

# 一般化インベーションパーコレーションによる混合多孔質媒体の水分保持特性のモデル化 Modeling of Water Retention Properties of Porous Media with Mixed Wettabilities Using Generalized Invasion Percolation

○竹内 潤一郎\*・住居 航\*・藤原 正幸\*

TAKEUCHI Junichiro, SUMII Wataru, and FUJIHARA Masayuki

## 1. はじめに

多孔質媒体における、水-石油、水-空気といった非混合性流体の片方の流体によるもう一方の流体の置換(浸透)は、シェール層におけるオイルの回収や NAPL (Non-Aqueous Phase Liquid) による地下水汚染、土壌の水分保持特性など多岐にわたる事象に関係する現象である。これらの置換現象は、間隙のつながりをネットワークとみなして、インベーションパーコレーションという動的な浸透過程モデルを用いて解析が行われている<sup>[1,2,3]</sup>。これまで、筆者らは、疎水性粒子を含む混合多孔質媒体の透水性や浸透現象を、間隙ネットワークを用いてモデル化してきた<sup>[4,5]</sup>。ここでは、浸潤過程および排水過程に対し、一般化インベーションパーコレーションを適用することにより、混合多孔質媒体の水分保持特性に関する数値実験を行う。

## 2. モデル

### 2-1 間隙ネットワーク

DEM (Discrete Element Method) を用いて、直方体領域に球形粒子を自由落下で充填することにより、多孔質媒体モデルを作成する。その際、所望の間隙率になるように粒子間の摩擦係数を調節する。この多孔質媒体モデルの間隙を、修正 Delaunay 分割法を用いて、間隙ネットワークを抽出する<sup>[6]</sup>。間隙ネットワークは、一般に PB (Pore Body) と、PB 間を結ぶ PT (Pore Throat) から構成されるが、ここでは、PB の体積は考慮せず、図 1 のように PT が連結したものとする。

### 2-2 一般化インベーションパーコレーション

パーコレーションとは、金属と絶縁体の混合物における導電性や、森林火災や感染症の進行といった様々な事象のつながりや伝播現象に共通する概念を一般化したものである<sup>[7]</sup>。インベーションパーコレー

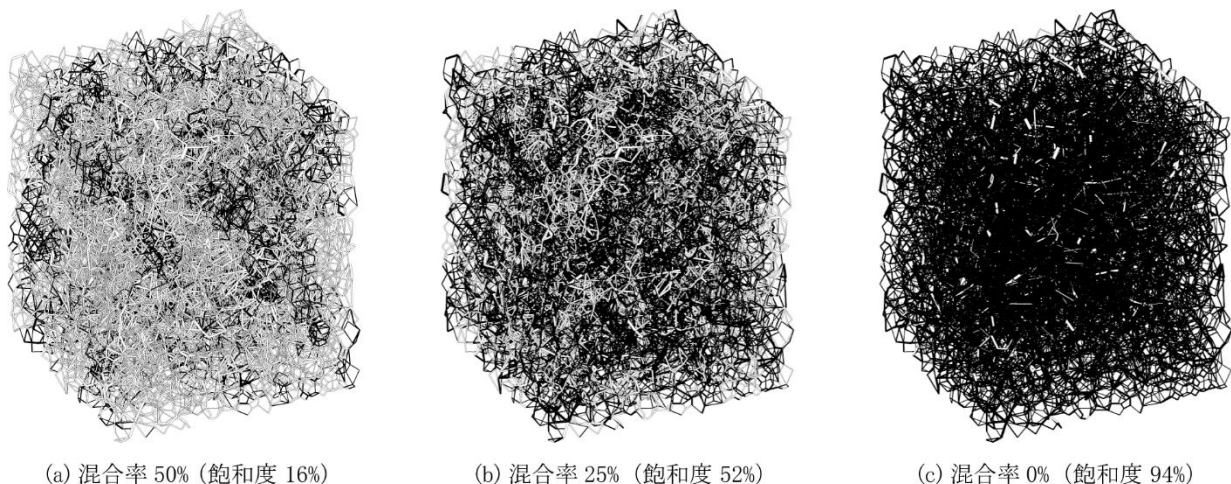


図 1 様々な混合率における水分布 (浸潤過程, Case2, マトリックポテンシャル  $-16\text{cmH}_2\text{O}$ )  
Water distribution at various mix rates (Wetting process, Case2, Matric potential  $-16\text{cmH}_2\text{O}$ )

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

キーワード: 間隙構造, 水分移動, 土壌空気

シオンとは、Wilkinson・Willemssen (1983) が多孔質媒体内の非圧縮性かつ非混合性流体の置換過程をモデル化した動的なパーコレーション過程である。インベージョンパーコレーションでは、浸入流体と被浸入流体が接する浸入可能な間隙のうち、最も浸入しやすい間隙に浸入するというステップを繰り返して、浸入過程が進行するものとなっている。しかし、実際に浸潤過程や排水過程では、複数の間隙において浸入が同時進行する様子が観測される。そのため、浸入可能な間隙のうち、一定数あるいは、すべての間隙で同時に浸入が進行するものを一般化インベージョンパーコレーションとして提案する。

水の浸入(あるいは排水)のしやすさの指標として、各 PT の断面積や構成する親水性・疎水性粒子の数などできる毛管上昇ポテンシャルとその PT におけるマトリックポテンシャルの差を採用する。浸潤過程では、この値が正のとき浸入可能となり、その値が大きいほど水浸入しやすいことを意味する。排水過程では、この値が負のとき排水可能となる。ただし、浸入や排水による置換が起こるには、浸入流体・被浸入流体ともに、封入状態でないことが前提条件となる。

### 3. 数値実験

粒径 0.2 mm の親水性と疎水性の球状粒子からなる混合多孔質媒体を対象とする。底面が 3mm×3mm の直方体の領域に粒子をおよそ 5000 個充填したのから間隙ネットワークを抽出する。上面は空気、下面は水と接しているものとし、側面からの空気や水の出入りはしないものとする。空気の圧力は多孔質媒体の内外で大気圧(一定)とし、下面に課す水の圧力は-50 から 40 cmH<sub>2</sub>O で変化させる。また、疎水性粒子の混合率は、25%刻みの 0 から 100%の 5 つとし、親水性粒子の表面の接触角は 70 度、疎水性粒子は 102 度とする。1 ステップで置換を行う数を 10 個に制限したものをケース 1 とし、置換可能な間隙すべてを 1 ステップで置換を行うものをケース 2 として、浸潤/排水過程の数値実験を行う。

ケース 2 の浸潤過程における水浸入の様子を図 1 に示す。図中の黒線は水が浸入している PT を、白抜き線は水が浸入していない PT を表している。図 2, 3 には、浸潤/排水過程におけるマトリックポテンシャルと飽和度の関係を示す。これらより、ケース 1 では、残留空気/水分が多く生じていることが分かる。これは、1 ステップで置換する数を制限したことにより、枝状に浸入/排水が進行したことが原因と考えられる。

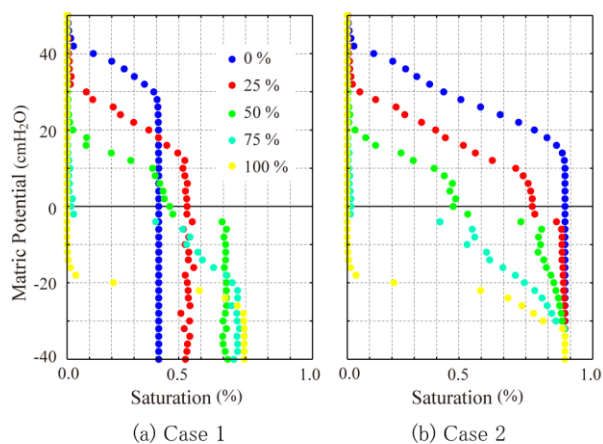


図 2 浸潤過程  
Wetting process

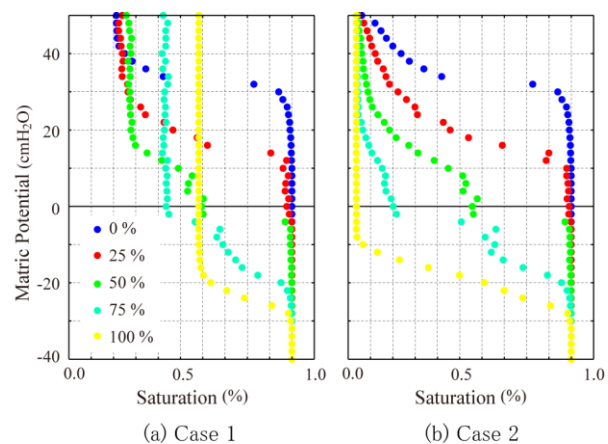


図 3 排水過程  
Drainage process

### 参考文献

- [1] Wilkinson and Willemssen, 1983, J. Phys. A: Math. Gen., 16, 3365-3376. [2] Ewing and Gupta, 1993, Water Resour. Res., 29, 3169-3178. [3] Ewing and Berkowitz, 1998, Water Resour. Res., 34, 661-622. [4] 竹内ら, 2014, 平成 26 年度 JSIDRE 大会講演会講演要旨集, 3-35, 386-387. [5] 竹内ら, 2013, JRCSA 第 21 回研究発表会講演要旨集, 11-12. [6] Al-Raoush et al., 2003, SSSAJ, 67, 1687-1700. [7] Stauffer and Aharony, 1992, Introduction to Percolation Theory, revised 2<sup>nd</sup> ed., Taylor and Francis, 205.