



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

井上, 一哉
小林, 晃
鈴木, 克季
竹之内, 亮
田中, 勉

(Citation)

土木学会論文集B1（水工学）, 67(4):I_613-I_618

(Issue Date)

2011

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

©2011 公益社団法人 土木学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90003323>



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

A NEW APPROACH FOR ESTIMATING MACRODISPERSIVITY
USING DYE TRACER AND SPATIAL MOMENT ANALYSIS

井上一哉¹・小林晃²・鈴木克季³・竹之内亮³・田中勉⁴

Kazuya INOUE, Akira KOBAYASHI, Katsutoshi SUZUKI,
Ryo TAKENOUTI and Tsutomu TANAKA

¹ 正会員 博士(農学) 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)

² 正会員 工博 京都大学准教授 大学院農学研究科 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

³ 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)

⁴ 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)

Laboratory dye tracer experiments with a pulse source were conducted in homogeneous and stratified porous formations under saturated unidirectional flow conditions. A new methodology using spatial moment analysis linked with image processing of a dye tracer behavior was developed to estimate macrodispersivities both in longitudinal and lateral directions. A calibration relation between the dye concentration and the corresponding pixel brightness was established to quantify the spatial distribution of dye tracer. Both dispersivities asymptotically approached a certain value and exhibited a dependency on the difference of hydraulic conductivities associated with the stratification, which played a significant role in the evolution of transverse dispersion. Laboratory study was extended by a random walk particle tracking approach to reconstruct the estimated dispersivity transition, demonstrating a good agreement between the experimental and numerical results not only in homogeneous but in stratified porous media of concern.

Key Words: dye tracer experiment, spatial moment, image analysis, brightness, macrodispersion

1. 緒論

色素を用いて浸透水の流れ経路や溶質の移流分散過程を可視化する試みはラボレベル・フィールドレベルで長く取り組まれている¹⁾⁻³⁾。色彩や化学特性の異なる多くの色素が存在し、それらを容易に入手できる一方で、使用時の安全性や環境に対する負荷を考慮すると、トレーサとしての利用に適した色素は限られている。ブリリアントブルーFCFやローダミンWT、ウラニンは毒性や安定性の面でトレーザとして優れた特徴を有しており、飽和帯や不飽和帯に関わらず広く利用されている色素の代表である⁴⁾⁵⁾。色素トレーザは染色領域を直接観察できる点のみならず、温度変化の大きい空間への利用可能性を有していることから、今後もトレーザとしての活用を期待されている⁶⁾。

水分や溶質の移動に関するラボ実験ならびに不飽和帯を対象としたフィールド実験に限定すると、画像処理技術と連携した色素トレーザの適用が見られる。たとえば、密度流領域の経時変化や選択流の同定¹⁾⁷⁾など、色

素トレーザの空間分布を定量化する過程において画像解析技術を援用している。トレーザの空間分布や分布形状の時間的な変化を評価することに力点を置く研究¹⁾は多くなされている一方で、色素トレーザと画像解析を用いて多孔質体内での分散挙動を定量化する研究は少ない。Forrerら²⁾は不飽和領域に分布した色素形状を画像処理により濃度分布に変換し、縦・横分散長を推定しているものの、移行に伴う分散長の時間変化を捉えるには至っていない。井上ら⁸⁾は色素トレーザの染色域と非染色域の境界を捉えて、縦・横分散長の時間変化を追跡する方法を提案しているが、均質領域での適用に留まっており、また精度の面でも改良の余地がある。

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ザ実験を実施し、画像処理と空間モーメント法を応用した縦・横分散長の推定手法を新たに提案した。また、マクロ分散の評価に向けて、流れ方向に並行した成層地盤に対して提案手法を適用し、層の構成状態と分散長の変化について検討した。本研究はラボレベルでの検討であるものの、不均質領域における溶質分散の推定

表-1 試料の物性値

試料	平均径 (cm)	均等係数 (-)	透水係数 (cm/s)	間隙率 (-)
K4	0.085	1.80	0.751	0.42 ± 0.01
K5	0.050	1.25	0.268	0.42 ± 0.01
K6	0.030	1.31	0.101	0.42 ± 0.01
G8	0.080	1.00	0.208	0.36

に色素トレーサと画像解析を応用した研究は希少であり、溶質移行に関する知見の蓄積やフィールドでのマクロ分散現象の評価に向けて有意義な課題と考えられる。

2. 色素トレーサ実験

(1) 試料と実験装置

溶質の移行挙動を可視化することを目的として、本実験には青系水溶性色素のブリリアントブルー-FCFを採用した。また、色素水溶液の初期濃度は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、 $0.4 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ に設定した。浸透場を形成する試料には平均粒径の異なる3種類のケイ砂を採用し、実験結果の比較のため、0.08 cm粒径のガラスビーズを使用した。表-1に示すように、いずれの試料も均等係数は十分に小さく、ケイ砂については平均粒径の大きい順に、K4, K5, K6, ガラスビーズはG8と記す。

本実験では図-1に示すように、長さ62 cm、高さ50 cm、奥行き1 cmの実験装置をステンレス材にて作成し、装置内に試料を充填することで浸透場を形成した。また、色素トレーサの移行挙動を観察するため、実験装置の前面と背面には厚さ2 cmのアクリル板を設置し、実験装置の頂部をステンレス板にて密閉することにより、被圧状態の流れ場を形成した。図-1に示すように、実験装置内を底部から25 cmの領域Iと頂部50 cmまでの領域IIに便宜上、区分して称し、装置底部から37.5 cmの地点に直径0.1 cmのトレーサ注入孔を設けて、領域IIを移行する色素トレーサの様子を画像に収めた。また、色素トレーサの移動と観察ができる限り阻害しないように、領域Iに15個のピエゾメータ孔を設け、ビニルチューブを接続してマノメータを作成し、ピエゾ水頭値の計測に供した。

(2) 実験方法

本実験では、飽和条件下にある浸透場を対象とするため、予め飽和させた試料を水中落下法により充填することで流れ場を形成した。単層地盤を形成する際には、5 cmずつ締め固めながら間隙率を調整した。また、2層地盤を作成する場合は4 cmごとに試料を充填し、図-1に示すLayer 1とLayer 2に、同一の試料を充填し、その他の層を異なる試料にて構成した。さらに、Layer 1とLayer 4に充填する試料とLayer 2とLayer 3の試料を変えることで、3層から成る浸透場を形成した。試料の充填

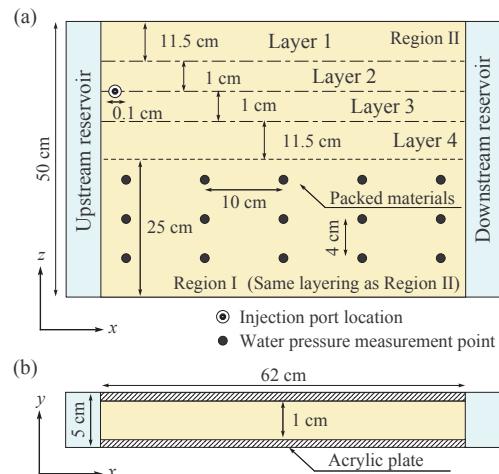


図-1 色素トレーサ実験装置概略図：(a) 断面図、(b) 平面図。

にあたり、層の構成数に関わらず、浸透場の領域Iと領域IIの層構成は同一になるように作成した。また、浸透領域の体積と充填試料の質量を基に、ケイ砂の間隙率を 0.42 ± 0.01 、ガラスビーズを0.36に密度調整した。なお、3層地盤と2層地盤の実験状態を統一するため、トレーサ注入量と注入後のトレーサ分布面積を試行錯誤した結果、Layer 2とLayer 3のトレーサ初期分布の面積がLayer 1とLayer 4のトレーサ分布を合算した面積に概ね等しくなるよう、Layer 2とLayer 3の層厚を1 cmに設定した。

所定の地盤を作成後、上下流部の定水頭タンクの水圧を調整することで浸透場に動水勾配をつけ、一様流条件下にある流れ場を形成した。すなわち本実験では、x軸に沿った層構成ならびに領域流れを生成した。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、注射針とシリンドリポンプを用いて 6 cm^3 のトレーサを20秒で注入した。トレーサ注入後、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。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、対象地盤に対して動水勾配を種々に変化させて実験した。

3. 分散長の推定方法

(1) トレーサ濃度の空間分布推定

図-2(a)に色素トレーサの分布を収めた生のRGB画像を示す。ブルームの中心部ほど青の彩度が高く、外側ほど低くなる様子が見て取れ、彩度の変化は色素の濃度変化に対応していると考えられる。また、図-2(b)はRGB画像から赤成分(R)のみを抽出した画像(R画像と記す)であり、明度の変化を数値化するため、図-2(b)に示すP-P'線を構成する333ピクセルの明度を抽出した結果を図-3(a)に示す。図より色素の濃度に応じてピクセルの明度には差異が生じており、土粒子部分とトレーサでは対応する明度は異なることがわかる。これらの点を踏ま

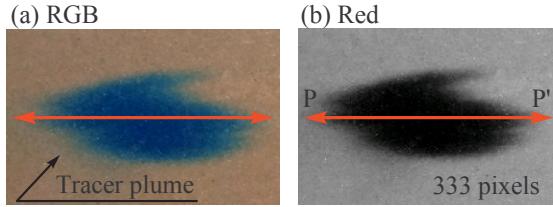


図-2 トレーサ分布の画像 : (a) RGBカラー, (b) Redカラー.

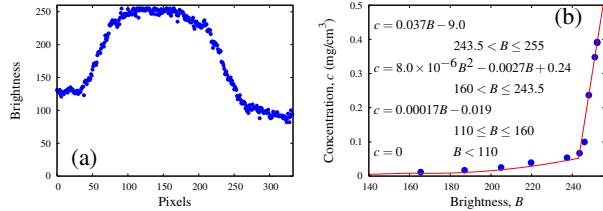


図-3 (a) P-P'上の明度プロファイル, (b) 明度と濃度の関係.

え、ピクセルの明度と色素濃度の関係を表す校正曲線を作成し、色素トレーサの空間濃度分布推定に用いた。

実験環境と同一の条件下にて校正用の画像を取得するため、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。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求め、校正曲線の基礎データを得た。トレーサ分布領域の明度に及ぼす実験試料の色相の影響は小さく、明度の差異は試料よりも照明やカメラの位置に強く影響を受けることから、対象とする層地盤ごとに前述の手続きにより校正曲線を求めた。図-3(b)にピクセルの明度と色素濃度の関係について校正した結果の一例を校正式とともに示す。明度240付近での濃度変化は大きいものの、色素の移行に伴う明度の減少やピクセルノイズの影響を考慮し、明度を判別可能な濃度領域を確保するため、試行錯誤により初期濃度を設定した。

以上より、解析対象とする画像を構成するすべてのピクセルから明度データを抽出し、校正曲線に当てはめることで、色素トレーサの濃度分布を推定することができる。本研究では、色素トレーサの移行過程を定期的に画像に収めていることから、時間ごとに色素トレーサの明度分布を抽出し、校正後の濃度分布を空間モーメント解析に組み込むことで時系列で縦・横分散長を推定する方法を考案した。なお、明度分布を取得する際には、RGB画像を対象に同様の校正過程を経て、色素濃度と明度の関係を求めることもできる。しかしながら、R画像の方がRGB画像よりもノイズが少ないため、精度の観点からR画像を採用した。

(2) 空間モーメント解析

2次元場における濃度分布の空間モーメント M_{ij} は次式にて表される⁹⁾.

$$M_{ij}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} c(x, z, t) x^i z^j dx dz \quad (1)$$

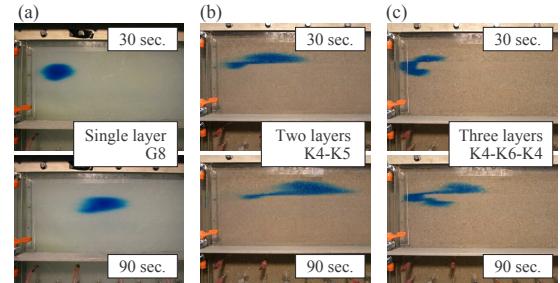


図-4 色素トレーサ分布の例 : (a) 単層, (b) 2層, (c) 3層地盤.

ここに、 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。式(1)のトレーサ濃度を校正曲線に基づいて明度分布に関連付けることにより、次式に変換する。

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

ここに、 $H(x, z)$ は1ピクセルの面積、 $B(x, z, t)$ はピクセルの明度を表す。

トレーサ分布の重心位置 (x_c, z_c) は次式にて求められる。

$$x_c = M_{10}/M_{00}, \quad z_c = M_{01}/M_{00} \quad (3)$$

また、トレーサ重心に対する空間2次モーメントは共分散テンソル σ として次式となる。

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{M_{20}}{M_{00}} - x_c^2 & \frac{M_{11}}{M_{00}} - x_c z_c \\ \frac{M_{11}}{M_{00}} - z_c x_c & \frac{M_{02}}{M_{00}} - z_c^2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

共分散テンソルはトレーサ重心からの濃度分散を表し、縦分散長 α_L と横分散長 α_T を次式にて推定する⁸⁾.

$$\alpha_L = \frac{1}{2} \frac{\sigma_{xx}}{\xi_c}, \quad \alpha_T = \frac{1}{2} \frac{\sigma_{zz}}{\xi_c} \quad (5)$$

ここに、 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

(1) 色素トレーサの空間分布変動

図-4に種々の浸透場における色素トレーサの移行挙動を示す。図中にはトレーサ注入時からの経過時間とともに、層を構成する試料名を記載している。K4-K5の表記はLayer 1とLayer 2に試料K4、Layer 3とLayer 4に試料K5を充填した2層地盤を表し、K4-K6-K4はLayer 1に試料K4、Layer 2とLayer 3に試料K6、Layer 4に試料K4を充填した3層地盤であることを示す。この表記方法は以降の図においても同様に使用する。

図-4より、色素トレーサの空間分布は層の構成状態に大きく依存し、ブルームの分布幅は流下方向のみならず、流れと垂直な方向にも異なることが見て取れる。これらの画像を基に、色素の濃度分布を明度分布から導出し、空間モーメント解析に組み込むことで縦・横分散長を推定する。空間モーメント解析にて分散長を推定する

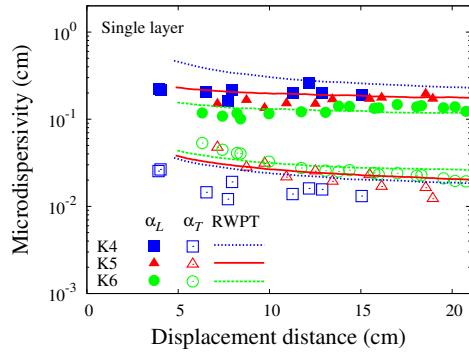


図-5 単層地盤におけるミクロ分散長の推定結果.

際には、注入した色素がすべて浸透場内に存在していることが前提となる¹⁰⁾ため、色素トレーサのフロント部が下流端に到達するまでの分布変動が解析対象となる。トレーサ分布の重心位置の移行距離に換算して、トレーサ注入点から約20 cmの範囲までは色素の流出が見られなかつたため、この区間にて分散長変化を予測した。

(2) 単層地盤におけるミクロ分散長推定

均質な単層地盤における分散はミクロ分散であると見なし、本手法により得られた分散長の結果を図-5に示す。縦・横分散長へ及ぼす浸透流速の影響は見られなかつたため、各単層地盤において最大と最小のレイノルズ数条件下にて得られた結果のみをまとめてプロットしている。実験より得られた縦分散長は移行距離に関わらずほぼ一定の値で推移しているのに対して、横分散長は移行距離とともにわずかに低下し、一定値に収束する傾向にある。色素トレーサをパルス注入する本実験では、縦分散方向の溶質混合は流れに沿って比較的早く安定すると考えられる。一方で、横分散方向への流速成分はほぼゼロであるため、安定した横分散に達するには縦分散よりも長い流下距離を要すると推察される。これはいくつかの研究³⁾⁸⁾において指摘されている現象であり、パルス注入によるトレーサ実験にて横分散長の推定結果にばらつきが生じやすい要因であると推測される。

(3) ランダムウォーク粒子追跡法を用いた妥当性評価

提案した手法により得られた縦・横分散長の妥当性について評価するため、ランダムウォーク粒子追跡法（以下、RWPTと記す）を用いて色素トレーサの移行挙動を数値的に再現し、分散長の変化を追跡した。RWPTを適用する前に、FEM解析により浸透流方程式を解くことで浸透場の流速分布を導出した。

$$\nabla \cdot (K(\mathbf{x}) \nabla h) = 0 \quad (6)$$

ここに、 h はピエゾ水頭、 \mathbf{x} は位置ベクトル、 $K(\mathbf{x})$ は透水係数テンソルであり、等方性を仮定した。本解析では、 x 軸方向に一様流れを形成するため、 $x = 0$ と $x = 62$ cmの面を実測に基づく水頭既知境界、他の面を不透水境界に

設定し、次式にて流速分布を求めた。

$$n_p \mathbf{v} = -K(\mathbf{x}) \nabla h \quad (7)$$

ここに、 \mathbf{v} は実流速ベクトル、 n_p は間隙率である。

次に、RWPTの基礎式は次式で表現される¹⁰⁾¹¹⁾。

$$\mathbf{X}_p(t + \Delta t) = \mathbf{X}_p(t) + (\mathbf{v} + \nabla \cdot \mathbf{D}) \Delta t / R + \mathbf{B} \mathbf{\Xi} \sqrt{\Delta t} \quad (8)$$

ここに、 $\mathbf{X}_p(t)$ は時間 t における粒子位置ベクトル、 Δt は時間増分、 $\mathbf{\Xi}$ は平均0、分散1の正規分布に従うベクトル、 R は遅延係数、 \mathbf{D} は分散係数テンソルである。

$$\mathbf{D} = (\alpha_T |\mathbf{v}| + D_d) \mathbf{I} + (\alpha_L - \alpha_T) v_i v_j / |\mathbf{v}| \quad (9)$$

ここに、 v_i は実流速成分、 $|\mathbf{v}|$ は実流速ノルム、 D_d は有効拡散係数、 \mathbf{I} は単位マトリクス、 \mathbf{B} は変位マトリクスである。

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \sqrt{2\alpha_L v_1^2 / (|\mathbf{v}| R)} & 0 \\ 0 & \sqrt{2\alpha_T v_1^2 / (|\mathbf{v}| R)} \end{pmatrix} \quad (10)$$

空間モーメント量は、RWPTでの粒子移行の結果を基に次式にて評価する。

$$X_{G,i} = \frac{1}{m(t)} \sum_{k=1}^{NP_t} \frac{m_p^k X_{p,i}^k(t)}{R(X_p^k(t))}, \quad m(t) = \sum_{k=1}^{NP_t} \frac{m_p^k}{R(X_p^k(t))} \quad (11)$$

$$S_{ij}(t) = \frac{1}{m(t)} \sum_{k=1}^{NP_t} \frac{m_p^k X_{p,i}^k(t) X_{p,j}^k(t)}{R(X_p^k(t))} - X_{G,i}(t) X_{G,j}(t) \quad (12)$$

ここに、 $X_{G,i}$ は時間 t の粒子空間分布に対する重心位置を表す空間1次モーメント、 $m(t)$ は時間 t において空間内に存在する粒子の総質量、 S_{ij} は粒子空間分布に対する空間2次モーメント、 NP_t は時間 t の空間内の粒子総数である。また、縦・横分散長を次式により推定する⁹⁾¹⁰⁾。

$$\alpha_L = \frac{S_{11}(\xi_G(t))}{2\xi_G(t)}, \quad \alpha_T = \frac{S_{22}(\xi_G(t))}{2\xi_G(t)} \quad (13)$$

ここに、 $\xi_G(t)$ は時間 t における粒子群の重心位置の変位距離である。

RWPTを実行する際に必要な縦・横分散長の値は各単層地盤にて得られた値の平均値を採用し、遅延係数は1と見なした。また、有効拡散係数は無視できる程度に小さいと仮定し、トレーサ注入位置に 10^4 粒子を発生させて移行挙動を追跡した。図-5に各単層地盤に対して、RWPTにより推定した分散長の変化を示す。トレーサ注入時の流速場のわずかな乱れは移行距離の短い領域での実験値と解析値の乖離につながると考えられ⁹⁾、この点が移行距離10 cm以下の結果に現れている。しかしながら、全体的には提案手法により推定した分散長の変化はRWPTによる分散長の変化と良好に一致しており、非破壊にて縦分散と横分散を同時に推定できる本手法は妥当な結果を導出していると考えられる。

(4) 既往の研究との比較

本手法による分散長の推定結果を既往の研究例と比較するため、レイノルズ数 Re に対する分散係数 $D = \alpha v_1$ と

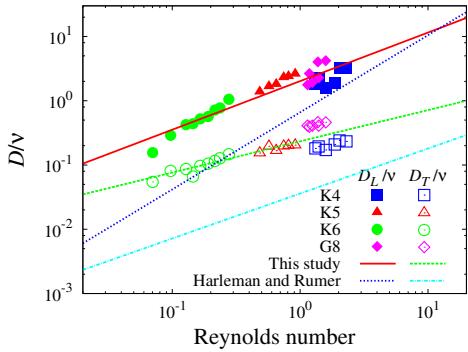


図-6 レイノルズ数と分散係数の関係.

動粘性係数 ν の比の関係を図-6に示す。図中には、各レイノルズ数条件下にて得られた縦・横分散長の平均値をプロットしており、また、HarlemanとRumer¹²⁾による経験式 $D/\nu = aRe^b$ と本実験にて得られた経験式を合わせて示す。ここに、 a と b は試料に依存する係数である。

本実験にて対象としたレイノルズ数の範囲では、 D/ν の値はHarlemanとRumerの結果より大きくなることがわかる。これは本実験にて用いた試料はHarlemanとRumerの試料よりも平均粒径は小さく、均等係数は大きいことが要因であると推察される。しかしながら、レイノルズ数の増加に伴い D/ν の値は増加する傾向にあり、縦分散係数 D_L と横分散係数 D_T の差異は約1オーダーの範囲に分布していることから、妥当な推定結果を得ていると考えられる。また、ガラスビーズに対する推定値は平均粒径が類似した試料K4の結果と大きな差異はなく、試料の素材に關係なく本手法は適用できると判断される。

(5) 成層地盤におけるマクロ分散長推定

本手法を用いて2層地盤に対して得られた分散長の推定結果を図-7にプロットする。単層地盤の結果と同様に、最大と最小のレイノルズ数条件での推定結果のみをまとめて示している。対象地盤における溶質分散は透水係数の分布に起因した流速分布に依存することから、スケールは小さいものの、マクロ分散⁹⁾として扱い、前述のミクロ分散と区別するため、縦分散長と横分散長をそれぞれ A_L と A_T として表記する。また、単層地盤と同様に、RWPTを用いて分散長の変動を追跡した結果を合わせて示す。RWPTの入力に用いたミクロ分散長は図-5にて得られた各層の推定値を平均した値を採用した。

縦分散長に対する本手法の推定値とRWPTの解析値は概ね一致しており、2層地盤に対しても妥当な結果が得られていると考えられる。また、図-5の単層地盤の結果と比較すると、縦分散長は約1オーダー高い値となり、移行距離とともに値は増加しながら一定値へ漸近している。さらには、透水係数に開きのあるK4-K6の2層構成の方がK4-K5の地盤よりも分散長は約2倍から3倍大きくなっている。さらに、透水係数の差が増すことでマクロ縦分散長は増大することが確認される。

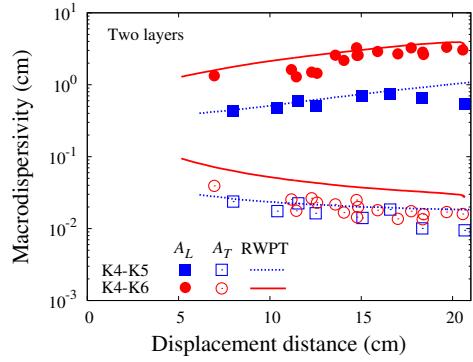


図-7 2層地盤におけるマクロ分散長の推定結果.

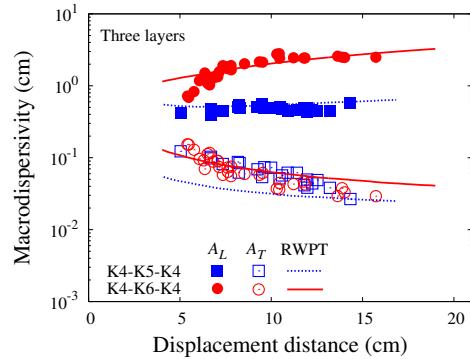


図-8 3層地盤におけるマクロ分散長の推定結果.

一方、横分散長は層を構成する試料に関わらず、ほぼ同じ傾向で推移しており、図-5に示すミクロ横分散長と類似した推定値であることから、本実験では縦分散方向のみにマクロ分散現象が発現していることが示唆される。本実験場の性質上、流速成分を有する方向が一方向のみであることから、横分散に関してはマクロ分散現象が発現する要因ではなく、間隙内のミクロ分散により色素は拡がると考えられる。一方で、K4-K6地盤の横分散長は解析値の方が実験値より2倍程度大きくなっている。縦分散に比べて横分散は色素の移動量がかなり小さいため、溶質混合量の小さい横分散の時間変化を捉えにくいためが要因であると推察される。

次に、層の構成数がマクロ分散に与える影響について考察するため、3層地盤にて得られた分散長の推定結果を図-8に示す。また、これまでと同様に、RWPTによるマクロ分散長の変動結果を併記する。3層地盤では試料K4の占める割合が高いため、K4の単層地盤にて得られた縦・横分散長をRWPTの入力値として採用した。図-8より、2層地盤の結果と同じく、透水係数に開きのある浸透場ほどマクロ縦分散長は大きく推定されていることがわかる。また、移行距離の増加とともに縦・横分散長は一定値に漸近する傾向にある点は層数に依存しない結果と言える。これらの傾向はフィールドの成層地盤でのマクロ分散変動とも共通した点¹⁰⁾¹¹⁾であり、観測スケールに関わらず、溶質混合に伴う分散特性と安定した溶質混合に達するスケール・時間は縦方向と横方向で異なる

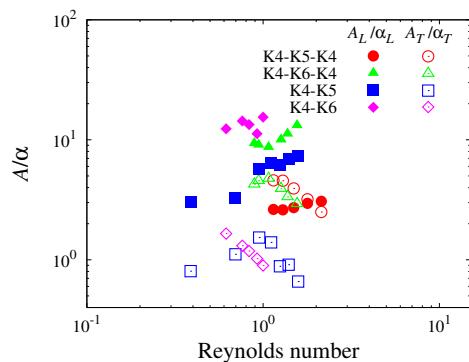


図-9 マクロ分散長とミクロ分散長の比の変化.

ことが示唆される。一方で、図-7と同様に、横分散長の実験値と解析値に差異が生じているケースがあるため、横分散長の追隨には改善の余地があると言え、今後の課題に挙げられる。

ところで、成層地盤のような不均質場では各層の流速は異なるため、層構成に呼応して分散係数 D は空間的に変化することになる。透水性の異なる領域の溶質移動に関して、Hoteitら¹³⁾は次式の物質輸送モデルを提案している。

$$P_1 = \frac{\sqrt{D_1}}{\sqrt{D_1} + \sqrt{D_2}}, \quad P_2 = 1 - P_1 = \frac{\sqrt{D_2}}{\sqrt{D_1} + \sqrt{D_2}} \quad (14)$$

ここに、 P_1 は溶質の位置する層 D_1 内に留まる確率、 P_2 は隣接する層 D_2 への移行確率、 D_1 と D_2 は各層の横分散係数である。本実験の成層地盤にて透水係数の高い層は試料K4の層であるため、横分散により色素トレーサがK4層へ移行する確率は高いと考えられる。

この点を確認するため、2層および3層地盤にて得られた縦分散長 A_L および横分散長 A_T の平均値を試料K4の縦分散長 $\alpha_L = 0.175$ cmと横分散長 $\alpha_T = 0.0156$ cmで除し、マクロ分散長とミクロ分散長の比 A/α を算出した結果をレイノルズ数の関数として図-9に示す。図より、試料K6を含む地盤の縦分散長は大きく得られており、約7倍の透水係数の差異により縦分散長は10倍程度異なることが示唆される。また、横分散に関しては、3層構成の横分散長は2層構成に比して5倍から10倍大きく得られている。これは式(14)にて表されるように、分散性の高い層へ移行する確率の差異に起因すると考えられる。3層地盤の場合、中間層を構成する試料K5やK6を移行するトレーサは上下に隣接するK4層へ移行することが可能であるため、2層構成よりも隣接層への移行確率は高くなると推察される。つまりは、3層構成となることで上下2方向への移行が可能となり、透水性の高い試料K4へのトレーサ移動量が増加し、3層地盤の2次空間モーメント量は2層地盤よりも大きくなり、結果としてマクロ分散長の増加につながったと推量される。以上の議論より、マクロ分散現象に及ぼす隣接層の影響は大きく、層構成や透水層の分散係数に応じてマクロ分散の度合いは変化すると考えられる。また、色素分布を基に縦・横方向の分散を定量化できる本手法は有用であると言える。

5. 結論

本研究では、成層地盤を対象として、飽和・定常流条件下で色素トレーサ実験を実施し、画素データと空間モーメント法を連携した分散長の推定手法を提案した。得られた分散長を基に、ランダムウォーク粒子追跡法を用いて縦・横分散長の推移を追跡すると、層数に関わらず、実験結果と良く一致する結果を得た。また、層の構成状態や透水係数の差異に応じたマクロ分散を定量的に評価し、分散係数の差異に伴う隣接層へのトレーサ移行確率の違いが横分散長に影響を与えている可能性を指摘した。

参考文献

- 1) Schincariol, R.A. and Schwartz, F.W.: An experimental investigation of variable density flow and mixing in homogeneous and heterogeneous media, *Water Resour. Res.*, 26(10), pp.2317–2329, 1990.
- 2) 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.
- 3) 中川 啓, 中川原尚子, 斎藤雅彦: 水平浸透水槽を用いたトレーサー試験による不飽和分散長の評価, 水工学論文集, 54, pp.608–617, 2010.
- 4) Mehlhorn, J., Leibundgut, Ch. and Rogg, H.: Determination of the flow and transport parameters of the unsaturated zone using dye tracers, *IAHS Publication*, 229, pp.23–96, 1995.
- 5) Flury, M. and Flühler, H.: Brilliant blue FCF as a dye tracer for solute transport studies - a toxicological overview, *J. Environ. Qual.*, 23, pp.1108–1112, 1994.
- 6) 日本地下水学会, 原位置トレーサー試験に関するワーキンググループ: 地下水のトレーサー試験, 技報堂出版, 383p., 2009.
- 7) Janssen, M. and Lennartz, B.: Characterization of preferential flow pathways through paddy bunds with dye tracer tests, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 72(6), pp.1756–1766, 2008.
- 8) 井上一哉, 正木一平, 小林晃, 田中勉: 空間濃度分布と空間モーメント解析による分散長推定, 水工学論文集, 51, pp.487-492, 2007.
- 9) Tompson, A.F.B. and Gelhar, L.W.: Numerical simulation of solute transport in three-dimensional, randomly heterogeneous porous media, *Water Resour. Res.*, 26(10), pp.2541–2562, 1990.
- 10) 井上一哉, Uffink, G.J.M., 田中勉: 成層地盤のマクロ分散に及ぼす物理的・化学的不均質性の影響に関する粒子追跡アプローチ, 水工学論文集, 54, pp.607–612, 2010.
- 11) Uffink, G.J.M.: Analysis of dispersion by the random walk method, *Ph.D. Dissertation, Delft University of Technology*, 150p., 1990.
- 12) Harleman, D.R.F. and Rumer, R.R.: Longitudinal and lateral dispersion in an isotropic porous media, *J. Fluid Mech.*, 16, pp.385–394, 1963.
- 13) Hoteit, H., Mose, R., Younes, A., Lehmann, F. and Ackermann, Ph.: Three-dimensional modeling of mass transfer in porous media using the mixed hybrid finite elements and the random-walk methods, *Math. Geol.*, 34(4), pp.435–456, 2002.