

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

PROPERTIES OF SOIL MOISTURE HYSTERESIS
BY A REFINED TENSIO METER METHOD

寺崎寛章¹・福原輝幸²・藤田剛志³

Hiroaki TERASAKI, Teruyuki FUKUHARA and Takashi FUJITA

¹学生会員 工修 福井大学大学院 工学研究科システム設計工学専攻 (〒910-8507 福井県福井市文京3丁目9番1号)

²正会員 工博 福井大学大学院教授 工学研究科 (〒910-8507 福井県福井市文京3丁目9番1号)

³学生会員 福井大学大学院 工学研究科建築建設工学専攻 (〒910-8507 福井県福井市文京3丁目9番1号)

The present paper describes a refined method, “Refined Tensiometer method” to evaluate the strongly non-linear hysteretic properties of soil moisture retention. The matric potential, ϕ , for the volumetric water content, θ , of the wet soil packed in a thin ring with a height of 10mm was measured by means of a microtensiometer. Continuous scanning curves with a high order of Toyoura standard sand and Chao soil were obtained by the refined tensiometer method.

The refined tensiometer method found the following three properties; (i) Artificial Pumping Error (APE) never appears at the reversal points on both main drying curve and wetting scanning curve. (ii) A drying scanning curve is returned to the main drying curve when drying process keeps progressing. (iii) A hysteretic soil moisture characteristic curve, which connects two reversal points, yields a unique closed-loop.

Key Words : *Refined tensiometer method, Hysteresis, Soil moisture characteristic curve, Scanning curve, Drying and wetting processes, Artificial Pumping Error*

1. はじめに

不飽和土壌中の水分移動に関する研究は、実験および解析の両面から長年に亘り行われているものの、依然として不明な点が多い。水分移動を正確に評価するためには、土壌の保水性を規定する水分特性曲線の精度が重要となるのは周知の通りである。特に、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)は、乾燥・湿潤の繰り返しを伴う、あるいは地下水面が変動するような状況下の水分移動解析を複雑にさせる。

今までにヒステリシスを表現するモデル^{1),2)}は多数提案され、モデルの比較^{3),4)}が行われてきたが、未だ確立されたとは言いがたい。その原因の一つに、水分特性曲線に関する実験的研究が、必ずしも十分な成果を上げていないことが挙げられる。実際に高次の乾燥および湿潤走査曲線を測定した研究は、筆者の知る限り数少ない⁵⁾。

ヒステリシスモデル構築のための研究は、その原点である乾燥および湿潤過程の水分特性曲線の精度良い測定

に基づいて、正しいヒステリシス特性を理解することが必要不可欠となる。特に、Artificial Pumping Error (APE)⁶⁾(走査曲線ループの始点と終点が一致しない現象)は、ヒステリシスのモデリングの際に議論的となっている。走査曲線ループに関する数少ない実験に注目すると、Poulovassilis and Childs⁷⁾およびMualem⁸⁾は言及していないものの、APEは起こらない結果を示した。その一方、Huang et al.⁹⁾はAPEが起きないと言いつつも、実験精度はそれを容認するまでに至っていない。APEの有無については、信頼性の高い実験的裏付けが更に必要である。

従来、水分特性曲線を求める方法としては表-1に示すように、マトリックポテンシャル ϕ の測定範囲に応じて土柱法、吸引法¹⁰⁾、加圧板法¹¹⁾およびサイクロメータ法¹²⁾などがある。さらに近年では、ADRセンサーを用いた水分分布近似法¹³⁾(瞬時水分計測法¹⁴⁾)、マルチステップ法¹⁵⁾や蒸発法¹⁶⁾などと逆解析により、水分特性曲線が求められているものの、主に乾燥主曲線の測定に留まっている。

そこで筆者らは、連続した乾燥および湿潤走査曲線を求めることを目的としてテンシオメータ法¹⁷⁾に着目し、

表-1 水分特性曲線の測定方法 (◎: 適当, ○: 可能, △: 不適)

名称	ϕ の測定範囲 (m)	測定時間	測定コスト	測定方法(簡便さ)	水分特性曲線	
					乾燥過程	湿潤過程
土柱法	0~1.5	△	◎	△	有	有
吸引法 ¹⁰⁾	0~2	△	○	◎	有	有
瞬時水分計測法 ¹⁴⁾	0~10	◎	△	△	有	無
マルスステップ法 ¹⁵⁾	0~10	◎	△	○	有	無
テンシオメータ法 ¹⁸⁾	0~10	△	◎	◎	有	無
加圧板法 ¹¹⁾	-10~-10 ²	○	△	○	有	有
サイクロメータ法 ¹²⁾	-10~-10 ⁴	◎	△	○	有	無

表-2 チャオソイルおよび豊浦標準砂の土壌物性値

	飽和透水係数 k_{sat} (m/s)	平均粒径 D_{50} (mm)	間隙率 ε	土壌分類
チャオソイル	9.42×10^{-5}	0.017	0.40	シルト質粘土ローム
豊浦標準砂	2.04×10^{-2}	0.183	0.40	砂質土

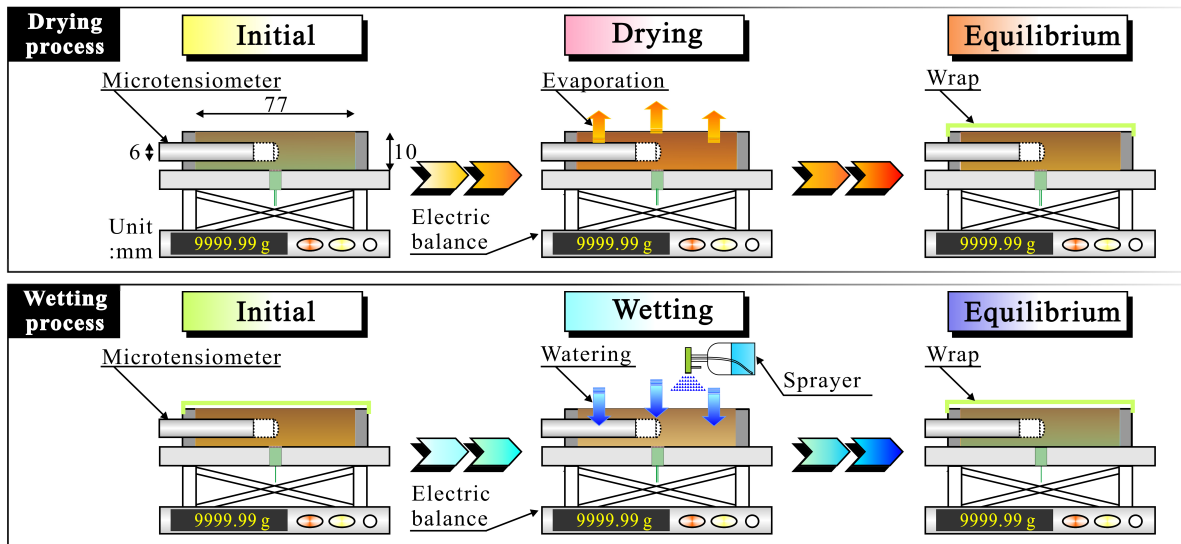


図-1 乾燥および湿潤過程における改良テンシオメータ法の実験概要

旧テンシオメータ法¹⁸⁾を基に、比較的簡単(低コスト)かつ短時間に水分特性曲線を求める改良テンシオメータ法を提案した¹⁹⁾。

本研究では、ヒステリシスモデル構築の前段として、改良テンシオメータ法を用いて、チャオソイル(中国の代表的な塩害土壌の一つであるシルト土壌)および豊浦標準砂の乾燥および湿潤過程のヒステリシス特性を明らかにすることを目的とする。

2. 実験概要

実験は、塩化ビニル製リング(厚さ:10mm, 内径:77mm), マイクロテンシオメータ(サンケイ理化製, ポーラスカップの直径6mm, 長さ15mm), チャオソイル

および豊浦標準砂を用いて、恒温恒湿室内(温度:20℃, 湿度:35%)で実施された。試験土壌の代表的な物性値は、表-2に示す通りである。

実験では、塩化ビニル製リングを、内径10mmの穴を空けたアクリル底板に接着させ、その穴にシア織物およびゴム栓を取り付けた円筒容器(以下、リングと呼称)を2つ作成した。リング側面からマイクロテンシオメータを挿入した後、乾燥密度1550kg/m³でチャオソイルを、乾燥密度1600kg/m³で豊浦標準砂を、それぞれ均一に充填した。その後、リング底部から淡水を供給し、試験土壌全域を毛管飽和させ、これを初期状態とした。体積含水率 θ は、リング全体の重量を最小読み0.01gの重量計(Mettler Toledo製)を用いて測定し、計算された。

乾燥および湿潤過程の水分特性曲線は、以下の手順で求めた(図-1を参照)。

表-3 改良テンシオメータ法および旧テンシオメータ法の比較

名称	改良テンシオメータ法	旧テンシオメータ法
リング厚	10mm	30mm
測定状態	乾燥および湿潤過程	乾燥過程のみ
蒸発方法	上面蒸発	下面蒸発
測定値	定常 ($\phi - \theta$: 平衡状態)	非定常 ($\phi - \theta$: 非平衡状態)
測定時間	短い(1/2程度)	長い
水分の一様性	高い	低い

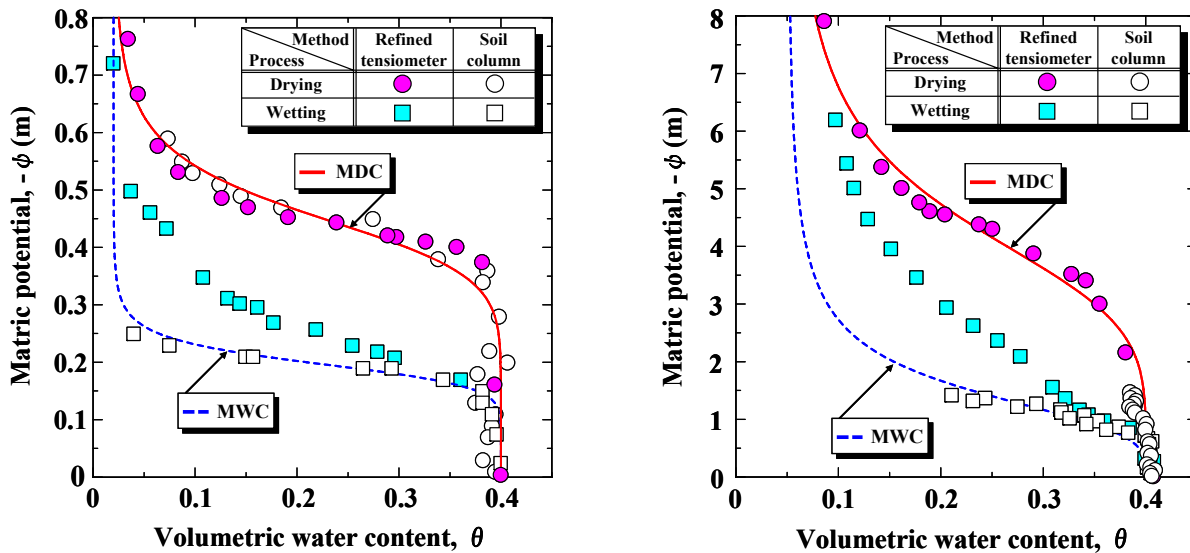


図-2 改良テンシオメータ法および土柱法の水分特性曲線の比較(左:豊浦標準砂, 右:チャオソイル)

乾燥過程では,

- 1) リング上面(土壤表面)を大気に開放し, 目標体積含水率(目標リング重量)になるまで自然蒸発させる.
- 2) 目標体積含水率に達した後, 上面をラップして蒸発を防ぎ, ϕ が一定(水分平衡状態)になった時点の値を求める.
- 3) 同時に, リング重量を再度測定し, 2)の ϕ に対応する θ を決定する.
- 4) 1)~3)の手順を繰り返すことで, 乾燥過程の水分特性曲線が求まる.

一方, 湿潤過程では,

- 1) リング上面から, 霧吹きを用いて散水することにより, 土壤を湿潤させる.
- 2) 目標体積含水率に達した後, 乾燥過程 2)~3)と同様の手順に従って, ϕ および θ をそれぞれ求める.
- 3) 湿潤過程 1)~2)の手順を繰り返すことで, 湿潤過程の水分特性曲線が求まる.

なお, 湿潤過程の途中で乾燥過程1)~3)の手順を, 乾燥過程の途中で湿潤過程1)~2)の手順を, それぞれ行うことで, 任意の乾燥および湿潤走査曲線を求めた.

3. 改良テンシオメータ法の特徴

旧テンシオメータ法と比較した場合における改良テンシオメータ法の主な特徴は, 以下のとおりである(表-3を参照).

- (1) リング厚を旧テンシオメータ法の 30mm から 10mm に薄くすることで, ϕ を規定するテンシオメータ周辺土壤の θ と, 水分特性曲線を描くために必要な θ , すなわちリング全体に対する θ の差が小さくなる(リング内水分が一様になりやすい).
- (2) (1)の改良により, 水分平衡状態に達する時間が旧テンシオメータ法の約 1/2 に短縮できた¹⁹⁾.
- (3) リングからの蒸発を下面から上面に変えることで, 旧テンシオメータ法では困難であった湿潤過程の水分特性曲線の測定が可能となった.
- (4) (3)の改良により, 蒸発および散水の繰り返しによる複雑な乾燥および湿潤走査曲線の連続測定が可能となった.

4. 実験結果および考察

(1) 乾燥主曲線および湿潤主曲線

図-2は, 改良テンシオメータ法および土柱法による乾

表-4 Van Genuchtenの式の各パラメーター

名称 パラメーター	乾燥主曲線(MDC)		湿潤主曲線(MWC)	
	豊浦標準砂	チャオソイル	豊浦標準砂	チャオソイル
θ_s	0.4	0.4	0.4	0.4
θ_r	0.02	0.05	0.02	0.05
α (1/m)	2.21	0.24	5.08	0.74
β	8.45	4.81	9.62	3.68

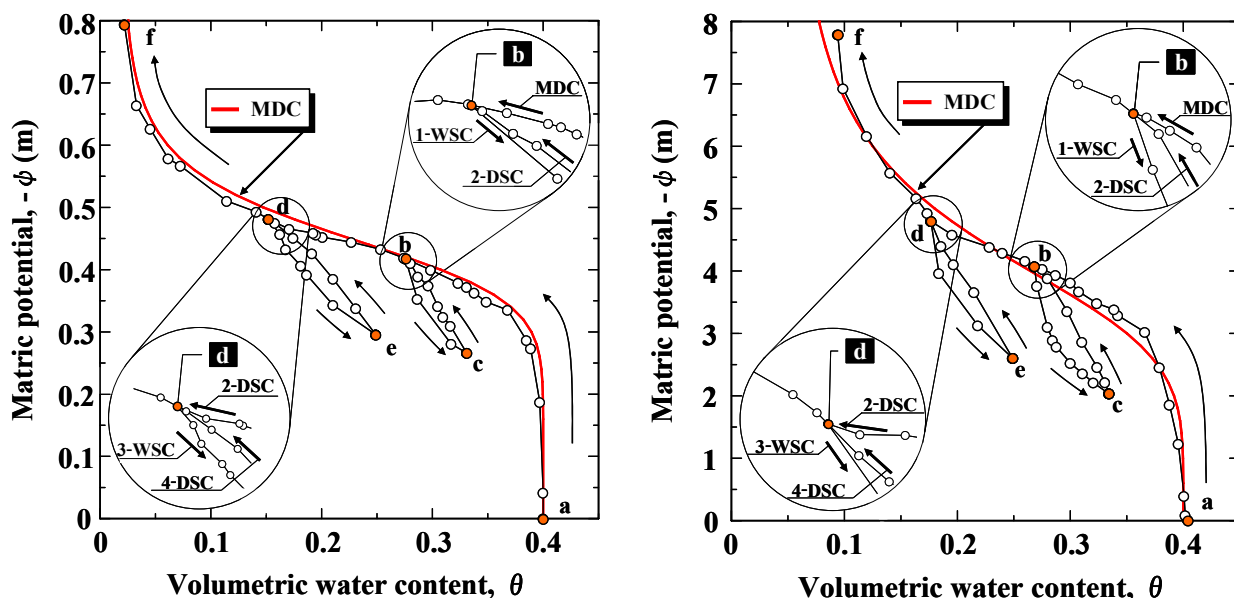


図-3 MDCに沿って繰り返される乾燥-湿潤のヒステリシスループ(左:豊浦標準砂, 右:チャオソイル)

乾燥および湿潤過程の水分特性曲線の比較を示す。チャオソイルの限界毛管水頭は約3mであり、豊浦標準砂のそれの約10倍となった。また、両方法による乾燥主曲線(Main Drying Curve, MDC)の測定結果は、高含水域から低含水域に亘り良好に一致した。またチャオソイルに関しても、両方法のMDCは概ね一致した。

一方、チャオソイルおよび豊浦標準砂の湿潤過程の水分特性曲線は、改良テンシオメータ法および土柱法で大きく異なる。この理由は、土柱法が気乾状態からの測定に対して、改良テンシオメータ法は土柱法よりも湿潤した状態からの測定となったためである。よって土柱法の結果は、湿潤主曲線(Main Wetting Curve, MWC)と言えるが、改良テンシオメータ法の結果は、実際には一次湿潤走査曲線(1st Wetting Scanning Curve, 1-WSC)であったと推察される。MWCの測定については、今後、検討を行う。

実験より得られたMDCおよびMWCは、Van Genuchten²⁰⁾の式を用いて表すことができる。すなわち、

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + |\alpha \cdot \phi|^\beta\right)^\gamma} \quad (1)$$

ここに、 θ_s : 飽和体積含水率(間隙率)、 θ_r : 残留体積含水率、 α : パラメーター(1/m)、 β : パラメーター、および γ : パラメーター($=1-1/\beta$)である。

図-2の実線は式(1)で計算されたMDCを、破線はMWCを、それぞれ表わす。表-4は計算に用いた各パラメーターの値を、MDCおよびMWC毎に示す。チャオソイルのMDCの α および β は、豊浦標準砂のそれの0.11倍および0.57倍となった。一方、MWCに関して、チャオソイルの α および β は、豊浦標準砂のそれの0.15倍および0.38倍となった。

(2) 土壌水分ヒステリシス特性

図-3は、MDCに沿って繰り返される乾燥-湿潤のヒステリシスループを示す。測定経路は図中の点a→b→c→b→d→e→d→fの順に従う。図-3より、点aからスタートしたMDC(a→b)は点bから1-WSC(b→c)へ、1-WSCは点cから2次乾燥走査曲線(2nd Drying Scanning Curve, 2-DSC, c→b)へ、それぞれ移行する。2-DSCは1-WSCの始点bを通過し、MDCに沿って点dへ向かう。その後、2-DSCは点dから3次湿潤走査曲線(3rd Wetting Scanning Curve, 3-WSC, d→e)へ、さらに3-WSCは点eから4次乾

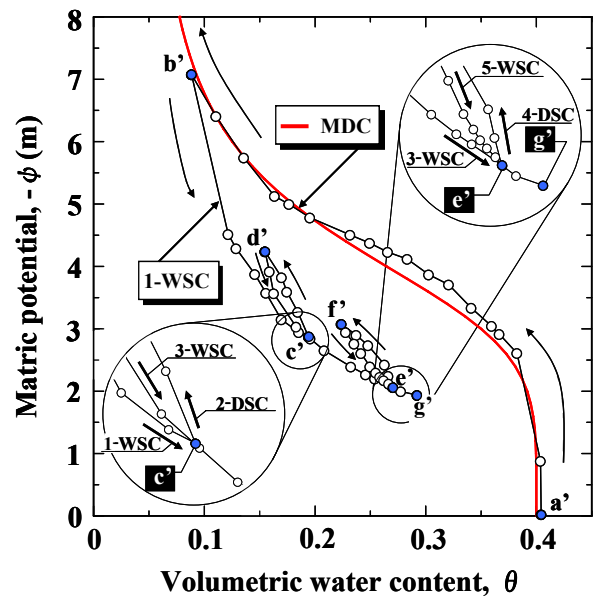
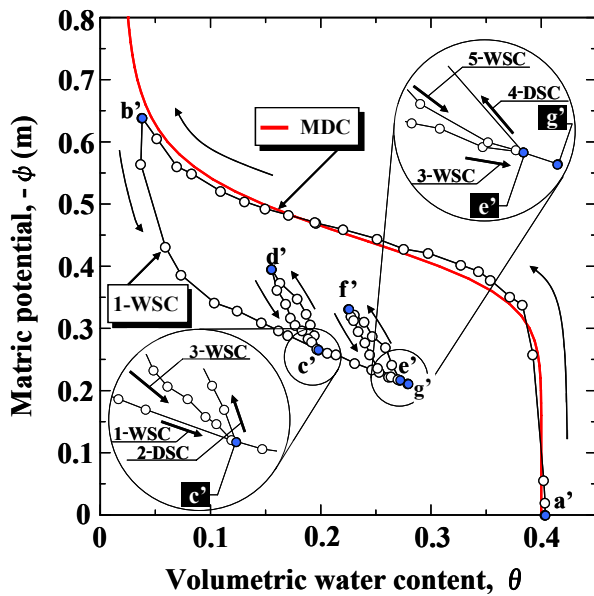


図-4 1-WSCに沿って繰り返される乾燥-湿潤のヒステリシスループ(左:豊浦標準砂, 右:チャオソイル)

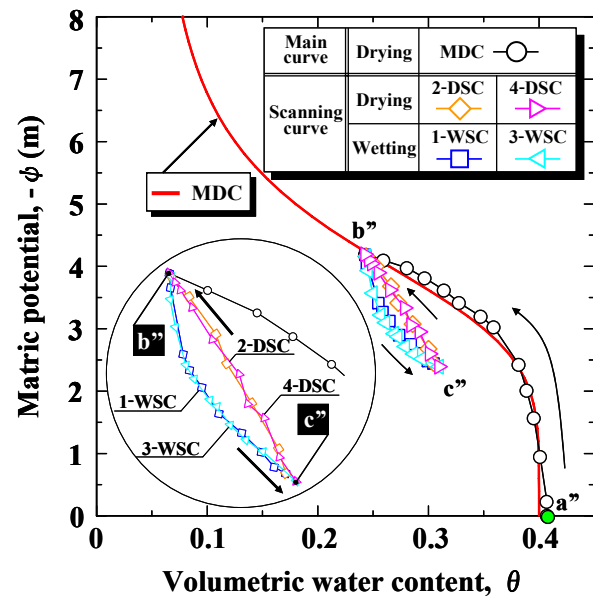
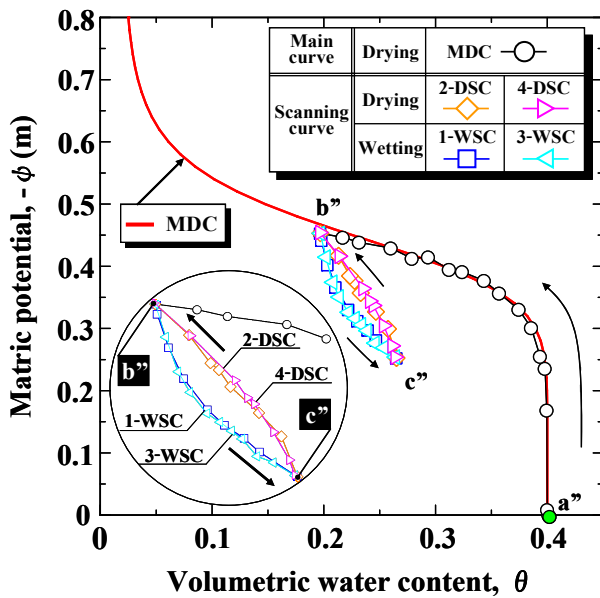


図-5 2点間(b''-c'')で繰り返される乾燥-湿潤サイクルのヒステリシスループ(左:豊浦標準砂, 右:チャオソイル)

乾燥走査曲線(4th Drying Scanning Curve, 4-DSC, e→d)へ、それぞれ移行する。4-DSCは3-WSCの始点dを通過した後、MDCに沿って点fに向かう。

図-4は、1-WSCに沿って繰り返される乾燥-湿潤のヒステリシスループを示す。測定経路は図中の点a'→b'→c'→d'→c'→e'→f'→e'→g'の順に従う。図-4より、点a'からスタートしたMDC(a'→b')は点b'から1-WSC(b'→c')へ、1-WSCは点c'から2-DSC(c'→d')へ、さらに2-DSCは点d'から3-WSC(d'→e')へ、それぞれ移行する。3-WSCは2-DSCの始点c'を通過した後、点b'-点c'の延長上の湿潤走査曲線を辿る。その後、点e'から4-DSC(e'→f')へ、点f'から5次湿潤走査曲線(5th Wetting Scanning Curve, 5-WSC, f'→e')へ、それぞれ移行する。5-WSCは4-DSC

の始点e'を通過し、1-WSC上の点g'へ向かう。

以上、本実験の走査曲線データは、APEが起こらないことを明確にした。

図-5は、2点間(b''-c'')で繰り返される乾燥-湿潤サイクルのヒステリシスループを示す。点a''からスタートしたMDC(a''→b'')は点b''から1-WSC(b''→c'')へ、1-WSCは点c''から2-DSC(c''→b'')へ、それぞれ移行する。さらに、2-DSCは点b''から3-WSC(b''→c'')へ、3-WSCは点c''から4-DSC(c''→b'')へ、それぞれ移行する。1-WSCは3-WSCと、2-DSCは4-DSCと、それぞれ同じ経路を辿る。

これより、2つの異なる(φ, θ)間で起こる走査曲線ループは一意的であることが分かった。

5. まとめ

本研究ではテンシオメータを挿入するリング厚を従来の1/3に薄くするとともに、新たにリング上面からの散水を取り入れた“改良テンシオメータ法”を提案し、チャオソイルおよび豊浦標準砂の土壌水分ヒステリシスに関する基本的性質を明らかにした。

本研究で得られた結論を、以下に列挙する。

- (1) 改良テンシオメータ法による乾燥主曲線の測定精度は、土柱法のそれと同じである。
- (2) 散水による改良テンシオメータ法の湿潤走査曲線の測定は有効であるものの、現段階で湿潤主曲線の測定は困難である。
- (3) 改良テンシオメータ法を用いることにより、複雑な乾燥-湿潤の走査曲線ループの連続測定が可能になった。
- (4) (3)の結果として、乾燥および湿潤過程ともにArtificial Pumping Errorは生じないことが明確になった。
- (5) 乾燥が進行し続ける時、 $\phi - \theta$ 関係は乾燥走査曲線を経た後、乾燥主曲線に移行する。
- (6) 2つの異なる(ϕ, θ)間で起こる走査曲線ループは一意的である。

今後は、上述の土壌水分ヒステリシス特性を考慮した任意の走査曲線を表現するモデルを構築するとともに、そのモデルの妥当性および精度を検証する。

参考文献

- 1) Mualem, Y. : A conceptual model of hysteresis, *Water Resources Research*, Vol. 10, No. 3, pp. 514-520, 1974.
- 2) Kool, J. B. and Parker, J. C. : Development and evaluation of closed-form expressions for hysteretic soil hydraulic properties, *Water Resources Research*, Vol. 23, No. 1, pp. 105-114, 1987.
- 3) Jaynes, D. B. : Soil water hysteresis: models and implications, *Process Studies in Hillslope Hydrology*, pp. 93-126, 1990.
- 4) Viaene, P., Vereecken, H., Diels, J., and Feyen, J., : A statistical analysis of six hysteresis models for the moisture retention characteristic, *Soil Science*, Vol. 157, No. 6, 1994.
- 5) Vachaud, G. J. and Thony, J. L. : Hysteresis during infiltration and redistribution in a soil column at different initial water contents, *Water Resources Research*, Vol. 7, No. 1, pp. 111-127, 1971.
- 6) Adrian, D. W. and David, A. L. : Artificial pumping errors in the Kool-Parker scaling model of soil moisture hysteresis, *Journal of Hydrology*, Vol. 325, pp. 118-133, 2006.
- 7) Poulouvalis, A. and Childs, E. C. : The hysteresis of pore water: The non-independence of domains, *Soil Science*, Vol. 112, No. 5, pp. 301-312, 1971.
- 8) Mualem, Y. : A modified dependent-domain theory of hysteresis, *Soil Science*, Vol. 137, No. 5, pp. 283-291, 1984.
- 9) Huang, H. C., Tan, Y. C., Liu, C. W. and Chen, C. H. : A novel hysteresis model in unsaturated soil, *Hydrological Processes*, Vol. 19, pp. 1653-1665, 2005.
- 10) 宇野尚雄, 神谷浩二, 田中宏路 : 「空気圧入法」と「水分法」による砂の間隙径分布, 土木学会論文集, No. 603/III-44, pp. 35-44, 1998.
- 11) 胸組智光, 小峯秀雄, 安原一哉, 村上哲 : 吸水および排水過程での保水性試験に基づく各地域における河川堤防堤体材料の脆弱性の比較, 土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集, III-170, pp. 339-340, 2009.
- 12) 塩沢昌 : サイクロメータによる土壌水のポテンシャル測定, No. 62, pp. 53-61, 1991.
- 13) 杉井俊夫, 山田公夫, 植村真美, 奥村恭 : 水分分布近似法による砂質土の不飽和透水特性の評価, 土木学会論文集, No. 792/III-71, pp. 131-142, 2005.
- 14) 河野伊一郎, 西垣誠 : 不飽和砂質土の浸透特性に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, No. 307, pp. 59-69, 1981.
- 15) 石田哲朗 : 不飽和土の浸透・透水試験法に関する考察, 地下水技術, Vol. 44, No. 7, pp. 18-32, 2002.
- 16) 坂井勝, 取手伸夫 : 蒸発法における不飽和水分移動特性推定の最適条件の検討, 土壌の物理性, No. 106, pp. 33-46, 2007.
- 17) 井上光弘, 野村安治 : 砂丘砂の水分恒数と乾燥過程における土壌水分特性曲線の決定, 砂丘研究, Vol. 30, No. 1, pp. 15-25, 1983.
- 18) 藤巻晴行, 井上光弘, 山本太平, 富樫敬 : 定常蒸発下の水分分布による低圧力水頭領域の不飽和透水係数の測定, 農業土木学会論文集, No. 201, pp. 1-12, 1999.
- 19) 寺崎寛章, 藤田剛志, 福原輝幸 : 新テンシオメータ法による水分特性曲線の測定, 土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集, III-328, pp. 655-656, 2009.
- 20) Van Genuchten, M. Th. : A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 44, pp. 892-898, 1980.

(2009. 9. 30受付)