

表層不飽和土壌層での溶質移動パラメータ の空間分布特性と観測スケールの影響

SPATIAL DISTRIBUTION OF PARAMETERS FOR SOLUTE INFILTRATION INTO UNSATURATED SURFACE SOIL AND EFFECT OF OBSERVATION SCALE

坂本康¹・穴水大介²・平山公明³・熱田洋一⁴・西田継⁵

Yasushi SAKAMOTO, Daisuke ANAMIZU, Kimiaki HIRAYAMA, Yohichi ATSUTA, and Kei NISHIDA

¹正会員 工博 山梨大学教授 工学部土木環境工学科 (〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11)

²工学 甲府市水道局 (〒400-0046 山梨県甲府市下石田二丁目 23-1)

³正会員 工博 山梨大学助教授 工学部土木環境工学科 (〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11)

⁴学生員 工修 山梨大学大学院博士後期課程 (〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11)

⁵博 (工) 山梨大学助教授 工学部土木環境工学科 (〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11)

Spatial distribution of parameters for solute infiltration into unsaturated surface soil was observed in 3m x 3m plot. Parameters were determined for 16 undisturbed soil columns (dia.=5cm, length = 5cm) by infiltration experiments and examined for their statistical characteristics. Then parameters of unobserved points were interpolated by universal kriging and were examined for their statistical characteristics, space-distribution characteristics, and effect of scale-dependency of observation. The results showed that interpolated principal component scores derived from convection velocities and dispersion coefficients showed a similar distribution to normal distribution and that solute transport parameters had bigger coefficients of variation than soil physical parameters. The results also showed that the spatial distributions of points with extreme values of parameters had fractal dimensions and this may cause the scale-dependency of parameters.

Key Words: *unsaturated surface soil, solute infiltration parameters, convection-dispersion, spatial distribution, fractal dimension, scale dependency*

1. はじめに

水文過程で現在最も不十分な知識しかない部分の一つは不飽和土壌中の水の移動である。水の移動に関する理論はあるが、パラメータの推定については十分な手法はないといえる。これはパラメータの空間分布特性の理解が不十分なこと、パラメータの空間分布にスケール依存性があること¹⁾による。このため、地下水への水と汚染物質の移動量の推定が困難な状況にある。この水や溶質の移動に関するパラメータの空間分布についての研究は、1) この空間分布の特性はどのようなものでどのような方法で表現できるか^{1), 2), 3) 4), 5)}, 2) この空間分布が移動量の推定にどのように影響するか^{6), 7), 8)}, 3) この空間分布の原因はなにか、土壌物理特性値、土壌構造の空間分布とどのように関係しているか^{9), 10)}という3方面からの研究が考えられる。しかし、既往の研究は2)で対数正規分布な

どの頻度の影響を検討したものが多く、空間分布の影響の検討や1), 3)の研究例は少ない。また、側方飽和流を対象としたものがほとんどであり、鉛直不飽和流での水平方向分布の研究¹¹⁾はほとんどない。本研究は、この鉛直不飽和流について、1)の視点に立ち、パラメータの空間分布とその影響を検討した。具体的には、格子点上の測定値の統計的特性を検討した後に、測定値から地質統計的手法 (geostatistics)¹²⁾で内挿したパラメータの空間分布について観測スケールの影響を評価した。

2. 方法

(1) 測定方法

検討対象とした溶質移動パラメータは、桃園から採取した不攪乱土壌について測定した値である。採取は図-1のように1m間隔で3m×3mの範囲の格子点 (4個×4個、

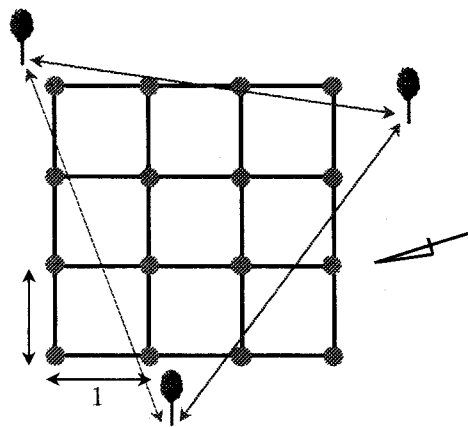


図-1 試料土採取位置概要図

表-1 溶質移動パラメータの主成分分析結果

		主成分 1	主成分 2	主成分 3
固有ベクトル	ub	0.520	0.191	-0.729
	uc	0.525	-0.450	-0.136
	Db	0.437	0.778	0.381
	Dc	0.514	-0.395	0.552
固有値		3.048	0.621	0.271
寄与率(%)		76.205	15.524	6.782
累積(%)		76.205	91.729	98.511

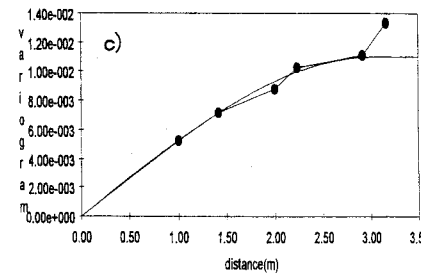
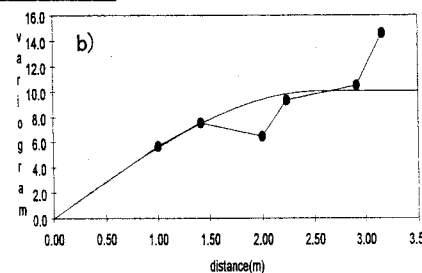
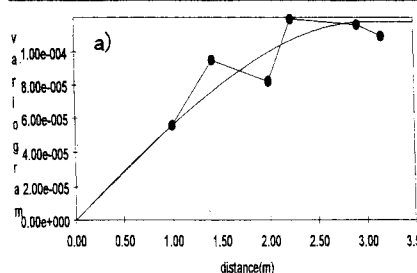


図-3 観測値のバリオグラム (a) 移流速度, b) 溶質移動主成分得点, c) 湿潤密度)

計 16 個) で行った。測定したパラメータは、土壌物理特性パラメータ (密度、体積含水率、平均径など 8 種)、溶質移動パラメータ (移流速度、分散係数) である。測定は、1) 採取土壌カラム (直径 5cm、長さ 5cm の円柱状不攪乱土) の重量測定、2) 土壌カラムへの純水の通水 (約 30mm/h で 150 分) と流出水の水質測定、3) 硝酸ナトリウム溶液 (100mg-N/l) の通水 (約 30mm/h で 180 分) と流出水の水質測定、4) 純水の通水 (約 30mm/h で 180 分) と流出水の水質測定、5) 通水終了直後の重量、乾燥後の重量の測定と粒径分布の測定という手順で行った。水質測定項目は、pH、電気伝導度 (EC)、各イオン濃度 (Cl^- 、 NO_3^- -N、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+}) である。手順 2) ~ 4) での水質変動の例を図-2 に示す。移流速度、分散係数は、手順の 3)、4) で得られた濃度変動曲線にそれぞれ一次元移流・分散方程式の計算値をあてはめて求めた。

(2) 検討対象データ

a) 代表パラメータの設定

(1) で求めた各パラメータのうち、以下の検討では推定移流速度 (u_e)、溶質移動パラメータに関する主成分分析で得られた主成分得点 (以後、溶質移動主成分得点と記

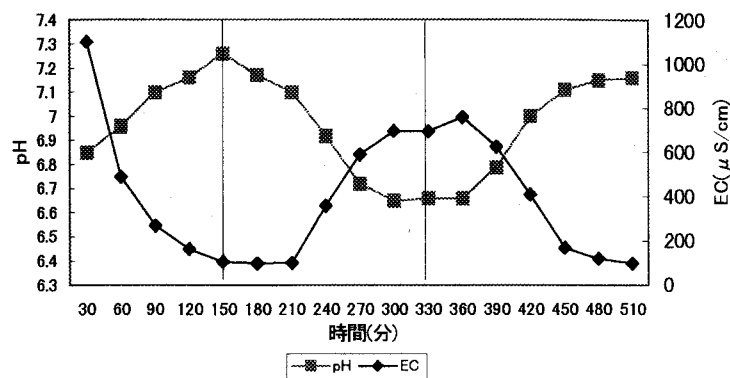


図-2 浸透実験での流出水の pH と EC の変化の例

表-2 パラメータの値の種別分け方法

パラメータ	最小値	最大値	区分番号	範囲
移流速度 u_e (cm/min)	0.050	0.079	$\text{INT}((\text{値}-0.05)/0.002)$	0-20
溶質移動主成分得点 (-)	-5.077	4.775	$\text{INT}((\text{値}+11))$	0-20
湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	1.049	1.446	$\text{INT}((\text{値}-1)/0.025)$	1-17

(注) INT(…)はカッコ内の値を越えない最大の整数を示す。

す)、湿潤密度 (ρ_t) を用いた。移流速度は 2. (1) の手順 4) の観測データによるものを用いた。溶出移動主成分得点とは、手順 3)、4) でそれぞれ得られた移流速度、分散係数の計 4 つのパラメータに対して主成分分析を行い得られた主成分の得点である。主成分分析の結果を表-1 に示す。主成分分析では第一主成分のみ固有値が 1 以上であったため、溶出移動主成分得点は 4 つのパラメータの持つ情報を一つのパラメータで表わしたものといえる。土壌物理特性パラメータでは、溶出移動主成分得点との相関係数が最も大きいこと、溶質移動主成分得点を目的変数、土壌物理特性パラメータを説明変数とした重回帰分析で重要な変数 (t 値の大きい変数) であったことから、湿潤密度を検討対象とした。

b) 内挿方法

以下の検討では、代表パラメータの実測値とともに内挿値も用いた。内挿では、16 点の実測データから 0.2m × 0.2m の格子点、16 個 × 16 個、計 256 点 (実測点 16 を含む) のデータを求めた。内挿方法は、ユニバーサル・クリッキング¹²⁾を用いた。バリオグラムを図-3 に、内挿の結果得られた等値線図を図-4 に示す。バリオグラムのモデル式としては spherical model 式¹²⁾を用いた。

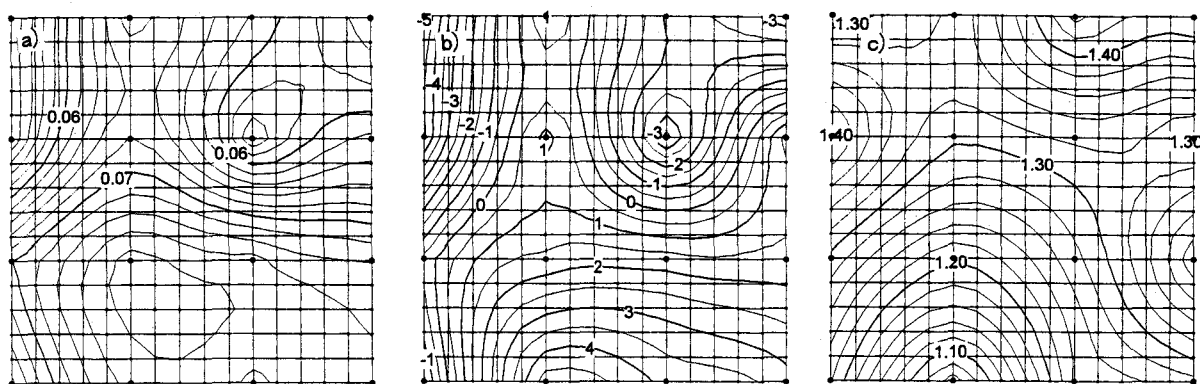


図-4 ユニヴァーサルクリッキング内挿値の等値線図 (a) 移流速度, b) 溶質移動主成分得点, c) 湿潤密度)

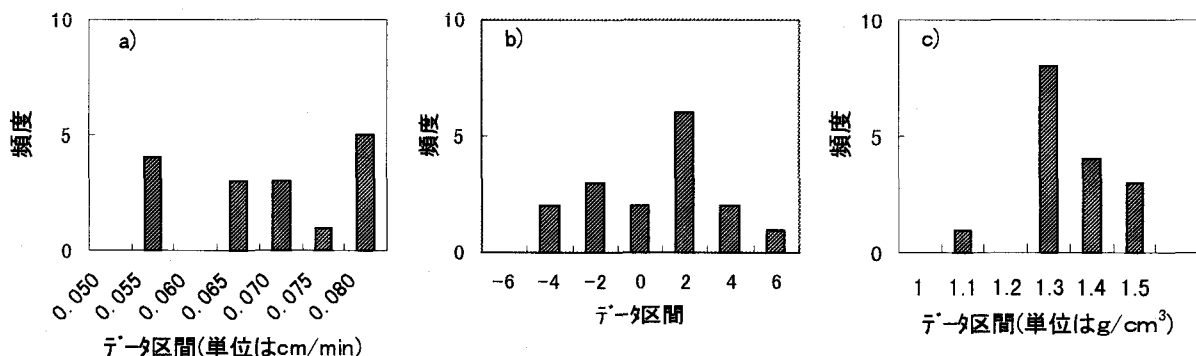


図-5 観測値のヒストグラム (a) 移流速度, b) 溶質移動主成分得点, c) 湿潤密度)

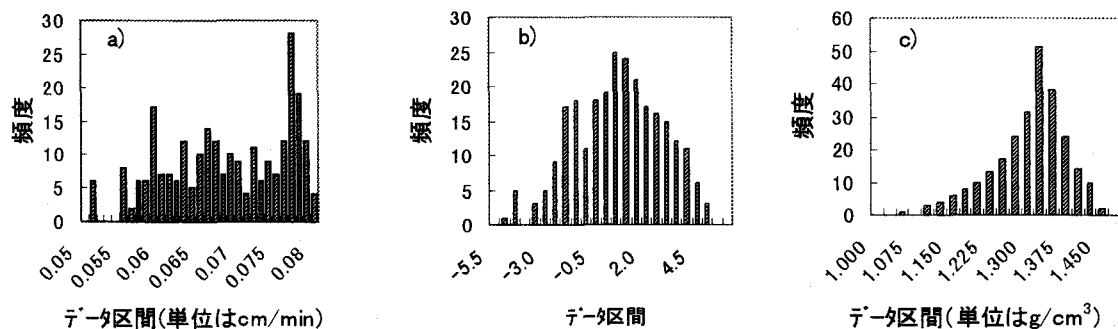


図-6 内挿値のヒストグラム (a) 移流速度, b) 溶質移動主成分得点, c) 湿潤密度)

c) 値の種別

検討には、パラメータの値そのものだけではなく、その値を大きさにより等間隔の区分にわけて設定した種別も用いた。各指標の値の範囲、種別番号（値の小さい順）の算出式と範囲を表-2 に示す。

3. 結果と考察

(1) 分布の基本特性

a) 頻度分布・変動係数・相関係数

観測値のヒストグラムを図-5、内挿値も含んだヒストグラムを図-6 に示す。観測値のヒストグラムでは、 u_c と溶質移動主成分得点については正規分布には見えない。 ρ_t は幾分正規分布的である。内挿値のヒストグラムでは、

溶質移動主成分得点については正規分布近づいている。

一方、 u_c の内挿値のヒストグラムでは、全体では一様分布のようになっている。このことから、移流速度の分布が仮に正規分布であったとしても、3m 四方で16個のデータ程度でそのパラメータを推定することはかなり困難なものと判断できる。一方、移流速度とそれと強く関係する分散係数をまとめて一つの指標とした溶質移動主成分得点では、統計的に取り扱いやすい正規分布に近づく可能性があるといえる。なお、最大値と最小値の差の平均に対する割合は、 u_c で43%、 ρ_t で31%で、3m 四方で1個のデータには最大で15-22%の誤差を含む可能性がある。

観測したパラメータ値、16個の変動係数では、土壌物理特性パラメータの変動係数が0.03-0.11であるのに対し、移流速度では0.12と0.15、分散係数では0.90と0.57と溶質移動パラメータの空間的変動が大きかった。土壌

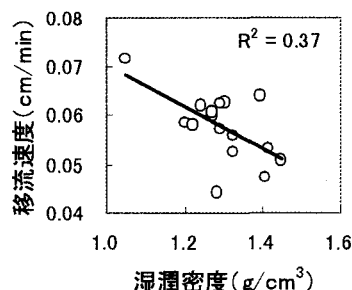


図-7 湿潤密度と移流速度の関係

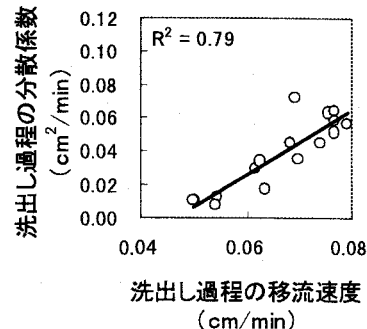
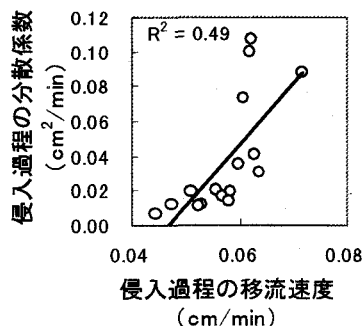


図-8 移流速度と分散係数の関係 (a) 侵入過程, b 洗出し過程)

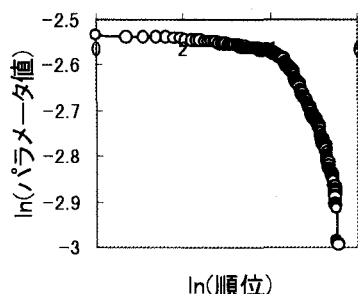


図-9 順位-値関係 (移流速度)

表-3 極端な値の点の空間分布についてのフラクタル次元

(1) 移流速度 u_c			(2) 溶質移動主成分得点			(3) 湿潤密度 ρ_t		
	全体に対する %	フラクタル次元 D		全体に対する %	フラクタル次元 D		全体に対する %	フラクタル次元 D
12以上の区分	32%	1.05	14以上の区分	30%	1.22	12以上の区分	54%	1.19
14以上の区分	6%	—	15以上の区分	24%	1.58	14以上の区分	20%	2.95
4以下の区分	18%	1.48	4以下の区分	16%	—	6以下の区分	13%	1.83

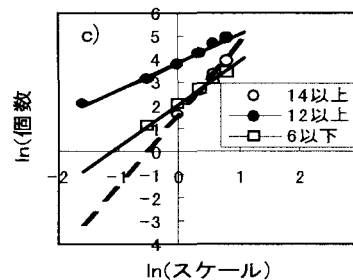
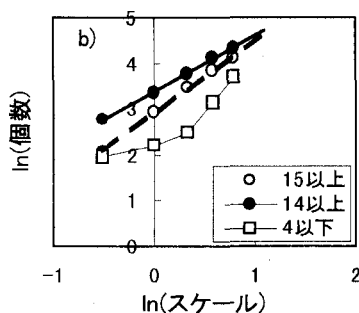
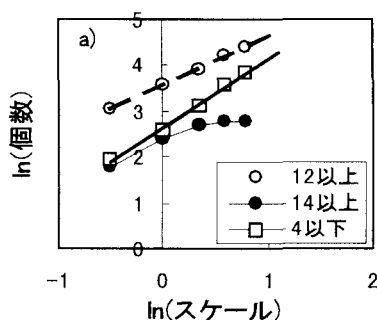


図-10 極端な値の点の空間分布 (a) 移流速度, b) 溶質移動主成分得点, c) 湿潤密度)

物理特性パラメータと溶質移動パラメータの相関係数は、図-7 の湿潤密度と移流速度の間で最大だが、それでも 0.61 にすぎない。図-7 の関係は、湿潤密度の大きい試料で移流速度が小さいことを示している。図-8 に移流速度と分散係数との関係を、手順 3) の溶質侵入過程と手順 4) の洗出し過程のそれぞれについて示す。相関係数は洗出し過程の方が大きくなった。

b) 順位-値関係

次に、パラメータの順位-値関係を検討した。パラメータ P の値を大きい順に並びかえ、大きい方から k 番目の値を $P(k)$ とし、横軸 $\ln(k)$ 、縦軸 $\ln(P(k))$ のグラフ上にプロットした。結果を溶質移動速度について図-9 に示す。図によると移流速度では $\ln(\text{順位})$ が 4 まで、つまり 256 個中大きい方から上位 55 位 (21.5%) までは、 $\ln(\text{順位})$ と $\ln(\text{パラメータの値})$ には直線関係が見られる。

(2) 観測スケールの影響

a) 極端な値の点の空間分布のフラクタル次元

極端な値の点の空間分布にはフラクタル次元が存在することが考えられる。ここで空間分布のフラクタル次元とは次式の D である。

$$M(r) \propto r^{-D} \quad (1)$$

ここに、 r : 検討対象範囲の大きさのスケール、 $M(r)$: 範囲 r 中の点の個数である。もし点が均一に分布しているときには、面積に比例して点の個数 $M(r)$ が増え、 $D=2$ となる。上式の関係があり D が 2 以外の値を取るときには、単純な均一分布とはいえず、点の空間分布に自己相似性がある。本論文では、この指標を用いてパラメータの値が極端に大きい点、小さい点が空間的にどのように分布しているかを検討した。図-10 は横軸に r の代わりに対象

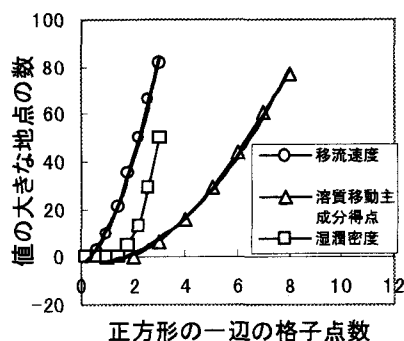


図-11 観測スケールと値の大きな地点の個数

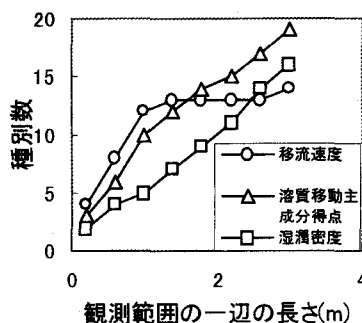


図-12 観測スケールと種別数

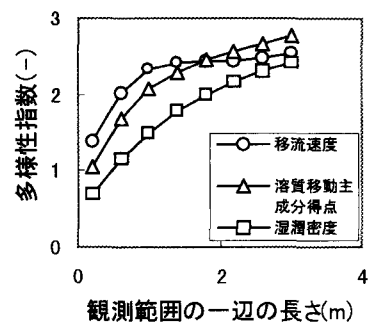


図-13 観測スケールと多様性指数

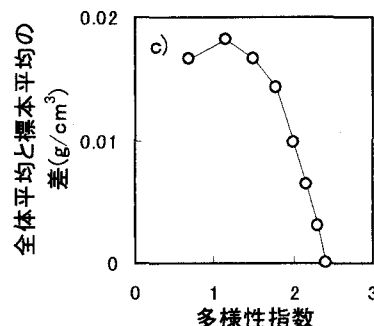
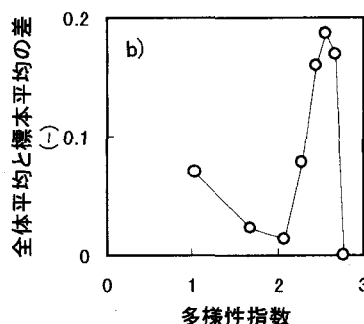
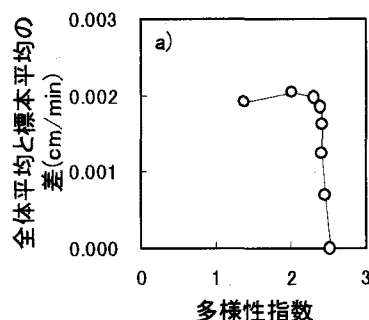


図-14 多様性指数と標本平均の誤差の関係 (a) 移流速度, b) 溶質移動主成分得点, c) 湿潤密度

範囲正方形の一辺の格子点数 n の対数、縦軸にその正方形内の各種別の個数の対数をプロットしたものである。図-10の直線の傾き D を、全体の個数に対する比率と共に表-3に示す。図のように、いずれのパラメータもフラクタル次元を持つことが多い。ただし、それぞれのフラクタル次元の間の関係には、一定の傾向は見られない。

b) 観測スケール-極端な値の地点数関係

図-11に、観測スケールとそのスケールの範囲内に存在する特に値が大きい地点の個数との関係を示す。値が特に大きい地点が均一に分布している場合には、その地点の個数は面積に比例して増えていき、スケールとの関係は原点を通る二次関数で表わせると予想される。図には二次関数で近似した曲線も示す。曲線は観測値を再現しているようにも見えるが、近似式は原点を通らないものとなった。つまり、観測値がある程度以上大きくないと値の大きな点は観測できず、ある程度以上大きいときは値の大きな点の個数はスケールの二次関数になるといえる。また、観測スケールと値が大きい点の出現確率との関係は、パラメータの種類毎でそれぞれ異なるといえる。

c) 観測スケール-種別数関係

図-12に、観測スケール（正方形の1辺の長さ (m)）とそのスケールの範囲内に存在する種別の種類数を示す。図のように、 u_0 では1m四方の範囲で0.2m間隔で36点の試料をとれば、その中には3m四方の範囲にある256点のパラメータの値と似た値をとる試料がほとんどすべて含まれている。 u_0 のみは分布が一様分布に近いので、1m四

方の範囲で全体を代表できる試料が得られたと考えられる。一方、溶質移動主成分得点と ρ_t では、測定範囲を広げるに連れそれまでなかったパラメータ値をとる試料が含まれていく。つまり、どのように観測スケールを大きくしても、平均値に影響を与えるような試料が新たに現われる可能性があり、パラメータ値のスケール依存性が生じる可能性がある。

d) 観測スケール-多様性指数関係

標本特性値として、シャノンの情報エントロピー¹³⁾に相当する値 DI （以下、多様性指数と呼ぶ）を次式で算出した。

$$DI = - \sum N_i / N_t \log (N_i / N_t) \quad (2)$$

ここに、 N_i : 種別 i の地点数、 N_t : 全地点数である。この多様性指数は、種別数が少ないとき、あるいは種別数は多いが1種の比率が極端に大きいときなどに値が小さくなる。図-13に、観測スケールと標本の多様性指数との関係を示す。また、図-14には多様性指数と標本平均と全平均との差の絶対値との関係を示す。

図-13を見ると、3つのパラメータとも、スケールが大きくなるにつれ多様性指数が大きくなっている。ただし、観測範囲が小さいほど増加の割合は大きくなり、観測範囲が大きくなるほど増加の割合は小さくなる。また、数 m 程度の範囲の観測で多様性指数は上限に達するようにも見える。図-14の溶質移動主成分得点を見ると、標本の多様性が増すにもかかわらず誤差が大きくなる場合もあることが分かる。つまり、種別がバランスよく試料に含ま

れていても、そのことと標本平均に含まれる誤差が小さいことは必ずしも関係しない。 u_e と ρ_e ではこのようなことはない。そして、3つのパラメータとも、標本の多様性指数が2.5以上になると、標本平均と全平均との誤差は急激に小さくなる。

4. まとめ

本研究では、3m四方内の16地点の不攪乱試料について測定した溶質移動のパラメータの値、およびそれらの内挿値の空間分布と観測スケールの影響を検討した。得られた知見は以下である。

(1) 移流速度の分布に正規分布の特徴は見られないが、移流速度と分散係数をまとめた主成分の得点は正規分布に近づく可能性がある。また、3m四方で1個のデータには最大で15-22%の誤差を含む可能性がある。

(2) 土壌物理特性パラメータに比し溶質移動パラメータの変動係数は大きい。また両パラメータの相関係数は最大0.61でそれほど大きくない。

(3) 全体の上位2割程度の大きい値では順位と値の対数の間には直線関係が見て取れる。

(4) 特に値が大きい点、小さい点の空間分布はフラクタル次元で表わせる。

(5) 移流速度は、1m四方の範囲の36点の試料に3m四方の範囲の256点と似たパラメータ値をとる試料がほとんどすべて含まれた。一方、溶質移動主成分得点と湿潤密度では、測定範囲を広げるにつれそれまでなかったパラメータの値が観測された。

(6) 試料に含まれる特に値が大きな点の数は、観測面積には比例しない。

(7) 観測スケールが大きくなると試料の多様性は増すが、平均値の誤差は必ずしも小さくはならない。

謝辞

本研究をまとめるにあたっては、水理委員会水文部会第3回地下環境水文学に関する研究集会(2002/8/31-9/1)での議論を大いに参考にさせていただいた。ここに記して、この研究集会の参加者各位に多大なる謝意を表したい。

参考文献

1) Schulze-Makuch, D., Carlson, D. A., Cherkauer, D. S. and

- Malik, P. : Scale Dependency of Hydraulic Conductivity in Heterogeneous Media, Ground Water, Vol. 37, No. 7, pp. 904-919, 1999.
- 2) Goderya, F. S. : Field Scale Variations in Soil Properties for Spatially Variable Control: A Review, J. Soil Contamination, 7(2), pp. 243-264, 1998.
- 3) 神野健二, 上田年比古, 鶴田明寛, 平野文昭: 透水量係数の空間分布および2次元確率微分方程式の自己回帰係数の推定, 第29回水理講演会論文集, pp. 881-886, 1985.
- 4) 中川啓, 神野健二: 現地トレーサー試験と数値計算による不均一浸透場の推定, 土木学会論文集, No. 656/II-52, pp. 47-59, 2000.
- 5) 齋藤雅彦, 川谷健: 透水係数の空間分布モデルの適用性に関する一考察, 土木学会論文集, No. 694/III-57, pp. 245-258, 2001.
- 6) Salzman, T. and Richter, J. : Field scale vertical transport from horizontally variable local scale transport parameters, Water Resources Research, V31, 10, pp. 2453-2459, 1995.
- 7) 齋藤雅彦, 川谷健: 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, 2000.
- 8) 原田守博, 高木不折: 不均質帯水層における透水試験結果の不確定性, 土木学会論文集, No. 443/II-18, pp. 109-112, 1992.
- 9) Wheatcraft, S. W. and Tyler, S. W. : An Explanation of Scale-Dependent Dispersivity in Heterogeneous Aquifer Using Concepts of Fractal Geometry, Water Resources Research, Vol. 24, No. 4, pp. 566-578, 1988.
- 10) Moldrup, P., Olesen, T., Komatsu, T., Schjonning, P. and Rolston, D. E. : Tortuosity, Diffusivity, and Permeability in the Soil Liquid and Gaseous Phases, SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA JOURNAL, V65, 3, pp. 613-623, 2001.
- 11) 仲江川敏之, 沖大幹, 虫明功臣: Philip式に基づく浸透量集約化規範の導出と浸透パラメータ分布の集約化, 土木学会論文集, No. 642/II-50, pp. 1-18, 2000.
- 12) ASCE Task Committee on Geostatistical Techniques in Geohydrology of the Ground Water Hydrology Committee of the ASCE Hydraulics Division : Review of Geostatistics in Geohydrology, J. Hydraulic Engineering, Vol. 116, No. 5, pp. 612-658, 1990.
- 13) 日野幹雄, スペクトル解析, 朝倉書店, p. 84, 1979.

(2002. 9. 30受付)