砂丘砂中の不均一な染料浸透に対する ランダムカスケードモデルの応用

王 康¹⁾ 安田 裕¹⁾ 安養寺 久男¹⁾
Mohamed Abd Elbasit Mohamed Ahmed¹⁾

¹⁾鳥取大学乾燥地研究センター
(〒680-0001 鳥取市浜坂1390)

本研究はランダムカスケードモデルを土壌中の移動現象の解析に用いたものである。砂丘砂を対象として染料トレーサー実験を実施し、染料浸透パターンをデジタル解析した。染料浸透による染色パターンは3つの実験スケール、0.25、0.50および1.00 mすべてにおいて不均一性を示していた。ランダムカスケードモデルを染料浸透パターンに就いて応用し、不均一な染色パターンがランダムカスケードモデルにより説明可能であることを明らかにした。ランダムカスケードジェネレーターの分布型として対数正規分布を用い、実験結果に就いて適合性があることが示された。各実験における最大染料浸透深はスケールに比例していた。推定されたランダムカスケードモデルパラメターの標準偏差 σ は、実験スケールに依存する傾向を示していた。

キーワード：ランダムカスケードモデル、不均一性、染料トレーサー実験、カスケードジェネレーター

I. はじめに

土の中の移動現象が不均一であることは多くの研究者が報告してきたことである（例えば、Yasuda *et al.*, 1994; Berndtsson *et al.*, 1996; Yasuda *et al.*, 1998; Persson *et al.*, 2000; Olsson *et al.*, 2001; Öhrström *et al.*, 2002）。特に地表面から地下水面までのベイドスゾーン（宮崎，2000）内での物質移動は土壤汚染・地下水汚染に対する影響から、その定量的評価が求められるものであるが、不飽和であることに加えて土の不均一性のため、計測・評価は困難なものになっている。

このような土の不均一性の評価の方法として、土の断面を染料で染色し染色パターンを画像処理する方法が提案されている。染料は直接的な視覚性があることに加え低価格であるため、土の中の浸透現象を表示するトレーサーとして不均一な移動現象の情報を提供してきた（Bouma and Dekker, 1978; Flury and Flühler, 1995; Yasuda *et al.*, 2001; Persson *et al.*, 2001; Öhrström *et al.*, 2002）。

不均一な土壌中の移動現象は3次元的な間欠性を持っているので、ダイナミックモデルでの評価は困

難である。このような土の中の不均一移動現象に対する取組みとして、染料トレーサー実験を拡散律則凝集モデル（Diffusion Limited Aggregation: DLA）で評価した研究（Flury and Flühler 1995; Persson *et al.*, 2001）、ランダムカスケードモデルを用いた研究（Olsson *et al.*, 2002）などがある。従来、ランダムカスケードモデルは降雨量の評価に用いられてきたものである（Olsson and Berndtsson, 1998; 陸・山本, 2005）。本研究はランダムカスケードモデルを砂丘圃場中での不均一的な染料浸透の評価に応用し、パラメーター推定の方法、スケールによる相違などを検討したものである。

II. 実験

1. 試料土

本研究の実験は鳥取大学乾燥地研究センター内に造成された平坦な砂丘圃場で実施された（35° 32' N, 134° 13' E）。サイトの地下水位は5 mより深く、地表面からの浸透は地表面下、地下水面以上のベイドスゾーンへの浸透であると考えられる。鳥取砂丘

表－1 深度別の鳥取砂丘砂の特性

Table 1 Vertical profile of Tottori dune sand properties.

Depth (m)	Sand (kg kg ⁻¹)	Silt (kg kg ⁻¹)	Clay (kg kg ⁻¹)	Bulk density (kg m ⁻³)	Porosity (%)	Saturated hydraulic conductivity (m s ⁻¹)
0 – 0.10	0.880	0.040	0.080	1550	39.53	3.30×10^{-5}
0.10 – 0.20	0.965	0.002	0.033	1520	40.21	2.66×10^{-4}
0.20 – 0.50	1.000	0.000	0.000	1430	38.67	3.76×10^{-4}
0.50 – 1.00	1.000	0.000	0.000	1510	38.55	3.76×10^{-4}

砂の特性を表－1に示す．土質はUSDA-SCSによる分類であり，乱さない試料による定水頭透水試験法（例えばJury et al., 1991）を用いて測定された．これらの特性は3サンプルずつ採取して求められた．

2. 染料

土壌断面を染色する染料として，食品用染料であるブリリアント・ブルー（青色1号: キリヤ化学薬品）を用いた．ブリリアント・ブルーは食品添加物として使われる商品であり，水に溶けやすく，水溶液は土に接触した部位に明確な可視の青を与える．この性質が着目され，ブリリアント・ブルーは，不均一な土壌中の浸透流を視覚化するために多くの研究者（Flury and Flühler 1995; Yasuda et al., 2001; Öhrström et al., 2002; Olsson et al., 2002; Öhrström et al., 2004; Kim et al., 2004）によって使われている．本研究ではこれらの研究結果を参考にして，染料溶液濃度は $4 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-3}$ とした．

3. 実験方法

本研究の実験は，粘性土において染料トレーサー実験を行ったYasuda et al. (2001) の実験法を参考にして実施された．

染料トレーサー実験は図－1に示すような大小2種の正方形のプラスチックフレーム（内枠，外枠）を1組としたプロットを用いて行った．外枠フレームは $2.00 \text{ m} \times 2.00 \text{ m}$ の1種類のみとして，内枠フレームを3種類（ $1.00 \text{ m} \times 1.00 \text{ m}$ ， $0.50 \text{ m} \times 0.50 \text{ m}$ ， $0.25 \text{ m} \times 0.25 \text{ m}$ ）用意し，これら3つのスケールについて実験を行った．この3種のサイズのセットをそれぞれ2回ずつ使い，計6回の実験を行った（プロット1-6）．畑地灌漑の分野で実施されるインテークレート試験と同様の要領で（中野ほか，1995），内枠フレーム（ $1.00 \text{ m} \times 1.00 \text{ m}$ ， $0.50 \text{ m} \times 0.50 \text{ m}$ ， $0.25 \text{ m} \times 0.25 \text{ m}$ ）のまわりに 2.00 m の外枠フレームを囲むよう設置し， 0.50 ， 0.75 ， 0.875 m の緩衝領域を保持した．

内外のフレームを設置し，内枠フレームの上をプラスチックフィルムで覆い，そこに 0.025 m 深の容量の染料溶液を散布した．そして，緩衝領域にも 0.025 m 深の水を散布し，直ちにプラスチックフィルムを取り除き，内枠フレーム内に染料溶液を均一に散布し浸透させた．その後，プロットは十分な染料浸透過程を完遂させるため24時間以上放置した．この間，プロット全体をプラスチックフィルムにより覆い蒸発を防止した．

フレームとプラスチックフィルムを取り除き，

図－1 実験区画

Fig.1 Schematic of the experimental setup.

染色パターンを観察するために水平に掘削した。0.60m深までは0.01mずつ、以降は染色が認められなくなるまで0.05mずつ掘削し、各水平面上の染色パターンをデジタルカメラにより撮影した。ただし、石や根の存在など、現場の測定上の問題により一定間隔で観測できなかった場所もある。デジタル画像は256色BMPイメージとして記録された。デジタル画像は1024×1024ピクセル（プロット1, 2）、512×512ピクセル（プロット3, 4）、及び256×256ピクセル（プロット5, 6）であり、1ピクセルはおよそ $1.0 \times 10^{-6} \text{m}^2$ に対応している。

デジタル画像はWindows上の普遍的なソフト（ペイントなど）により圧縮のかかっていないBMPイメージに変換し、汎用フリーソフトSTIR131によりテキスト変換の後、BMPフォーマットに対応したFortran codeプログラムを用いて256色中の染色（青色）を定義したカラーパレットを使いバイナリー（黒:染色有、白:染色無）に変換した（鈴鹿ほか, 2004）。

Ⅲ. ランダムカスケードモデル

ランダムカスケードモデルでは、染料の浸透深は以下のように示される：

$$Z(x, y) = Z_A \varepsilon(x, y) \quad (1)$$

ここに、 $Z(x, y)$ は (x, y) における染料浸透深、 Z_A は平均染料浸透深、 $\varepsilon(x, y)$ はランダムカスケード関数である。

陸・山本（2005）の降雨に対する応用例に記載されているように、ランダムカスケードの構築は平均染料浸透深を初期2次元領域（次元数： $d=2$ ）に与えることから開始される。2次元領域にランダムカスケードの分布を与えるカスケードジェネレーター $W_i(x, y)$ を以下のように定めて、この初期領域がさらに分割数 b ($b=2^d=4$) の部分領域に分割される。この分割過程がさらに繰り返される（図-2）。本研究では分割過程は第10層 ($n=10$) の1024分割になるまで繰り返した。

カスケードジェネレーターにより与えられるランダム分布は正值であり、期待値 $E\langle W \rangle = 1$ に従って独立に分布する。最終段階 n 回目での最小スケール l_0 に対応する染色深分布の場合 $\varepsilon(x, y)$ はカスケードジェネレーター $W_i(x, y)$ により以下のように示される。

$$\varepsilon(x, y) = \prod_{i=1}^n W_i(x, y) \quad (2)$$

図-2 ランダムカスケードモデルの概念
Fig.2 Schematic of discrete random cascade model
(branching number $b=4$) .

つまり n 回のカスケードジェネレーター $W_i(x, y)$ の独立試行により、実験区画の長さ L_0 から $l_0 = L_0 / \lambda^n$ までカスケードが形成され、染色深の分布の場合 $\varepsilon(x, y)$ が生成される。ここで、 λ ($=2$) は連続したスケール間にわたる一定のスケール比である。

カスケードジェネレーターの形式として、様々なモデルが提案されている。本研究では、多くの研究者により土壌の水理特性を表すとされている対数正規分布（例えば、Rao *et al.*, 1979; Gilbert 1987; Boll *et al.*, 1997; 齋藤・川谷, 2000; Gimenez *et al.*, 2001, 羽山・中津川, 2004）を仮定して、次のような分布を用いた（Schmitt, 2003）：

$$W_i(x, y) = \exp \left[\sigma g_0 - \frac{\sigma^2}{2} \right] \quad (3)$$

ここで、 σ は $\log W_i(x, y)$ の標準偏差、 g_0 は標準正規分布である。

ランダムカスケードモデルは乱数によるものなので、結果はバラツキをとまなう（Persson *et al.*, 2001）。そこで本研究では40回の試行を行い、その平均値を用いた。

Ⅳ. ランダムカスケードモデルの パラメータ推定

2つのパラメータ Z_A , σ の値がランダムカスケードモデルによる染料浸透深分布の構築に必要である。本研究ではパラメータ推定に2つの方法を用いた。1番目の方法では、パラメータは水平面上の各解析グリッドにおける染料浸透深の平均により与えた。2番目の方法では、水平方向の平均染色分布の鉛直分布と計算値とのフィッティングによる最適化を用いた。

1. 方法Ⅰ

この方法では、すべての水平グリッド (x, y) 上で実測された最大染料浸透深の平均値を与えた。この平均染料浸透深 Z_A が第一層で与えられ、カスケードジェネレーター $W_i(x, y)$ により順次割り当てられていく。

カスケード形成の総スケール比 $\lambda_1 = \lambda^n$ に関する $\varepsilon(x, y)$ のスケール特性は、モーメント次数 q に対して以下のように表される (Schmitt, 2003) :

$$E\langle \varepsilon(x, y)^q \rangle = (\lambda_1)^{K(q)} \quad (4)$$

ここに $E\langle \cdot \rangle$ は期待値を表す。また $K(q)$ は対数正規分布に対して次式で与えられる :

$$K(q) = \frac{\mu}{2}(q^2 - q) \quad (5)$$

この式は $q^2 - q$ と $K(q)$ の関係を表している。

これらの関係から μ は以下のようになる。

$$\mu = K(2) = \sigma^2 / \log 2 \quad (6)$$

パラメータ σ が式(5), (6) から得られる。

この欠点を補うための改良として、実際の染色範囲を以下のようにして評価する。

それは、方法Ⅰの中で、最大の染料浸透深さの上のゾーンが染料によって完全にカバーされていたと

仮定することであったと理解して (それは非均一性情報の損失を起こすかもしれない), 次に定義されるように、実際の染料浸透深さを導入した :

$$Z_{Act} = \sum_{i=1}^k \beta \Delta Z_i \quad (7)$$

ここに、 k は層の数、 ΔZ_i は各層の厚み、 β は層の染色の有無を表す指標 (染色, $\beta=1$; 非染色, $\beta=0$)。

この Z_{Act} を式(1)の Z_a として用いる。

2. 方法Ⅱ

方法Ⅱにおいては、 Z_A と σ_1 を推定するために実測の各層ごとの染色域が用いられた。 Z_A と σ_1 の組合せに対して式(3)を用いて $W_i(x, y)$ が生成され、式(1), (2)により染色深分布が計算される。このようにして生成された染色域が実測値と比較され相関係数が求められる。相関係数の最大値を与えるパラメータの組合せが最適な組合せとなる。

Ⅴ. 結果と考察

1. 染色パターン

図-3にプロット1~6 (プロットサイズはプロット1, 2: 1.00 m, プロット3, 4: 0.50 m, プロット5, 6: 0.25 m) について、水平断面の染料染色パターンのバイナリイメージが示されている。地表面上 ($z=0$ m) では全断面が染色されているが、地中には著しい不均一性がみられる。染色のパターンは実験スケールすべてにおいてきわめて不均一である。

図-4は6つのプロットで観察された水平断面上の平均染色域の鉛直分布を示す。水平面全体の完全な染色は地表面直下でのみ認められる。表-2に6つのプロットにおける染料染色深の最大値と50%染色域の深さを示す。最大の染料浸透深はプロット1とプロット2 (サイズ 1.00 m) にみられ、染料浸透深は実験スケールの拡大によって増大する傾向を示している。

表-2 最大染料浸透深と水平面50%が染色された深さ

Table 2 Maximum dye infiltration depth and depth where 50 % of the horizontal section was covered by dye.

Size	Plot 1	Plot 2	Plot 3	Plot 4	Plot 5	Plot 6
	1.00×1.00 m		0.50×0.50 m		0.25×0.25 m	
Max. depth (m)	0.92	1.14	0.86	0.77	0.52	0.58
50% dye coverage (m)	0.32	0.175	0.17	0.25	0.11	0.04

図-3 水平面上の染料染色パターンのバイナリーイメージ. z は地表面からの深さ (m)
Fig.3 Binary image of dye stained pattern in the horizontal sections. z is depth from the ground surface (m).

図-4 染色域の鉛直分布 (プロットサイズ Plot 1, 2: 1.00 m, Plot 3, 4: 0.50 m and Plot 5, 6: 0.25 m)
Fig.4 Vertical distribution of dye coverage. (Plot size, Plot 1, 2: 1.00 m, Plot 3, 4: 0.50 m and Plot 5, 6: 0.25 m)

図-5 同一スケールのプロット間の染色域の差異 (a)プロット1-2, (b)プロット3-4, (c)プロット5-6
Fig.5 Dye coverage difference between pair of plots of the same scale. (a) Plot 1 and 2, (b) Plot 3 and 4, and (c) Plot 5 and 6.

図-5は同一スケールにおける染色域の差異を見るために、同一スケールであるプロット1-2, プロット3-4, プロット5-6間での染色域の差異に対し、スプライン多項式曲線をあてはめたものである。それぞれの対の比較に関して深度方向の差異が計算された。差異が有意かどうかを判定するために95%信頼区間を用いた。もし95%信頼区間に含まれなければ差異は有意である(例えばLogsdon *et al.*, 2002)。図-5にあるように、同じスケールのペアにおいても、染色率の鉛直分布は大きく異なっている。染料浸透は不均一的であり同一スケールでも再現性は低い。

2. ランダムカスケードモデルによる染料浸透の再現

実験によって得られた不均一な染料浸透の分布をランダムカスケードモデルにより再現するため、まず方法Iに従い実測の染料浸透深をもとにパラメータ推定を行い、染料浸透を計算した。図-6は q^2-q と $K(q)$ の計算値を示しており、この勾配から σ が求められる。 q^2-q と $K(q)$ の関係は相関寄与率 R^2 が0.96以上であり、対数正規分布がよく対応していることを表している。

方法Iによる推定値、 Z_{A1} と σ_1 方法IIによる推定値、 Z_{A2} と σ_2 は表-3に示してある。これらの値を用

図-6 $K(q)$ と $(q^2-q)/2$ の関係
Fig.6 Relationship between $K(q)$ and $(q^2-q)/2$.

図-7 方法 I, II, 方法 I の改良により求められた水平面染色域の鉛直分布

Fig.7 Vertical distribution of horizontal dye coverage calculated by the method I, the method II and the modified method I.

いて染料浸透深の場が形成される。ランダムカスケードモデルによる水平断面の染色率の鉛直分布と実測値との比較が図-7に示してある。方法Iにおける3次元の不均一情報の欠落により、方法IIによる結果よりも高い染色率を与えている。図-7では、方法IIによる結果は方法Iのものより良い結果を与えている。方法IIは実測値とのフィッティングによるもの

なのでよい適合を与えていることになる。

また方法Iの改良によるパラメータ推定値, Z_{A1}^* , σ_1^* も表-3に示している。この方法Iの改良による結果は、プロット3に対しては方法IIとほぼ同様のよい適合結果を与えている。

方法I, 方法I改良, および方法IIによる測定値とシミュレーション値との間の平均二乗誤差を比較す

表-3 ランダムカスケードモデルのパラメータ

Table 3 Parameters of the random cascade model.

Size	Plot 1	Plot 2	Plot 3	Plot 4	Plot 5	Plot 6
	1.00×1.00 m		0.50×0.50 m		0.25×0.25 m	
Z_{A1} (m)	0.52	0.45	0.48	0.37	0.17	0.14
σ_1	0.084	0.125	0.096	0.116	0.135	0.127
Z_{A2} (m)	0.37	0.37	0.36	0.32	0.15	0.14
σ_1^*	0.835	0.303	0.897	0.291	0.346	0.306
Z_{A1}^* (m)	0.35	0.43	0.43	0.33	0.12	0.12
σ_2^*	0.955	1.434	0.922	0.801	0.590	0.401

Z_{A1} , σ_1 , the estimated values by the method, Z_{A1}^* , σ_1^* , the estimated values by the modified method and Z_{A2} , σ_2 , the estimated values by the method II.

Z_{A1} , σ_1 , 方法 I による推定値, Z_{A1}^* , σ_1^* , 方法 I の改良による推定値, Z_{A2} , σ_2 , 方法 II による推定値

表-4 各方法による計算値と実測値の誤差

Table 4 Root mean square error between calculated and observed dye coverage.

	Plot 1	Plot 2	Plot 3	Plot 4	Plot 5	Plot 6
方法 I	0.3129	0.3710	0.3509	0.2114	0.2122	0.4486
方法 I 改良	0.0907	0.2059	0.0604	0.1009	0.1319	0.3313
方法 II	0.0874	0.0708	0.0560	0.0552	0.0516	0.3008

ると表-4のようになる。方法Iの誤差は大きい方法I改良では誤差が小さくなり、方法IIの誤差は方法Iと方法I改良より小さいものであった。

これは方法Iでは、最大染色深より上にある層はすべて染色域であるとしていることから、鉛直方向の不均一情報が十分ではないことによる。

これらの方法によって推定されたパラメータ σ はカスケードジェネレーターによって与えられる場の標準偏差である(式(4))。つまり σ は染料染色深のバラツキを示すものであり、土壌構造の不均一性を表す一つの指標と考えられる。表-3に示した σ の推定値は実験スケールの拡大に伴い増加する傾向を示している。誤差が最も小さかった方法IIによる σ_2 の値とスケールとの関係を示す図-8ではスケールに伴う値の増加傾向が見られる。各実験スケールについて2つずつの推定値なので普遍的とはいえないが増加傾向をみることはできる。

図-8 実験スケールとランダムカスケードパラメータ σ_2 (方法IIによる推定値)

Fig.8 Relationship between the experimental scale and the random cascade parameter, σ_2 (estimated by the method II).

本研究でもOlsson *et al.*, (2002) により提案されたランダムカスケードモデルの有用性が確認された。Olsson *et al.*, (2002) で用いられた最大染色深の概念では、最大染色深より上の領域はすべて染色されて

いるということになるので、本研究ではこれを修正する方法を示すことにより適合の改善をみた。

VI. 結論

不均一な土の中の流れを評価するために現場で染料トレーサー実験が行われ、ランダムカスケードモデルが流れのシミュレーションに使われた。実験結果は3つの実験スケール、0.25, 0.50, 1.00mにおいて著しい不均一性を示していた。パラメータを推定する適切な方法を用いることにより、ランダムカスケードモデルは浸透過程を表現した。求められたパラメータのうち、領域の不均一性を特徴づける標準偏差 σ が実験スケールに伴い増加傾向を示していた。

参考文献

- Berndtsson R, Nodomi K, Yasuda H, Persson T, Chen H, Jinno K. 1996. Soil water and temperature patterns in an arid desert dune sand. *Journal of Hydrology* 185: 221-240.
- Boll J, Selker JS, Shalit G, Steenhuis TS. 1997. Frequency distribution of water and solute transport properties derived from pan sampler data. *Water Resources Research* 33 : 2655-2664.
- Bouma J, Dekker L. 1978. A case study on infiltration into dry clay soil. Morphological observations. *Geoderma* 20: 27-40.
- Flury M, Flühler H. 1995. Modeling solute leaching in soils by diffusion-limited aggregation, Basic concepts and applications to conservative solutes. *Water Resources Research* 31: 2443-2452.
- Gilbert, RO. 1987. Statistical methods for environmental pollution monitoring, New York, Van Nostrand Reinhold: 320.
- Gimenez D, Rawls WJ, Pachepsky Y, Watt JPC. 2001. Prediction of a pore distribution factor from soil texture and mechanical parameters. *Soil Science*. 166: 79-88.
- Jury WA, Gardner WR, Gardner WH. 1991. Soil physics. 5th ed. John Wiley & Sons Inc. 80.
- Kim JG, Chon CM, and Lee JS. 2004. Effect of structure and texture on infiltration flow pattern during flood irrigation. *Environmental Geology* 46: 962-969.
- Logsdon SD, Kaspar TC, Meek DW, Prueger JH. 2002. Nitrate leaching as influenced by cover crops in large soil monoliths. *Agronomy Journal* 94: 807-814.
- Olsson J, Berndtsson R. 1998. Temporal rainfall disaggregation

- based on scaling properties. *Water Science and Technology* 37: 73-79.
- Olsson J, Berndtsson R, Bahri A, Persson M, Jinno K. 2001. Nonlinear and scaling spatial properties of soil geochemical element contents. *Water Resources Research* 37: 1031-1042.
- Olsson J, Persson M, Albergel J, Berndtsson R, Zante P, Öhrström P, Nasri S. 2002. Multiscaling analysis and random cascade modeling of dye infiltration. *Water Resources Research* 38, 1263. Doi, 10. 1029/2001 WR 00080.
- Persson M, Berndtsson R, Nasri S, Albergel J, Zante P, Umegaki P. 2000. Solute transport and water content measurements in clay soils using time domain reflectometry, *Hydrological Science Journal* 45: 833-847
- Persson, M, Yasuda H, Albergel J, Berndtsson R, Zante P, Nasri S, Öhrström P. 2001. Modeling plot scale dye penetration by a diffusion limited aggregation (DLA) model. *Journal of Hydrology* 250: 98-105
- Rao PV, Rao PSC, Davidson, JM, and Hammond, LC. 1979. Use of goodness-of-fit tests for characterizing the spatial variability of soil properties. *Soil Science Society of America Journal* 43: 274-278.
- Schmitt FG. 2003. A causal multifractal stochastic equation and its statistical properties. *European Physics Journal B* 34: 85-98.
- Yasuda H, Berndtsson R, Bahri A, Jinno K. 1994. Plot-scale solute transport in a semiarid agricultural soil. *Soil Science Society of America Journal* 58: 1052- 1060.
- Yasuda H, Berndtsson R, Persson H, Bahri A, Jinno K. 1998. Lateral bromide distribution in a vertic clay soil. *Soil Science* 176: 544-555.
- Yasuda H, Berndtsson R, Persson H, Bahri A, Takuma K. 2001. Characterizing preferential transport during flood irrigation of a heavy clay soil using the dye Vitasyn Blau. *Geoderma* 100: 49-66.
- Öhrström P, Persson M, Albergel J, Zante P, Nasri S, Berndtsson R, Olsson J. 2002. Field-scale variation of preferential flow as indicated from dye coverage. *Journal of Hydrology* 257: 164-173.
- Öhrström P, Hamed Y, Persson M, Berndtsson R. 2004. Characterizing unsaturated solute transport by simultaneous use of dye and bromide. *Journal of Hydrology* 289: 23-35.
- 羽山早織・中津川誠 (2004) : サロベツ湿原の地下水環境と植生変化について 北海道開発土木研究所月報 612, pp. 3 - 20.
- 陸 旻皎・山本隆広 (2005) : ランダムカスケードモデルの基本高水流量算定への可能性について 水文・水資源学会誌 18, pp. 132-139.
- 宮崎 毅 (2000) : 環境地水学 東京大学出版会
- 中野政詩・宮崎 毅・塩沢 昌・西村 拓 (1995) : 土壌物理環境測定法, 東京大学出版会.
- 齋藤雅彦・川谷 健 (2000) : 透水係数の空間分布に関する理論的考察, 土木学会論文集 No. 645/Ⅲ-50, pp. 103 - 114.
- 鈴鹿淳一・安田 裕・猪迫耕二・田熊勝利・大野香織 (2004) : 塩類集積時に生じる塩結晶のデジタル解析, 砂丘学会誌, 51, pp. 27-32.

(受付: 2005年5月13日, 受理: 2005年12月9日)

Application of Random Cascade Model to Heterogeneous Dye Infiltration in Dune Sand Dye Infiltration in Dune Sand

Kang WANG ¹⁾ Hiroshi YASUDA ¹⁾ Hisao ANYOJI ¹⁾ Mohamed Abd Elbasit Mohamed Ahmed ¹⁾

¹⁾Arid Land Research Center, Tottori University
(1390 Hamasaka, Tottori 680-0001, Japan)

This study presents an application of the random cascade model to the evaluation of the transport phenomenon in soil. Dye tracer tests were carried out and dye staining patterns were digitized for the analysis. The dye staining pattern showed heterogeneous response in all of experimental scales, 0.25, 0.50 and 1.00 m. The random cascade model was applied to the dye infiltration patterns and heterogeneous dye infiltration patterns were well described. The lognormal distribution was used to the random cascade generator and conformability result was shown. Maximum dye infiltration depth in case of each experiment was proportional to the experimental scale. Estimated parameter of the random cascade model, σ (standard deviation) showed a tendency of the scale dependency.

Key words : Cascade generator, Dye tracer test, Heterogeneity, Random cascade model.