



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

(Citation)

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**・島田遙***・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

土壤・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
飽和透水俹数 (cm/s)	0.751	0.0341
間隙率 (-)	0.421	0.638
試料の色	灰色	褐色

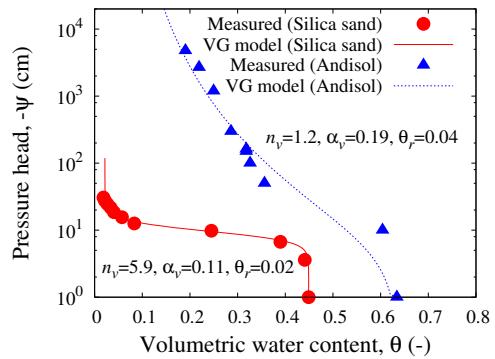


図-1 土質試料の水分特性曲線.

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土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 1 mg/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、平均粒径と均等俹数は

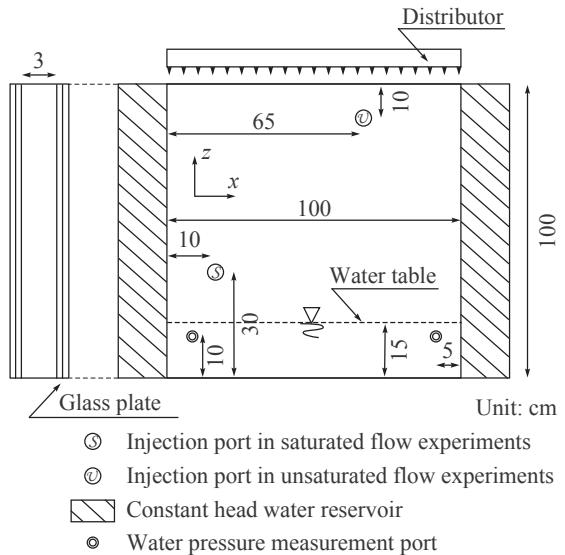


図-2 物質移動実験装置の概略図.

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俹数を求めた。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。

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

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、 α_v と 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、色素トレーサの移動挙動を可視化した。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

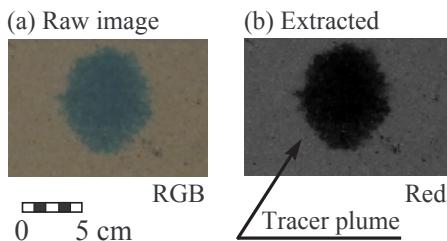


図-3 ケイ砂地盤の画像:(a) RGB 画像, (b) Red 成分抽出画像.

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に

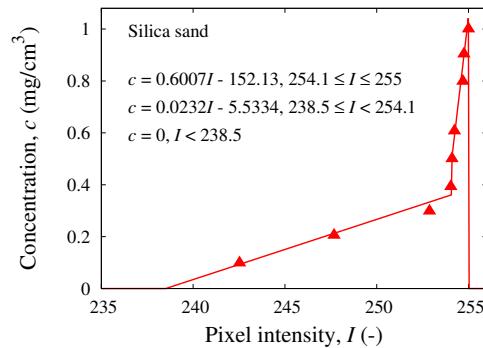


図-4 ケイ砂地盤の校正曲線の一例.

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

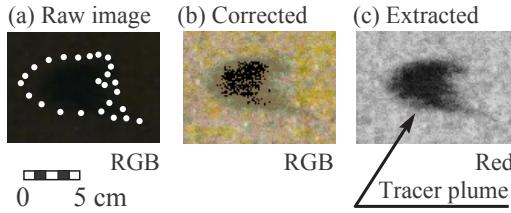


図-5 黒ボク地盤の画像 : (a) RGB 画像, (b) 振正後の RGB 画像, (c) Red 成分抽出画像.

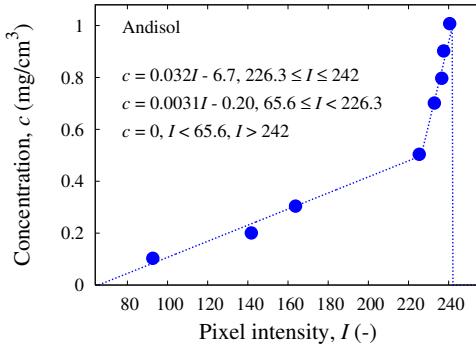


図-6 黒ボク地盤の校正曲線の一例.

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, 土質試料の色相に変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帶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⁾.

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

ここに, M_{ij} は空間モーメント, c は溶質濃度, x と z は座標, t は時間, i と 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⁾.

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

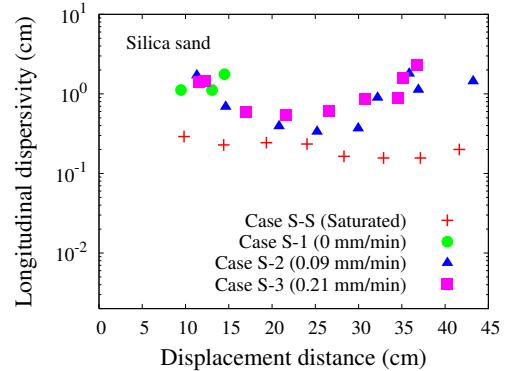


図-7 ケイ砂地盤における縦分散長の推定結果.

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.

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

ここに, x_c と 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.

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

さらに, 縦分散長と横分散長を次式にて推定した²⁴⁾.

$$\alpha_L = \frac{1}{2} \frac{\sigma_{xx}}{\xi_c}, \quad \alpha_T = \frac{1}{2} \frac{\sigma_{zz}}{\xi_c} \quad \text{飽和条件} \quad (6)$$

$$\alpha_L = \frac{1}{2} \frac{\sigma_{zz}}{\xi_c}, \quad \alpha_T = \frac{1}{2} \frac{\sigma_{xx}}{\xi_c} \quad \text{不飽和条件} \quad (7)$$

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, 不飽和条件下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

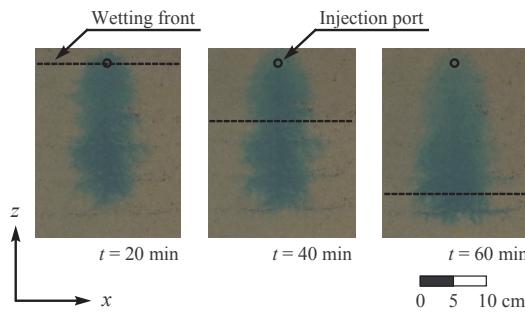


図-8 0.21 mm/min 条件下にあるケイ砂地盤の溶質移動.

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、進行方向に對する色素トレーサの空間分布のばらつきが小さくなつた結果、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份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

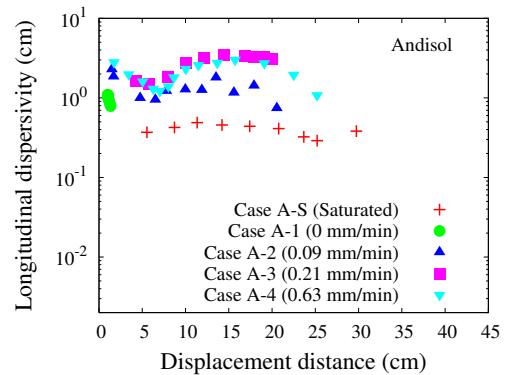


図-9 黒ボク地盤における縦分散長の推定結果.

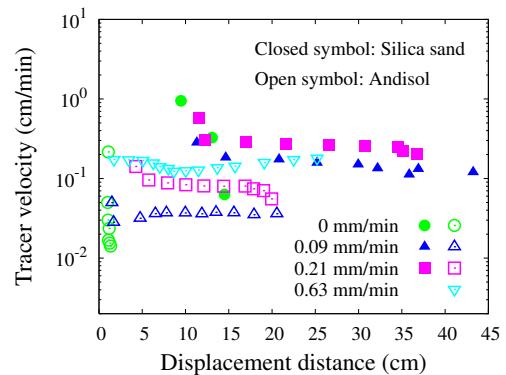


図-10 不飽和条件下における色素トレーサの移動速度の結果.

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。

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

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

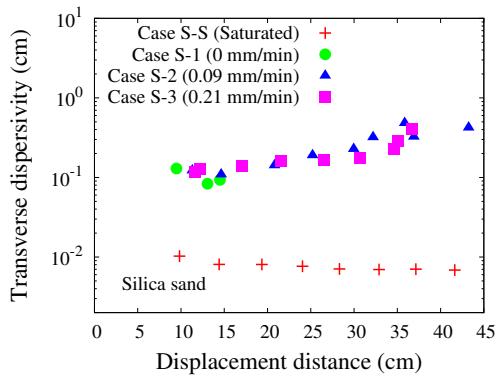


図-11 ケイ砂地盤における横分散長の推定結果.

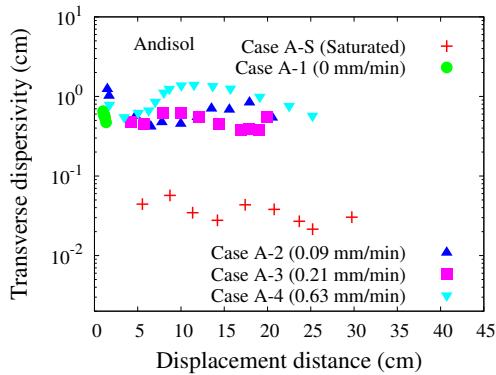


図-12 黒ボク地盤における横分散長の推定結果.

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つたと考えられる。

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

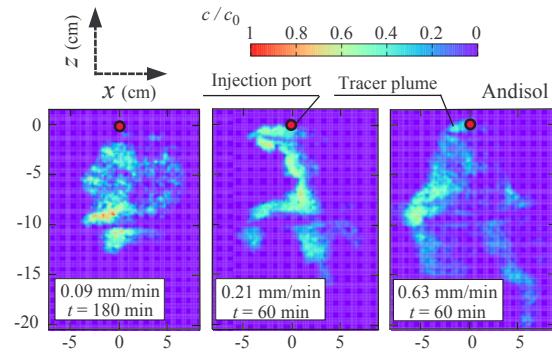


図-13 黒ボク地盤の溶質移動の状況.

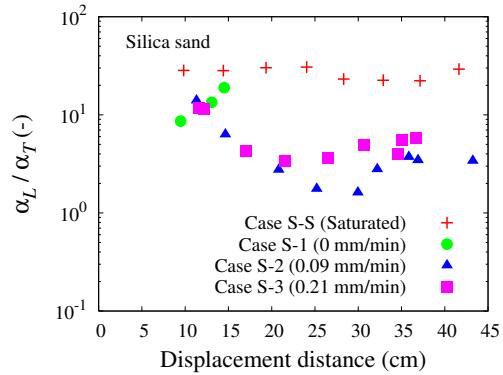


図-14 ケイ砂地盤の分散比の推定結果.

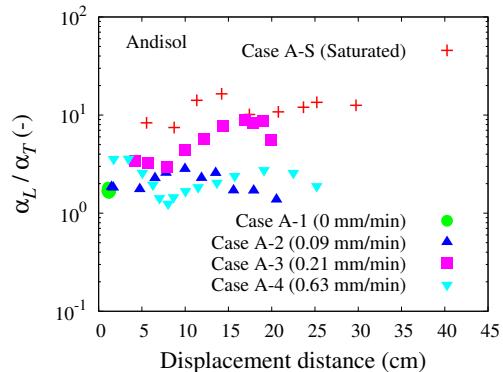


図-15 黒ボク地盤の分散比の推定結果.

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

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。

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 ~ 0.243	0.00520 ~ 0.00808	9.8 ~ 54.7	飽和	This study (Silica sand)
0.290 ~ 0.489	0.0215 ~ 0.0570	5.5 ~ 29.7	飽和	This study (Andisol)
0.522 ~ 0.756	—	30.2	飽和	Maraqa et al. ²⁷⁾
—	0.0024 ~ 0.10	37.6 ~ 41.2	飽和	Seagren et al. ²⁸⁾
0.335 ~ 1.80	0.0833 ~ 0.483	9.5 ~ 43.2	不飽和	This study (Silica sand)
0.764 ~ 3.48	0.379 ~ 1.40	1.1 ~ 25.2	不飽和	This study (Andisol)
1.02 ~ 1.67	0.320 ~ 0.577	5 ~ 25	不飽和	Inoue et al. ⁹⁾
—	0.0029	30	不飽和	Massabò et al. ¹⁰⁾
0.966 ~ 1.631	—	30.2	不飽和	Maraqa et al. ²⁷⁾

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

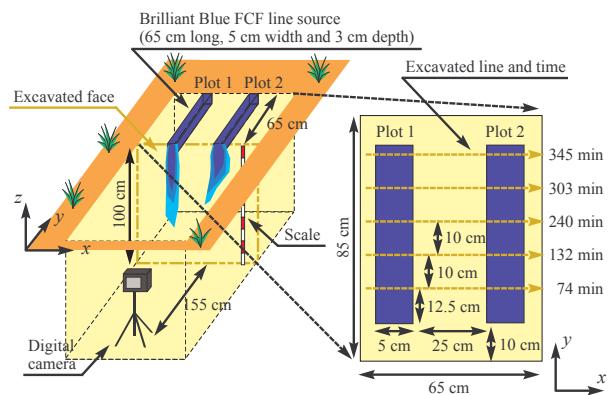


図-16 フィールド実験の概要。

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、5 m × 3 m の平面領域にわたり、地表面から1 m 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の帯状にトレーナーを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 (cm)	粘土 (%)	シルト (%)	砂 (%)	礫 (%)	平均粒径 (cm)	均等係数 (-)	透水係数 (cm/s)	間隙率 (-)	乾燥密度 (g/cm ³)	試料の色
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

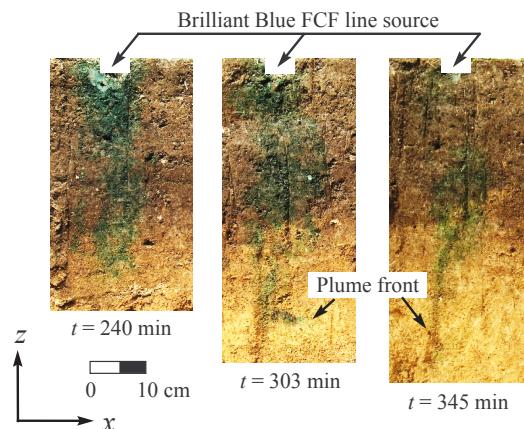


図-17 フィールド実験における溶質移動の様子 (Plot 1) .

視化について試行錯誤した上で、初期濃度を 2 mg/cm^3 に設定した。2つのトレンチ Plot 1 と Plot 2 にそれぞれ 1000 cm^3 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 $65 \text{ cm} \times 85 \text{ cm}$ 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、時間経過に従つて順次、水平方向に約 10 cm 間隔で深さ 1 m 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 155 cm 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。

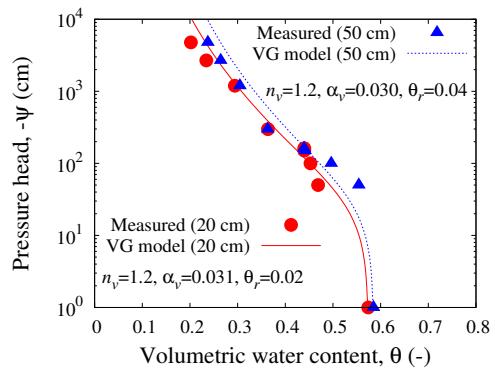


図-18 フィールド試料の水分特性曲線.

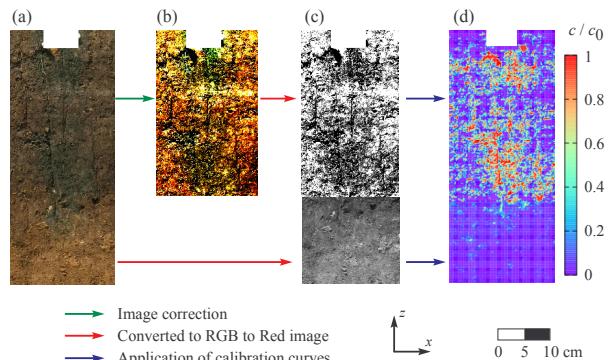


図-19 画像処理の流れ : (a) RGB 画像, (b) 上層部の画像補正, (c) Red 成分抽出画像, (d) 色素トレーサ濃度分布.

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ることから、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

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.

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 ~ 3.72	0.52 ~ 2.35	1.8 ~ 21.7	不飽和	This study (Andisol)
0.66 ~ 11.73	0.33 ~ 6.59	7.5 ~ 25	不飽和	Forrer et al. ³⁾
2.6 ~ 18.3	0.03 ~ 2.20	6 ~ 14	不飽和	Abbasi et al. ³⁰⁾
1.9 ~ 33.6	—	5 ~ 90	不飽和	Persson and Berndtsson ²⁾
1.0 ~ 1.6	—	25 ~ 100	不飽和	Snow et al. ³¹⁾
1.75 ~ 10.89	—	20	不飽和	Radcliffe et al. ³²⁾

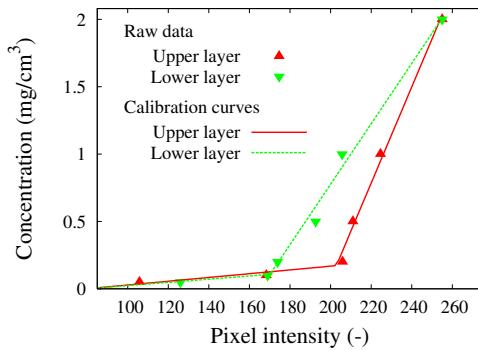


図-20 フィールド地盤に対する校正曲線の一例.

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ーは存在しないため、既定の濃度に調整した色素トレーサー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)に色素トレーサー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

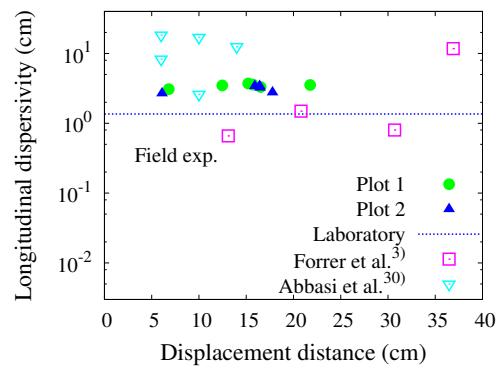


図-21 フィールド地盤の縦分散長の推定結果.

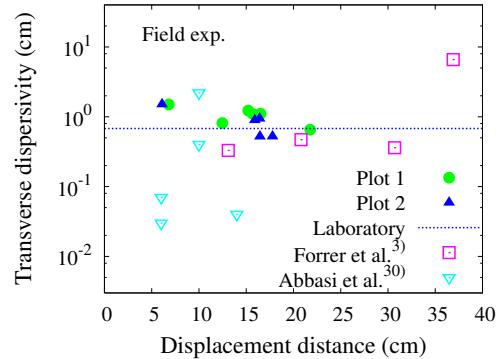


図-22 フィールド地盤の横分散長の推定結果.

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、色素トレーサーの注入から303分後に掘削した断面

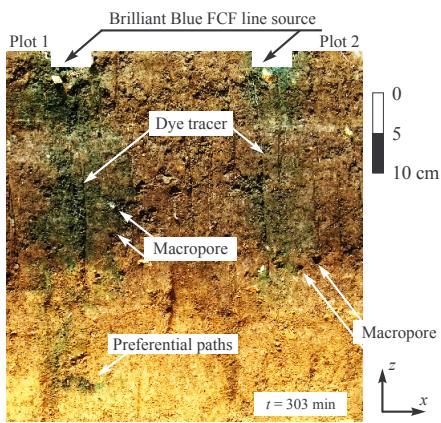


図-23 対象サイトのマクロポアと選択的輸送の様子.

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

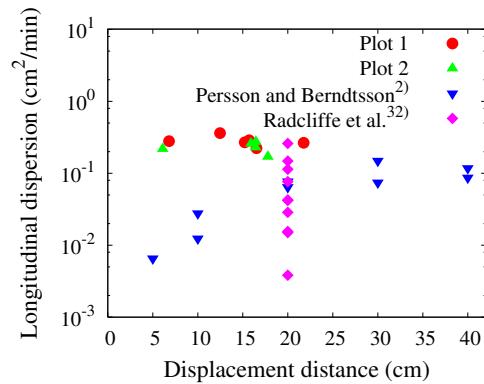


図-24 フィールド地盤の縦分散係数の推定結果.

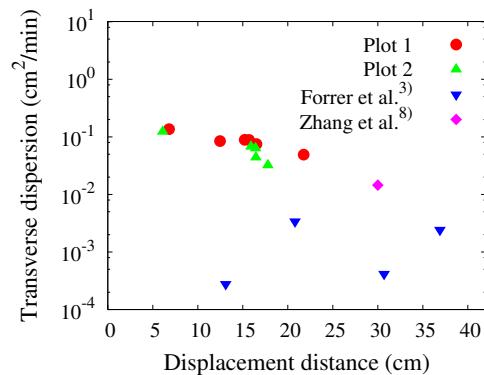


図-25 フィールド地盤の横分散係数の推定結果.

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.

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

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

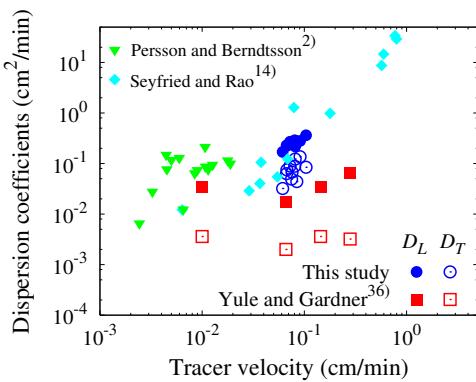


図-26 トレーサ移動速度と分散係数の関係.

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つたと推察される.

6. 結論

本研究では, 鮫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

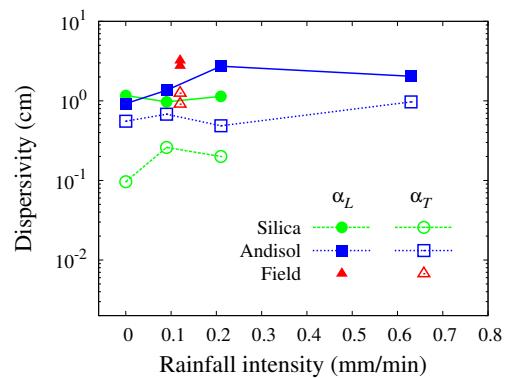


図-27 降水強度と分散長の関係.

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.

1. 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.
2. 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.
3. 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つた.
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ともに同じ試料を用いたラボ実験よりも大きくなつた.
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.
- Vanderborgh, 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.
- 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.
- 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.: Two-dimensional 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Quisenberry, V.L., Phillips, R.E. and Zelenznik, J.M.: Spatial distribution of water and chloride macropore flow in a well-structured soil, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58, pp.1294–1300, 1994.
- 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.
- 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.
- 井上一哉, 島田遙, 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.
- Dagan, G.: Solute transport in heterogeneous porous formations, *J. Fluid Mech.*, 145, pp.151–177, 1984.
- Matsubayashi, U., Devkota, L.P. and Takagi, F.: Characteristics of the dispersion coefficient in miscible displacement through a glass beads medium, *J. Hydrol.*, 192, pp.51–64, 1997.
- 坂本康, 渡辺和彦: 不飽和層中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.
- 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.
- 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.
- Klenk, I.D. and Grathwohl, P.: Transverse vertical dispersion in groundwater and the capillary fringe, *J. Contam. Hydrol.*, 58, pp.111–128, 2002.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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)