



単純化した不均質帶水層内の溶質分散実験と数値解析による評価

井上, 一哉

藤原, 隆之

田中, 勉

(Citation)

土木学会論文集B1（水工学）, 70(4):I_1105-I_1110

(Issue Date)

2014

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

©2014 公益社団法人 土木学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90003326>



単純化した不均質帶水層内の溶質分散実験と 数値解析による評価

SOLUTE DISPERSION EXPERIMENT IN SIMPLIFIED HETEROGENEOUS
AQUIFERS AND ITS EVALUATION USING NUMERICAL SIMULATION

井上一哉¹・藤原隆之²・田中勉³

Kazuya INOUE, Takayuki FUJIWARA and Tsutomu TANAKA

¹ 正会員 博士(農学) 神戸大学准教授 大学院農学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

² 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)

³ 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-scale experiments on simplified heterogeneous porous media were conducted in a 100 × 100 × 3 cm sandbox with small blocks of fine or coarse sand. The use of visualization of dye solute and the measurement of NaCl concentration were applied to transitional estimates in longitudinal and transverse dispersivities caused by the presence of heterogeneities. Results showed a larger longitudinal dispersivity in the flow field with fine blocks than that in the flow field with coarse blocks while a continuous decrease in transverse dispersivity was shown despite of the heterogeneity. Laboratory study was extended by a random walk particle tracking and spatio-temporal moments to reflect experimental conditions, demonstrating a good agreement between the experimental and numerical results. Numerical simulations also exhibited that the transverse dispersivity depends on the magnitude of the initial solute distribution.

Key Words: *solute dispersion, laboratory-scale experiment, heterogeneous porous media, random walk particle tracking, spatial and temporal moment approaches*

1. 緒論

帶水層内の溶質輸送現象を解明するにあたり、フィールドレベルでの実験は理想的な手段である。しかしながら、フィールド実験の実施には物理的・経済的に多くの困難を伴い、また、計測手段やデータの質・量に応じて、定量化される物理量の信頼性は様々である¹⁾。特に、場の物理的不均質性は溶質輸送に大きく寄与する因子であるものの、確度の高い場の推定は難しく、高い不確実性を有した状態で観測データを解釈することが常である²⁾。そこで、移流分散現象に関する有益な知見を得ることを目的として、ラボレベルの理想的な条件下において不均質場を移行する溶質輸送を研究する事例が増えている³⁾。また、非侵襲で溶質の空間分布を捉える画像解析技術を援用する例も増加しており⁴⁾⁵⁾、スケール効果を有する溶質分散に対して、ラボレベルの知見をフィールドに活かすことが期待されている。

井上ら⁵⁾は溶質の空間分布を収めた画像データを基に、画像処理と空間モーメント法による分散長の推定手法を提案しているが、不均質地盤への適用例は少ない。また、フィールドへ応用する場合、定点での濃度計測が主たる

観測データとなるため、画像データのような空間情報だけでなく、時間情報を活用する方法を見い出すことが望ましく、この点に関する検討も十分とは言えない。一般に、議論の対象となる実験条件には限りがあるため、数値解析による多角的な検討は一つの手段である⁶⁾が、実測データと数値モデルの連携、ならびに、実験事例や実測データの蓄積は溶質輸送現象の解明に不可欠である。このような背景から本研究では、単純化した不均質場を対象に溶質輸送実験を実施し、ランダムウォーク粒子追跡法を用いて井上ら⁵⁾の分散長推定方法の適用性を検討した。また、時間モーメント法により推定した縦分散長を数値解析の結果と比較するとともに、横分散長の推移に及ぼす溶質分布の初期条件の影響について検討した。

2. 溶質輸送実験

(1) 土質試料と溶質

不均質性を有する浸透場を形成するため、本実験では地盤構成材料として、均等係数が小さく、かつ、平均粒径の異なる3種類のケイ砂を準備した。平均粒径の最も大

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
K7	0.011	1.25	0.42	0.0334

きい試料をK3と称し、平均粒径の大きさを降順にして、K4、K7とする。表-1に各試料の物理特性を示す。試料K3とK7では、平均粒径と透水係数とともに約1オーダーの差異がある。また、本実験では、溶質輸送挙動を可視化するため、色素Brilliant Blue FCFを採用し、後述する空間モーメントの定量化におけるピクセル明度の抽出を考慮して、色素水溶液の初期濃度を0.4 mg/cm³に設定した。また、溶質の濃度計測のため、初期濃度を5.0 mg/cm³に調整したNaCl水溶液を色素水溶液に混合することで実験に供した。色素とNaClを混合した水溶液（以下、混合液と記す）を溶質輸送の対象とすることにより、溶質の空間分布変動の可視化、ならびに、浸透場内に設置した観測点での時系列濃度計測の両者を可能とした。

(2) 実験装置

高さ100 cm、長さ100 cm、奥行き3 cmの空間を製作するため、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た。本体の両側面に定水頭タンクを設置し、本体とタンクの連結部分に試料の流出を防ぐメッシュフィルタを断面全体に貼付した。また、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。さらに、背面の5箇所a～eに半径6 mmの孔を穿孔して溶質の注入孔とし、同じく背面に半径3 mmの孔を3箇所に設けてNaCl濃度の計測点N1～N3とした。各計測点には半径3 mmの電圧センサを挿入し、データロガを介してNaCl濃度を2秒間隔で測定した。便宜上、実験装置の上流端最下部を原点とし、実験装置の概略を図-1に示す。

(3) 実験方法と実験ケース

不均質浸透場を構成する主たる地盤材料には、対象試料の中で中程度の透水性を有する試料K4を選定し、土質試料を予め十分に飽和させた上で、水中落下法により5 cm層ごとの積み上げと突き固めを繰り返した。また、図-1(a)に示すように、領域内の8箇所に、試料K4と異なる試料を高さ5 cm、長さ10 cm、奥行き3 cmの範囲に充填した。透水係数分布に変化をつけることで、局所的に流向と流速が変化する単純化した不均質場を形成した。ブロック状に試料を充填する際には、試料K4とブロック試料の混合を防ぐため、ブロックを形成するスペースの両側に仕切り板を挿入した上で、試料K4とブロック試

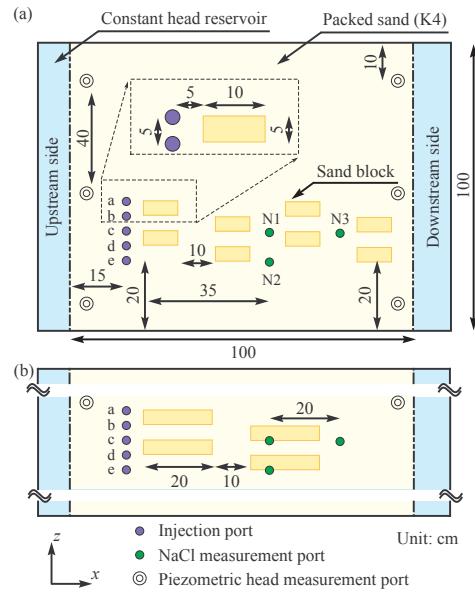


図-1 溶質輸送実験装置の概略：(a) 断面図（不均質ケース1）、(b) 断面図（不均質ケース2）

料を充填した。突き固めと並行して、ブロック試料、ならびに、隣接試料を乱さないように、仕切り板をゆっくりと引き抜いた。浸透場全体の間隙率を統一するため、試料に関わらず0.42の間隙率となるように密度を調整して試料を充填し、一つの浸透場を構成する地盤材料は、試料K4、ならびに、K4と異なるブロック試料の計2種類とした。図-1(a)に示すブロック試料の配置を不均質ケース1とし、ケース2として、図-1(b)に示すように、ブロック試料の占有体積は変えずに、ブロック配置を変更した場を設定した。以下の表記では、例えば、試料K3にてブロックを構成した場合には、K4-K3地盤のように記し、透水性の差異と分散長の関係を検討する目的で、K4-K3地盤とK4-K7地盤を各実験ケースの対象地盤とした。

所定の地盤を作成後、装置頂部をステンレス板にて密閉し、定水頭タンク内の水圧を調整することで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。対象場が定常流状態に達するまで定期的にピエゾ水頭を計測し、水頭の変動が終息した後に、図-1に示す注入孔a～eに、1つの孔あたり25 cm³の混合液をシリンジポンプから30秒でパルス注入した。実験時は照明のみを用い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混合液の移行過程を一定の時間間隔で撮影した。

(4) 空間モーメント法を応用した分散長推定

混合液を注入した時刻を実験開始時刻t = 0として、ケース2のK4-K7地盤中を移動する混合液の空間分布変化を図-2に示す。図は、120秒後と480秒後の状態を示しており、混合液の注入点とNaCl濃度観測点を併記している。不均質浸透場を移行する溶質挙動を基に、縦・横分散長の変動を推定する手段として、井上ら⁵⁾の手法を適用した。

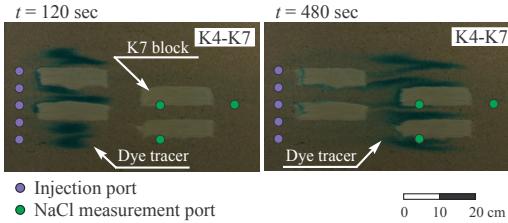


図-2 色素NaCl混合液の輸送挙動の例

混合液の挙動を捉えた画像データより抽出したピクセル明度を色素濃度に対応付け、色素分布の空間変動を基に空間モーメント量を算出した。

$$M_{ij}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H(x, z) I(x, z, t) x^i z^j dxdz \quad (1)$$

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、 $H(x, z)$ は1ピクセルの面積、 $I(x, z, t)$ はピクセル明度である。式(1)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。

$$X_G = M_{10}/M_{00}, \quad Z_G = M_{01}/M_{00} \quad (2)$$

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次モーメントを用いて、縦分散長と横分散長を次式にて推定した。

$$A_L(\xi_c) = \frac{\frac{M_{20}}{M_{00}} - X_G^2}{2\xi_c}, \quad A_T(\xi_c) = \frac{\frac{M_{02}}{M_{00}} - Z_G^2}{2\xi_c} \quad (3)$$

ここに、 A_L は縦分散長、 A_T は横分散長、 ξ_c は色素注入点 c から分布重心までの距離である。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、浸透場を作成する度に校正関係を求める。なお、分散長推定の詳細に関しては、井上ら⁵⁾を参照されたい。

(5) 時間モーメント法を応用した縦分散長推定

不均質ケース1のK4-K7地盤を代表として、図-1に示す3つの観測点にて計測したNaCl濃度の時間変動を図-3に示す。観測点N3については後述する数値解析の結果を併記する。得られた破過曲線から縦分散長を推定するため、 j 次標準化時間モーメントと j 次標準化中心時間モーメントを求めた⁶⁾。

$$\mu_j = \int_0^{\infty} t^j c(x, z, t) dt / \int_0^{\infty} c(x, z, t) dt \quad (4)$$

$$\mu'_j = \int_0^{\infty} (t - \mu_1)^j c(x, z, t) dt / \int_0^{\infty} c(x, z, t) dt \quad (5)$$

ここに、 μ_j は j 次標準化時間モーメント、 μ'_j は j 次標準化中心時間モーメント、 c はNaCl濃度である。

これらの時間モーメント量を観測点ごとに導出し、各観測点の縦分散長を次式で推定した⁶⁾。

$$A_L(\zeta_p) = \frac{\zeta_p}{2} \frac{\mu_2(\zeta_p)}{(\mu_1(\zeta_p))^2} \quad (6)$$

ここに、 ζ_p は溶質注入点 c から観測点までの距離である。観測点の濃度計測に時間モーメント法を応用する場合、

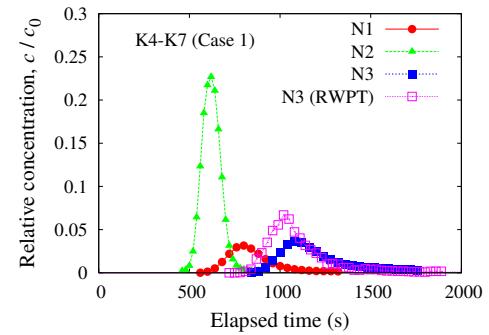


図-3 破過曲線の例

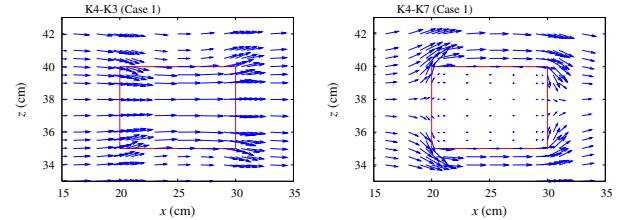


図-4 ケース1の不均質ブロック周辺の流速ベクトル

横分散長 A_T の推定は困難であり、常にゼロ濃度を示すような観測データに対しては時間モーメントを算定できないため、分散長は推定できない。

3. 数値解析による妥当性評価

(1) ランダムウォーク粒子追跡法と空間モーメント法

縦・横分散長の変化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）により溶質輸送を解析した。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、ブロック状の不均質性を成す浸透場の流速分布を導出した。

$$\nabla \cdot (K(\mathbf{x}) \nabla h) = 0 \quad (7)$$

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。また、 $x = 0$ 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、次式にて流速分布を求めた。

$$\mathbf{v} = -K(\mathbf{x}) \nabla h / n_p \quad (8)$$

ここに、 \mathbf{v} は実流速ベクトル、 n_p は間隙率である。図-4にケース1の不均質ブロック周辺の流速ベクトルを示す。

次に、次式に従って溶質輸送を解析した⁷⁾⁸⁾。

$$\mathbf{X}_p(t + \Delta t) = \mathbf{X}_p(t) + (\mathbf{v} + \nabla \cdot \mathbf{D}) \Delta t / R + \mathbf{B} \mathbf{E} \sqrt{\Delta t} \quad (9)$$

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{E} 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。

$$\mathbf{D} = \alpha_T |\mathbf{v}| \mathbf{I} + (\alpha_L - \alpha_T) v_i v_j / |\mathbf{v}| \quad (10)$$

ここに、 α_L はミクロ縦分散長、 α_T はミクロ横分散長、 v_i

は実流速成分, $|\mathbf{v}|$ は実流速ノルム, \mathbf{I} は単位マトリクス, \mathbf{B} は変位マトリクスである.

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \sqrt{2\alpha_L v_1^2 / (|\mathbf{v}|R)} & 0 \\ 0 & \sqrt{2\alpha_T v_1^2 / (|\mathbf{v}|R)} \end{pmatrix} \quad (11)$$

また, 空間モーメント量を次式にて算出した.

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

$$S_{ij}(t) = \frac{1}{m(t)} \sum_{k=1}^{NP_t} \frac{m_p^k X_{p,i}^k(t) X_{p,j}^k(t)}{R(X_p^k(t))} - X_{G,i}(t) X_{G,j}(t) \quad (13)$$

ここに, $X_{G,i}$ は粒子空間分布に対する重心位置, $m(t)$ は時刻 t に領域に存在する粒子総質量, 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した⁵⁾⁶⁾.

$$A_L = \frac{S_{11}(\xi_G(t))}{2\xi_G(t)}, \quad A_T = \frac{S_{22}(\xi_G(t))}{2\xi_G(t)} \quad (14)$$

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. 表-2にRWPTに用いたパラメータを記す. ミクロ分散長は同一の土質試料を用いた既往の研究⁵⁾を参考に定めた. また, 注入した混合液はパスカルの原理により球状に初期分布し, ガラス面に当たると $x-z$ 方向に拡がるため, 注入直後の画像を抽出して実験ごとに初期半径 r を設定した.

(2) ランダムウォーク粒子追跡法と時間モーメント法

時間モーメント法をRWPTに組み込むため, 観測点を通過する粒子群の時間的な質量変化を基に, n 次時間モーメント $M_{n,T}$ を次式から求めた⁶⁾⁷⁾.

$$M_{n,T} = \sum_{k=1}^{NP_s} m_p^k (t_p^k(\xi_1))^n / \sum_{k=1}^{NP_s} m_p^k \quad (15)$$

ここに, m_p^k は k 番目の粒子質量, ξ_1 は観測点の x 座標, NP_s は観測点を通過する粒子数, t_p^k は k 番目の粒子の観測点通過時間である. また, n 次中心時間モーメント $\Lambda_{n,T}$ を求めて, 縦分散長 A_L を推定した.

$$\Lambda_{n,T} = \sum_{r=0}^n {}_n C_r M_{n-r,T}(\xi_1) (-M_{1,T}(\xi_1))^r \quad (16)$$

$$A_L(\xi_P) = \frac{\xi_P}{2} \frac{\Lambda_{2,T}(\xi_P)}{(M_{1,T}(\xi_P))^2} \quad (17)$$

ここに, ξ_P は粒子初期位置から観測点までの距離である.

4. 結果と考察

(1) 空間モーメント法

不均質ケース1に対する2種類の地盤について, 縦分散長 A_L と横分散長 A_T の推定結果を図-5に示す. 横軸には溶質の重心位置の x 座標 X_G , 縦軸には分散長を設定し, 実験

表-2 ランダムウォーク粒子追跡解析に用いたパラメータ

間隙率 n_p (-)	0.42
ミクロ縦・横分散長 α_L, α_T (cm)	0.2, 0.02
遅延係数 R (-)	1
粒子数	2×10^5
時間ステップ Δt (s)	1.0
溶質分布の初期半径 r (cm)	2.5 ± 0.1

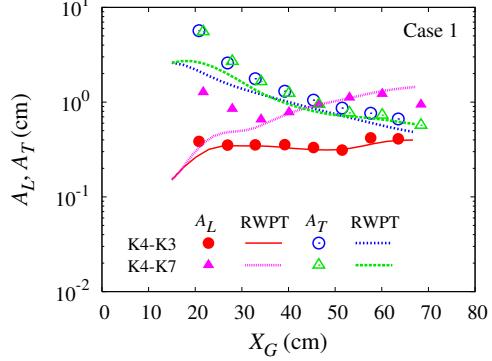


図-5 空間モーメント法による分散推定結果

結果とRWPTの結果をそれぞれ記号と線で併記している. 輸送距離の短い範囲ではパルス注入の影響が残るため, 推定結果と解析結果が乖離しているケースがあるものの, 全体的に, 推定結果はRWPTの結果と概ね一致しており, 本実験結果, ならびに, 空間モーメント法を用いた推定手法は一定の妥当性を有していると判断される.

縦分散長はK4-K3地盤よりもK4-K7地盤の方が大きい値で推移しており, 約2倍から約5倍の差異がある. これは, 試料K3よりも透水係数が1オーダー以上小さい試料K7に流入した溶質は試料K7内に長く滞留し, 溶質の空間分布は x 軸方向に徐々に拡張していくことが要因である. K4-K3地盤とK4-K7地盤において, 混合液を注入して480秒経過した時点の溶質分布を図-6に示す. 見易さのため, K3ブロックの位置を枠線で図中に示す. K4-K7地盤の上流側上段に配置されたK7ブロック内に溶質が流入し, K4-K3地盤の溶質分布よりも上下流方向へ伸びていることがわかる. すなわち, 浸透場を形成する試料の透水係数の差が縦分散長に影響を及ぼしていると言える. K7ブロックを迂回する溶質輸送過程は縦分散長の縮小に作用すると推量されるが, 迂回距離はブロック高さの半分程度であるため, 寄与は小さいと考えられる.

一方で, 図-5に示すように, 構成試料に関わらず, 横分散長の推移はほぼ同じである. 図-6の楕円に示すように, 低透水性に滞留する溶質が存在すると, 溶質分布は x 軸方向へ拡がるもの, z 軸方向にはあまり拡がらない. つまり, 透水性の異なるゾーンの有無に関わらず, 溶質分布の鉛直成分は大きく変化しないため, 横方向の分散は類似した推移になったと推察される.

本研究と同様に溶質をパルス注入した実験事例⁹⁾でも見られるように, 図-5では溶質移動に伴い横分散長は徐々

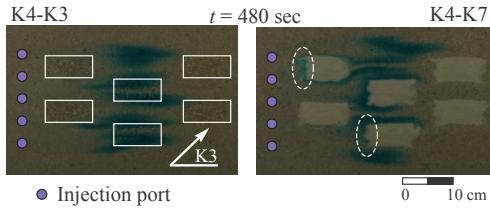


図-6 ケース1の色素分布の例.

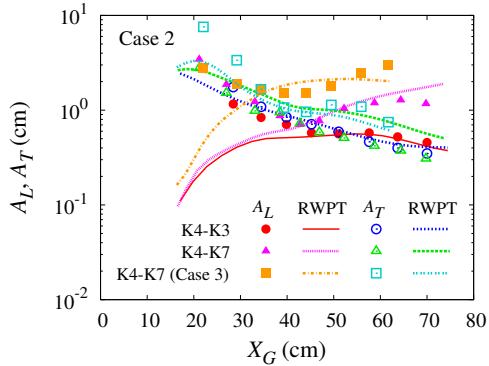


図-7 空間モーメント法による分散推定結果

に減少する傾向にある。これは5点から注入された初期の溶質分布は強制的に横（鉛直）方向に拡がっており、式(3)や式(14)に基づいて初期分布の横分散長を求める縦分散長より数十倍大きくなる。溶質移行とともに初期分布の重心から該当時刻の分布重心までの距離は増えていく一方で、横方向への溶質分散は大きく変化しないため、結果的に、横分散長は徐々に減少すると考えられる。

次に、不均質ケース2に対する2種類の地盤について、縦分散長 A_L と横分散長 A_T の推定結果を図-7に、RWPTの解析結果とともに示す。溶質の重心座標 X_G が40 cm付近までは縦分散長の実験値と解析値には差異が生じているものの、40 cm以降の推移は実験と解析ともに類似した値を示している。パルス注入後は本来の分散度合いよりも大きく溶質分布は拡がるため、移行距離の短い範囲において、画像解析を用いた推定手法は分散長を過大評価する傾向にある⁵⁾ことが差異の要因であり、移行距離の増加とともに注入時の影響は減少していく。

図-5と同様に、試料K7のブロックを有する地盤の縦分散長はK4-K3地盤よりも大きくなる。これは前述のように、低透水領域に溶質が流入すると、溶質が低透水領域を抜けるまでの間、溶質分布の最上流側と最下流側の距離が時間とともに拡大することが要因である。低透水領域の配置と分散長の関係を調べるため、 $x = 20 \sim 30 \text{ cm}$, $z = 20 \sim 40 \text{ cm}$ と $x = 40 \sim 50 \text{ cm}$, $z = 20 \sim 40 \text{ cm}$ に試料K7を配置した追加実験（ケース3）を実施した。実験による推定結果とRWPTの結果を図-7に併記する。上流側に低透水領域が集中すると縦分散長は増加しており、縦分散長は低透水領域の配置に依存することがわかる。

本実験の特徴として、横分散長へ与えるブロック試料の影響は小さい点が挙げられる。不均質ブロックを構成する領域全体にわたって溶質が移行する場合、鉛直方向に拡がる要因になるのは、間隙内の横分散（ミクロ分

散）とブロック試料周辺における流向・流速の変化（マクロ分散）である。図-4に示すように、ブロック試料の上下流側の端部における流速の z 成分は正と負の両方をもつたため、溶質分布の重心位置から溶質分布の鉛直方向（ z 方向）までの偏差は不均質の状態にあまり影響を受けないと推察される。よって、ミクロ分散現象は継続する一方で、横分散長の透水係数分布への依存性は小さい結果になったと考えられる。

(2) 時間モーメント法

時間モーメント法による推定結果を考察するため、NaCl観測点での濃度変化に基づき、時間モーメント法を適用して得られた縦分散長の結果を表-3に列記する。また比較のため、RWPTを用いて推定した縦分散長の結果についても併記する。差異の大きい観測点があるものの、いずれの浸透場に対しても、実験値と解析値は類似した値であり、縦分散長は概ね推定できていると判断される。

一方、ケース2のK4-K7地盤に関しては、他の浸透場よりも実験値と解析値の乖離が大きい。例えば、観測点N3の2次時間モーメントは、実験では15.9、解析では82.3 min²であり、両者の差異が推定結果に反映されている。時間モーメント法の利点は、溶質の全体分布は不明であっても点観測による部分情報に基づいて縦分散長を推定する点にあり、溶質の全体分布を基礎データとする空間モーメント法とは性質を異にしたフィールド調査向きの特性であるものの、溶質の通過時間が短い場合には過小に、滞留により溶質の通過時間が長い場合には縦分散長を過大に評価することにつながる。ケース2のK4-K7地盤では、試料K4とK7ブロックの境界部分に観測点N1とN2が設けられており、試料K4に観測点があるケース1のK4-K7地盤とは観測点周辺の透水係数分布が大きく異なる。透水性の変化部分では浸透水の流れ方向や大きさに加えて、溶質の分散状態が変化しやすい⁷⁾ため、実験場とRWPTにて状況再現した場合は乖離が生じやすいと考えられる。また、上流側の乖離の影響が下流側へ伝播することで、観測点N3において推定結果に相違が生じたと推察される。特に、RWPTではブロック試料をゆがみの無い幾何形状として扱っており、図-2や図-6にて観察されるように、K7ブロックの実際の充填状態とは差異がある。空間モーメント法は溶質分布全体の情報を利用するため、数値モデルと実現象の間に局所的な相違があったとしても、最終的な結果への影響は小さいと考えられる。一方で、時間モーメント法は空間モーメント法よりも局所的な相違に敏感であり、この性質が推定値の差異につながったと推量される。

(3) 溶質の初期形状の影響

ラボ実験やフィールド調査を鑑みると、溶質の初期分布はある程度の大きさを有していることが多い³⁾⁹⁾。溶質の初期形状と分散長の関係を評価するため、溶質分布の初期半径を2 cmと3 cmに設定し、加えて、理想的な点と

表-3 時間モーメント法によるNaCl計測点での縦分散長推定結果（単位:cm）

NaCl計測点	Case 1 (K4-K3)		Case 1 (K4-K7)		Case 2 (K4-K3)		Case 2 (K4-K7)		Case 3 (K4-K7)	
	実験	RWPT	実験	RWPT	実験	RWPT	実験	RWPT	実験	RWPT
N1	0.366	0.287	0.225	0.264	0.366	0.268	1.55	5.44	0.225	0.687
N2	0.171	0.322	0.833	0.872	0.545	0.462	0.920	4.06	0.833	0.418
N3	0.254	0.347	1.13	0.886	0.655	0.440	1.18	7.34	1.13	0.286

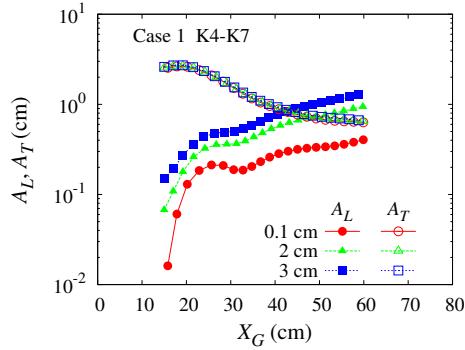


図-8 初期形状の差異に伴う分散長の変化

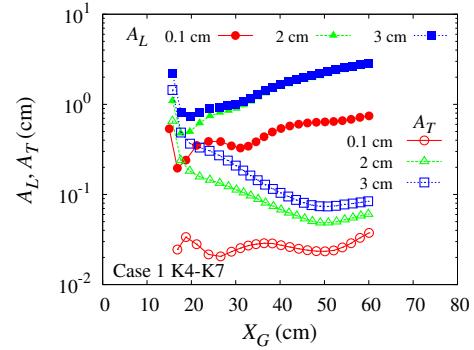


図-9 一点注入時の分散長の変化

して0.1 cmの3つのケースをRWPTにより数値実験した。

図-8に、不均質ケース1のK4-K7地盤に対する分散長の推移を示す。初期形状に応じて、低透水領域への溶質流入量は異なるため、初期形状が大きいほど縦分散長は大きくなる。一方で、不均質領域全体を溶質は通過するため、横分散長は初期形状に影響を受けないことがわかる。

そこで、注入点cのみを溶質注入点とした状況を想定して、同様に、RWPTにより数値実験した結果を図-9に示す。半径0.1 cmの場合、大部分の溶質は試料K4の領域のみを通過するが、大きい半径では試料K7への流入が生じるため、低透水域の配置に応じて、初期形状よりも溶質の鉛直方向への分布は大きくなり、重心位置からの偏差は拡大する。その結果、不均質領域全体よりも初期形状が拡がりのある状態では発現しなかった横分散長の初期形状への依存性が現れる。つまり、点源では、初期の溶質分布の規模に横分散長の推移は依存すると言える。

5. 結論

本研究では、浸透場の透水係数分布をブロック状に単純化した場を対象として、溶質輸送実験を実施した。色素分布と定点でのNaCl計測に基づき、それぞれ空間モーメント法と時間モーメント法により分散長の空間変動を推定した。実験場の状態をランダムウォーク粒子追跡法により再現した結果、実験による推定値と解析値は概ね一致した。また、ブロック試料の透水性が低い浸透場は高透水性の浸透場よりも大きい縦分散長になることが確認された。一方、横分散長はブロック試料の透水性にあまり依存せず、数値実験の結果、横分散長は溶質の初期配置や初期形状に依存して変化することがわかった。

参考文献

- 1) Gelhar L.W., Welty, C. and Rehfeldt, K.W.: A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers, *Water Resour. Res.*, 28(7), pp.1955–1974, 1992.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) Fernández-García, 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.
- 7) Uffink, G.J.M.: Analysis of dispersion by the random walk method, *Ph.D Dissertation, Delft University of Technology*, 150p., 1990.
- 8) Salamon, P., Fernández-García, D. and Gómez-Hernández, J.J.: Modeling mass transfer processes using random walk particle tracking, *Water Resour. Res.*, 42, W11417, 2006.
- 9) 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.595–600, 2010.

(2013.9.30受付)