Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-12-04

中規模溶質輸送実験を用いた溶質マクロ分散性に及ぼす相関長と不均質度の影響評価

井上, 一哉
小尾, 泰輝
濱田, 莉菜子
教野, 真帆
田中, 勉

(Citation)
土木学会論文集A2（応用力学）,73(2):I_85-I_96

(Issue Date)
2017

(Resource Type)
journal article

(Version)
Version of Record

(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/90005953

土木学会論文集 A2（応用力学），Vol. 73, No. 2（応用力学論文集 Vol. 20），I_85-I_96, 2017.

中規模溶質輸送実験を用いた溶質マクロ分散性に及ぼす相関長と不均質度の影響評価

井上　一哉[1]・小尾　泰輝[2]・濱田　莉菜子[3]・教野　真帆[4]・田中　勉[5]

[1]正会員 博士（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]学生会員 学士（農） 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: 169a001a@stu.kobe-u.ac.jp
[3]学生会員 学士（農） 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: 175a014a@stu.kobe-u.ac.jp
[4]非会員 学士（農） 京都府庁（〒 602-8570 京都市上京区下立売通新町西入藪ノ内町）
E-mail: m-kiyono28@pref.kyoto.lg.jp
[5]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，透水係数分布の相関長が異なる 3 種類の不均質浸透場を地球統計学的に生成し，色素水溶液を用いた中規模溶質輸送実験を実施した．可視化した時系列の色素分布に対して画像解析と空間モーメント法により地下水流れ方向（縦方向）と鉛直方向（横方向）のマクロ分散性を時系列で推定した．その結果，相関長に対するマクロ縦分散長とマクロ横分散長の依存性・非依存性が実験的に示された．また，本実験スケールではマクロ縦分散長と相関長の比の変動は 3 種類の不均質浸透場で一致する結果を得た．さらには，ランダムウォーク粒子追跡法にて溶質輸送状態を再現するとともに，色素水溶液の分布領域の透水係数を画像抽出することで見かけの不均質度を導入し，局所的に輸送する色素分布のマクロ分散性と見かけの不均質度の関係を求めた．

Key Words: *macrodispersion, intermediate-scale solute transport experiment, correlation length, heterogeneity, random walk particle tracking*

1. 緒論

帯水層内を移動する水溶性地下水汚染物質の主たる輸送現象は，地下水流れに伴う移流現象，土粒子間隙内をランダムに移動する分散現象，溶質の濃度ポテンシャルを駆動力とする拡散現象に大別することができる[1)]．一般的に，拡散現象による溶質分布の拡大度合いは分散現象に比べると小さいため，移流と分散の 2 つの現象は物質輸送現象の根幹と言える[2),3)]．帯水層の透水係数は場所ごとに異なる不均質性を有しており，透水係数に応じた地下水の流向・流速の変化は溶質の輸送経路に大きく影響を及ぼす因子である．間隙内の流路のランダム性に起因する分散はミクロ分散現象，透水係数の変化による平均的な流速変化に起因する分散はマクロ分散現象と称され，マクロ分散現象はミクロ分散現象よりも溶質の拡大度合いの大きい現象である[4),5)]．また，透水係数のばらつき，ならびに，任意の距離間にある透水係数の自己相関性を示す相関長にマクロ分散現象の発現強度は左右される[4)] ことから，溶質分布の拡大予測やトレーサ試験の実施・データ解釈において，溶質のマクロ分散性の評価は重要な課題である[6)]．

アメリカ合衆国の Cape Cod サイト[7)] やカナダの Borden サイト[8)] のように，狭いボーリング孔間隔で透水係数データを測定しつつ，トレーサ試験を広い空間で実施することはフィールドの溶質マクロ分散現象を捉える理想的な状況であるものの，物理的・経済的観点から容易に実現できる試験ではない．また，対象空間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．観測孔において計測された濃度変動を基にして推定されるマクロ分散性は溶質の通過した範囲を中心とした局所的不均質性を反映した結果である一方で，局所的不均質性と分散性の関係は未解明の課題である[2)]．

そのような背景を受けて，水溶性物質の挙動を把握すべく，環境条件を制御しやすいラボレベルの溶質輸送実験は頻繁に採用される手段である．地下空間を模擬したカラムや土槽を用いた実験例は豊富である[9)−12)] ものの，多くの溶質輸送実験ではセンサーなどの計測機器を供試体に挿入するため，部分的にであるにせよ，模擬地下水や溶質の挙動に影響を及ぼすことになる．この問題を払拭するにあたり，溶質として色素を用いた溶質輸送実験を可視化しつつ，画像情報を基に溶質移行に関わる物理量を定量化する研究が進められている[13)−16)]．しかしながら，不均質地盤を対象とした実験事例は乏

しく，透水係数分布の不均質度や透水係数の空間相関距離，すなわち相関長が軸となる研究例は極めて少ない[17)−20)]．そこで本研究では，1 m 長さの土槽による中規模溶質輸送実験を通じて，マクロ分散現象の定量化を試みるとともに，マクロ分散性に及ぼす相関長，不均質度の影響に関する知見を得ることを目的とする．

2. 中規模溶質輸送実験

(1) 水溶性物質

本研究では，水溶性汚染物質の輸送挙動を可視化できるように，青系水溶性色素である Brilliant Blue FCF（Color index: 42090）[21)] を採用した．当該色素は Rhodamine B[18),19)] のように毒性に関する懸念の無い安全な色素であり，溶質としての適用実績[20),22)] も豊富である．実験に供する色素水溶液の初期濃度は，色素混合時の水溶液の比重，ならびに，画像解析の際に重要となるピクセル明度の抽出を勘案して 0.2 mg/cm^3 に調整した．

(2) 土質試料とカラム試験

実験土槽内にばらつきのある透水係数分布を実現できるように，まず，平均粒径の異なる 5 種類のケイ砂を準備した．類似の 5 種類のケイ砂のみを既定の試料配置に従ってマトリクス状に透水係数分布を形成した実験例はあるものの[20)]，透水係数分布の滑らかさの観点では十分とは言い難い．そこで本研究では，5 種類のケイ砂をそれぞれのケースにおいて使用する，あるいは，平均粒径の近い 2 種類を混合することにより，18 種類の土質試料を生成した．**表–1** に 18 種類の試料に関する物理特性を平均粒径の小さい試料から順番に列記する．透水係数は直径 5 cm，長さ 30 cm のアクリル製円筒カラムを使用して，飽和状態の各試料を密度管理しながら水中充填することにより，所定の動水勾配に伴う排水流量と断面積を基に求めた．水温 15°C にて補正した結果を**表–1** に示す．試料に関わらず，間隙率は 0.437 に統一して密度管理しており，充填試料の質量とカラム本体の体積から間接的に間隙率を算定した．

加えて，各試料の分散性を把握するため，5.0 mg/cm^3 に調整した NaCl 水溶液をカラム上端から注入し，カラム下端からの浸出液の NaCl 濃度を時系列で計測した．計測された濃度変化を時間モーメント法[23),24)]

$$\mu_n(\xi_P) = \frac{\int_0^\infty t^n c_s(\xi_P, t)dt}{\int_0^\infty c_s(\xi_P, t)dt} \tag{1}$$

にて，間隙構造の不規則性に起因するミクロ縦分散長を

$$\alpha_L = \frac{\xi_P \mu_2}{2\mu_1^2} \tag{2}$$

により導出した．ここに，μ_n は n 次標準時間モーメント，c_s は NaCl 濃度，t は時間，ξ_P は NaCl 濃度計測点である．α_L はミクロ縦分散長であり，後述するマクロ分散長との区別と簡便さを考慮して，単に縦分散長と記す．**表–1** にすべての試料の縦分散長を列記する．

表–1 18 種類の土質試料に関する物理特性一覧

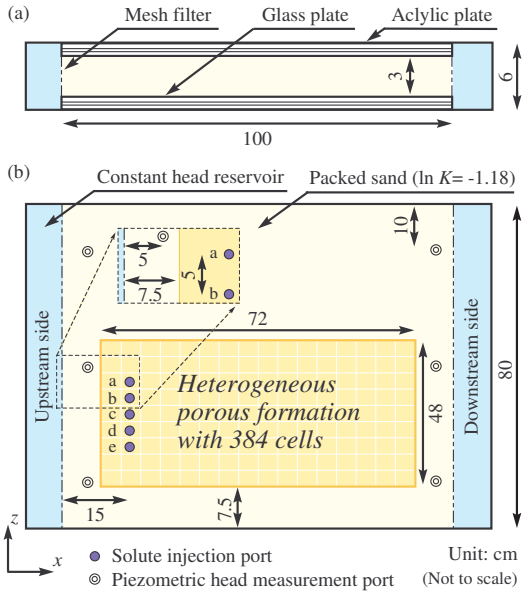
試料	平均粒径 (cm)	均等係数 (−)	透水係数 (cm/s)	縦分散長 (cm)
1*	0.011	1.25	0.0152	0.19
2	0.014	1.26	0.0188	0.19
3	0.017	1.27	0.0238	0.19
4	0.021	1.28	0.0291	0.19
5	0.024	1.29	0.0363	0.19
6	0.027	1.30	0.0459	0.19
7	0.028	1.30	0.0559	0.32
8*	0.030	1.31	0.0650	0.19
9	0.036	1.32	0.0770	0.25
10	0.039	1.33	0.0923	0.33
11*	0.048	1.34	0.119	0.24
12	0.054	1.39	0.156	0.32
13	0.059	1.44	0.188	0.31
14	0.065	1.50	0.216	0.26
15	0.073	1.57	0.249	0.29
16*	0.081	1.65	0.306	0.35
17	0.11	1.83	0.341	0.43
18*	0.15	2.01	0.390	0.54

* は配合元になるケイ砂

(3) 溶質輸送実験装置

溶質輸送実験を実施するにあたり，高さ 80 cm，幅 100 cm，奥行き 3 cm の実験空間を作製した．実験装置本体の前面をガラス板にて構成することにより，溶質挙動を可視化できるようにしており，背面はアクリル板，底部はステンレス材で構成した．上流から下流方向を x 軸，鉛直方向を z 軸として，**図–1** (a) に溶質輸送実験装置の平面図，**図–1** (b) に断面図を示す．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することで既定の水頭を負荷しつつ，水の流出入を制御した．実験装置本体と定水頭タンクの連結部分には，内部に充填する土質試料の流出を防ぐ目的でメッシュフィルタを連結断面の全体にわたって貼付した．

実験装置背面の 6 箇所に半径 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．また，ピエゾメータ孔とは異なる位置に半径 6 mm の孔を 5 箇所に穿孔することで溶質の注入孔を設け，土質試料の流出を防ぐため，注入孔はシリコン栓で閉じた．**図–1** にピエゾメータ孔と溶質注



図–1 中規模溶質輸送実験装置の概略：(a) 平面図，(b) 断面図

入孔 a ～ e を示す．さらに，**図–1** に示すように，浸透場を成す高さ 80 cm，幅 100 cm，奥行き 3 cm の空間のうち，高さ 48 cm，幅 72 cm，奥行き 3 cm の領域を不均質領域に設定した．

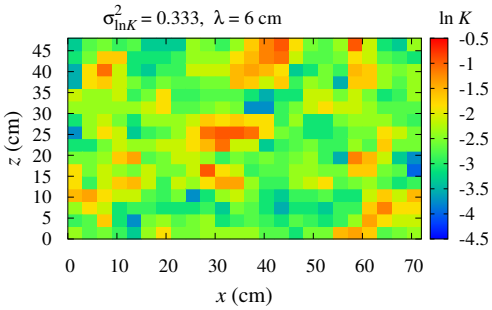
(4) 地球統計学を用いた不均質場の生成方法

透水係数分布を形成する 18 種類の土質試料に関して，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 −2.45，0.554 である．つまり，透水係数の幾何平均値は 0.086 cm/s である．Borden サイトに代表されるように，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[8] と考えられる．そこで透水係数の空間相関は等方として，指数型バリオグラム

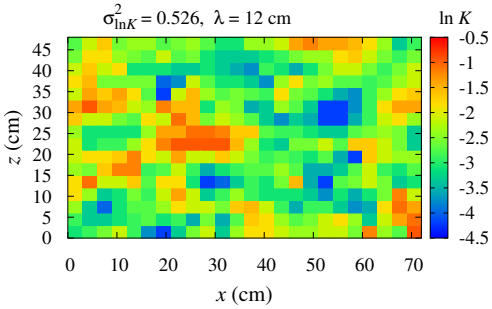
$$\gamma(d) = \kappa^2 \left(1 - \exp\left(\frac{-d}{\lambda}\right)\right) \tag{3}$$

に従うと仮定した．ここに，γ はバリオグラム，d は観測点間距離，κ^2 はバリオグラムの変動が落ち着く値（シル）であり，単位量とした．また，λ は相関長であり，相関長と溶質輸送特性の関係を探るべく，相関長を 6 cm，12 cm，18 cm に変えた不均質場を対象とした．

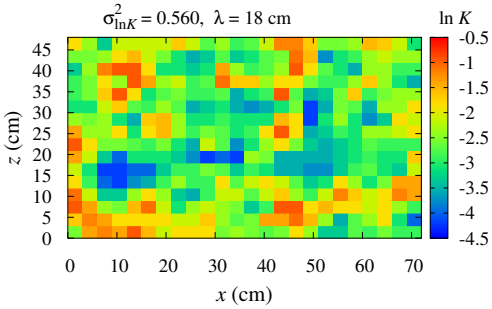
疑似的に透水係数分布を生成するブロッククリギング予測[25] の過程では，所定の領域内に一様乱数にて，250 個のソース点を生成し，各ソース点に乱数により透水係数を発生させて，高さ 48 cm，幅 72 cm の領域に対する透水係数分布を生成した．このとき，1 つのセルサイズを高さ 3 cm，幅 3 cm に定めて，x 軸方向に 24 セル，z 軸方向に 16 セルをマトリクス状に配置した不均質空間を生成した．1 つのセルサイズを高さ 5 cm，幅 5 cm に設定して類似の溶質輸送実験を実施している事



図–2 不均質透水係数分布：相関長 $\lambda = 6$ cm



図–3 不均質透水係数分布：相関長 $\lambda = 12$ cm



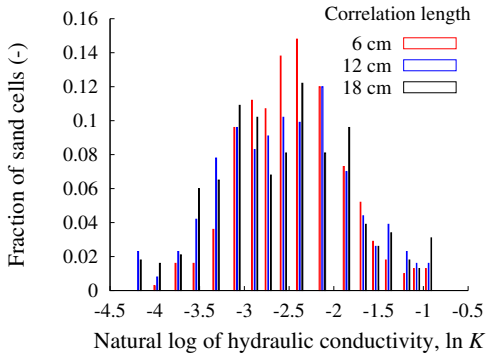
図–4 不均質透水係数分布：相関長 $\lambda = 18$ cm

例[20] があるものの．解像度の観点から鑑みて，より解像度の高い不均質場を作り出すことを目的として，本実験では，セルサイズを高さ 3 cm，幅 3 cm に定めた．生成された透水係数の空間分布状態を**図–2** から**図–4** に示す．ブロッククリギング予測より得られた透水係数に最も近い透水係数を有する試料を該当セルに配置することとし，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–5** に示す．**図–5** 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，縦軸は各試料の母数（384 セル）に対する構成割合である．

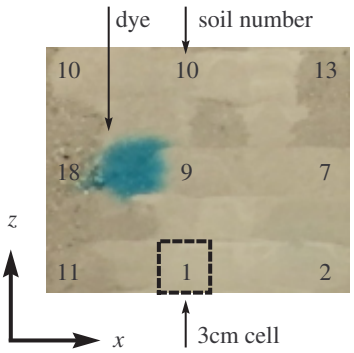
各セルに対応する試料の透水係数の値に基づいて，

$$\sigma^2_{\ln K} = \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n}(\ln K_i)^2 - n(\ln M)^2\right) \tag{4}$$

により，対象場の不均質度を定義した．ここに，$\sigma^2_{\ln K}$ は不均質度，n はセル数，K_i はセルに対応する試料の透水係数，$\ln M$ は透水係数の幾何平均である．結果的



図–5 不均質場を形成するセル群の透水係数のヒストグラム



図–6 試料配置と色素分布

に，相関長 6 cm，12 cm，18 cm の透水係数分布に対応する不均質度はそれぞれ，0.333，0.526，0.560 であり，不均質度としては，やや低めである[12]．

(5) 試料充填方法と不均質地盤の形成

本実験は，飽和状態の帯水層を模擬するため，空気が混入しないように土質試料を十分に飽和させた上で，水中落下法により試料を充填した．試料充填時には，比較的透水性の良い 16 番の土質試料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．各層の充填過程では，前述したカラム実験と同条件になるように試料を突き固めつつ，0.437 の間隙率を維持して密度を管理した．**図–2** から**図–4** に示す透水係数分布を形成するため，**図–1** (b) に示す高さ 48 cm，幅 72 cm，奥行き 3 cm の空間に，既定の土質試料を高さ 3 cm，幅 3 cm，奥行き 3 cm で充填配置した．充填過程における隣接試料の混合を防ぐため，異なる 2 つの試料の間と両側に仕切り板を挿入し，試料の充填と突き固めを終えた後，仕切り板を徐々に引き抜いた．また，定水頭タンクからの圧力を緩和して，流れを整える目的で，16 番の試料を不均質場の上下流側に充填した．高さ 3 cm の一層あたり，最上流部に幅 11.5 cm の 16 番の試料，その下流側に幅 3 cm の試料を 24 個，最下流部に幅 16.5 cm の 16 番の試料を充填した．同様の過程を 16 層にわたって繰り返すことで，384 個のセルから構成される不均質場を形成した．

不均質場より上部には，16 番の試料を一層 5 cm の高さで密度管理して配置し，充填完了後に装置上部をステンレス板にて密閉した．相関長の異なる不均質場においても同様の過程を経て，土層内に試料を充填した．水中落下法では装置の上部ほど充填密度にばらつきが生じやすい点を勘案して，実験空間全体の概ね中央部になるように不均質空間の位置を決定している．前述のように，本研究では，6 cm，12 cm，18 cm の 3 種類の相関長を対象としているため，不均質地盤を 3 度構成している．

(6) 浸透流と色素水溶液のリリース

浸透流を生じさせるため，実験装置両側の定水頭タンクの水圧を調整することで動水勾配を与えた．下流側の定水頭タンクから流出する流量の計測，ピエゾ水頭値の読み取りにより定常流状態を確認した．**図–1** に示す 5 つの溶質注入孔に，1 つの孔あたり 20 cm^3 の色素水溶液を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．

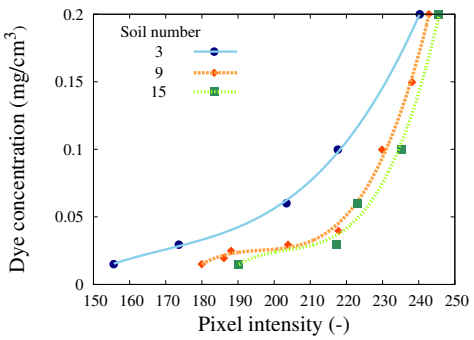
実験中は所定の照明のみを点灯させて光量を一定に保ち，実験装置から約 100 cm 離れた位置に設置したデジタルカメラを用いて水溶液の移行過程を一定の間隔で撮影し，画像を取得した．本実験は 20°C の恒温室にて実施し，実験実施中の水温は 21 ± 2°C であることから，水温変化に伴う粘性や密度の変化は極めて小さいと考えられる．なお，本実験では，前面のガラス面と背面のアクリル板にて観察される移流分散挙動はほぼ一致していることを目視により確認している．

3. 画像解析と数値解析によるマクロ分散推定

(1) 画像解析

本実験の主たる目的の 1 つは，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，溶質の拡大則を表すマクロ縦分散長とマクロ横分散長を推定することにある．**図–6** には，不均質地盤内に存在する色素水溶液の分布を示しており，数字は 3 cm サイズのセルに配置された試料番号である．**図–6** に見られるように，実験に使用した 18 種類の試料は試料番号が小さいほど色彩として白みを帯びていく．そのため，同一の溶質濃度であっても，溶質の位置する試料に応じた明度変化となることから，推定手段の最初のステップとして，既往の手法[26] 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，カメラ位置を溶質輸送実験



図–7 ピクセル明度と色素濃度の変換関数

の状況と同一にして，注入する色素水溶液の濃度を 0.2 mg/cm^3 から複数段階に変えて，該当する色素濃度とピクセル明度の関係を求めた．不均質空間の生成に使用した 18 種類の試料は厳密にはすべて色調が異なるため，すべての試料に対する明度と濃度の関係を求めることが理想であるものの，試料番号の近い試料の色彩は似ている．そこで本実験では，18 種類の試料を色調により 1 ～ 4 と 5 ～ 10，11 ～ 18 の 3 つに分類し，それぞれ中央付近にある試料番号 3 と 9，15 に対応する明度と濃度の関係を変換曲線として求めた．**図–7** にピクセル明度と色素濃度の変換関数の一例を示す．低濃度の色素水溶液に対しては，不明瞭なピクセル明度と色素濃度の関係になるため，ピクセル明度の閾値を下回る明度が得られた場合には，色素濃度をゼロと見なした．また，閾値を上回る場合についても同様に，色素濃度をゼロとした．したがって，溶質輸送実験の画像を解析する際には，すべてのピクセルに対して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た 3 種類の変換関数を使い分けることとした．また，濃度変換後にノイズ処理[13] を組み込み，室内照明や間接照明によって明度には差が生じるため，不均質地盤を形成する度に明度と色素濃度の関係を構築し直した．

(2) 空間モーメント法

空間モーメント法は溶質の濃度や質量の空間分布データに基づく，分布状況を解釈する 1 つの手段である．2 次元場における濃度分布の空間モーメントは

$$M_{ij}(t) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} c(x,z,t)x^i z^j dxdz \tag{5}$$

により表すことができる[4]．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，色素濃度をピクセル明度に関連付けており，マクロ分散長を推定する 2 つ目のステップとして，

$$M_{ij}(t) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} H(x,z)I(x,z,t)x^i z^j dxdz \tag{6}$$

により空間モーメント量を算出した[26]．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 (6) を用いて空間 1 次モーメントを導出し，

$$x_G(t) = \frac{M_{10}}{M_{00}}, \quad z_G(t) = \frac{M_{01}}{M_{00}} \tag{7}$$

により色素分布の重心位置を求めた．ここに，x_G と z_G は時刻 t における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 次モーメントを用いて，マクロ縦分散長とマクロ横分散長を

$$A_L(\xi_c(t)) = \frac{1}{2}\frac{\dfrac{M_{20}}{M_{00}} - x_G^2}{\xi_c(t)} \tag{8}$$

$$A_T(\xi_c(t)) = \frac{1}{2}\frac{\dfrac{M_{02}}{M_{00}} - z_G^2}{\xi_c(t)} \tag{9}$$

にて推定した[24),26]．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と時刻 t における色素分布の重心の距離である．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．A_L と A_T は透水係数の空間変動に起因した流速分布による分散長であり，式 (2) の α_L は間隙構造の微視的スケールでの流速分布に起因した分散長である．

(3) 数値解析

本研究では画像解析に加えて，数値解析を用いてマクロ分散長を推定した．対象場は飽和条件下にある，不均質浸透場であることから，浸透流方程式

$$\nabla \cdot (K(\boldsymbol{x})\nabla h) = 0 \tag{10}$$

を有限要素解析により求解した．ここに，h はピエゾ水頭，$\boldsymbol{x}$ は位置ベクトルである．また，$K(\boldsymbol{x})$ は透水係数テンソルであり，等方性を仮定するとともに，解析対象の透水係数分布に応じた値を設定した．さらに，$x = 0$ cm と $x = 100$ 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，

$$\boldsymbol{v} = -\frac{K(\boldsymbol{x})}{n_p}\nabla h \tag{11}$$

にて流速分布を求めた．ここに，$\boldsymbol{v}$ は実流速ベクトル，n_p は有効間隙率である．領域内で有効間隙率は一定と見なし，地下水はすべての有効空隙を通ると仮定した．

移流分散現象を数値的に求解する手段として本研究では，ランダムウォーク粒子追跡法[27] を採用した．ランダムウォーク粒子追跡法は対象物質に見立てた大量の粒子群を領域内に発生させて，粒子位置と質量に対する空間分布変動を時系列で追跡する手法であり，ランジュバン方程式の伊藤解釈[28] に基づいて，

$$\boldsymbol{X}_p(t+\Delta t) = \boldsymbol{X}_p(t) + \frac{(\boldsymbol{v} + \nabla \cdot \boldsymbol{D})\Delta t}{R} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{\Xi}\sqrt{\Delta t} \tag{12}$$

にて表される．ここに，$\boldsymbol{X}_p(t)$ は時刻 t の粒子位置ベクトル，Δt は時間増分，$\boldsymbol{\Xi}$ は平均 0，分散 1 の正規分布に従うベクトル，R は遅延係数であり，溶質と土粒

子間の吸脱着は小さいとみなして，単位量を設定した．$\boldsymbol{D}$ は分散係数テンソルであり，指標表示にて，

$$D_{ij} = \alpha_T |v| I_{ij} + (\alpha_L - \alpha_T)\frac{v_i v_j}{|v|}, \quad i,j = 1,2 \quad (13)$$

と表される[1]．ここに，I_{ij} は単位マトリクス，α_L は縦分散長，α_T は横分散長である．また，v_i は実流速成分，$|v|$ は実流速ノルムであり，式 (11) の結果を用いた．$\boldsymbol{B}$ は変位マトリクスであり，

$$\boldsymbol{B} = \begin{pmatrix} \frac{v_1}{|\boldsymbol{v}|}\sqrt{\frac{2\alpha_L|\boldsymbol{v}|}{R}} & -\frac{v_2}{|\boldsymbol{v}|}\sqrt{\frac{2\alpha_T|\boldsymbol{v}|}{R}} \\ \frac{v_2}{|\boldsymbol{v}|}\sqrt{\frac{2\alpha_L|\boldsymbol{v}|}{R}} & \frac{v_1}{|\boldsymbol{v}|}\sqrt{\frac{2\alpha_T|\boldsymbol{v}|}{R}} \end{pmatrix} \quad (14)$$

にて表される．加えて，移流後の分散計算にて透水係数の異なる領域を粒子が横断する場合，

$$P_1 = \frac{\sqrt{D_1}}{\sqrt{D_1}+\sqrt{D_2}} \quad (15)$$

$$P_2 = \frac{\sqrt{D_2}}{\sqrt{D_1}+\sqrt{D_2}} \quad (16)$$

により，横断できる確率を求めた．ここに，D_1 と D_2 は各要素の分散係数，P_1 は粒子が存在する要素内に留まる確率，P_2 は粒子が隣接する要素へ移行する確率である．横断確率を課すことにより，透水係数の不均質性の影響をモデル化でき，横断できない判定の場合は横断点で反射させている[27]．

ランダムウォーク粒子追跡法による演算過程では，空間モーメント法を組み込むことで，空間モーメント量

$$X_{G,i} = \frac{1}{m(t)}\sum_{k=1}^{NP_t}\frac{m_p^k X_{p,i}^k(t)}{R(\boldsymbol{X}_p^k(t))} \quad (17)$$

$$m(t) = \sum_{k=1}^{NP_t}\frac{m_p^k}{R(\boldsymbol{X}_p^k(t))} \quad (18)$$

$$S_{ij}(t) = \frac{1}{m(t)}\sum_{k=1}^{NP_t}\frac{m_p^k X_{p,i}^k(t) X_{p,j}^k(t)}{R(\boldsymbol{X}_p^k(t))} - X_{G,i}(t)X_{G,j}(t) \quad (19)$$

を算出した．ここに，$X_{p,i}$ は粒子位置成分，$X_{G,i}$ は粒子空間分布に対する重心位置，m_p^k は k 番目粒子の質量，$m(t)$ は時刻 t に存在する粒子総質量，S_{ij} は粒子空間分布の空間 2 次モーメント，NP_t は時刻 t の空間内の粒子総数である．これよりマクロ縦・横分散長を

$$A_L(\xi_G(t)) = \frac{S_{11}(\xi_G(t))}{2\xi_G(t)}, \quad A_T(\xi_G(t)) = \frac{S_{22}(\xi_G(t))}{2\xi_G(t)} \quad (20)$$

にて推定した[15),24)]．ここに，$\xi_G(t)$ は時間 t における粒子群の重心位置の移動距離である．

入力パラメータとして，**表–1** の試料群の分散長結果を参考に，縦分散長は 0.3 cm，横分散長は縦分散長の 0.5 倍とした．均等係数の小さい試料であれば，分散長の変動は小さい[10] ため，空間固定とした．また，注入した色素水溶液はパスカルの原理により球状に分布し，ガラス面に当たると $x-z$ 方向に拡がる．溶質注入直後の画像を抽出して実験ごとに初期半径を設定し，半径内に 10^4 粒子をランダム配置して溶質注入を模擬した．**表–2** に数値解析に用いたパラメータを記す．

表–2 ランダムウォーク粒子追跡法に用いたパラメータ一覧

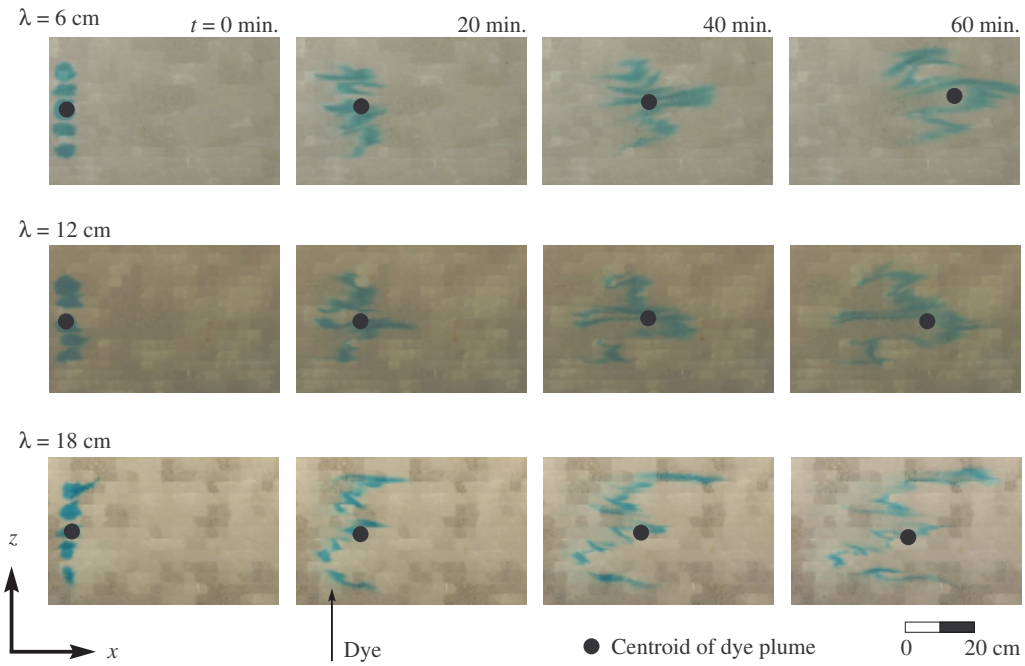
縦分散長 α_L (cm)	0.3
横分散長 α_T (cm)	0.15
遅延係数 R (−)	1.0
時間ステップ Δt (s)	1.0
粒子数 N	5×10^4

4. マクロ分散性の定量化

(1) 溶質輸送現象とマクロ分散長

透水係数分布の空間相関性，すなわち，相関長が異なる 3 種類の不均質浸透場において，5 か所の溶質注入孔より線状にリリースした色素水溶液の空間変動の様子を**図–8** に一例として示す．溶質注入時の時刻 t をゼロ（$t=0$）として，60 分までの溶質輸送の状態を 20 分間隔で示している．また，図中の黒丸は 3.2 節において述べた空間 1 次モーメントとして得られる色素分布の重心位置を示している．色素分布の経時変化は輸送対象となる場で大きく異なり，主たる流れ方向（x 軸方向）や鉛直方向（z 軸方向）への色素分布の進展状況についても場に応じて変動することが観察できる．

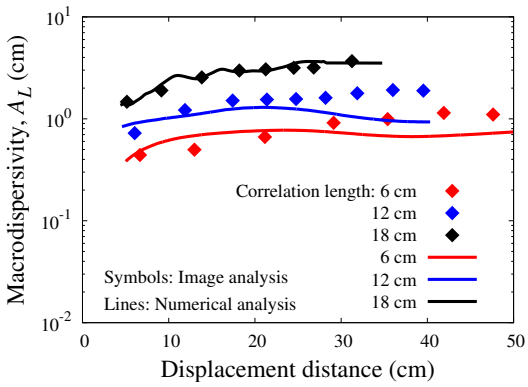
色素分布の変動に基づいて，前述した空間モーメント法を応用した画像解析により推定されたマクロ縦分散長の結果を**図–9** にシンボルで示す．凡例には対象場の相関長を記しており，溶質注入孔から色素分布の重心位置までの距離を移動距離として算定した値を図の横軸に，その時点の色素分布より推定されるマクロ縦分散長の値を縦軸にプロットしている．いずれの相関長に対してもマクロ縦分散長は移動距離の増加とともに徐々に増加しており，マクロ分散現象に特徴的な距離依存特性である，スケール効果[5),24)] を捉えることができている．また，相関長の大きさに呼応してマクロ縦分散長の値は大きくなる結果が得られている．この傾向は，Gelhar と Axness[29)]，あるいは，Tompson と Gelhar[3)] が理論的・数値解析的に指摘している一方で，実験的に定量化した事例はないことから，理論を裏付ける結果と言える．相関長の違いは，最も透水係数の小さいセルから最も透水係数の大きいセルまでの幾何距離と簡略化して考えることができる．相関長の高い不均質場は，相関長の低い場よりも低透水域から高透水域へ徐々に変化するため，低透水域から高透水域への変化が大きい相関長の低い場に比べると，溶質が流れ方向に伸



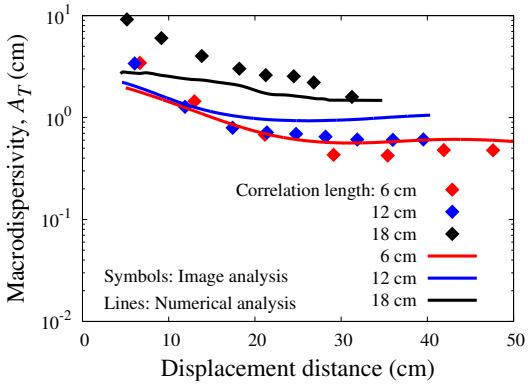
図–8 線状にリリースされた溶質の輸送挙動の一例

びやすい状態にあると推測される．そのため，色素分布の濃度のばらつきは流れ方向に増加することとなり，式 (8) の分子にある空間 2 次モーメント M_{20} は大きくなる結果，マクロ縦分散長の推定結果に反映されると言える．

マクロ縦分散長の推定結果と同様に，マクロ横分散長の結果を**図–10** にシンボルにて示す．相関長に関わらず，色素分布の移動距離とともにマクロ横分散長は減少する傾向を示している．マクロ横分散長は鉛直方向（z 軸方向）への溶質分布の伸びを表す物理量であるため，仮に，点状でリリースされた溶質が輸送距離とともに鉛直方向へ拡大していく様子を定量化することができるならば，対象場のマクロ横分散長の妥当な評価につながると考えられる．しかしながら，本実験場のように，あるいは，自然地盤でのマクロ分散推定が目的とするように，対象 “場全体” に対するマクロ分散長を推定する際には，領域の大部分を通過するように，溶質を移行させた上で分散性を推定しなければならない．言い換えると，点状でリリースした溶質は領域の一部のみを通過するため，輸送過程の溶質拡大は溶質の存在する地点周辺の局所的な不均質性の影響を受け，“場全体” に対するマクロ分散性とは乖離が生じる．溶質の通過領域に関与しない領域の透水係数は任意の値をとることができるため，その場合，“場全体” の不均質度は本実験の不均質度と異なることとなる．その点を鑑みて本研究では，線状に色素水溶液をリリースして流れ方向の軸（x 軸）に対しては点状に色素分布を初期配置し，かつ，対象場の大部分を色素が通過・拡大する



図–9 マクロ縦分散長の推定結果



図–10 マクロ横分散長の推定結果

現象を作り出しているため，マクロ縦分散長については妥当な定量化が可能と考えられる．

一方で，初期の線状配置はマクロ横分散長の解釈を難しくするものであり，線状配置によって強制的に横

表–3 マクロ分散長の推定結果の比較

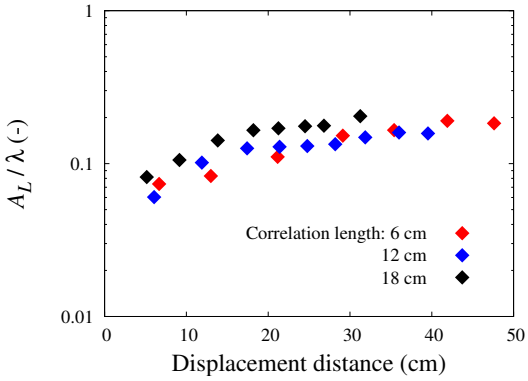
相関長 (cm)	不均質度 (−)	最大輸送距離 (cm)	マクロ縦分散長 (cm)	マクロ横分散長 (cm)	出典
6	0.333	47.6	1.10	0.478	This study
12	0.526	39.5	1.89	0.610	This study
18	0.560	31.3	3.67	1.59	This study
5	1.15	60	1.22	0.729	井上ら[20]
10.2	1.8	100	8.0	-	Fernàndez-Garcia *et al.*[30]
38	0.24	120	4.6	0.019	McNeil *et al.*[18]

方向へ拡大させられた色素分布を定量化の起点としている結果，**図–10** に示すように短い輸送距離に対するマクロ横分散長はマクロ縦分散長よりも大きい値として定量化されている．強制的な伸びは，輸送とともに緩和されて自然な状態に戻っていくため，移動距離とともに減少するマクロ横分散長の傾向は，本実験では妥当な傾向である．相関長 6 cm や 12 cm に対する値の推移に見られるように，一定の移動距離を経て漸近する値が場全体のマクロ横分散長と推測される．したがって，相関長 18 cm に対する変動は漸近値の見通しが見えにくい結果であるため，理想的には，より輸送距離の長い場において類似の定量化を試みることが望まれる．この点については，今後の課題の 1 つに挙げられる．

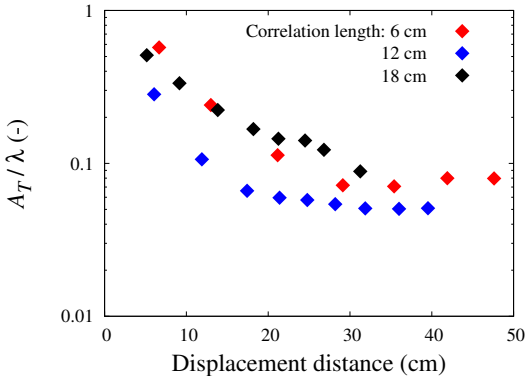
(2) 推定結果の妥当性

溶質輸送実験において得られた推定結果の妥当性について検討するため，ランダムウォーク粒子追跡法にて数値解析的に推定したマクロ縦分散長とマクロ横分散長の結果をそれぞれ**図–9** と**図–10** に実線で描く．溶質は 5 か所から線状にリリースしており，いずれのケースについても概ね一致した結果であることから，本実験の推定結果は一定の妥当性を有していると判断される．数値解析上，各セルに設定する透水係数の値が実際に充填されているセルの真の透水係数と差異が生じている可能性，あるいは，平均粒径の小さいセルにて部分的に発生している吸脱着の可能性が一部，実験結果と数値解析結果に相違のある要因として推測される．

マクロ分散性を実験的に定量化した研究例はあまり多くはないものの，**表–3** にて相関長や不均質度に応じたマクロ分散長の推定結果を実験スケールが類似する他の研究結果と比較する．マクロ横分散長は線状リリースの影響により過大推定している可能性がある一方で，マクロ縦分散長に対する本実験による推定値は類似の研究例と比較して同一のオーダーにあり妥当な推定結果と考えられる．実フィールドへの手法の展開を考慮すると，数少ない計測濃度データにより分散性を推定



図–11 マクロ縦分散長と相関長の比の推定結果

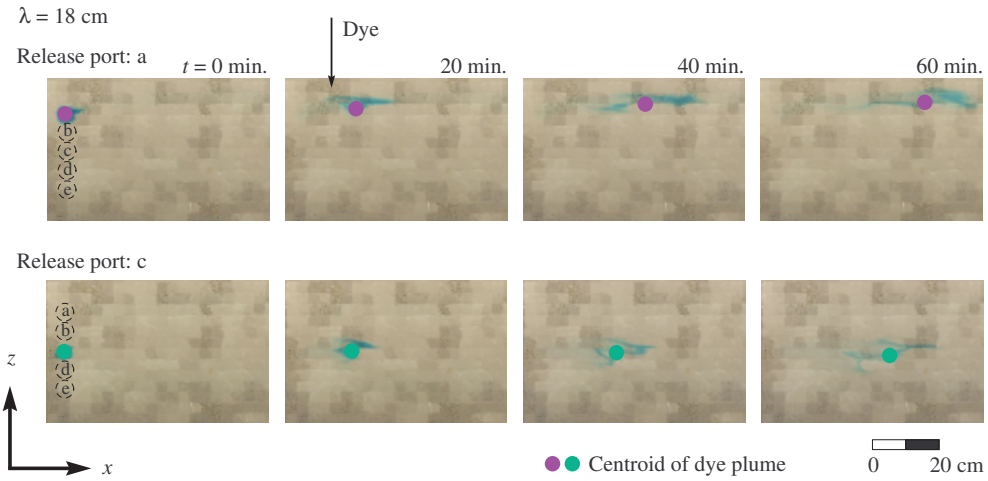


図–12 マクロ横分散長と相関長の比の推定結果

することになる．限られたデータに基づく空間モーメント法の活用については今後の課題である．

(3) 相関長と分散性

相関長の大きい場ほどマクロ縦分散長は大きくなる点が示されたものの，相関長とマクロ分散性に関する検討を加える目的で，また，相関長とマクロ分散長ともに長さの次元を有することから，場の分散性を無次元で定量評価する目的で，マクロ縦分散長と相関長の比の推定結果を輸送距離の関数として**図–11** に示す．4.1 節と同様に，溶質注入孔から色素分布の重心位置までの距離を移動距離として算定した値を図の横軸に，そ



図–13 点状にリリースされた溶質の輸送挙動の一例．相関長 $\lambda = 18$ cm の孔 a と c からの点状リリース．

の時点の色素分布より推定されるマクロ縦分散長の値を対象場の相関長で除した値を縦軸にプロットしている．図に見られるように 3 つの実験ケースに対して，マクロ縦分散長と相関長の比の変動はほぼ一致する結果が得られている．本実験場を形成する土質試料は，粒径としてシルトから砂の範囲であり，また，単一のセル内は均等係数の小さい状態であるために条件付きの知見となるものの，**図–11** の結果は，単位長さあたりの相関長に対する流れ方向に対する溶質分布の進展はいずれの場においても同一であり，マクロ縦分散長と相関長の比は輸送距離に対応して定まる可能性がある．

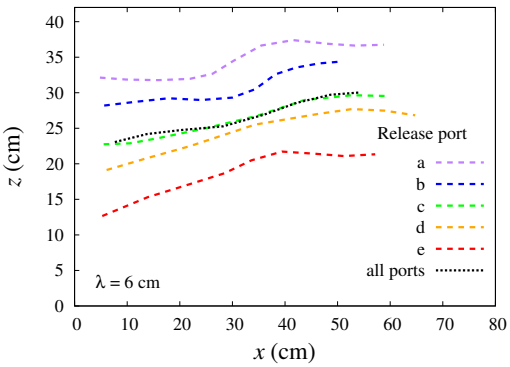
マクロ縦分散長と同様に，マクロ横分散長と相関長の比の推定結果を**図–12** に示す．前述のように，マクロ横分散長は初期の線状配置により横方向に拡大した状態から移流分散していくため，一定のマクロ横分散長に達するまでの推定値は場全体のマクロ横分散現象を十分に反映しているとは言い難いものの，移動距離が 25 cm を上回る結果に限ると，各ケースの値には差異が生じている．相関長の大きさに対するマクロ横分散長の非依存性については Tompson と Gelhar[3] も触れており，本実験結果としてもマクロ縦分散長の結果と比較すると，相関長に対するマクロ横分散長の依存性は低いと考えられる．

(4) 見かけの不均質度の提案と分散性の関係

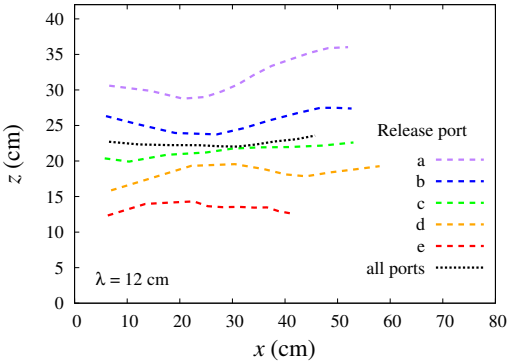
前述のように，場全体のマクロ分散性を評価するには，領域内の大部分を通過する溶質分布を対象とすることが条件として望まれる．しかしながら，実フィールドでの溶質リリースはリリース後の計測範囲や頻度を考えると広い範囲へのリリースは難しく，注入孔から回収孔の間に存在する帯水層の透水係数分布を対象場の不均質度として見なしている[27]．あるいは，溶質の通過領域とは異なる領域にて得られた透水係数の結果を対象場の不均質度と見なすが物理的・経済的側面から現実的な手段である[5]．いずれにしても対象場全体を溶質が通過していることはなく，本実験場においても**図–8** に見られるように，溶質の侵入しないセルも存在する一方で，式 (4) に基づいて定義される不均質度には溶質の侵入しないセルの透水係数も算定対象となる．

いくつかの研究事例[6),30)] にて指摘されるように，マクロ分散長は透水係数分布の不均質度に依存して変化する特性を有している．また，対象領域の一部のみを通過する溶質の輸送挙動に対してもマクロ分散長の推定や局所的不均質度を評価できるのであれば，ラボレベル実験に限らず，フィールドのトレーサ試験にも応用できると考えられる．そこで本研究では，線状リリースの溶質輸送実験に加えて，単一の孔から点状に色素水溶液をリリースすることで，線状リリースと同様の手続きに従ってマクロ分散長を推定した．相関長 $\lambda = 18$ cm の浸透場に対して，点状にリリースされた溶質の輸送挙動の一例を**図–13** に示す．溶質注入時の時刻 t をゼロ（$t = 0$）として，60 分までの溶質輸送の状態を 20 分間隔で示し，色素分布の重心位置に丸印を付している．点状リリースであるため，狭い範囲で溶質は通過することが観察できる．

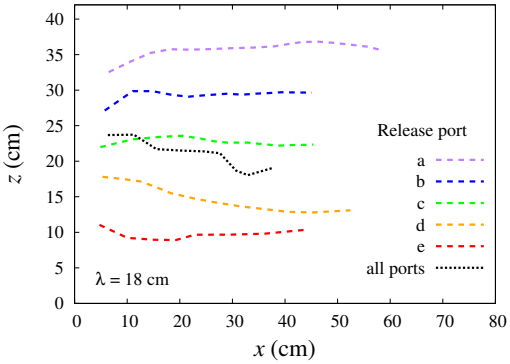
また，相関長 6 cm，12 cm，18 cm の透水係数分布に対して，式 (7) に基づいて算出された色素分布の重心位置の輸送軌跡をそれぞれ**図–14**，**図–15**，**図–16** に描く．比較のため，5 点から線状リリースされた色素分布の重心位置の輸送軌跡も図中に併記している．**図–2** から**図–4** に示す透水係数分布の低透水領域を避けるように色素分布の重心位置は変化していることがわかる．このような点状リリースの結果についても透水係数分布の不均質度と分散性の関係について検討できるように，局所的に通過する溶質分布に寄与した領域の不均質度を求める方法を考案した．



図–14 リリース点に応じた重心の輸送軌跡（$\lambda = 6$ cm）



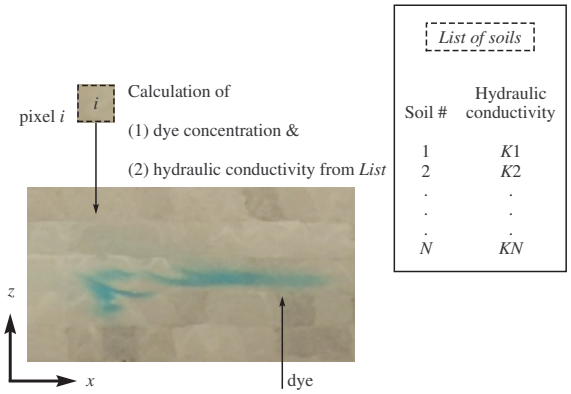
図–15 リリース点に応じた重心の輸送軌跡（$\lambda = 12$ cm）



図–16 リリース点に応じた重心の輸送軌跡（$\lambda = 18$ cm）

3.1 節と 3.2 節にて言及した画像解析と空間モーメント法によるマクロ分散長の推定過程では，ピクセルの位置に基づいて充填されている試料を判別し，ピクセルの明度に基づいて色素濃度へ変換する手続きをすべてのピクセルに対して走査している．そこで**図–17** に示すように，充填試料の透水係数をリストとして入力しておき，充填試料の番号に応じた透水係数を選定することで，ピクセルに存在する色素濃度に加えて，該当ピクセルの透水係数を求めることができる．本研究では，色素分布の拡大領域に対応する透水係数分布を見かけの不均質度として定義することで，局所部分を通過する溶質挙動と見かけの不均質度の関係を検討した．

見かけの不均質度の算定にあたっては，すべてのピ



図–17 見かけの不均質度の導出方法

クセルを走査後，色素濃度が非ゼロとなるピクセルのみを対象として，

$$\sigma_{app}^2 = \frac{1}{\Lambda}\left(\sum_{i=1}^{\Lambda}(\ln K_i)^2 - \Lambda(\ln M)^2\right) \tag{21}$$

について演算した．ここに，σ_{app}^2 は見かけの不均質度，Λ は濃度が非ゼロとなるピクセルの数，K_i はピクセル位置にある試料の透水係数，$\ln M$ は選定対象となったすべての透水係数に対する幾何平均である．これにより溶質のリリース形状に依存せずに，任意の位置に分布する色素分布に寄与する見かけの不均質度とマクロ縦分散長，マクロ横分散長の関係を導くことができる．本研究では，溶質の混合過程が十分に達成されたと考えられる最大輸送距離の時点に対する色素分布に対して本手法を適用した．つまりは，特定の相関長の不均質浸透場に対して，各溶質注入孔から点状リリースする 5 種類，すべての溶質注入孔から同時に線状リリースする 1 種類の計 6 種類の色素分布がそれぞれ最大輸送距離に達した時点を対象として，見かけの不均質度とマクロ縦分散長，マクロ横分散長を導出した．

マクロ縦分散長の算定結果を**図–18** に，線状リリースした結果のみをシンボルサイズを拡大して示す．マクロ縦分散長については全体的に，見かけの不均質度に呼応してわずかに増加する傾向を有しており，線状リリースの方が点状リリースに比べて輸送経路に低透水域が存在する確率が高いため，マクロ分散長の値も大きく得られている．また，高い不均質度であるほど，低透水域と高透水域の透水性の幅が大きくなるため，流れ方向への溶質分布の拡大は生じやすくなる．この点により，程度は小さいものの，見かけの不均質度に応じたマクロ縦分散長の増加につながっていると推察される．

他方，**図–19** にマクロ横分散長の算定結果を示す．前述のように，初期のリリース形状の影響により，線状リリースのマクロ横分散長は大きく評価されている．点

状リリースの結果に限定すると，全体的には約 1 オーダー程度の範囲内に分布している一方で，見かけの不均質度とマクロ横分散長の関係性は弱いと判断される．流れ方向に沿った透水係数の変動に感度のあるマクロ縦分散現象に比べると，主たる流れ方向の垂直方向への流速成分は流れ方向の成分よりも絶対値として小さいため，マクロ横分散現象は数値として大きく発現しないと推測される．

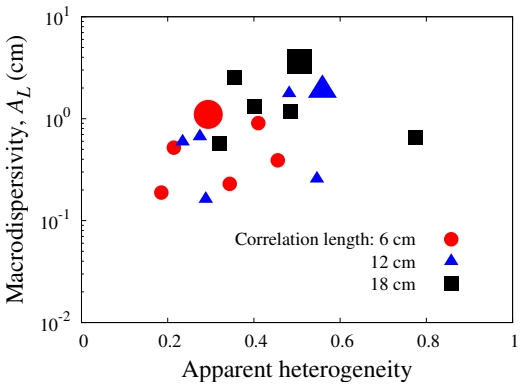
本手法にて提示した手続きは，溶質の輸送挙動を可視化している点，ならびに，セルの配置状態をすべて把握していることが前提にあるため，現状としてはラボレベルの推定に限定される．しかしながら，少ない濃度観測点の条件下でも推定精度を維持する手法が開発できるのであれば，計測点の透水係数データと連携した評価手法に成り得ると期待される．この点は今後の課題とする．

5. 結論

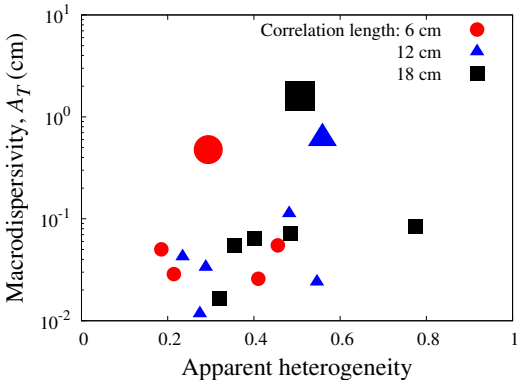
本研究において得られた知見を列記すると以下のとおりである．

1. マクロ縦分散長の輸送距離に応じたスケール効果を実験的に確認し，マクロ縦分散長の相関長への依存性を実験的に示した．マクロ横分散長は初期配置の関係上，輸送距離とともに減少する傾向にあり，相関長への依存性は低い可能性を示した．
2. 本実験にて採用した透水係数の範囲では，また，本実験スケールでは，すべての実験ケースでマクロ縦分散長と相関長の比の変動は一致する結果を得た．
3. ランダムウォーク粒子追跡法による数値解析を実施した結果，溶質輸送実験にて推定したマクロ縦分散長とマクロ横分散長の推移を概ね再現できた．
4. 画像解析の過程にて，色素水溶液の分布領域の透水係数を抽出することで見かけの不均質度を定義・導入した．その結果，局所的に輸送する色素分布に対してもマクロ分散性と見かけの不均質度の関係について求めることができた．

空間モーメント法は分散性の推定に有益な手法である一方で，実サイトの観測データ数は限られているため，少数データの下での手法の適用性を吟味することが望まれる．また，不均質性の高い場に対するマクロ縦分散長と相関長の比の推移を検討することは実サイトの分散性を予測する情報に成り得ると考えられる．数値解析の援用を含めて，今後の課題とする．



図–18 見かけの不均質度とマクロ縦分散長の関係



図–19 見かけの不均質度とマクロ横分散長の関係

参考文献

1) Bear, J.: *Dynamics of fluids in porous media*, Dover Publications, 764p., 1972.
2) Kitanidis, P.K.: Persistent questions of heterogeneity, uncertainty, and scale in subsurface flow and transport, *Water Resour. Res.*, 51, pp.5888–5904, 2015.
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) Dagan, G.: Solute transport in heterogeneous porous formations, *J. Fluid Mech.*, 145, pp.151–177, 1984.
5) 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.
6) Dagan, G. and Fiori, A.: The influence of pore-scale dispersion on concentration statistical moments in transport through heterogeneous aquifers, *Water Resour. Res.*, 33(7), pp.1595–1605, 1997.
7) 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.
8) Turcke, M.A. and Kueper, B.H.: Geostatistical analysis of the Borden aquifer hydraulic conductivity field, *J. Hydrol.*,178(1-4), pp.223–240, 1996.
9) 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.
10) Xu, M. and Eckstein, Y. : Statistical analysis of the relationships between dispersivity and other physical properties of porous media, *Hydrogeology J.*, 5, pp.4–20, 1997.
11) Guedes de Carvalho, J.R.F. and Delgado, J.M.P.Q. : The effect of fluid properties on dispersion in flow through

packed beds, *AIChE Journal*, 49, pp.1980–1985, 2003.
12) Sternberg, S.P.K.: Dispersion measurements in highly heterogeneous laboratory scale porous media, *Transp. Porous Media*, 54, pp.107–124, 2004.
13) 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.
14) 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.
15) 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.
16) Citarella, D., Cupola, F., Tanda, M.G. and Zanini, A.: Evaluation of dispersivity coefficients by means of a laboratory image analysis, *J. Contam. Hydrol.*, 172, pp.10–23, 2015.
17) Fernàndez-Garcia, D., Sánchez-Vila, X. and Illangasekare, T.H. : Convergent-flow tracer tests in heterogeneous media: combined experimental-numerical analysis for determination of equivalent transport parameters, *J. Contam. Hydrol.*, 57, pp.129–145, 2002.
18) 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.
19) Castro-Alcalà, E., Fernàndez-Garcia, D., Carrera, J. and Bolster, D.: Visualization of mixing processes in a heterogeneous sand box aquifer, *Environ. Sci. Technol.*, 46, pp.3228–3235, 2012.
20) 井上一哉，藤原隆之，倉澤智樹，田中勉：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，土木学会論文集 A2(応用力学)，71(2)，pp.I_691–I_702，2015.
21) 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.
22) 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.
23) Pang, L., Goltz, M. and Close, M.: Application of the method of temporal moments to interpret solute transport with sorption and degradation, *J. Contam. Hydrol.*, 60(1-2), pp.123–134, 2003.
24) Fernàndez-Garcia, D., Illangasekare, T.H. and Rajaram, H.: Differences in the scale-dependence of dispersivity estimated from temporal and spatial moments in chemically and physically heterogeneous porous media, *Adv. Water Resour.*, 28, pp.745–759, 2005.
25) Deutsch, C.V. and Journel, A.G.: *GSLIB: Geostatistical software library and user's guide*, Oxford University Press, 340p., 1992.
26) 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(応用力学)，68(2)，pp.I_527–I_538，2012.
27) Uffink, G.J.M.: Analysis of dispersion by the random walk method, *Ph.D Dissertation, Delft University of Technology*, 150p., 1990.
28) Itô, K.: On stochastic differential equations, *Mem. Amer. Math. Soc.*, 4, pp.1–51, 1951.
29) Gelhar, L.W. and Axness, C.L.: Three-dimensional stochastic analysis of macrodispersion in aquifers, *Water Resour. Res.*, 19(1), pp.161–180, 1983.
30) Fernàndez-Garcia, D., Illangasekare, T.H. and Rajaram, H.: Conservative and sorptive forced-gradient and uniform flow tracer tests in a three-dimensional laboratory test aquifer, *Water Resour. Res.*, 40, W10103, 2004.

(2017. 6. 23 受付)

INTERMEDIATE-SCALE SOLUTE TRANSPORT EXPERIMENTS FOR ASSESSING THE IMPACTS OF CORRELATION LENGTH AND HETEROGENEITY ON MACRODISPERSION PHENOMENA

Kazuya INOUE, Yasuteru KOBI, Rinako HAMADA,
Maho KIYONO and Tsutomu TANAKA

Intermediate-scale laboratory solute transport experiments are conducted in heterogeneous porous formations comprised by 24×16 sand cells in a $100 \times 80 \times 3$ cm sandbox. The spatial distributions of hydraulic conductivity having different values of the correlation length are geostatistically generated. Visualization of dye solute is applied to transitional estimates in longitudinal and transverse macrodispersivities caused by the presence of heterogeneities. Experimental results reveal that the longitudinal and transverse macrodispersivities show the dependence and non-dependence nature on the correlation length, respectively. Laboratory study is extended by a random walk particle tracking approach to reconstruct the estimated macrodispersivity transition, demonstrating a good agreement between the experimental and numerical results. A highlight of our experimental approach is that the variations of the ratio of the longitudinal macrodispersivity to the correlation length exhibit almost the same evolution despite of the correlation length. Quantification imaging methodology is proposed to investigate the relation between the apparent heterogeneity and the macrodispersivities based on solute distributions.