



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

井上, 一哉

藤原, 隆之

田中, 勉

(Citation)

土木学会論文集A2（応用力学）, 69(2):I_9-I_18

(Issue Date)

2013

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

©2013 公益社団法人 土木学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90003321>



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

Intermediate-scale solute transport experiments for identifying solute dispersion parameters
in heterogeneous porous media using spatial and temporal moment approaches

井上一哉*・藤原隆之**・田中勉***
Kazuya INOUE, Takayuki FUJIWARA and Tsutomu TANAKA

*正会員 博(農) 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)
**学生会員 神戸大学大学院生 大学院農学研究科 (〒 657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)
***正会員 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)

Geological media exhibit heterogeneities in their hydraulic properties, which lead to enhanced spreading and mixing of the transported solutes. Intermediate-scale laboratory experiments on heterogeneous porous media were conducted in a $1 \times 1 \times 0.03$ m 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 the identification of the changes in longitudinal and transverse dispersivities caused by the presence of heterogeneities. Results indicated an increase tendency in longitudinal dispersivity with the increase of travel distance and heterogeneity, while a continuous decrease in transverse dispersivity attributed to the initial solute distribution despite of the heterogeneity. Results also revealed that dispersivity estimates from temporal moments were identical to or smaller than those from spatial moments and variation of the dispersivities showed no dependency on the seepage velocity. Moreover, identified values were in good agreement with reported studies regarding laboratory experiments in heterogeneous porous media.

Key Words : parameter identification, solute dispersion, intermediate-scale experiment, spatial and temporal moment approaches, heterogeneous porous media

1. 緒論

自然地盤は不均質性を有しており、地質に関わる物理的・化学的特性は、空間、あるいは、時間に依存して変化する¹⁾。そのため、不均質地盤内を移動する溶質の挙動と領域全体を平均的に捉えた均質地盤を移動する溶質の挙動は大きく異なる²⁾。溶質分布の空間・時間変動に最も影響する因子は透水係数の空間分布であり³⁾、透水係数の空間分布に応じて溶質の分散、すなわち、マクロ分散の度合いは顕著に変化する⁴⁾⁵⁾。また、不均質度のみならず、溶質の輸送距離に依存して、マクロ分散の程度は変化するため、換言すれば、マクロ分散現象はスケール依存性を有するため、帶水層中のマクロ分散現象を精緻に捉えることは極めて困難である³⁾。

マクロ分散現象に関する研究は理論的立場¹⁾²⁾から、あるいは、解析的立場⁶⁾⁷⁾から取り組まれており、フィールドのトレーサ試験結果からマクロ分散現象を評価する研究例もある⁸⁾⁹⁾。フィールドにおいて、数値解析的に溶質の長距離輸送を予測する場合には、モニタリング結果を再現できるように、マクロ分散の指標となる縦分散長と横分散長を同定することになる。しかしながら、空間的に変化する縦方向と横方向のマクロ分散長を時系列で同定できる簡便なパラメータ同定手法は

発展途上の段階にあり、数値解析的な観点からマクロ分散現象を評価する試み⁷⁾¹⁰⁾に比べると、実験ベースのアプローチは少ない。最近では、分散長は場の不均質性に依存して平均的に定まるパラメータではなく、溶質の輸送経路に依存して空間的に変化する概念も導入されており¹¹⁾、分散長は単なる入力物性ではなく、溶質輸送の履歴を反映できるパラメータと考えることもできる。

実験的観点から見ると、10 cm程度の1次元カラム実験について膨大な研究例¹²⁾¹³⁾がある一方で、対象とする空間次元や空間規模が増すにつれて研究例は減少する傾向にある。基本的に、1次元場では横方向の溶質分散は対象外となるため、溶質輸送距離の拡大、ならびに、マクロ分散現象の定量化を目的として、100 cm程度の2次元場を対象とした中規模実験が継続的に実施されている¹⁴⁾¹⁵⁾。また並行して、数値解析的観点からの研究事例も進められており¹⁶⁾、画像解析により溶質輸送パラメータを同定する研究例も増加傾向にあるものの、時系列で縦方向と横方向のマクロ分散長を同定する手法は希少である。井上ら¹⁷⁾は画像処理と空間モーメント法を応用したパラメータ同定手法を提案しているが、不均質浸透場のマクロ分散現象を対象とした事例は少ない。

これらの背景を踏まえて本研究では、不均質地盤を

表-1 土質試料の物理特性

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
K7	0.011	1.25	0.42	0.0334

対象として、中規模溶質輸送実験を実施し、井上ら¹⁷⁾¹⁸⁾の手法に基づいて、空間モーメント法により縦分散長と横分散長を時系列で同定し、不均質性とマクロ分散性の関係について同定結果を基に考察した。また、フィールドにおける濃度観測を視野に入れて、時間モーメント法により縦分散長を同定するとともに、空間モーメント法の結果と比較検討した。本研究は、中規模実験ではあるものの、マクロ分散現象の発現機構の解明やフィールドにおけるパラメータ同定への応用に向けて、有意義な課題と考えられる。

2. 中規模溶質輸送実験

2.1 実験試料

浸透場を形成する地盤材料として本実験では、均等係数が小さく、かつ、平均粒径の異なる4種類のケイ砂を使用した。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、K7とする。表-1に各試料の物理特性を示す。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。

本研究では、画像解析としての実績を有する青系水溶性色素のBrilliant Blue FCFを溶質として採用し、後述する画像処理における明度変化や水溶液の比重を考慮して、色素水溶液の初期濃度を0.4 mg/cm³に設定した。また、溶質の濃度計測を目的として、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を混合した水溶液を溶質輸送の対象とすることにより、物質移行過程における水溶液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。

2.2 実験装置

溶質輸送実験を実施するにあたり、図-1に示す高さ100 cm、長さ100 cm、奥行き3 cmの実験空間を製作

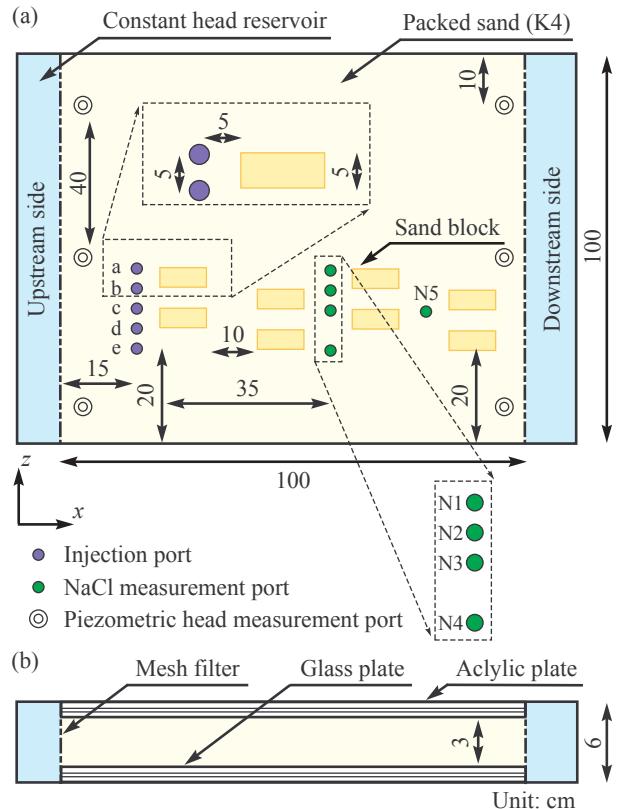


図-1 溶質輸送実験装置の概略：(a) 断面図、(b) 平面図

表-2 溶質注入点とNaCl計測点

注入点	座標(x,z)	NaCl計測点	座標(x,z)
a	(0, 10)	N1	(40, 10)
b	(0, 5)	N2	(40, 5)
c	(0, 0)	N3	(40, 0)
d	(0, -5)	N4	(40, -10)
e	(0, -10)	N5	(60, 0)

した。水平方向をx軸、鉛直方向をz軸に設定し、溶質の輸送挙動、ならびに、不均質浸透場を構成する地盤材料の分布状態を可視化できるように、実験装置本体の前面を厚さ1.5 cmのガラス板、背面を厚さ1.5 cmのアクリル板で構成した。実験装置本体の両側には、定水頭タンクを設置し、水頭調整とともに、浸透水の導入部と排水部とした。実験装置本体と定水頭タンクの連結部分には、地盤材料の流出を防ぐために、メッシュフィルターを断面全体にわたって貼付した。また、浸透場内にピエゾメータ孔を設け、ビニルチューブと連結することにより、ピエゾ水頭の計測と動水勾配の算出に用いた。さらに、溶質の注入孔として、実験装置内の5箇所a~eに直径1 cmの孔を設けてシリコンで閉栓し、溶液の注入時における初期分布に変化をつけることができるようにした。加えて、直径0.6 cmの孔

を5箇所に設けてNaCl濃度の計測点N1～N5とし、各地点に直径0.6cmの電圧センサを挿入してデータロガと連結することでNaCl濃度の時系列測定に供した。すべての電圧センサには予めキャリブレーションを施し、センサごとに電圧とNaCl濃度の関係を得た。表-2に溶質注入点とNaCl計測点の座標を示す。本研究では、便宜上、図-1に示す溶質注入点cを原点に定めた。

2.3 実験方法

本実験では飽和条件下にある不均質浸透場を作成するため、充填試料を予め十分に飽和させることで、空気の混入を防いだ。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、水中落下法により、5cm層ずつ充填した。充填過程では、間隙率が0.42になるように密度を管理し、1層積み上げるごとに締め固め棒を用いて突き固めた。また、図-1に示すように、領域内の8箇所に、試料K4と異なる試料をブロック状に配置することで、透水係数分布の異なる不均質浸透場を形成した。ブロックの大きさは高さ5cm、長さ10cm、奥行き3cmであり、ブロックを形成するスペースの両側に仕切り板を挿入することで、試料K4とブロック試料の混合を防いだ。つまりは、不均質性を与える層では、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、試料K4を充填しつつ、異なる試料をブロック状に充填した。充填対象となるブロックのある層を突き固める作業と並行して、ブロック試料、ならびに、ブロックと接する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。1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、実験対象空間の境界部分の影響を少なくするため、境界から離れた領域にて、不均質性を与える空間を形成した。

所定の地盤を作成後、実験装置上部を天板にて密閉し、実験装置両側に設置した定水頭タンクの水圧を調整することで浸透場に動水勾配を与え、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。定常状態を確認した後に、図-1に示す注入孔から、1つの孔あたり25cm³の色素NaCl混合水溶液をシリンドリポンプを用いてパルス注入した。

実験時は所定の照明のみを点灯させて光量を一定に保ち、実験装置から約100cm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時間間隔で撮影し、画像を取得した。また、電圧センサを稼動させて、データロガを介してNaCl濃度を2秒間隔で計測した。本研究では、実験状態を統一するた

表-3 中規模溶質輸送実験ケース

	注入点数	注入位置	総注入量(cm ³)
Case 1	1	c	25
Case 2	3	b,c,d	75
Case 3	5	a~e	125

均質地盤では、Case 1のみ実施。

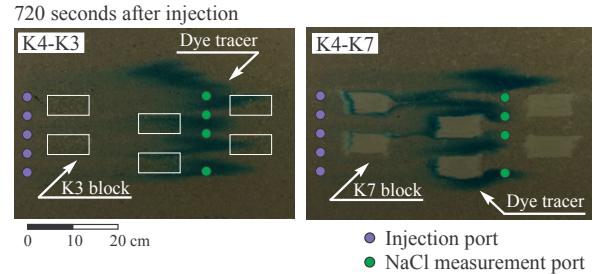


図-2 溶質分布の様子 (Case 3)

め、浸透場を構成する地盤試料の組み合わせに関わらず、実流速を0.042cm/sに調整し、パルス注入に要する時間を30秒に統一した。

2.4 実験ケース

本研究では、場の不均質性に応じた縦分散長と横分散長の同定に加えて、縦方向と横方向の溶質分散に及ぼす不均質度の影響を検討するため、主たる構成材料は試料K4に固定し、ブロック状に配置する試料の種類を変えた。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、地盤K4-K3のように記し、地盤K4-K3、K4-K5、K4-K7の3つの組み合わせを不均質地盤として、実験対象とした。また、比較のため、試料K4を単独で充填した均質地盤についても実験項目に加えた。

さらに、溶質の初期分布に応じた同定パラメータの精度、ならびに、分散特性の差異について検討するため、溶質の注入地点数を種々に設定した。各不均質地盤に対して、注入孔cのみを注入点とするケースをCase 1、3つの注入孔b～dから注入するケースをCase 2、すべての注入孔a～eから注入するケースをCase 3に設定した。前述のように、1つの孔につき、25cm³の色素NaCl混合水溶液をパルス注入した。表-3に実験ケースを列記する。

3. 縦分散長と横分散長の同定

3.1 色素分布と空間モーメント法

溶質輸送実験の様子について、K4-K3地盤とK4-K7地盤のCase 3を代表的に図-2に示す。図には、実験開始から720秒後の色素分布を示しており、K4-K3地盤

に関しては、試料 K3 をブロック状に充填している領域を白枠にて記している。本研究では、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、縦分散長と横分散長を同定するため、色素部分のピクセル情報を色素濃度情報へ変換¹⁷⁾した。まず、照明やカメラの位置など、実験環境と同一の条件下にて、既知の濃度を有する色素水溶液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。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。

ケイ砂を試料に用いた井上ら¹⁷⁾¹⁸⁾と同様の手法により、RGB 画像から赤成分のみを抽出した画像に変換することで、色相に関わるピクセル情報を限定し、校正データを作成した。ピクセル明度と色素濃度の関係は光源やカメラ位置に影響を受けるため、実験ケースごとに校正関係を求めた。

得られた校正曲線に基づいて、次式により空間モーメント量を算出した¹⁷⁾。

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

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

ここに、 M_{ij} は空間モーメント、 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、 $I(x, z, t)$ はピクセルの明度、 c は溶質濃度である。式 (2) 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。

$$x_G = \frac{M_{10}}{M_{00}}, \quad z_G = \frac{M_{01}}{M_{00}} \quad (3)$$

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²⁾¹⁸⁾。

$$A_L(\xi_c) = \frac{1}{2} \frac{\frac{M_{20}}{M_{00}} - x_G^2}{\xi_c} \quad (4)$$

$$A_T(\xi_c) = \frac{1}{2} \frac{\frac{M_{02}}{M_{00}} - z_G^2}{\xi_c} \quad (5)$$

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 から色素分布の重心までの距離である。

3.2 NaCl 濃度変動と時間モーメント法

観測点において計測された NaCl 濃度の時間変動を K4-K5 地盤の Case 3 を代表として、図-3 に示す。本研究では、計測された NaCl 濃度の経時変化に対して、時間モーメント量を算定することにより縦分散長を推定した。ある観測点において計測された破過曲線に対

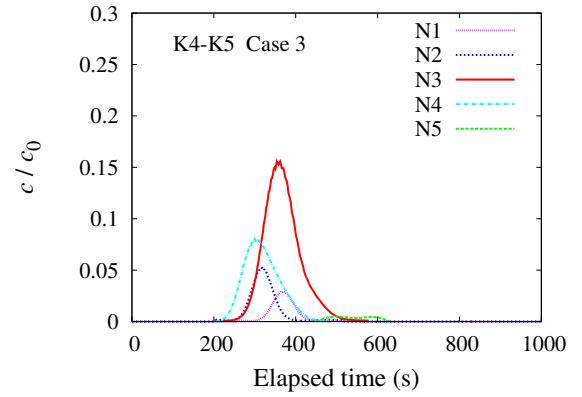


図-3 破過曲線の一例

する j 次標準化時間モーメントは次式にて表される⁷⁾。

$$\mu_j = \frac{\int_0^{\infty} t^j c_m(x, z, t) dt}{\int_0^{\infty} c_m(x, z, t) dt} \quad (6)$$

ここに、 μ_j は j 次標準化時間モーメント、 c_m は NaCl 濃度である。また、 j 次標準化中心時間モーメントは次式で定義される。

$$\mu'_j = \frac{\int_0^{\infty} (t - \mu_1)^j c_m(x, z, t) dt}{\int_0^{\infty} c_m(x, z, t) dt} \quad (7)$$

ここに、 μ'_j は j 次標準化中心時間モーメントである。

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⁷⁾⁹⁾。

$$A_L(\zeta_p) = \frac{\zeta_p}{2} \frac{\mu'_2(\zeta_p)}{(\mu_1(\zeta_p))^2} \quad (8)$$

ここに、 A_L は縦分散長、 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、横分散長 A_T の同定が困難になるデメリットを有している。また、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、縦分散長の同定はできない。これらが空間モーメント法による縦分散長と横分散長の同定と大きく異なる点であり、空間モーメント法の優位性を示唆している。

4. 結果と考察

4.1 空間モーメント法による縦分散長の同定結果

最も透水係数の大きい試料 K3 をブロック状に配置した K4-K3 地盤の Case 1 から Case 3 に対する縦分散長の同定結果を図-4 に示す。比較のため、K4 単独の均質地盤の結果をプラス記号にてプロットしており、横軸に示す移動距離は、空間モーメント法では色素分布の重心位置の変化、時間モーメント法では溶質注入点 c と観測点の距離を表す。また、空間モーメント法に基

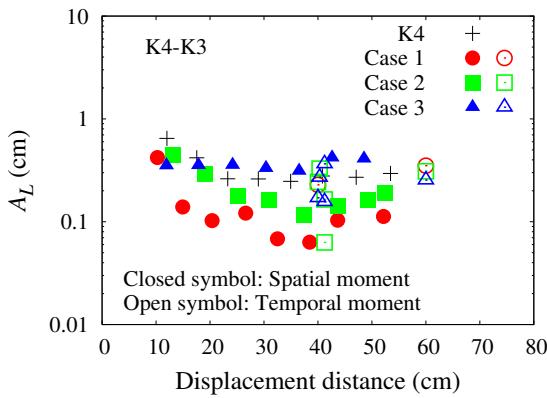


図-4 K4-K3 地盤における縦分散長の同定結果

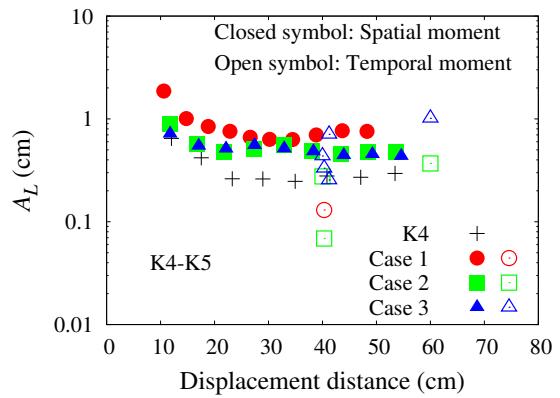


図-6 K4-K5 地盤における縦分散長の同定結果

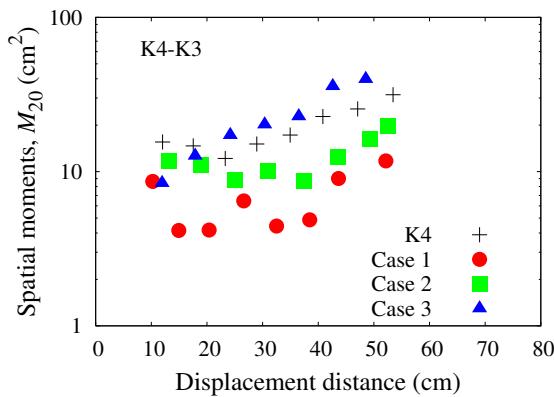


図-5 K4-K3 地盤における空間 2 次モーメントの変化

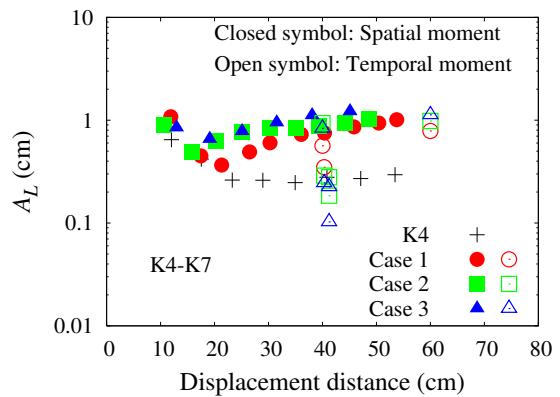


図-7 K4-K7 地盤における縦分散長の同定結果

づく式(4), 時間モーメント法に基づく式(8)により得られた結果を, それぞれ塗りつぶしと白抜き記号にて併記するが, 時間モーメント法による結果については後述する.

均質地盤では全体的に, 試料 K4 の平均粒径の約 3 倍で縦分散長は推移しており, 良好な同定結果¹⁹⁾である. また, 図-4 に示すように, 注入点数の最も多い Case 3 の同定結果は均質地盤の変化に類似していることがわかる. これは 5 箇所から同時注入する Case 3 では, 試料 K4 で占める間隙部分を移動する溶質の量が多くなるため, 試料 K3 の成すブロックの影響が平滑化されたと考えられる.

一方で, Case 1, および, Case 2 の推定結果は, 均質地盤の結果よりも小さく, 最大で 3 倍程度の差がある. 注入点 b から d の下流側 5 cm の地点から, 試料 K4 よりも透水係数の大きい試料 K3 のブロックが存在するため, ブロック内の流速は周辺部よりも高くなる. Uffink や Hoteit らは, 異なる流速域が隣接する場合, 分散による溶質輸送量は大きい流速域ほど高くなることを指摘している²⁰⁾²¹⁾. そのため, 均質地盤の状態と比べると, Case 1 と Case 2 では, 試料 K3 のブロック領域へ流入する溶質は多くなると考えられる. 改めて, Uffink や Hoteit らの理論を考えると, 流入時とは

逆に, 試料 K3 から試料 K4 へ流出する際には, 分散による移動性は低下するため, K3 ブロック内へ流入した溶質はブロック内の下流部に集中することになる. このとき, x 軸方向への溶質分布は小さくなるため, 縦分散長の低下につながると推察される. この点を確認するため, 図-5 に, 式(2)より得られる x 軸方向の空間 2 次モーメント M_{20} の変化を示す. Case 1, および, Case 2 の空間 2 次モーメントは減少後に上昇することがわかる. この点が試料 K4 と K3 の境界部分において溶質の分散性が影響を受けていることを示唆していると言える.

浸透場を主に形成する試料 K4 よりも透水性の低い試料 K5 をブロック状に配置した K4-K5 地盤における縦分散長の同定結果を図-6 に示す. 図-4 とは異なり, 均質地盤よりも大きい値で縦分散長は推移する. これは試料 K5 に流入する溶質の量は少ないものの, 試料 K5 の透水性が低いため, 溶質分布の最上流部分と最下流部分の距離が大きくなることで, 均質地盤よりも大きい縦分散長になると考えられる.

この点を明確にするため, 図-7 に, 最も透水性の低い試料 K7 を用いた K4-K7 地盤における縦分散長の同定結果を示す. 実験ケースに関わらず, 15 cm から 20 cm の移動距離以降は縦分散長は増加し, 一定値に漸近す

表-4 時間モーメント法と空間モーメント法による NaCl 計測点での縦分散長同定結果

NaCl 計測点	座標 (x, z)	K4-K3 地盤			K4-K5 地盤			K4-K7 地盤		
		Case 1	Case 2	Case 3	Case 1	Case 2	Case 3	Case 1	Case 2	Case 3
時間モーメント法										
N1	(40, 10)	0.	0.165	0.157	0.	0.	0.255	0.	0.184	0.103
N2	(40, 5)	0.	0.328	0.270	0.130	0.0687	0.331	0.349	0.289	0.246
N3	(40, 0)	0.228	0.244	0.171	0.	0.276	0.436	0.564	0.935	0.833
N4	(40, -10)	0.	0.063	0.366	0.	0.	0.708	0.	0.279	0.225
N5	(60, 0)	0.351	0.309	0.254	0.	0.369	1.01	0.786	0.983	1.13
空間モーメント法*										
	$x = 40$	0.0751	0.128	0.373	0.714	0.448	0.435	0.748	0.881	1.14
	$x = 60$	0.121	0.226	0.389	0.709	0.464	0.416	1.15	1.29	1.45

* 空間モーメント法の同定値は比較を目的とした参考値である。

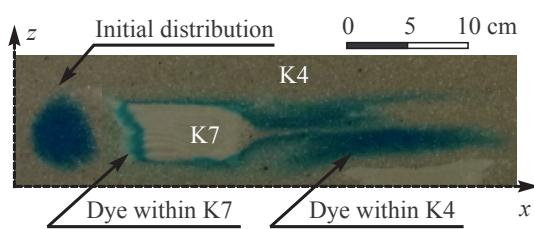


図-8 不均質ブロックへの溶質の流入 (K4-K7 地盤)

ることがわかる。試料 K7 は試料 K4 よりも約 1 オーダー低い透水係数であるため、前述のように、溶質の移動距離が大きくなるにつれて、溶質分布の最上流部と最下流部の拡がりが増すことで、縦分散長の上昇につながると言える。すなわち、短い輸送距離であっても、本実験場ではマクロ分散のスケール効果が発現していると言える。図-8 に、試料 K7 の内部を移動する溶質の様子を示す。図中の円状分布が溶質の初期形状であり、重心部分が K7 ブロックより下流側に移動した溶質分布とともに、画像合成して示している。溶質の一部が試料 K7 のブロックに流入しており、溶質分布は x 軸方向に伸びていることがわかる。したがって、透水性の差異の大きい不均質ブロックが存在する場合、ブロックの影響により、縦方向の分散性は高まると言える。

4.2 時間モーメント法の同定精度

図-4 と図-6、図-7 を包括的に見ると、NaCl 観測点にて時間モーメント法により同定した縦分散長の結果は、空間モーメント法の同定結果と同じ、または、小さくなる傾向にある。時間モーメント法による同定結果のみを考察するため、表-4 に、5箇所の NaCl 観測点において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列記する。また、観測点 N3 と N5 にて、

時間モーメント法と空間モーメント法の結果を比較するため、空間モーメント法による同定結果を併記する。

空間モーメント法の性質上、NaCl 観測点上に溶質の重心が重なる時刻を事前に把握することは困難であることから、 $x = 40$ cm にある観測点 N3 の近傍にて得られた 2 つの同定結果に基づいて、按分により観測点の位置に応じた縦分散長を算出した。例えば、K4-K3 地盤の Case 1 では、空間モーメント法により、 $x = 38.47$ cm と $x = 43.65$ cm の重心位置にて、それぞれ 0.06330 cm、0.1034 cm の縦分散長が同定されており、 $x = 40$ cm の地点にて按分することで、0.0751 cm の縦分散長を得た。観測点 N5 に対応する縦分散長に関しては、観測点の近傍にて得られた 2 つの同定結果を外挿して求めた。したがって、表-4 に示す空間モーメント法による縦分散長の同定結果は時間モーメント法との比較を目的とした値であり、実際の同定値ではなく、変動の小さい重心の z 座標については、考慮していない。

観測点にて計測される濃度は観測点を通過する溶質濃度の変化のみを捉えるため、実サイトでの濃度計測状況を反映しているものの、溶質の全体的な分布はわからない。したがって、点観測による同定は部分的な情報に基づく同定と考えられる。図-3 に示すように、溶質の通過量の多い観測点 N3 を除いては、観測点へ到達するピーク濃度は相対的に低く、継続して濃度観測できる時間は短くなる。この点は、式 (8) の分子を構成する中心時間モーメントの低下につながりやすく、結果として時間モーメント法は、溶質分布全体を利用する空間モーメント法よりも小さくパラメータを同定すると考えられる。特に、図-1 に示すように、観測点 N1 や N4 は他の観測点に比べると溶質の通過する割合が小さくなる地点に位置するため、注入点数の少ない Case 1 や Case 2 では他の観測点よりも小さい同定結果になるだけでなく、Case 1 のように、溶質の初期配置

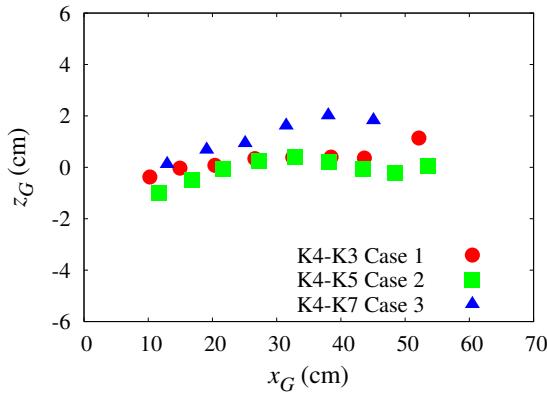


図-9 重心座標の推移の一例

によっては同定できない状況になる。

他方、観測点 N3 と N5 における時間モーメント法の同定結果は、空間モーメント法の結果と概ね一致しており、特に、Case 2 や Case 3 では適合性は良好である。いくつかの研究が指摘するように、局所的に不均質性の高い領域が存在しない限り、溶質分布の重心位置が通過する地点にて計測する濃度変化から同定される縦分散長の結果は空間モーメント法の結果に合う傾向がある⁷⁾。そこで、溶質分布の重心位置の変化を見るため、式(3)より導出した代表的な重心位置の変化を図-9 に示す。重心座標は概ね $z_G = 0$ の付近で推移しており、最大で約 +2 cm 程度の鉛直変位であることから、溶質分布の重心は観測点 N3 と N5 の近傍を通過しており、観測点 N3 と N5 における同定結果は、空間モーメント法の結果に類似したと考えられる。

4.3 横分散長の同定結果

前述のように、観測点の濃度変動に基づく時間モーメント法では、横分散長の同定が困難である。一般的な点計測に基づく分散推定とは大きく異なり、井上らの手法¹⁷⁾¹⁸⁾は時系列にて縦分散長と横分散長を同時に同定できる点に特徴がある。縦分散長の結果と同様に、空間モーメント法により得られた横分散長の同定結果を図-10 に示す。図には、均質地盤を含めたすべての実験ケースに対する結果をプロットしている。注入点数の多いケースほど、横分散長は大きくなり、溶質の移行とともに横分散長は減少する結果が得られている。本実験では、 $x = 0$ のライン上に注入点を増やしていることから、注入点が多いほど溶質の初期配置時点における重心からの z 方向への溶質分布は大きくなるため、 z 方向に最も広く初期分布している Case 3 の横分散長が最も大きくなる。

空間モーメントの観点から溶質輸送を考察するため、 z 方向の空間 2 次モーメントの変化を図-11 に示す。Case 1 を除いて、浸透場の不均質性に関わらず、溶質の注入位置や数が同じであるならば、空間 2 次モーメント M_{02} の値はほぼ一定で推移しており、 z 方向への

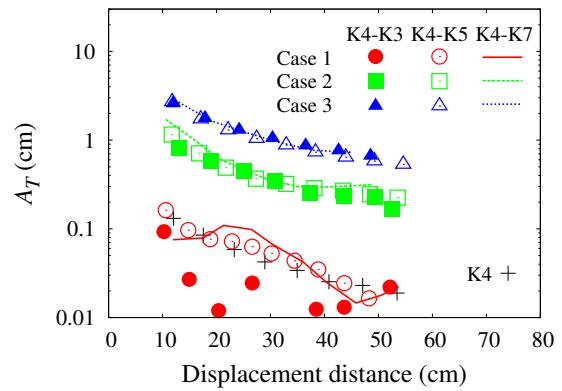


図-10 横分散長の同定結果

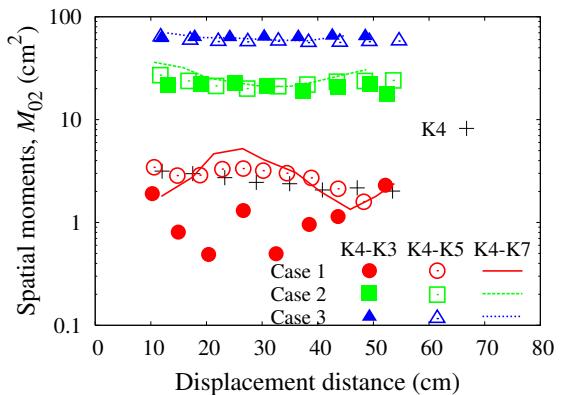


図-11 z 方向の空間 2 次モーメントの変化

拡がり度合いは場の不均質性にあまり依存しない結果になっている。空間 2 次モーメント M_{02} の変動は式(5)の分子に寄与する因子であり、不均質性の異なる実験ケースの空間 2 次モーメントがほぼ一致していることから、図-10 に示すように、横分散長は場の不均質性に依存しない結果を得たと考えられる。また、各 Case の空間 2 次モーメント M_{02} は溶質の輸送距離に依存しない点は、単位移動距離あたりの溶質分散量は減少することを意味するため、式(5)の右辺は溶質輸送距離の増加とともに減少することになる。したがって、図-10 に示すように、横分散長の値は溶質の移動距離が増すと減少する結果になる。これは本実験では z 方向の流速成分の変化は主にブロックの端部、特に、ブロックの上下流側の端部周辺に限定され、溶質分布の重心 z 座標は大きく変動しないことが要因と推察される。しかしながら、溶質の初期分布の小さい Case 1 については、注入した溶質の分布形状の変化はブロック試料の存在に大きく影響を受けて、溶質分布の存在割合は変動しやすいため、他の Case よりも横分散長の変動幅は大きくなつたと考えられる。

一般的に、横方向への流速成分の無い場における横分散長は浸透場を形成する土粒子の粒径や粒度分布に依存する¹⁹⁾。均質地盤であれば、縦分散長と同じく、

表-5 溶質輸送実験における縦分散長と横分散長の比較

縦分散長 (cm)	横分散長 * (cm)	平均移動距離 (cm)	出典
0.064 ~ 1.9	0.022 ~ 0.66	10.0 ~ 52.1	This study (空間モーメント法)
0.10 ~ 1.1	—	40 ~ 60	This study (時間モーメント法)
0.067 ~ 0.12	—	30 ~ 80	Oostrom et al. ²²⁾
2.76	—	100	Huang et al. ²³⁾
0.522 ~ 0.756	—	30.2	Maraqa et al. ²⁴⁾
—	0.0024 ~ 0.10	37.6 ~ 41.2	Seagren et al. ²⁵⁾
4.6	0.019	120 ~ 160	McNeil et al. ¹⁵⁾

* 各ケースの最大輸送距離に対する同定結果に限定する。

溶質の輸送距離に関わらず、ほぼ一定の横分散長となり、溶質の初期分布形状に応じて幾何的な制約を受けた横分散長の値を起点として、土粒子粒径に依存した横分散長の値まで溶質の輸送距離とともに減少すると考えられる⁹⁾。この点は、不均質地盤においても同様であるものの、透水係数の異なる領域を溶質が輸送する過程では、均質地盤とは異なり、非ゼロの横方向流速成分を有する領域が存在するため、流向変動の影響を受ける溶質量の割合に応じて横分散長の変化には差異が生じると推察される。本実験では、溶質注入量が最小である Case 1において流向変動の影響を受ける溶質量の割合が最も高くなる状態であるため、不均質度に応じて横分散長は最も大きい変動を示したと言える。注入点数の増加とともに、溶質全体として横方向の流速成分の変化を受ける割合は低下した結果、Case 2 と Case 3 の横分散長においては、不均質性に依存せず、初期分布形状にのみ依存する結果になったと考えられる。

以上のように、溶質注入時における初期分布の形状が横分散長の大きさに及ぼす影響は縦分散長の大きさに及ぼす影響に比べて大きく、井上ら¹⁰⁾が指摘するように、場の不均質性に特化した横分散を単独で定量化することは極めて難しい。この点は流れとともに溶質が混合する度合いの大きい縦分散現象とは対照的であるが、縦分散長と同様に、横分散長についても輸送距離が大きくなるに従って、ある一定値に漸近すると考えられ²⁾、本実験では、最大輸送距離の地点における横分散長を対象場の代表値と見なす。

4.4 既往の文献との比較

本実験において同定された縦・横分散長の妥当性を検討するため、本実験と実験スケールが類似しており、砂質系地盤材料にて溶質輸送実験を実施した研究例の結果を表-5に列記する。前述のように、横分散長については、最大輸送距離の時点における同定結果を示す。本実験の不均質地盤と同一の条件にて実施された溶質輸送実験は無いため、同定結果の取り得る範囲で比較すると、いずれの研究例においても縦分散長に関して

は 1 cm 程度であることから、縦分散長に関しては妥当な結果と考えられる。また、横分散長に関しては、列記した文献の値¹⁵⁾²⁵⁾に比べると少し大きく同定されている。本実験では、Case 3 のように、溶質の初期分布を z 軸方向に大きく設定したケースがあり、50 cm 程度の輸送距離では初期分布の影響と場の不均質性の影響が混在するため、点注入した他の研究例に比べると大きい横分散長になったと推測される。しかしながら、既往の研究結果と極端に異なる同定結果ではなく、また、横分散長と縦分散長の比を考慮して、本実験では良好な推定結果が得られていると判断される。

4.5 流速の影響

溶質分散に与える実流速の影響について検討するため、追加実験として K4-K5 地盤にて、0.042 cm/s の約 2 倍となる 0.081 cm/s の流速条件を対象として溶質輸送実験を実施した。実験ケース、ならびに、パラメータ同定はこれまでと同様の手順を踏んでおり、空間モーメント法にて同定した縦分散長と横分散長の同定結果をそれぞれ図-12 と図-13 に示す。縦分散長と横分散長とともに、流速依存性は見られず、Case ごとに固有の変化になっている。これは本実験に採用した色素水溶液の土粒子表面への吸着はかなり小さいことと、2 倍の流速増加では流路はあまり変化しないことが要因と考えられる。したがって、対象とした実験条件では、溶質の分散性に及ぼす流速の影響はかなり小さく、溶質の輸送経路に存在する透水係数の空間変動と溶質の初期分布によって分散性は変化すると言える。

5. 結論

本研究では、不均質地盤を対象とした中規模溶質輸送実験を実施し、画像処理と空間モーメント法を用いた縦分散長と横分散長の同定を試みた。また、観測点での時系列濃度変化に基づいて、時間モーメント法により縦分散長を同定した。さらには、不均質場を構成する土質試料を変えることで物理的不均質性とマクロ

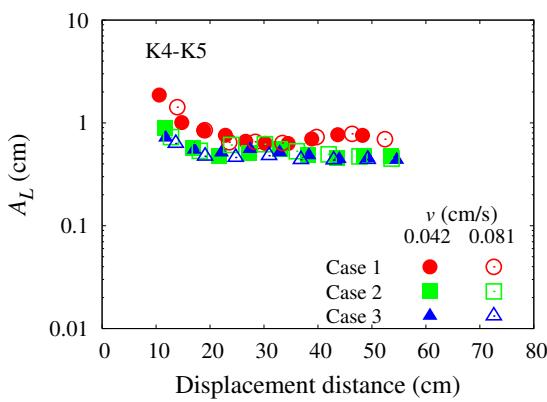


図-12 実流速の変化に伴う縦分散長の同定結果

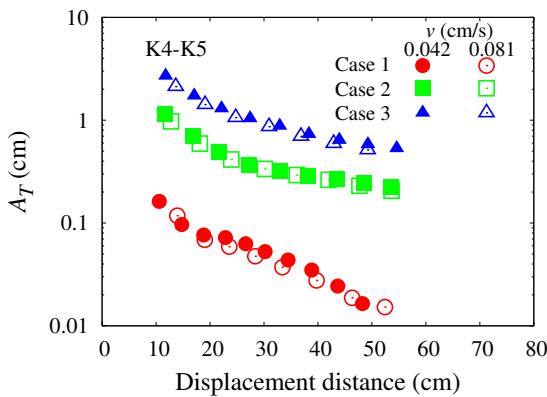


図-13 実流速の変化に伴う横分散長の同定結果

分散現象に与える影響を評価した。本研究にて得られた知見をまとめると以下のようになる。

1. 浸透場を構成する主たる地盤材料の透水性よりも高い透水係数を有する地盤材料にて不均質領域を形成すると、主たる地盤材料の縦分散長よりも小さい縦分散長となり、透水性の低い地盤材料にて不均質領域を形成すると、縦分散長は大きくなる結果を得た。
2. 透水係数の差異が小さい不均質場では、マクロ分散現象の発現は確認されなかった。一方で、透水係数の値が1オーダー異なる不均質場では、溶質の輸送距離に応じた透水係数の空間変動の影響を受けることにより、縦分散長は増加する傾向になり、マクロ分散のスケール依存性を観察することができた。
3. 時間モーメント法の同定結果は空間モーメント法よりも小さくなる傾向にあるものの、溶質分布の重心位置が通過する観測点では両手法の結果は概ね一致した。
4. 溶質の初期分布は横分散長の推移に大きく影響を及ぼし、浸透場の不均質性に関わらず、横分散長は溶質の初期分布形状に固有の変動を示す結果を得た。

5. 本実験により同定された値は類似した研究例と比較して良好な範囲にあり、対象とした実験条件下では、溶質分散の流速依存性は低いことがわかった。

謝辞： 本研究の一部は科学研究費補助金の助成を受けた。ここに記して深謝の意を表す。

参考文献

- 1) Gelhar, L.W. and Axness, C.L.: Three-dimensional stochastic analysis of macrodispersion in aquifers, *Water Resour. Res.*, 19(1), pp.161–180, 1983.
- 2) Dagan, G.: Solute transport in heterogeneous porous formations, *J. Fluid Mech.*, 145, pp.151–177, 1984.
- 3) 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.
- 4) Tompson, A.F.B.: Numerical simulation of chemical migration in physically and chemically heterogeneous porous media, *Water Resour. Res.*, 29(11), pp.3709–3726, 1993.
- 5) Alkindi, A., Al-Wahaibi, Y., Bijeljic, B. and Muggeridge, A.: Investigation of longitudinal and transverse dispersion in stable displacements with a high viscosity and density contrast between the fluids, *J. Contam. Hydrol.*, 120–121, pp.170–183, 2011.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 井上一哉・松永尚子・田中勉：ランダムウォーク粒子追跡法によるマクロ分散評価と流れ条件の影響、応用力学論文集、土木学会、12, pp.895–904, 2009.
- 10) 井上一哉・島田遙・田中勉：溶質のマクロ分散とトラベル時間に与える成層地盤のアップスケールの影響、土木学会論文集 A2 分冊 (応用力学), 67(2), pp.I-521–I-532, 2011.
- 11) De Barros, F.P.J. and Rubin, Y.: Modelling of block-scale macrodispersion as a random function, *J. Fluid Mech.*, 676, pp.514–545, 2011.
- 12) 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.
- 13) Vanderborght, J. and Vereecken, H.: Review of dispersivities for transport modeling in soils, *Vadose Zone J.*, 6, pp.29–52, 2007.
- 14) Sillman, 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.
- 15) 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.
- 16) Berkowitz, B., Scher, H. and Sillman, S.E.: Anomalous transport in laboratory-scale, heterogeneous porous media, *Water Resour. Res.*, 36(1), pp.149–157, 2000.
- 17) 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.

- 18) 井上一哉・鈴木克季・島田遙・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.
- 19) Bear, J.: *Dynamics of fluids in porous media*, Dover Publications, 764p., 1972.
- 20) Uffink, G.J.M.: Analysis of dispersion by the random walk method, *Ph.D. Dissertation, Delft University of Technology*, 150p., 1990.
- 21) 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.
- 22) Oostrom, M., Dane, J.H., Güven, O. and Hayworth, J.S.: Experimental investigation of dense solute plumes in an unconfined aquifer model, *Water Resour. Res.*, 28(9), pp.2315–2326, 1992.
- 23) Huang, K., Toride, N. and van Genuchten, M.Th.: Experimental investigation of solute transport in large, homogeneous and heterogeneous, saturated soil columns, *Transp. Porous Media*, 18, pp.283–302, 1995.
- 24) Maraqa, M.A., Wallace, R.B. and Voice, T.C.: Effects of degree of water saturation on dispersivity and immobile water in sandy soil columns, *J. Contam. Hydrol.*, 25, pp.199–218, 1997.
- 25) Seagren E.A., Rittmann, B.E. and Valocchi, A.J.: An experimental investigation of NAPL pool dissolution enhancement by flushing, *J. Contam. Hydrol.*, 37, pp.111–137, 1999.

(2013年3月18日受付)