

改良テンシオメータ法による高次ヒステリシス特性

福井大学大学院 学生会員 ○寺崎 寛章
福井大学大学院 正会員 福原 輝幸

1. はじめに

水分特性曲線には、乾燥過程と湿潤過程で異なる経路を辿る土壌水分ヒステリシス(以下、ヒステリシス)が存在することは知られているものの、ヒステリシスに関する実験的研究は少なく、ヒステリシス特性が十分理解されているとは言い難い。

とりわけ、乾燥・湿潤の繰り返しに伴う高次ヒステリシス(複数の乾燥走査曲線(DSC)および湿潤走査曲線(WSC)で形成される渦巻状の水分特性曲線)を測定した研究例は少ない。換言すればその殆どが一次ヒステリシス(一つのDSCおよびWSCから形成される水分特性曲線)の測定に留まっている¹⁾。野外で起こる連続的な蒸発-浸透下の水分移動をより正確に解析するためには、高次ヒステリシスの特性を調べることが必須である。

前報²⁾では、改良テンシオメータ法を用いることで、乾燥および湿潤過程ともに Artificial Pumping Error (APE) は起きない、すなわち、ヒステリシスはループを描くことを明らかにした。

本研究では、改良テンシオメータ法を用いて得られた高次ヒステリシスの特性を報告する。

2. 実験概要

実験は恒温恒湿室内(温度:20℃, 湿度:35%)にて、塩化ビニル製リング(高さ:10mm, 内径:77mm)を、

直径 10mm の穴を空けたアクリル底板に接着させ、その穴にシア織物とゴム栓を取り付けた円筒容器(以下、リングと呼称)を作製した。リング側面からマイクロテンシオメータ(サンケイ理化製、ポラスカップの長さ 15mm, 外径 6mm)を挿入し、豊浦標準砂を乾燥密度 1600kg/m^3 で均一に充填した。その後、豊浦標準砂にリング底部から淡水を供給し、毛管飽和させた。これを初期状態とした。なお、以下の実験手順毎に最小読み 0.01g の重量計(Mettler Toledo 製)を用いて、リング全体の重量を測定し、体積含水率 θ を求めた。

次に、実験手順について述べる(図-1を参照)。

乾燥過程では、

- (1) リング上面を大気に開放し、目標体積含水率 $\tilde{\theta}$ になるまで自然蒸発させる。
- (2) $\tilde{\theta}$ に達した後、上面をラップして蒸発を防ぎ、マトリックポテンシャル ϕ が一定(水分平衡状態)になった時点の $\phi-\theta$ 関係を求める。

一方、湿潤過程では、

- (3) 霧吹きを用いて、 $\tilde{\theta}$ になるまでリング上面から淡水を散布する。
- (4) 上面をラップして、水分平衡状態になった時点の $\phi-\theta$ 関係を求める。
- (5) (1)~(4)を繰り返すことで、高次ヒステリシスを求めた。

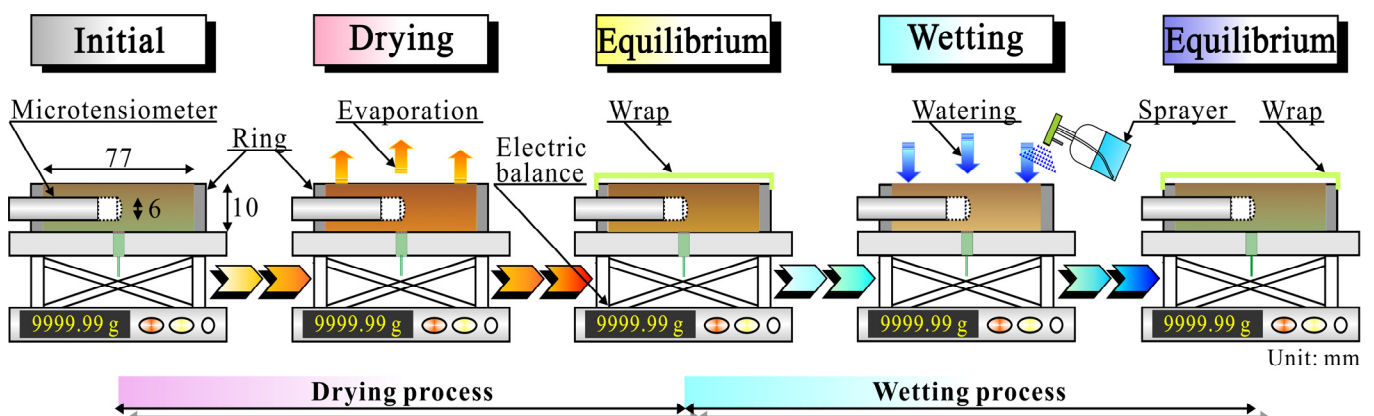


図-1 実験概要

キーワード：高次ヒステリシス，水分特性曲線，改良テンシオメータ法，APE，比水分容量

連絡先：〒910-8507 福井市文京 3-9-1 福井大学工学部建築建設工学科 環境熱・水理研究室 TEL 0776-27-8595

3. 実験結果

図-2 は、得られた高次ヒステリシスを示す。点 a からスタートした乾燥主曲線(MDC)は、点 b から1次湿潤走査曲線(1-WSC)へ、1-WSCは点 c から2次乾燥走査曲線(2-DSC)へ、2-DSCは点 d から3次湿潤走査曲線(3-WSC)へ、3-WSCは点 e から4次乾燥走査曲線(4-DSC)へ、4-DSCは点 f から5次湿潤走査曲線(5-WSC)へ、5-WSCは点 g から6次乾燥走査曲線(6-DSC)へ、それぞれ移行する。ここで注目すべきは6-DSCである。6-DSCは5-WSCの始点 f を通過することでAPEは起きないことが確認できた。さらに乾燥が続くと、6-DSCは点 f を通過後、3-WSCの始点 d を通過することは興味深い。今後のデータ蓄積により更なる検討を行う。

図-3は、van Genuchtenの式(図中の式(1))で計算された走査曲線と実測のそれを比較したものである。乾燥走査曲線は飽和体積含水率 θ_s の代わりに θ_s^* を、湿潤走査曲線は残留体積含水率 θ_r の代わりに θ_r^* を、それぞれ与え、それ以外のパラメータは実測値に合うように最小二乗法により決めた。結果、全ての走査曲線はvan Genuchtenの式で表わすことができた。

次に、水分移動解析で重要となる比水分容量 $C_s (=d\theta/d\phi)$ について考察を行なう。図-4はMDC、4-DSCおよび6-DSCの $C_s-\phi$ 関係を示す。高次DSCになるほど、 C_s の最大値 $C_{s\max}$ は低下することが知れる。ちなみに4-DSCおよび6-DSCの $C_{s\max}$ (1.3および1.1)は、MDCのそれ(2.2)の0.6および0.5倍となった。

4. おわりに

本研究により得られた結果を、以下に列挙する。

- (1) 高次ヒステリシスでもAPEは起こらない。
- (2) 本実験に関する限り、ヒステリシスの回数に関係なく、乾燥および湿潤走査曲線はvan Genuchtenの式で表わすことができた。
- (3) 本実験の範囲内において、4次および6次乾燥走査曲線の比水分容量の最大値は、乾燥主曲線のそれの0.6および0.5倍となる。

今後はデータの蓄積に努め、高次ヒステリシスのモデル化について更に検討する。

参考文献

- 1) Mualem, Y. and Dagan, G.: A dependent domain model of hysteresis, *Water Resources Research*, Vol. 11, No. 3, pp. 452-460, 1975.
- 2) 寺崎 寛章, 福原 輝幸, 藤田 剛志: 改良テンシオメータ法による土壌水分ヒステリシス特性, *水工学論文集*, Vol. 54, pp.214-219, 2009.

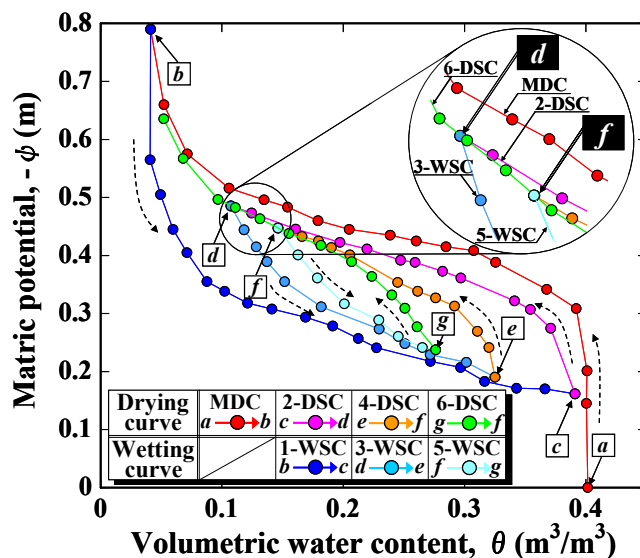


図-2 高次ヒステリシスの実験結果

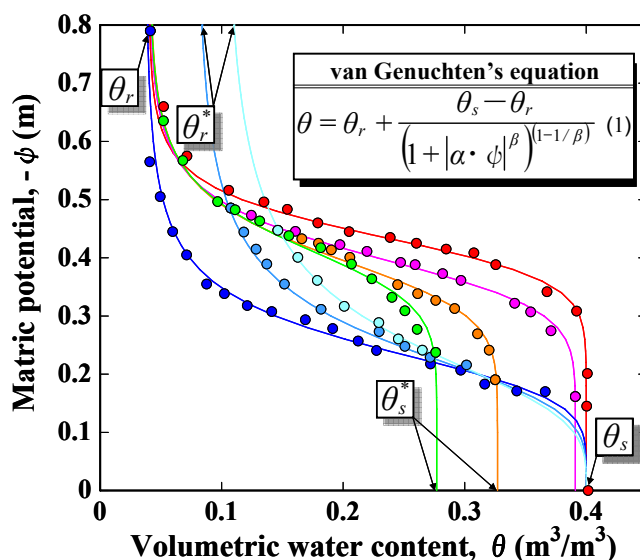


図-3 走査曲線の計算値と実測値の比較

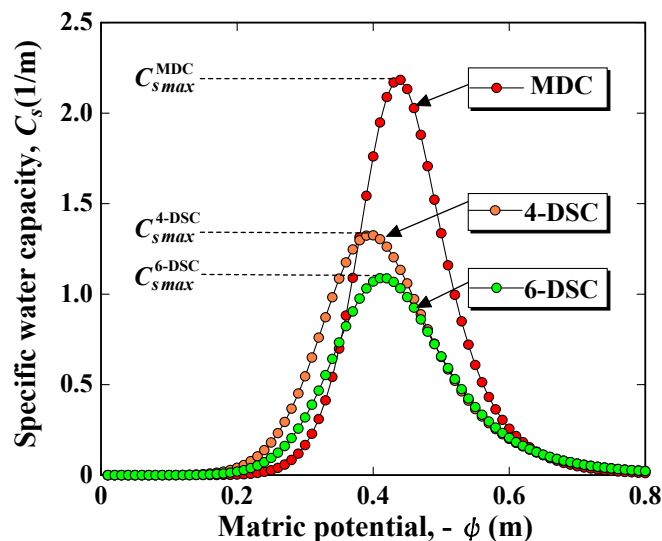


図-4 MDC, 4-DSC, 6-DSC の $C_s-\phi$ 関係