



中規模溶質輸送実験による不均質多孔質体内の溶質マクロ分散現象と局所的不均質性の定量化

井上, 一哉
藤原, 隆之
倉澤, 智樹
田中, 勉

(Citation)

土木学会論文集A2 (応用力学) , 71(2):I_691-I_702

(Issue Date)

2015

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

©2015 公益社団法人 土木学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90003781>



中規模溶質輸送実験による不均質多孔質体内の溶質マクロ分散現象と局所的不均質性の定量化

井上 一哉¹・藤原 隆之²・倉澤 智樹³・田中 勉⁴

¹正会員 博(農) 神戸大学准教授 農学研究科食料共生システム学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)
E-mail: mornel@kobe-u.ac.jp

²正会員 修(農) 大阪府庁環境農林水産部 (〒540-8570 大阪市中央区大手前 2 丁目)
E-mail: FujiwaraTakay@mbox.pref.osaka.lg.jp

³学生会員 神戸大学大学院生 農学研究科食料共生システム学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)
E-mail: 147a008a@stu.kobe-u.ac.jp

⁴正会員 農博 神戸大学教授 農学研究科食料共生システム学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)
E-mail: ttanaka@kobe-u.ac.jp

本研究では、同一の不均質度を有する2種類の透水係数分布を対象として中規模溶質輸送実験を実施した。また、画像解析と空間モーメント法を応用することで不均質場における溶質輸送のマクロ分散性の空間変動を推定した。その結果、マクロ縦分散長は局所的不均質性の影響を受けて変動し、マクロ横分散長は溶質の初期位置に関わらず減少傾向を示した。また、溶質の初期位置が異なる複数の溶質挙動をアンサンブル評価することで対象場全体のマクロ分散として表す方法を考案し、マクロ縦分散長に関して、良好な結果を得た。さらに、不均質場の溶質輸送経路を追跡することで、局所的不均質度について評価する方法を提示し、不均質度に対するマクロ分散長のスケール依存特性が確認された。

Key Words: *solute transport, macrodispersion, heterogeneous porous formation, intermediate-scale experiments*

1. 緒論

透水係数の空間分布は帯水層を移動する地下水汚染物質の移流分散挙動に大きく影響を及ぼす要因である¹⁾²⁾。そのため、汚染物質の移動範囲を調査する際に、あるいは、汚染物質の拡大領域を予測する際に、透水係数分布は重要視される因子である³⁾。しかしながら、砂礫から成る高透水領域や局所的に存在する低透水領域など、自然地盤の構造は不均質性を有しており、複雑な地質構造のすべてを求めることは物理的・経済的に極めて難しい⁴⁾。Borden サイト⁵⁾や Cape Cod サイト⁶⁾のように、空間的に広い範囲で、また、狭いボーリング孔の間隔で透水係数データを得ることは極めて稀である。

不均質帯水層における地下水・溶質輸送を考えると、低透水領域を避けるように、また、高透水領域を選択するように地下水は流動し、地下水に溶解した汚染物質は地下水とともに移動する。つまりは、透水係数の空間変動に起因する流速分布に従って溶質は移動しており、マクロ分散と称される⁷⁾⁸⁾。土粒子間隙内の流路のランダム性に起因するミクロ分散に比べると、マクロ分散はミクロ分散より数倍から数オーダー大きく、溶質の移行距離や透水係数の不均質性の度合いに応じて分散性は変動する⁹⁾¹⁰⁾。したがって、透水係数の空間分布とマクロ分散現象は密接な関係にあると言える。

溶質のマクロ分散を評価する場合、流れ方向や流れに垂直な方向への溶質の拡がりやすさをマクロ分散長として、あるいは、マクロ分散長に平均流速を乗じてマクロ分散係数として、それぞれミクロ分散長やミクロ分散係数と同様の観点から表すことが多い¹¹⁾¹²⁾。フィールド・ラボレベルにおいて溶質のマクロ分散性を求める研究は継続的に進められてきたものの、溶質の輸送距離に応じたマクロ分散長やマクロ分散係数の導出に留まっており、透水係数の不均質度を組み込んだ検討は理論的・数値解析的アプローチに限定されており、実験的検討は少ない²⁾¹³⁾。一般的に、対象とする空間のマクロ分散性を評価するには、対象領域のすべてを溶質が通過することによって、透水係数の空間分布の不均質度に対応したマクロ分散係数あるいはマクロ分散長が評価される¹⁴⁾。しかしながら、対象領域の規模が大きいフィールドの溶質輸送実験では、対象領域のすべてを網羅できるように溶質をリリースすることは難しいため、得られたマクロ分散長や分散係数は局所的な不均質性を反映した結果となる¹⁵⁾¹⁶⁾。

このような点を補うには、ラボレベルにおいて類似の溶質輸送実験を実施することが有益であると考えられる¹⁷⁾ものの、透水係数の不均質性とマクロ分散性の関係に軸足を置いた実験事例はあまり多くない¹⁴⁾。また、溶質輸送現象の可視化情報とマクロ分散性の定量

表-1 土質試料の物理特性一覧

試料	平均粒径 (cm)	均等係数 (-)	間隙率 (-)	透水係数 (cm/s)
K3	0.145	2.01	0.42	1.47
K4	0.081	1.65	0.42	0.751
K5	0.048	1.34	0.42	0.224
K6	0.030	1.31	0.42	0.101
K7	0.011	1.25	0.42	0.0334

化を関連付けた研究例は比較的少なく¹⁸⁾¹⁹⁾²⁰⁾，可視化情報の活用についても検討が望まれる²¹⁾．以上の点を鑑みて，本研究では，不均質性を有する透水係数の空間分布をラボレベルで形成し，不均質地盤を移行する溶質の移流分散実験を実施した．溶質のマクロ分散挙動を定量化するため，画像解析と空間モーメント法を利用してマクロ分散長を推定するとともに，局所的な不均質性に基づくマクロ分散長から対象場全体のマクロ分散長を推定する方法を考案した．また，局所的な不均質度を定量化することで，不均質度とマクロ分散長の関係を求める方法を提示した．

2. 中規模溶質輸送実験

(1) 土質試料と溶質

透水係数の不均質性を有する浸透場を形成するため，地盤構成材料として本実験では，平均粒径の異なる5種類のケイ砂を準備した．いずれの試料も粒度のばらつきが小さく，均等係数が小さい試料である．平均粒径の最も大きい試料をK3と称し，平均粒径の大きさを降順にして，K4，K5，K6，K7と称する．表-1に各試料の物理特性を示す．土粒子密度は密度試験，平均粒径と均等係数は粒度試験結果から導出し，間隙率は充填試料の質量と実験装置本体の体積から間接的に算定した．また，実験装置内に土質試料を充填し，所定の動水勾配に伴う排水流量と実験装置の断面積を基に透水係数を求め，15度水温で補正した．結果として，試料K3とK7の平均粒径と透水係数はそれぞれ約13倍と約44倍の差異がある．

本実験では，溶質輸送挙動を可視化するため，安全性と適用実績²²⁾²³⁾を踏まえて，青系水溶性色素であるBrilliant Blue FCF (Blue 1, Color index: 42090)を採用した．また，後述する空間モーメント量の定量化時におけるピクセル明度の抽出と水溶液の比重を考慮して，色素水溶液の初期濃度を 0.2 mg/cm^3 に調整して実験に供した．

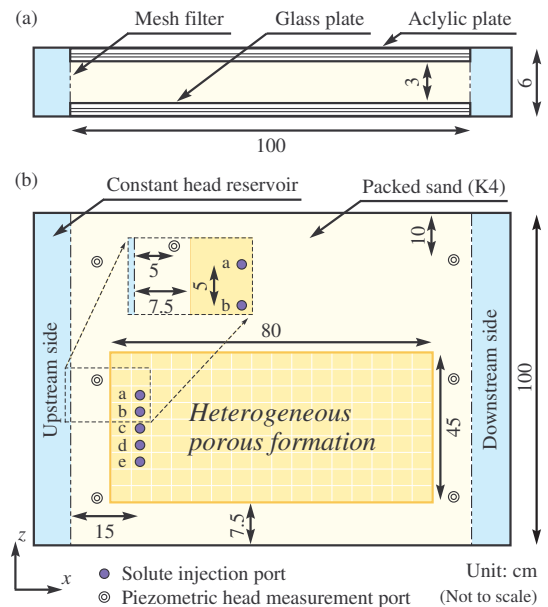


図-1 溶質輸送実験装置の概略：(a) 平面図，(b) 断面図

(2) 実験装置

中規模溶質輸送実験を実施するにあたり，実験装置本体の前面をガラス板，背面をアクリル板，底部をステンレス材で構成して，高さ100 cm，幅100 cm，奥行き3 cmの実験空間を作製した．図-1(a)に平面図，(b)に断面図を示す．便宜上，実験装置の上流端最下部を原点とし，上流から下流方向に x 軸，鉛直方向に z 軸を設定した．実験装置本体の両側面にはステンレス製の定水頭タンクを設置し，本体とタンクの連結部分には試料の流出を防ぐメッシュフィルタを断面全体にわたって貼付した．また，装置背面の6箇所半径1.5 mmのピエゾメータ孔を穿孔し，ビニルチューブと連結してピエゾ水頭の計測に用いた．さらに，装置背面の5箇所a～eには半径6 mmの孔を穿孔することで，溶質の注入孔を設け，シリコン栓で閉じた．図-1に示すように，浸透場を成す高さ100 cm，幅100 cm，奥行き3 cmの空間のうち，高さ45 cm，幅80 cm，奥行き3 cmの領域を不均質領域に設定した．

(3) 透水係数に関するランダム場の生成

実験に用いる5種類の土質試料に関する透水係数の幾何平均と幾何分散はそれぞれ 0.216 cm/s ， $2.10 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ である．一般的に，自然地盤の透水係数分布は対数正規分布を成し，空間相関性をもって分布する⁵⁾．そのため，対象試料の透水係数の値を自然対数変換し，算術平均と標準偏差を求めると，それぞれ-1.53，1.45であり，対数正規分布を描くと図-2の実線となる．

本実験では，自然地盤の透水係数の対数正規性を踏まえた不均質な透水係数分布を生成するため，空間的

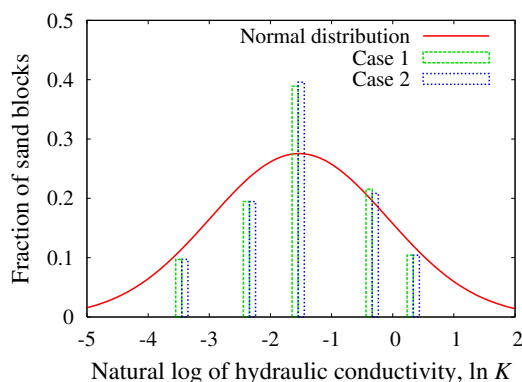


図-2 透水係数のヒストグラム

ばらつきを有する模擬透水場を確率統計的に発生させた²⁴⁾。すなわち、対象場の透水係数は対数正規分布に従い、特定のバリオグラムに従うと仮定して、所定の領域内に一様乱数にて、250個のソース点を生成した。続いて、図-2に示す対数正規分布に従うように、各ソース点に透水係数を乱数により発生させ²⁵⁾、ソース点の透水係数から高さ45 cm、幅80 cmの領域に対してブロッククリギング予測²⁴⁾することで透水係数分布をばらつかせた。このとき、1つのブロックサイズを高さ5 cm、幅5 cmに定め、 x 軸方向に16ブロック、 z 軸方向に9ブロックから成る不均質空間を生成した。ブロッククリギング予測では、文献²⁷⁾やブロックサイズを基に、相関長 λ を5 cm、場の分散を表すシルに透水係数の幾何分散を設定し、透水係数の空間相関は等方として次式の指数型バリオグラムを採用した。

$$\gamma(d) = \sigma^2(1 - \exp(d/\lambda)) \quad (1)$$

ここに、 γ はバリオグラム、 σ^2 は透水係数の幾何分散、 d は観測点間距離である。生成された透水係数の空間分布をCase 1とし、透水係数の分布状態を図-3(a)に示す。また、不均質場を構成するために必要とする土質試料のヒストグラムを図-2に示す。図-2の横軸は用いる試料の透水係数を自然対数変換した数値である。

ブロックの総数は144であり、各ブロックに割り当てられた土質試料の透水係数の値から、対象場の不均質度を次式から算出すると、1.15となる。

$$\sigma_{\ln K}^2 = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n (\ln K_i)^2 - n(\ln M)^2 \right) \quad (2)$$

ここに、 $\sigma_{\ln K}^2$ は不均質度、 n は対象領域内のブロック数、 K_i はブロック試料の透水係数、 $\ln M$ は透水係数の幾何平均である。

上記の過程を経て得られた透水係数分布は既定の平均と分散を満足する1つの可能性にすぎない。そのため、複数の透水係数分布を検討できるように、同様の手順により、不均質度が同一で土質試料の空間配置が

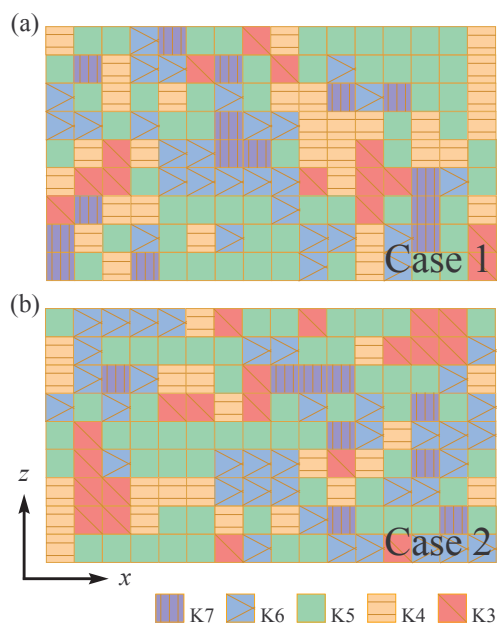


図-3 不均質透水係数分布：(a) Case 1, (b) Case 2

異なる透水係数分布を生成した。この透水係数分布をCase 2とし、透水係数の空間分布状態を図-3(b)に、対応する透水係数のヒストグラムを図-2に示す。図-3に示す2種類の不均質地盤に加えて、不均質場を生成する実験空間に試料K5のみを配置することで均質透水場を形成し、不均質透水場の比較対象とした。

(4) 不均質浸透場の形成方法

不均質浸透場を形成するにあたり、空気が混入しないように十分に土質試料を飽和させた上で、水中落下法により試料を充填した。試料を充填する際には、採用した土質試料のうち、中程度の透水係数を有する試料K4を実験装置の底から7.5 cmの高さまで二層に分けて積み上げた。各層を充填する過程では、0.42の間隙率を維持できるように突き固めつつ、密度を管理した。

次に、確率統計的に定めた不均質場を形成するため、図-1(b)に示す高さ45 cm、幅80 cm、奥行き3 cmの空間に、5種類の土質試料を高さ5 cm、幅5 cm、奥行き3 cmのブロック状に充填配置した。試料を充填する際には、隣接する試料同士の混合を防ぐため、所定の試料を配置する空間の両側に仕切り板を挿入して、試料を充填した。突き固めにより密度を管理し、試料の充填完了後、隣接するブロックとの境界が乱れないように、仕切り板を徐々に引き抜いた。また、不均質場を構成する空間以外の領域には、不均質地盤ケースと均質地盤ケースの条件を合わせるため、試料K4を充填した。すなわち、高さ5 cm、幅100 cm、奥行き3 cmの空間を一つの層と見なすと、最上流部に幅7.5 cmの試料K4、その下流側に幅5 cmのブロック状試料を16

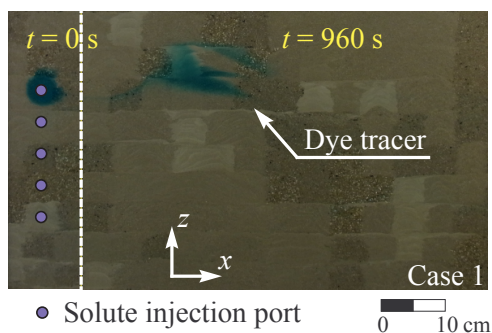


図-4 色素水溶液の輸送挙動の一例（Case 1 において溶質注入点 a からリリース）．白色が最も強いブロックが試料 K7 である．

個，最下流部に幅 12.5 cm の試料 K4 を充填した．同様の過程を 8 層にわたって繰り返すことで，水平方向に 16 個，鉛直方向に 9 個から成る 144 個のブロック試料を充填した．

残りの空間には，試料 K4 を一層あたり 5 cm の高さで密度管理しながら配置し，高さ 100 cm，幅 100 cm，奥行き 3 cm の空間全体に充填した．図-3 (a) に示す Case 1 に加えて，図-3 (b) の Case 2 の不均質地盤，ならびに，試料 K4 を用いた均質地盤を形成する際にも同様の過程を辿った．水中落下法では実験装置の上部ほど充填密度にばらつきが生じやすい点，対象領域の境界部分が浸透流と溶質輸送に及ぼす影響，照明と画像処理精度を勘案して，不均質空間の位置を決定した．

(5) 実験方法

所定の不均質地盤，あるいは均質地盤を形成した後，実験装置上部をステンレス天板にて密閉した．実験装置両側に設置した定水頭タンクの水圧を調整して，浸透場に動水勾配を与え，飽和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水温を計測し，15 度水温で補正した流量を算出した．また，ピエゾ水頭値を読み取ることで，水頭の変動の有無について確認し，対象場が定常流状態に達するまで定期的に計測した．流量と水頭値の計測から定常状態を確認した後に，図-1 に示す溶質注入孔の 1 つに，20 cm³ の色素水溶液をシリンジポンプに連結した注射針を用いて注入した．このとき，奥行き方向に均一の分布になるように，前面から背面にかけて徐々に針の先端位置を変えながら，30 秒間かけて一定の流量で注入した．実験中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 100 cm 離れた位置に設置したデジタルカメラを用いて水溶液の移行過程を一定の間隔で撮影し，画像を取得した．

同様の過程を 5 つの溶質注入孔すべてに対して実施

することで，溶質の初期位置に応じた移流分散現象を画像に収めた．透水係数分布の異なる不均質場に対して，不均質空間内の実流速を合わせることは極めて難しく，マクロ分散現象の流速依存性は小さい²⁰⁾点を踏まえて，上下流側に設置した定水頭タンクの水圧を調整することにより，下流側断面部分を通過する実流速を 0.017 cm/s に統一した．本実験は 20°C の恒温室にて実施し，実験実施中の水温は 21 ± 2°C であることから，水温変化に伴う固有透過度の変化は極めて小さい．なお，本実験では，前面のガラス面と背面の亚克力板にて観察される移流分散挙動はほぼ一致していることを目視により確認している．

3. マクロ縦分散長とマクロ横分散長の同定

(1) 色素分布と画像解析

不均質地盤 Case 1 を代表例として，図-4 に，不均質地盤内を移動する色素水溶液の分布変動を示す．このとき，色素水溶液は溶質注入点 a からリリースしており，点線の左側が溶質の初期分布，右側が 960 秒後の溶質分布である．本実験では，60 秒あたり 1 cm 程度，色素分布の重心位置は変位しており，時系列で変化する色素分布の様子を捉えた画像データに基づいて，マクロ縦分散長とマクロ横分散長を同定するため，井上ら²³⁾²⁸⁾と同様の手法により，色素部分のピクセル情報を色素濃度情報と関連付けた．

室内照明や間接照明，デジタルカメラの位置などを溶質輸送実験の状況と同一にして，流れの無い不均質浸透場内に既知の濃度を有する色素水溶液を注入し，注入直後の分布を画像に収めた．次に，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，参照対象となる色素濃度を種々に変えることで，色素濃度とピクセルの明度の関係を校正曲線として求めた．実験に用いた土質試料は平均粒径が小さくなるにつれて表面の白色が強くなる傾向にあることから，5 つの土質試料すべてに対して，該当試料内で分布する色素濃度と対応するピクセル明度の関係を求めた．また，青系色素は青成分が卓越していることから，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，校正データのばらつきを抑えた．さらには，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，不均質，あるいは均質地盤を形成する度に校正関係を求めた．

図-5 にピクセル明度と色素濃度の校正関係の一例を示す．色素水溶液の濃度が 0.02 mg/cm³ を下回る範囲ではピクセル明度と色素濃度の関係が不明確になるため，0.02 mg/cm³ の色素濃度に対するピクセル明度の値よりも小さい明度が得られた場合には，色素濃度を

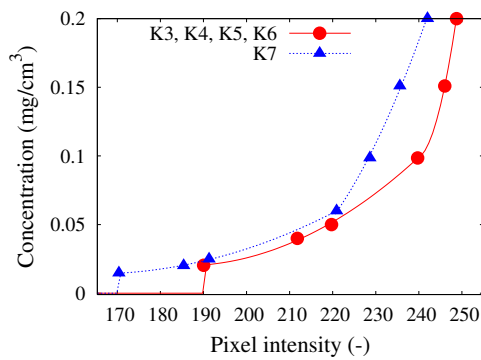


図-5 ピクセル明度の色素濃度に関する校正曲線の一例

ゼロと見なした。また、校正過程で得られたピクセル明度の範囲で濃度に変換するため、 0.2 mg/cm^3 の色素濃度に対するピクセル明度の値よりも大きい明度を示す地点の色素濃度はゼロとした。さらに、すべての試料に対してピクセル明度と色素濃度の関係を求めた結果、試料 K7 以外の試料については、ほぼ同一の校正関係を示したため、図-5 に示すように、2 種類の校正曲線を採用した。そのため、溶質輸送実験の画像を解析する際には、色素濃度の抽出対象となるピクセルの位置に存在する土質試料を判別した上で試料に応じて 2 種類の校正曲線を使い分けた。

(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マクロ分散の推定に利用されている手法の 1 つであり²⁹⁾、溶質の濃度や質量の空間分布データに基づいて算出される。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²⁾。

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

ここに、 M_{ij} は空間モーメント、 x と z は座標、 t は時間、 i と j は各軸の空間次数、 c は溶質濃度である。実際の積分区間は対象とする画像の両軸方向の規模に限定される。

本実験では、校正曲線により色素濃度をピクセル明度に関連付けていることから、次式により空間モーメント量を算出した²³⁾。

$$M_{ij}(x, z, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H(x, z) I(x, z, t) x^i z^j dx dz \quad (4)$$

ここに、 $H(x, z)$ は 1 ピクセルの面積、 $I(x, z, t)$ はピクセルの明度である。式 (4) を用いて 1 次空間モーメントを導出し、色素分布の重心位置を次式から求めた。

$$x_G(x, z, t) = \frac{M_{10}}{M_{00}}, \quad z_G(x, z, t) = \frac{M_{01}}{M_{00}} \quad (5)$$

ここに、 x_G と z_G は色素分布の重心位置の x 成分と z 成分である。また、重心に対する空間 2 次モーメント

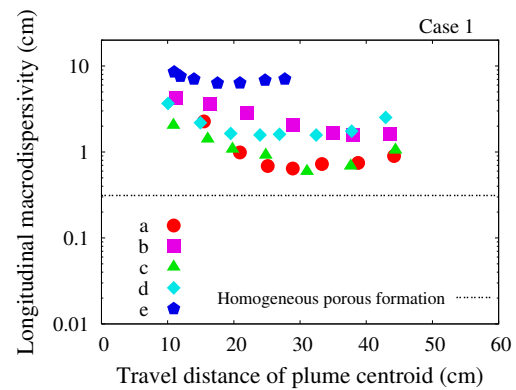


図-6 マクロ縦分散長の推定結果 (Case 1)

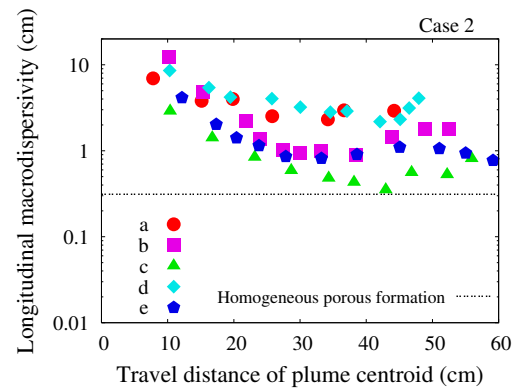


図-7 マクロ縦分散長の推定結果 (Case 2)

を用いて、マクロ縦分散長とマクロ横分散長をそれぞれ次式にて推定した³⁾²⁸⁾。

$$A_L(\xi_c, t) = \frac{1}{2} \frac{\frac{M_{20}}{M_{00}} - x_G^2}{\xi_c} \quad (6)$$

$$A_T(\xi_c, t) = \frac{1}{2} \frac{\frac{M_{02}}{M_{00}} - z_G^2}{\xi_c} \quad (7)$$

ここに、 A_L はマクロ縦分散長、 A_T はマクロ横分散長、 ξ_c は初期の色素分布の重心から該当時刻の色素分布の重心までの距離である。本実験における縦方向と横方向はそれぞれ水平 x 方向、鉛直 z 方向である。

4. 結果と考察

(1) マクロ縦分散長

透水係数分布の異なる 2 種類の不均質地盤において、溶質注入点 a から e の各点を起点として移流分散した際のマクロ縦分散長の推定結果を Case 1 は図-6、Case 2 は図-7 に示す。図-6 と図-7 の横軸は、初期の色素分布重心から該当時刻の色素分布重心までの距離をトラベル距離として表しており、凡例は溶質の初期位置を表している。また、試料 K5 にて形成した均質地盤では、間隙スケールのミクロ分散長は $0.31 \pm 0.04 \text{ cm}$ 程度の

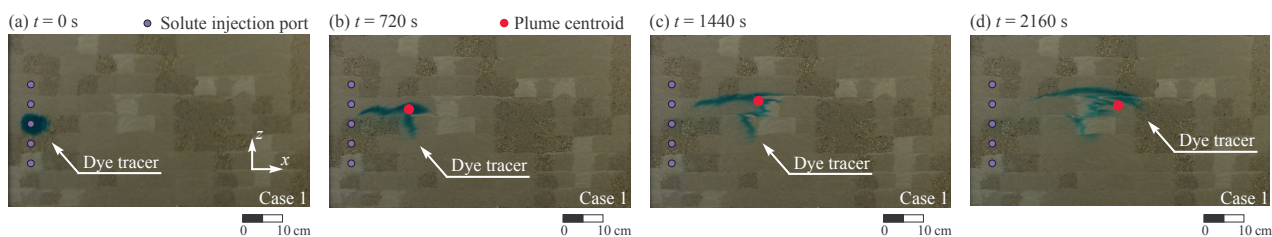


図-8 色素水溶液の輸送挙動 (Case 1 において溶質注入点 c からリリース)．白色が最も強いブロックが試料 K7 である．

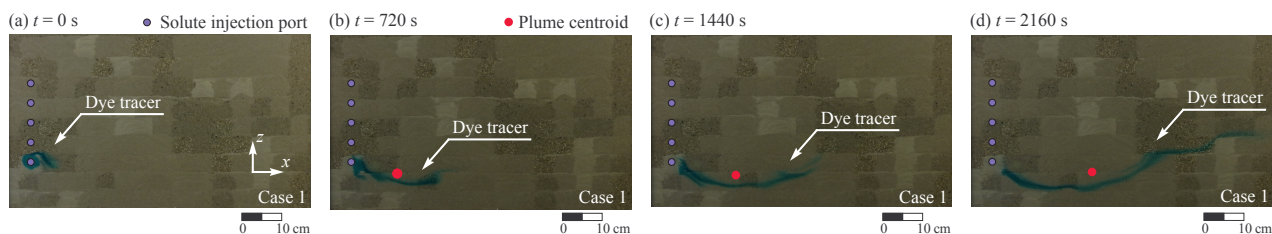


図-9 色素水溶液の輸送挙動 (Case 1 において溶質注入点 e からリリース)．白色が最も強いブロックが試料 K7 である．

変動であるため、平均値を点線で併記している。

図-6と図-7ともに、不均質場の推定結果は均質地盤よりも2倍から10倍大きい値で推移している。場の透水係数分布に依存して流速分布の大きさは一様ではなく、不均質地盤内の溶質は透水性の高い部分を選択的に移動する³⁾²⁷⁾。そのため、溶質の分散性は均質場よりも不均質場の方が大きくなり、本実験結果はこの点を良好に定量化できていると判断される。また、溶質のトラベル距離が進むにつれて、マクロ縦分散長は徐々に減少し、Case 1では約20 cmから約30 cm、Case 2では約30 cmから約40 cmのトラベル距離の付近から増加傾向に転じている。これは流速分布の差異を受けながら輸送する過程において、主たる流れ方向への溶質混合の度合いが場所ごとにばらつき、流れ方向への拡張度合いが増していることを表している。つまりは、マクロ分散現象が発現していることを表しており、不均質地盤において特徴的な溶質輸送挙動を適切に捉えることができていると言える。

一方で、図-6と図-7では、注入位置に応じたマクロ縦分散長の推移状況は異なり、最大で1オーダー程度の差異が生じている。この点を検討するため、時系列の色素分布画像を活用して、不均質地盤のCase 1にて点c、点eから色素水溶液をリリースした際の色素分布変動をそれぞれ図-8と図-9に示す。図-8と図-9ともに、溶質を注入した直後の時刻を $t = 0$ sとして、720秒間隔の色素分布状態を表している。図-8と図-9を比べると、初期位置に応じて溶質は異なる領域を通過するだけでなく、輸送経路における透水係数の分布状態に依存して溶質の分散性は大きく異なることがわかる。たとえば、図-9では、初期位置に最も透水係数の小さい試料 K7 があるため、試料内に色素が留まる時間は他の

試料に比べて長くなる。そのため、2160秒まで時間が経過しても色素分布のフロント部とリア部の幾何距離は時間の経過とともに増加しており、図-8に示す色素分布と比べると顕著な相違が見て取れる。したがって、図-6と図-7にて示される初期位置に応じた推定値の差異は、透水係数分布の影響によるマクロ分散性の変化が要因であり、溶質の輸送経路における透水係数分布、すなわち局所的な不均質性に起因すると言える。

(2) マクロ横分散長

マクロ縦分散長の推定結果と同様に、溶質注入点 a から e の各点を起点として移流分散した際のマクロ横分散長の推定結果をCase 1は図-10に、Case 2は図-11に示す。試料 K5 にて形成した均質地盤におけるミクロ横分散長の推定値が 0.047 ± 0.012 cmであることから、平均値を点線で併記している。トラベル距離とともにマクロ横分散長は増減を繰り返して変動し、大局的には減少する傾向を示している。溶質輸送状態を観察すると、たとえば、図-8(b)から(c)、あるいは、図-9(b)から(d)への色素分布の変化に見られるように溶質の進行方向に低透水性試料が存在すると、低透水部分を避けるように相対的に高い透水性部分へ溶質は移動する。つまり、水平方向が主たる流れ方向である対象浸透場において、鉛直の正・負方向へ溶質は拡大することを意味しており、結果的に、マクロ横分散長の増加につながる。対照的に、図-8(c)から(d)への色素分布変動に見られるように、低透水性試料の上流部分と下流部分における流速の鉛直成分の正負は逆になるため、結果として、マクロ横分散長は減少する方向に作用する。

縦方向のマクロ分散現象と同様に、横方向のマクロ分散現象についても透水係数の空間分布に起因する流

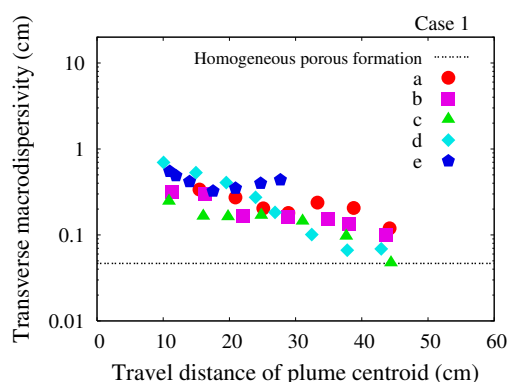


図-10 マクロ横分散長の推定結果 (Case 1)

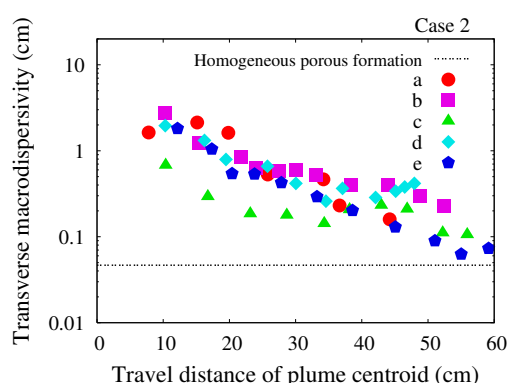


図-11 マクロ横分散長の推定結果 (Case 2)

速ベクトルの空間分布状態に溶質の輸送経路は依存するため、流速ベクトルの鉛直成分が正・負方向に変化する領域はマクロ横分散長の増減に寄与する領域となる。しかしながら、マクロ横分散長の増減は局所的に発生している現象であり、大局的な観点からは、間隙空間のスケールで鉛直方向にばらつきながら溶質は移動している。縦方向の分散現象では、図-9(a)から(d)への分布変動に示されるように、低透水領域にある溶質の滞在時間は相対的に長いいため、時間の進展とともに溶質分布のフロント部とリア部の距離が拡大し、単位移動距離あたりの縦方向への溶質分布のばらつきは小さくなりにくい。他方、横方向の分散現象は流れの向きに対して直交する方向への分散現象であることから、低透水部分への滞在時間は分散性の変動にあまり影響せず、局所的に流速ベクトル成分が変動するにしても、溶質分布の全体としては間隙スケールの分散に支配されている。この点が縦方向と横方向の分散現象で大きく異なる要因であり、図-10や図-11に示すように、マクロ横分散長は減少しながら、間隙スケールのミクロ横分散長に近づく変化となる。溶質輸送距離の短い段階においてミクロ横分散長よりもマクロ横分散長が1オーダー程度大きいのは、点状であっても本来のミクロ、あるいは、マクロ横分散長よりも大きい状態

で初期分布していることに起因しており、強制的に拡がった状態にある結果が推定値に反映されている。この点については、次節にて改めて言及する。

(3) アンサンブル推定

均質地盤では間隙スケールのミクロ分散のみ生じるため、分散性は空間・時間的に変動せず、点状リリースの溶質分布に基づいて縦方向と横方向のミクロ分散長の評価が可能である²⁶⁾。一方で、不均質場における溶質分散の定量化では、局所的な不均質性の影響を内包できるように、溶質が場全体を輸送した状態を評価対象とするのが理想的であり²⁷⁾、溶質の初期配置は点ではなく、線あるいは面を成すことが望ましい。この点をラボレベルにおいて検討するため、すべての溶質注入孔aからeに同時に溶質を注入することで、線状の初期位置を成す溶質輸送実験を追加して実施した。これにより、溶質の線状注入による同定値は対象領域全体における透水係数の分布変動の影響を受けたマクロ分散長と見なすことができる。しかしながら、特にフィールド試験を視野に入れた場合、濃度を均一にした線状や面状の溶質注入は点状の注入に比べると難しく、対象の規模が大きくなるほど、実験方法や観測方法は複雑になる。そこで、マクロ縦分散長に関しては図-6と図-7、マクロ横分散長に関しては図-10と図-11の点状に溶質注入した5つの実験結果に基づいて、対象場全体におけるマクロ分散長の値を求める手法の1つとして、点注入の推定結果のアンサンブル平均を検討した。すなわち、5点同時に注入した溶質分布より得られる値と異なる5か所の点に注入した5種類の溶質分布のアンサンブル平均より得られる値を比較した。

本実験では、溶質注入孔から色素分布の重心位置までの移動距離は初期位置に応じて異なる。そのため、既定の移動距離に対するマクロ分散の値をアンサンブルするにあたり、アンサンブル平均するトラベル間隔を4 cmに設定し、推定対象となるトラベル位置を挟む2つの推定値に対する内分点を該当するトラベル位置の分散長推定値と見なした。この演算を注入位置が異なる5つの実験ケースに対して実施し、Case 1は40 cm、Case 2は54 cmのトラベル距離までアンサンブル平均を繰り返して求めることで場全体のマクロ分散長の推移を求めた。なお、溶質注入位置に応じて溶質重心の最大トラベル距離は異なるため、各実験ケースの最大トラベル距離よりも長い位置でアンサンブル平均をとる場合には、当該実験ケースの最大トラベル距離にて得られた分散長を採用した。

溶質注入孔aからeの5点に同時注入した実験ケースに対して得られたマクロ分散長の推定結果と点状注入の5つの実験結果をアンサンブル平均することで得

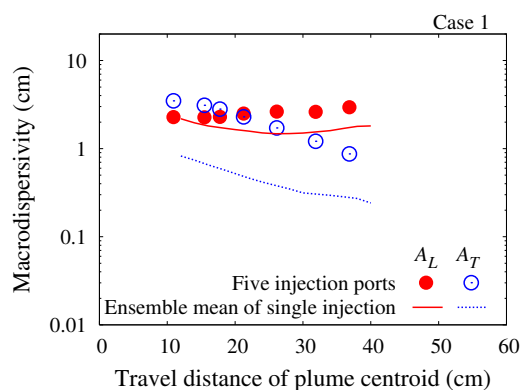


図-12 マクロ分散長のアンサンブル推定結果 (Case 1)

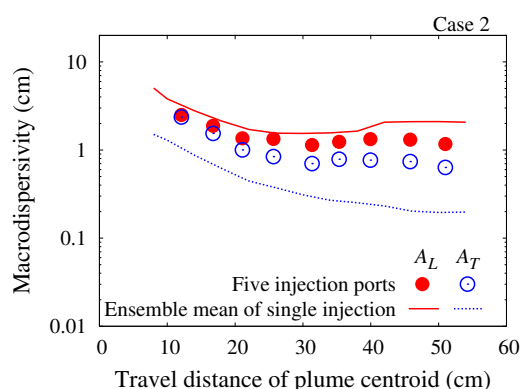


図-13 マクロ分散長のアンサンブル推定結果 (Case 2)

られた結果を, Case 1 は図-12, Case 2 は図-13 に示す. マクロ縦分散長に関しては, 5 点同時注入の結果とアンサンブル平均の結果は概ね一致している. 単一の点状注入では, 初期位置によって局所的不均質性の影響は異なるものの, アンサンブルにより局所部分の効果が平均化され, 5 点同時注入の結果と類似した推定値になったと考えられる. したがって, 点状の初期配置であっても複数の箇所から溶質をリリースすることにより, 対象場全体を溶質が通過するような状態をアンサンブル評価できるならば, 局所的な不均質性の影響は卓越することなく, 線状注入の推定値に近い結果を得ることができる可能性がある.

同一の時間経過であっても色素分布の輸送経路に依存して分布の重心位置や単位移動距離あたりの溶質の空間的ばらつきが異なるため, トラベル距離の増加に伴う 5 点同時注入の結果とアンサンブル平均の結果の差異を生み出す要因になる可能性がある. 図-12 や図-13 における結果の相違について検討するため, 5 つの溶質注入点に線状に初期配置した場合の Case 1 および Case 2 における溶質輸送挙動をそれぞれ図-14 と図-15 に 840 秒間隔で示す. 白色が溶質分布の重心位置を表しており, 比較として, 溶質注入孔 a から e の個々の点から点状リリースした際の溶質分布の重心位置を併記して

いる. 初期位置を除いて, 6 種類ある重心の x 座標は一致せず, Case 1 では, 溶質注入孔 a を起点とする紫の重心位置は線状注入した重心位置である白よりもトラベル距離は長く, 溶質注入孔 e からリリースされた重心位置である赤の輸送は白よりも短いトラベル距離で推移していく. Case 2 では, Case 1 とは異なり, 注入孔 a の重心輸送距離は比較的短く, 注入孔 c から放たれた溶質の輸送距離は長く進展していく. このとき, 図-14(c) に示す 1680 秒後の色素分布に対してマクロ分散長を推定することを考えると, 白の重心位置が 5 点同時注入におけるマクロ分散長の推定ポイントとなる. 一方で, アンサンブル平均をとる方法においては, トラベル距離を合わせるため, たとえば, 紫は 1680 秒より早い時間, 赤は 1680 秒より遅い時間の色素分布を対象としてマクロ分散長を推定していることになる. アンサンブル平均の対象となる 5 つの色素分布を重ね合わせた場合, 図-14(c) に示す色素分布とは一致しないため, 極端な相違にはならないものの, アンサンブル平均と 5 点同時注入の結果には差異が生じると言える. なお, 本実験では, いくつかの実験ケースについて複数回の実験を実施し, 個々の推定結果に大幅なばらつきが生じていないことを確認している.

これまでのマクロ縦分散長に関する議論とは対照的に, 図-12 と図-13 に見られるように, マクロ横分散長については, 5 点同時注入の結果とアンサンブル平均の結果は大きく異なり, 線状注入の結果は点状注入のアンサンブル平均に比べて 1 オーダー程度大きく推定されている. この点に言及するため, 図-16 に点状と線状の溶質初期配置に対する模式図を示す. 単一の注入孔にある点状の空間 2 次モーメント M_{02} は線状に配置した際の空間 2 次モーメント M'_{02} よりも z 軸方向への溶質分布のばらつきは小さいため, $M_{02} < M'_{02}$ となる. 本実験において主たる流れ方向は x 軸方向であり, z 方向の流速成分は x 方向に比べて小さいことから, 透水性の変動がマクロ横分散長に及ぼす影響は小さく, 横方向における溶質の拡がり初期位置に大きく依存すると言える. つまりは, z 方向のばらつきが小さい単一の点状注入の方が線状注入よりも短い移行距離で z 軸方向の初期配置の影響が消失するため, 結果として, 50 cm 程度の輸送距離では, z 方向への初期分布規模の大きい線状注入において, マクロ横分散長が点状注入と比べて過大に評価されたと考えられる. 図-10 と図-11 において輸送距離の短い段階では比較的大きいマクロ横分散長になっている点も同様の理由である.

(4) 局所的不均質度に関する評価手法

本実験において対象とした 2 つの不均質地盤の不均質度はともに 1.15 である. 前節にて議論したように,

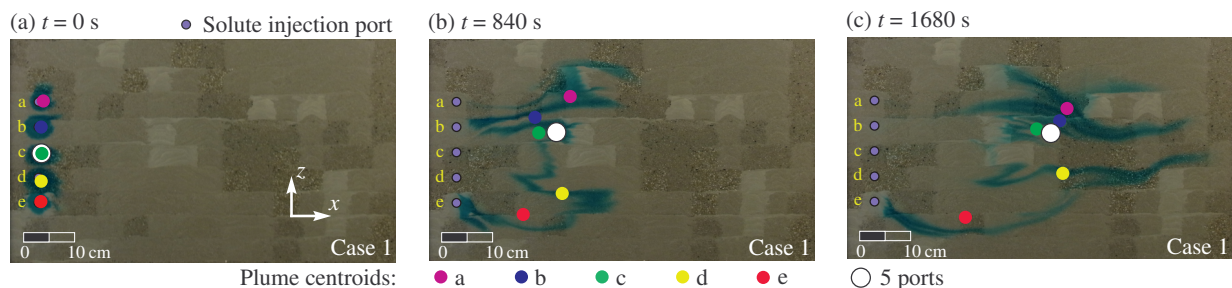


図-14 線状初期配置に対する色素分布変動 (Case 1)．白丸が溶質分布の重心位置を示す．比較として，注入孔 a から e の個々の点から点状リリースした際の分布重心の位置を示す．

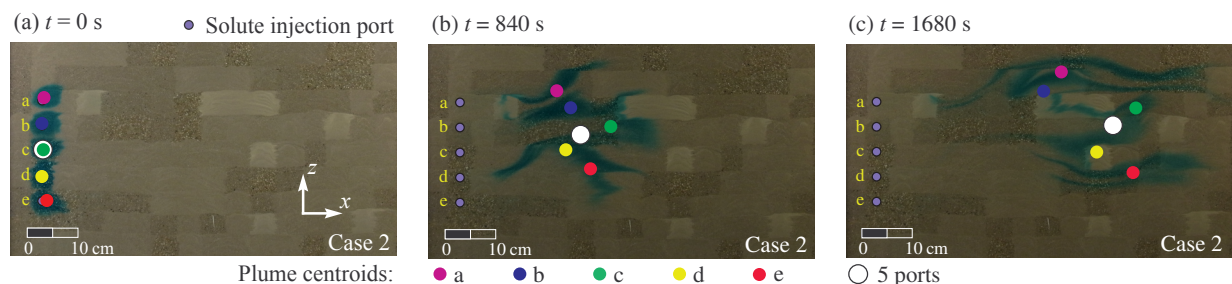


図-15 線状初期配置に対する色素分布変動 (Case 2)．白丸が溶質分布の重心位置を示す．比較として，注入孔 a から e の個々の点から点状リリースした際の分布重心の位置を示す．

溶質の輸送過程では局所的不均質性の影響を受けるため，溶質の初期位置に応じて異なる分散性を示す．分散性の相違は対象場全体の不均質性ではなく，溶質輸送に寄与する領域の不均質性に起因すると推測される．そこで局所的不均質性の観点から，不均質性とマクロ分散長の関係を評価するため，溶質分散に影響を及ぼす領域の不均質度を求める方法を考案した．

図-17に局所的不均質度を求める際に対象とする領域について例示する．図-17は Case 1 の不均質地盤において，溶質注入孔 b からリリースした色素水溶液の 1800 秒後の分布を示しており，色素分布のフロント部分が不均質ブロック群の最下流部分に到達した状態である．溶質の輸送挙動を可視化している点を活かして，図-17に示すように溶質が通過したすべてのブロック，ならびに，その上下にあるブロックを画像から選定することで対象領域とした．つまり，図-17の白色点線で覆われた領域を局所的不均質度の評価対象領域と定義し，溶質の輸送経路に応じて評価対象となる領域を個別に定めた．同時に，局所的不均質度の対象となる領域にあるブロック試料の透水係数を基に，前述の式 (2) を用いて，局所的不均質度を算定した．式 (2) の変数 n が局所的不均質度の評価対象領域を構成するブロック試料の数， $\ln M$ が該当するブロック試料群の透水係数の幾何平均となる．このように局所的不均質度を定義することで，溶質の初期位置に応じた不均質度を算出することができ，一つの不均質地盤に対して，各溶質

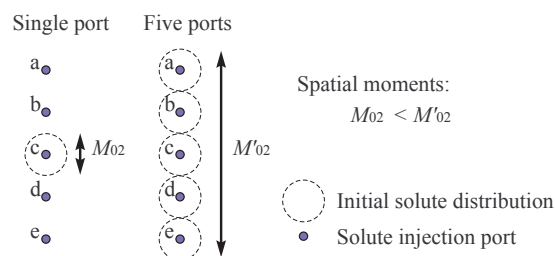


図-16 点状と線状の溶質初期配置に対する空間 2 次モーメント M_{02} と M'_{02} の相違

注入孔を初期位置とする 5 種類，すべての溶質注入孔から同時に移流分散する 1 種類の計 6 種類の溶質挙動について，不均質性とマクロ縦・横分散長の関係を導くことができる．

各実験の溶質輸送において，色素分布のフロント部が不均質ブロック群の最下流部分に達した時点，言い換えると，各実験で最大の輸送距離となる色素分布より得られた局所的不均質性の値とマクロ分散長の値の関係を図-18に示す．図中には，Case 1 と Case 2 の不均質地盤において得られた 12 種類のマクロ縦分散長をプロットする．前述のように，マクロ横分散長に関しては，溶質の初期形状が線状を成してすべての溶質注入孔から同時に移流分散する場合，本実験の輸送距離内では初期形状の影響が強く残存するため，点状の初期形状を成す 10 種類のマクロ横分散長の推定値をプロッ

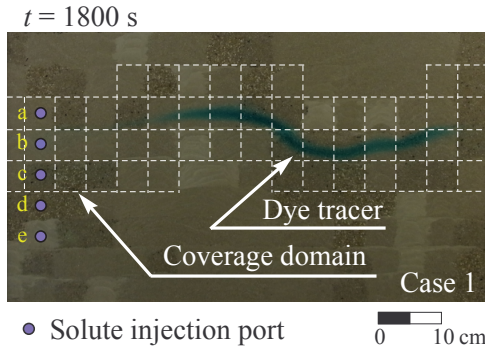


図-17 局所的不均質度の対象領域の例。溶質は注入孔 b からリリース。

トしている。不均質度の増加に伴い、マクロ縦・横分散長はともに増加する傾向にあり、不均質度の範囲は狭いものの、透水係数の不均質性に対するマクロ分散長の依存性が確認できる。この点は溶質の分散性は輸送距離とともに増加するだけでなく、不均質度にも呼応して変動することを示唆しており、本実験において、輸送距離、ならびに、不均質度に対する溶質分散のスケール依存性が定量化できたと考えられる。

ところで、不均質地盤における溶質挙動をマクロ分散現象の観点から評価する場合、本実験のような有限の輸送距離に対する分散性の評価とは異なり、無限遠方まで輸送した場合の分散性を予測する研究が理論的になされている⁷⁾。その中でも、Gelhar と Axness⁷⁾、Tompson と Gelhar³⁾ によると、無限遠方への輸送過程ではマクロ縦分散長はある値への漸近増加、マクロ横分散長についてはマクロ縦分散長とは異なる値への漸近減少が指摘されており、マクロ縦・横分散長の漸近値はそれぞれ、

$$A_L(\infty) = \frac{\sigma_{\ln K}^2 \lambda}{\gamma^2} \quad (8)$$

$$A_T(\infty) = \frac{\sigma_{\ln K}^2 (\alpha_L + 4\alpha_T)}{15\gamma^2} \quad (9)$$

と予測されている。ここに、 $A_L(\infty)$ は無限遠方でのマクロ縦分散長、 $A_T(\infty)$ は無限遠方でのマクロ横分散長、 λ は透水係数分布の相関長、 α_L と α_T はそれぞれ間隙スケールでのミクロ縦・横分散長である。また、 γ は $\gamma = \exp(\sigma_{\ln K}^2/6)$ である。

本実験結果と比較するため、式(8)と式(9)を図-18に併記する。このとき、 α_L と α_T の値は不均質場内で占有する割合の高い試料 K5 について得られた値を採用している。1つの例外を除いて、本実験にて得られたマクロ縦分散長は理論解よりも小さく、また、マクロ横分散長は理論解よりも大きく分布している。前述のように、本実験の溶質輸送距離は比較的短く、漸近値に至るほどの規模ではないため、実験結果が式(8)と式(9)

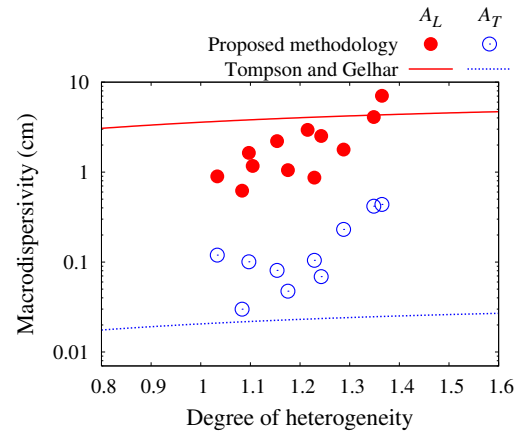


図-18 不均質度とマクロ分散長の関係

の間にプロットされている点は推定結果として妥当と判断される。前節の結果から推量すると、輸送距離が延長されるならば、輸送距離の増加とともに、より大きいマクロ縦分散長、より小さいマクロ横分散長の推移が見られると考えられる。

(5) 既往の文献との比較

本実験における同定値の妥当性を検討するため、本実験と実験スケールが類似する文献を調査することで得られた、不均質度や平均移動距離に応じたマクロ分散長の推定結果を表-2に列記する。本実験は他の研究例と比べてスケールが小さく、マクロ横分散長は文献値よりも実験値の方が数倍大きく推定されているものの、マクロ縦・横分散長ともに同定結果と文献値はオーダー的に概ね類似しており、一定の妥当性を有した結果を得ていると判断される。前述のように、マクロ横分散長は初期分布と場の不均質性の両方に影響を受け、本実験の推定結果は溶質の移行とともに初期分布の影響が減衰する過程にあるマクロ横分散長を定量化したと考えられる。この点が他の研究例と比べて大きいマクロ横分散長を得た要因であると推察される一方で、より輸送距離の長い溶質輸送を観察・計測することができれば、横分散長に関する新たな知見の獲得が期待される。この点については今後の課題とする。

5. 結論

本研究では、透水係数の空間分布が異なる2つの不均質地盤を対象に中規模溶質輸送実験を実施することで、溶質のマクロ分散と不均質性の関係を検討した。本研究において得られた知見は以下の通りである。

1. 高さ 5 cm、幅 5 cm の透水性ブロックを 144 個並べた透水係数分布を地球統計学的に生成した。同一の不均質度を有する 2 種類の透水係数分布を実

表-2 溶質輸送実験におけるマクロ縦・横分散長の推定結果の比較

マクロ縦分散長 A_L (cm)	マクロ横分散長 A_T (cm)	不均質度 $\sigma_{\ln K}^2$	平均トラベル距離 (cm)	出典
0.621 ~ 7.05	0.0300 ~ 0.871	0.894 ~ 1.36	27.7 ~ 59.8	This study
0.409 ~ 1.22	0.349 ~ 0.729	0.0237 ~ 0.508	45.1 ~ 55.9	井上ら ²⁰⁾
1.74 ~ 6.01	—	1.24 ~ 1.48	32.7	Aggelopoulos & Tsakiroglou ³⁰⁾
0.187 ~ 12.0	—	1.81	25.4 ~ 220	Chao <i>et al.</i> ³¹⁾
2.32 ~ 5.85	—	1.23	40 ~ 80	Danquigny <i>et al.</i> ³²⁾
—	0.01	1.0	—	Beaudoin & de Dreuzy ³³⁾
4.6	0.019	0.24	380	McNeil <i>et al.</i> ¹²⁾

験対象として、ラボレベルにて形成した。

- 色素水溶液を用いた中規模溶質輸送実験にて色素分布の時間変動を可視化し、画像解析と空間モーメント法を応用することで不均質場におけるマクロ分散長の空間変動を推定した。
- 局所的不均質性の影響を受けてマクロ縦分散長は溶質注入位置に応じて変動し、最大で1オーダーの差異が生じた。横方向の分散現象は流れと鉛直方向への分散現象であることから、局所的な流速成分の変化が生じて溶質分布全体としては間隙スケールの分散に支配される結果、マクロ横分散長は減少しながらミクロ横分散長に近づく変化となった。
- 初期位置が異なる点状の溶質輸送をアンサンブル評価することで、線状の溶質輸送を表現する方法を考案した。マクロ縦分散長に関しては、線状の溶質輸送の結果と点状をアンサンブル平均した結果は概ね一致し、アンサンブル平均により場全体のマクロ縦分散長を推定できる可能性が示された。一方で、マクロ横分散長は初期形状の影響が強いため、本実験のトラベル距離では差異が大きくなった。
- 不均質場の溶質輸送経路を追跡することで、局所的不均質性を評価する方法を提案し、不均質度に対するマクロ分散長の依存特性を確認できた。
- 本研究にて推定したマクロ分散長の値は類似した規模の研究例と比較して良好な推定結果であることがわかった。

参考文献

- 1) Bear, J.: *Dynamics of fluids in porous media*, Dover Publications, 764p., 1972.
- 2) Dagan, G.: Solute transport in heterogeneous porous formations, *J. Fluid Mech.*, 145, pp.151–177, 1984.
- 3) 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.

- 4) Rajaram, H. and Gelhar, L.W.: Three-dimensional spatial moments analysis of the Borden tracer test, *Water Resour. Res.*, 27(6), pp.1239–1251, 1991.
- 5) Turcke, M.A. and Kueper, B.H.: Geostatistical analysis of the Borden aquifer hydraulic conductivity field, *J. Hydrol.*, Vol.178, No.1–4, pp.223–240, 1996.
- 6) LeBlanc, D.R., Garabedian, S.P., Hess, K.M., Gelhar, L.W., Quadri, R.D., Stollenwerk, K.G. and Wood, W.W.: Large-scale natural gradient tracer test in sand and gravel, Cape Cod, Massachusetts: 1. Experimental design and observed tracer movement, *Water Resour. Res.*, 27(5), pp.895–910, 1991.
- 7) Gelhar, L.W. and Axness, C.L.: Three-dimensional stochastic analysis of macrodispersion in aquifers, *Water Resour. Res.*, 19(1), pp.161–180, 1983.
- 8) Zheng, C. and Bennett, G.D.: *Applied contaminant transport modeling*, Wiley Interscience, 621p., 2002.
- 9) Guedes de Carvalho, J.R.F. and Delgado, J.M.P.Q.: Effect of fluid properties on dispersion in flow through packed beds, *AIChE J.*, 49, pp.1980–1985, 2003.
- 10) 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.
- 11) Silliman, S.E. and Simpson, E.S.: Laboratory evidence of the scale effect in dispersion of solutes in porous media, *Water Resour. Res.*, 23(8), pp.1667–1673, 1987.
- 12) McNeil, J.D., Oldenborger, G.A. and Schincariol, R.A.: Quantitative imaging of contaminant distributions in heterogeneous porous media laboratory experiments, *J. Contam. Hydrol.*, 84, pp.36–54, 2006.
- 13) Berkowitz, B., Scher, H. and Silliman, S.E.: Anomalous transport in laboratory-scale, heterogeneous porous media, *Water Resour. Res.*, 36(1), pp.149–158, 2000.
- 14) Fernández-García, D., Rajaram, H. and Illangasekare, T.H.: Assessment of the predictive capabilities of stochastic theories in a three-dimensional laboratory test aquifer: Effective hydraulic conductivity and temporal moments of breakthrough curves, *Water Resour. Res.*, 41, W04002, 2005.
- 15) Gelhar L.W., Welty, C. and Rehfeldt, K.R.: A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers, *Water Resour. Res.*, 28(7), pp.1955–1974, 1992.
- 16) Hoteit, H., Mose, R., Younes, A., Lehmann, F. and Ackerer, 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.
- 17) Vanderborght, J. and Vereecken, H.: Review of dispersivities for transport modeling in soils, *Vadose Zone J.*, 6, pp.29–52, 2007.
 - 18) 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.
 - 19) Forrer, I., Papritz, A., Kasteel, R., Flüher, H. and Luca, D.: Quantifying dye tracers in soil profiles by image processing, *Euro. J. Soil Sci.*, 51, pp.313–322, 2000.
 - 20) 井上一哉・藤原隆之・田中勉：不均質地盤を対象とした中規模溶質輸送実験と空間・時間モーメント法による溶質分散パラメータ同定，土木学会論文集 A2 分冊（応用力学），69(2)，pp.I.9–I.18, 2013.
 - 21) Jaeger, S., Ehni, M., Eberhardt, C., Rolle, M., Grathwohl, P. and Gauglitz, G.: CCD camera image analysis for mapping solute concentrations in saturated porous media, *Anal. Bioanal. Chem.*, 395, pp.1867–1876, 2009.
 - 22) Flury, M. and Flüher, H.: Brilliant blue FCF as a dye tracer for solute transport studies - a toxicological overview, *J. Environ. Qual.*, 23, pp.1108–1112, 1994.
 - 23) 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.
 - 24) Deutsch, C.V. and Journel, A.G.: *GSLIB: Geostatistical software library and user's guide*, Oxford University Press, 340p., 1992.
 - 25) Ghori, S.G., Heller, J.P. and Singh, A.K.: An efficient method of generating random permeability fields by the source point method, *Math. Geol.*, 25(5), pp.559–572, 1993.
 - 26) Inoue, K., Takenouti, R., Kobayashi, A., Suzuki, K. and Tanaka, T.: Assessment of a UV excited fluorescent dye technique for estimating solute dispersion in porous media, *J. Rainwater Catchment Sys.*, 17(1), pp.1–9, 2011.
 - 27) Uffink, G.J.M.: Analysis of dispersion by the random walk method, *Ph.D Dissertation, Delft University of Technology*, 150p., 1990.
 - 28) 井上一哉・鈴木克季・島田遥・小林晃・田中勉：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，土木学会論文集 A2 分冊（応用力学），68(2)，pp.I.527–I.538, 2012.
 - 29) Freyberg, D.L.: A natural gradient experiment on solute transport in a sand aquifer 2. Spatial moments and the advection and dispersion of nonreactive tracers, *Water Resour. Res.*, 22(13), pp.2031–2046, 1986.
 - 30) Aggelopoulos, C.A. and Tsakiroglou, C.D.: Quantifying soil heterogeneity from solute dispersion experiments, *Geoderma*, 146, pp.412–424, 2008.
 - 31) Chao, H.C., Rajaram, H. and Illangasekare, T.H.: Intermediate-scale experiments and numerical simulations of transport under radial flow in a two-dimensional heterogeneous porous medium, *Water Resour. Res.*, 36(10), pp.2869–2884, 2000.
 - 32) Danquigny, C., Ackerer, P. and Carlier, J.P.: Laboratory tracer tests on three-dimensional reconstructed heterogeneous porous media, *J. Hydrol.*, 294, pp.196–212, 2004.
 - 33) Beaudoin, A. and de Dreuzy, J.-R.: Numerical assessment of 3-D macrodispersion in heterogeneous porous media, *Water Resour. Res.*, 49, pp.2489–2496, 2013.

(2015. 6. 23 受付)

QUANTIFICATION OF SOLUTE MACRODISPERSION PHENOMENA AND LOCAL HETEROGENEITY USING INTERMEDIATE-SCALE SOLUTE TRANSPORT EXPERIMENTS IN HETEROGENEOUS POROUS FORMATIONS

Kazuya INOUE, Takayuki FUJIWARA, Tomoki KURASAWA and Tsutomu TANAKA

Intermediate-scale laboratory solute transport experiments were conducted in heterogeneous porous formations comprised by 144 sand cells. Visualization of dye solute was applied to transitional estimates in longitudinal and transverse macrodispersivities caused by the presence of heterogeneities. Results showed that a distinct transition of the longitudinal macrodispersivity was confirmed due to the local heterogeneity while a continuous decrease in transverse dispersivity was shown despite of the initial source location. Quantification methodologies were proposed to achieve the ensemble estimation of five distinct transitions of macrodispersivities and the local heterogeneity quantification based on solute pathways, leading to appropriate outcomes relevant to not only the variation and distribution of estimates but the degree of the longitudinal macrodispersivity.