

# 研究終了報告書

## 「地下資源開発に資する「流れ」と「構造」の逆解析」

研究期間：2019年10月～2022年3月

研究者：鈴木 杏奈

加速フェーズ期間：2022年4月～2023年3月

### 1. 研究のねらい

地下資源開発(例えば地熱エネルギー)では、計測できるデータに基づいて、岩石き裂内(き裂幅 nm-mm スケール)を流れる流体流動を把握する必要がある。この「流れ」と「構造」との関係を定量化・定式化できれば、地下流体流動の評価、最適な開発デザインへとつなげることが出来る。当該研究では、地下から計測できるデータに着目し、不均質媒体の複雑な流体流動・物質移動・熱移動を定式化することを目指した。

複雑き裂構造との関係を把握するためには、まず、複雑き裂構造をどのように定量化するかが重要となる。トポロジカルデータ解析手法の一つであるパーシステントホモロジーは、対象の連結性と、対象間の距離を定量的に評価できることから、岩石き裂構造の流れ特性(つながり・連結性)との関係を見るのに適している可能性がある。そこで当該研究では、まず、パーシステントホモロジーによって複雑き裂構造を定量化し、流れに関する計測データと構造との関係をデータ駆動的に導出した。

加速フェーズでは、物質移動の応答曲線からパーシステントホモロジーによって定量化された複雑き裂構造を推定できるかを数値シミュレーションによって検証し、また、実フィールドに近いデータを用いて、データ駆動型浸透率分布推定手法を提案した。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

地下資源開発では、複雑なき裂の「構造」と「流れ」(流動・熱移動・物質移動等)との関係を理解し、地表で得られるデータに基づいて定量化・定式化ができれば、持続的に利用するための最適なフィールドデザインができると考えられる。本研究では、まず、複雑なき裂構造を位相幾何学の解析手法であるパーシステントホモロジーを用いて定量化し、定量化された複雑き裂構造と計測データとの関係を評価した。その結果、人の目ではわからないような複雑な岩石構造の特性をパーシステントホモロジーによって抽出することができ(Suzuki et al., *Compt & Geos*, 2020)、さらには、流動特性で最も重要なパラメータである浸透率との関係を見出した(Suzuki et al., *Sci. Rep*, 2021)。この結果より、画像データのみを用いて、流動特性を推定できる可能性を示した。加速フェーズでは、物質移動の応答曲線との関係を数値シミュレーションによって調査し、応答曲線から地下構造の特性(特に流路の開口幅)を推定できる可能性を示した。

また、3D プリンタを活用した流動・熱移動実験を行い、温度データに熱移動モデルを適用することで、岩石き裂の表面積を推定する手法の妥当性を示すことができた(Suzuki et al., *Geothermics*, 2022)(加速フェーズ実施後採択)。提案する手法を用いて、フィールドデータを解析したところ、妥当な推定を示すことができた。さらには、フィールドの計測データに基づき、データ駆動的に浸透率分布を推定する機械学習手法を提案し(Suzuki et al., *Geoscience*,

2022) (加速フェーズ実施後採択), さらに, 加速フェーズでは, 条件付き敵対的生成ネットワーク(CGAN)や畳み込みニューラルネットワーク(CNN)を用いた推定手法を提案し, 手法の妥当性を検証した.

## (2) 詳細

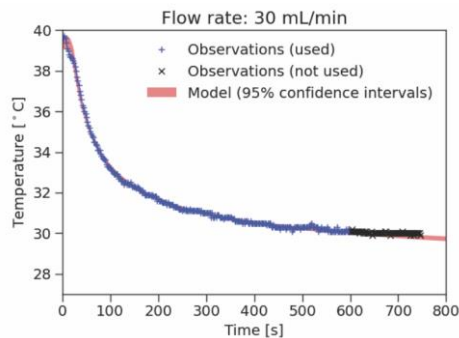
### 研究テーマ A「3D プリンタを活用した構造制御型流動実験と数値シミュレーション」

3D プリンタを用いていくつかのき裂構造サンプルを作成し, 流動実験を行った. 透水実験のほか, 物質移動現象を見るトレーサー試験や熱移動試験を実施した. トレーサー試験では染料を注入し, 流動挙動を可視化することができた. また, 熱移動試験では, 温度応答から, 簡易な熱移動方程式を用いて流路表面積の表面積を推定できる可能性を示した. また, 同じ構造データを用いてナビエーストックス方程式に基づいた直接シミュレーション(OpenFOAM を利用)を実施し, 実験と数値シミュレーションの比較を行った. 3D プリンタによる実験をベンチマークとし, また, スーパーコンピュータで多数パターンの計算を行い, 構造と計測結果との関係のデータセットを収集した.

(a)



(b)



(c)

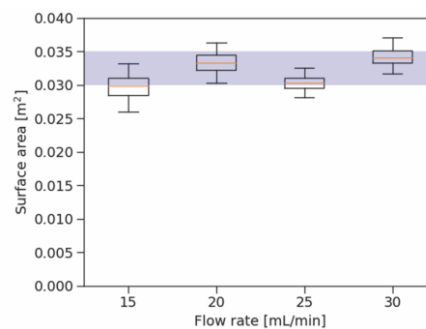


Fig. 1: 3D プリンタを用いた流動実験. (a)き裂内の流動挙動の可視化, (b) 温度応答と熱移動モデルによる解析, (c) 表面積の推定結果(紫帯がサンプルのとらうる表面積).

### 研究テーマ B「パーシステントホモロジーによる複雑き裂構造の定量化」

数値シミュレーションによって模擬した岩石のき裂構造をパーシステントホモロジーに用いて定量的に評価した. その結果, 流動特性の違いによって変化の現れる岩石構造の特性を整理することができ, これまで人が経験的に分類を行っていた構造を機械的に行うことに成功した. また, パーシステントホモロジー解析によって, 流路の数ならびにその流路の最小の流路幅を推定した. その結果, 浸透率  $K$  は Fig. 2 内の式のように書ける. この式を岩石構造に適用し, 直接流動シミュレーション結果と比較した. 推定値はシミュレーション結果に近い値を示しており, 妥当な推定が可能であることが示された. ただし, 式は平行平板モデルに基づいて

いるため、流れは直線的であると仮定している。仮に、流路に蛇行があると、流れの長さが長くなり、推定値が実際の値よりも大きくなる可能性がある。

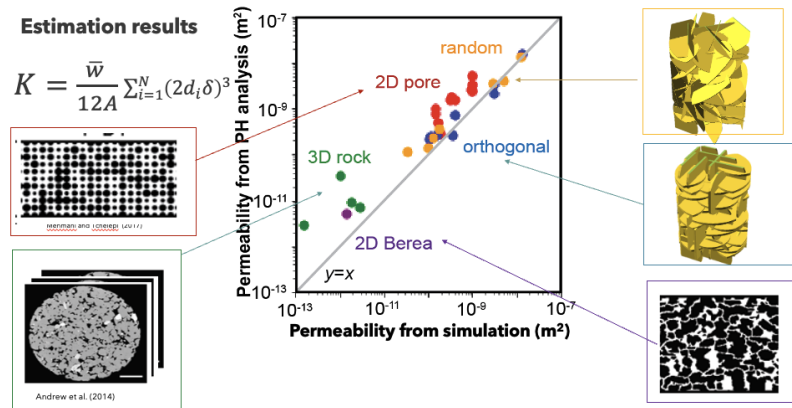


Fig. 2: 様々な岩石構造に対するパーシステントホモロジーを用いた浸透率の推定.

### 研究テーマ C「計測データから複雑き裂構造を推定するデータ駆動型モデルの開発」

貯留層モデルの構成パラメータの数は数万個に及ぶため、考慮すべきパラメータの組み合わせはほぼ無限にある。本研究では、地熱貯留層モデルの入力パラメータを一意に推定するために、測定可能なデータを用いて機械学習ベースで浸透率分布を提案した。浸透率分布が異なる自然状態での圧力と温度の分布を計算できる地熱貯留層シミュレーターによって、大量の学習データを用意し、いくつかの機械学習アルゴリズムを適用して、浸透率と圧力・温度分布の関係を学習した。圧力差を特徴変数として用いたランダムフォレストが最も良い推定値が得られた。また、加速フェーズでは、条件付き敵対的生成ネットワーク(CGAN)や畳み込みニューラルネットワーク(CNN)を用いた推定手法を提案し、これらの手法によっても、妥当な推定ができることを示した。

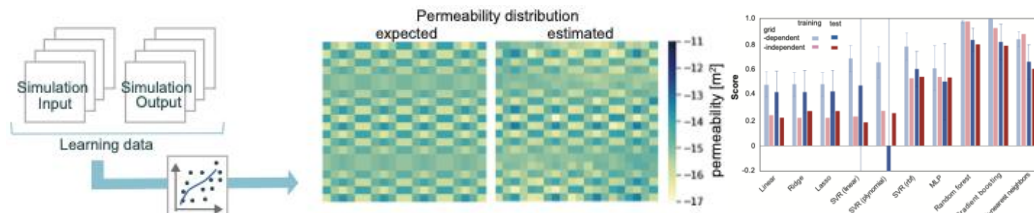


Fig. 4: 浸透率分布を推定する学習モデルの構築.

### 研究テーマ D「物質移動の応答曲線に基づく地下構造推定」(加速フェーズ)

物質移動の応答曲線との関係を数値シミュレーションによって検証した。研究テーマ A で示したように、温度応答を用いれば流路表面積を推定することができ、ここで、物質移動の応答曲線から平均滞留時間および、各流路の流量の割合を導くことで、各流路の開口幅が推定できる可能性を示した。

## 3. 今後の展開

本研究で見出した岩石構造と流動特性との関係や、導出した浸透率の推定式では、簡略化した流路構造を想定している。複雑な岩石の浸透率を推定しようとすると、現状では推定誤差がで

るため、他のパラメータで補正する必要がある。特に、現状のモデルでは、流路を直線と仮定しており、流路が平行平板以外の形状の場合や曲がりくねった流路の場合は、浸透率を大きく見積ってしまう。そこで今後の1年間で、パーシステントホモロジーによって記述される構造のデータを用いて、多様な形状を考慮できる推定式への拡張を目指す。

また、地熱開発の将来予測では、将来的な温度変化を予測することが求められる。特に、発電に利用した水を再び地下に戻す還元は、地下の水量や圧力維持に寄与し、持続的なシステムの構築が期待できる。一方、発電に利用した水は、地下の温度より冷えているため、地下に還元した流体が岩石からどの程度熱を受けとるか、岩石と水が接する流路の表面積を評価する必要がある。今後は、これまでに得られた、パーシステントホモロジーによる流動特性の関係式と、データ駆動型浸透率推定手法を拡張し、新たな構造表現の検証、将来予測の可能性を検証する。加速フェーズでは、条件付き敵対的生成ネットワーク(CGAN)や畳み込みニューラルネットワーク(CNN)を用いることで、より妥当な推定ができる可能性を示した。このことから、新しい数理・情報科学の手法を適用していくことで、地下開発への展開が広がると考えられる。

本研究展開は、現代社会を支える上で不可欠なエネルギー問題の解決に向けた数理科学と情報科学の連携・融合研究であると考えている。申請者は数学・情報科学が専門ではないが、このACT-Xで出会った数学・情報科学の専門家の協力を仰ぐことで、実社会に即戦力となる数学・情報科学の展開を社会に示していきたいと考えている。

また、本研究課題は、本質的には不均質多孔質体における流れである。世の中で作成される固体材料・デバイスの多くが多孔質体であり、その性能は、その媒体内の流れが支配している。したがって、本研究は岩体内の熱や水の流れだけでなく、燃料電池内のイオンの動き、骨の中の骨髄の動き、など幅広い分野への応用が可能であると考えており、不均質多孔質体全般の最適なデザインの学理構築を目指すことができる。

地下資源利用の普及のみを狙っても、多様なステークホルダーが満足するとは限らない。本研究では、基礎研究段階からステークホルダーの意識変容を図る取り組みを並行することが、社会実装の早期実現には欠かせないと考えられる。ACT-X期間中には、複数のJST主催のイベントに登壇し、社会と対話を積極的に行なった。今後も、ただ専門の研究を進めるのではなく、社会コミュニティ全体でより良い資源利用の形を探究しながら、研究を展開していきたい。

#### 4. 自己評価

研究目的については、コロナ禍で実験が思う通りにできなかったことにより、多少遅れが生じたり、予定の変更が必要であったが、おおよそ達成することができた。研究内容の一部は、領域会議で他の研究者やアドバイザーと議論することによって、軌道修正できた部分も含んでおり、ACT-Xでのネットワークによって、研究をブラッシュアップすることができたと思う。

主要論文の一つ(下記2)はプレスリリースを出し、その結果、複数の新聞や雑誌で取り上げられた。この成果は、社会への波及効果があるものと言える。また、自分自身が応用する側のため、今回の成果を応用し、実フィールドへ繋げていきたいと考えている。

上述の通り、今回のACT-X期間中には、ただ専門の研究を進めるのではなく、複数のJST主催のイベントに登壇し、社会と対話を積極的に行なった。研究と社会とをどのようにつなげればよいかは暗中模索ではあったが、その中で見えてきたニーズもあった。また、他の研究者と共同したい研究内容もあったが、具体的な研究テーマを進めるには至らなかった。今後も引き続き、他の研究者とのネットワークを保ちながら、新しい研究展開を探していきたいと思う。

#### 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：21 件（加速フェーズ実施後更新）

1. Suzuki, A. et al. Flow estimation solely from image data through persistent homology analysis. Sci. Rep. 11, 17948 (2021)
概要 数値シミュレーションによって模擬した岩石のき裂構造をパーシステントホモロジーに用いて定量的に評価した。その結果、流動特性の違いによって変化の現れる岩石構造の特性を整理することができ、これまで人が経験的に分類を行っていた構造を機械的に行うことに成功した。
2. Suzuki, A. et al. Inferring fracture forming processes by characterizing fracture network patterns with persistent homology. Computers and Geosciences 143, 104550 (2020)
概要 岩石き裂によって構成される流路の数と幅をパーシステントホモロジーによって抽出し、そのパラメータによって表現される浸透率推定式を導出した。人工的なき裂ネットワークモデル、岩石構造を解析し、また、流動シミュレーションを実施することで、浸透率の推定式の妥当性を検証し、良い推定ができることを示した。
3. Suzuki, A., Bjarkason, E. K., Yamaguchi, A., Hawkins, A. J. & Hashida, T. Estimation of flow-channel structures with uncertainty quantification: Validation by 3D-printed fractures and field application. Geothermics 105, 102480 (2022)
概要 熱移動モデルを用いて地下の流路表面積を推定する手法を提案し、3Dプリンタによる実験、フィールドデータへ適用し、その有効性を示した。 ※加速フェーズ実施の成果
4. Suzuki, A., Fukui, K. I., Onodera, S., Ishizaki, J. & Hashida, T. Data-Driven Geothermal Reservoir Modeling: Estimating Permeability Distributions by Machine Learning. Geosciences (Switzerland) 12, (2022)
概要 地熱貯留層モデリングを自動化させるため、浸透率を計測データに基づき推定する機械学習モデルを開発した。数値シミュレーションによって多数の浸透率パターンに対するアウトプット(温度、圧力)を生成し、それらを学習データとした学習モデルを複数の機械学習アルゴリズムを用いて開発した。テストデータに対して、比較的良い精度で推定ができることを示した。 ※加速フェーズ実施の成果

(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)

1. 【新聞掲載】2021年9月24日掲載、日刊工業新聞(「科学技術・大学」面)、「岩石内の流体流動、実験いらずで直接予測 東北大」
2. 【受賞】令和2年7月19日、会頭特別賞、JCI JAPAN TOYP 2020、(公社)日本青年会議所
3. 【登壇】2020年6月3日 “日本の未来、ワク湧くさせよう！温泉で！Waku2 as life—資源利用と地域づくりの最適化” 【JST 共催】Beyondミーティング特別編～科学技術×ソーシャルインパクト～、Online
4. 【登壇】2020年12月4日～2021年1月22日 “「Waku×Waku as Life」をよりサステナブルな取り組みへ！”，SCIENCE IMPACT LAB ～意志ある科学者と共に社会実装プランで未来



を描く3日間～, Online

5. 【インタビュー掲載】2021年9月1日発刊、JSTnews(p16～16)、「Waku Waku する気持ちがすべての源」
6. 【受賞】2022年7月奨励賞, 日本情報地質学会. ※加速フェーズ実施の成果
7. 【招待講演】2022年11月16日”New Descriptors and Estimations of Structures of Flow Paths in Fractured Rocks”, CouFrac. ※加速フェーズ実施の成果