

令和3年9月22日

報道機関 各位

東北大学流体科学研究所

**複雑な構造の“かたち”から“ながれ”を直接予測
岩石内の流体流動をトポロジーによって読み解く**

【発表のポイント】

- 岩石内の流路を、応用数学における「穴」として評価した。
- 流動実験やシミュレーションなしに、画像データ（形の情報）のみによる流れ特性の簡易な予測に成功した。
- カーボンニュートラル技術として注目されている二酸化炭素の地中貯留や地熱開発などの開発加速に期待。

【概要】

複雑な構造の中の流れやすさを予測することは、長年の課題でした。東北大学 流体科学研究所 鈴木杏奈 助教ら研究グループは、スコットランド University of Strathclyde James M. Minto 博士、九州大学工学研究員地球資源システム工学部門 辻健 教授、岡山大学 サイバーフィジカル情報応用研究コア 大林一平 教授、京都大学高等研究院 平岡裕章 教授らと共同で、岩石内を水が流れる流路を、数学的な「穴」として評価し、構造情報から水の流れやすさを予測する方法を提案しました。本アプローチは、機械学習や畳み込みニューラルネットワークでは捉えにくい大域的な特徴を抽出することにより、“かたち”と“ながれ”を結びつける新しいアプローチです。流動実験やシミュレーションをしなくても、構造の情報さえあれば、簡単に流れやすさを求めることができます。岩石内の水の流れやすさを把握することによって、カーボンニュートラル技術として注目されている二酸化炭素の地中貯留や、地熱開発などに利用できます。

この研究成果は、9月10日 Nature Publishing Group の電子ジャーナル *Scientific Reports* に掲載されました。

【詳細な説明】

・研究の背景

空気や水、熱など、私たちの周りでは、様々なものが流れていますが、そのほとんどが周囲の構造物に支配されて流れています。例えば、小型化した人工デバイスを開発するためには、その中を流れる熱や流体の動きを把握し、最適な形状にする必要があります。自然を相手とする天然資源開発では、岩石の割れ目の中を流れる流体の流れを把握して、適切に生産する必要があります。複雑な構造の中の流れやすさを予測することは、長年の課題でした。構造を表すパラメータの一つとして、媒体の中にどの程度隙間があるかを示す空隙率が使われており、近年開発が進むCT画像などの画像データから、その値を計測することができます。しかしながら、隙間同士がつながっていなければ流路にはならないことから、空隙率だけで構造を表しても流れを予想することは困難であり、流れとの関係をうまく表すことができる構造の上手い表現方法が確立していませんでした。

応用数学の一分野であるトポロジーは、形のつながり、「穴」を調べるのに適しています。中でもパーシステントホモロジーは、トポロジーデータ解析の最も重要なツールの一つであり、様々な「穴」の特徴を容易に計算することができます。本研究では、パーシステントホモロジーを用いて、岩石の割れ目によって構成される流路を「穴」として検知することで、“かたち”と“ながれ”の関係を導けないかと考えました。

・研究の内容

パーシステントホモロジー解析では、「穴」を検出し、定量化します。岩石の入口から出口までつながった隙間を流路と考えると、パーシステントホモロジーは、流路として機能する隙間を検出することができます。また、流路の中でも最も細くなる幅も定量的に検出できるので、その情報を使うことによって、流れ特性として最も重要なパラメータである流れやすさ（浸透率）を導出する式を提案しました。本研究では、人工的なネットワーク構造や、実際の岩石のCT画像データを用いて、手法の適用性を検証しました。流体流動の詳細なシミュレーションから得られた実際の流れやすさと比較したところ、受け入れられる範囲で推定できたことを確かめました。この方法を使えば、流体シミュレーションや流動実験を行わなくても、画像データのみから流れやすさを推定することができ、解析を迅速に行うことができると期待できます。

・今後の展開

本研究では、トポロジカルデータ解析に基づいて、画像データから物理現象をモデル化することに成功しました。岩石の中の流れやすさを把握することによって、カーボンニュートラル技術として注目されている二酸化炭素の地中貯

留や、地熱開発などに利用できます。さらにこの手法は、岩石内部の流れだけでなく、二酸化炭素吸収のための透過膜の評価や、人工デバイス設計、人の体中の毛細血管などの評価にも応用できると考えられます。流れの特性を推定するだけでなく、物質移動や電気・磁気の流れなど、さまざまな輸送現象の特性評価にも応用できると期待できます。

近年では、機械学習や畳み込みニューラルネットワークなど、ブラックボックス化したアプローチが増えてきましたが、このブラックボックス化したアプローチだとモデルの解釈が難しく、汎用性に欠ける問題点がありました。一方、我々のアプローチは、水が流れる流路を連結した穴の構造として表現することによって、単純で簡単な原理で、流れやすさを予測することができます。このように、トポロジーによって新たな記述法を提案することは、機械学習や畳み込みニューラルネットワークでは捉えにくい全体的な特徴を抽出することができます。

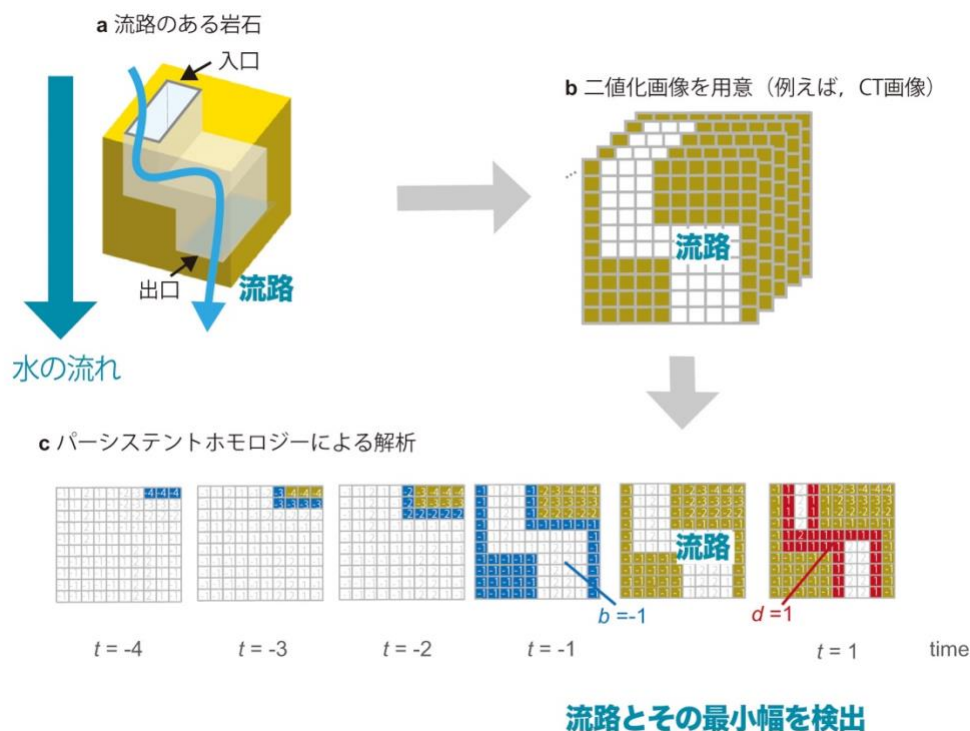


図1：パーシステントホモロジーによる岩石の流路解析のイメージ。(a) 岩石内の割れ目が入り口から出口までつながっていると流路となり、水が流れることができます。(b) このような岩石を解析するために、二値化画像 (例えば、CT画像など) を用意します。(c) パーシステントホモロジーで解析すると、流路とその最小の幅を検出できます。

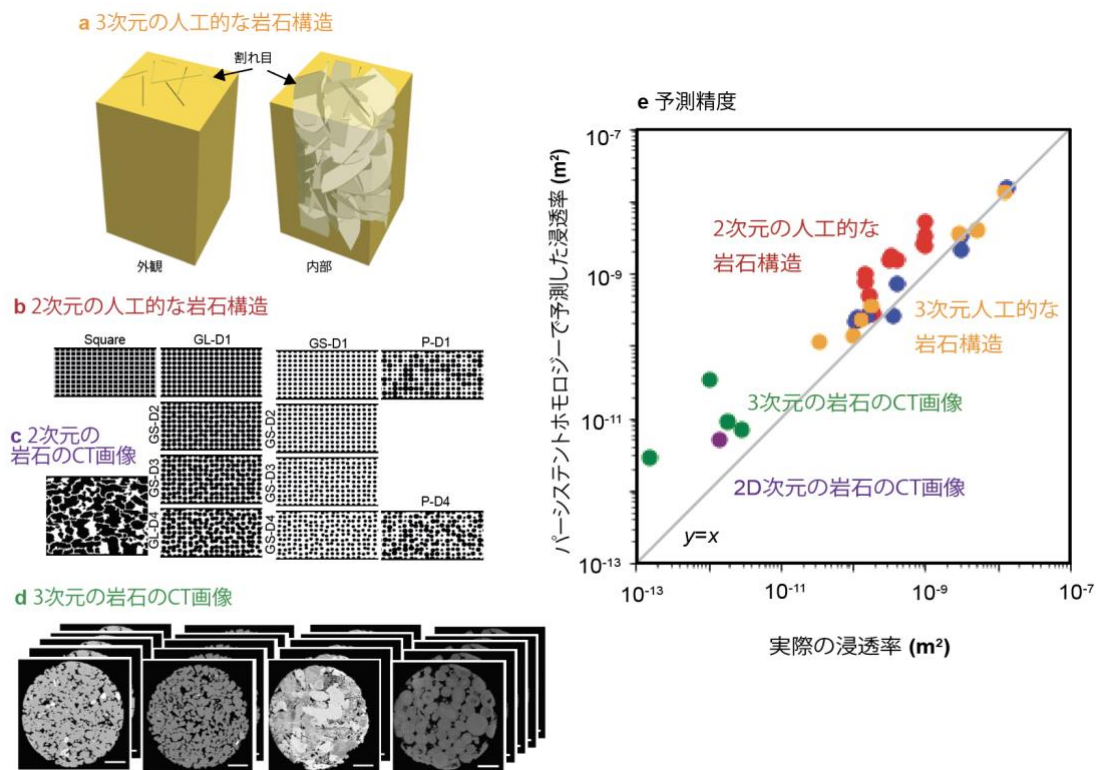


図 2：予測精度の検証。(a)3次元の人工的に作成した岩石，(b)2次元の人工的な岩石，(c)2次元の岩石のCT画像，および(d)3次元の岩石のCT画像を用いて，パーシステントホモロジーによる浸透率の推定を行いました。(e)同じ構造を用いて行われた流動実験や数値シミュレーションによる浸透率と，推定した値を比較しました。斜め線に近いほど予測がうまくいったことを示しており，パーシステントホモロジーによる予測によって，実際の浸透率に近い値を推定することができました。

【論文情報】

タイトル：Flow estimation solely from image data through persistent homology analysis

著者：Anna Suzuki, Miyuki Miyazawa, James M. Minto, Takeshi Tsuji, Ippei Obayashi, Yasuaki Hiraoka & Takatoshi Ito

雑誌：Scientific Reports

DOI: 10.1038/s41598-021-97222-6

【用語解説】

パーシステントホモロジー：応用数学的手法の一つ。“かたち”を扱う幾何学の1分野「トポロジー」では，個数だけを議論するのに対し，“パーシステン

トホモロジー」では、穴の形・大きさ・分布をも定量的に扱うことが可能です。

<資金情報> 本研究の一部は JSPS 科研費 JP20H02676, JP17H04976, JP16K17638, JP19H00834, JP20H05884, JST ACT-X JPMJAX190H, JST さきがけ JPMJPR1923, JST CREST 15656429, 戦略的イノベーション創造支援プログラム D72 (日本) の支援を受けて実施されました。

【問い合わせ先】

東北大学流体科学研究所

担当 助教 鈴木杏奈

電話 022-217-5284

E-mail anna.suzuki@tohoku.ac.jp