

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
 Consideration on Behavior of Invading Fluid into Porous Media Using Percolation Theory

清水 雅俊*・竹内 潤一郎**・岩間 憲治***・藤原 正幸**

SHIMIZU Masatoshi, TAKEUCHI Junichiro, IWAMA Kenji, and FUJIHARA Masayuki

1. はじめに

浸潤過程や排水過程に代表される多孔質媒体における非混合性流体の置換(侵入)過程において、ある条件下では、侵入流体はフィンガー状の選択的な侵入を起こすことが知られている^[1]。この現象はフィンガリング現象といわれ、多孔質媒体への流体侵入だけでなく、Hele-Shaw セル内での流体侵入や油層工学や地熱工学における流体による岩盤への破碎進行など様々な分野で見られる現象である。

本研究では、多孔質媒体中のフィンガリングの発生は、Hele-Shaw セル内におけるフィンガリングのような流体挙動の不安定性に起因するものではなく、間隙サイズの不均一性が要因であると考え、数値実験と室内実験によってその妥当性を調べる。ここでは、間隙ネットワークにおける侵入過程のモデル実験と、軟 X 線を用いた侵入流体挙動の可視化実験を行う。

2. モデルによる数値実験

多孔質媒体における非混合性流体の置換現象に対して、間隙のつながりをネットワークとみなした間隙ネットワークにおける一般化インバージョンパーコレーションという動的な浸透過程モデル^[2-4]を採用する。間隙ネットワークは比較的大きな間隙である Pore Body (PB) と PB をつなぐ Pore Throat (PT) から構成されるモデルである。インバージョンパーコレーションでは、時間・空間的な離散モデルで、侵入流体と被侵入流体の界面が存在する間隙のうち、侵入しやすい間隙に侵入するというステップを繰り返して侵入が進行していく。後述する軟 X 線による可視化実験^[5]に用いる造影剤(ジヨ

ードメタン, CH_2I_2) が水に比べて濡れ性が低いことから、ジヨードメタンの水で飽和された多孔質媒体への侵入過程は、ジヨードメタンの圧力を一定と仮定すると、排水過程(空気の侵入過程)と同等の現象と見なすことができる。

大気圧を一定とし、作成した間隙ネットワークモデルの底面に与える水圧を-30 から-70 cmH_2O まで変化させて、すなわち、毛管圧を 30 から 70 cmH_2O まで変化させて空気侵入の様子がどのように変化するかを数値実験する。計算結果を図 1 に

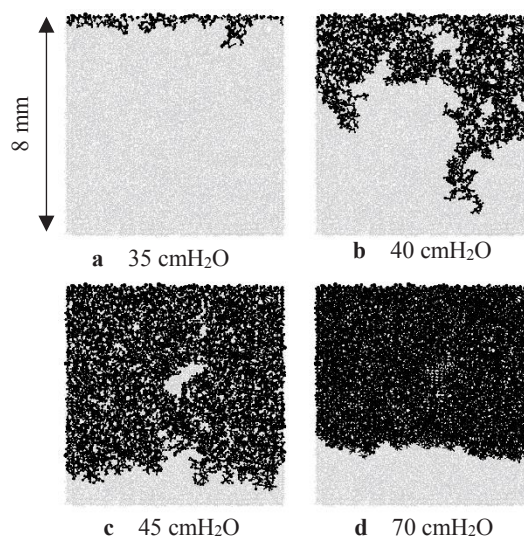


図 1 空気侵入の様子(毛管圧)

Fig.1 Air Intrusion (capillary pressure)

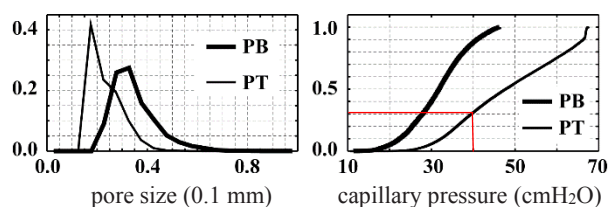


図 2 間隙サイズの頻度分布(左)と侵入可能な間隙の累積分布(右)

Fig.2 Frequency and Cumulative Distributions

*京都大学農学部 Faculty of Agriculture, Kyoto University

**京都大学大学院農学研究科 Graduate School of Agriculture, Kyoto University

***滋賀県立大学環境科学部 School of Environmental Science, The University of Shiga Prefecture

キーワード: 水分移動, フィンガリング, 間隙ネットワークモデル, 軟 X 線, 可視化実験

示す。可視化実験で得られる画像と対比しやすいように、空気が侵入した間隙を黒くしている。これらの結果より、毛管圧が低いとき(35 cmH₂O)は空気侵入は進行せず、40 cmH₂O になると空気がフィンガー状に侵入することわかる。さらに毛管圧が高くなるにつれ、侵入は一様になっていき、70 cmH₂O では、一様な侵入前線が形成されることがわかる。図 2 に、実験に用いた間隙ネットワークの PB と PT の間隙サイズの分布と、毛管圧に対する空気が侵入できる間隙の累積分布を示す。これらより、継続的な空気侵入が生じる 40 cmH₂O で、PT のおよそ 3 割が侵入可能となっており、これは、間隙ネットワークのポンド過程の侵透閾値に相当している。

3. 軟 X 線を用いた可視化実験

0.2 mm のガラスビーズと豊浦標準砂を試料として、軟 X 線を使用した多孔質媒体への流体侵入挙動の可視化実験を行う。造影剤としてジヨードメタンを使用する。まず、大きさが縦 4.6 cm、横 5.0 cm、幅 2.0 cm のアクリル製の容器に、水中降下法で 3 cm ほどの高さまで試料を充填する。容器を X 線透過装置に設置し、給水を行い、滞りなく流れることを確認した後、マリOTTタンクの空気侵入管を塞ぐことにより一旦給水を停止する。X 線カメラとビ

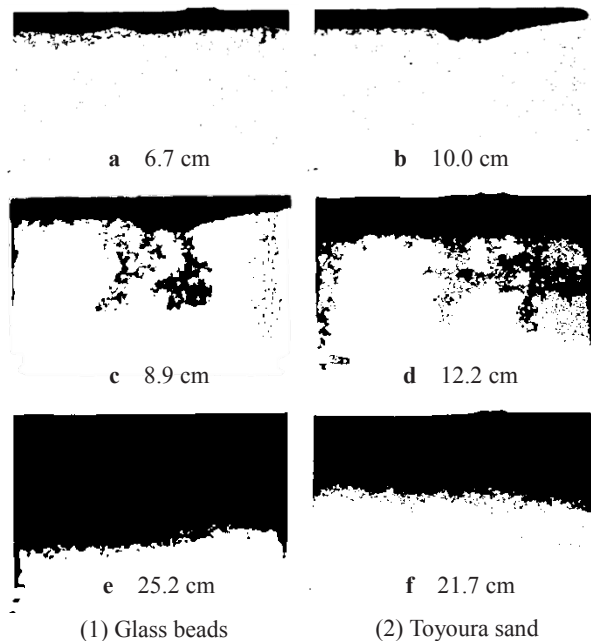


図 4 造影剤の浸透の様子
Fig.4 Intrusion of Contrast Fluid

デオカメラの録画を開始した後、造影剤を試料上面に重力による自然注入する。この際、造影剤は試料の上を 1 cm ほどの厚さで覆うようにする。その後、給水を再開(造影剤の上面へ圧力を付加)し、造影剤の侵入の様子を記録する。ここでは、マリOTTタンクの設置高さを変えることにより、造影剤にかかる圧力を変化させて、侵入の様子が変化するか確認する。これは、侵入可能な間隙の割合を変化させることに相当する。

実験の結果を図 3 に示す。侵入圧が低い場合、造影剤の継続的な侵入は起こらず、途中で侵入は停止した(図 4 a, b)。侵入圧を高くすると、フィンガー状の侵入が見られた(図 4 c, d)。さらに、圧力を高くすると、侵入前線が形成され、一様に侵入していく様子が見られた(図 4 e, f)。

4. まとめ

モデルをもちいた数値実験では、フィンガリングが生じた毛管圧(40 cmH₂O)で侵入可能となる PT の割合はおよそ 3 割で、これは間隙ネットワークのポンド過程の侵透閾値とほぼ等しいものであった。パーコレーション理論からは、侵透閾値を超えた付近において自己相似形のサブネットワーク(ここでは、侵入可能な間隙のネットワーク)が生じるとされており、そのサブネットワークへ流体が侵入したことによりフィンガリングが生じたと考えられる。また、毛管圧を上げることにより、侵入可能な間隙の割合が増えると、一様な侵入が生じると考えられる。これらの結果より、同一の媒体において、浸入流体にかかる圧力を変化させる、すなわち、侵入可能な間隙の割合を変化させることにより、侵入挙動が変わることが予想された。軟 X 線を用いた可視化実験では、浸入流体にかかる圧力を変化させる(侵入可能な間隙の割合を変える)ことで、実際に侵入様式が変わることが示確認された。

参考文献

- [1] Saffman and Taylor, 1958, Proceeding of Royal Society. Series A, 245 (1242), 312-329. [2] 小田垣, 1993, パーコレーションの科学, 裳華房, 131. [3] Takeuchi, Sumii, and Fujihara, 2016, International Journal of GEOMATE, 10 (22), 1971-1977. [4] Takeuchi, Tsuji, and Fujihara, 2016, Precision Farming and Resources Management, Excel India Publishers, 292-304. [5] 岩間ら, 1992, 土壌の物理性, 66, 11-18.