314
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11053-021-09874-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Kazuya Ishitsuka, Hiroki Ojima Toru Mogi, Tatsuya Kajiwara, Takeshi Sugimoto, Hiroshi Asanum	4. 巻 15
2. 論文標題 Characterization of hydrothermal alteration along geothermal wells using unsupervised machine-learning analysis of X-ray powder diffraction data	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth Science Informatics	6. 最初と最後の頁 73-87
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s12145-021-00694-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 杉本達洋・石塚師也・林 為人	4. 巻 70
2. 論文標題 ベイズ統計モデリングに基づく非弾性ひずみ回復応力測定法の新規解析手法に関する理論的検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 材料	6. 最初と最後の頁 573-580
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2472/jsms.70.573	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Haruto Sugamoto, Kazuya Ishitsuka, Weiren Lin, Takemi Sakai	4. 巻 112
2. 論文標題 Measurement of thermal conductivities of drill cuttings and quantification of the contribution of thermal conduction to the temperature log of the Hachimantai geothermal field, Japan	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Geothermics	6. 最初と最後の頁 102742
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.geothermics.2023.102742	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計23件(うち招待講演 1件/うち国際学会 8件)

1. 発表者名 酒井雄飛, 石塚師也, 林為人
2. 発表標題 X線CT画像を用いた砂岩の熱伝導率の推定における解像度の違いによる推定精度への影響に関する検討
3. 学会等名 資源・素材学会2023年度春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 菅本大仁, 石塚師也, 林為人, 坂井健海
2. 発表標題 カッティングス試料を用いた熱伝導率測定手法の検証と岩手県八幡平地域の地熱坑井への適用
3. 学会等名 資源・素材学会 関西支部 第19回若手研究者・学生のための研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 嶋章裕, 石塚師也, 林為人, Elvar Bjarkason, 鈴木杏奈
2. 発表標題 数値モデルを事前情報とした深層学習による地熱地域のモデリング手法の開発
3. 学会等名 2022年度資源・素材関係学協会合同秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石塚師也, 山谷祐介, 渡邊教弘, 小林洋介, Elvar Bjarkason, 鈴木杏奈, 茂木透, 浅沼宏, 梶原竜哉, 杉本健, 齋藤遼一
2. 発表標題 深部地熱資源評価におけるAIの活用
3. 学会等名 資源地質学会第71回年会学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 菅本大仁, 石塚師也, 林為人, 坂井健海
2. 発表標題 非定常面熱源法を用いたカッティングス試料の熱物性測定および N19-HA-1 坑井の温度プロファイルの考察
3. 学会等名 日本地熱学会令和4年学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuhi Sakai, Kazuya Ishitsuka, Weiren Lin
2. 発表標題 Examining the effectiveness of digital rock physics without segmentation for thermal conductivity estimation of sandstones
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 永田智季, 重光勇太郎, 石塚師也, 林為人
2. 発表標題 Noise removal of InSAR surface displacement images using Noise2Noise deep learning
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 嶋章裕, 石塚師也, 林為人, Elvar K. Bjarkason, 鈴木杏奈
2. 発表標題 数値モデルを事前情報としたphysics-informedニューラルネットワークによる地熱地域のモデリング手法の開発
3. 学会等名 日本地熱学会令和4年学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鶴木智, 石塚師也, 林為人, 山谷祐介, 梶原竜哉, 杉本健, 斎藤遼一
2. 発表標題 比抵抗を基としたベイズ統計モデリングによる葛根田地熱地域の空隙率・塩濃度分布推定
3. 学会等名 日本地熱学会令和3年学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 嶋章裕, 石塚師也, 林為人, Elvar K. Bjarkason, 鈴木杏奈
2. 発表標題 深層学習を用いた地熱系シミュレーションのパラメータ推定および多次元尺度構成法による教師データの評価
3. 学会等名 日本地熱学会令和3年学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菅本大仁, 石塚師也, 林為人, 坂井健海
2. 発表標題 八幡平地域N19-HA-1坑井におけるカッティングス試料を用いた熱物性測定および坑井の温度構造解析
3. 学会等名 日本地熱学会令和3年学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 嶋 章裕, 石塚師也, Elvar K. Bjarkason, 鈴木杏奈, 林 為人
2. 発表標題 深層学習を用いた地熱系シミュレーションのパラメータ推定手法の開発: 2次元モデルを用いた評価
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菅本大仁, 石塚師也, 林 為人, 坂井健海
2. 発表標題 八幡平地域の地熱坑井から得られたカッティングス試料を用いた熱物性測定及び温度構造解析
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Satoru Tsuruki, Kazuya Ishitsuka, Weiren Lin, Yusuke Yamaya, Tatsuya Kajiwara, Ryoichi Saito
2. 発表標題 Bayesian inference of the spatial distribution of effective porosity and salinity at great depths of a geothermal field
3. 学会等名 AGU fall meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shoki Hiranaka, Kazuya Ishitsuka, and Weiren Lin
2. 発表標題 Estimation of time-series surface displacements in Taiwan using interferometric SAR analysis
3. 学会等名 The 14th SEGJ international symposium (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 重光勇太朗, 石塚師也, 林 為人
2. 発表標題 干渉SAR解析で得られた地表変動と地下水位変化の相関性評価: 京阪地域を例として
3. 学会等名 日本リモートセンシング学会第71回学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平中章貴, 石塚師也, 林 為人
2. 発表標題 干渉SAR解析を用いた台湾北東地域における時系列地表変動の推定
3. 学会等名 日本リモートセンシング学会第71回学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鶴木智, 石塚師也, 林為人, 山谷祐介, 梶原竜哉, 杉本健, 斎藤遼一
2. 発表標題 比抵抗を用いたベイズモデルによる地熱地域深部における高塩濃度流体分布の推定
3. 学会等名 第15回岩の力学国内シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石塚師也, 山谷祐介, 渡邊教弘, 岡本京祐, 村田泰章, 浅沼宏, 鈴木浩一, 小林洋介, 岡本敦, 鈴木杏奈, 茂木透, 北村圭吾, 梶原竜哉, 杉本健, 斎藤遼一
2. 発表標題 AIによる超臨界地熱資源評価・掘削技術 AIによる資源量評価
3. 学会等名 日本地熱学会令和2年学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤井元宏, 林為人, 石塚師也, 澁谷奨
2. 発表標題 掘削コア試料の測定による火山地帯の岩石の比抵抗特性とその考察
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小嶋洸輝, 石塚師也, 茂木透, 梶原竜哉, 杉本健, 浅沼宏
2. 発表標題 多変量解析による地熱井の検層データを用いた地層の特徴の抽出
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宇郷翼, 石塚師也, 茂木透, 鈴木浩一, 小林洋介
2. 発表標題 ニューラルネットワークを用いた岩手県葛根田地熱地域の温度・浸透率分布の推定
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鶴木智, 石塚師也, 林為人, 山谷祐介, 梶原竜哉, 杉本健, 齋藤遼一
2. 発表標題 比抵抗を基とした葛根田地熱地域における空隙率・塩濃度のベイズ推定
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------