

顕微鏡画像を用いた土壌孔隙径計測による水分特性曲線の測定の試み

立命館大学・衣笠総合研究機構 ○林 祐妃

1. はじめに

近年、気候変動により土砂災害が増加しており、この予知のためには、土壌中の雨水の浸透状況を把握する飽和不飽和浸透シミュレーションが有効な手段となる。しかし、この数値計算は土壌水分特性のパラメータの入力を必要とし、その取得のための室内試験では3カ月に及ぶ時間と手間と百万円ほどのコストがかかる。土壌水分特性は土壌孔隙構造によって決まることが知られている。ログノーマルモデル(LNモデル)では土壌孔隙径分布が対数正規分布に従うと仮定し、土壌水分特性を物理的に意味のあるパラメータで表している(Kosugi, 1997)。

近年、技術の進歩によりデジタル顕微鏡やPCの性能が高まっており、デジタル顕微鏡の画像をPC上で電子情報とし、画像解析を行うことが可能となった。この技術を用いて、デジタル顕微鏡で土壌構造の画像データを解析することで、水分特性曲線を取得することが可能であれば、飽和不飽和浸透シミュレーションを用いた崩壊予測が短時間、容易に、低コストに行うことができると考えられる。

そこで本研究では、不攪乱土壌サンプルを採取し、土壌断面のデジタル顕微鏡画像を取得し、画像から測定した土壌孔隙径分布の実測データとpF試験による水分特性曲線を比較し、顕微鏡画像からの水分特性曲線の取得可能性について検証する。

2. 方法

顕微鏡画像からの森林土壌の水分特性曲線の特定可能性を検証するために、立命館大学びわこ・くさつキャンパスの自然緑地内にて、森林土壌を採取した。植生は広葉樹林であった。粒度はシルトであった。深度10-15cmと22.5-27.5cmにおいて、100ccコアサンプラー(高さ5cm、直径5cmの円筒形サンプラー)で不攪乱土壌を2繰り返し採った。同深度の2つの不攪乱サンプルは、顕微鏡画像を撮影するサンプルとpF試験を行うサンプルに分けた。

顕微鏡画像を撮影するために、不攪乱サンプルは、土壌断面をナイフでサンプラーの縁にそって水平に削り前処理をした。サンプルからデジタル顕微鏡(キーエンス社製

VHX-5000)で、カラー画像を撮影した。サンプルの上断面・下断面の両方から5枚ずつ、合わせて1サンプル当たり10枚の画像を取った。

顕微鏡画像の孔隙径分布の測定を実施するために、画像解析プログラミング言語のMATLAB(MathWorks社製)を用いて解析した。土壌の画像は図-1aに示されるように奥まっているために顕微鏡の焦点が合わずぼやけた部分と、影になり暗く映っている部分がある。このため、どの部分を孔隙として認識すべきかを検討事項とした。孔隙の抽出手法は図-1に示した3通りの手法で行った。Method 1として、奥まっておぼやけた部分を孔隙と仮定した(図-1b)。Method 2では色が濃かった部分を孔隙と仮定した(図-1c)。Method 3では、孔隙の境界として検出した境界線で分割することで孔隙を仮定した(図-1d)。以上の方法で土壌孔隙を認識し手動で孔隙を抽出した。

孔隙は円形や楕円形のように抽出し易い形状ではなかったため、ソフトの画面上で孔隙を直線で囲みポリゴンを作成した。ポリゴンの面積を算出させ孔隙径分布の元データとした。面積を求める作業は1枚の画像において少なくとも40回繰り返した。算出した孔隙面積を用いて、円の面積の計算式から逆算して孔隙半径をExcelシート上で算出した。この40個以上の異なる孔隙半径のデータから、次のように孔隙径分布が分かる。土壌孔隙半径は圧力水頭と逆数の関係にあるので、圧力水頭に変換できる。さらに、孔隙面積は一枚の画像面積に対する割合とし孔隙率であると考えられるので算出した。さらに孔隙面積率とともに圧力水頭を小さい順にソートして、孔隙面積率の積み上げ値を算出し体積含水率、 θ とした。以上の方法で求めた、圧力水頭と体積含水率の関係は水分特性曲線となる。

採取した不攪乱サンプルを用いて加圧板法でpF試験を行い、従来の方法で水分特性曲線を測定した。水分特性曲線の体積含水率に対応する圧力水頭は0、-5、-10、-20、-30、-50、-70、-100、-200、-500cmである。孔隙解析を行うために、水分特性曲線の圧力水頭、 ψ を次の式により孔隙半径、 r に変換した。

$$r = A/\psi$$

ここで $A = -0.149$ とした。

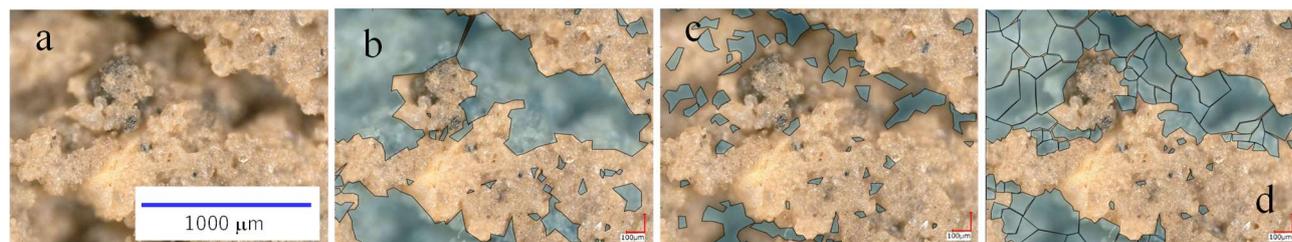


図-1 深度10-15cm土壌サンプル断面の顕微鏡画像。(a)土壌孔隙構造の顕微鏡画像、(b) Method 1、(c) Method 2、(d) Method 3による土壌孔隙径分布の採取状況

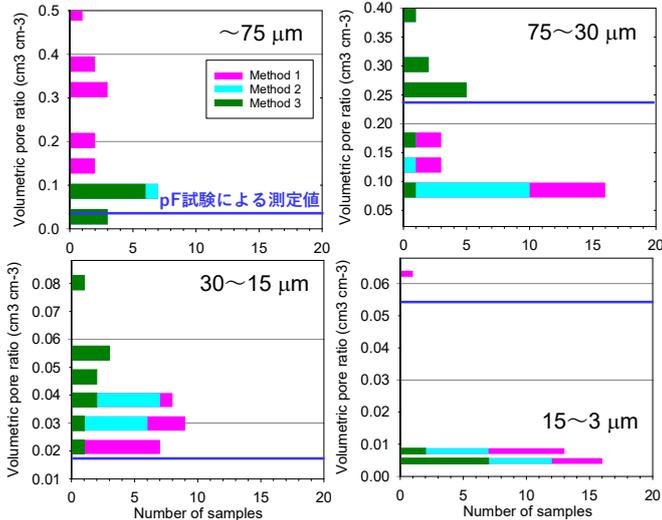


図-2 顕微鏡画像と pF 試験から取得したデータを用いた孔隙解析, 深度 22.5-27.5 cm の場合

3. 結果と考察

3.1 孔隙解析

顕微鏡画像からの解析と pF 試験から取得した水分特性曲線を用いて、孔隙径分布を比較するために孔隙解析を行った。図-2 に孔隙解析の結果を示した。この図は、深度 22.5 -27.5 cm の不攪乱土壌サンプルを対象として取得した 10 枚の顕微鏡画像から導いたもので、所定の体積孔隙率のヒストグラムを示している。棒グラフは積み重ね値となっている。青線は所定の pF 試験を用いて求めた体積孔隙率の値である。

Method 1 の結果を見ると、75 μm 以上の体積孔隙率と 30 ~ 15 μm の体積孔隙率はばらつきがある上に pF 試験の結果よりも多く測定された。75 ~ 30 μm と 15 ~ 3 μm の体積孔隙率は pF 試験より少なく測定された。

Method 2 の結果は、Method 1 とほぼ同じ傾向であった。しかし、75 μm 以上の体積孔隙率は、Method 2 では画像上からは抽出されなかったが、pF 試験でも測定されていない。このことは 75 μm 以上の体積孔隙率は抽出されなかったことが間違いではないことを示している。

Method 3 については、30 μm より大きい孔隙では pF 試験の結果と大体一致したが、これらよりも小さな孔隙 (15 ~ 3 μm) は少なかった。Method 1 の結果と同様に 75 μm 以上の大孔隙は pF 試験より多く抽出した。このことは、Method 3 が大孔隙は土壌断面の成形作業の際に形成された孔隙を抽出しているのではないかと考察される。

3.2 顕微鏡画像の水分特性曲線への LN モデルの適応

図-3 に深度 22.5-27.5 cm のサンプルの顕微鏡画像 10 枚すべてから抽出した孔隙径分布のデータから得た水分特性曲線と pF 試験の結果を示した。これは各 Method の水分特性曲線の計算値とそれに対する LN モデルをフィッティングした曲線を示す。さらに pF 試験の測定値と LN モデルの曲線を示した。

水分特性曲線の縦軸は、通常、体積含水率、 θ であるが、残留体積含水率、 θ_r は顕微鏡画像からは孔隙が微小である

ため測定できない。そこで、 θ から θ_r を引いた値を縦軸として設定した。 θ_r は非常に乾燥した状況で土壌中に残留している体積含水率のことであるので、水移動に関係した水ではない。最も湿潤状態の体積含水率である飽和体積含水率、 θ_s から θ_r を引いた値である有効飽和体積含水率、 θ_e と言い、浸透シミュレーションにおいて入力されるパラメータとなる。だから、本研究では θ_r を含む θ は意味をなさないとして、水分特性曲線の縦軸は $\theta - \theta_r$ として表示する。

図-3 の結果から、Method 1 は高い圧力水頭の範囲で関数化がうまくできず、測定値と LN モデルによる計算値が一致していなかった。これは、画像サイズに比べ孔隙が大きすぎたため抽出できなかったことを示している。大孔隙は 3.1 章で pF 試験から求めた体積孔隙率より Method 1 による体積孔隙率が多かったことを明らかにしたが、この結果を反映している。顕微鏡画像からは、Method 2 と 3 は LN モデルに精度よく一致することが分かった。

pF 試験による測定値の結果と比較すると、顕微鏡画像からの結果の方が、プロットが圧倒的に多いため圧力水頭の低い領域からの立ち上がりと上げ止まりのラインをより詳細に描いており、pF 試験よりも水分特性曲線を詳細に再現することができた。

パラメータの θ_e の値を比較した。Method 1 と 3 は画像から同じ面積を対象にデータを採取したためほぼ同じとなった。しかしながら、pF 試験で測定した θ_e とは 0.15 程度の差があった。水分特性曲線の変曲点である LN モデルのパラメータとなる ψ_m は Method 1 > 3 > 2 順に大きくなることを捉えている。顕微鏡画像から得た LN モデルのパラメータの値と pF 試験により得られた値は、本紙では明記していないが、違いは小さくなく、パラメータすべてを pF 試験の結果から得るのではなく、顕微鏡画像から得たパラメータも用いることで、精度よく関数化を行うことが可能であることが推測される。この方法による解析については本紙では紙面の関係から省略することとした。大会にて発表する予定である。

引用文献: Kosugi, K., 1997. A new model to analyze water retention characteristics of forest soils based on soil pore radius distribution. Japan Forest Research. 2:1-8.

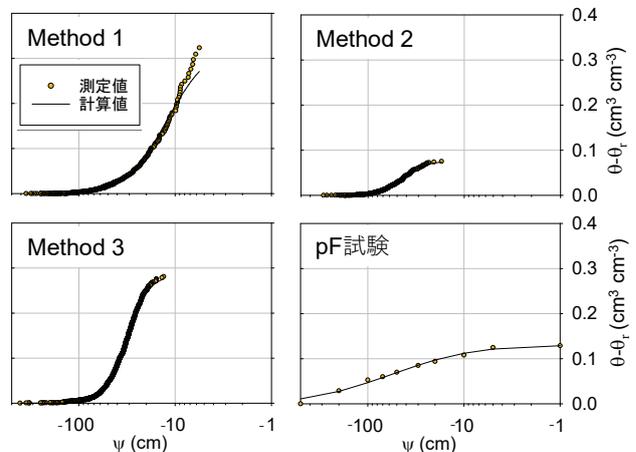


図-3 顕微鏡画像と pF 試験から得た水分特性曲線の LN モデルへのフィッティング状況, 深度 22.5-27.5 cm の場合