

## 数理形態演算による地盤内多相流動シミュレーション手法の提案

熊本大学大学院 学生会員 ○三上 和昭  
熊本大学大学院 正会員 椋木 俊文

### 1. はじめに

多相流動特性はミクロスケールの孔隙構造と流体物性によって支配されており、孔隙構造は、孔隙径、孔隙形状、孔隙の接続性などで特徴づけられる<sup>1)</sup>。近年実用化されたマイクロフォーカス X 線 CT 装置(MXCT)はミクロン単位の分解能を有しており、砂地盤材料程度であれば、3次元孔隙構造を鮮明に可視化することができる。本研究では、ミクロスケールにおける多孔体中の多相流動メカニズムの解明を目的として、豊浦標準砂の MXCT 画像から3次元孔隙径分布を評価するとともに、著者らが開発した画像解析技術を応用した孔隙スケールの擬似流動シミュレーション手法を用いて、空気-水 2 相流動における主排水過程と主吸水過程について評価を行った。その結果、non-wetting 相の残留メカニズムに対して、細孔隙と大孔隙の比(aspect ratio)が重要な要因であることが確認された。

### 2. X 線 CT 撮影条件・解析方法

#### 2. 1 X 線 CT 撮影条件

多孔質試料としては土粒子密度  $2.65\text{kg/m}^3$ 、乾燥密度  $1.57\text{kg/m}^3$ 、間隙率 40.8%の絶乾状態の豊浦標準砂を使用した。本研究では、熊本大学所有のマイクロフォーカス X 線 CT スキャナ (TOSCANE-32300FPD, 東芝 IT コントロールシステム(株)製) を利用した。解像度は  $4.46 \times 4.46 \times 5.0 \mu\text{m}^3$  で撮影したが、画像解析の都合上、撮影後にボクセルサイズを  $5 \times 5 \times 5 \mu\text{m}^3$  の立方体にリサイズ(線形補間)し、画像中心部の  $200 \times 200 \times 200 \text{voxels}$  の範囲(一辺 1mm の立方体)を画像解析の範囲に設定した。

#### 2. 2 画像解析手法

MXCT 画像の画素値は密度と相関のある CT 値と呼ばれる値をもつ。孔隙部分を抽出するためには孔隙(気相)と土粒子(固相)に相分離する必要があり、この処理を 2 値化処理と呼ぶ。本研究では、大津の閾値決定法<sup>2)</sup>をスライスごとに適用することで孔隙部分を抽出した。次に、3次元孔隙径分布の評価方法について説明す

る。画像から構造を抽出する処理は、画像間の集合演算を扱うマセマティカルモルフォロジー(mathematical morphology)の演算が有効である<sup>3)</sup>。本研究ではマセマティカルモルフォロジーの基本演算であるオープニング(opening)を利用した。集合(画像) X の構造要素 B によるオープニング  $\gamma_B$  は次式で定義される。

$$\gamma_B(X) = \bigcup_X \{B_X \mid B_X \subseteq X\} \quad (1)$$

この演算の意味は、構造要素 B を集合 X からはみ出さないように動かしたときの B の軌跡を意味する。今回、構造要素 B に対しては直径 d の 3 次元の球を設定し、集合 X に対しては先の 2 値化画像を設定している。本研究では、直径 d の球がはみ出さずに侵入できない孔隙は、直径 d よりも小さい孔隙径をもつと仮定する。この処理を球の直径 d を変化させて繰り返すことで 3 次元孔隙径分布が得られる。ここで、2 つ目の仮定として、本手法で定義した孔隙径に対して、直径が等しい毛細管モデルを仮定できるとする。すなわち、準静的な流動条件においては孔隙径 d から次式によって毛管圧力が求まる。

$$hc = \frac{4\sigma_{nw} \cos \theta}{\rho_w g d} \quad (2)$$

ここで、 $h_c$  は毛管圧力水頭(cmH<sub>2</sub>O)、 $\sigma_{nw}$  は界面張力(dyn/cm)、 $\theta$  は接触角(degree)、 $\rho_w$  は水の密度(g/cm<sup>3</sup>)、 $g$  は重力加速度(cm/s<sup>2</sup>)である。wetting 相に水、non-wetting 相に空気を仮定すると、 $\sigma_{nw} = 72.75$  (dyne/cm)、 $\rho_w = 1.0$  (g/cm<sup>3</sup>)となる。接触角  $\theta$  は文献<sup>4)</sup>より  $\theta = 49^\circ$  に設定した。

#### 2. 3 開発した流動シミュレーションモデル

孔隙構造を特徴づける要因は孔隙径、孔隙形状、孔隙の接続性である。孔隙径分布は既に評価している。孔隙形状に関しては MXCT 画像をそのまま利用しているため満足している。最後の接続性、すなわち孔隙のネットワークに関しては画像解析の接続性解析<sup>3)</sup>を利用することで考慮する。本解析モデルはあくまで孔隙

キーワード 多相流, X 線 CT, 画像解析, 毛管圧力曲線, 数理形態学

連絡先 〒860-8555 熊本県熊本市黒髪 2-39-1 熊本大学大学院自然科学研究科 TEL 096-344-2111

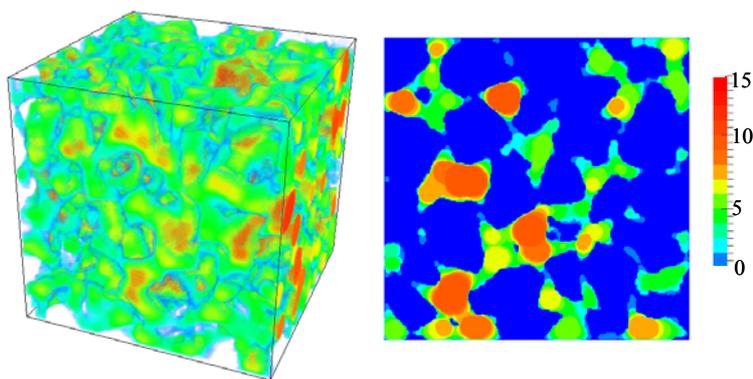


図 1. 孔隙径分布 (左)三次元表示, (右)断面

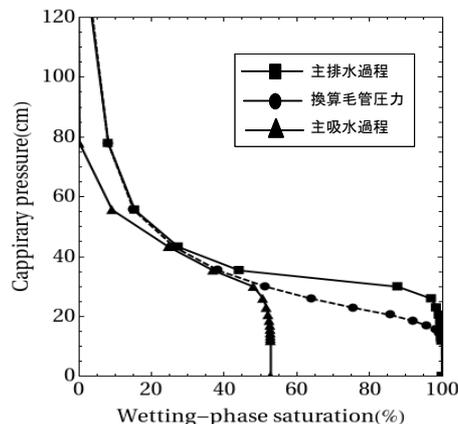


図 2. 毛管圧力曲線 (解析結果)

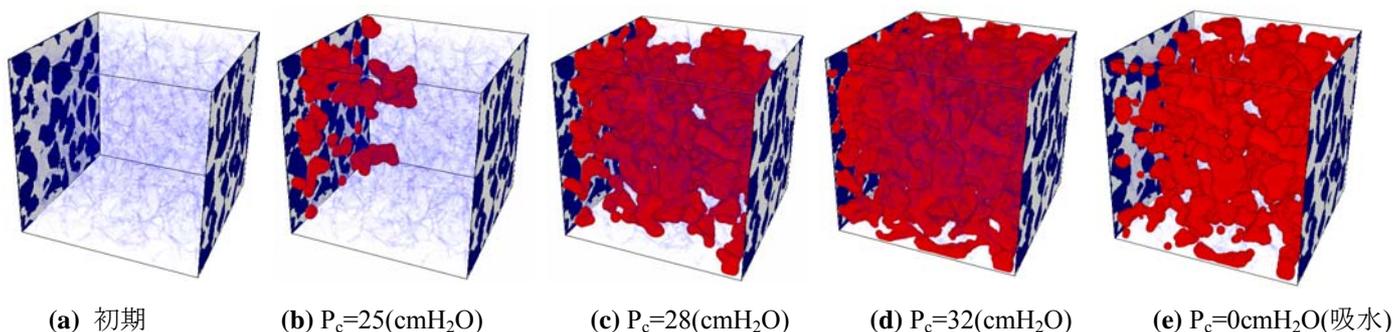


図 3. 解析結果 (赤 : non-wetting 相)

構造から擬似的に多相流動をシミュレーションするものであり、非平衡な挙動は考慮できない。境界条件は、左側面を non-wetting 相レイヤー、右側面を wetting 相レイヤーに設定し、重力は考慮しない。主排水過程においては non-wetting 相に接続(26 点近傍)しているボクセルの内、孔隙径が大きいものから順に non-wetting 相で置換し、主吸水過程ではその逆とする。ただし、主吸水過程において wetting 相あるいは固相に囲まれて孤立した non-wetting 相は残留状態とみなし、以後の計算から除外する。

3. 解析結果・考察

3次元孔隙径分布の解析結果を断面画像と3次元画像で図 1 に示す。大孔隙(pore)と相対的に小さな細孔隙(throat)が 3 次元的分布している様子が確認できる。この孔隙径分布に対する式(2)による換算毛管圧力曲線を図 2 に示す。これは孔隙のネットワーク、すなわち流動経路の影響を考慮しない毛管圧力曲線である。

次に、擬似流動シミュレーションの結果を図 2、図 3 に示す。排水過程においては、接続性を考慮することで non-wetting 相の侵入圧の影響を考慮出来ている。また、30cmH<sub>2</sub>O 程度((2)式換算径 65μm)の毛管圧力水頭において急速に排水が進む様子が 3 次元的に確認できる(図 3(a)-(e))。これらの結果は、細孔隙の侵入圧の影響

によると考えられ、すなわち、流動経路を考慮することによって排水過程のボトルネックとなるミクロな侵入圧の影響を評価可能となった。一方で、吸水過程においては、30cm 程度の毛管圧力水頭で急速に残留が進む結果となった。これは、ボトルネックとなる細孔隙が wetting 相で満たされた結果、大孔隙の non-wetting 相が液滴化するスナップオフが生じたためであると考えられる。

4. おわりに

画像解析手法を応用した多相流動シミュレーション手法を提案した。今後は、実験結果との比較検討により、流動メカニズムの解明を目指していく予定である。

参考文献

- 1) F.A.L.Dullien : Porous Media Fluid Transport and Pore Structure, ACADEMIC PRESS, INC., 1992.
- 2) P.Soille: Morphological Image Analysis principles and Applications, Springer, pp.117-236, 2003.
- 3) N.Otsu : A Threshold selection method from gray-level histogram, IEEE, vol 9-1, 1979.
- 4) 遠藤和人: DNAPL 汚染サイトの原液移動特性と汚染分布評価, 京都大学地球環境学大学院平成 14 年度博士学位論文, pp132-135, 2002.