

# X線マイクロCTを用いた 不飽和土中の間隙構造と水分保持形態の観察 Observation of microstructures of the soil with different water retention states using X-ray micro CT

渡辺晋生<sup>1,\*</sup>, 米山明男<sup>2</sup>, 竹谷敏<sup>3</sup>, 長田友里恵<sup>1</sup>, 伴俊和<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 三重大学大学院生物資源学研究所, 〒5148-507 津市栗真町屋町 1577

<sup>2</sup> 日立製作所, 〒185-8601 東京都国分寺市東恋ヶ窪 1-280

<sup>3</sup> 産業技術総合研究所, 〒305-8565 茨城県つくば市東 1-1-1 中央第 5

Kunio Watanabe<sup>1,\*</sup>, Akio Yoneyama<sup>2</sup>, Satoshi Takeya<sup>3</sup>, Yurie Osada<sup>1</sup> and Toshikazu Ban<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Graduate School of Bioresources, Mie University, 1577 Kurima-machiya, Tsu 514-8507, Japan

<sup>2</sup> HITATI, 1-280, Higashi Koigatsubo Kokubunji Tokyo 185-8601, Japan

<sup>3</sup> National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Central 5, 1-1-1 Higashi, Tukuba 305-8565, Japan

## 1 はじめに

土のような多孔質体や粉体中には、形やサイズ、連続性の異なる様々な間隙が存在する。土の乾燥・湿潤過程において、これらの間隙から水分がどのように排出され、また満たされていくのかは、土粒子表面の性質や粒子間隙の配列構造で異なる。ここで、土の乾燥状態を規定する圧力（マトリックポテンシャル）と間隙に保持される水分量（含水率）の関係を水分保持特性と、間隙をつないで形成される水膜ネットワークを流れる水の巨視的抵抗とマトリックポテンシャルの関係を不飽和透水係数関数と呼ぶ。土中の肥料や汚染物質の挙動、根の成長、塩害、土の凍結現象を考えるには、土中の水分移動の予測が不可欠であり、こうした水分移動を表現する偏微分方程式を解くには、水分保持特性と不飽和透水係数関数を得る必要がある。

理論的には、乾燥過程にある土中では、水は大きな間隙から順に、間隙内部では間隙中央付近から順に排水され、湿潤過程では微細間隙の粒子表面近傍から順に吸水する[1]。そこで、こうした概念に基づき水分特性曲線や不飽和透水係数関数を表現する様々なモデルが、これまでも多数提案されている[2, 3]。また、空気や水分の封入やメニスカスの違いが乾燥湿潤や凍結融解の水分保持曲線や不飽和と薄い係数関数のヒステリシスを生むとみなされている。こうした土の水分保持特性や透水特性、凍結特性のモデルの検証や構築には土の間隙構造と水分分布の直接観察が効果的である。しかし、実体顕微鏡による数ミリ径のガラスビーズの間隙水のメニスカスを観察した例[4]や、顕微ラマンによる数ミクロンの間隙中の氷の確認例[5]はあるものの、実際に様々な不飽和状態（マトリックポテンシャル状態）で、土中の間隙中にどのように水や空気が分布しているのか

を非破壊で3次元的に観察した例はない。昨今では、X線CTやMRIを用いた土間隙の可視化が盛んになりつつあり、可視画像に基づく水分保持特性の検証も試みられるようになったが、間隙内部の水分状態を論じるには未だ解像度が粗く[6]、それゆえ土中間隙における水や空気の分布と土質やヒステリシスとの関係を理解するに至っていない。ところで、近年、数mm径の試料を数ミクロンオーダーの解像度で観察できるX線マイクロCTが開発されつつあり[7]、これを用いれば土中の数十ミクロンオーダーの間隙の観察から間隙内部の水や封入空気の配置を論じられる可能性がある。

そこで本研究では、比較的粒径が粗粒で均一な砂の粒子間隙と間隙水分布を高空間分解能のX線マイクロCTにより3次元的に観察することを目的とした。そして、画像解析から算出した含水率と水分特性曲線を比較し、土の水分保持機構や封入空気が水分保持機構や透水機構に及ぼす影響を考察した。また、黒ボク土やシルトなど、砂とは間隙構造や表面特性の異なる土についても観察を試みた。

## 2 実験

試料にはよく洗浄した鳥取砂丘砂、藤森シルトの2mm篩通過分、および岩手大学附属農場休耕畑の表層から採土した黒ボク土を用いた。土粒子の平均的な密度は2.65 g/cm<sup>3</sup>である。図1に吸引法、加圧板法、鏡面冷却露点計測式水ポテンシャル計で求めた、Durnerのモデル[8]に適合した乾燥過程の水分保持曲線を示す。砂は、-25 cm程度で空気侵入値に達した後、わずかなマトリックポテンシャルの低下で急激に水分を失い、-100 cm以下ではほとんど水を保持しない。シルトは砂にくらべ粒径や間隙が細かいだけでなく、比表面積も高い。そのため、空気侵

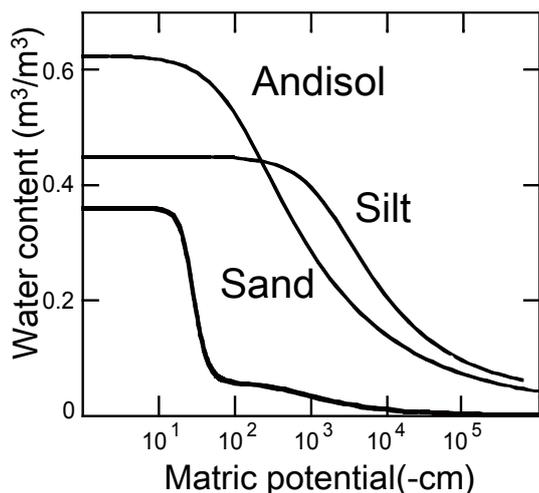


図 1 : 試料の水分保持曲線

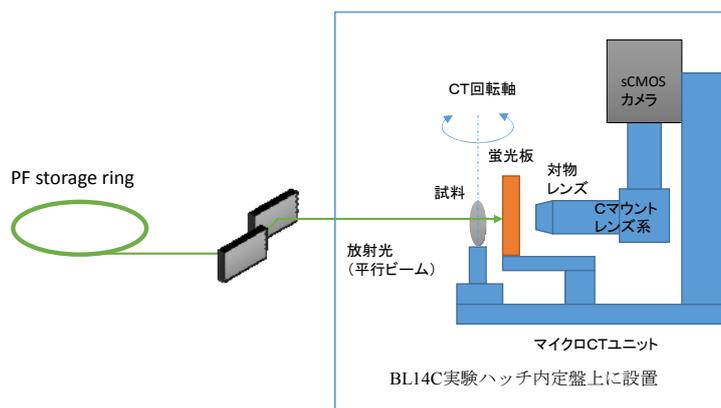


図 2 : 観察系の概念図

入値は-200 cm と低く、それ以下のマトリックポテンシャルにおいても多量の水を保持する。黒ボク土は団粒構造に富む。団粒は砂サイズの二次構造であり、黒ボク土内には、砂中に見られる間隙と同程度の大きさの団粒間隙と、微少な団粒内間隙が存在する。このため水分保持曲線にもそれぞれの間隙の排水に対応した階段状の傾向が見られる。

これらの試料を、下端を脱脂綿で閉じた直径 1 mm および 2 mm、長さ 5 cm のポリイミドチューブ（密度 1.4 g/cm<sup>3</sup>）に乾燥密度が均一になるように充填した。乾燥密度は砂で 1.5 g/cm<sup>3</sup>、シルトで 1.2 g/cm<sup>3</sup>、黒ボクで 1.0 g/cm<sup>3</sup> とした。下端を蒸留水に浸し、下方より試料を飽和した。そして、下端に吸引圧をかけ、試料の含水率を任意に調整した後、チューブの上下端をシリコン樹脂で防水した。ポリイミドの空気透過度は 84 g/m<sup>2</sup>d であり、試料円筒壁面からの水分蒸発は完全には無視できない。試料の含水率はわずかな水分量の違いで大きく変化するため、試料作成後は測定を迅速に行うことに留意が必要である。

作成した試料図 2 のように、BL-14C の高空間分解 X 線 CT システムの回転台の上に設置した。そして、回転装置により試料を回転させながら Computed Tomography (CT) により非破壊三次元観察を行った。撮像には 12 あるいは 15 keV の X 線を利用し、撮像装置にはカメラ (sCMOS 2560\*2180, Binning 2\*2)。蛍光体 (GOS; 5 μm)、対物レンズ (5 倍; 1.3 μm/pixel) を用いた。露光は砂で 8 秒、黒ボクで 5 秒、シルトで 15 秒とし、一回転の撮影には 1 試料当たり砂で約 2 時間 (0.5 度ずつ; 8 秒×720 枚+背景) を要した。

### 3 結果および考察

図 3 に、異なる水分量に調整した砂を X 線 CT で観察した画像を示す。図中の左端が風乾状態の試料 (0.05 g<sub>water</sub>/g<sub>soil</sub>)、右端ほど含水率が高く (0.1, 0.15, 0.2 g<sub>water</sub>/g<sub>soil</sub>)、右端は水分飽和した試料 (0.25 g<sub>water</sub>/g<sub>soil</sub>) の結果である。砂粒子の平均直径は 0.2mm 程度であり、砂粒子が一粒ずつよく観察できた。

図 4 に、図 3 の試料の断面図を示す。それぞれ独立した試料であり、同じようには砂粒子が詰まっていなかったが、全体の乾燥密度は等しく、ここではこうした違いを無視できるとみなした。図中白っぽいところが砂粒子、黒っぽい所が間隙であり、間隙中でも色の濃いところが空気、薄いところが水である。図から、粒子間には様々なサイズの間隙があることがわかった。間隙内の水は概ね大きな間隙から排水されていたが、同じようなサイズの間隙でも水を保持している場所とそうでない場所があった。空気は必ずしも間隙の中央あるわけではなく、間隙中の一部を空気が占めるようなこともあった。また、水分飽和状態の試料中にもそれなりに空気は封入されており、こうした試料中では比較的サイズの等しい空気が大きな間隙の片隅にまばらに存在することがわかった。

シルトや黒ボク土についても観察を試みた。シルトについては粒子が小さく、間隙内の水膜を判別することが難しかった。黒ボク土については粒子の配列や粒径分布がよく観察できたが、シルト同様細粒が多く水と空気の判別は難しかった。

ここで、図 4 の面積比から全間隙に対する水の占める割合をもとめ、これを有効飽和度と見なすと、図中左の試料よりそれぞれ、0, 0.33, 0.79, 0.87,

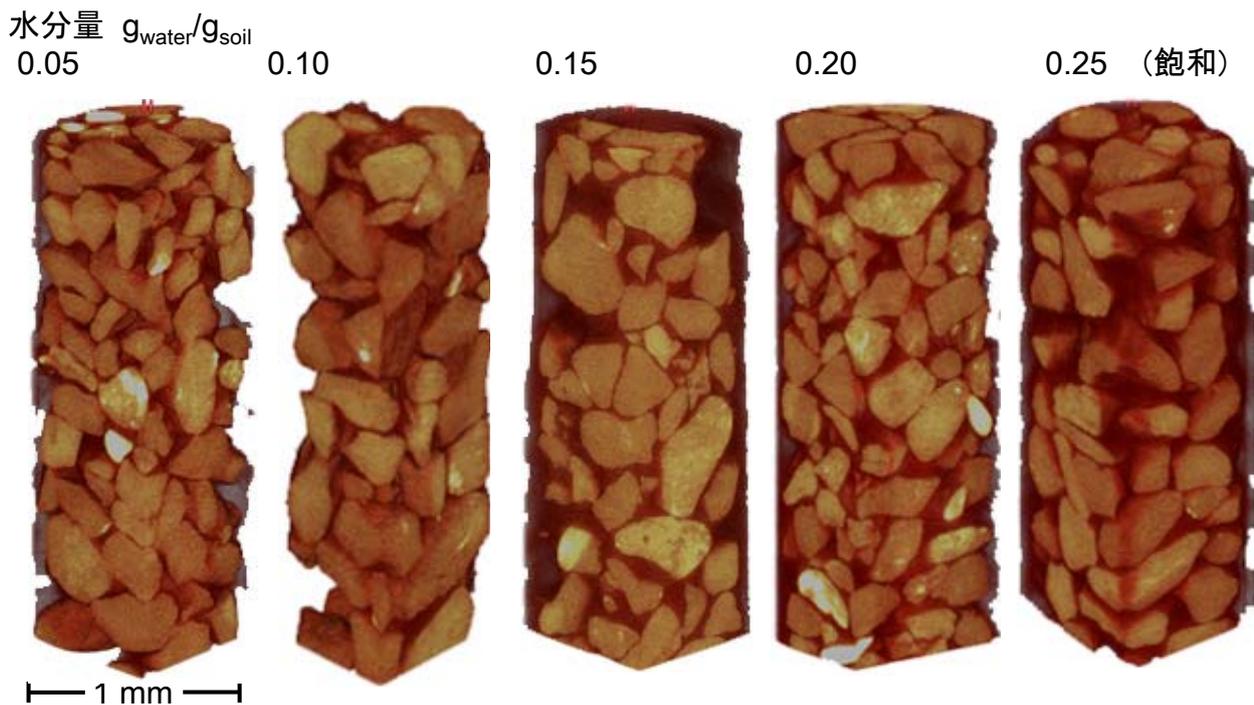


図 3 : 異なる水分量に調整した鳥取砂丘砂 (吸水過程) の観察画像

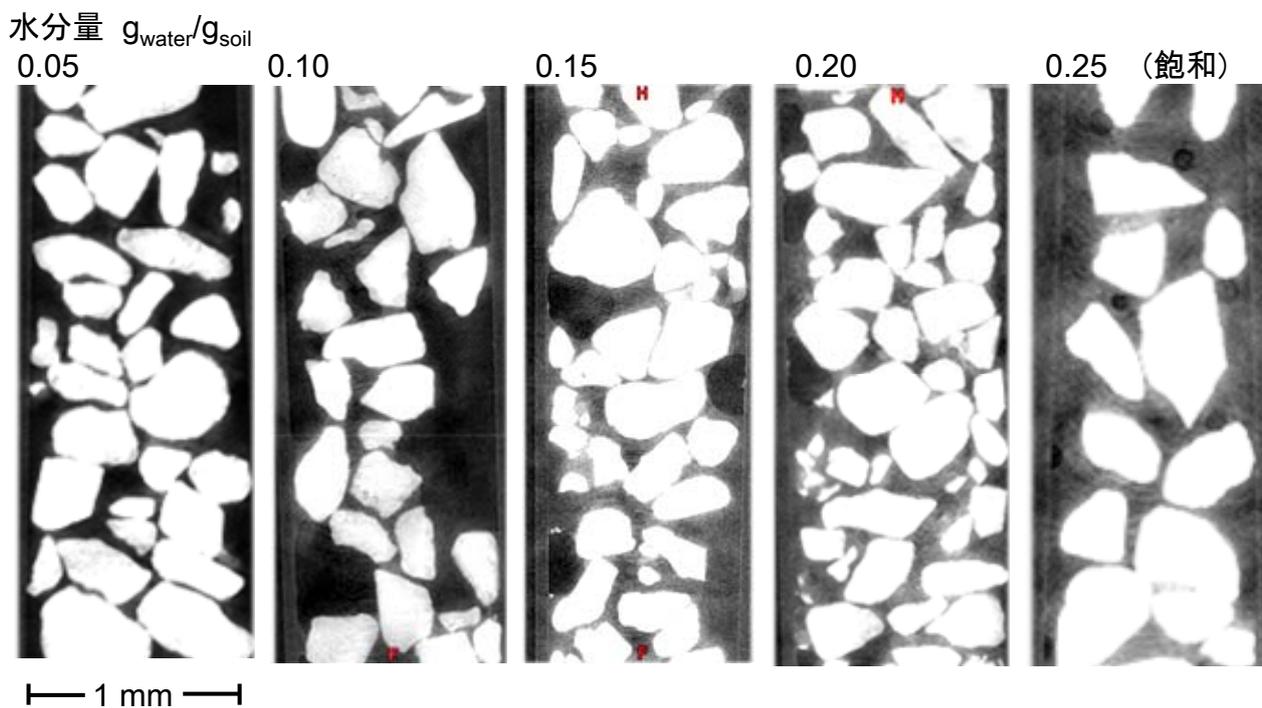


図 4 : 異なる水分量に調整した鳥取砂丘砂 (吸水過程) の断面図

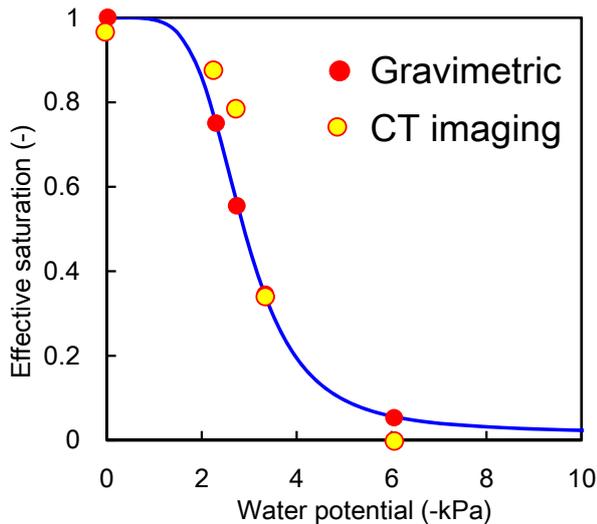


図5：重量比から求めた有効飽和度と X 線 CT 観察画像の面積比から推定した有効飽和度で作成した水分保持曲線

0.96 となった。今回調整した試料と水分の重量比から求めた飽和度とこれらの値を水分保持曲線で比較すると（図 5），面積比より推定した試料の有効飽和度は水分保持曲線と概ね一致した。このことから，こうした観察画像の解析から土中の水分保持機構や水分移動機構の定量化が可能と考えられる。

図 3 や 4 には，水分保持曲線の高水分領域のヒステリシスの説明にしばしば用いられるインク瓶効果 [1] を説明できる間隙形状や水分配置は見られなかった。低水分領域のヒステリシスの説明には気液界面の形状や土粒子と水膜の接触角の違いがしばしば指摘される。本観察の解像度は界面形状を論ずるには及ばなかったものの，接触角の算出は可能であり，今後の解析が期待できる。また，今回用いた砂試料には密度の高い粒子がいくつか含まれていた。こうした粒子を前もって取り除くことができれば，より解像度の高い観察も可能と思われる。封入空気の量や配置，間隙を占める割合が間隙径によらなかったことは，飽和近傍の給排水過程の水分保持曲線に大きなヒステリシスが生じることや，水分保持曲線の測定に再現性を得にくいことの原因と考えられる。こうした関係の検証には，水分量を変化させながらの同一視野の観察が今後必要であろう。また，飽和近傍では封入空気のサイズがそれなりに均一化した。こうした気相中の圧力は大気圧とは異なり，ある一定の圧力状態を保っている可能性も考えられる。今回得られた必ずしも大きな間隙から水が抜けていないという観察結果は，現行の通水モデルの仮定に反するものである。図 3 や 4 の間隙や水膜の連続性の解析から通水や通気経路の屈曲度を求め，モデルの改良を検討することも必要と考えられる。

#### 4 まとめ

高空間分解能の X 線マイクロ CT により，異なる含水率に調整した砂，シルト，黒ボク土の 3 次元観察を行った。各試料の粒子配列や砂試料間隙中の水や空気の配置が観察でき，観察画像の面積比から含水率を評価できること，排水が必ずしも大きな間隙から順には進行しないこと，封入空気が間隙径によらず不均一に分布することなどが明らかになった。こうした知見はこれまで定量化されておらず，今後，モデルへの組み込みに向けての解析が期待される。また，移動問題や水膜の形状変化を論じるには，同一試料を同一視野において水分量や温度を変えながら連続観察することが不可欠である。そのためには，回転台上で吸引圧を変化させて含水率を調整できる装置の作成が今後必要といえる。

#### 参考文献

- [1] W. Jury and R. Horton, 2004, *Soil Physics* 4<sup>th</sup> ed.
- [2] M.T. Van Genuchten, 1980, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892-898.
- [3] K. Watanabe and M. Flury, 2008, *Water Resour. Res.*, 44, W12402
- [4] S.C. Colbeck, 1982, *Soil Sci.*, 133, 116-123.
- [5] K. Watanabe and M. Mizoguchi, 2000, *J. Cryst. Growth*, 213, 145-140.
- [6] 森下他, 2012, 地盤工学研究発表会発表講演集, 47, 349.
- [7] 米山他, 2014, 第 27 回日本放射光学会年会, 11P095.
- [8] W. Durner et al. 1994, *Water Resour. Res.*, 30, 211-223.

\* kunio@bio.mie-u.ac.jp