

令和 6 年 5 月 20 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K05402

研究課題名(和文) 地下流体流動モデルとシミュレータの開発：圧力変化と移流の統一的理解を目指して

研究課題名(英文) Joint modeling of pressure propagation and advection to develop a multi-purpose simulator

研究代表者

松本 光央 (Matsumoto, Mitsuo)

九州大学・工学研究院・助教

研究者番号：60842060

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、地下流体流動に伴う圧力変化とトレーサー濃度変化を統一的に説明するアイデア(不均質性が高い空隙分布の地下流体の流動に伴う、圧力変化とトレーサー濃度の変化が、見掛け異なる空隙率に従う)について、まず室内実験で検証し、その実現可能性を示した。更に地下断裂分布を忠実に再現できるdiscrete fracture networkモデルに基づくシミュレータにより、フィールドスケールでの実現可能性を示した。最後に同アイデアを発展させて、地下透水性構造のシミュレーションモデルの正確さを定量的に評価するアイデアとその応用の可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究が示し検証したアイデアは、地下流体の流動の効果的なキャラクタライズの方法を提供することで、地下流体を利活用する幅広い理工学の問題への適用可能性を秘めている。特に本研究が着目した流体資源(貯留層)の調査開発においては、その各段階における貯留層シミュレーションモデルの正確さの評価を通じてプロジェクトの意思決定に有益な情報を与えるほか、地球物理学的な探査手法との併用により、開口性断裂の発見確率の向上にも寄与できると期待される。

研究成果の概要(英文)：This study presented and validated a novel perspective for improving the understanding of subsurface permeable structures by jointly diagnosing the responses of conventional pressure transient and tracer testing: the pressure and tracer responses individually yielded apparent porosity-thickness products. The idea was quantitatively validated using a laboratory experiment and numerical simulation based on the discrete fracture network model, which was capable of faithfully reproducing subsurface fracture distribution. Finally, an extended approach and its potential applications were presented by estimating the accuracy of subsurface permeable structures assumed in simulation models.

研究分野：流体資源工学

キーワード：貯留層シミュレーション 圧力遷移試験 トレーサー試験

### 1. 研究開始当初の背景

地下の流体流動は、広範な工学的諸問題において重要である(石油・天然ガス、地熱等の流体資源の開発、汚染物質の拡散の評価・予測、有価・廃棄物の地下貯留、地盤の安定性評価等)。特に、複雑に分布する割れ目を伴う流体流動のモデル化を目指し、Barenblatt et al. (1960) の dual-porosity モデル以来、試行錯誤がなされてきた。

地下流体に与えた人工的な信号への応答を利用した主な調査方法として、圧力遷移試験とトレーサー試験とがある(表1)。両者は流体流動の異なる側面を調査するものであるが、応用分野によって重きを成す側面は異なり、両試験結果を統一的モデルに基づいて理解・再現する試みは少なく、手法も未確立である。しかしながら、地下資源の効率的な開発と自然環境への配慮の高度な両立等、工学的諸問題に対して期待されるレベルが高度化する中で、両試験の併用とそれらの結果の統一的理解の重要性は高まりつつある。

表1：圧力遷移試験・トレーサー試験の概要

	圧力遷移試験	トレーサー試験
背景理論	圧力の拡散問題	試薬濃度の移流分散問題
人工的信号	井戸で試験的に生産・注入	井戸に試薬を投入
応答	井戸の圧力変化	井戸や湧水地の試薬濃度変化
用途例	地下資源の生産性評価	汚染物質の拡散予測

### 2. 研究の目的

上記の背景のもと本研究では、代表者が過去に提案した(松本, 2018)、両試験結果を統一的に理解・再現するモデルを確立することを目的とし、次の2つの目標を定めた。

目標1：実フィールドで経験的に考案した数学モデルを、新たな多角的視点(ミクロスケールのシミュレーション、室内実験)で検証し、再構築する。

目標2：これまでに開発した流体流動シミュレータをベースに、再構築した数学モデルを実装した新たな流体流動シミュレータを開発する。

このモデルでは、圧力変化と移流はそれぞれ異なる空隙率のポーラスモデルに従う。つまり、圧力変化は形状に関わらず割れ目全体(割れ目①・②)を考慮した空隙率に従うのに対し、移流は一部の流路として有効な領域(割れ目②)のみを考慮した空隙率に従う(図1)。そのため、ポーラスモデルと比較してパラメータが1つ増えるだけでモデルの自由度の増加は最小限であり、その挙動はポーラスモデルを参考に容易に見通せる扱い易さを持つ。同時に、パラメータの選択により圧力とトレーサー濃度の変化を独立して個別に再現できる柔軟性も併せ持つ。



図1：本研究のモデルの考え方

割れ目を伴う地層中の流体流動を考える従来一般的なモデルとして、既述の dual-porosity モデルを含む multiple-continuum モデルがある。本研究のモデルは multiple-continuum モデルとは対象とする状況が異なるために、一概に優劣は比較できない。従来の multiple-continuum モデルに加えて、本研究のモデルは地下の流体流動の理解に向けた新たなコンセプトを与え、その進展に寄与することが期待される。

本研究では当初、既述の目的・目標に基づいて地下流体流動の一モデルを確立することを目指していた。しかしながら検討を進める中で、モデル—つまり、観測結果から現象を理解・再現する方法—を確立することに留まらず、本研究のモデルが定義する2種類の空隙率(または、空隙率・層厚積)の乖離を、任意の時点での地下の透水性構造の理解の正確さを示す尺度とするアイデアを着想した。そこで、同アイデアの検証までを最終目標として研究に取り組んだ。

### 3. 研究の方法

目標1については、プラスチック製のチューブやタンク等を用いた室内実験により、本研究のモデルの考え方の前提となる、圧力変化と移流が異なる空隙率のポーラスモデルに従う性質の実現可能性を検証した。実験により得られた圧力とトレーサー濃度の変化を、それぞれ Hagen-Poiseuille 流れに従う1本のチューブ内の流動を仮定したシミュレーションモデルで再現し、その過程で定まるパラメータの値を比較検討した。

目標2については、当初の目標から方針を修正した。当初は、室内実験等の結果から定式化した独自の数学モデルを、地下の流体流動シミュレータに実装することを目標としていた。しかし既述の通り、圧力とトレーサー濃度の変化からそれぞれ求められる空隙率(または、空隙率・層厚積)の乖離を、任意の時点での地下の透水性構造の理解の正確さを示す尺度とするアイデアを着想した。そこでそのアイデアの具体例を従来一般的な数学モデルに基づくシミュレーション

ョンで示し、その有用性を明らかにすることを新たな目標とした。

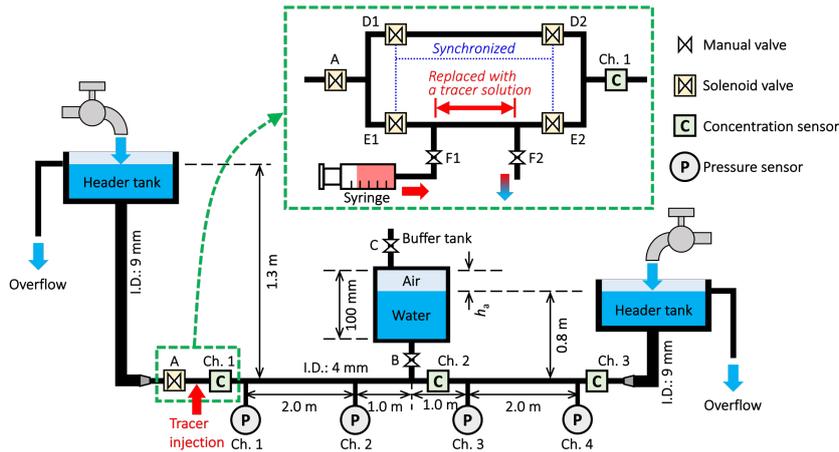


図 2：実験装置概念図 (Matsumoto and Sawayama, 2024)

#### 4. 研究成果

##### (1) 室内実験

実験装置の概念図を図 2 に示す。定水位水槽により一定の圧力勾配を与えられるチューブの上流側に電磁弁（バルブ A）を設け、その開放直後の過渡的な圧力変化を 4 箇所（Ch. 1-4）の圧力センサで測定できる。バルブ A の下流側には電磁弁（バルブ D1, D2, E1, E2）操作により任意のタイミングでトレーサー（食紅）をチューブ内の流れに投入できる機構があり、その濃度も 3 箇所（Ch. 1-3）のセンサで測定できる。チューブの中間点には、密閉されたバッファタンクが接続されている。バッファタンク内の空気層の厚さを調節することで、同タンクが水で満たされた場合と仮定した場合の実効的体積を調節できる他、バルブ B を閉じることで同タンクを切り離すこともできる。

バッファタンクの有無や実効的体積を変化させながら、圧力とトレーサー濃度の変化をそれぞれ比較した。その結果、両変化は共に Hagen-Poiseuille 流れに従う 1 本のチューブを仮定したシミュレーションモデルで再現することができた。ただし、モデルに含まれる見掛上のチューブ径を、両変化を再現するために個別に試行錯誤的に求めたところ、バッファタンクの実効的体積の増加と共にその乖離が拡大した。つまり、トレーサー濃度の変化は、バッファタンクに関わらずカタログ値（4 mm）に近いチューブ径で再現できた。一方、圧力変化の再現に必要な見掛上のチューブ径は、バッファタンクを切り離した場合にはカタログ値とほぼ一致し、接続したバッファタンクの実効的体積の増加と共にカタログ値の数百倍程度まで増加した。

以上の結果から、Hagen-Poiseuille 流れと数学的に等価な方程式に従う地下流体の流動についても、圧力とトレーサー濃度の変化に同様の性質があると考えられる。特に、両変化を再現するために必要となる見掛上のチューブ径の差は、仮定した構造（1 本のチューブ）と実際の構造（中間にバッファタンクが繋がったチューブ）との乖離—つまり、仮定の正確さを定量的に表していると考えられる。この考え方を実フィールドに応用すれば、任意の時点での地下の

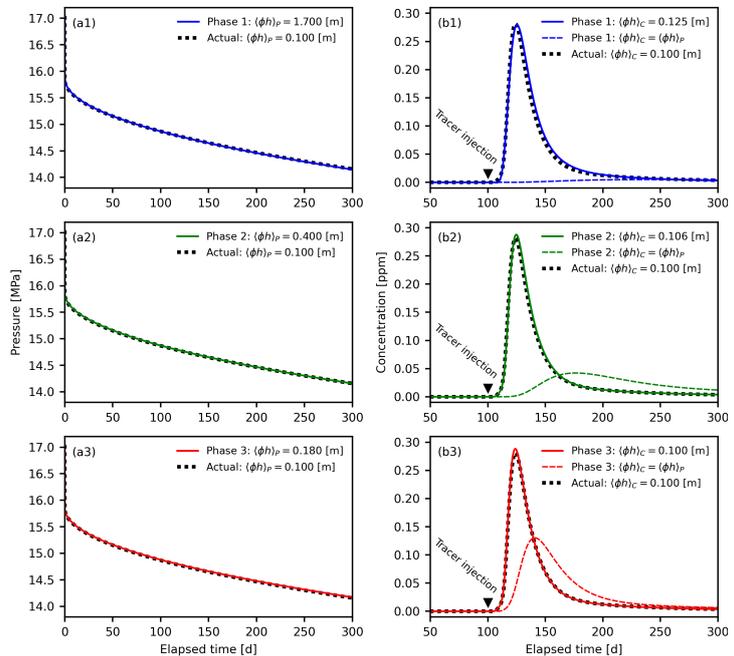


図 3：仮想的な地熱資源調査の各フェーズで再現された圧力とトレーサー濃度の変化 (Matsumoto and Sawayama, 2024)。Actual は全 4 枚の断層を考慮した実際の透水性構造による仮想的な観測データ。Phase 1-3 は、それぞれ 1-3 枚の既発見断層のみを考慮した不正確な透水性構造のモデルによるシミュレーション結果。 $\langle \phi h \rangle_P$  と  $\langle \phi h \rangle_C$  は、それぞれ圧力とトレーサー濃度の変化を再現するために試行錯誤的に決定された空隙率・層厚積。

透水性構造の理解の正確さを定量化できると考えられる。

## (2) シミュレーション

室内実験と同様に、本研究のモデルの考え方の前提となる性質の実現可能性を、フィールドスケールでのシミュレーションで検証した。断層を介して接続された複数の水平多孔質層により、室内実験の装置と同じ特徴を持つ透水性構造を持つフィールドを仮定し、そこで再現された圧力とトレーサー濃度の変化について検討した。このシミュレーションでも、室内実験と同様の結果と考察が得られた。ただし室内実験でのチューブ径は、多孔質層の空隙率・層厚積に対応する。

室内実験とシミュレーションにより検証された圧力とトレーサー濃度の変化の性質を踏まえ、両変化が示す2種類の空隙率・層厚積の乖離を、透水性構造の理解の正確さの尺度として利用するアイデアの具体例を示すことを試みた。並行する4枚の垂直断層が1枚の水平構造で接続された透水性構造を仮定し、地熱資源調査の各フェーズで垂直断層が1枚ずつ発見されることを考える。ここで、このフィールドで実施された生産試験で得られた一つまり、正確な透水性構造のモデルでシミュレーションされた一圧力とトレーサー濃度の変化を、各フェーズで発見された断層のみを考慮した透水性構造のモデルで再現した結果を、図3に示す。調査の各フェーズで発見された断層だけを考慮した不正確なモデルでも、異なる値の空隙率・層厚積を使用することを許せば、圧力とトレーサー濃度の変化をそれぞれ再現することができた。またこれらの2種類の空隙率・層厚積の差は、モデルの正確さの向上により縮小することも確認された。

以上のアイデアを実フィールドでの資源調査・開発に適用することで、任意の時点における透水性構造の理解度を定量的に評価することが可能となるなど、プロジェクトの継続可否等の意思決定に有益な情報が得られると期待される。更に別の応用の可能性として、従来の地球物理学的な探査手法では断層等に伴う物性分布の不連続面を見出すことは比較的容易であるが、それに開口性の割れ目が伴うかを判別することは容易ではない。地球物理学的な探査手法と本研究のアイデアを併用し、圧力とトレーサー濃度の変化を共通の空隙率・層厚積の値を用いたシミュレーションで再現できるという制約条件を与えることで、開口性の割れ目を伴う可能性が高い不連続面を効果的に絞り込めることが期待される。今後はこれらの応用の可能性について、更なる検証を進める予定である。

## <引用文献>

- Barenblatt, G. I., Zheltov, I. P., Kochina, I. N., Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks [strata], Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 24(5), 1286-1303, 1960.
- 松本光央, 流路として機能しない空隙を導入した貯留層シミュレーションモデルによる圧力・トレーサー濃度変化の理論的検討, 日本地熱学会誌, 40(2), 129-144, 2018.
- Matsumoto, M., Sawayama, K., Joint diagnostic approach to pressure and tracer responses from reservoirs: An experimental and theoretical study to estimate the accuracy of reservoir models, Geofluids, 2024, 9329314, 2024.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Matsumoto Mitsuo, Sawayama Kazuki	4. 巻 2024
2. 論文標題 Joint Diagnostic Approach to Pressure and Tracer Responses from Reservoirs: An Experimental and Theoretical Study to Estimate the Accuracy of Reservoir Models	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Geofluids	6. 最初と最後の頁 1~21
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1155/2024/9329314	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3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 松本光央、澤山和貴
2. 発表標題 貯留層の空隙分布の不均質性の定量化とその有用性
3. 学会等名 日本地熱学会令和4年東京大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古賀翼、澤山和貴、松本光央
2. 発表標題 地下の空隙の不均質性を考慮したsingle-porosityモデルの開発
3. 学会等名 日本地熱学会令和3年学術講演会（仙台大会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mitsuo MATSUMOTO, Naoto YOSHIDA, Tsukasa HIGUCHI, Keitaro TAKAKI
2. 発表標題 Numerical Simulator for the Coupled Model of Wells and Fractured Reservoirs
3. 学会等名 45th New Zealand Geothermal Workshop（国際学会）
4. 発表年 2023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
研究 協力 者	澤山 和貴  (Sawayama Kazuki)  (10936991)	京都大学・大学院理学研究科・助教    (14301)	

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
---------	---------