

令和元年6月24日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K07971

研究課題名(和文) 浅層地下水における密度流の非線形性についての多角的解析

研究課題名(英文) Multifaceted analysis of non-linearity of density-driven flow in shallow groundwater

研究代表者

竹内 潤一郎 (TAKEUCHI, Junichiro)

京都大学・農学研究科・助教

研究者番号：20362428

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：浅層地下水へ高密度流体が浸入する際に、地下水の流速や浸入流体の密度などの条件に応じて侵入の様子は変化する。これを分岐といい、支配方程式の非線形性に由来する。数値実験で確認されていたこの現象を、塩水を用いた浸透流の可視化実験によっても確認することができた。実験では、数値実験では見られなかった不規則な振動が見られたため、塩水濃度データのアトラクタ再構成やWayland検定といった時系列解析を行った。その結果、不規則振動のカオス性が強く示唆された。間隙ネットワークを用いた浸透現象のモデル化では、パーコレーション理論により侵入可能な間隙のサブネットワークが重要な役割を果たしていることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地下水における密度流は、火山性熱源に由来する数百年といった時間的・空間的スケールの大きな対流現象が知られているが、浅層地下水においても、条件がそろえば数週間から数か月といったオーダーの対流現象が起こることが示された。対流を伴う高密度の流体の侵入は、下流に広く拡散しながら広がるためこの現象の解明は社会的にも意義がある。

また、多孔質媒体の間隙内への流体の侵入にも、フィンガー流や一様侵入といった侵入様式が存在するが、その発生メカニズムが示されたことは学術的に意義が高い。これにより、空気侵入圧、水侵入圧といった用語がさす状態を明確に規定できるようになった。

研究成果の概要(英文)：When high-density-fluid enters shallow groundwater, its flow regime will change depending on velocity of the groundwater and/or the density of inflow fluid. This phenomena is referred to as bifurcation, and this derives from non-linearity of the governing equations. The bifurcation, which had been confirmed through computational experiments, was also ascertained by visualization experiments of seepage flow. But irregular fluctuation was seen in the laboratory experiments, while only simple harmonic wave had been seen in the computational experiments. So, non-linear time series analysis, such as the attractor reconstruction and Wayland test, was done. Those provided evidences that the irregular fluctuation is chaotic one.

In the modeling study of seepage flow through porous media using a pore-network model, it was shown that sub-networks which are composed by invadable pores play a critical role in imbibition and drainage processes from the perspective of the percolation theory.

研究分野：水資源利用工学

キーワード：地下水 密度流 非線形性 間隙ネットワーク パーコレーション理論

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

農業流域の水環境が有する価値が再認識されている。農村地域は、本来の役割である食糧生産としての場をはじめとして、多様な動植物を育む生態系維持としての場、小川や湧水に代表される清らかな水との親水空間としての場など、多面的な役割を果たしている。半自然半人工的な環境で、様々な生物が適応し、生息場としており、農業流域の水環境を管理・保全していくためには、湧水地点や排出地点といった点に対する対策ではなく、地表水や地下水流動を考慮に入れた多元的観点が重要である。

自然界における密度流としては、海に囲まれた島嶼部における淡水レンズや、沿岸部における塩水くさびといった静的なものがよく知られている。一方、動的な密度流としては、火山性熱源に由来する数百年といった時間的スケールの大きな地下水の対流現象は知られているが、浅層地下水においても条件が満たされれば、周期が数週間から数か月といったオーダーの密度流が発生しうることが示されている。特に、高密度の汚染物質の侵入の際に、振動的な密度流が発生する条件が整えば、より広範囲に汚染物質が広がることも懸念されるため、その発生条件やメカニズムを解明することは重要である。

2. 研究の目的

密度流の発生の有無に代表される地下水の流れの様式の変化は、支配式や境界条件に含まれるレイリー数や地下水流速といったパラメータの変化によって引き起こされるもので、支配式の非線形性に由来する分岐現象である。そこで本研究では、数学的なアプローチ、数値シミュレーションによるアプローチ、室内実験によるアプローチにより、分岐の発生する条件やそのダイナミクスを解明することを目的とする。

また、密度流以外にも、浸潤過程や排水過程といった非混合性流体の多孔質媒体への侵入の際に生じる様式の変化や、透過性の相転移、浸潤と排水におけるヒステリシスといった非線形現象も視野に入れて数学的な観点からでの解析を行う。

3. 研究の方法

密度流に関する室内実験については、地下水流速や浸入する塩水流量を調整可能な実験水槽を作成した。塩水を着色することにより、密度流の発生の有無など浸透の様子を可視化し、タイムラプスカメラを用いて記録することにより、対流の様子を動的に把握する。また、実験水槽には電気伝導度計 (HORIBA 製, ES-71) を用いて 5 か所の電気伝導度を 10 秒ごとに測定し、塩水の侵入の様子を観測する。実験条件は、事前の数値実験により分岐が起こる前後の状態として、流速は 3 パターン、レイリー数は 5 パターンとする。

多孔質媒体への非混合性流体の侵入実験には、軟 X 線を用いて造影剤が浸透する様子の可視化実験を行う。多孔質媒体として、0.2 mm のガラスビーズと豊浦標準砂 (平均粒径 0.25 mm) を用い、造影剤としてジヨードメタンを用いる。ジヨードメタンは水に比べて、ガラスや砂に対して接触角がおおきいため、ジヨードメタンの侵入は排水過程と同等の仕組みで起こると考えられる。ジヨードメタンにかかる圧力を変化させることにより、様々な侵入様式を発生させ、その様子を動画で記録する。

これらの実験を、数値計算でも再現するとともに、数学的な背景について検討を行う。具体的には、密度流に関しては鉛直 2 次元領域を対象としブシネスク近似を用いた支配式を有限要素法で離散化した数値モデルを用い、多孔質媒体への侵入に関しては間隙ネットワークを用いて時間・空間について離散的なインバージョンパーコレーションでモデル化する。また、数学的には、進行波として移動座標系においてフーリエ級数を用いて密度流の発生条件を求めたり、間隙をネットワークと見なし、パーコレーション理論 (ネットワークのつながりを解析する応用数学の分野) の観点から浸透現象について検討を行う。また、浸透の簡易なモデルとして Hele-Shaw 流れにおけるフィンガリングの発生機構についても検討を行う。

4. 研究成果

地下水への塩水侵入の可視化実験からは、数値実験と同様に、地下水流速やレイリー数に応じて、振動的な塩水侵入の発生の有無に関して複数の分岐点が存在することが確認された。さらに、可視化実験では、数値実験では見られなかった不規則に振動しながらの侵入が見られたため、塩水濃度のデータについて、アトラクタ再構成やサロゲートデータを用いた Wayland 検定といった時系列解析を行った。その結果、不規則振動のカオス性が強く示唆された。カオス的な侵入が起こる原因としては、実験媒体の不均一性や、モデルでは鉛直 2 次元領域を想定しているのに対し実験系は 3 次元であることなどが要因となりうると考えられるが、さらなる検討が必要である。

軟 X 線を用いた浸透現象の可視化実験からは、造影剤へかける圧力を変化させることにより、浸透の様子が、フィンガリングや一様侵入、それらの中間的な侵入など様々に変化することが、ガラスビーズと豊浦標準砂ともに確認された。遷移する際の圧力は豊浦標準砂のほうが高かった。これは、砂粒子の形状は不規則のため、粒子間に形成される間隙の大きさが豊浦標準砂のほうが小さくなるためである。様々な侵入様式が生じる機構は、間隙ネットワークを用いた浸透現象のモデル化から、造影剤にかかる圧力に応じて、造影剤が侵入可能な間隙のサブネットワークが変化するためと考えられる。特に、浸透がはじまる透閾値を超えた付近では侵入可能

なサブネットワークは自己相似形になることが知られており、フィンガリングの発生と符合する。また、この視点を土壌の浸潤過程、排水過程に適用すると、現象論的にとらえられていた水侵入圧や空気侵入圧の発生メカニズムを明確に理解できるようになる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計7件)

Takeuchi, J. and M. Fujihara: Evaluation of drainage process in porous media by invaded percolation probability. International Journal of GEOMATE, 17(59), pp.90-97, 2019.

Takeuchi, J. and M. Fujihara: Evaluation of imbibition process in porous media by invaded percolation probability, International Journal of GEOMATE, 14(46), pp.1-7, 2018

Takeuchi, J., M. Shimizu, K. Iwama, and M. Fujihara: Consideration on Behavior of Displacement of Immiscible Fluids in Porous Media Using Percolation Theory, Proceedings of 12th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, pp.0546-1-0546-11, 2017.

Takeuchi, J., H. Tsuji, and M. Fujihara: Modeling of permeability of porous media with mixed wettabilities on noncircular capillaries, International Journal of GEOMATE, 12(34), pp.1-7, 2017.

Takeuchi, J., M. Kawabata, and M. Fujihara: Numerical analysis of the occurrence of thermal convection in flowing shallow groundwater, International Journal of GEOMATE, 11(27), pp.2688-2694, 2016.

Takeuchi, J., W. Sumii, H. Tsuji, and M. Fujihara: Estimation of permeability of porous media with mixed wettabilities using pore-network model, International Journal of GEOMATE, 11(24), pp.2241-2247, 2016.

Takeuchi, J., W. Sumii, and M. Fujihara: Modeling of fluid intrusion into porous media with mixed wettabilities using pore network, International Journal of GEOMATE, 10(22), pp.1971-1977, 2016.

〔学会発表〕(計18件)

伊藤豪哉, 竹内潤一郎, 藤原正幸: 代用電荷法を用いた Hele-Shaw セル内のフィンガリング現象の数値計算, 農業農村工学会応用水理研究部会平成 30 年度応用水理研究部会講演集, 名古屋, 2018 年 12 月, pp.48-52.

橋本大志, 竹内潤一郎, 藤原正幸: 地下水への塩水侵入の振動の分岐現象に関する可視化実験, 農業農村工学会応用水理研究部会平成 30 年度応用水理研究部会講演集, 名古屋, 2018 年 12 月, pp.53-58.

Takeuchi, J., and M. Fujihara: Imbibition and drainage process in porous media from the perspective of invaded percolation probability, IMI Joint Research Project Workshop (II), Modeling and Analysis of Time Series Data in Math-Agro Sciences, Kyushu University, Nov.5-7, 2018

Takeuchi, J. and M. Fujihara: Evaluation of drainage process in porous media by invaded percolation probability. 8th Int. Conf. on Geotechnique, Construction Materials and Environment, Kuala Lumpur, Malaysia, Nov. 20-22, 2018, ISBN: 978-4-909106001 C3051. pp. 829-834, 2018

竹内潤一郎: ネットワークの観点から見た多孔質媒体への浸透現象, RIMS]共同研究(グループ型), 数理農学の基盤づくりに向けて, 京都, 2018 年 1 月.

原 啓太郎, 竹内 潤一郎, 藤原 正幸: 格子ボルツマン法を用いた多孔質媒体における置換現象の再現, 農業農村工学会応用水理研究部会平成 29 年度応用水理研究部会講演集, 名古屋, 2017 年 12 月, pp.3-5.

Takeuchi, J. and M. Fujihara: Evaluation of imbibition process in porous media by invaded percolation probability, 7th Int. Conf. on Geotechnique, Construction Materials and Environment, Mie, Nov. 21-24, 2017, ISBN: 978-4-9905958-8-3-C3051. pp. 884-889, 2017

Takeuchi, J., M. Shimizu, K. Iwama, and M. Fujihara: Consideration on Behavior of Displacement of Immiscible Fluids in Porous Media Using Percolation Theory, Proceedings of 12th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, pp.0546-1-0546-11, 2017

Takeuchi, J., H. Tsuji, and M. Fujihara: Modeling of permeability of porous media with mixed wettabilities on noncircular capillaries, International Journal of GEOMATE, 12(34), pp.1-7, 2017

竹内潤一郎, 藤原正幸: 単一粒径粒子からなる多孔質媒体間隙の空間統計解析, 日本雨水資源化システム学会大会研究発表会講演要旨集, 松山, 2017 年 11 月, pp.18-21.

清水雅俊, 竹内潤一郎, 岩間憲治, 藤原正幸: パーコレーション理論を用いた多孔質媒体へ

の侵入流体の挙動に関する考察，平成 29 年度農業農村工学会大会，藤澤，2017 年 8 月，講演要旨集：[3-3] .

Takeuchi, J., H. Tsuji, and M. Fujihara: Effect of Capillary Radius Distribution on the Hydraulic Properties of Porous Media, International Conference Emerging Technologies in Agricultural and Food Engineering, Kharagpur, India, Dec. 27-30, p. 96, 2016.

竹内潤一郎，辻英剛，藤原正幸：排水過程における侵入浸透確率，農業農村工学会応用水理研究部会平成 28 年度応用水理研究部会講演集，名古屋，2016 年 12 月，pp.4-6 .

川畑誠，竹内潤一郎，橋本大志，藤原正幸：地下水環境への塩水浸入によって生じる密度流の振動現象の再現実験，農業農村工学会応用水理研究部会平成 28 年度応用水理研究部会講演集，名古屋，2016 年 12 月，pp.28-31 .

Takeuchi, J., H. Tsuji, and M. Fujihara: Modeling of permeability of porous media with mixed wettabilities based on noncircular capillaries, 2nd International Conference on Science, Engineering and Environment, Osaka, Nov. 21-23, 2016, ISBN: 978-4-9905958-7-6 C3051, pp.770-776.

竹内潤一郎，藤原正幸：間隙ネットワークの浸入浸透確率，日本雨水資源化システム学会大会研究発表会講演要旨集，京都，2016 年 10 月，pp.1-2 .

Hara, K., J. Takeuchi, and M. Fujihara: Evaluation of water migrability in pore- and grain-networks of porous media by percolation theory, The 15th PAWEES Conference of Sustainable Paddy Water Management in Water-Energy-Food NEXUS, Daejeon, South Korea, Oct. 20-21, 2016.

竹内潤一郎，川畑誠，藤原正幸：流れのある地下水における密度流の古典解析，平成 28 年度農業農村工学会大会，仙台，2016 年 8 月，講演要旨集：[10-6] .

〔図書〕(計 1 件)

Takeuchi, J., H. Tsuji, and M. Fujihara: *Effect of Capillary Radius Distribution on the Hydraulic Properties of Porous Media*, In "PRECISION FARMING AND RESOURCES MANAGEMENT", Excel India Publishers, pp.292-304, 2016.

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。