

プリント基板プローブを用いたTDRと画像解析による不飽和-不均一場における水分動態解析

WATER INFILTRATION INVESTIGATIONS IN UNSATURATED-HETEROGENEOUS FIELD BY TDR METHOD USING PRINTED CIRCUIT BOARD PROBE AND BY IMAGE ANALYSIS

中川 啓¹・関岡洋志²・前川陽介²・勅井和朗³・北村良介⁴

Kei NAKAGAWA, Yoji SEKIOKA, Yosuke MAEKAWA, Kazuro MOMII and Ryosuke KITAMURA

¹正会員 博(工) 鹿児島大学助教授 農学部生物環境学科 (〒890-0065 鹿児島市郡元1-21-24)

²鹿児島大学大学院 農学研究科生物環境学専攻 (〒890-0065 鹿児島市郡元1-21-24)

³正会員 農博 鹿児島大学教授 農学部生物環境学科 (〒890-0065 鹿児島市郡元1-21-24)

⁴正会員 工博 鹿児島大学教授 工学部海洋土木工学科 (〒890-0065 鹿児島市郡元1-21-40)

Hydrogeological parameters of field soil porous media are distributed with large heterogeneity. Evaluation of physical heterogeneity effects on soil water flow is important to understand basic flow characteristics of field soil. In this study, two types of water infiltration experiments were applied to examine water flow under the heterogeneous distribution of hydraulic conductivities. Time series of soil water change was measured by time domain reflectometry (TDR). In the TDR system, the small printed circuit board probes (PCBP) were used as wage guide. To evaluate soil water distribution change in the experimental sand box, the simple image analysis of digital photo of the experiments was proposed and tested. According to the TDR measurement, probes show clear response for ponding timing in the stepwise ponding experiment. Once soils were filled with water, they kept water in the continuous infiltration experiment using rain generator. The order of breakthrough match sequential photo of the continuous infiltration experiment. Preferential flow was clearly observed in the both experiments.

Key Words: infiltration, unsaturated-heterogeneous field, TDR method, image analysis

1. はじめに

一般に、現場の土壌や地層における水文地質学的特性は、大きな不均一性を持つことが知られている。この水文地質学的特性の不均一性は、透水係数のような物理的性質の不均一性として、媒体を流れる水とそれに伴う物質輸送へ影響を及ぼすと考えられる。これまでに多くの研究者が、透水係数などの物理的不均一性を含む土壌や地層中の地下水流れを、理論的、実験的、また数値計算により研究を行っている¹⁾⁻³⁾。Wildenschild and Jensenは、2次元の透水係数の不均一場における流れについて、実験および数値計算により検討し、不均一場をそれと等価な均一場に置き換えたときの透水係数や不飽和パラメータについて検討した^{4), 5)}。著者らは不飽和-不均一多孔媒体における物質輸送特性を調べるため、室内実験と数値計算を行い比較したが、両者はあまり一致せずより精度の高い室内実験の実施が求められた⁶⁾。したがって、局所的な土壌水分の変動や全体的な土壌水分の変化に関する実験データはあまり公開されてお

らず、透水係数が水の浸透過程に及ぼす影響を詳細に検討するには未だ十分でないと考えられる。

本研究では、飽和透水係数が不均一に分布する場を想定し、地表面からの水の浸透挙動を調べるための室内実験を実施した。8つの測定点では、プリント基板製の小型プローブを用いたTDR測定により、土壌水分量の時間変化を測定した。また非破壊で簡便な室内実験における土壌水分量の推定方法として、デジタルカメラにより撮影された写真から水分量を推定する方法を検討した。

2. 実験の概要

図-1に実験装置の概略を示す。採取してきた試料(農場廃土および砂)を炉乾燥させ、5種類の粒径範囲(a:0.1~0.2, b:0.2~0.4, c:0.4~0.6, d:0.6~0.8, e:0.8~1.2 mm)に篩い分け、それぞれ10%の含水比に調整した。室内試験により求めた、各粒径範囲の飽和透水係数を表-1に示す。

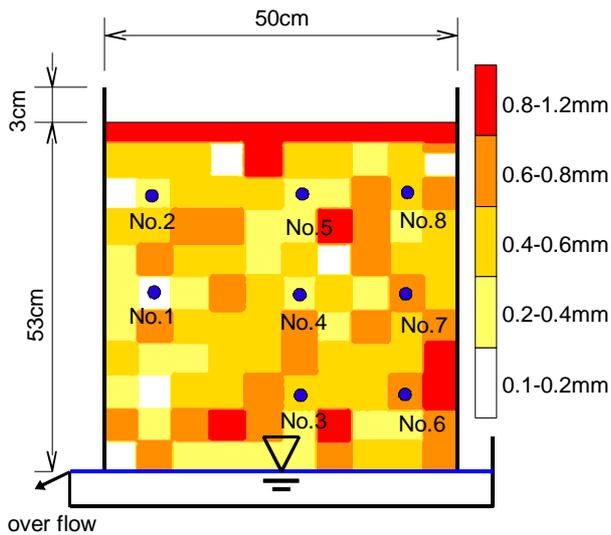


図-1 実験装置の概略

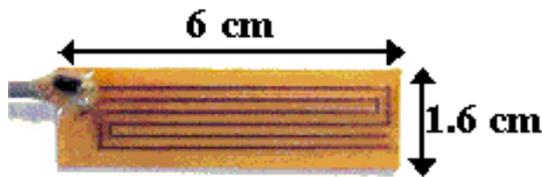


図-2 プリント基板製TDRプローブ (PCBP)

試料a~cは農場廃土で、乾燥密度 0.9 g cm^{-3} (後の実験A)または 1.1 g cm^{-3} (後の実験B)に、試料d, eは砂で、乾燥密度 1.3 g cm^{-3} となるように締め固め、浸透層の所定の位置へ、 $5 \times 5 \times 10 \text{ cm}$ のブロック毎に均一に充填した。なお試料充填の際の乾燥密度が異なるのは、後の実験Aで多少試料の移動が起こったため、実験Bでは若干固めに締め固めたからである。浸透層内の不均一場は、PMWIN⁷⁾のRandom Field Generatorを用い、自然対数変換した飽和透水係数分布の平均値を-1.05、標準偏差を0.45、相関距離/浸透場スケールを0.1として発生し、5クラスの透水係数の範囲に分類し作成した。図-2に示すプリント基板製のTDRプローブ (PCBP)を^{6), 8)}、図-1に示す浸透層内の8点に挿入した。TDRのケーブルテストは、TDR100 (キャンベル)を用い、マルチプレクサを介しPCBPと接続した。浸透層下端には水位を固定した水面を設けた。

浸透実験は、段階的湛水と降雨発生装置により着色した水道水を浸透させた (それぞれ実験AおよびBとする)。実験Aでは、まず浸透層上部から食用色素 (赤色102号, キリヤ化学)により着色した水道水の 3000 cm^3 を段階的に湛水し、浸透させた。すなわち、前回に湛水させ、浸透した浸潤前線がほぼ停止した後、次の湛水を行うことを繰り返した。実験Bでは、実験Aと同様に食用色素で着色した水道水を、マイクロチューブポンプにより浸透層上部より降雨状に連続的に散水し、浸透させた。このときの降雨強度

表-1 各粒径範囲の透水係数

Particle size /mm	Hydraulic Conductivity / cm s^{-1}	
	experiment	A B
0.1-0.2	2.3×10^{-3}	1.1×10^{-3}
0.2-0.4	5.0×10^{-3}	2.3×10^{-3}
0.4-0.6	8.3×10^{-3}	3.2×10^{-3}
0.6-0.8	5.6×10^{-2}	5.6×10^{-2}
0.8-1.2	8.3×10^{-2}	8.3×10^{-2}

は、 $1.49 \times 10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$ である。両方の実験における浸透の様子は、所定の時間毎にデジタルカメラで撮影した。またPCBPを挿入した8点では、土壌水分 (体積含水率)を算定する為の波形を系時的に測定した。いずれの実験においても、上部より浸透させる水が概ね浸透層下部まで浸透したことを確認の後、実験終了とした。

3. PCBPを用いたTDRによる土壌水分の変化

PCBPを用いたTDRによる土壌水分の算定は、次のようにした。まず、波形そのものを256点の離散データとしてデータロガーに一時的に保存し、20分毎に接続したパソコンのハードディスクへ転送して保存した。実験終了後、記録された波形はそれぞれWinTDR⁹⁾により解析を手動で行い、見かけの誘電率を作成し、あらかじめ求めておいた試料およびPCBP毎の校正曲線により体積含水率へ変換した¹⁰⁾。

それぞれのPCBPとそれを挿入した地点の試料毎の校正曲線をプロットしたものを図-3に示す。校正式は、TDRで測定された見かけの誘電率と体積含水率の関係式として次式のように求めた。a~dはこの関係式のパラメータであり、それぞれのPCBPに対する値は表-2に整理している。

$$\theta = a + b\varepsilon + c\varepsilon^2 + d\varepsilon^3 \quad (1)$$

図中には、Topp *et al.*の式¹¹⁾も示している。Topp *et al.*のパラメータは、 $a = -5.3 \times 10^{-2}$, $b = 2.92 \times 10^{-2}$, $c = -5.5 \times 10^{-4}$, $d = 4.3 \times 10^{-6}$ である。

4. 画像解析による土壌水分分布の解析

浸透実験の際にデジタルカメラで撮影した写真から、非破壊で体積含水率の分布を簡便に推定するため、次のような方法を検討した。すなわち画像処理ソフトにより撮影された写真のG値から体積含水率を推定する方法を検討した。ここでもPCBPを用いたTDR法と同様に、あらかじめ校正曲線を求めておくことが必要である。含水比を、15, 20, 25, 30, 40%に調整した各粒径範囲の試料を、実験と同様の条件で撮影されたデジタルカメラ写真から中心部を代表部分としてG値を抽出し、校正曲線により体積含水率へ変換する。事前の検討結果よりRGB値のうちG値が含水比との相関が最も明瞭であったため、ここ

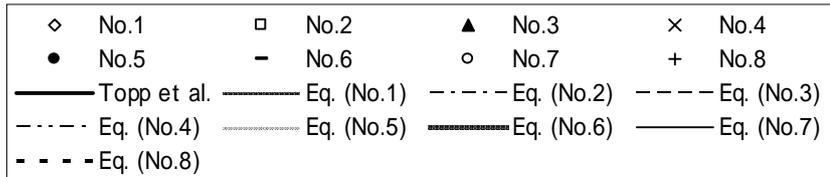
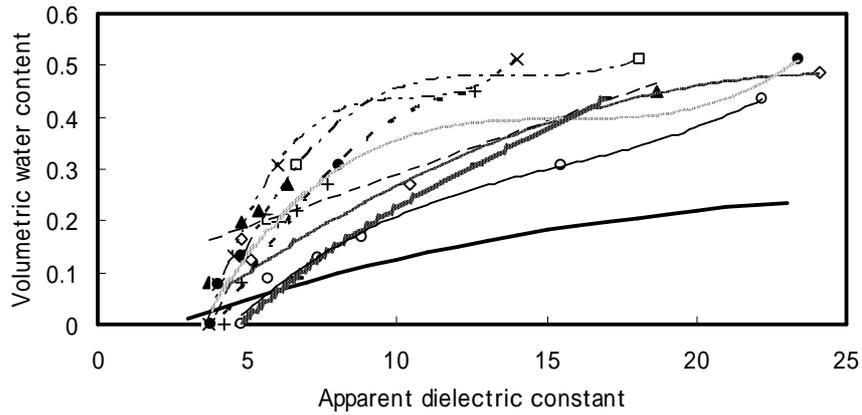


図-3 PCBPによる見かけの誘電率と体積含水率の関係 (校正曲線)

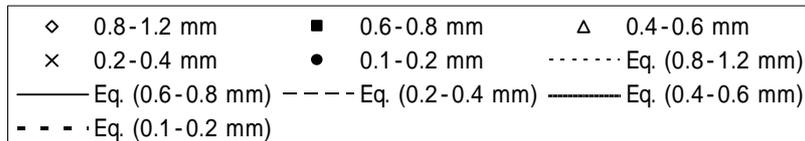
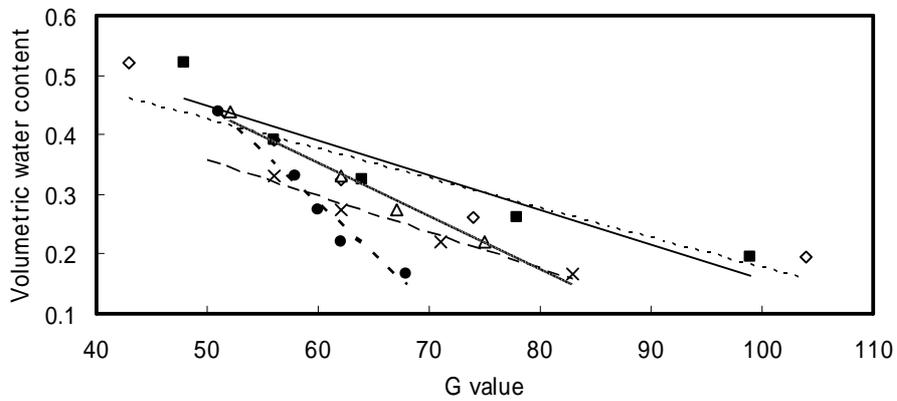


図-4 G値と体積含水率の関係 (校正曲線, 実験A)

表-2 TDR測定 of 校正曲線のパラメータ

Probe No.	a	b	c	d
1	-0.1184	0.0484	-0.001	0
2	-0.803	0.2783	-0.0201	0.0005
3	-0.0864	0.0203	0	0
4	-1.1463	0.4515	-0.0432	0.0014
5	-0.4472	0.1625	-0.0104	0.0002
6	0.3481	0.0907	0.0044	0.0001
7	-0.3334	0.0955	-0.0053	0.0001
8	-0.5029	0.1463	-0.0056	0

表-3 画像解析 of 校正曲線のパラメータ

Particle size /mm	e	f
0.1-0.2	-1.5314	117.58
0.2-0.4	-0.7086	71.631
0.4-0.6	-0.801	80.307
0.6-0.8	-0.4486	56.956
0.8-1.2	-0.3856	52.145

ではG値を用いて次式のような校正曲線を作成した。

$$\theta = 0.01\rho_d w = 0.01\rho_d (eG + f) \quad (2)$$

ここで ρ_d は乾燥密度, w は含水比 (%), e, f は校正曲線のパラメータで, 各粒径範囲の試料毎に決定する。 e, f の値は表-2に示す。実験写真のブロック毎に平均

のG値を抽出し, 上式により浸透層全体のブロック単位での体積含水率分布を求める。図-4に各試料の実験Aの時の校正曲線を示す。なお推定された体積含水率の値が負になるときは, 残留体積含水率となるようにした。

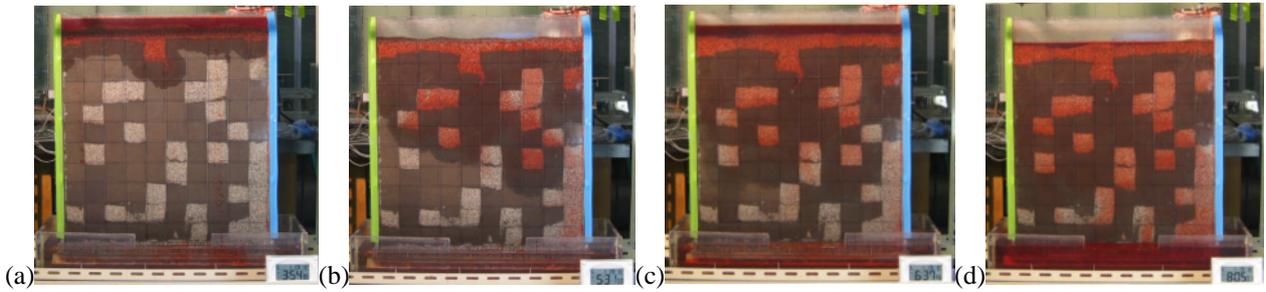


図-5 実験Aにおける着色した水道水の浸透挙動 (a) 3 min., (b) 120 min., (c) 192 min., (d) 271 min.

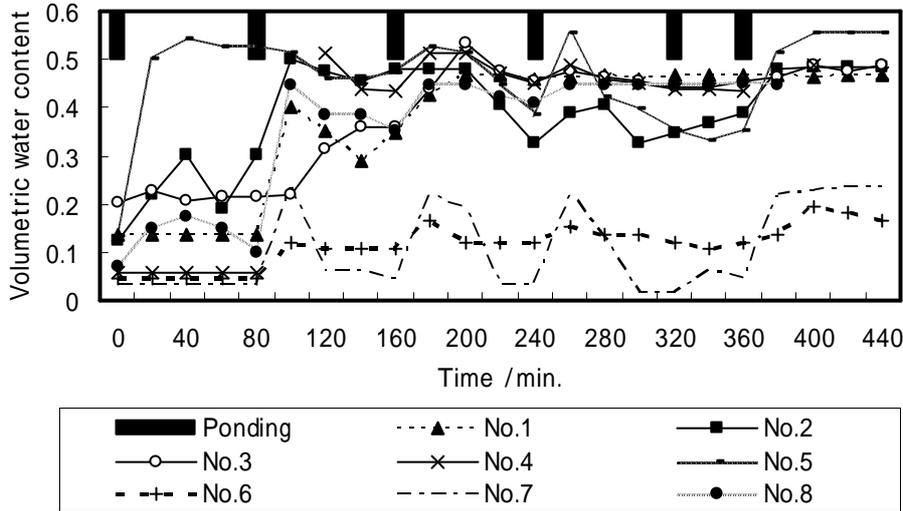


図-6 実験AにおけるPCBP挿入点の体積含水率の変化

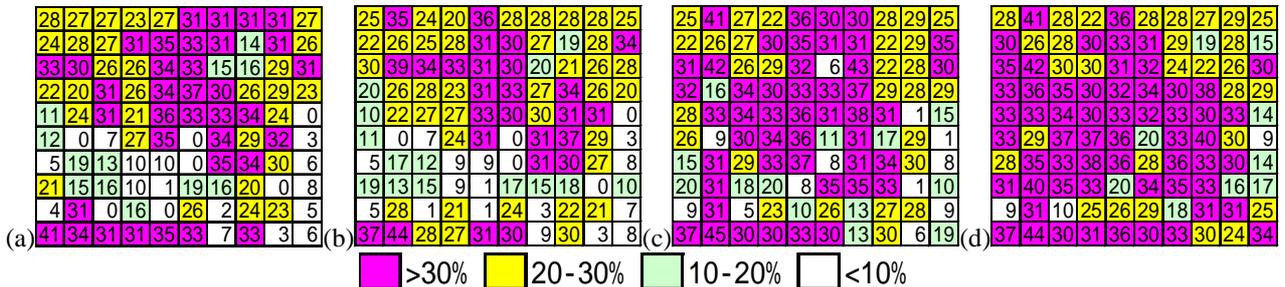


図-7 実験AにおけるG値により推定した体積含水率分布の変化(%表示) (a) 3 min., (b) 120 min., (c) 192 min., (d) 271 min.

画像解析による土壌水分量の推定に関しては、Perssonにより、有機物の少ない明るい色の土であれば、土の色と土壌水分量の相関が高いことが示されている¹²⁾。これに対し本研究では、着色した水を用いて試料毎に校正式を作成し、土の色によらない、より簡便な方法として検討した。

5. 結果と考察

(1) 段階的湛水実験 (実験A)

図-5に実験Aにおける着色した水道水の浸透挙動を示す。初期には、下に凸形に充填された透水係数の比較的大きい部分のため、中央部が先行する形で浸透が進む。その後の全体的な流れは、浸透層の右側へ向かい流下する。これは右側壁面下部に多く配置された透水係数の大きいブロックのためと考えられる。

図-6にPCBPを用いたTDRによる各測定点の体積含水率の変化を示す。図中には、湛水が行われたタイミングも併せて示す。No.6と7の挿入された部分は、ともに0.6~0.8 mmの砂である。この部分では低い水分量で推移し、砂の保水性を反映していることが分かる。最初の湛水では、浸透層上部で保水されてしまい、浸潤前線が到達できず、水分の増加が見られない。2回目の湛水により、No.6においては水分上昇が起こり、以降は低水分量であるが10%程度が一定で保水されている様子が見られる。No.7の方は、2回目以降、湛水毎に対応はあるものの、その後すぐに水分量の低下が起こっている。この違いは、No.6の周囲のブロックにそれよりも大きい透水係数を持つブロックが配置されておらず、そのため周りに水分を奪われることがなかったことと、No.7のすぐ右側のブロックは高い透水係数を持ち、このブロックを通して排水が促進されたからと考えられる。

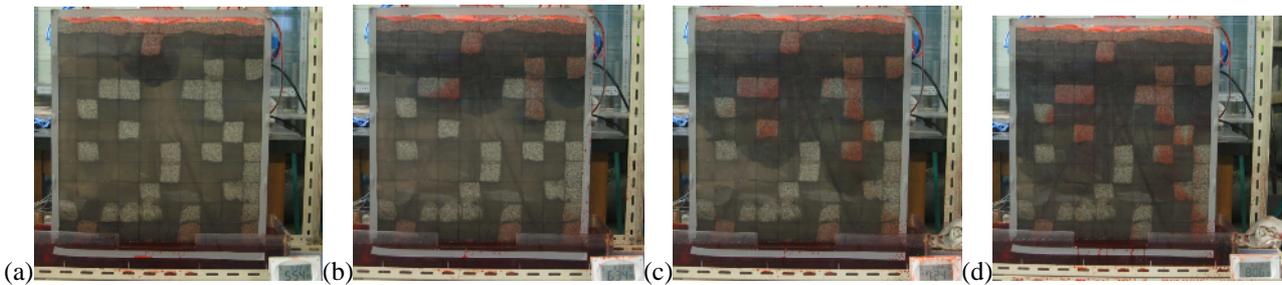


図-8 実験Bにおける着色した水道水の浸透挙動 (a) 24 min., (b) 64 min., (c) 114 min., (d) 156 min.

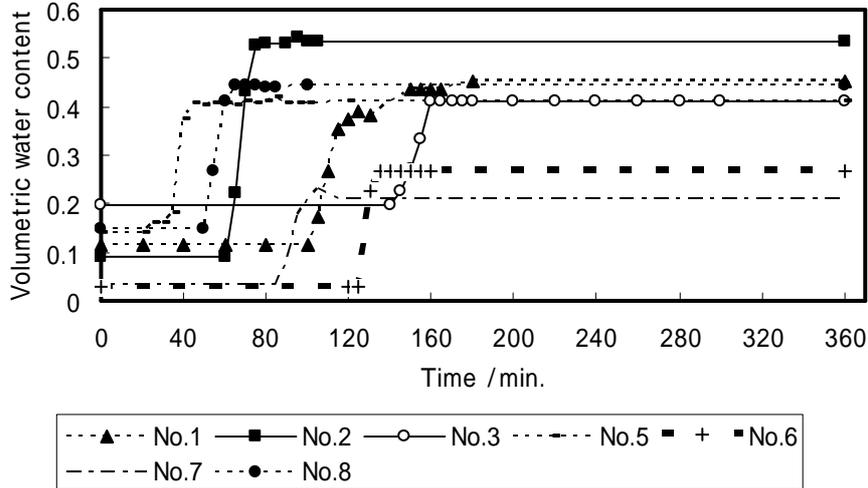


図-9 実験BにおけるPCBP挿入点の体積含水率の変化

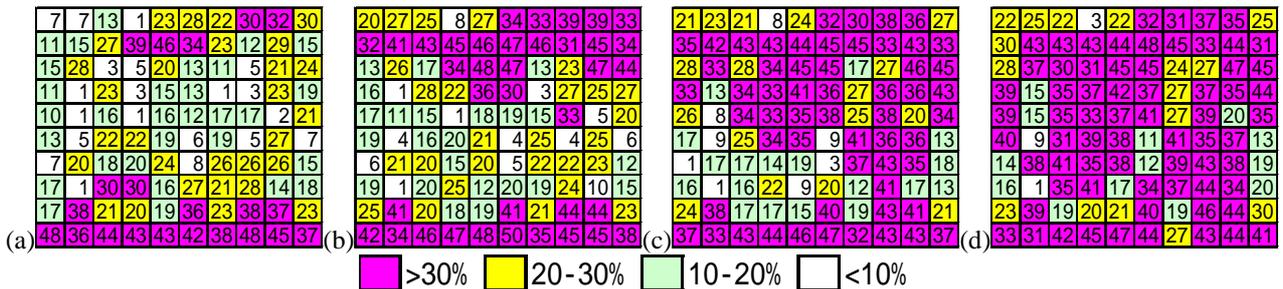


図-10 実験BにおけるG値により推定した体積含水率分布の変化(%表示) (a) 24 min., (b) 64 min., (c) 114 min., (d) 156 min.

No.1～5の挿入点は農場廃土試料であり、湛水により投入された水道水が到達した後は、高い水分量で推移していることが分かる。No.5は浸透が先行する凸部の右下に位置し、ただちに水分上昇が起こっており、TDRによる計測が正しく行われていることが確認できる。No.2と8の点は、浸透層上部の同じ高さに位置している。1, 2回目の湛水に対しては、若干No.2の方が早く水分上昇が起こっており、左右対称というより左側が早く浸透が進んでいることが分かる。このことは図-5 (a)からも推定できる。2回目の湛水に対応した水分上昇は、No.1と8で、ほぼ同時に起こっており、その後の変化も概ね同じである。No.2, 8の最初のピークは、実験開始後40分に最初のピークが表れている。浸透層中央部のNo.4では、記録した波形が解析不能で、初期のデータが欠損しているが、実験開始後120分以降の変化は、湛水への応答を示しつつ、3回目の湛水直後まではNo.2と同様の、それ以降は、No.1, 8とほぼ同様の変化を示

した。よって、先行して浸透した中央部の影響を受けて、初めの方では上部のNo.2と同じ変化をするが、時間がたてば左側の浸潤前線が追いついてきてほぼ平行に浸透が進むようになったと考えられる。中央部下部のNo.3においては、初期の体積含水率が20%となっており、これは浸透層下端に設けた水面からの毛管上昇と、重力排水により上部から移動してきた水分を保水したためと考えられる。水分の上昇は緩やかであるが、3回目以降の湛水には応答していることが分かる。いずれのPCBP挿入点においても、湛水への応答はただちに表れているので、これは押し出しによる水分の上昇であると考えられる。

図-7には、図-5に対応するG値により推定された体積含水率分布の変化を示す。実験写真と比較すると、水分量の多少は概ね良好に再現できたと考えられる。浸透層最下段で体積含水率が高くなっているのは、水面からの毛管上昇を再現できたものと考えられる。TDRによる測定との対応を見てみると、

No.6や7の部分では低い水分量となっており、概ね正しく推定できていると考えられる。

(2) 降雨発生装置による浸透実験 (実験B)

図-8に実験Bにおける着色した水道水の浸透挙動を示す。実験Aと同様、下に凸形の部分に先行し、全体としては浸透層の右側を優先的に流下した。透水係数の分布が同じであれば、水の浸透する経路そのものはあまり変わらないようである。

図-9にPCBPを用いたTDRによる各測定点の体積含水率の変化を示す。なおNo.4のプロープによる測定は、波形が正しくとれなかったため示していない。連続的に模擬降雨を与えたため、実験Aと異なり、一旦保水されると、ほぼそのまま水分量を保っていることが分かる。水分量が上昇し、すぐに低下しないのは、下部や側方への排水よりも早く、連続的に上部から補給されるためと考えられる。実験Aと同様、砂が充填されているNo.6と7の測定点においては、他の点と比べ保水性は低くなっている。水分上昇の順番は、No.5>8>2>7>1>6>3となっている。すなわち、実験Aと同様、凸部の右下であるNo.5で先行して水分上昇が起こり、同じ高さでは右側が先行して水分の上昇が起こっている(8>2, 7>1, 6>3)。この結果は図-8の実験写真とも相違せず、TDRによる計測がほぼ正しく行われたことを示している。No.3においては、実験Aと同様に、下部の水面からの毛管上昇により初期の体積含水率が20%となっており、値もほぼ同じである。したがって、実験AのNo.3のブロックの初期水分量は、毛管上昇のみに起因すると考えられる。

図-10には、図-8に対応するG値により推定された体積含水率分布の変化を示す。これについても実験Aと同様に、概ね保持している水分量の多少を表現できていると考えられる。実験終了後に、ブロック毎に体積含水率を実測し、提案している方法で推定した体積含水率と比較したところ、ほぼ再現できた。今後、浸透層表面の反射による誤差などを補正する方法を検討し、より適用可能性を高めたいと考えている。

6. おわりに

本研究では、飽和透水係数が不均一に分布する浸透層を対象とし、初期に所定の水分量に調整した浸透層へ、上部より着色した水道水を段階的に湛水し浸透させる実験と、同様に着色した水道水を降雨発生装置により連続的に浸透させる実験を行った。その結果、いずれの実験においても、水は透水性の大きいブロックを多く配置した右側壁面下部へ向かって選択的に流下した。PCBPを用いたTDRによる土壌水分変化の測定によれば、段階的湛水実験(実験A)では、土壌水分増加が、湛水のタイミングによく応答しており、浸潤前線が到達した後の水分上昇は押し出しによるものと考えられた。また連続的な降雨発生装置による実験(実験B)では、実験Aと異な

り一旦水分が上昇した後は、保水し続けることが確認できた。水分上昇の順番は、実験写真とよく整合した。いずれの実験においてもPCBPを用いたTDRによる水分測定が概ね正しく行われたことが分かった。本研究ではまた、非破壊で簡便な土壌水分の推定方法として実験写真の画像解析により抽出されたG値によって推定する方法を提案した。いずれの実験においても水分量の多少は概ね正しく推定できたと考えられる。

PCBPを用いたTDR法による測定は、局所的な土壌水分の時間変化を捉えるのに適していると考えられる。一方、画像解析による推定は、実験における浸透層全体の土壌水分分布を把握するのに適していると考えられ、両者を組み合わせる方法で、現象の解明に役立てることができると考える。

参考文献

- 1) Mantoglou, A.: A theoretical approach for modeling unsaturated flow in spatially variable soils: effective flow models in finite domains and nonstationary, *Water Resources Research*, Vol.28, No.1, pp.251-267, 1992.
- 2) Jensen, K.H. and Mantoglou, A.: Application of stochastic unsaturated flow theory, numerical simulations, and comparisons to field observations, *Water Resources Research*, Vol.28, No.1, pp.269-284, 1992.
- 3) Yeh, T.-C.J. and Harvey, D.J.: Effective unsaturated hydraulic conductivity of layered sands, *Water Resources Research*, Vol.26, No.6, pp.1271-1279, 1990.
- 4) Wildenschild, D. and Jensen, K.H.: Laboratory investigations of effective flow behavior in unsaturated heterogeneous sands, *Water Resources Research*, Vol.35, No.1, pp.17-27, 1999.
- 5) Wildenschild, D. and Jensen, K.H.: Numerical modeling of observed effective flow behavior in unsaturated heterogeneous sands, *Water Resources Research*, Vol.35, No.1, pp.29-42, 1999.
- 6) 中川 啓・岩田将英・筑紫二郎・初井和朗: 不飽和・不均一多孔媒体における物質輸送特性について, *水工学論文集*, Vol.47, pp.337-342, 2003.
- 7) Chiang, W.-H. and Kinzelbach, W.: *3D-Groundwater Modeling PMWIN*, Springer-Verlag, Heidelberg, Germany, 2001.
- 8) Wang, W., Kobayashi, T. and Chikushi, J.: Measuring the Layer-Average Volumetric Water Content in the Uppermost 5 cm of Soil Using Printed Circuit Board TDR Probes, *Journal of Faculty of Agriculture, Kyusyu University*, Vol.45, No.1, pp.277-287, 2000.
- 9) Or, D., Jones, S.B., VanShaar, J.R., Humphries, S. and Koberstein, L.: *WinTDR Users Guide*, Utah State University, Plants, Soils, & Biometeorology, Logan, Utah, 2003.
- 10) Evett, S.R.: Soil Water Measurement by Time Domain Reflectometry, *Encyclopedia of Water Science*, Marcel Dekker, New York, pp.894-898, 2003.
- 11) Topp, G.C., Davis, J.L. and Annan, A.P.: Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines, *Water Resources Research*, Vol.16, No.3, pp.574-582, 1980.
- 12) Persson, M.: Estimating surface soil moisture from soil color using image analysis, *Vadose Zone Journal*, Vol.16, pp.1119-1122, 2005.

(2006.9.30受付)