

不飽和土壌中の溶質の移動について

SOLUTE TRANSPORT IN AN UNSATURATED SOIL.

安田 裕*・神野 健二**・田熊 勝利***
Hans Persson****・Ronny Berndtsson**** Akissa Bahri*****

Hiroshi Yasuda*, Kenji Jinno**, Katsutoshi Takuma***
Hans Persson****・Ronny Berndtsson**** Akissa Bahri*****

To evaluate the solute movement in an unsaturated soil, blue dye was injected to the field soil in Tunisia and both of the vertical and the horizontal cross sections below the injected region were observed. Since dye spreads along the preferential flows caused by cracks, the dye spreading patterns showed superior heterogeneity and the spatial correlations are significant only for small spatial scale. Consequently 2-dimensional convection dispersion equation can replicate an overall transport of solute but not replicate the detailed patterns.

KEYWORDS: *Solute movement, Preferential flow, Dye-spreading.*

1. まえがき

汚染物質が地表から浸透し、地下水面に至るまでの移動の評価は、環境保全、農業活動等の計画、重要な問題であるが、土壌自体の持つ非均質性に加え、土壌状態が不飽和であるため現象が複雑になるので多くの場合、評価は容易ではない。本研究に先立ち、同一土壌に対しNaBr, KBrを用いたトレーサー試験が行われている(Yasuda他, 1994a; Yasuda他, 1994b)。結果は数10cmのスケールの著しい非均一性を示すものであった。本研究では、従来のトレーサー試験では得られなかった不飽和層内の物質移動の視覚的評価を目的として、地表面から染料を散布し、土壌断面の染色状況を観察し、解析したものである。

2. 実験対象地区

実験はチュニジア国チュニス郊外の農業省農業工学研究所セルワ実験農場で実施された。実験が行われた畑地の土壌断面は3層からなり、1)表層(0-0.4m)シルト質粘土、2)中間層(0.4-1.0m)；シルト質粘土ローム、3)深層(1.0-1.5m)砂質粘土ロームに分けられる(Bahri他, 1993; Yasuda他, 1994A,B)。また、農場の土壌の水分特性曲線は、以下に示すvan Genuchtenのモデルにあてはめられ、図-1に示すような土壌水分特性曲線が推定されている(Gullberg及びPersson, 1993)。

$$\frac{S - S_r}{S_s - S_r} = \frac{1}{\{1 + (ah)^n\}^{-m}} \quad (m = 1 - 1/n)$$

* 正会員 農修 鳥取大学講師 農学部生存環境科学講座(〒680 鳥取市湖山南4-101)

** 正会員 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科(〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)

*** 農博 鳥取大学教授 農学部生存環境科学講座(〒680 鳥取市湖山南4-101)

**** スウェーデン・ルンデ工科大学教官 水資源工学科 (TVRL LTH Box 118 S-22100 LUND, SWEDEN)

***** チュニジア・農業省農業工学研究所副所長(CRGR Ariana Tunis, TUNISIA)

ここに、 S :体積土壌水分、 S_s :飽和土壌水分、 S_r :最
小土壌水分、 h :マトリックポテンシャル、 a, n :パラ
メータ。

3. 実験

3.1 染料の地中への注入

本研究においては、汚染物質の土中の移動を評価す
るために染料を地表に散布した後、散布域下の土壌
断面（縦断面、横断面）を掘削し、染料の浸透の様
子を視覚的に把握しようとするものである。そのた
め、土壌断面が染色された様子を観察・写真撮影し
非均質的(heterogeneous)不飽和層内に汚染物質が
パルス状に浸透した場合、地中でどのような移動・
拡散をするのかを評価する。

図-2のような鉄製二重枠(内枠1.0x1.0m, 外枠2.0
x2.0m)を用いて実験が行われた。実験は2度行われ、
1回目、2回目をPlot 1, Plot 2の2地点で実施し
た。染料の注入に先立ち内枠と外枠の間に水を散布
し緩衝域とし、インテークレート試験と同様の手順により、内枠に青色染料(C.I. Food blue 2)の溶液(4,0
00 mg/L) 50Lを地表から散布した。また、実験開始前に外枠の4辺（北、東、南、西側、図中のN, E, S,
W)につき、土壌サンプリングを行い、初期土壌水分量を測定するとともに、N側からS側に向って0.15、0.
25 及び0.50 mの鉛直断面について左端、中央、右端から0.1 m深ごとに採土し染料散布後の土壌水分量を測
定した。

3.2 トレンチの掘削、写真撮影

染料散布後、1日放置した後、実
験装置の側方（N側）にトレンチ
を掘削し、実験装置内枠の下まで
掘り進み、染料の下方への浸透状
況を写真撮影する。内枠の水平方
向0.5mまで縦断面を掘削した後
は、残りの0.5mについては水平方
向に土壌面を削除し染料の平面分
布を観察した。図-2に示すよう
に鉛直断面(実験区画N側よりS
側へ順次掘削)を観察・写真撮影
の後、残りS側0.5 mにつき水
平断面を観察・写真撮影したも
のである。写真撮影に際しては、
土壌断面の座標系を認識するた
めに、0.1 mメッシュのマーカ
ーを用いた。

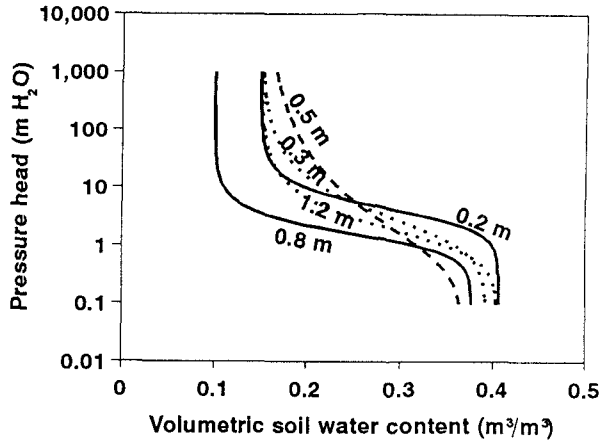


図-1 Soil water retention curves

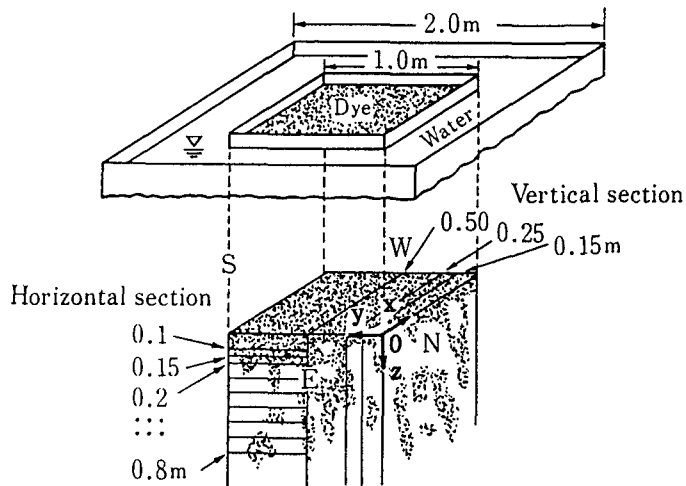


図-2 Experimental arrangement

4. 実験結果

4.1 土壌水分

図-3にPlot 1の体積土壌水分の鉛直分布を示す。図の左方の破線が初期土壌水分断面(N, E, S, W)であり、右方の実線が散布後のN側からS側へ0.15, 0.25, 0.50 mの鉛直断面中央における土壌水分量の平均値である。50Lの染料の注入により表層近傍(0.1 m深)ではおよそ10 %の水分増加が見られ、0.6 m深まで散布による土壌水分増加が認められる。実験開始時に表層の0.2 m深までは乾燥状態にあり、体積土壌水分量は22-25%程となっており、乾燥による亀裂が顕著であった。

4.2 染色パターン

図-4にはPlot 1のN側から水平距離 $y=0, 0.25, 0.50$ m, Plot 2のN側から $y = 0, 0.15, 0.40, 0.50$ mの鉛直断面の染色パターンを示す。この図は染色パターンを 0.25×0.25 mのメッシュ毎に染色の有無を識別して作成されたものである。染料の下方への移動は散布域直下ではほぼ水平方向に染料が拡っている一方で、枝状に分布しており、染料が大量に流下したところと、全く通過しなかったところに明確に分離されている。およそ0.1m深までは散布域全体にわたり均等に染

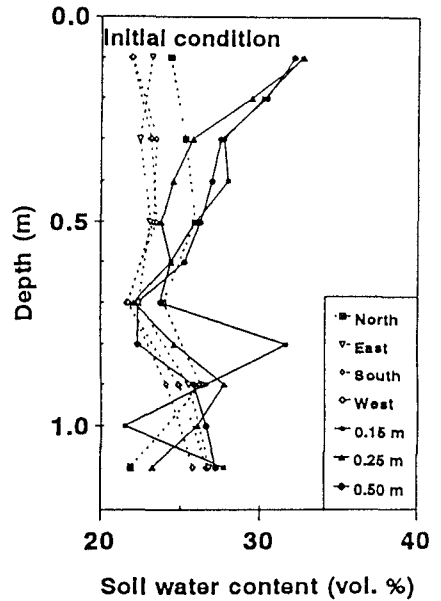


図-3 Profile of soil water content

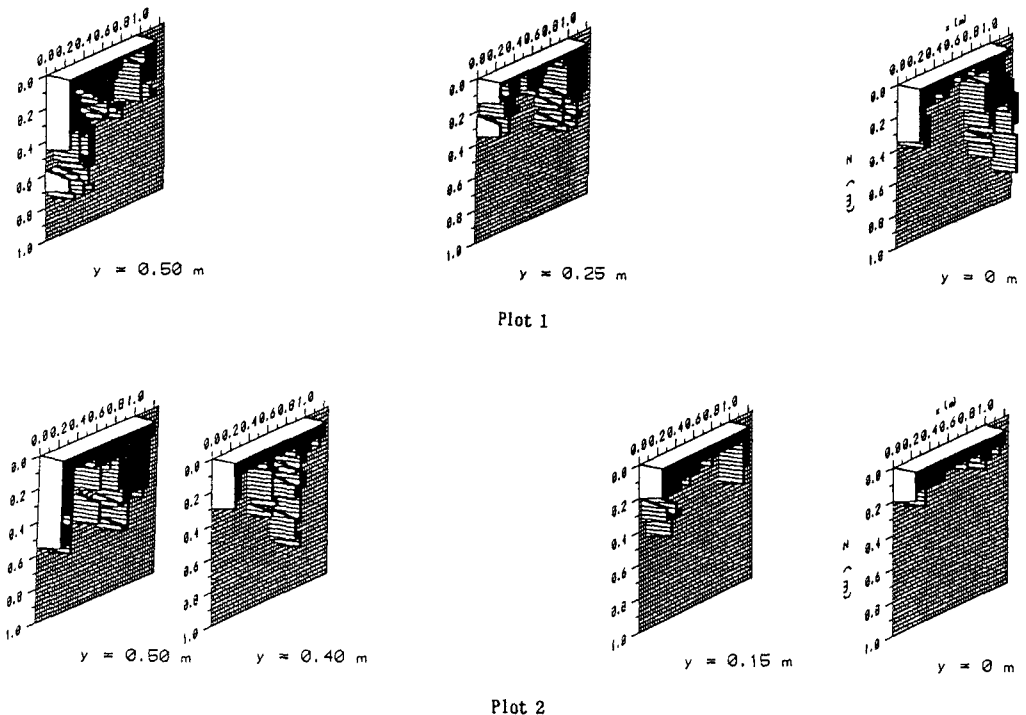


図-4 Dye pattern in the vertical sections

料が拡がったものであるが0.1 mより下では、2～3の優勢な染色域が認められ、これらの主幹部から枝分かれしてタコ足状に染料が流下している。これらの主幹部をはずれた領域では染料は全く到達しておらず、散布域下での著しい非均質性が確認された。特にPlot 1 中央の右側(W側、横軸 $x = 0.70\text{--}1.00\text{ m}$)では染色域の下方への移動が著しい上に0.30-0.50 m深で左方へのよじれが認められる域であり、ミクروسケールでの観察からも亀裂沿いの染色域は明らかである。染色域の内側には島状に全く染色されていない領域が存在するとともに、飛び石状に染色された領域もある。これは染料が3次的に移動していることを示すものであり、2次元モデルでは説明できないものと考えられる。RistemaとDekker (1994)の土壌水分に関する観察結果では初期条件の相違による土壌水分移動の非均質性が示唆されていた一方、Fluryら(1994)は染色に対して土壌水分の初期条件がさほど有意でないことを示唆していたものであるが、本研究においても土壌水分の初期条件と染色パターンには大きな関連性は認められない。

一方、各断面の染色パターンの類似性については、Plot 2の4断面のうち、N側からの水平距離 $y = 0.40, 0.50\text{ m}$ のものについては、ある程度の類似性が見られるものであり、空間スケールが0.10 m以下に対しては何らかの相関性の存在が推定される。Cherfechの土壌については、溶質の移動に関して数10cmのスケールについてランダム性が示されており、今回の結果もこれを裏付けるものとなっている(Yasuda et al., 1994A)。

図-5はPlot 1の水平断面上の染色パターンを示したものである。図-5に示された鉛直断面上の染色パターンでは地表から0.2m深までは完全に染色されていたものであるが、これらの水平面上の染色

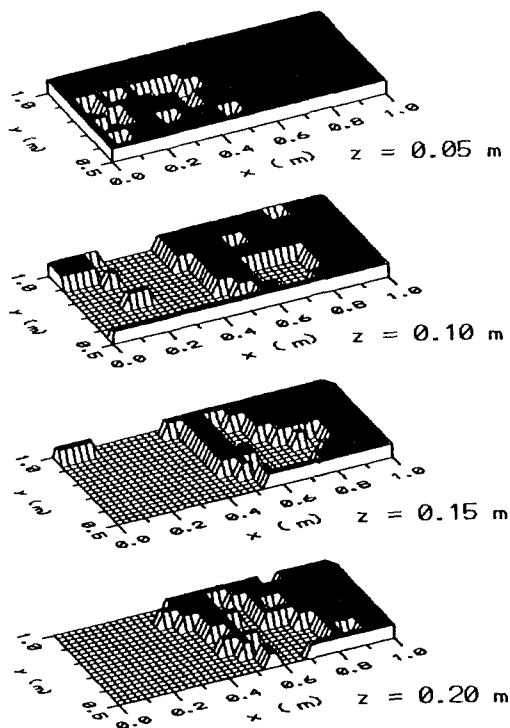


図-5 Dye pattern in the horizontal sections

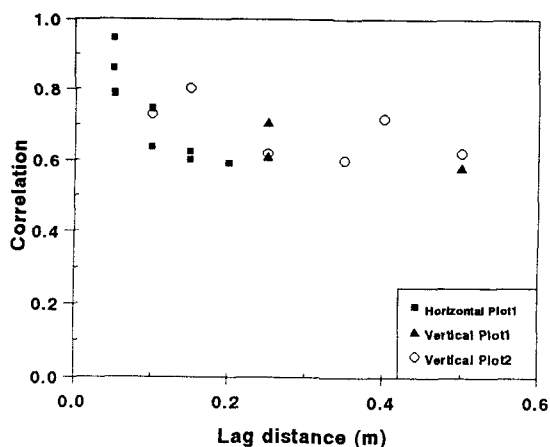


図-6 Correlation of dye pattern on two planes

パターンは 0.05m深でさえも、非染色域が存在することを示している。また、非染色域の上下が染色されている要素もあり、溶質の3次元的な移動が視覚的に理解できる。

これらの染色パターンの相関性を評価するために、以下に示すような相関 R_{fg} を2断面 $f(i,j)$, $g(i,j)$ に関し、対象領域 A について計算し、2断面間の距離との関係を図-6に示す。

$$R_{fg} = \frac{\sum_{(i,j) \in A} f(i,j)g(i,j)}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in A} f^2(i,j) \sum_{(i,j) \in A} g^2(i,j)}}$$

水平断面については、0.1 m以下の断面間の距離に対し高い相関が得られているようである。0.1m以上の距離については、緩やかな減少傾向が見られるが、ほぼ同一レベルになっている。

5. 数値計算の検討

パラメーターの寄与の把握を目的として、2次元のコンピュータ・シミュレーションを試みた。用いたコンピュータ・シミュレーション・モデルはSWMS_2D(Simunek他, 1992)である。土壌水分の初期条件は測定値をスプライン関数で補間して与えた。土壌鉛直断面を鉛直方向に2層に分け、計算のパラメーターを表-1のようにした(Gullberg and Persson, 1993)。実験で得られた染色域が染料の移動痕跡となっていると解釈されるので、各時間ステップごとの染料の到達範囲を実験結果と比較検討する。

表-1 Parameters for the computer simulation

	Ss	Sr	a(1/cm)	n	ks(cm/sec)
第1層(0.0-0.4 m)	0.399	0.150	0.0046	2.10	0.0006
第2層(0.4-1.3 m)	0.379	0.130	0.0102	1.98	0.0012

ここに、 s_s :飽和体積含水率、 s_r :最小含水率、 a,n :パラメータ、 $m = 1/n$ 。

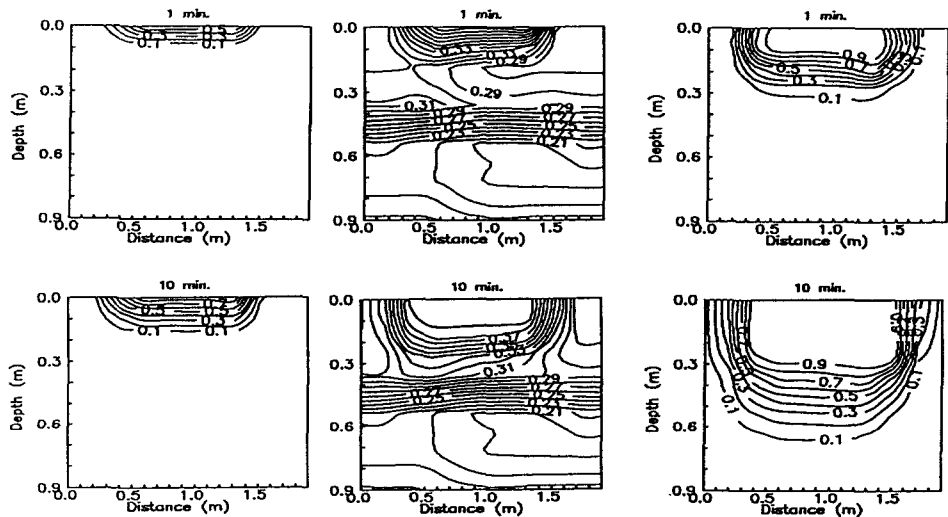


図-7 Computer simulation

Left; Dye transport、Center; Water transport、Right; Dye transport (100 times permeability)

図-7は染料注入後1及び10分後の染料の濃度と体積土壌水分量のシミュレーション・モデルによる結果である。実験結果（図-4）で得られた0.1 m深まで全域にわたる染色域とほぼ一致しているが、0.1 m以深の分岐にまでは到達していない。また、図-7の右の染料の移動はマクロポアの効果を検討するために、飽和透水係数を100倍して計算されたものである。実験結果が示す分岐領域の先端部（およそ0.5 m深）にまで染料が到達している。本計算では水平方向に諸パラメータの分布が与えられていないので、実験結果が示す三つ又状の染色域を表すことはできないが、将来2次元パラメータ分布を与えることにより大まかな評価は可能であることが予想される。一方で、島状の非染色域や飛び石状の染色域は3次元マクロポア効果によるものであることが予想されるので、将来的には3次元の非均質モデルによる解析及び統計的手法との融合が期待される。

6. 結び

溶質の土中の移動は非均質的である。実験結果が示すように、染料の土中の移動は著しい非均質性を示しており、数10cmのスケールにおける土壌特性の変化により、水分、溶質の移動が大きな影響を受けることがわかる。一方で、10cm以下のスケールで空間的相関が存在することが示唆されている。

2次元の非均質モデルにより全般的な溶質の移動をシミュレーションできることは予想されるが、より詳細なシミュレーションにはパラメータ分布を考慮した3次元モデルが必要である。本論で示された現場調査結果により、不飽和非均質土壌内の溶質の移動が視覚的に示された。今後、溶質移動に関わるパラメーターの空間分布を評価し、緻密な数値シミュレーション・モデルに応用することを目的としたい。

参考文献

- A. Gullberg and H. Persson.
Two-dimensional unsaturated tracer experiments in a semi-arid clayey soil. Dept. of Water Resou. Lund University. Lund, Sweden. 1993.
- A. Bahri, R. Berndtsson, and K. Jinno
Spatial dependence of geochemical elements in a semiarid agricultural soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 57:1316-1322, 1993.
- M. Flury, H. Fluehler, W. A. Jury and Leuenberger.
Susceptibility of soils to preferential flow of water: A field study. Water Resou. Res. 30:1945-1954, 1994.
- C. J. Ristema and Dekker.
Soil moisture and dry bulk density patterns in bare dune sands. J. Hydrol., 154:107-131. 1994.
- J. Simunek, T. Vogel, and M. Th. van Genuchten.
The SWMS_2D Code for simulating water flow and solute transport in two-dimensional variably saturated media. 1992.
- H. Yasuda, R. Berndtsson, A. Bahri, and K. Jinno.
Plot-scale transport in a semi-arid agricultural soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 58:1052-1060, 1994A.
- H. Yasuda, R. Berndtsson, A. Bahri, H. Persson, A. Gullberg and K. Jinno.
Spatial correlation analysis of two-dimensional solute transport in the unsaturated zone. Stochastic and Statistical Methods in Hydrology and Environmental Engineering, vol. 2, 127-138. 1994B.
- P. J. Wierenga, R. G. Hills and D. B. Hudson.
The Las Cruces trench site: Characterization, Experimental results and one-dimensional flow predictions. Water Resour. Res. 27:2695-2705. 1991.