

画像解析を用いた分散特性の実験的検討

Experimental investigation of dispersion characteristics using image analysis

井上一哉*・小林 晃*・寺村直子**・青山 成康*

Kazuya INOUE, Akira KOBAYASHI, Naoko TERAMURA, and Shigeyasu AOYAMA

1. はじめに

地盤中の物質は地下水の流れに沿う移流と間隙構造や流速に影響される分散により移動していく。物質移動を把握する上で物質の縦分散や横分散は重要な因子の1つである。本研究では、着色トレーサを用いた室内実験より得られたデジタル画像を解析することで分散係数と分散長を推定し、不飽和領域における分散特性の把握を目的としている。

2. トレーサ実験

実験では物質移動の様子を可視化するため、赤色 102 号にて着色した水溶液（濃度 $1.5 \times 10^{-3} \text{g/cm}^3$ ）をトレーサとして使用する。また浸透場には平均粒径 0.6mm と 0.07mm のガラスビーズを用い、配合割合を変えることで3種類の流れ場を形成している。Fig. 1 に van Genuchten モデル¹⁾を用いたガラスビーズの水分特性曲線を示し、Table 1 に各配合割合に対する物性値を列記する。

実験には幅 100cm × 高さ 40cm × 奥行き 10cm のアクリル製タンクを使用し、ガラスビーズを水中落下法にて充填させることにより浸透場を形成する。その後、上下流の水位差が 4cm となるようにタンク内の水を排水し、1 日程度放置することで定常の流れ場を作り出している。飽和帯 (No1) と毛管帯 (No2) に着色したトレーサを瞬時に 10cm^3 注入して、トレーサの移動を定期的にデジタルカメラで撮影し、得られた画像を画像解析で使用する。

3. 統計モデル

画像解析を適用する際には、得られた画像の濃度値を 2 値化することでトレーサ分布の時系列変化を抽出していく。抽出されたトレーサ分布から分散係数を推定するには Bear の統計モデル²⁾を用いる。Fig. 2 に示すように、時刻 $t = t_1$ において瞬時に注入された点状のトレーサ分布は $t = t_2$ ではある程度の拡がりをもって移動している。このときの時刻 $t = t_1$ から $t = t_2$ までの $\Delta t (= t_2 - t_1)$ 間に物質の粒子群が移動する平均的な距離のベクトルはトレーサ域の重心 G_1 と G_2 の移動距離から \vec{d} と表される。まず、時刻 $t = t_1$ におけるトレーサ域の形状に対して、画像解析によりトレーサの重心から輪郭までのベクトル $\vec{d}_n^1(x_n^1, z_n^1)$ を求める。ここで上付き添え字の番号は時間ステップ番号であり、

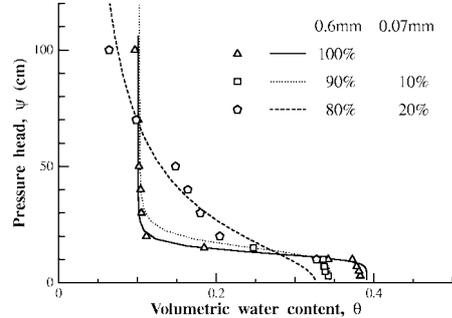


Fig.1 Water characteristic curves
ガラスビーズの水分特性曲線

Table 1: Properties of glass beads
ガラスビーズの物性値

(0.6mm:0.07mm)	配合割合 (%)		
	(100:0)	(90:10)	(80:20)
粒子密度 g/cm^3	2.48	2.48	2.48
飽和透水係数 cm/s	0.045	0.0093	0.0047
実験場の間隙率	0.39	0.35	0.33

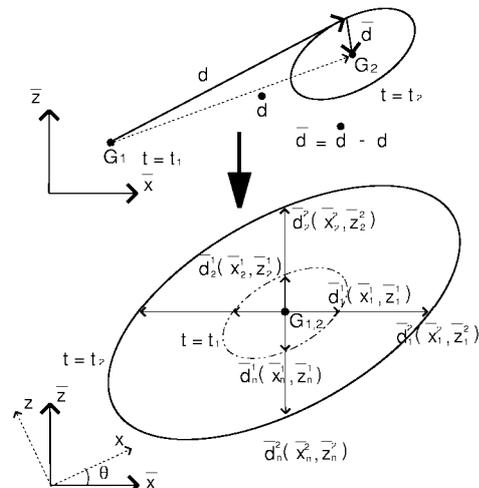


Fig.2 Estimation of dispersion coefficient
分散係数の推定方法

$$D_{ij} = \begin{pmatrix} D_{xx} & D_{xz} \\ D_{zx} & D_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n \frac{\bar{x}_m^2}{2\Delta t} & \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n \frac{\bar{x}_m \bar{z}_m}{2\Delta t} \\ \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n \frac{\bar{z}_m \bar{x}_m}{2\Delta t} & \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n \frac{\bar{z}_m^2}{2\Delta t} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} D_{xx} & D_{zz} \\ D_{zx} & D_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D_{xx} & D_{zz} \\ D_{zx} & D_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} D_{xx} &= \alpha_L |V_x| \\ D_{zz} &= \alpha_T |V_x| \end{aligned} \quad (3)$$

*京都大学大学院農学研究科；Graduate School of Agricultural Science, Kyoto University

**奈良県；Nara Prefecture

キーワード：分散，画像解析，不飽和

下付き添え字の番号は重心周りの角度の番号である．時刻 $t = t_2$ のトレーサ域に対しても同じ角度で $d_1^2(x_1^2, z_1^2)$ から $d_n^2(x_n^2, z_n^2)$ まで求める．これを用いて Δt 間のトレーサ移動に関する分散係数を Bear²⁾の式 (1) から算出し，粒子の移動方向と座標軸とのなす角度 θ に対して式 (1) を回転することにより式 (2) を得る．本論では縦分散係数 D_{xx} と横分散係数 D_{zz} について検討する．

4. 画像解析によるパラメータ推定の結果

分散係数 D_{xx} と D_{zz} に対して，毛管帯に注入されたトレーサの画像解析による推定結果と移行時間の関係を Fig. 3 に示す．配合割合に関わらず，分散係数の時間的な変動は小さい．また，0.07mm 粒径の配合割合が増加するにつれて分散係数は大きくなる傾向にある．浸透場内の平均的な流速は 0.6mm 粒径の配合割合が 100% のときに 1.44×10^{-2} ，90% では 1.20×10^{-2} ，80% では 5.38×10^{-3} (cm/sec) であり，このことから分散係数は流速よりも間隙構造に影響を受けていると推察される．そこで，式 (3) に示す流速依存のモデルを適用することにより分散長を推定する．推定された分散長（縦分散長 α_L と横分散長 α_T ）の結果を Fig. 4 に示す．間隙構造が複雑になるにつれて分散長は大きくなっており，分散長は間隙構造に大きく影響を受けていると言える．

飽和帯と不飽和帯での推定結果を比較するため，Fig. 5 と Fig. 6 に 0.6mm 粒径の配合割合が 100% と 80% のケースに対する分散長の時系列変化を示す．縦分散長 α_L は飽和帯と毛管帯の区別なく一定値をとり，横分散長 α_T についても時間的な変動は見られない．しかし，横分散長 α_T は 0.6mm 粒径のみの浸透場では飽和帯での値が毛管帯よりも大きいのにに対して，0.07mm 粒径の配合割合が増加すると逆の結果が得られている．これには細かい粒径が混合されることにより間隙分布が複雑になり，物質の流れが多様になることと毛管帯内にある空気の影響が相互に作用していることが推察される．実験においても毛管帯に注入したトレーサの方が飽和帯のトレーサよりも鉛直方向（横分散方向）に広がる様子が観察されており，間隙分布や空気分布の縦分散長へ与える影響は小さいが，横分散長には大きく影響すると考えられる．

参考文献

1) van Genuchten, M.Th. : A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Soc. Am., Vol.44, pp.892-898, 1980. 2) Bear, J. : Dynamics of fluids in porous media, Elsevier, pp.579-663, 1975.

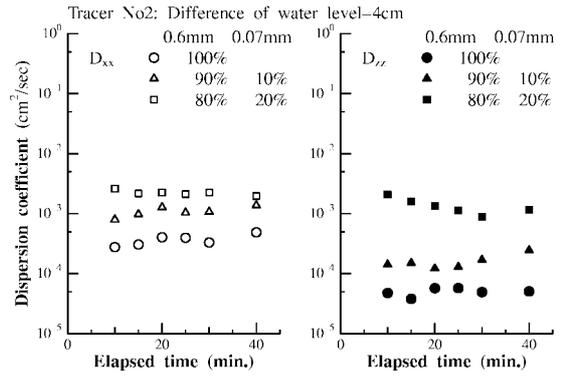


Fig.3 Results of analysis for dispersion coefficient in unsaturated zone
毛管帯における分散係数の推定結果

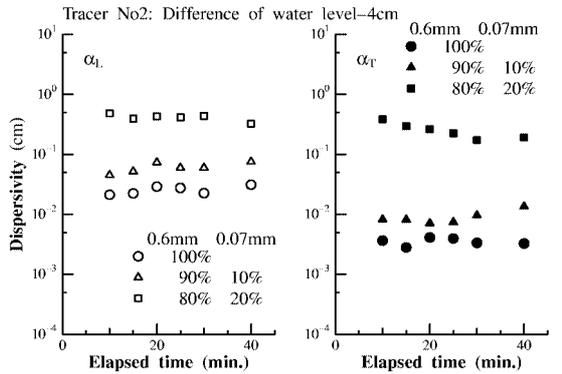


Fig.4 Results of analysis for dispersivity in unsaturated zone
毛管帯における分散長の推定結果

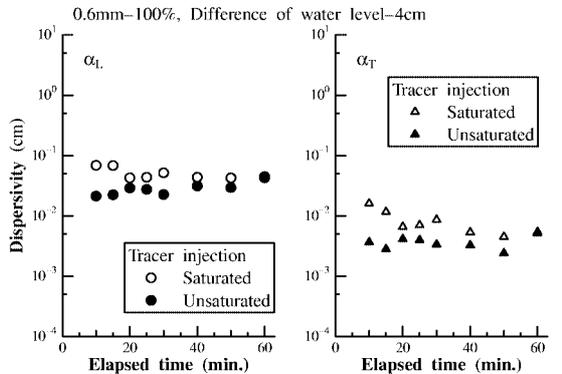


Fig.5 Comparison of dispersivity between saturated and unsaturated zone
分散長に関する飽和帯と毛管帯との比較

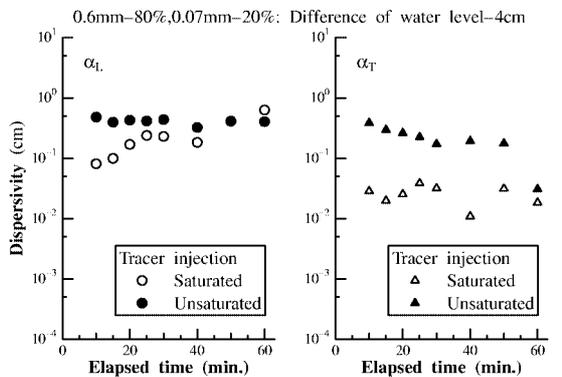


Fig.6 Comparison of dispersivity between saturated and unsaturated zone
分散長に関する飽和帯と毛管帯との比較