

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	多孔質内での溶質分散現象研究
Title(English)	Study of solute transport mechanism in porous media
著者(和文)	張春偉
Author(English)	Chunwei Zhang
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12077号, 授与年月日:2021年9月24日, 学位の種別:課程博士, 審査員:末包 哲也,肖 鋒,青木 尊之,大西 領,志村 祐康
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12077号, Conferred date:2021/9/24, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	機械 機械	系 コース	申請学位 (専攻分野)： 博士 (工学) Academic Degree Requested Doctor of
学生氏名： Student's Name	Chunwei ZHANG		指導教員 (主)： Academic Supervisor(main) 末包 哲也
			指導教員 (副)： Academic Supervisor(sub)

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

本論文は「Study of solute transport mechanism in porous media (多孔質内における溶液輸送メカニズムに関する研究)」と題し、以下の6章から構成される。

第1章「Introduction (序論)」では、本論文の研究背景と目的を述べている。すなわち、土壌汚染修復や二酸化炭素地下貯留における溶液輸送に関して分散現象を解明することの必要性を指摘するとともに、単相流および混相流、一様流れとせん断流れにおける研究の現状を概観している。それを踏まえて、多孔質内の単相流および混相流の溶液輸送メカニズムを実験的および数値シミュレーションを用いて解明することが本研究の目的であると述べている。

第2章「Experimental investigation of solute transport in saturated porous media using X-ray computed tomography (飽和多孔質におけるX線コンピュータトモグラフィ(CT)を用いた溶液輸送の実験的研究)」では、多孔質内における溶液輸送と分散現象を計測するために新たにX線CTを用いる手法を提案している。多孔質内部の溶液濃度を非接触で計測するとともに、ブレナーのモーメント法などの手法を適用し、縦方向および横方向の分散係数を定量的に評価している。今回計測したペクレ数はおおそ指数法則が成り立つ範囲をカバーしており、この領域では分散は主に対流により支配されるが、拡散も無視できないことを見出している。

第3章「Experimental investigation of solute transport in partially saturated porous media using X-ray computed tomography (部分飽和多孔質におけるX線CTを用いた溶液輸送の実験的研究)」では、混相流における溶液輸送と分散現象を実験的に明らかにしている。混相流においてはチャネリング効果により溶液輸送が大きな影響を受け、飽和率に応じて分散に与える影響が変化する。計測結果に基づいて、統計的モーメント、分散係数、希釈指数、平均スカラー散逸率を定量的に評価し、溶液輸送の特徴を明らかにしている。

第4章「Solute transport in variably saturated porous media studied by lattice Boltzmann simulations at the pore scale (様々な飽和状態における多孔質内の溶液輸送の格子ボルツマン法を用いた空隙スケール数値シミュレーション)」では、空隙スケール数値シミュレーションにより溶液輸送特性と分散現象を明らかにしている。過渡的な時間では分散挙動において弾道的および超拡散的な領域が観察されたが、時間経過とともに漸近的な分散挙動へと推移する。過渡期は、横方向と縦方向それぞれ約12粒子と16粒子の長さスケールにわたって持続する。数値シミュレーションの対象とした多孔質構造は様々な実岩石のCT画像から再構成された3次元デジタル画像を用いており、実験を実施すること無く、実多孔質のCT画像から数値解析により分散係数を取得する、いわゆるデジタルロック技術を実現できることを実証している。

第5章「Influence of stagnant zones on solute transport in heterogeneous porous media at the pore scale (不均質多孔質内における空隙スケール溶液輸送に与える濃み領域の影響)」では、多孔質媒体の不均一性が溶質輸送に及ぼす影響を包括的に検討している。空隙構造の不均一性として流体の流れを通さないデッドエンドポア、循環流、薄膜層などの滞留部が存在する。これらの滞留部が溶質輸送挙動に及ぼす影響を明らかにするために、岩石試料の高解像度CT画像を対象として直接数値流体力学シミュレーションを行った。不均質な多孔質媒体では、流体の多孔質内滞留時間分布により早期到着や後半テーリング効果が観察される。対流が支配的な領域では、溶質の輸送は対流輸送が支配的であるのに対し、滞留域では分子拡散が重要な役割を果たす。局所的な濃度場に基づいて、対流領域と滞留域の間の物質輸送をダムケラー数を用いて整理した。

第6章「Conclusions (結論)」では、本研究で得られた結果を総括し、今後の展望を概説している。以上を要するに、本論文は多孔質内における溶液輸送と分散現象を多孔質内の溶液濃度分布の直接計測と空隙スケール数値シミュレーションに基づいて明らかにしたものであり、工学上、工業上、貢献するところが大きい。よって本論文は博士(工学)の学位論文として十分な価値があると認められる。

備考：論文要旨は、和文2000字と英文300語を1部ずつ提出するか、もしくは英文800語を1部提出してください。

Note: Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)
Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	機械 機械	系 コース	申請学位 (専攻分野)： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	Chunwei ZHANG		指導教員 (主)： Academic Supervisor(main)	末包 哲也	
			指導教員 (副)： Academic Supervisor(sub)		

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

Predicting the fate of dissolved chemicals (e.g., CO₂, NaCl, and non-aqueous phase liquid (NAPL)) within arbitrary saturated porous media is essential for multiple fundamental engineering processes. This work intends to elucidate the solute transport mechanism in porous media through the column-scale microfocus X-ray computed tomography (CT) experiment and the pore-scale lattice Boltzmann method (LBM) simulation.

An innovative three-dimensional (3D) tracer dispersion experiment was designed to investigate the solute transport mechanism under a steady-state single or two-phase flow condition, where NaI plume was point-released into an unconsolidated particle bed saturated with NaCl solvent or partially saturated with NaCl solvent and pump oil. With the aid of high-resolution CT, the spatial and temporal concentration configuration of the tracer plume could be synchronously recorded, relating to the brightness of the CT image. In this work, the influence of Péclet number (Pe) and NaCl saturation (S_w) on the dispersion coefficient was comprehensively studied. Results indicated the asymptotic dispersion coefficient was obtainable within the experimental scale, and could be summarized as a power law of Pe. In addition, the dispersion coefficient has a non-monotonic dependency on S_w , which peaks at an intermediate value.

In parallel, LBM coupled with different mass transfer schemes was developed to simulate the dispersion process. Direct pore-scale simulations for single/two-phase fluid flow and solute transport were performed based on high-resolution 3D digital CT image same as those used in the tracer experiment as well as porous media with different levels of heterogeneities. Solute transport mechanisms were thoroughly investigated by the method of time/space moments, Lagrangian velocity correction function (LVCF), dilution index, scalar dissipation rate (SDR), residence time distribution (RTD), breakthrough curves, and the dispersion coefficient as a function of Pe. Numerical simulations revealed the transient solute transport behavior like the ballistic and super diffusive dispersion, whereas asymptotic dispersion behavior appeared at longer characteristic times. The dispersion coefficient increases when Pe increases or when the porous medium becomes more heterogeneous. To conclude, the proposed experimental and computational schemes are of practical means to study dispersion behavior in porous media.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note: Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).