

不飽和-不均一多孔媒体における 物質輸送特性について

MASS TRANSPORT IN THE UNSATURATED-HETEROGENEOUS POROUS MEDIA

中川 啓¹・岩田将英²・筑紫二郎³・舩井和朗⁴
Kei NAKAGAWA, Masahide IWATA, Jiro CHIKUSHI and Kazuro MOMII

¹正会員 博(工) 九州大学助手 農学研究院植物資源科学部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

²学生員 九州大学大学院 生物資源環境科学府 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

³農博 九州大学教授 生物環境調節センター (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

⁴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)

In general, hydraulic parameters such as hydraulic conductivities show heterogeneous distribution in natural soil and aquifers. Therefore, in order to understand contaminant transport with soil water in unsaturated zone, laboratory experiments and numerical simulations were applied. Preferential flow and transport appeared because of such as heterogeneous structures of soil. TDR method was used to measure water content and electric conductivity in the experiments. Pressure heads were also observed at some locations using tensiometer. In the numerical simulations of mass transport, the method of characteristics (MOC) was applied. Preferential flow was observed both in numerically and experimentally. Although a part of numerical tracer movement agreed with experimental one, numerical results of water content and tracer concentrations could not meet with observed one. In order to use the applied numerical model to predict preferential flow, more consideration should be needed.

Key Words : *unsaturated zone, heterogeneous porous media, mass transport, preferential flow*

1. はじめに

地表から浸潤した汚染物質は、不飽和土壤中を下方へ移動し、一部は土壤中へ吸着などにより留まるものの、大部分は地下水面へ到達し、地下水汚染を引き起こす。また、一般に土壤中における透水係数などの水理パラメータは不均一に分布することが知られている。この不均一分布により、水の移動とともに汚染物質は複雑な浸潤過程を経ることが予想される。そして汚染物質が選択的に浸潤する場所とそうでないところが分かれると考えられる。

土壤において水理パラメータが空間的に不均一であることによる水の流れや物質輸送について、理論的¹⁾、現場観測²⁾と室内実験³⁾による多くの研究が行われてきた。土壤汚染の対策を講じるためには、このような選択的な経路を予測することが重要であると考えられるが、同時に不飽和特性を含む水理パラメータの不均一性によって、汚染物質がどのような移流分散挙動を示すか調べることも大切である。

坂本は、不飽和帯における水みち流れについて系統的に研究を行い、水みち形成の様子や水みち形状、さらに流れのフラクタル性について明らかにしている⁴⁾⁻⁹⁾。ただし取り扱った流れは、透水係数などの

分布による選択的な流れではなく、毛管力分布の不均一性に伴うキャピラリーフィンギングによる流れである。中川らは、飽和帯水層の透水係数が不均一な場に対して、トレーサの巨視的分散について検討した¹⁰⁾⁻¹²⁾。しかし不飽和帯における透水係数の不均一性の移流・分散への影響については議論されていない。Yeh and Harvey³⁾は、室内で1次元鉛直カラムにより、有効透水係数の概念を検討したが、1次元では透水性が最小の領域が水の流れを制限するため、不均一性の流れに対する影響を十分に検討できなかった。そのため、Wildenschild and Jensen^{13), 14)}は2次元不均一場に対して流れの過程や有効な水理パラメータについての検討を実験的、数値的に実施した。しかしこのような研究は未だ十分ではないと考えられる。

本研究では、水理パラメータの不均一性に伴う物質移動特性について基礎的な知見を得るため、室内実験と数値計算により検討を加えた。室内実験においては土壤水分と電気伝導度が同時に測定できる小型のTDRプローブを用いる方法を採用し、数値計算においては特性曲線法を用いた¹⁵⁾。

2. 不飽和-不均一場物質輸送実験

(1) 実験装置と実験方法

図-1に実験装置の概略図を示す。高さ60 cm×幅50 cm×奥行き10 cmの浸透層は厚さ1 cmの塩ビ板で作成し、底部は金網を介して高さ12 cm×幅62 cm×奥行き22 cmの下部水槽と接続している。下部水槽の下端から6 cmの高さで流出分を回収できるようにした。

浸透層内は粒径の異なる5種類のガラス球を用い、不均一に充填した。不均一場は5 cm×5 cmのブロックごとに1つの飽和透水係数を与えることにし、平均0, 分散1の正規乱数 ε を用い、次式により発生した。

$$Y = \bar{Y} + \sigma_Y \cdot \varepsilon \quad (1)$$

ここに、 Y は対数透水係数 ($Y = \log k_s$, k_s : 飽和透水係数), σ_Y は標準偏差, $\bar{Y}$ は対数透水係数の平均値である。ここでは $\bar{Y} = -1.05$, $\sigma_Y = 0.45$ を用いた。100個の乱数 ε に対して(1)式から得られた Y を指数変換し k_s を得る。次にそれらを任意の方向に並べ2次元的に配置し、 k_s に応じてガラス球の透水係数のカテゴリに分けて浸透層を構成した。なお本方法による透水係数場の発生では相関長を特に定めるものではない。不均一場上部には、最小粒径(0.1 mm)のガラス球の層を高さ3 cmで設け、下部には最大粒径(0.8 mm)の層を高さ4 cmで設けた。

土壌水分量と電気伝導度測定のためTDRプローブを9点(No.1~No.9), 圧力水頭測定のためテンシオメータを5点(A~E), 図-1に示す位置にそれぞれ挿入した。図-2に用いたTDRプローブを示す。縦6 cm, 横1.6 cm, 厚さ0.1 cmの小型のプリント基板製で、通常のロッドに相当する部分は15.5 cmである。TDRプローブはガラス球の粒系ごとに校正を行っている。浸透層上部には塩ビ板と多孔板および注射針(口径0.50 mm)により作成した、降雨発生装置を設置した。

実験は、まず下部水槽に脱イオン水を貯め、浸透層下端より3 cmの高さに水面を調節、脱イオン水を降雨発生装置から約10 mm h⁻¹の降雨強度で与え、浸潤前線が浸透層下端に到達し、下部水槽からの流出量が一定になったのを確認した後、降雨発生装置を取り外し、5 g L⁻¹ NaCl水溶液のトレーサを500 mL地表面に一樣に散布する。トレーサが十分浸潤した後再び模擬降雨を与え、浸透層下端からの流出液の濃度が十分低減したとき実験終了とした。またトレーサの挙動を目視で観察するため、トレーサとして食紅を用いた上と同様の実験を行った。このときはデジタルカメラにより一定時間ごとにトレーサの分布を撮影した。

(2) 実験結果と考察

図-3に浸透層下部流出液の塩分濃度の変化と流出量を示す。塩分濃度は電気伝導度から求めた。横軸

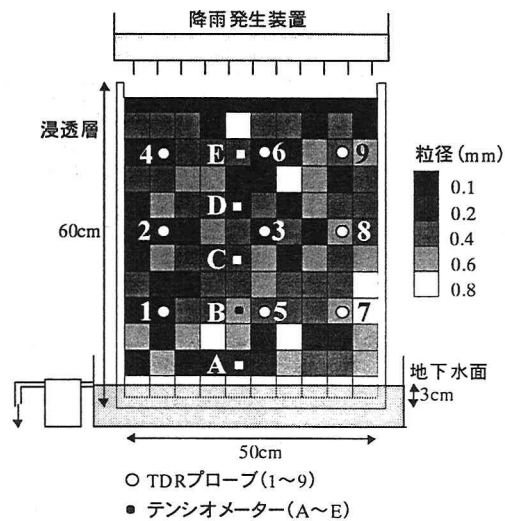


図-1 実験装置の概要

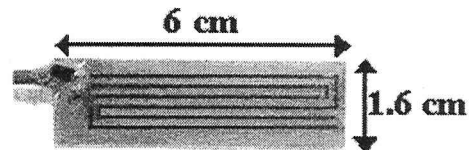


図-2 プリント基板製小型TDRプローブ

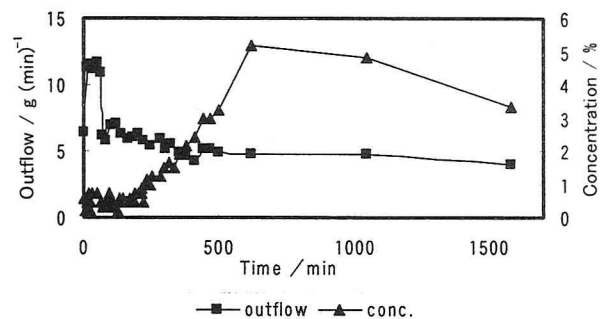


図-3 浸透層下部流出液の塩分濃度と流出量

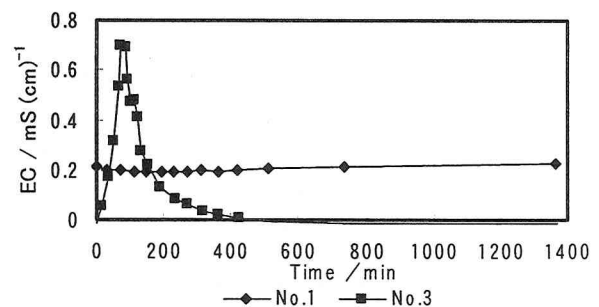


図-4 TDR測定点における電気伝導度変化

の時間はトレーサ散布時間を0分とする(以下の図でも同様である)。流出量は10分から65分にかけて大きなピークが出ているが、これは地表面に与えたトレーサにより浸透層中の水が急に押し出されたものと考えられるが、その後はほぼ一定値で推移した。濃度は500分過ぎにピークを示し、その後なだらかに低減した。

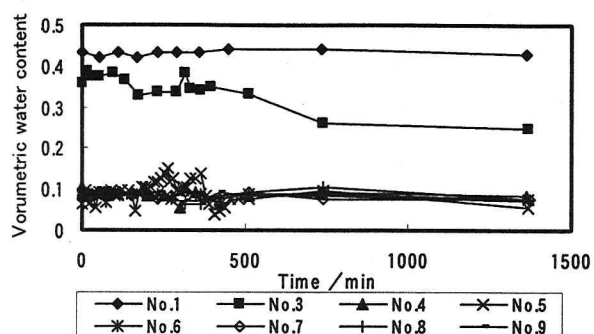


図-5 TDR測定点における体積含水率の変化

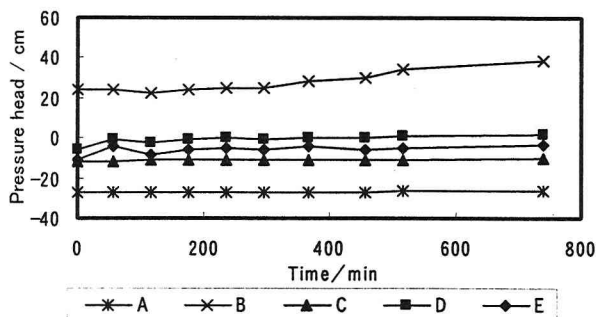


図-6 テンシオメータによる圧力水頭の変化

図-4に各測定点における土粒子(ここではガラス球)と土壤溶液をあわせたバルクの電気伝導度を示す。No.3では65分から90分にかけて大きなピークを示し、その後徐々に低減した。No.1では実験初期よりほぼ一定値で推移している。この値は下端の電気伝導度とほぼ等しいので、地下水面からの毛管上昇によると考えられる。その他の点では反応がなく、トレーサがこれらの点を流下しなかったからと考えられる。

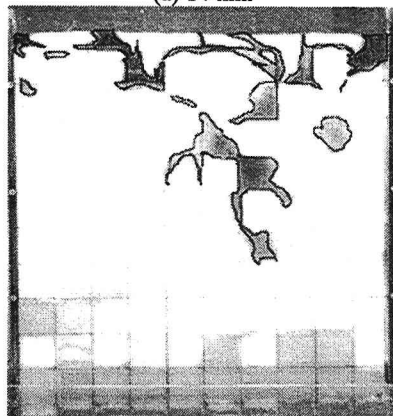
図-5に体積含水率の変化を示す。750分以降の水分量の低下は降雨量の減少によると考えられる。No.1は濃度と同様に実験初期からほぼ一定値で推移していたが、これも地下水面からの毛管上昇によると考えられる。No.3では体積含水率が0.3~0.4と高い値を示し、この点に水分が移動してきたことを示している。No.4~No.9では実験初期からほぼ一定値であり、トレーサ散布以前に流下した水分が保たれており移動が起きていないと考えられる。

図-6に圧力水頭変化を示す。一番下部のAは負圧であったが、Bは正圧となった。またCで負圧になった。体積含水率ではCより下方の点でNo.1のように飽和に近い値を示した点もあるし、そうでない点もある。このことは上部からの浸透は場の不均一性の影響を受け選択的流れを示すが、地下水からの毛管上昇も同様に場の不均一性のため高い位置まで上昇するところとそうでないところが出てくる現象があることを示唆している。C~Eはほぼ一定値で推移した。

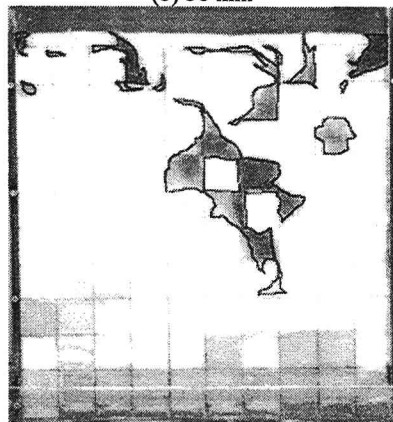
図-7に食紅トレーサの浸透過程を示す。トレーサは主に浸透層中央よりやや右側を選択的に流れ下端に至る。保水量の多い低透水性の部分を選択的に流下したように見えるが、このことは地表面に湛水す



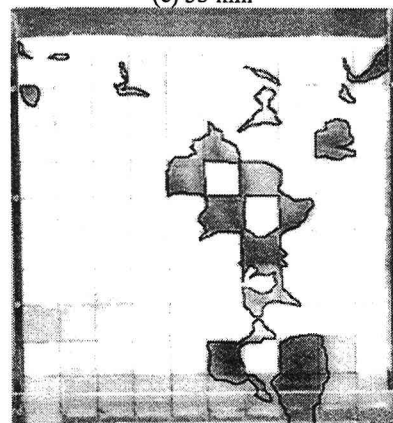
(a) 14 min



(b) 36 min



(c) 53 min



(d) 114 min

図-7 食紅トレーサの浸潤過程

表-1 ガラス球の飽和透水係数, 縦方向分散長および不飽和パラメータ

平均粒径/mm	$k_s / \text{cm s}^{-1}$	α_L / cm	θ_r	θ_s	α	n
0.1	8.92×10^{-3}	3.67×10^{-3}	0.0000	0.4120	0.02216	19.02883
0.2	2.98×10^{-2}	7.34×10^{-3}	0.0000	0.3940	0.02881	7.51085
0.4	8.57×10^{-2}	1.47×10^{-2}	0.0288	0.3940	0.07379	10.69138
0.6	2.16×10^{-1}	2.20×10^{-2}	0.0276	0.4065	0.10693	8.15999
0.8	3.58×10^{-1}	2.93×10^{-2}	0.0269	0.3800	0.15641	7.75112

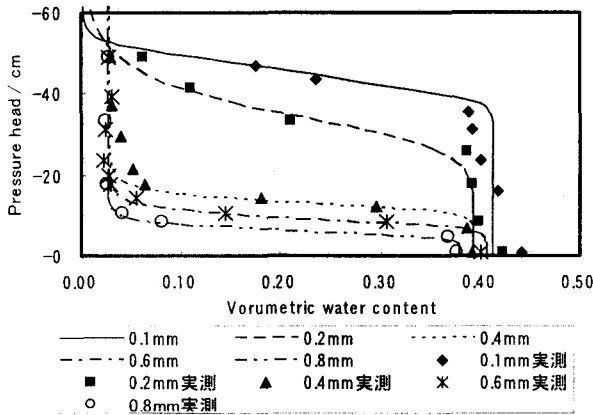


図-8 ガラス球ごとの水分特性曲線

る場合, 大降雨時や飽和状態時は大間隙 (マクロポア) を選択的に流下するが, 小降雨時は小間隙 (マトリクス) を選択的に流下することと相違しない¹⁶⁾。

3. 数値計算による不飽和-不均一場物質輸送現象の検討

(1) 数値計算モデル

基礎式は2次元地下水流れの式と, 物質輸送の基礎式である2次元移流分散方程式を用いた。2次元地下水流れは次式で表される¹⁵⁾。

$$(c_w(\theta) + \beta S_s) \frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2)$$

$$u = -k(\theta) \frac{\partial h}{\partial x} \quad (3)$$

$$v = -k(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial y} + 1 \right) \quad (4)$$

ここに $k(\theta)$: 透水係数(cm s^{-1}), t : 時間(s), h : 圧力水頭(cm), u, v : x, y 方向のDarcy流速(cm s^{-1}), S_s : 比貯留係数(cm^{-1}), θ : 体積含水率, $c_w(\theta)$: 比水分容量, β : 飽和帯の時は1, 不飽和帯の時は0をとるダミー変数である。濃度 $C(x, y, t)$ に関する物質輸送の式は次式で表される¹⁵⁾。

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\theta C)}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{xx} \frac{\partial(\theta C)}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial(\theta C)}{\partial y} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{yx} \frac{\partial(\theta C)}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial(\theta C)}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

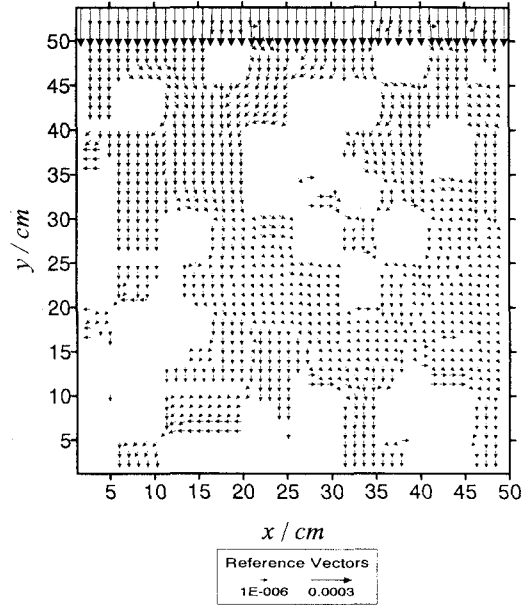


図-9 流速ベクトル分布

Huyakorn and Pinderによれば, 分散係数 D_{xx} , D_{xy} , D_{yx} , D_{yy} は, 次式のように流速依存型の分散と分子拡散の和で表される¹⁷⁾。

$$D_{xx} = \frac{\alpha_L u'^2}{V} + \frac{\alpha_T v'^2}{V} + D_M \quad (6)$$

$$D_{yy} = \frac{\alpha_T u'^2}{V} + \frac{\alpha_L v'^2}{V} + D_M \quad (7)$$

$$D_{xy} = D_{yx} = \frac{(\alpha_L - \alpha_T) u' v'}{V} \quad (8)$$

ここに $V = (u'^2 + v'^2)^{1/2}$ であり, α_L : 縦方向分散長(cm), α_T : 横方向分散長(cm)であり, $\alpha_T = 0.1\alpha_L$ とした。不飽和帯も含めた計算を実施するので, 負の圧力水頭 h に対する体積含水率 θ (水分特性曲線), 不飽和の透水係数 $k(\theta)$, および比水分容量 $c_w(\theta)$ を与える必要がある。本研究では土柱法により水分特性曲線を作成し, van Genuchtenが提案した理論式¹⁸⁾をあてはめ不飽和パラメータを最小二乗法により求めた¹⁹⁾。ここで得られた水分特性曲線を図-8に, 決定された不飽和パラメータを飽和透水係数, 縦方向分散長と併せて表-1に示す。

(2) 計算方法および計算条件

地下水流れの式(2)については, 陰形式の差分法で繰り返し計算を行い, 物質輸送の式(5)については, 特性曲線法を用いる³⁾。計算領域は x 方向に 50 cm, y 方向に 53.75 cm, 差分格子間隔は x, y 両方向ともに

1.25 cmとした。初期条件は圧力水頭について、地下水面より上の部分は地下水面下を静水圧分布として地表面まで直線的に延長した分布、濃度について上部を100 %、それ以外を0 %とした。境界条件は圧力水頭について上部は、トレーサ散布時間内は1.0 cmの一定値で、その後は降雨フラックス境界とした。下部は地下水面を0 cmとして一定値を与え、左右壁面は不透水性境界としている。濃度については、上部についてトレーサ散布時間内は100 %とし、以降0 %とした。下部および左右壁面については濃度勾配なしとした。

(3) 計算結果と考察

図-9にトレーサ散布前の流速ベクトル分布を示す。ベクトルが示されていない部分は、水の流れみちとなっていないと考えられる。流れは透水係数の小さな部分を迂回してより透水係数の大きな部分へと流れる傾向がある。全体としては、浸透層中央よりやや上方の透水係数の小さな領域を迂回して流れ、浸透層左側下方の領域も同様に迂回し、最終的には浸透層下端に向かって流下した。

トレーサの挙動を図-10に示す。中央の透水係数の小さい領域を迂回し、この領域の左右に分かれ右側を流下したトレーサは透水係数の大きい右下の2つの粒径0.6 mmのブロックへ向かい流下した。左側を流下したトレーサは左下の透水係数の小さい領域を迂回し、一部はそのまま流下し、その他は右下の粒径0.6 mmのブロックへ向かい流下した。また中央の透水係数の小さい領域の上部ではトレーサが暫くの間停滞し濃度が高くなっている様子が確認され、これは実験結果とも定性的には一致している。実験結果からは、左側を流下するトレーサが確認できなかった。浸透層内部と前面から観察できる分布が異なっている可能性もあり、今後詳しく調べる予定である。

各測定点における濃度変化を図-11に、体積含水率の変化を図-12に示す。実験では変化が見られなかった点において体積含水率及び濃度の変化が見られた。また実験で主要な経路上と判断されたNo.3においては、それほど大きな濃度上昇を示さなかった。測定がうまくいかなかったことが考えられ、本件については今後検討する予定である。No.1では実験では濃度は変化せず一定値であったが、計算結果ではピークを持つ濃度変化を示した。これは数値計算で地下水面からの毛管上昇を再現できなかったからと考えられる。圧力水頭の変化を図-13に示す。初期に圧力が急に高くなる点があるが、それを除けば以降のほぼ一定に推移する点は実験結果と似ている。各測定点における体積含水率、圧力水頭、濃度ともその時間変化の定性的な様子は似ているが、数値計算の妥当性を示すことができたとは言えない。不飽和透水係数の取り扱いや分散長の体積含水率依存性など明らかにされていない問題があること、また2章で示したような大降雨時と小降雨時の違いを数値計算で再現することができるか、検討の余地がある。

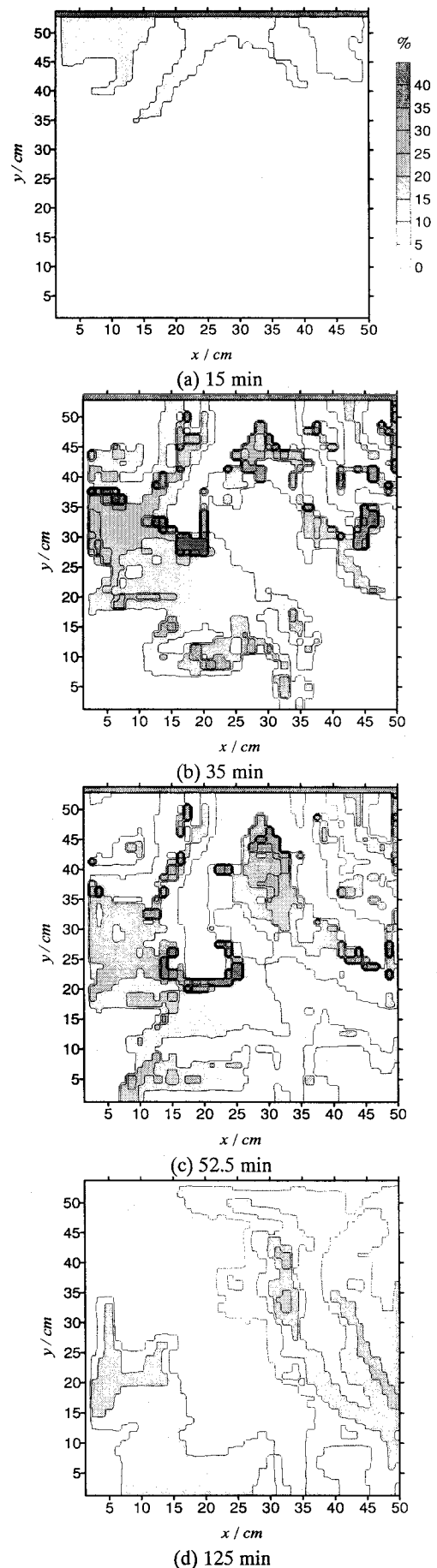


図-10 数値計算によるトレーサの浸潤過程

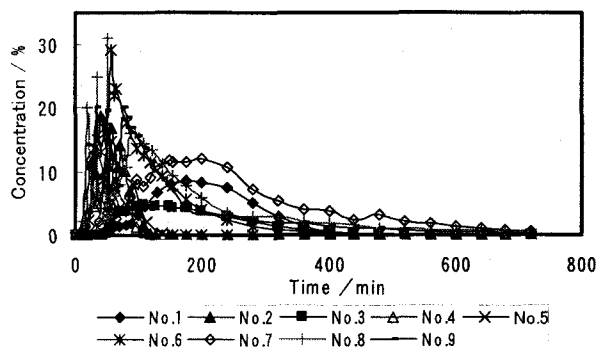


図-11 TDR測定点における塩分濃度の計算結果

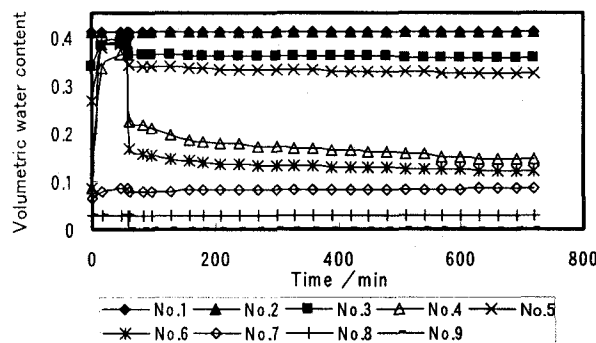


図-12 TDR測定点における体積含水率の計算結果

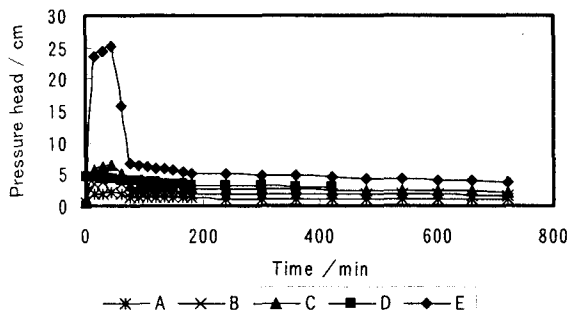


図-13 テンシオメータ挿入点における圧力の計算結果

4. おわりに

本研究では、水理パラメータの不均一性に伴う物質移動特性について基礎的な知見を得るため、室内実験と数値計算により検討を加えた。その結果トレーサの流れは透水性の不均一分布の影響を受け選択的流れを示したが、着色トレーサの実験結果からは左側へ迂回した流れが観察されなかった。また実験におけるTDRプローブ挿入点における濃度変化が確認されていない場合でも、数値計算では濃度変化を示したなどの相違点が見られた。実験上の精度が問題であるため今後十分に検討しなければならない。しかし各測定点における体積含水率、圧力水頭、濃度とも、その時間変化の定性的な傾向は概ね類似しているが、数値計算モデルの妥当性を示すことができたとは言えない。今後はまず他の透水係数場に対しても室内実験と数値計算を行い、実験・計算両方の精度を十分検討する。そして数多くの透水係数場に対して数値計算を実施し、その結果を透水係数場

と物質輸送の関係について理論的に整理することを考えている。

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 Nonstationarity, *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) 坂本康, 渡辺和彦: 不飽和層中での水みち形成と水みち流下速度についての実験的研究, *水工学論文集*, Vol.35, pp.111-116, 1991.
- 5) 坂本康: 接触角と水分量の影響を考慮した水みち侵入モデルによるシミュレーション, *水工学論文集*, Vol.38, pp.179-184, 1994.
- 6) 坂本康: 不飽和層での水みち流れによる溶質移動の実験とシミュレーション, *水工学論文集*, Vol.39, pp.337-342, 1995.
- 7) 坂本康: 不飽和層の障害物が溶質の移流・拡散に与える影響, *水工学論文集*, Vol.40, pp.443-448, 1996.
- 8) 坂本康: 面に沿う流れと浸透量が不飽和層中の水みち流れに与える影響, *水工学論文集*, Vol.41, pp.7-12, 1997.
- 9) 坂本康: 不飽和層中の水みち流れのフラクタル次元と水みち侵入モデルによるシミュレーション, *水工学論文集*, Vol.36, pp.447-452, 1992.
- 10) 中川啓, 神野健二, 細川土佐男, 畑中耕一郎, 井尻裕二, 巨真吾: 不均一多孔媒体中の流れと物質輸送特性について, *地下水学会誌*, Vol.40, No.1, pp.1-16, 1998.
- 11) 中川啓, 神野健二, 細川土佐男: 不均一浸透場におけるトレーサ輸送の微視的分散と巨視的分散に対する水理学的考察, *水工学論文集*, Vol.42, pp.385-390, 1998.
- 12) 中川啓, 神野健二: 不均一場における巨視的分散の遷移状態の特性評価, *地下水学会誌*, Vol.40, No.4, pp.485-499, 1998.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 神野健二編: 地下水中の物質輸送数値解析, 九州大学出版会, 2001.
- 16) Clothier, B.E. and White, I.: Measurement of Sorptivity and Soil Water Diffusivity in the Field, *Soil Science Society of America Journal*, Vol.45, pp.241-245, 1981.
- 17) Huyakorn, P.S. and Pinder, G.F.: *Computational method in subsurface flow*, Academic Press, 1983.
- 18) van Genuchten, M.T.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, Vol.44, No.5, pp.892-898, 1980.
- 19) 西垣誠, 竹下祐二: 室内及び原位置における不飽和浸透特性の試験及び調査法に関する研究, 岡山大学工学部土木工学科, 1993.

(2002. 9. 30受付)