

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：17401

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B)）

研究期間：2019～2023

課題番号：19KK0109

研究課題名（和文）多孔質材料中の二相熱流体挙動の解明とその相似則を用いた高精度数値解析手法の確立

研究課題名（英文）Mechanism of two phase thermo-fluid behavior in porous media and its high accuracy numerical analysis based on multi-scale effect

研究代表者

椋木 俊文（Mukunoki, Toshifumi）

熊本大学・大学院先端科学研究部（工）・教授

研究者番号：30423651

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、液液二相流格子ボルツマン法とナビアストークス方程式と移流拡散方程式を連成した多孔質内における高粘性流体の流動解析を行った。また、X線CT用高粘性流体注入実験装置を開発し、得られた知見は次のとおりである。液液二相流格子ボルツマン法による流動シミュレーションは、熱水を注入する回収方法をシミュレーションする位置づけであり、間隙流体内の水と油の挙動を定性的に評価できた。後者の拡散を伴うN-S方程式と移流拡散方程式の連成解析では、多孔質内における高粘性流体は、粘性と密度が異なる流体が接触する部分で拡散が生じ、X線CT解析と連成解析よりゆっくり拡散が進む挙動が確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、オイルサンドからの重質油を効率的に回収するという実問題を多少に、多孔質材料中の高粘性流体の流動機構を解明することを学術的課題とした。LBMによる流動解析は、二流体間の拡散現象を考慮できないが、間隙中に重質油がトラップされる様子が再現できた。一方、連成解析の成果は、従来の重質油回収方法に新たに提案するVAPEX法を想定した解析であり、二流体間の拡散現象とそれに伴う粘性の変化が、多孔質体内で流動挙動を加速する現象が再現できた。これらの成果は、オイルサンドからの重質油回収のための新しい技術開発及び境界条件の提案につながることで期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, the liquid-liquid two-phase flow lattice Boltzmann method, coupled with the Navier-Stokes and advection-diffusion equations, was used to analyze the flow of highly viscous fluid in a porous medium. An experimental apparatus for injecting highly viscous fluid for X-ray CT analysis was also developed. The findings are as follows: The flow simulation based on the liquid-liquid two-phase flow lattice Boltzmann method was used to simulate the recovery method of injecting hot water, and the behavior of water and oil in the pore fluid was qualitatively evaluated. In the latter coupled analysis of the Navier-Stokes equation with diffusion and the advection-diffusion equation, the diffusion of highly viscous fluid in a porous medium occurs where fluids with different viscosities and densities come into contact. The slow diffusion behavior was obtained from both X-ray CT analysis and numerical analysis.

研究分野：環境地盤工学

キーワード：油汚染地盤 格子ボルツマン法 移流拡散 粘性 X線CT画像解析 多孔質体

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、コンピュータの高速化および大容量化に伴い、非破壊検査技術が飛躍的に進歩している。これに伴い、地盤(多孔質)内部をより詳細に可視化し、それを画像解析による定量化から、さらに画像データから対象材料の幾何学情報を取り込んだ数値解析が可能になってきた。この技術の進歩により、地盤工学におけるマイクロメカニクスの深化がオイルサンドに代表される資源開発においても利用することが期待される。

2. 研究の目的

本研究の最終目標は、新しい地層内原油回収法を開発することである。この目標を達成するために、オイルサンドのような多孔質体内の重質油の回収時の流動機構を解明することが本研究の目的である。本研究では、X線CT用高粘性流体注入実験装置を開発し、多孔質体内部の流体分布状況を把握する一方で、数値解析を用いて流動現象を分析していく。

3. 研究の方法

3.1 X線CT画像から幾何学条件を取り込んだ液液二相流格子ボルツマン法による流動解析

ここでは、砂粒子群のCT撮影を実施し、その画像を二値化処理して間隙構造と土粒子群の二値画像を作製する。次に、間隙内はすべて油で満たされている条件を与え、そこに水を注入する液液二相流格子ボルツマン(Lattice Boltzmann Method: LBM)流動解析を実施する。

(1) 格子ボルツマン法

格子ボルツマン法は、流体を有限個の速度(例えば3次元では15速度、19速度、27速度など)をもつ多数の微視的な仮想粒子の集合体でモデル化し、その速度分布関数のモーメントから巨視的な流れ場を求める数値流体力学(CFD)シミュレーション手法の一種である。LBMでは空間は規則的な格子によって一様に離散化されているため、格子点上に定義されている各粒子の衝突・並進を粒子の速度分布関数の発展方程式として計算する。格子ボルツマン方程式からは、ボルツマン方程式と同様の漸近理論に従って流体の運動方程式であるNavier-Stokes方程式が導出できることが確認され、LBMの適用は理論的に保証されている。LBMでは粒子の分布関数に局所平衡状態を仮定し、局所平衡分布関数を定義する。この局所平衡分布関数と分布関数との差にある定数をかけたものが衝突項とされ、最も一般的なものとして単一緩和時間のBGK衝突モデルがある。粒子衝突演算モデルは、最も一般的なモデルである単一緩和時間(Single Relaxation Time: SRT)モデル、SRTモデルの改良発展版であり、極低Reynolds数流れに対して有効である二緩和時間(Two Relaxation Time: TRT)モデル、高Reynolds数解析に多用される多緩和時間(Multi Relaxation Time: MRT)モデルの3つにわけられる。これらの衝突演算モデルを条件によって使い分けることで数値安定性が向上することが知られている。本研究では、TRTモデルを用いた。

(2) 液液二相モデル(Shan & Chenモデル)

本研究では二相流解析を行うために二相流体間の相互作用および固体流体間の相互作用を考慮したSCモデルを導入した。SCモデルでは速度場に加速度を追加することにより外力による効果が組み込まれる。ここで、外力項には、流体-流体間の相互作用力、流体-固体間の相互作用力が含まれる。

(3) Skeletonize法による間隙構造の画像解析

本研究では間隙構造を定量評価するために、Skeletonize法を適用した。Skeletonize法は図形の境界から波を伝播させるモデルに基づいて考案されたものであり、距離変換と骨格化の2つのステップにわけて行われる画像処理の手法である。距離変換とは、各画素に対しての波の到達時間をその点の距離値とする変換のことであり、骨格化とは、波のぶつかる点の集合と定義される。この結果、距離変換とは図形の各画素において0画素(粒子)への最短距離を求める処理となり、図形の中心に行くほど高い値をとるよう各画素の値が変換される。一方、距離変換された画像中で値が極大になる点の集合が骨格になり、図形の中心部分に位置する線状の集合となる。この結果とLBMの解析結果を融合し、二相流動挙動を考察する。

3.2 多孔質対中の拡散を伴う高粘性流体の流動解析

注入する流体は油と親油性がある材料を注入することで、高粘性な油を注入流体中に拡散させながら、粘性が低下した油を回収する流動解析を行う。ここでは、使用するパラメータの物性を考慮して、油ではなく高粘性流体としてシロップを利用した。ここでは、3.1と同様にCT画像を利用し、流動解析には、ナビアストークス方程式と移流拡散方程式を連成させ、さらに求まる間隙水中のシロップの濃度と粘性の関係を逐次計算させ、粘性が変化することによる拡散係数を導入する流動解析を実施した。紙面の関係で、連成に関する式展開は省略するが、本解析で使用した粘性と拡散係数のモデルには、Wilke-Chang(W-C)のモデルを用いた。W-Cモデルは次式のとおり提案されている。

$$D = 7.4 \times 10^{-8} \times \frac{(xM)^{1/2} T}{\mu V^{0.6}}$$

濃度と粘性係数の関係は実験を行い、ここで得られる粘性を Wilke–Chang のモデル導入し、拡散係数を適宜変化させながら解析を行った。計算には汎用有限要素法ソフト COMSOL を利用した。

4. 研究成果

4. 1 間隙のアスペクト比が及ぼす二相流動挙動の変化

本研究では、10 種の間隙構造に対し 2 次元解析を行った。2 次元解析に用いた 10 種の間隙構造とそれらの名称を図-1 に示す。以降、各間隙構造のことを図-1 で示したように本文中では呼称する。各間隙構造に対し、水の注入解析を行い LNAPL のトラッピング現象を引き起こす要因について考察する。本研究で行った解析は不飽和帯から飽和帯への LNAPL 供給が終了し、地下水面上に滞留した LNAPL が地下水位の変動の影響を受けた場合を想定した解析である。複数の間隙構造に対し、それぞれ流入口と流出口側に密度差 $\Delta u = 0.1$ を与え解析を行った。図-2 に解析条件を示す。流入口に $\rho_{water} = 1.0, u_{LNAPL} = 0.0$ 、流出口に $\rho_{water} = 0.9, u_{LNAPL} = 0.0$ を与える。解析領域の y 方向と z 方向には周期境界条件を与えた。また全ての解析では解析領域の左右に壁を設置し、水注入によって押し出された LNAPL が収まるだけの十分な領域を流出口側に設けた。解析領域は粒子の含まれない解析を含むため、解析結果の比較・評価は粒子の存在する $300 \times 300 \times 3$ voxel の領域で行う。解析の初期状態は全てのケースにおいて LNAPL 飽和度が 90% 以上になるようにしている。間隙全体の間隙構造と LNAPL 残留率・残留分布を比較する際に、解析の初期状態で LNAPL が存在しない領域では LNAPL 残留が発生しないため、LNAPL が存在しない領域が大きいと、間隙構造の全体評価と LNAPL 残留現象の間の正しい相関が得られない可能性がある。そのため間隙全体に LNAPL が満遍なく分布する飽和度 90% 以上を初期状態とした。LNAPL 残留率・残留分布の比較の際に解析は流出口側に水が到達し、間隙中に残留した LNAPL が不動化した時点で解析を終了する。図-3 に間隙 1-10 の各構造の 2 次元解析結果を示す。2 次元解析では流入出口以外の面を壁として設定しており、この壁面の存在が LNAPL 残留に影響を与えている可能性を否定できないため、壁面に接する LNAPL は LNAPL の残留率・残留分布の測定からは除いている。

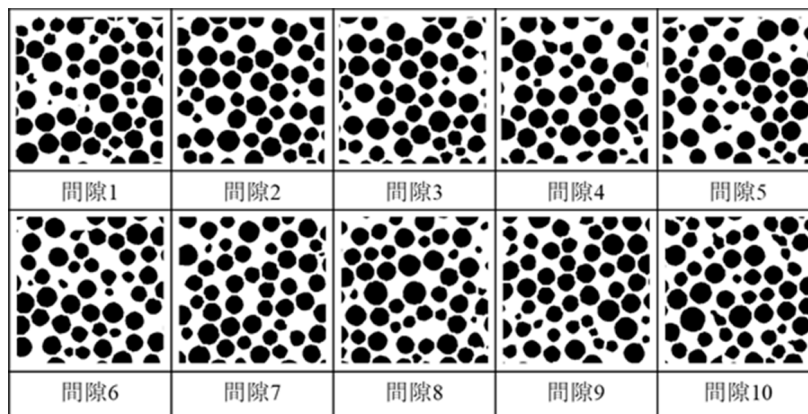


図-1 2次元解析間隙構造

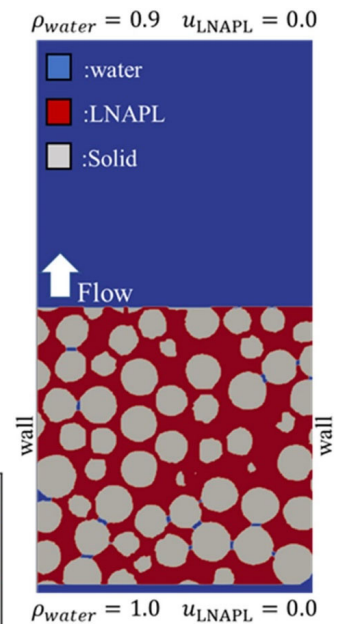


図-2 2次元解析境界条件

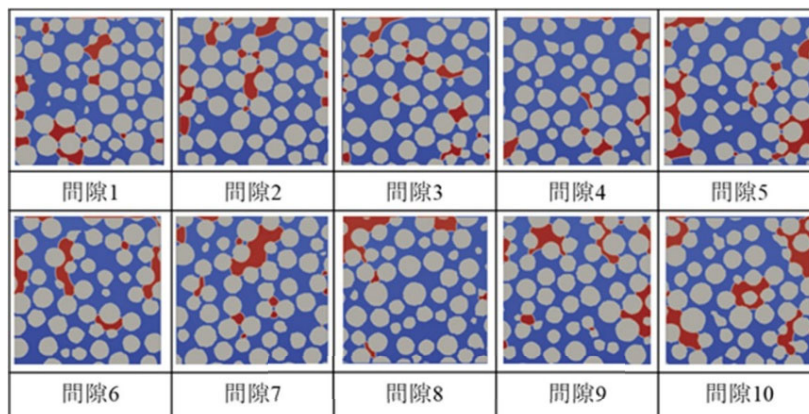


図-3 2次元LBM流動解析結果

a) LNAPL 残留分布

間隙1-10の中で特に大きなLNAPLクラスタを形成している間隙7に注目する。間隙7のLNAPLクラスタの平均面積は686.6(voxel²)であるが、この巨大なLNAPLクラスタの面積は3934(voxel²)であり、平均面積の約6倍

の面積を持っている。間隙7の間隙径分布図とLNAPL残留分布を重ね合わせた図を図4に示す。間隙径分布とLNAPL残留分布の関係を視覚的に明確にするために間隙径分布図を間隙の骨格を用いて網状に表している。この図は、通常の間隙径分布図と同様に色調が明るくなるほどに、間隙径が大きくなることを示している。そして、間隙の骨格の線が細くなるほどに間隙径が小さくなることを示している。通常の間隙径分布図ではなく、骨格線を用いて網状に表すことで間隙径の急拡大・急縮といった連続する間隙径の変化を視覚的に分かりやすくしている。

表-1 間隙全体とLNAPL 残留間隙の平均間隙径(単位: voxel)

	間隙 1	間隙 2	間隙 3	間隙 4	間隙 5	間隙 6	間隙 7	間隙 8	間隙 9	間隙 10
間隙全体	20.31	21.12	21.21	22.99	23.96	24.04	22.79	22.03	20.99	21.67
LNAPL 残留間隙	14.13	16.71	14.96	15.64	13.53	17.90	18.87	15.22	15.22	15.74

巨大なLNAPLクラスタを形成している間隙7の間隙径分布を見ると、間隙径の色調が大きく変化せず複数の間隙に渡って繋がっていることがわかる。また、このLNAPLクラスタの外縁部に注目すると、間隙径の色調が隣接する間隙との間で大きく変化していることがわかる。このことから、LNAPLは隣接する間隙間でのアスペクト比が小さいとLNAPLは繋がって大きなLNAPLクラスタを形成する。そして、隣接する間隙間でのアスペクト比が大きいとLNAPLは切断され、小さなLNAPLクラスタを形成する可能性があることがわかった。しかし、既存研究でLNAPLは間隙径の大きな領域に残留する傾向が示されていることから、間隙7で確認されたLNAPLクラスタもアスペクト比が小さいためではなく、間隙径の大きい領域が連続して接続していたために大きなLNAPLクラスタを形成した可能性がある。そこで次に間隙10に注目して分析を行う。間隙10(図-5)の間隙中心部に形成されたLNAPLクラスタに注目すると間隙7と同様に隣接する間隙間のアスペクト比が小さいことが見てとれる。また、間隙10のLNAPLクラスタが形成された間隙の間隙径は間隙7で大きなLNAPLクラスタが形成された間隙の間隙径よりも小さい。また間隙10の間隙全体の間隙分布を見ても、LNAPLクラスタが形成された間隙の間隙径は小さいことがわかる。

次に、間隙1~10の各間隙構造のLNAPLが残留した間隙部分と間隙全体の平均間隙径を表-1に示す。この表から、全ての間隙構造においてLNAPLが残留した間隙の間隙径は全て20voxel未満の値を取っているのに対し、間隙全体の平均間隙径は全て20voxel以上の値を取っていることがわかる。このことから、本研究で用いた間隙構造においては、LNAPLが残留する間隙の平均間隙径は間隙全体の平均間隙径に比べ小さいことがわかる。以上のことから、10ケースの2次元解析結果よりLNAPLは隣接する間隙間でのアスペクト比が小さいほどに大きなLNAPLクラスタが形成されやすく、間隙径の変化が大きいほどに大きなLNAPLクラスタが形成されにくい可能性が示唆された。

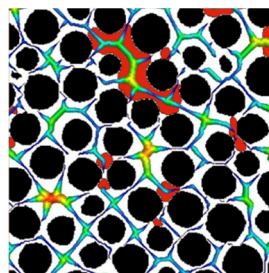


図4 間隙 7 解析結果

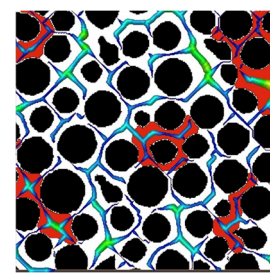


図5 間隙 10 解析結果

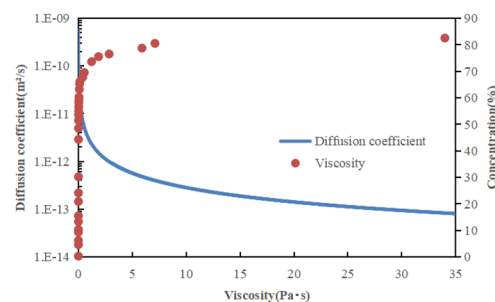
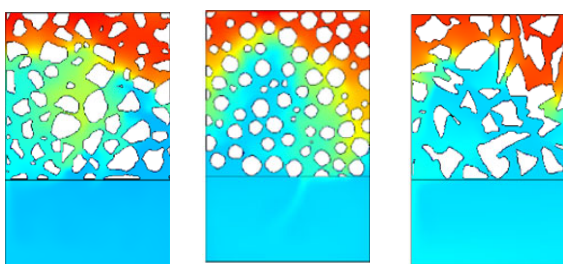


図 6 粘性-濃度-拡散経緯数の関係

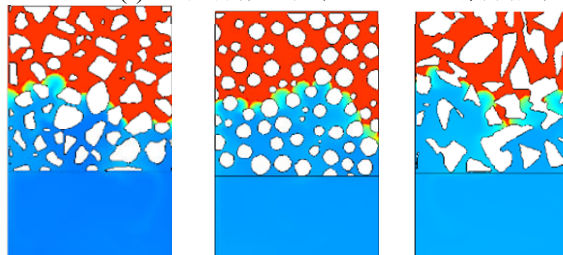


(a)珪砂 5号

(b) ガラスビーズ

(c) 粉碎 GBs

図 7-(I) 拡散係数を変化させない解析結果



(a)珪砂 5号

(b) ガラスビーズ

(c) 粉碎 GBs

図 7-(II) W-C モデルから得られる

拡散係数を用いた解析結果

4. 2 拡散を伴う N-S 方程式と移流拡散方程式の連成解析

図 6 は、W-C モデル(実線)と粘性-濃度実験(プロット)の結果を統合した拡散係数-粘性-濃度の関係を示した図である。濃度が約 70%未満では、粘性係数はほぼ水と同じで

あり、濃度が70%以上になると、粘性係数も増加する傾向が見られ、その結果粘性が高いほど、拡散係数は小さく、測定される濃度が小さい結果が示され、妥当な結果が得られている。図7 (I) および (II) は、それぞれ各材料(珪砂5号, ガラスビーズ, 粉砕ガラスビーズ)のX線CT画像を用いて、いわゆるIn-situ解析を実施した。(I)拡散係数を一定とした解析結果および(II)W-Cモデルを用いて拡散係数を変化させたときの1000秒時の濃度分布を示している。W-Cモデルの拡散係数を使用した場合の濃度は、濃度勾配が大きくなるにつれて拡散層が薄くなることを示した。高濃度での拡散係数は小さいため、高濃度の上部領域での流れの変化は非常に遅い。拡散によって粘性係数が変化すると、上部のシロップは高粘度で流動性が低くなるため、拡散係数は $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 未満となり、水がシロップ中に拡散することができない。次に珪砂5号とガラスビーズを解析結果を比較すると、間隙形状は類似しているが、シロップの拡散状況が異なることがわかる。ガラスビーズのシロップ濃度は均一に分布しているが、シリカ砂の左領域の拡散は右領域の拡散よりも速い。初期状態では、液体の流速は低く、シロップの輸送は主に拡散によって支配されていることが示された。

4. 3 X線CT用高粘性流体注入実験装置の開発と結果

本研究事業では、本実験装置を最初に作り、現象観察をすることを計画していたが、コロナ禍の中で実験装置の材料確保が計画通りに進まなかったことから、数値解析の研究を先行させた。ここでは、新たに開発した装置の概略と得られたX線CT画像を説明する。

(1) X線CT用高粘性流動装置の開発

写真1は、マイクロX線CTスキャナ用高粘性流体注入実験装置が、CT撮影内にセットされた様子を示している。この実験では、高粘性流体としてシロップ(粘性係数: $18 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, 密度: $1.384 \text{ g}/\text{cm}^3$)を使用し、拘束圧 450 kPa を与えた飽和シロップ供試体中にヨウ化カリウム水溶液を注入する実験である。注入口には、定流量シリンジポンプを設置し、試料母材には珪砂3号を使用した。

(2) 拡散を伴う流動現象のX線CT画像

図8は、初期、ヨウ化カリウム水溶液が貫通した直前、定常状態に置いて、異なる3つの高さの供試体水平断面像とヨウ化カリウム水溶液が貫通直前の供試体内の鉛直断面画像である。供試体側面には粘土を塗布し、メンブレンと供試体境界面に注入流体の先行流が生じないように工夫した。注入流体貫通後の水平断面および鉛直断面を見ると、流動挙動が局所化しており、いわゆるワームホール現象が生じていることがわかる。3次元画像を確認すると、注入流体がまっすぐ注入されずに、ねじれた様子が確認できた。その断面画像であり、ねじれた箇所が供試体底部の黄緑色の箇所に捉えられている。鉛直断面中の色は、赤⇒青⇒黄緑色順でシロップ濃度が低下していることを意味している。黄緑色の領域は、拡散領域を示唆しており、先行流の発現機構には、間隙構造(形, 間隙間のアスペクト比), 間隙流体の粘性, 注入流体の注入圧に依存すると考えられる。今後は、注入速度をペクレ数で管理し、ペクレ数と拘束圧の関係と各注入圧レベルでのCT撮影を実施する必要がある。

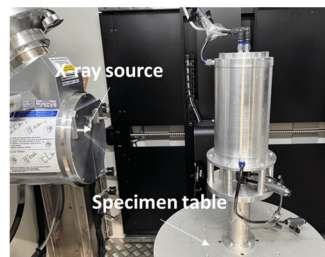


写真1 X線CT室内に設置された流動実験装置

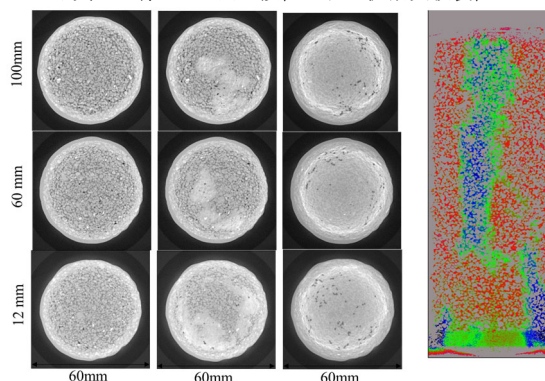


図8 各注入ステップにおけるX線CT画像(水平)

5. まとめ

液液二相流格子ボルツマン法にいる流動シミュレーションは、熱水を注入する回収方法をシミュレーションする位置づけであり、定性的な評価が得られた。間隙流体内の水と油の挙動を定性的に評価できている一方、それを検証する実験結果が得られていないため、今後の課題としたい。一方、オイルサンド中にパラフィン注入させながら回収するVAPEX法による回収は、後者の拡散を伴うN-S方程式と移流拡散方程式の連成解析によって再現された。多孔質内における拡散を伴う高粘性流動は、粘性と密度が異なる流体が接触する部分で拡散が生じ、ゆっくり拡散が進む挙動がX線CT解析より得られており、連成解析の結果と同様の挙動が得られた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件／うち国際共著 4件／うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 山本菜月, 椋木俊文, 塩田絵里加, 佐藤宇紘	4. 巻 15
2. 論文標題 液液二相流格子ボルツマン法と画像解析による多孔質体中のLNAPL流動機構の評価	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 地盤工学ジャーナル	6. 最初と最後の頁 551-561
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 塩田絵里加, 竹中亮, 椋木俊文	4. 巻 77
2. 論文標題 LNAPLの温度依存性に着目した地盤内残留LNAPL回収効率の変化	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集C (地圏工学)	6. 最初と最後の頁 18-31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Shiota, E. Mukunoki, T., Oxarango, L., Tinet, A. and Golfier, F.	4. 巻 57
2. 論文標題 Micro-and macro-scale water retention properties of granular soils: contribution of the X-Ray CT-based voxel percolation method	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Soil Research.	6. 最初と最後の頁 575-588
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1071/SR18179	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 該当する
1. 著者名 羊嘉曦・阪本凌雅・椋木俊文・Laurent OXARANGO	4. 巻 1
2. 論文標題 多孔質体中において移流拡散を伴う高粘性流体の流動挙動の可視化	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 第15回環境地盤工学シンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 63-70
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 該当する

1. 著者名 Bunyu, H., Higashi, S. and Sainoki	4. 巻 1
2. 論文標題 Elucidation of Microscopic Stress State Within Surface Asperities of a Rock Joint	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 In ISRM Congress	6. 最初と最後の頁 405
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 該当する

1. 著者名 Jeong, S., Schwartzkopff, A.K. and Sainoki, A	4. 巻 1
2. 論文標題 Development of a numerical simulation method for the fluid-mechanical coupled behavior of geothermal reservoir rocks within a fault zone	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 In ISRM International Workshop on Rock Mechanics and Geoengineering in Volcanic Environments	6. 最初と最後の頁 392-398
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 該当する

[学会発表] 計4件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 J Yang, T Mukunoki,
2. 発表標題 Numerical study on fluid transport with viscosity reduction due to diffusion in porous materials
3. 学会等名 The 17th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 羊 嘉曦, 金子 璃久, 椋木 俊文, 塩野谷元
2. 発表標題 多孔質体中において粘性低下を伴う高粘性流体輸送挙動の数値解析
3. 学会等名 第57回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 羊 嘉曦, 阪本 凌雅, 棕木 俊文, 塩野谷 元
2. 発表標題 X線CT画像解析によるオイルサンドの物理特性の評価
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Erika Shiota, T. Mukunoki, Y. Miyata
2. 発表標題 Two-phase flow analysis for three-dimensional flow of LNAPL using CT image in porous material
3. 学会等名 The 16th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計8件

1. 著者名 阪本 凌雅	4. 発行年 2023年
2. 出版社 令和4年度熊本大学大学院自然科学研究部土木建築学専攻 修士論文	5. 総ページ数 19
3. 書名 多孔質体中の拡散を伴う高粘性流体の流動挙動の解明に関する研究	

1. 著者名 立道 大成	4. 発行年 2023年
2. 出版社 令和4年度熊本大学大学院自然科学研究部土木建築学専攻 修士論文	5. 総ページ数 19
3. 書名 LBMを用いた間隙アスペクト比に起因するLNAPL残留機構の評価	

1. 著者名 金子 璃久	4. 発行年 2022年
2. 出版社 熊本大学大学院土木建築学専攻修士論文	5. 総ページ数 19
3. 書名 ビチューメン回収問題を対象とした間隙内における高粘性流体の流動現象の解明	

1. 著者名 羊 嘉曦	4. 発行年 2021年
2. 出版社 熊本大学大学院土木建築学専攻修士論文	5. 総ページ数 20
3. 書名 ビチューメン回収問題を対象とした砂中の高粘度流体の拡散・溶解現象の有限要素解析	

1. 著者名 阪本凌雅	4. 発行年 2021年
2. 出版社 熊本大学工学部社会環境工学科	5. 総ページ数 15
3. 書名 X線CT画像解析によるオイルサンドの物理特性の評価に関する研究	

1. 著者名 立道大成	4. 発行年 2021年
2. 出版社 熊本大学工学部社会環境工学科卒業論文	5. 総ページ数 15
3. 書名 LBMを用いた多孔質構造体内の二相流動解析による残留LNAPL輸送機構に関する研究	

1. 著者名 山本菜月	4. 発行年 2020年
2. 出版社 令和元年度熊本大学大学院自然科学研究部土木建築学専攻 修士論文	5. 総ページ数 20
3. 書名 粒状材料を対象とした間隙スケールにおける液液二相流動機構に関する研究	

1. 著者名 塩田絵里加	4. 発行年 2020年
2. 出版社 令和元年度熊本大学大学院自然科学研究科 環境性工学専攻 博士論文	5. 総ページ数 221
3. 書名 粒状材料を対象とした残留LNAPLの流動特性に関する研究	

〔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
研究分担者	大谷 順 (Otani Jun) (30203821)	熊本大学・大学院先端科学研究部(工)・教授 (17401)	
研究分担者	オノ木 敦士 (Sainoki Atsushi) (70802049)	熊本大学・大学院先端科学研究部(工)・准教授 (17401)	

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1件

国際研究集会 第110回国際先端科学技術研究機構セミナー	開催年 2023年～2023年
---------------------------------	--------------------

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			
フランス	Grenoble University, Alps	University of Clermont Auvergne	University of Lorraine	
カナダ	McGill University	The University of British Columbia		