

# フェーズフィールド法を用いた気液二相流解析による 土の保水性試験のシミュレーション

Simulation of soil water retention test

by gas-liquid two-phase flow analysis using the phase-field method

岩葉柊志<sup>1)</sup>, 山田正太郎<sup>2)</sup>, 京谷孝史<sup>3)</sup>

Shuji Iwaba, Shotaro Yamada, Takashi Kyoya

1) 東北大学大学院工学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06, E-mail: shuji.iwaba.q7@dc.tohoku.ac.jp)

2) 東北大学大学院工学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06, E-mail: shotaro.yamada.d2@tohoku.ac.jp)

3) 東北大学大学院工学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06, E-mail: Takashi.kyoya.b1@tohoku.ac.jp)

In this study, the suction method, one of the soil water retention tests, is simulated by gas-liquid two-phase flow analysis using the phase-field method. By changing wettability parameters, numerical simulation reproduces differences in the water retention properties of soil due to differences in the wettability of soil particles. The hysteresis in the moisture property curve is discussed by visualizing the movement of water through a specimen. As a result, it is shown that the ink bottle effect can be a major factor in generating hysteresis.

**Key Words :** Gas-liquid two-phase flow, Phase field method, Surface tension, Ink bottle effect

## 1. はじめに

土中水のポテンシャルと含水率を表す水分特性曲線は土の保水性を表す指標として使われている。本研究では、フェーズフィールド法（以下、PF法）を用いた気液二相流解析[1,2]によって、土の保水性試験をシミュレートする。供試体内を水分が移動する様子を可視化し、水分特性曲線にヒステリシスが生じる理由などについて考察する。また、土粒子の濡れ性が土の間隙での水の動きに与える影響についても考察する。

## 2. 間隙水と間隙空気の界面の表現方法

PF法を用いて間隙水と間隙空気の界面の移動を表現する。界面関数  $\phi(\mathbf{x}, t)$  が、 $\phi=1$  は水、 $\phi=0$  は空気、 $0 < \phi < 1$  は界面を表すとする。 $\phi$  の時間発展方程式として、以下の移流を考慮したAllen-Cahn方程式（以下、AC方程式）を用いる。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \phi = -M_\phi \eta \quad (1)$$

$$\eta = \frac{\partial \varphi(\phi)}{\partial \phi} - k_\phi (\nabla^2 \phi + \kappa |\nabla \phi|) \quad (2)$$

ここで  $M_\phi$  は易動度係数、 $\eta$  は化学ポテンシャル、 $k_\phi$  は界面の滑らかさを表す係数、 $\kappa$  は界面の曲率である。化学ポテンシャルとしてダブルウェルポテンシャルと勾配エネルギー密度を考える。

## 3. 間隙流体の解法

間隙水と間隙空気を非圧縮性流体と仮定し、流速と圧力をナビエストークス方程式（以下、NS方程式）を解くことで求める。この際、間隙流体の密度  $\rho$  と粘性係数  $\mu$  を水と空気のそれらの値より  $\phi$  を用いて内挿する。また、NS方程式の外力項において  $\phi$  を元に表面張力を考慮する。一方で、式(2)の右辺第3項によって、PF法からは表面張力の効果を取り除く。NS方程式の計算における表面張力は以下のように表せる[2]。

$$f_{sv} = \sigma \kappa \nabla \phi \quad (3)$$

$$\kappa = -\nabla \cdot (\nabla \phi / |\nabla \phi|) \quad (4)$$

ここで  $M_\phi$  は易動度係数、 $\eta$  は化学ポテンシャル、 $k_\phi$  は界面の滑らかさを表す係数、 $\kappa$  は界面の曲率である。化学ポテンシャルとしてダブルウェルポテンシャルと勾配エネルギー密度を考える。

## 4. 濡れ性

式(1)の境界条件として、以下の Neumann 型境界<sup>1)</sup>を規定することで土中水に対する土粒子の濡れ性の効果を考慮する。

$$n \cdot (k_\phi \nabla \phi) = t_\phi \quad (5)$$

ここで、 $n$  は物体表面の法線ベクトル、 $t_\phi$  は濡れ性に関するパラメータである。 $t_\phi$  を大きくすることで親水壁面を、小さくすることで撥水壁面を表現することができる。

## 5. 解析手法

流速と圧力に加え、界面関数を未知関数とし、差分法を用いて NS 方程式と AC 方程式の空間離散化を図った。格子の配置には Arakawa-B 型スタッガード格子を用い、 $\phi$  は圧力と同じ点に配置することとした。NS 方程式を解くことで各点の流速と圧力の計算を行った後に、AC 方程式より各点の界面関数  $\phi$  の値を更新する弱連成解析手法を採用了。NS 方程式はフラクショナルステップ法、AC 方程式は陽解法を用いて解いた。

## 6. 数値解析結果

吸引法による土の保水性試験のシミュレーションを行う。豊浦砂の粒径加積曲線を元に 3 つのサイズの土粒子から成るモデルを考え、間隙比が  $e=0.787$  となるようにした。表面張力係数は 20 °C での水の値を参考に  $\kappa=0.0728 \text{ N/m}$  とし、土粒子の濡れ性については  $t_\phi=7.6 \times 10^{-6}$ 、 $t_\phi=3.8 \times 10^{-6}$  の 2 パターンを考えた。前述した通り、 $t_\phi$  の値が大きい方が濡れ性が高い。

間隙空気圧を大気圧とし、マトリックポテンシャル  $\psi_m$  を次式で定めた。

$$\psi_m = u_a - u_w = -u_w \quad (6)$$

ここで、 $u_a$  は間隙空気圧、 $u_w$  は間隙水圧である。土の保水性試験に倣い、解析領域の上端面で指定する圧力を  $u_a$ 、下端面で指定する圧力を  $u_w$  として結果を整理する。

下端面を減圧して排水させた後に、増圧することで吸水させた。 $t_\phi=7.6 \times 10^{-6}$  と  $t_\phi=3.8 \times 10^{-6}$  の初期と最大負圧作用時（いずれも平衡状態）における含水分布をそれぞれ図 1 と図 2 に示す。土粒子を青色で示し、間隙水が存在する領域を赤色で示している。接触角の大きさにより表面張力の働きに違いが出るため同じ圧力条件を課しても飽和度に違いが生じている。濡れ性が高い  $t_\phi=7.6 \times 10^{-6}$  の方が毛管圧が高くなるため、含水率、すなわち保水性が高くなることが分かる。

吸排水過程で得られた水分特性曲線を図 3 に示す。いずれのケースでもヒステリシスが現れている。また、図 1 と図 2 に示す含水状態の違いを反映して、同じマトリックポテンシャルにおいて、濡れ性が高いの方が飽和度が高い値を示している。

図 4 に、濡れ性の低いのケースで、マトリックポテンシャルが 15 Pa に達したときの、排水過程と吸水過程の含水分布を示す。図 3 に示す水分特性曲線のヒステリシ

スに現れている通り、吸水過程に比べて排水過程の方が高い含水状態になっている。吸水過程で間隙の大きな部分に間隙水が浸入できないことがこの違いを生んでいる。

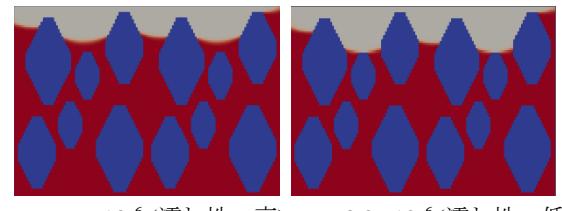


図 1 初期含水状態 ( $\psi_m = -25 \text{ Pa}$ )

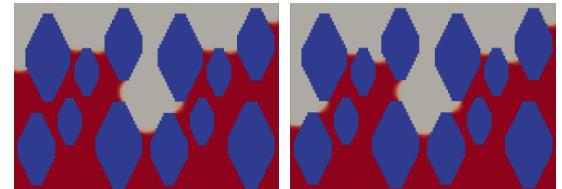


図 2 最大負圧作用時の含水状態 ( $\psi_m = 75 \text{ Pa}$ )

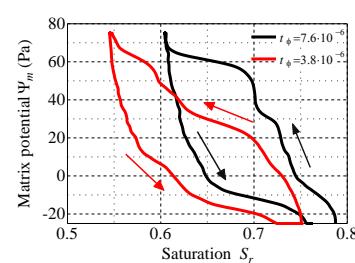


図 3 水分特性曲線

図 4 に、濡れ性の低い  $t_\phi=3.8 \times 10^{-6}$  のケースで、マトリックポテンシャルが 15 Pa に達したときの、排水過程と吸水過程の含水分布を示す。図 3 に示す水分特性曲線のヒステリシスに現れている通り、吸水過程に比べて排水過程の方が高い含水状態になっている。吸水過程で間隙の大きな部分に間隙水が浸入できないことがこの違いを生んでいる。

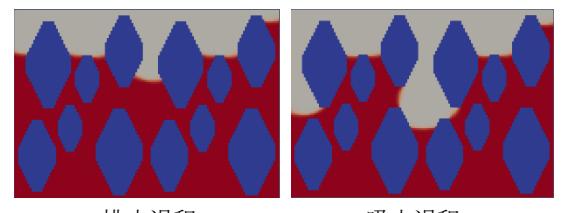


図 4  $\psi_m = 15 \text{ Pa}$  作用時の含水状態 ( $t_\phi = 3.8 \times 10^{-6}$ )

次に、吸水過程で間隙の大きな部分に間隙水が浸入できない理由としてインク瓶効果が考えられる。そのため、間隙の広い部分と細い部分を図 5 に示す間隙モデルとして考え、インク瓶効果についての検証を行う。このモデルの底面の水圧を変化させたときの、水面高さとマトリッ

クボテンシャルの関係を図 6 に示す。排水過程と吸水過程で異なるルートを辿り、図 3 と同様なヒステリシスが生まれている。

図 6 の点 A～D における含水状態を図 7 に示す。排水過程の初期は間隙の幅が一定であるため、マトリックポテンシャルに比例して水面が下がる。点 A や点 B では、間隙の幅が変化することの影響で水面の下降がやや鈍るが、大きく停滞することはない。吸水過程でもはじめはマトリックポテンシャルの低下に伴って、水面が上昇するが、点 C に至ると、間隙が広がる影響で水面の上昇が停滞する。毛細管現象では間隙幅と毛管上昇高さの関係として、毛管上昇高さは間隙幅に反比例することが知られており、細い間隙のときは水面を上げる力は強く、毛管上昇高さは高くなり、太い間隙のときは水面を上げる力は弱く、毛管上昇高さは低くなる。これが点 C で水面の上昇が停滞する理由である。その後、マトリックポテンシャルがさらに低下し、界面での圧力差により水面を下げようとする力が、表面張力により水面を上昇させようとする力を下回ると、上の細い間隙の位置まで水面が急激に上昇する。この状態が点 D である。このように、間隙幅の差により毛管上昇高さが異なることに起因して、大きな間隙に間隙水が侵入できないことが、図 6 にヒステリシスをもたらしている。これがインク瓶効果と呼ばれる現象の正体で、本計算で得られた水分特性曲線にヒステリシスが生まれる主要なメカニズムになっている。

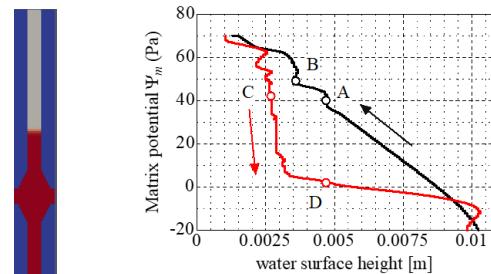


図 5 間隙モデル

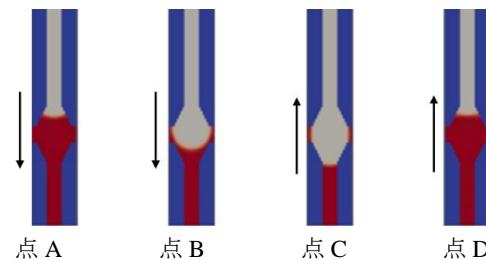
図 6 水面高さ  $h$  と  $\psi_m$  の関係

図 7 図 6 の点 A～D での含水状態

## 7. 結論

本研究では、フェーズフィールド法を用いた気液二相流解析によって、土の保水性試験のシミュレーションを行った。水分特性曲線のヒステリシスや、土粒子の濡れ性の違いに起因して土の保水性に違いが生まれる様子を可視化した。また、インク瓶効果が水分特性曲線にヒステリシスが生まれる主要な原因となり得ることを示した。

## 参考文献

- [1] Jacqmin, D.J.: Calculation of Two-Phase Navier-Stokes Flows Using Phase-Field Modeling, 15, pp.96-127, 1999.
- [2] 一般財団法人: 日本計算工学会: 第3版 有限要素法による流れのシミュレーション, pp.87-107, 2017.