

PDF issue: 2025-06-22

色素トレーサと画像処理,空間モーメント法を融合 した不飽和領域における縦分散と横分散の推定

井上, 一哉

鈴木,克季

島田,遥

小林, 晃

田中, 勉

<mark>(Citation)</mark> 土木学会論文集A2(応用力学),68(2):I_527-I_538

(Issue Date) 2012

(Resource Type) journal article

(Version) Version of Record

(Rights) @2012 公益社団法人 土木学会

(URL)

https://hdl.handle.net/20.500.14094/90003320



色素トレーサと画像処理,空間モーメント法を融合した 不飽和領域における縦分散と横分散の推定

Identifying longitudinal and transverse dispersion of solutes in unsaturated porous media using dye tracer, image processing and spatial moment approach

井上一哉*・鈴木克季**・島田遥***・小林晃****・田中勉[†] Kazuya INOUE, Katsutoshi SUZUKI, Haruka SHIMADA, Akira KOBAYASHI and Tsutomu TANAKA

*正会員 博(農) 神戸大学助教 大学院農学研究科(〒 657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)
**学生会員 神戸大学大学院生 大学院農学研究科(〒 657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)
***学生会員 神戸大学大学院生 大学院農学研究科(〒 657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)
****正会員 工博 関西大学教授 環境都市工学部(〒 564-8680 吹田市山手町 3 丁目 3 番 35 号)
[†]正会員 農博 神戸大学教授 大学院農学研究科(〒 657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

A new methodology using spatial moment analysis linked with image processing of a dye tracer behavior in porous media was developed to estimate dispersivities not only in longitudinal but in transverse directions. Laboratory tracer experiments using a relatively mobile dye tracer Brilliant Blue FCF were conducted under saturated and unsaturated flow conditions. Uniformly packed homogeneous fields, which were comprised by silica sand or andisol taken from a maize field, were of concern under four different infiltration rates as well as under saturated flow conditions. An image processing technique based on digitalized spatial distributions of dye tracer allowed to link with a spatial moment approach to identify the transverse and longitudinal dispersivities. Dispersivities exhibited an increasing and decreasing tendency associated with infiltration rates and showed a marked difference between estimates under saturated and unsaturated conditions. Laboratory study was extended by a comprehensive literature search to compare the new results with earlier work, demonstrating a good agreement between the experimental and published results. Developed methodology was applied to a field with approximately 100 cm depth from the ground surface under unsaturated conditions. Dye tracer moved through the soils in a preferential path pattern, which induced higher dispersivities in more irregular pore patterns as compared with estimates obtained in laboratory tracer experiments. Experimental results demonstrated the effectiveness of the developed methodology for simultaneous assessment of transverse and longitudinal dispersion in unsaturated soils.

Key Words : longitudinal and transverse dispersion, dye tracer, image processing, spatial moment, unsaturated soil

1. 緒論

土壌・地下水汚染の原因となる物質の多くは,地表 面あるいは地表面付近から地盤内へ侵入し,不飽和領 域を経て,地下水面へ到達する.不飽和領域における 溶質輸送の主たる移動方向は鉛直下方であり,地盤の 透水性や間隙構造に依存して溶質の輸送度合いは変化 する.また,降水に伴う水分分布の変化は浸透水の流 速変動に大きく関与する一因であり,汚染物質の移動 量や濃度分布にも影響を及ぼすことになる.不飽和領 域の物質移動を吟味する際,地表面から地下水に到達 する溶質のトラベルタイムや縦分散は興味の対象であ る^{1),2)}とともに,その過程における水平方向への溶質分 布変動,すなわち,横分散は地下水への流入規模を推 定する上で極めて重要な検討課題である³⁾.

溶質の輸送速度や質量減衰の度合い,空間濃度変動 の予測における横分散の重要性は認識されている^{4),5)}に も関わらず,横分散を同定する研究はほとんどなされ ていない.また,不飽和領域を対象に,縦分散に関する スケール効果や間隙構造の依存性については多く研究 されている^{6,7)}一方で,溶質輸送過程における横分散の 評価事例は極めて少ないのが現状である.この点は溶 質の横分散現象を実験的に定量化する手段の少なさに 起因することから,ラボレベルにて,あるいはフィー ルドレベルにて,横方向の溶質分散量を測定する研究 がなされている⁸⁾⁻¹⁰⁾.しかしながら,一般的に,不飽 和領域での濃度計測には観測計器の埋設やコアサンプ リングを要するため,対象場のかく乱による溶質輸送 挙動への影響に加えて,観測点数の制約により推定精 度への影響が懸念される^{9),11)}.不飽和領域の溶質輸送 に焦点を当てた数値解析的アプローチ^{12),13)}も多くなさ れているが,対象となるサイトの実現象を観察する手 段としては利用が難しいと言える.

このような問題を払拭するにあたり、色素は有益な ツールであり、トレーサ実験としての実績も豊富であ る^{3),14),15)}.しかしながら、浸透水や溶質の輸送経路を

表-1 土質試料の物理特性.

	ケイ砂	黒ボク土
土粒子密度 (g/cm ³)	2.68	2.40
平均粒径 (cm)	0.085	0.076
均等係数 (-)	1.80	2.74
飽和透水係数 (cm/s)	0.751	0.0341
間隙率 (-)	0.421	0.638
試料の色	灰色	褐色

可視化するツールとしての利用が多数を占めているの が現状であり¹⁶⁾,画像データ等による可視化情報を基 に溶質移行に関わる物理量を定量化する応用的研究例 は限られている¹⁷⁾.Forrer ら³⁾や井上ら⁹⁾は色素トレー サの空間分布から不飽和領域の縦方向および横方向の 溶質分散量を定量化する試みを異なるアプローチにて 提案しているものの,フィールドを対象とした横分散に 関する研究事例自体が乏しいことから,色素を用いて 溶質分散を推定する実績の更なる蓄積が望まれる.ま た,井上ら¹⁷⁾は飽和条件にてガラスビーズやケイ砂な ど,色素の色相とは対照的な試料を用いた縦分散長と 横分散長の推定手法を提案しているが,種々の色相を有 するフィールドの士質材料への適用には至っていない.

これらの背景を踏まえて本研究では、ラボレベルに て色素トレーサ実験を実施し、画像処理と空間モーメ ント法を応用した縦分散長と横分散長の同時推定法を 新たに提案した.また、溶質輸送に及ぼす土質試料と 降水強度の影響について検討するとともに、提案手法 をフィールドに適用し、不飽和域における縦分散長お よび横分散長と移行距離の関係について検討した.

2. ラボレベル溶質輸送実験

2.1 実験試料

本研究では、溶質移行挙動の可視化を目的として、色素の完では、溶質移行挙動の可視化を目的として、色素トレーサには青系水溶性色素のBrilliant Blue FCF を採用した.また、後述する画像処理における明度変化や水溶液の比重を考慮して、色素水溶液の初期濃度を1mg/cm³に設定した.浸透場を構成する土質試料にはケイ砂と黒ボク土を使用し、溶質輸送に及ぼす土質試料の影響を検討するとともに、トレーサ移動の画像処理過程における試料の色相の影響について検討した.本実験にて使用した黒ボク土は、後述するフィールド実験のサイトにて地表面から40 cm 深さの範囲で採取し、2 mm ふるいの通過分を使用した.また、細粒土の影響を除くため、最小粒径を0.25 mm に設定した.本実験にて使用するケイ砂と黒ボク土の土質特性を表-1に記す.土粒子密度は密度試験、平均粒径と均等係数は



図-1 土質試料の水分特性曲線.



図-2 物質移動実験装置の概略図.

粒度試験結果から求めた.間隙率は充填試料の質量と 装置体積から間接的に算定し,装置内に土質試料を充 填し,動水勾配に伴う排水流量を基に飽和透水係数を 求めた.図-1には,各土質試料の水分特性の計測結果, ならびに,次式の van Genuchten モデル(以下, VG モ デル)¹⁸⁾によるフィッティング曲線を示す.

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(1 + |\alpha_v \psi|^{n_v}\right)^{\frac{1}{n_v} - 1} \tag{1}$$

ここに、 S_e は有効飽和度、 ψ は圧力水頭、 θ は体積含 水率、 θ_r は最小容水量、 θ_s は飽和体積含水率、 $\alpha_v \ge n_v$ は試料依存のパラメータである.

2.2 実験装置と実験方法

本実験では、図-2に示す高さ100 cm,幅100 cm,奥 行き3 cmの実験装置を作成し、実験装置の前面を厚さ 1.5 cmのガラス板で構成することにより、色素トレー サの移行挙動を可視化した.浸透場を作成する際には、 予め飽和させた試料を水中落下法により5 cm層ずつ締 め固めながら充填し、密度管理の下、ケイ砂は0.421、 黒ボク土は0.638の間隙率を有する単層・均質地盤を作

表-2 実験ケースおよび実験名称一覧.

		降水強度 (mm/min)			
	飽和	0	0.09	0.21	0.63
ケイ砂	S-S	S-1	S-2	S-3	-
黒ボク土	A-S	A-1	A-2	A-3	A-4



図-3 ケイ砂地盤の画像:(a) RGB 画像,(b) Red 成分抽出画像.

成した.所定の地盤を作成後,装置上部の天板を閉め, 装置両側に設置した定水頭タンクの水圧を調整するこ とで浸透場に0.22の動水勾配を与え,飽和かつ一様流 条件下にある流れ場を形成した.下流側の定水頭タン クから流出する流量とピエゾ水頭を計測して定常流状 態にあることを確認した後,実験装置の底から 30 cm の高さにある孔から 25 cm³のトレーサをパルス注入し た.実験時は所定の照明のみを点灯させて光量を一定 に保ち,実験装置から約 40 cm 離れた位置に設置した デジタルカメラを用いて色素トレーサの移行過程を一 定の時間間隔で撮影し,画像を取得した.

飽和条件での実験を終了した後, 天板をはずして定 水頭タンク内の水位を徐々に低下させることにより, 浸 透場内の水分を排水した.間隙構造を乱さないように, 時間をかけて排水し,実験装置の底から 15 cm の位置 に水頭を保つことで地下水面を形成するとともに,不 飽和状態にある浸透場を形成した.排水中はラップを 用いて装置上部からの蒸発を防止し,24 時間以上,排 水を継続した.定水頭タンクからの流出水が無くなる ことを確認して,実験装置上部から10 cm の位置に設 けた孔から25 cm³ の色素トレーサをパルス注入する ことで,不飽和条件下にある溶質輸送実験を実施した. 色素トレーサの濃度は飽和条件の溶質輸送実験と同一 であり,トレーサの移行過程を光量一定の下で定期的 にデジタル撮影した.

飽和実験と異なり,不飽和実験では降水強度と物質 輸送量の関係を検討するため,図-2に示すように,模 擬降水装置を用いて所定の降水強度を地表面全体に一 様に与えた.模擬降水を与える際には,水滴による地 表面の洗掘を防止するため,メッシュフィルタを地表 面に敷設した.模擬降水は色素トレーサの注入と同時



図-4 ケイ砂地盤の校正曲線の一例.

に開始し、実験中は継続して既定量の降水を地表面に 負荷することで、フィールドでの実現象を視野に入れ た非定常場を対象とした.文献¹⁹⁾を参考にして降水強 度を設定し、実験ケース名とともに表-2に降水強度を 列記する.

3. 縦分散長と横分散長の推定方法

3.1 色素トレーサ濃度とピクセル明度

色素トレーサの空間変動を基に,縦分散長と横分散 長を推定する第1段階として、ケイ砂を試料に用いた 井上ら¹⁷⁾と同様の手法により、色素トレーサ濃度とピ クセル明度の関係を求めた. 照明やカメラの位置など, 実験環境と同一の条件下にて、既知の濃度を有する色 素を流れの無い浸透場内に注入し、注入直後の分布を 画像に収めた.また,注入する色素濃度を種々に変え ることで該当する色素濃度に対応したピクセルの明度 を抽出し、校正曲線の基礎データを得た.このとき、色 素分布の中心部近傍のピクセル明度を色素濃度に対応 づけた. 図-3(a) にケイ砂地盤に注入した色素トレーサ のRGB 画像の一例を示す.実験に用いた色素は青成分 が卓越していることから、図-3(b)に示すように、RGB 画像から赤成分のみを抽出した画像に変換することで, 色相に関わるピクセル情報を限定し、校正データを作 成した. ピクセル明度と色素濃度の関係は光源やカメ ラ位置に影響を受けるため,実験パターンごとに校正 関係を求めた. 図-4 にピクセル明度と色素濃度の校正 関係の一例を示す.

ケイ砂地盤の場合, 色素トレーサの分布する領域の ピクセル明度に及ぼす試料の色相の影響は小さいこと を井上らは指摘している¹⁷⁾.しかしながら, 図-5(a)に 示すように, 黒ボク土の場合には, 土の色相の特性上, 取得した RGB 画像の状態で間隙内を移行する色素ト レーサを十分に判別することは困難である.図中には 色素トレーサ分布の輪郭部分を白丸で示している.そ のため, コントラスト補正とガンマ補正^{20),21)}を施すこ とにより, 図-5(b) に示すように, 色素分布を判別でき



図–5 黒ボク地盤の画像: (a) RGB 画像, (b) 補正後の RGB 画像, (c) Red 成分抽出画像.



図-6 黒ボク地盤の校正曲線の一例.

るレベルに画像を処理した.また,色素分布の明瞭化 を図るため,図-5(c)に示すように,RGB 画像から赤 成分のみを抽出した.

一連の画像処理を経て、色素濃度とピクセル明度の 校正関係をケイ砂地盤と同様の方法で求めた.図-6に 黒ボク地盤に対するピクセル明度と色素濃度の校正関 係の一例を示す.図-4と比べると、同じ色素濃度であっ ても対応するピクセル明度は土質試料ごとに異なるこ とがわかる.画像処理を施すことでピクセル明度と色 素濃度の関係は変化するものの、土質試料の色相に関 わらず校正関係が求まるため、色素輸送を捉えた時系 列画像データに対しても同様に一連の画像処理を施し、 縦分散長と横分散長の推定に供した.

3.2 空間モーメント法

空間モーメント法は帯水層におけるトレーサ実験の 解釈や巨視的分散の評価に利用されている手法の1つ であり^{22),23)},溶質の濃度あるいは質量の空間分布デー タに基づいて定量化される.2次元場における濃度分 布の空間モーメントは次式にて表される²⁴⁾.

$$M_{ij}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} c(x, z, t) x^{i} z^{j} dx dz$$
 (2)

ここに、 M_{ij} は空間モーメント、cは溶質濃度、 $x \ge z$ は座標、tは時間、 $i \ge j$ は各軸の空間次数である。本研究では、式(2)の溶質濃度を校正曲線に基づいて明度分布に関連づけることにより、次式に変換した¹⁷⁾.

$$M_{ij}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H(x,z)I(x,z,t)x^{i}z^{j}dxdz \qquad (3)$$



図-7 ケイ砂地盤における縦分散長の推定結果.

ここに, H(x,z)は1ピクセルの面積, I(x,z,t)はピクセ ルの明度を表す.

式(3)を用いて1次空間モーメントを導出し、色素 トレーサ分布の重心位置を次式から求めた.

$$x_c = M_{10}/M_{00}, \quad z_c = M_{01}/M_{00} \tag{4}$$

ここに、 $x_c \ge z_c$ は色素トレーサ分布の重心位置のx成 分とz成分である.また、トレーサ重心に対する空間 2 次モーメントを用いて、トレーサ重心からの濃度分散 を表す共分散テンソル σ を次式により導出した.

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{M_{20}}{M_{00}} - x_c^2 & \frac{M_{11}}{M_{00}} - x_c z_c \\ \frac{M_{11}}{M_{00}} - z_c x_c & \frac{M_{02}}{M_{00}} - z_c^2 \end{pmatrix} \quad (5)$$

さらに、縦分散長と横分散長を次式にて推定した24).

ここに, α_L は縦分散長, α_T は横分散長, ξ_c はトレー サ注入点から重心までの距離である.

4. 結果と考察

4.1 縦分散長

飽和ならびに不飽和条件下にて得られたケイ砂地盤 に対する縦分散長の推定結果を図-7に示す.図中,横 軸に示す移動距離は色素トレーサ分布の重心位置の変 化を表す.全体的に,不飽和条件の推定値は飽和条件 よりも大きい傾向にあり,平均的に見て,約5倍の差 がある.これは図-1に示すように,ケイ砂地盤の保水 性は小さいため,空気分布の影響を受けて,溶質の輸 送挙動は選択的な経路をとるようになり,飽和条件に 比べて高い縦分散長を導いたと推察される.

図-7 に示すように、不飽和条件にて降水を与えない Case S-1 では、溶質移動の駆動力は重力のみとなるため、溶質の移動距離は 10 cm 程度となっているのに対 して、降水を負荷することにより、溶質の輸送量は増加



図-8 0.21 mm/min 条件下にあるケイ砂地盤の溶質移動.

し、縦分散長の値は減少後に増加する変化となる.本 実験では、地表面から 10 cm の深さをトレーサの初期 位置に設定していることから、地表面に与えた水が浸 透し、トレーサと混合するまでは一定の時間を費やす. 降水が色素トレーサの位置にまで到達する過程の溶質 輸送は無降水の状態と似通っているため、10 cm 程度 の移動距離に対する縦分散長は降水量に関わらず概ね 同一の値になったと考えられる.また、降水を与えた 場の縦分散長はトレーサの移動距離が 25 cm 付近まで は減少し、その後に増加する傾向にある.この点を考 察するため、0.21 mm/min の降水条件下にある溶質移 動の様子を図-8 に示す.画像データを基に目視により、 降水に伴い飽和度が上昇した領域の最も下方にある位 置を浸潤フロントとして図中に示した.

図-8に示すように、降水による水分の浸潤フロント が進行する過程では、水分と混合した色素トレーサを 鉛直下方に押し出すような効果が作用するため、進行方 向に対する色素トレーサの空間分布のばらつきが小さ くなった結果、縦分散長は減少したと考えられる.井上 ら¹⁷⁾が示すように、飽和域を移動する色素トレーサは 間隙内に留まることなく浸透水とともに移流分散する. 一方で、降水の浸透とともに、色素トレーサ周辺の水 分量は増加するものの、不飽和領域では一部の色素ト レーサは水分と混合しない状態にある.未混合の色素ト レーサは水分と混合しない状態にある.未混合の色素ト レーサの移動速度は水分と十分に混合した色素トレー サの移動速度に比べてかなり小さいことから、図-8 に 示すように、縦方向へ色素トレーサ分布は拡大し、そ の状態に呼応して縦分散長は増加傾向に転じたと推察 される.

図-9には、黒ボク地盤にて得られた縦分散長とトレー サ移動距離の関係を示す.土質試料に関わらず間隙内 が不飽和状態になることで流下方向への溶質の拡がり は増す²⁵⁾ため、黒ボク地盤においてもケイ砂地盤と同 様に、不飽和条件の縦分散長は飽和条件よりも大きく 得られている.また、不飽和条件にて降水を与えると、 縦分散長は減少から増加への変化を示す点もケイ砂地 盤と類似した傾向と言える.一方で、黒ボク地盤の推 定値は図-7に示すケイ砂地盤の縦分散長よりも大きく



図-9 黒ボク地盤における縦分散長の推定結果.



図-10 不飽和条件下における色素トレーサの移動速度の結果.

推定されている.図-1の水分特性より,色素トレーサ の注入地点での飽和度はケイ砂地盤の方が黒ボク地盤 よりも小さいと考えられるが,均等係数の大きい場ほ ど溶質の分散性は高くなるため,結果として,黒ボク 地盤の縦分散長は大きく得られたと推察される.

黒ボク地盤において降水強度が大きくなると,ケイ 砂地盤に比べて短い移動距離の位置で縦分散長は減少 から増加に遷移している.これは色素トレーサの移動 速度の差異に起因すると考えられるため,不飽和条件 に対する色素トレーサの移動速度と移動距離の関係を 図-10に示す.図中の凡例は降水強度を表しており,ケ イ砂地盤と黒ボク地盤の結果を併記する.また,色素 トレーサの移動速度は空間モーメントから得られる色 素分布の重心位置の変化を基に次式により算出した.

$$v_d = \frac{\sqrt{(x_c - x_0)^2 + (z_c - z_0)^2}}{\tau}$$
(8)

ここに、 v_d は色素トレーサの移動速度、 x_0 と z_0 はトレーサ注入位置のx座標とz座標成分、 τ は該当する色素トレーサの移動時間である.

図-10 に見られるように,黒ボク地盤の溶質移動速 度はケイ砂地盤よりも小さいことがわかる.これは土 質試料の不飽和水分特性に起因し,同一の降水強度で あっても溶質の移動速度には差異が生じることを示し ている.すなわち,体積含水率の大きい黒ボク地盤の



図-11 ケイ砂地盤における横分散長の推定結果.



図-12 黒ボク地盤における横分散長の推定結果.

トレーサ移動速度はケイ砂地盤よりも小さいため,縦 分散長が減少から増加に変化する位置は比較的移動距 離の短い地点になったと考えられる.

4.2 横分散長と分散長比

本実験より推定されたケイ砂地盤の横分散長の結果 を図-11 に示す. 飽和条件下の横分散長は概ね一定値 で推移するのに対して,降水を負荷した浸透場では色 素トレーサの移動とともに横分散長は徐々に増加する 傾向にある. 粒度の整った不飽和間隙においても溶質 移動は選択的になる²⁶⁾ことで,横方向へ徐々に拡大し, トレーサの移動距離の増加とともに横分散長は増加し たと推察される. また,ケイ砂の不飽和水分特性は乾 燥域から湿潤域にかけて大きく変動し,降水により飽 和度は上昇することから,縦分散と同様に,横分散に 及ぼす降水強度の影響は小さくなったと考えられる.

一方,図-12に示す黒ボク地盤の横分散長の変化は 縦分散長の結果のように,溶質の移動過程において減 少と増加を示している.この点を視覚的に考察するた め,黒ボク地盤を移行するトレーサ分布を濃度分布に 変換した一例を図-13に示す.黒ボク地盤では降水強 度に応じて溶質の通過する間隙経路は異なり,降水強 度の大きい場ほど横方向(x方向)への拡がりは大きく なっている.したがって,降水条件に依存して溶質の



図-13 黒ボク地盤の溶質移動の状況.



図-14 ケイ砂地盤の分散比の推定結果.



図-15 黒ボク地盤の分散比の推定結果.

選択性は大きく異なる点,ならびに,前述した浸潤フ ロントと色素トレーサ分布の関係の点に起因して,横 分散長は色素トレーサの移動とともに変化すると考え られる.

本研究のように、縦分散長と横分散長を同時に推定 できることの利点の1つに、縦分散長と横分散長の比、 すなわち分散比の評価が可能となる点が挙げられる.本 実験場に対する分散比について考察するため、図-14と 図-15 にそれぞれケイ砂地盤と黒ボク地盤における分 散比の変化を示す.図-14 に示すように、ケイ砂地盤で は飽和条件における分散比よりも不飽和条件の値の方 が小さいことが見てとれる.本実験はトレーサの注入

縦分散長 (cm)	横分散長 (cm)	平均移動距離 (cm)	水分条件	出典
$0.156\sim 0.243$	$0.00520 \sim 0.00808$	$9.8\sim54.7$	飽和	This study (Silica sand)
$0.290\sim 0.489$	$0.0215\sim 0.0570$	$5.5\sim 29.7$	飽和	This study (Andisol)
$0.522 \sim 0.756$	_	30.2	飽和	Maraqa et al. ²⁷⁾
_	$0.0024 \sim 0.10$	$37.6\sim41.2$	飽和	Seagren et al. ²⁸⁾
$0.335 \sim 1.80$	$0.0833 \sim 0.483$	$9.5\sim 43.2$	不飽和	This study (Silica sand)
$0.764\sim 3.48$	$0.379 \sim 1.40$	$1.1\sim 25.2$	不飽和	This study (Andisol)
$1.02 \sim 1.67$	$0.320\sim 0.577$	$5\sim 25$	不飽和	Inoue et al. ⁹⁾
_	0.0029	30	不飽和	Massabò et al. ¹⁰⁾
$0.966 \sim 1.631$	_	30.2	不飽和	Maraqa et al. ²⁷⁾

表-3 ラボレベル溶質輸送実験における縦分散長と横分散長の比較.

後に降水を負荷するため,浸潤フロントが色素トレー サのフロント部まで到達する間は水分量の増加により 縦方向よりも横方向への色素分布のばらつきは大きく なる.この間の分散比は減少するのに対して,浸潤フロ ントとともに色素トレーサが移動する過程では縦方向 へ色素分布は拡大することから,分散比の増加につな がると考えられる.分散比の値は異なるものの,図-15 に示すように,黒ボク地盤に関しても類似した傾向は 見られ,各降水強度に応じて分散比に相違が生じてい る.図-13に見られるように,降水条件に応じて溶質 の選択経路は異なる点が縦分散および横分散の進展に 影響を及ぼし,差異の要因になったと推察される.す なわち,飽和度の変化は分散比の変化に大きく寄与す ると言える.

4.3 既往の文献との比較

図-7 と図-9, 図-11, 図-12 に示した縦分散長と横 分散長の推定値はケイ砂地盤については、それぞれ 0.156 cm から 1.80 cm、 0.00520 cm から 0.483 cm で あり、黒ボク地盤ではそれぞれ 0.290 cm から 3.48 cm, 0.215 cm から 1.40 cm である. また, 縦分散長と横分 散長の比はケイ砂地盤で1.61から30.7,黒ボク地盤で 1.02から16.5の範囲にある.表-3には、本実験と実験 スケールの類似した研究^{9),10),27),28)}にて報告されている 文献値を示す.本実験の推定値は既往の研究例と比較 して同一のオーダーにて得られていることから、本手 法は水分条件や土質試料に依らず、良好な分散長を推 定できると言える.また、同一の間隙構造であっても、 縦分散長のみならず横分散長も飽和条件よりも不飽和 条件の方が大きくなる傾向にあり^{25),29)}、本手法により 推定された縦分散長と横分散長は定性的に妥当な結果 と言える.

全体的に、ケイ砂地盤と黒ボク地盤の縦分散長と横 分散長を比較すると、黒ボク地盤の方が高い分散性を 示すことがわかる.これは黒ボク土は団粒化しやすく、 また、ケイ砂より大きい均等係数を有するため、移行



図-16 フィールド実験の概要.

経路の多様化につながり,結果として分散長はいずれ の方向でも増加したと考えられる.また,降水強度の 高い場ほどトレーサは選択的に移動し,降水強度に応 じてトレーサ移動の選択性は異なる点がケイ砂地盤よ りも大きい分散長として反映されたと考えられる.

5. フィールドレベル溶質輸送実験

5.1 実験サイトの概要と実験方法

本研究では、提案手法の適用性とフィールドの溶質 挙動を評価するため、ラボ実験と類似した規模のフィー ルドを対象に溶質輸送実験を実施した. ラボ実験にて 使用した黒ボク土を採取した飼料用トウモロコシ畑に て油圧ショベルを用いて、5m×3mの平面領域にわた り、地表面から1mの深さを掘削して実験領域を確保 した. また、ソイルナイフなどを用いて地表面を平ら に整備した.

図-16 に示すように,地表面に深さ3 cm,幅5 cm, 奥行き65 cmの帯状にトレンチを2 つ設け,2 か所同 時にトレーサ実験を実施できるように整備した.また, フィールド実験ではラボ実験と同様に,Brilliant Blue FCF 水溶液を色素トレーサとして採用し,色素分布の可

表-4 実験サイトの土質特性.

深さ	粘土	シルト	砂	礫	平均粒径	均等係数	透水係数	間隙率	乾燥密度	試料の色
(cm)	(%)	(%)	(%)	(%)	(cm)	(-)	(cm/s)	(-)	(g/cm^3)	
20	21	51	22	6	0.021	23.7	0.00884	0.59	0.95	褐色
50	15.8	39.7	43	1.5	0.1	85.7	0.0239	0.57	1.13	茶色



図-17 フィールド実験における溶質移動の様子(Plot 1).

視化について試行錯誤した上で,初期濃度を2mg/cm³ に設定した.2つのトレンチ Plot 1 と Plot 2 にそれぞ れ 1000 cm³の色素水溶液を流し込んだ時刻を実験開始 時刻とした.地盤中への色素トレーサの浸入を確認し た後に,図-16 に示す 65 cm×85 cm の地表面区画に 0.12 mm/minの模擬降水を 15 分間与えた.降水終了後 は地表面をラップで覆うことにより,水分の蒸発を防 止した.

フィールド実験では図-16に示すように、色素トレー サの注入から最大で345分経過後まで、時間経過に従っ て順次、水平方向に約10cm間隔で深さ1m程度まで シャベルを用いて掘り下げた.このとき、断面が垂直 になるように、また滑らかになるように断面を均一に 整えた.断面を掘削するごとに、露出断面から155cm 離れた位置にデジタルカメラを設置し、5つの掘削断 面を対象に色素トレーサのプロファイルをデジタル撮 影した.図-17に、得られた画像の一例を示す.時間の 経過とともに、色素トレーサのフロント部分は鉛直方 向に進展している様子がわかる.

色素トレーサ実験と並行して,深さ 20 cm と 50 cm の地点にてコアを採取して実験室にもち帰り,対象サイトの土質特性を計測した. 表-4 に得られた土質特性を列記する.対象サイトの黒ボク地盤は,地表面から深さ方向に約 40 cm までの領域は褐色,40 cm 以深は茶色を呈している.本研究では便宜上,褐色領域を上層,茶色領域を下層と記す.図-18 には,コア採取地点の不飽和水分特性を VG モデル¹⁸)とともに示す.







図-19 画像処理の流れ: (a) RGB 画像, (b) 上層部の画像補
正, (c) Red 成分抽出画像, (d) 色素トレーサ濃度分布.

5.2 画像処理と分散長の推定

撮影した色素トレーサの空間分布を濃度分布に変換 する手段として、ラボ実験と同様に、画像処理を施し た.図-19(a)に撮影された色素トレーサの空間プロファ イルを示す.褐色を呈する上層の色素分布を明瞭にす るため、生の RGB 画像にコントラスト補正とガンマ 補正を施して、図-19(b)のように処理した.茶色の色 相を有する下層については色素トレーサの分布を比較 的判別できたことから、上層のように画像を処理しな かった.上層と下層の RGB 画像から赤成分のみを抽出 し、図-19(c)に示すように、色素トレーサの領域を明 瞭にした.

図-19(c)の状態にある色素トレーサ部分のピクセル 明度と色素トレーサの濃度を対応づけるため、フィール ド実験と並行して、色素濃度とピクセル明度に関する 校正関係を求めた.晴天日の日中に実験を実施したもの

縦分散長 (cm)	横分散長 (cm)	平均移動距離 (cm)	水分条件	出典
 $1.00 \sim 3.72$	$0.52\sim 2.35$	$1.8 \sim 21.7$	不飽和	This study (Andisol)
$0.66 \sim 11.73$	$0.33\sim 6.59$	$7.5\sim25$	不飽和	Forrer et al. ³⁾
$2.6\sim18.3$	$0.03\sim2.20$	$6 \sim 14$	不飽和	Abbasi et al. ³⁰⁾
$1.9\sim 33.6$	_	$5\sim90$	不飽和	Persson and Berndtsson ²⁾
$1.0 \sim 1.6$	_	$25 \sim 100$	不飽和	Snow et al. ³¹⁾
$1.75\sim 10.89$	_	20	不飽和	Radcliffe et al. ³²⁾

表-5 フィールドレベル溶質輸送実験における縦分散長と横分散長の比較.



図-20 フィールド地盤に対する校正曲線の一例.

の、光源は太陽光であり、撮影断面に照射する日射量の時間変化に対応するため、撮影断面の掘削と並行して、 2つのPlotに比較的近い距離にある断面を掘削した.掘 削面に色素トレーサは存在しないため、既定の濃度に 調整した色素トレーサを断面に吹き付けて、色素分布 をデジタル撮影した.上層ならびに下層にて同じ作業 を繰り返し、得られた画像を前述の画像処理を施すこ とで、色素濃度とピクセル明度の関係を上層と下層で 求めた.図-20に校正曲線の一例を、また、図-19(d)に 色素トレーサの濃度分布の一例を示す.一連の画像処 理と校正関係の導出を経て、ラボ実験と同様に、空間 モーメント法を適用することにより、式(2)から式(7) を用いて対象サイトの縦分散長と横分散長を推定した.

5.3 縦分散長と横分散長

フィールド実験より得られた縦分散長と横分散長の 結果をそれぞれ図-21 と図-22 に示す.また,図中に は、前述のラボ実験にて得られた結果の平均値ととも に、本実験と実験スケールの類似する文献^{3),30)}の値を 併記する.対象とする土質材料や水分条件が異なるた め、文献値と実験結果は一致しない部分はあるものの、 本実験における縦分散長と横分散長の推定値はそれぞ れ 1.00 cm から 3.72 cm, 0.52 cm から 2.35 cm の範囲 に分布しており、溶質移動距離や土質試料の平均粒径 を考慮すると妥当な推定結果と考えられる.表-5 には、 本実験と実験スケールが類似しており、また不飽和条



図-21 フィールド地盤の縦分散長の推定結果.



図-22 フィールド地盤の横分散長の推定結果.

件にて得られた縦分散長,あるいは横分散長の文献の 値^{2),3),30)-32)}を列記する.いずれの研究例においても縦 分散長に関しては 1 cm のオーダーとなり,横分散長 は縦分散長の 0.1 倍から 0.5 倍程度の値をとることか ら,本実験では良好な推定結果が得られていると判断 される.

図-21と図-22より、縦分散長と横分散長ともに、フィールド実験にて得られた値は同一試料を用いたラボ 実験の結果に比べてわずかに大きい推定値になってい ることがわかる. ラボ実験ではかく乱した試料を用い て浸透場を再構成しているため、間隙構造には差異が 生じる結果,推定値に影響したと推察される. 図-23 に、色素トレーサの注入から 303 分後に掘削した断面



図-23 対象サイトのマクロポアと選択的輸送の様子.

にて撮影された色素トレーサの分布を示す.断面内の 特に上層にマクロポアが点在していることや Plot 1 の トレーサ分布のフロント部にて選択的に溶質が移動し ていることがわかる.溶質輸送の選択性はラボ実験に おいても確認されたが,マクロポアの存在は未かく乱 であるサイト特有の状態であり,フィールド実験とラボ 実験の推定結果の差異に影響を及ぼした一因と考えら れる.フィールドのように間隙構造の不均質性を有す る場においては,図-23 にて観察されるように,Plot 1 と Plot 2 の色素トレーサ分布は同一にならない.この 点が図-21 と図-22 において,Plot 1 と Plot 2 の分散長 の推定結果に相違が生じた要因と言える.しかしなが ら,縦分散長と横分散長ともに,2 つの Plot 間での推 定結果のばらつきは小さいため,対象サイトの不均質 性はあまり高くないと判断される.

ところで、図-21の色素トレーサの移動に伴う縦分散 長の変化を見ると、縦分散長は輸送距離に関わらず一 定値をとる傾向にあることがわかる. 図-17, あるいは, 図-23 に示す色素トレーサの空間分布に見られるよう に、対象フィールドでは流下方向に対する溶質の選択 的移動が認められる.しかしながら、対象場の有する 不均質性はあまり高くないと考えられることから、縦 分散長は一定で推移したと推察される.一方で、図-22 に見られるように、 横分散長は色素トレーサの移動に 伴って減少する傾向にある. 図-17 に示すように,対 象サイトでは横方向への溶質の選択経路はあまり顕著 には見られない. 黒ボク地盤のように団粒構造を有す る地盤においては, 鉛直方向に水分や溶質の選択性が 高い傾向にある14),33)点とは対照的に、溶質の横方向移 動に及ぼすマクロポアの影響は小さく、横方向へあま り進展しない結果、横分散長は移動距離とともに減少 したと考えられる.

5.4 縦分散係数と横分散係数

本手法は縦分散長と横分散長の推定と同時に,色素 トレーサの平均的な移動速度を式(8)にて算出するこ



図-24 フィールド地盤の縦分散係数の推定結果.



図-25 フィールド地盤の横分散係数の推定結果.

とができるため,縦分散係数と横分散係数についても 推定が可能である.縦分散係数と横分散係数は次式の モデルで表されると仮定し,図-24と図-25に縦分散係 数と横分散係数の結果をそれぞれ示す.

$$D_L = \alpha_L |v_d|, \quad D_T = \alpha_T |v_d|$$
 (9)

ここに、 D_L は縦分散係数、 D_T は横分散係数、 v_d はトレーサ移動速度である.比較として、本実験スケール と類似した Persson と Berndtsson²⁾、および、Radcliffe ら³²⁾の結果を併記する.いずれの研究も不飽和領域内 の溶質輸送を対象とした多くの研究事例^{34),35)}と同様に、 縦分散のみを対象としていることから、**図–25**には、横 分散係数を推定した Forrer ら³⁾と Zhang ら⁸⁾の文献値を 示す.

対象サイトにて降水を与えた直後は地表面付近の浸透 水,および,色素トレーサの移動速度は大きくなる.そ の結果,水分量の比較的多い状況にて得られた Radcliffe ら³²⁾の縦分散係数の結果と本実験の結果に類似する部 分がある一方で,降水強度の小さい他の研究例に比べ ると,本実験の縦分散係数と横分散係数は大きく評価 されるのは自然な結果と言える.

図-26 には、トレーサ移動速度と分散係数の関係を Yule と Gardner³⁶⁾の結果とともに示す.また、縦分散 係数に限定されるが、不飽和条件下にて溶質の移動速 度と分散係数の結果が得られている文献値^{2),14)}を併記



図-26 トレーサ移動速度と分散係数の関係.

する.一般的に、トレーサ移動速度の上昇に呼応して 分散係数は増加する傾向にあり、図-26においても同 様の傾向が見られる.Yule と Gardner は粒径、ならび に、均等係数の小さいシルト質砂を用いたため、横分 散係数を小さく推定しており³⁶⁾、対象とする土質試料 の違いが本実験結果との相違につながったと考えられ る.横分散係数の妥当性については比較対象が限られ ることから評価が難しいものの、トレーサ移動速度と 縦分散係数の結果や横分散長の推定結果など、総合的 な観点から見て、妥当な推定結果と判断される.

5.5 降水強度の影響

ラボ実験にて観察された図-13やフィールド実験の 図-17 のように、不飽和領域の溶質輸送は選択的経路 をとることが特徴的である.分散長の降水強度への依 存性を検討するため、フィールド実験に加えてラボ実 験にて得られた縦分散長と横分散長の結果を図-27 に 示す. すべてのデータは該当する降水強度の条件下に て得られた結果の平均値である. 降水強度の値に関わ らず、分散長はあまり変動せず、ケイ砂地盤の横分散 長で約3倍,黒ボク地盤の縦分散長も同様に,約3倍 程度の相違である. 前述のように、 ラボ実験とフィー ルド実験ともに、溶質の選択的輸送が観察され、色素 トレーサの移行に伴う分散長の変化が定量化されたも のの,大局的に対象場の分散性を評価すると,本実験 にて採用した降水強度は分散長の変化にあまり影響を 及ぼさないと言える.これはフィールド地盤も含めて、 対象場の不均質性が低く、特に、ラボ実験では均質に 試料を充填していることから,分散長の変化は小さく なったと推察される.

6. 結論

本研究では,飽和および不飽和領域における溶質の 分散性を推定するため,ラボレベルにて色素トレーサ 実験を実施し,画像処理と空間モーメント法を融合す ることで縦分散長と横分散長を推定する手法を提案し



図-27 降水強度と分散長の関係.

た.また,提案手法をフィールドに応用し,推定結果 を既往の文献と比較した.本研究にて得られた知見を まとめると以下のようになる.

- 色素トレーサ分布の変化を捉えた画像に画像処理 と空間モーメント法を適用することにより、縦分 散長と横分散長の同時推定法を提案した.
- 一般的な点計測に基づく分散推定とは大きく異なり、本手法は分散長に加えて、溶質の移動速度、ならびに、分散係数を時系列にて推定することができる点に特徴がある。
- 本手法により得られた推定値は既往の文献と比較 して良好であり、本手法の妥当性を示すことがで きた.また、画像処理を施すことで黒ボク土のよ うな褐色系の土質材料に対しても溶質の輸送を評 価することができた.
- 4. 不飽和条件と飽和条件で分散長の値は異なり、空気を含有する不飽和状態の方が飽和状態よりも高い分散長になった.また、黒ボク地盤の分散長は降水条件に依らずケイ砂地盤より高くなった.
- 5. ラボ実験とフィールド実験ともに、溶質の選択的 輸送が観察された.また、本研究にて対象とした フィールドではマクロポアの存在が確認され、縦 分散長と横分散長ともに同じ試料を用いたラボ実 験よりも大きくなった.
- 6. 色素トレーサの移行に伴う分散長の変動が確認されたものの、大局的に対象場の分散性を評価すると、本実験にて採用した降水強度は分散長の変化にあまり影響を与えない結果を得た.

研究事例の少ない横分散の評価において、本手法は 有益な情報をもたらす手段になり得ると期待される.数 値解析による現象の再現とともに、本手法の適用性に 関する更なる実績の蓄積が望まれる.

謝辞: 本研究を遂行するにあたり,スウェーデン・ル ンド大学の Persson 先生には貴重な資料を提供してい ただきました.また,本研究の一部は科学研究費補助 金の助成を受けました.ここに記して深謝の意を表し ます.最後に、フィールド実験にて畑地の利用を許可 していただいた渡辺牧場の関係者の方々に深く感謝い たします.

参考文献

- Hunt, A.G., Skinner, T.E., Ewing, R.P. and Ghanbarian-Alavijeh, B.: Dispersion of solutes in porous media, *Eur. Phys. J. B*, 80, pp.411–432, 2011.
- Persson, M. and Berndtsson, R.: Transect scale solute transport measured by time domain reflectometry, *Nord. Hydrol.*, 33, pp.145–164, 2002.
- Forrer I., Kasteel, R., Flury, M. and Flühler, H.: Longitudinal and lateral dispersion in an unsaturated field soil, *Water Resour. Res.*, 35(10), pp.3049–3060, 1999.
- Stenback, G.A., Ong, S.K., Rogers, S.W. and Kjartanson, B.H.: Impact to transverse and longitudinal dispersion on first-order degradation rate constant estimation, *J. Contam. Hydrol.*, 73, pp.3–14, 2004.
- Bijeljic, B. and Blunt, M.J.: Pore-scale modeling of transverse dispersion in porous media, *Water Resour. Res.*, 43, W12S11, 2007.
- Butters, G.L. and Jury, W.A.: Field scale transport of bromide in an unsaturated soil 2. dispersion modeling *Water Resour. Res.*, 25(7), pp.1583–1589, 1989.
- Vanderborght, J. and Vereecken, H.: Review of dispersivities for transport modeling in soils, *Vadose Zone J.*, 6, pp.29–52, 2007.
- Zhang, X., Qi, X., Zhou, X. and Pang, H.: An in situ method to measure the longitudinal and transverse dispersion coefficients of solute transport in soil, *J. Hydrol.*, 328, pp.614– 619, 2006.
- 9) Inoue, K., Setsune, N., Suzuki, F. and Tanaka, T.: Determining transport parameters for unsaturated porous media in flow-tank experiments using image analysis, *Water Pollution VIII Modelling, Monitoring and Management*, WIT Press, pp.309–319, 2006.
- Massabò, M., Catania, F. and Paladino, O.: A new method for laboratory estimation of the transverse dispersion coefficient, *Ground Water*, 45(3), pp.339–347, 2007.
- Forrer, I., Papritz, A, Kasteel, R., Flühler, H. and Luca, D.: Quantifying dye tracers in soil profiles by image processing, *Euro. J. Soil Sci.*, 51, pp.313–322, 2000.
- 12) Cirpka, O.A. and Kitanidis, P.K.: Numerical evaluation of solute dispersion and dilution in unsaturated heterogeneous media, *Water Resour. Res.*, 38(11), 1220, 2002.
- Aggasi, F., Feyen, J. and van Genuchten, M.Th.: Twodimensional simulation of water flow and solute transport below furrow: model calibration and validation, *J. Hydrol.*, 290, pp.63–79, 2004.
- Seyfried, M.S. and Rao, P.S.C.: Solute transport in undisturbed columns of an aggregated tropical soil: preferential flow effects, *Soil Sci. Sci. Am. J.*, 51, pp.1434–1444, 1987.
- 15) Schincariol, R.A., Herderick, E.E. and Schwartz, F.W.: On the application of image analysis to determine concentration distributions in laboratory experiments, *J. Contam. Hydrol.*, 12, pp.197–215, 1993.
- 16) Nobles, M.M., Wilding, L.P. and Lin, H.S.: Flow pathways of bromide and Brilliant Blue FCF tracers in caliche soils, *J. Hydrol.*, 393, pp.114–122, 2010.
- 17) 井上一哉,小林晃,鈴木克季,竹之内亮,田中勉:色素 トレーサと空間モーメント解析を用いたマクロ分散長推 定法,水工学論文集,55, pp.613-618, 2011.
- 18) van Genuchten, M.Th.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, pp.892–898, 1980.
- 19) Quisenberry, V.L., Phillips, R.E. and Zelenznik, J.M.: Spa-

tial distribution of water and chloride macropore flow in a well-structured soil, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58, pp.1294–1300, 1994.

- 20) 岡崎彰夫:はじめての画像処理技術,工業調査会,218p., 2001.
- 井上誠喜,八木伸行,林正樹,中須英輔,三谷公二,奥 井誠人:C言語で学ぶ実践画像処理,オーム社,289p., 1999.
- 22) Vereecken, H., Döring, U., Hardelauf, H., Jaekel, U., Hashagen, U., Neuendorf, O., Schwarze, H. and Seidemann, R.: Analysis of solute transport in a heterogeneous aquifer: the Krauthansen field experiment, *J. Contam. Hydrol.*, 45, pp.329–358, 2000.
- 23) 井上一哉,島田遥,田中勉:溶質のマクロ分散とトラベル時間に与える成層地盤のアップスケールの影響,土木学会論文集 A2 分冊(応用力学)特集号,14,pp.I_521-I_532,2011.
- 24) Dagan, G.: Solute transport in heterogeneous porous formations, J. Fluid Mech., 145, pp.151–177, 1984.
- 25) Matsubayashi, U., Devkota, L.P. and Takagi, F.: Characteristics of the dispersion coefficient in miscible displacement through a glass beads medium, *J. Hydol.*, 192, pp.51–64, 1997.
- 26) 坂本康,渡辺和彦:不飽和層中での水みち形成と水みち流下速度についての実験的研究,水工学論文集,35, pp.111-116,1991.
- 27) Maraqa, M.A., Wallce, R.B. and Voice, T.C.: Effects of degree of water saturation on dispersivity and immobile water in sandy soil columns, *J. Contam. Hydrol.*, 25, pp.199–218, 1997.
- 28) Seagren E.A., Rittmann, B.E. and Valocchi, A.J.: An experimental investigation of NAPL pool dissolution enhancement by flushing, *J. Contam. Hydrol.*, 37, pp.111–137, 1999.
- 29) Klenk, I.D. and Grathwohl, P.: Transverse vertical dispersion in groundwater and the capillary fringe, *J. Contam. Hydrol.*, 58, pp.111–128, 2002.
- 30) Abbasi, F., Simunek, J., Feyen, J., van Genuchten M.Th. and Shouse, P.J.: Simultaneous inverse estimation of soil hydraulic and solute transport parameters from transient field experiments: homogeneous soil, *Trans. ASAE*, 46(4), pp.1085–1095, 2003.
- 31) Snow, V.O., Clothier, B.E., Scotter, D.R. and White, R.E.: Solute transport in a layered field soil: experiments and modelling using the convective-dispersion approach, *J. Contam. Hydrol.*, 16, pp.339–358, 1994.
- 32) Radcliffe, D.E., Tillotson, P.M., Hendrix, P.F., West, L.T., Box, J.E. and Tollner, E.W.: Anion transport in a Piedmont Ultisol: I. Field-scale parameters, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60, pp.755–761, 1996.
- 33) Bejat, L., Perfect, E., Quisenberry, V.L., Coyne, M.S. and Haszler, G.R.: Solute transport as related to soil structure in unsaturated intact soil blocks, *Soil Sci. Sci. Am. J.*, 64, pp.818–826, 2000.
- 34) Bowman, R.S. and Rice, R.C.: Transport of conservative tracers in the field under intermittent flood irrigation, *Water Resour. Res.*, 22(11), pp.1531–1536, 1986.
- 35) Ellsworth, T.R. and Jury, W.A.: A three-dimensional field study of solute transport through unsaturated, layered, porous media 2. characterization of vertical dispersion, *Water Resour. Res.*, 27(5), pp.967–981, 1991.
- 36) Yule, D.F. and Gardner, W.R.: Longitudinal and transverse dispersion coefficients in unsaturated plainfield sand, *Water Resour. Res.*, 14(4), pp.582–588, 1978.

(2012年3月8日受付)