

29. 途上国における半乾燥地性土壌中の 汚染物質の移動について

POLLUTANT MOVEMENT IN A SEMI-ARID SOIL.

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

Hiroshi Yasuda^{*}, Katsutoshi Takuma^{*}, Akissa Bahri^{**}
Hans Persson^{***}, Ronny Berndtsson^{***}, Kenji Jinno^{****}

ABSTRACT; To evaluate the pollutant movement in a semi-arid soil, dye was injected to the field in Tunisia and both of the vertical and the horizontal cross sections below the injected region were observed and taken for the photos. Since dye spreads along the preferential flows caused by cracks, the dye spreading patterns showed superior heterogeneity and the patterns should have been caused by the 3-dimensional heterogeneity. Consequently 2-dimensional convection dispersion equation (CDE) can not work for complete simulation for the dye spreading in a heterogeneous soil.

KEYWORDS; Pollutant movement, Preferential flow, Cracks, Dye-spreading.

1. まえがき

途上国、特に中進国においては、わが国の60～70年代と同様に、産業の発展と公害規制の未整備状態があいまって、無秩序な公害発生が生じている状態である。近年、飛躍的に経済成長を続ける東南アジア諸国と同様にヨーロッパの周辺に位置しアフリカ圏では高い経済レベルを持つモロッコ、チュニジア等マグレブ諸国でも産業発展と公害規制に齟齬を生じ、わが国がかって体験した環境汚染の問題が生じてきている。伝統的にヨーロッパ諸国の影響を受け、環境問題においても技術援助を受けているチュニジアでは比較的早くから、汚水処理スラッジの肥料としての活用、廃棄物処理場周辺の土壌汚染の対策などが検討されていたものである。日本などの先進国の発展段階での公害発生を反面教師とし、環境問題を重視しており、土壌の汚染については同国農業省では化学成分の土中での移動を検討してきている (Bahri, 1987, 1992)。

本研究はチュニジア、スウェーデン、日本の3国共同で実施された乾燥地土壌内中の汚染物質移動に関する現地実験の結果を報告するものである。同国の土壌内の溶質の移動については金属の含有量 (Bahri 他、1992) の統計的解析、NaBr, KBrを用いたトレーサー試験 (Yasuda 他、1994a, 1994b) などが報告されているが、本研究では汚染物質の土壌内移動を視覚的に評価するために染料を地表から散布し土壌断面がどのように染色されたかを観察したものである。

* 鳥取大学農学部生存環境科学講座
** チュニジア・農業省農業工学研究所
*** スウェーデン・ルンド大学水資源工学科
**** 九州大学工学部建設都市工学科

Dept. of Environmental Science, Tottori Univ.
Rural Engineering Research Center, Tunisia
Dept. of Water Resources Engineering, Lund Univ., Sweden
Dept. of Civil Engineering, Kyushu Univ.

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シェルフ実験農場（図-1）で実施された。同地は地中海性気候（温帯冬雨気候）に含まれ、雨期・乾期の区別が明白であり、実験は現地の雨期である12月（1994年）に実施された（図-2）。実験が行われた畑地の土壌断面は3層に分離され、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（Bahri 他, 1993; Yasuda 他, 1994）。

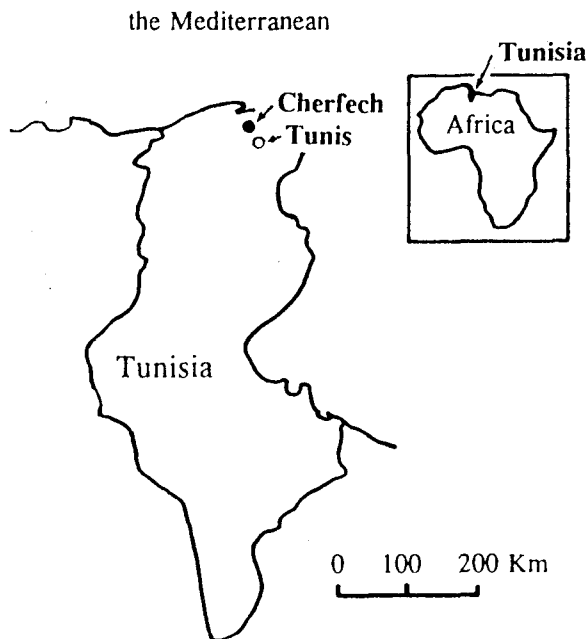


図-1 Cherfech farm land, Tunisia

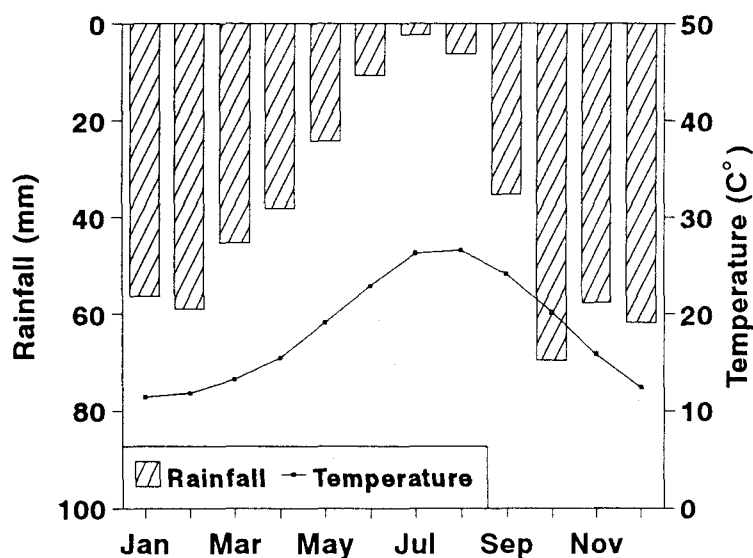


図-2 Monthly rainfall and temperature in Tunis

3. 実験

3.1 染料の地中への注入

本研究に先立ちシェルフ実験農場では 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。土壌断面が染色された様子を観察・写真撮影し非均一的 (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-3のような鉄製二重枠を用い（内枠 1.0x1.0m, 外枠 2.0x2.0m）を用いて実験が行われた。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、インタークレート試験と同様の手順により、内枠に

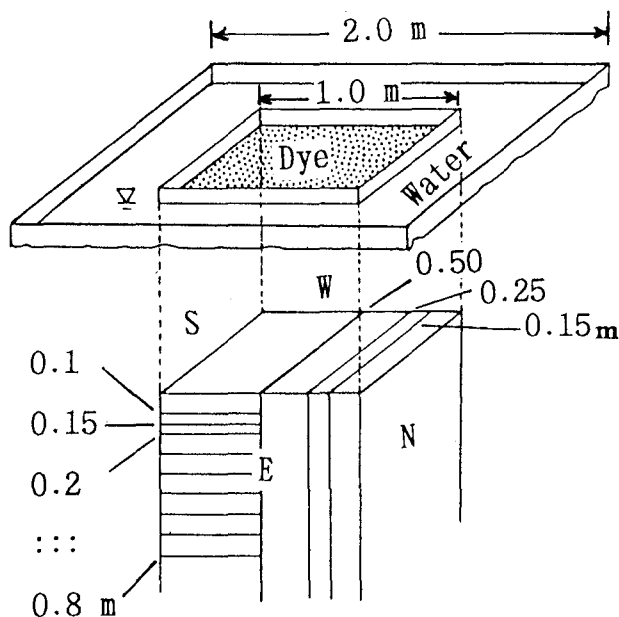


図-3 Experimental arrangement

青色染料 (C.I. Food blue 2) の溶液 (4,000 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、北側から南側に向かって 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 (北側) 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 (実験区画北側より 0, 0.15, 0.25, 0.50 m) を観察・写真撮影の後、残り南側 0.5 m につき水平断面 (0.10, 0.15, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70, 0.80 m 深) を観察・写真撮影したものである。

4. 実験結果

4.1 土壌水分

図-4に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北側から南へ 0.15, 0.25, 0.50 m の鉛直断面中央における土壌水分量である。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 深までは現地の雨期でありながら乾燥状態にあり、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 染料

図-5に北側鉛直断面における染色パターンを示す。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がっているものの、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 (図-5)。およそ 0.1m 深までは散布域全体にわたり均等に染料が拡がったものであるが 0.1m より下では、2~3の優勢な染色域が認められ、3つ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

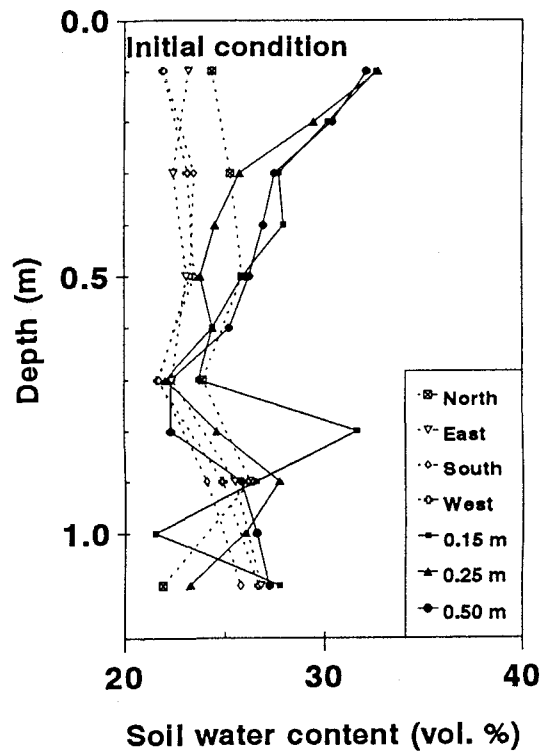


図-4 Soil water profile

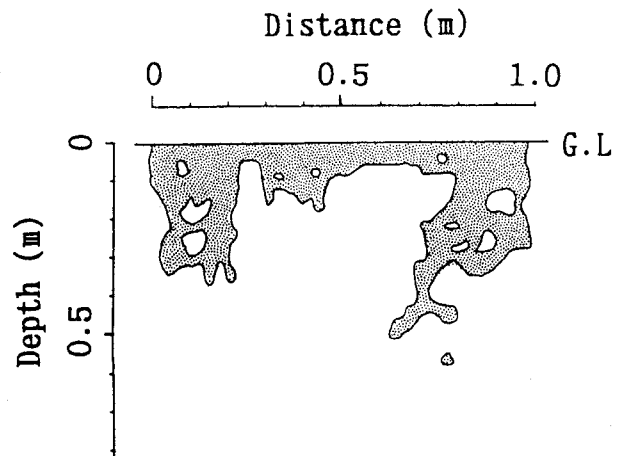


図-5 Dye pattern(N 0 m)

到達しておらず、散布域下での著しい不均一性が確認された。特に図の右側(W側、横軸0.7–1.0 m)では染色域の下方への移動が著しい上に0.3–0.5m深で左方へのよじれが認められる。この結果はFlury他(1994)のスイスにおける実験結果と一致するものである。これら、染料の大量通過域は亀裂、マクロポアーの存在による高透水域であり、ミクロス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次元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一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。

5. 数値計算の検討

現場の状況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られた。土壌水分特性はvan Genuchten model(vG model)を用い、計算のパラメーターは表ー1の通りである(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。

表ー1 Parameters for the computer simulation

	S _s	S _r	a(1/cm)	n	k _s (cm/sec)
第1層 (0.0–0.4 m)	0.150	0.399	0.0046	2.10	0.0006
第2層 (0.4–1.3 m)	0.130	0.379	0.0102	1.98	0.0012

ここに、S_s;飽和体積含水率、S_r;最小容水量、a, n;vG modelパラメター、k_s;飽和透水係数、

図ー6は染料注入後1, 3, 6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(図ー3)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、図ー6の右の染料の移動はマクロポアー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ター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次元マクロポアー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次元の非均一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。

**Dye transport
(relative concentration)**

**Water transport
(volumetric water content)**

**Dye Transport for
high permeability
(relative concentration)**

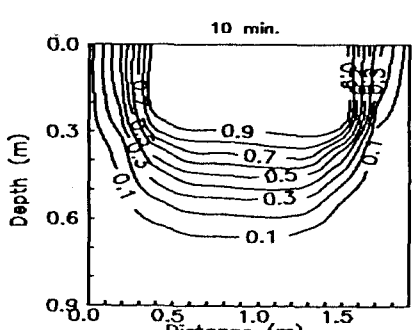
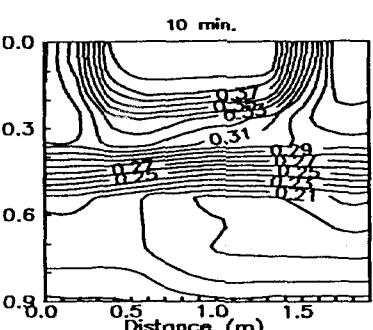
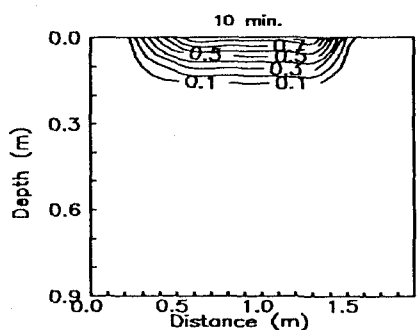
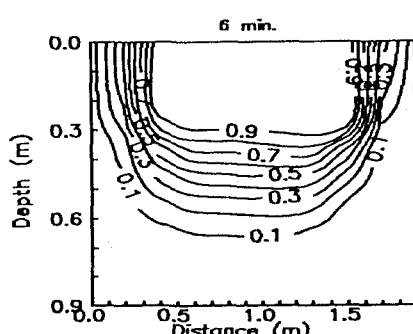
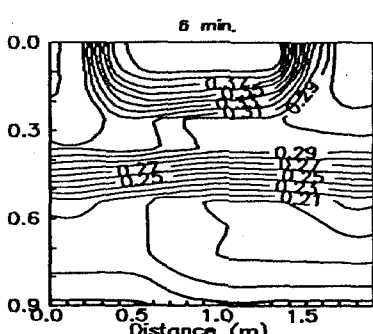
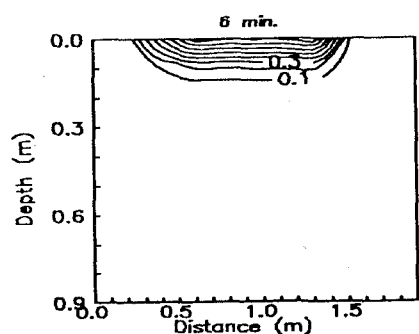
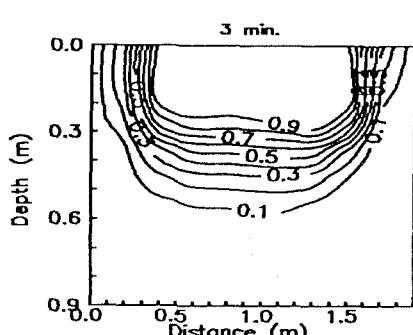
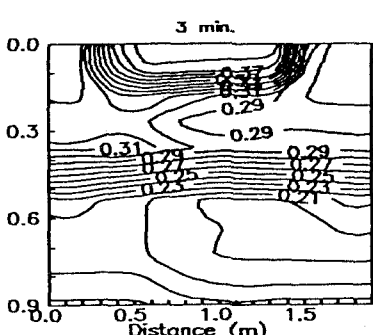
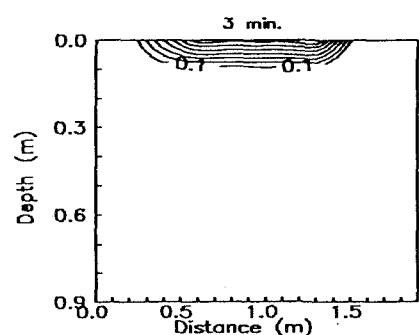
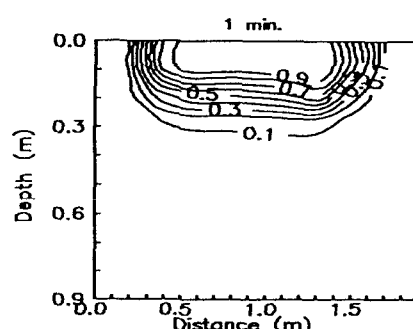
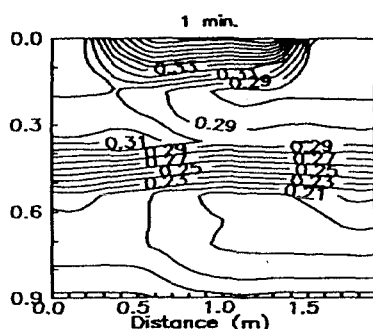
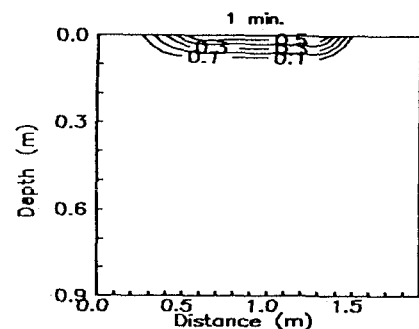


图-6 Computer simulation

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

6. 考察・結論

1) 汚染物質の土中の移動は不均一的である。実験結果が示すように、染料の土中の移動は著しい不均一性を示しており、数センチメートル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。

2) 断面全体に対し平均的に数値モデルを適応してもこのような不均一的な汚染物質の移動は評価できない。

3) 2次元の非均一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、詳細なシミュレーションにはマクロポーア沿いの流れ (preferential flow) を考慮した3次元モデルが必要である。数値シミュレーションモデルでこのような極端なパラメーター分布を取り扱うのは困難であるので、何らかの統計的手法が期待される。

おわりに

この研究はスウェーデン国土研究協力機構 (SAREC) 及び日本国住友財団の援助を受けて実施されたものです。

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

Impact of sewage sludge application on drainage water quantity and quality. Science du sol. 30:57-74 1992.

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 variety 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, 1994.

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. 1994

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