# 分散長に及ぼす透水係数分布の影響と パラメータ推定手法の比較

# EFFECT OF SPATIAL DISTRIBUTION OF HYDRAULIC CONDUCTIVITY ON DISPERSIVITY AND COMPARISON OF PARAMETER ESTIMATION METHODS

# 井上一哉<sup>1</sup>・正木一平<sup>2</sup>・小林 晃<sup>3</sup>・田中 勉<sup>4</sup> Kazuya INOUE, Ippei MASAKI, Akira KOBAYASHI and Tsutomu TANAKA

<sup>1</sup>正会員 農博 神戸大学助手 農学部食料生産環境工学科(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)
 <sup>2</sup>学生会員 神戸大学大学院生 大学院自然科学研究科(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)
 <sup>3</sup>正会員 工博 京都大学助教授 大学院農学研究科(〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)
 <sup>4</sup>正会員 農博 神戸大学教授 農学部食料生産環境工学科(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

Laboratory tracer experiments were conducted to investigate solute transport in 100-cm long, horizontally placed transmissivity field under steady saturated water flow condition. Uniformly packed homogeneous and layered formations of sand having cross-sectional areas of  $50 \times 6$  cm<sup>2</sup> were used under various hydraulic gradient conditions. NaCl breakthrough curves in the flow fields were measured with salt sensors inserted along flow direction. Dispersivity and dispersion coefficient were estimated through genetic algorithm (GA) linked with an analytical solution of the advection-dispersion equation and were identified using image analysis based on obtained images of tracer movement. The results show that dispersivity estimated from image analysis is about one order smaller than that GA estimates and the ratio of transverse dispersivity to longitudinal dispersivity ranges from 0.15 to 0.8 in an experimental field. Additionally, estimation of dispersivity in layered media depends on transport pathway of contaminant, suggesting the importance of observation location in parameter estimation.

*Key Words :* solute transport experiment, homogeneous media, layered media, dispersivity, dispersion coefficient, parameter estimation, genetic algorithm, image analysis

# 1. はじめに

地下水中における汚染物質の物質移動特性を把握する ことは揚水処理や封じ込めなどの汚染対策の立案,環境 影響評価や健康リスク管理を適切に実施する上で不可欠 な要素である.地圏に放出された汚染物質は移流や分散 といった物理的作用により濃度を変化させながら汚染領 域を拡大していくため,分散長および分散係数の推定と それに関わる実験事例の蓄積は極めて重要である.また, 均質場と不均質場にて得られる分散長の値は異なる<sup>11</sup>こ とが推察されるため,透水係数分布の差異による移流分 散特性の変化を考察することは大変有意義と言える.

分散長や分散係数の推定には実験室レベル<sup>20</sup>あるいは フィールドレベル<sup>30,4)</sup>にて実験的検討がなされており, 多くの研究はNaClやKBrをトレーサとして用いた濃度の 測定データを基に移流分散方程式を介して<sup>50,6)</sup>パラメー タを同定している.また,研究事例の多くはカラム試験 による一次元的な現象を基に物質移動特性を捉えている ため、流下方向に沿った縦分散のみの評価となっており、 二次元場において横分散を考察対象とした実験事例は少 ないのが現状である.加えて、逆解析的な手法を駆使し てパラメータ推定に取り組むには濃度データの取得が必 要であるため、土壌コアの採取や計器の埋設等により多 少なりとも物質の移行状態を妨げることは避けられない 状況にある.そのような状況を払拭するため、色素ト レーサを用いて現象を可視化し、画像解析を通じて物質 移行特性を把握する研究例<sup>7,8</sup>が報告されている.

平面的に現象を捉えた実験例が少ない状況を鑑み,また実験事例の蓄積に貢献することを目的として,本研究では飽和・定常流下で平面二次元物質移動実験を実施する.均質地盤を対象に画像解析と遺伝的アルゴリズムを用いた逆解析により分散長と分散係数の推定を試み,両者の差異を検討する.また,不均質地盤を均質地盤の組み合わせと見なすと,その組み合わせを変化させることで不均質地盤の透水係数分布を表すことが可能となる.



図-1 実験装置の概略図. (a) 平面図 (b) a-a' 断面図

そこで、不均質地盤での移行挙動を捉える足がかりとして、透水性が異なる二層地盤を対象に物質移動パラメータへの影響について考察する.なお、本研究では流れ方向に2つの地盤が連続したものを二層地盤と呼ぶ.

# 2. 平面二次元物質移動実験

#### (1) 実験装置および試料

実験に用いるトレーサには色素の一種であるブリリア ントブルーFCF(青色1号)を $5.0 \times 10^3$  g/cm<sup>3</sup>の濃度に 調整した水溶液を使用し、トレーサの移行過程を可視化 する.また、トレーサ濃度を測定するため、NaCl濃度を  $5.0 \times 10^3$  g/cm<sup>3</sup> に調整することで実験に供する.

実験には図-1に示す長さ100cm,幅50cm,深さ6cmの 実験装置を用いる.実験装置の上流側と下流側にはタン クが設けられており,装置基盤はステンレス材で作成さ れている.これらをアクリル板で密閉することにより平 面二次元の流れ場を形成し,色素トレーサの移動状態を 視覚的に捉える.また,流れ方向に沿って4本の塩分セ ンサーをトレーサ注入口から15cm,35cm,55cm,75cmの 位置に設置することで,塩分濃度の測定が可能になって いる.間隙水圧測定のために装置基盤には20個のピエゾ メータ孔が取り付けられている.さらに、上流タンクへ 定水頭の給水装置を設置し、下流タンクには定水頭の排 水装置を連結させており、流量の測定と動水勾配の調整 を可能にしている.浸透場の形成には平均粒径の異なる ケイ砂を使用し、透水性の差異が移流分散挙動へ及ぼす 影響について検討する.各試料の物性値を表-1に示す.

#### (2) 実験方法

実験装置内へ予め飽和させた試料砂を水中落下させ, 試料砂を締め固めることで浸透場を作成する.均質地盤 の作成には浸透場全体で同一の試料砂を使用し,二層地 盤の形成時には上流側から50cmの位置を境に上流側と下 流側で試料砂を変えている.

地盤作成後,空気混入を防ぎながら装置を密閉し,給 水装置と排水装置の水位差を調整する.透水地盤内が定

表-1 試料砂の物性値

試料砂	土粒子 密度 $ ho_{ m s}~^{ m (g/cm^3)}$	50%粒径 D <sub>50</sub> (cm)	均等 係数 <i>U<sub>c</sub></i>	間隙 率 <i>n</i>	飽和 透水係数 <i>K<sub>s</sub></i> (cm/s)
А	2.68	0.085	1.80	0.41	0.751
В	2.66	0.050	1.25	0.41	0.268

常状態に到達したことを確認した後,注入装置を用いて 流れを乱さないように20cm<sup>3</sup>のトレーサを注入する.

トレーサの移動を装置上部に設置されたデジタルカメ ラによって一定の時間間隔で撮影し、得られた画像を画 像解析によって処理する.また、塩分センサーには予め キャリブレーションを施しており、所定の位置において 時系列での濃度計測を可能にしている.

実験では深さ方向へ均一にトレーサを注入しているため、鉛直方向に一定濃度であると考えられ、重力の効果は小さいものとする.加えて、トレーサと試料砂の生化学的な反応、アクリル板の間の物理的反応や密度流の影響は無視できるものとする.また、各浸透場に対して上下流の水位差を種々に変化させて実験しており、各ケースについて2回あるいは3回繰り返して実施している.

# 3. 分散長と分散係数の推定

#### (1) 画像解析によるパラメータ推定

色素トレーサの空間分布と移行に伴う形状変化を捉え た画像を分散係数と分散長の推定に用いる.分散係数と プルームの分散は次式(1)で表される.

$$D_l = \frac{1}{2} \frac{d\sigma_l^2}{dt} \tag{1}$$

ここに、 $\sigma^2$ はプルームの縦分散、 $D_l$ は分散係数、tは時間である.この関係式に基づき、次の手順によって分散係数が推定される.(1)  $t = t_1 \ge t = t_2$ におけるプルームの輪郭を画像処理により抽出し、プルームの重心 $G_1$   $\ge G_2$ が得られる.(2) x 方向に対するトレーサの実流速 $|V_x|$ が経過時間 $\Delta t (= t_2 - t_1) \ge G_1 \ge G_2$ の距離から得られる.(3) プルームの重心から輪郭への偏差ベクトル $\bar{\mathbf{d}}_n^{\mathbf{i}}(\bar{x}_n^{\mathbf{i}}, \bar{y}_n^{\mathbf{i}})$ が $\pi/180$  radごとに計360回計算される.ここで、上付き添え字は時間ステップ番号を表し、下付き添え字は1から360までのベクトル番号を表す.(4)  $\Delta t$  の間に移動するプルームの分散係数テンソル $D_y$  を次式によって計算する.

$$D_{ij} = \begin{pmatrix} D_{\overline{xx}} & D_{\overline{xy}} \\ D_{\overline{yx}} & D_{\overline{yy}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{n} \sum_{m=1}^{n} \frac{\overline{x}_{m}^{2}}{2\Delta t} & \frac{1}{n} \sum_{m=1}^{n} \frac{\overline{x}_{m} \overline{y}_{m}}{2\Delta t} \\ \frac{1}{n} \sum_{m=1}^{n} \frac{\overline{y}_{m} \overline{x}_{m}}{2\Delta t} & \frac{1}{n} \sum_{m=1}^{n} \frac{\overline{y}_{m}^{2}}{2\Delta t} \end{pmatrix}$$
(2)

さらに流れの主方向に回転させることによって縦および 横分散係数を得る.

$$\begin{pmatrix} D_{xx} & D_{xy} \\ D_{yx} & D_{yy} \end{pmatrix} = R D_{ij} R^T \quad R = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}$$
(3)

ここに、添え字T は転置行列を意味する.回転後の分散 係数テンソルのうち縦分散係数は $D_{xx}$ ,横分散係数は  $D_{yy}$ である.さらに分散長は分散係数をトレーサの移動 速度で除することで求められる.

$$\alpha_L = \frac{D_{xx}}{|V_x|}, \quad \alpha_T = \frac{D_{yy}}{|V_x|} \tag{4}$$

ここに、 $\alpha_L$ は縦分散長、 $\alpha_T$ は横分散長、 $|V_x|$ はトレー サの移動速度である.なお、画像解析の詳細は文献<sup>80</sup>を 参考にされたい.

### (2) 遺伝的アルゴリズムによるパラメータ推定

逆解析によるパラメータ推定の過程において必要となる順解析には、式(5)に示す移流分散方程式を式(8)から式(10)で示される初期条件と境界条件下で解くことによって得られる解析解(11)を用いる. なお、分散係数は分散長を用いて式(6)で表され、式(7)に示す変数変換により解析解は記述されている. この解析解は幅と高さを有するパッチ型汚染源から、一定濃度の汚染物質の漏洩が所定の時間継続する現象を表現することが可能であり、定常流を有する実験場を再現するのに十分適したモデルである.

$$R_{d}\frac{\partial c}{\partial t} = D_{x}\frac{\partial^{2} c}{\partial x^{2}} + D_{y}\frac{\partial^{2} c}{\partial y^{2}} + D_{z}\frac{\partial^{2} c}{\partial z^{2}} - v\frac{\partial c}{\partial x} - R_{d}\lambda c$$
(5)

$$D_x = \alpha_L v + D_d, \quad D_y = \alpha_{TH} v + D_d, \quad D_z = \alpha_{TV} v + D_d$$
(6)

$$v' = \frac{v}{R_d}, \quad D'_x = \frac{D_x}{R_d}, \quad D'_y = \frac{D_y}{R_d}, \quad D'_z = \frac{D_z}{R_d}$$
(7)  
$$c(x, y, z, 0) = 0$$
(8)

$$x(0,-y_0 \le y \le y_0, z_1 \le z \le z_2, t) = c_0(t)$$
(9)

$$c(\infty, y, z, t) = 0, \quad c(x, \pm \infty, t) = 0, \quad \frac{\partial c}{\partial z}(x, y, 0, t) = 0 \tag{10}$$

$$c = \frac{x}{4B\sqrt{\pi D'_x}} \int_0^t c_0(t-\xi) \frac{1}{\xi^2} \exp\left(-\lambda\xi - \frac{(x-v'\xi)^2}{4D'_x\xi}\right)$$
$$\times \left(\operatorname{erfc}\left(\frac{y-y_0}{2\sqrt{D'_y\xi}}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{y+y_0}{2\sqrt{D'_y\xi}}\right)\right) \left((z_2-z_1) + \frac{2B}{\pi} \sum_{n=1}^\infty \frac{1}{n} \times \left(\sin\left(\frac{n\pi z_2}{B}\right) - \sin\left(\frac{n\pi z_1}{B}\right)\right) \cos\left(\frac{n\pi z}{B}\right) \exp\left(-D'_z \frac{n^2 \pi^2}{B^2}\xi\right)\right) d\xi \quad (11)$$

ここに、*c* は物質濃度, *c*<sub>0</sub> は汚染源濃度, *x*,*y*,*z* は座標, *t* は時間, *v* は浸透流速, 2*y*<sub>0</sub> は*y* 軸方向の汚染源長さ, *z*<sub>1</sub>-*z*<sub>2</sub> は*z* 軸方向の汚染源長さ, *B* は帯水層厚さ, *a*<sub>L</sub> は縦分散長, *a*<sub>TH</sub> は水平方向横分散長, *a*<sub>TV</sub> は鉛直方向 横分散長, *D*<sub>*x*,*y*,*z*</sub> は分散係数, *D*<sub>*d*</sub> は有効拡散係数,  $\lambda$  は 崩壊定数, *R*<sub>*d*</sub> は遅延係数である. 実験状況を反映して 解析に用いる既知パラメータは, *z*<sub>1</sub>-*z*<sub>2</sub>=6 cm, *B*=6 cm, *D*<sub>*d*</sub> = 0 cm<sup>2</sup>/s,  $\lambda$  = 0, *R*<sub>*d*</sub> =1.0 とする. なお, 浸透流 速はダルシー流速を有効間隙率で除することで求められ るが, 真の有効間隙率を求めることは困難であることと 本実験地盤では砂を試料としているため, 間隙率と有効 間隙率は等しいと仮定して式(12)によって求める.

表-2 決定変数の定義域

決定変数	下限值	上限值	間隔	ビット
縦分散長の常用対数 $\log_{10} lpha_L$	-2.0	1.3	0.1	5
縦横分散長の比 $\alpha_T / \alpha_I$	0.05	0.8	0.05	4
漏洩時間	30.0	156.0	2.0	6
汚染源長さ $y_0$	2.5	4.0	0.5	2

$$v = \frac{q}{n} \tag{12}$$

ここに, q はダルシー流速, n は間隙率である.

画像解析を適用したパラメータ推定に加えて,本解析 では実験により得られた塩分濃度の破過曲線に基づいて, 遺伝的アルゴリズム(GA)により未知パラメータ(決定変 数)を逆推定する.GAは生物の進化において特徴的な選 択,交叉,突然変異を模した多点探索による最適化手法 であり,多数の決定変数を同時に扱うことが可能である ことや解空間が複雑な場合においても解の探査が可能で あることが利点として挙げられる.

GAに関わるパラメータ値には個体数を50,最終世代交 代数を50と設定する.また,選択にはトーナメント選択 を用いトーナメントサイズは2とする.交叉には一様交 叉を採用し,交叉率を0.85に設定し,突然変異の確率は 0.05とする.表-2には解析に用いる決定変数とそれらの 定義域を記す.本解析の主目的は分散長の推定であるが, トレーサの注入に要する時間と注入時の分布幅は実験ご とに多少ばらつくため,漏洩時間と汚染源幅を決定変数 に組み込んでおり,これらの推定結果は実測された値と ほぼ同等の値が得られている.

適合度の評価には推定された決定変数を用いて解析解 (11)により求めた値と、実験により得られた観測値との 残差二乗和を用いる.よって、本解析で採用する評価関 数Fは式(13)で表される.

$$F = \sum_{k=1}^{T} \sum_{m=1}^{N} \left( C_{obs}^{k}(t_{m}) - C_{com}^{k}(t_{m}) \right)^{2}$$
(13)

ここに、 $C_{obs}^{k}$ は観測点kにて得られた観測データ、 $C_{com}^{k}$ は観測点kにおける解析解の値、 $t_{m}$ は観測時間、Nは 各観測点での観測データ数、Tは観測点の数である.本 解析では $F < 10^{-4}$ あるいは50世代の世代交代のいずれか を満足した時点で解が収束したと判断している.

# 4. パラメータ推定結果

#### (1) 均質地盤におけるパラメータ推定

均質地盤を対象に、画像解析とGAにより分散長を推定 した結果を図-2に示す. 試料砂AではGAによる逆解析に て縦分散長は0.20cmから0.25cmの範囲で、横分散長は 0.03cmから0.13cmの範囲で推定されている.また、横分 散長に対する縦分散長の比( $\alpha_T/\alpha_L$ )は0.1から0.6となり、 平均値は0.45である.一方、画像解析による推定値は縦



分散長が2.3×10<sup>-2</sup>cm から3.2×10<sup>-2</sup>cm, 横分散長が3.1×10<sup>-3</sup>cmから4.8×10<sup>-3</sup> cmの範囲で求められ,  $\alpha_T/\alpha_L$ は約 0.15である.

次に、試料砂BではGAによる逆解析結果は縦分散長で 0.06cmから0.25cm、横分散長で0.01cmから0.10cmの推定 結果が得られており、 $\alpha_r/\alpha_L$ は0.2から0.8の値となり、 その平均値は試料砂Aと同じく0.45である.画像解析に よる推定では8.8×10<sup>-3</sup>cm から2.2×10<sup>-2</sup>cmの縦分散長と 2.6×10<sup>-3</sup>cm から2.2×10<sup>-2</sup>cmの横分散長が得られ、  $\alpha_r/\alpha_L$ は約0.2と推定されている.ガラスビーズを用い たMatsubayashiら<sup>60</sup>のトレーサ試験の結果では0.043cmか ら0.059cmの縦分散長を得ている.また、Huangら<sup>51</sup>によ る1200cmのカラムを用いた物質移動実験ではトレーサが 100cm移動した地点での縦分散長を0.092cmと推定してい る.さらに、Robbins<sup>90</sup>のカラム実験では3.9×10<sup>-4</sup> cmか ら1.3×10<sup>-2</sup> cmの横分散長を推定している.以上の実験 例より、本実験にて得られた分散長は妥当な範囲にある と言える.

一方で、画像解析による分散長の推定値は逆解析結果 より約1オーダー小さい値となり、*α<sub>r</sub>/α<sub>L</sub>*にもGA解析と の差異が見られる.解析手法による推定値の差異はプ ルームの輪郭として判断される色素濃度が塩分センサー で観測されるNaClの下限値濃度よりも大きいことが原因 であると推察される.加えて、トレーサの移行過程にお いて重力の影響を受けてわずかながら鉛直方向へ移動す ることにより、可視化領域にて画像として捉えられるプ ルームが本来の分布よりも小さく見積もられている可能





性があることも一因として考えられる.

図-3には均質地盤における分散係数の推定結果は示している.Matsubayashiら<sup>6</sup>は縦分散係数を1.5×10<sup>-3</sup> cm<sup>2</sup>/sから6.7×10<sup>-3</sup> cm<sup>2</sup>/sの範囲で得ている.また,本実験と同等の規模で実施されたRobbins<sup>90</sup>のカラム実験によると横分散係数は3.3×10<sup>-6</sup> cm<sup>2</sup>/sから1.2×10<sup>-4</sup> cm<sup>2</sup>/sの範囲となっており,既往の実験例と比較して本実験における分散係数の推定値も妥当な範囲にあると言える.また,各実験間で流速の差異は小さいので分散長の推定値と同様の特徴が見られ,GAと画像解析による推定値には1オーダーから2オーダーの差が見られる.

GAによる逆解析と画像解析によって得られたパラメー タ値の相違が破過曲線に与える影響を検討するため、試 料砂Aにおいて動水勾配が0.027の状況下で測定された濃 度値と両手法で推定されたパラメータを用いて再現した 破過曲線を図-4に示す. なお, 図中の縦軸はトレーサ注 入時の初期濃度で基準化した値となっている. GAによる 結果は実験結果とほぼ一致しており、逆解析結果の妥当 性を示しているが、画像解析の推定値を用いた破過曲線 はピーク濃度が高く裾の狭い形となっており、分散長の 小ささが反映された結果となっている. 同様の傾向はそ の他の実験ケースに関しても現れている.この結果から, GAにより得られる分散長の方が画像解析手法よりも信頼 性の高い結果を導くと言える. 一方, 試料砂Bにおいて 動水勾配が0.026の実験で得られた画像を図-5に示す. また、画像解析の過程で抽出された輪郭と推定値による シミュレーション結果のコンター図も合わせて示す. こ の図より、画像解析において初期濃度の約3%の濃度を プルームの輪郭として捉えていることが確認できる. ま た、画像解析による推定値を用いてシミュレーションす ることにより浸透場におけるプルームの挙動がよく再現 されている.画像解析では分散長を低く見積もる傾向に あるものの、実験地盤程度のスケールであればプルーム の挙動を概ね追随可能であると言える.また、カラム実 験では困難な横分散を捉えることができる点は強調すべ き事項である.



図-5 画像解析によって抽出されたプルーム輪郭とシミュレー ション結果の比較. (a) トレーサの移行画像 (b) 抽出さ れたプルームの輪郭 (c)シミュレーションにより得られ た濃度分布のコンター図



図-6 上流試料砂B,下流試料砂A,全体の動水勾配が0.051の 条件下にある逆解析結果.

表−3 二層地盤における逆解析結果										
試料砂	上流	下流	地盤	上流	下流	地盤	上流	下流	地盤	
	А	В	全体	А	В	全体	А	В	全体	
i	0.016	0.048	0.029	0.019	0.053	0.035	0.027	0.076	0.051	
v	0.032	0.031	0.031	0.038	0.038	0.038	0.053	0.052	0.053	
$\alpha_L$	0.251	0.159	0.126	0.200	0.126	0.126	0.251	0.079	0.159	
$\alpha_T$	0.138	0.071	0.069	0.110	0.069	0.069	0.025	0.039	0.048	
$\alpha_T / \alpha_L$	0.55	0.45	0.55	0.55	0.55	0.55	0.10	0.50	0.30	
$D_x$	8.0×10 <sup>-3</sup>	4.9 $\times 10^{-3}$	3.9 $\times 10^{-3}$	7. $6 \times 10^{-3}$	4.8 $\times 10^{-3}$	4.8 $\times 10^{-3}$	$1.3 \times 10^{-2}$	4.1 $\times$ 10 <sup>-3</sup>	8.4 $\times 10^{-3}$	
$D_y$	4. $4 \times 10^{-3}$	2.2 $\times 10^{-3}$	2. $1 \times 10^{-3}$	4.2 $\times 10^{-3}$	2.6 $\times 10^{-3}$	2.6 $\times 10^{-3}$	$1.3 \times 10^{-3}$	2.0 $\times 10^{-3}$	2.5 $\times 10^{-3}$	
~ 느냐이 가지	-									
きかなしてい	上流	下流	地盤	上流	下流	地盤	上流	下流	地盤	
試料砂	上流 B	下流 A	地盤 全体	上流 B	下流 A	地盤 全体	上流 B	下流 A	地盤 全体	
試料砂 i	上流 B 0.044	下流 A 0.016	地盤 全体 0.028	上流 B 0.052	下流 A 0.019	地盤 全体 0.036	上流 B 0. 073	下流 A 0.029	地盤 全体 0.051	
試料砂 i v	上流 B 0.044 0.031	下流 A 0.016 0.031	地盤 全体 0.028 0.031	上流 B 0.052 0.041	下流 A 0.019 0.041	地盤 全体 0.036 0.041	上流 B 0.073 0.056	下流 A 0.029 0.057	地盤 全体 0.051 0.057	
試料砂 $i$ v $\alpha_L$	上流 B 0.044 0.031 0.079	下流 A 0.016 0.031 0.100	地盤 全体 0.028 0.031 0.200	上流 B 0.052 0.041 0.100	下流 A 0.019 0.041 0.063	地盤 全体 0.036 0.041 0.063	上流 B 0.073 0.056 0.063	下流 A 0.029 0.057 0.126	地盤 全体 0.051 0.057 0.079	
試料砂 $i$ v $\alpha_L$ $\alpha_T$	上流 B 0.044 0.031 0.079 0.064	下流 <u>A</u> 0.016 0.031 0.100 0.040	地盤 全体 0.028 0.031 0.200 0.120	上流 B 0. 052 0. 041 0. 100 0. 050	下流 A 0.019 0.041 0.063 0.009	地盤 全体 0.036 0.041 0.063 0.022	上流 B 0.073 0.056 0.063 0.013	下流 A 0.029 0.057 0.126 0.063	地盤 全体 0.051 0.057 0.079 0.032	
試料 ゆ $     i     v     \alpha_L     \alpha_T     \alpha_T / \alpha_L $	上流 B 0.044 0.031 0.079 0.064 0.80	下流 A 0.016 0.031 0.100 0.040 0.40	地盤 全体 0.028 0.031 0.200 0.120 0.60	上流 B 0.052 0.041 0.100 0.050 0.50	下流 A 0.019 0.041 0.063 0.009 0.15	地盤 全体 0.036 0.041 0.063 0.022 0.35	上流 B 0.073 0.056 0.063 0.013 0.20	下流 A 0.029 0.057 0.126 0.063 0.50	地盤 全体 0.051 0.057 0.079 0.032 0.40	
	上流 B 0.044 0.031 0.079 0.064 0.80 2.4×10 <sup>-3</sup>	下流 A 0.016 0.031 0.100 0.040 0.40 3.1×10 <sup>-3</sup>	地盤 全体 0.028 0.031 0.200 0.120 0.60 6.2×10 <sup>-3</sup>	上流 B 0. 052 0. 041 0. 100 0. 050 0. 50 4. 1×10 <sup>-3</sup>	下流 A 0.019 0.041 0.063 0.009 0.15 2.6×10 <sup>-3</sup>	地盤 全体 0.036 0.041 0.063 0.022 0.35 2.6×10 <sup>-3</sup>	上流 B 0.073 0.056 0.063 0.013 0.20 3.5×10 <sup>-2</sup>	下流 A 0.029 0.057 0.126 0.063 0.50 7.2×10 <sup>-3</sup>	地盤 全体 0.051 0.057 0.079 0.032 0.40 4.5×10 <sup>-3</sup>	

### (2) 二層地盤におけるパラメータ推定

二層地盤を対象にパラメータ推定を実施し、均質地盤 との比較と二層上流側の層が下流側の層に与える影響を 検討する.二層地盤の実験では塩分センサーを各層に2 本ずつ設置しており、逆解析では片方の層で得られた観 測データを使用するケースと両方の層の測定値を使用す るケースを実施する.いずれのケースにおいても得られ る値は浸透場の分散長を表すことになる. しかしながら, 測定地点に応じて推定結果が異なることが予想されるた め,不均質地盤における分散長を均質場と等価なパラ メータとして扱った場合の差異を検討することが考察の 背景にある. 図-6に上流が試料砂B, 下流が試料砂Aの浸 透場において全体の動水勾配が0.051の条件下で両方の 層で得られた測定値に基づく逆解析結果を示す.

最下流地点ではピーク濃度に開きがあるものの, 観測 値と解析値は全体的に良好な一致を見せており、両層の データを用いたGA解析では浸透場全体の等価パラメータ として適切な分散長を推定していると言える.

次に、各層あるいは両方の層のデータを用いて逆推定 した結果を表-3に列記する.表には動水勾配i,浸透流 速v (cm/s), 縦分散長 $\alpha_L$  (cm), 横分散長 $\alpha_T$  (cm), 横分 散長に対する縦分散長の比 *a<sub>T</sub> / a<sub>L</sub>*,縦分散係数 *D<sub>x</sub>* (cm<sup>2</sup>/s), 横分散係数 D<sub>1</sub> (cm<sup>2</sup>/s)の結果を示す. 縦分散 長では地盤全体の推定値が上流層と下流層の推定値の間 を取る傾向が見られる.また、本実験場は間隙率が等し いことから層による浸透流速の違いは生じないため、縦 分散係数に関しても縦分散長と同様の傾向が現れている. 一方, 横分散長については地盤全体の推定値と上流層,



図-7 均質地盤と二層地盤下流側における分散長の比較

下流層の推定値に明白な関係は見られないが,縦分散長 に対する横分散長の比は地盤全体の値が上流層と下流層 の間の値を取る.よって,二層地盤における分散長の等 価パラメータは各層単独で推定された分散長の範囲で存 在する傾向にあると言える.

さらに、下流層で観測されるプルームは上流層での物 質移行を経ているため、下流層単独のパラメータ推定結 果と均質地盤で得られた推定結果には差異が生じること が予測される. 図-7に各試料砂における分散長の推定値 を示す. 図中の2nd layerは対象の試料砂が二層地盤の 下流側の層を形成する時の推定値を表し、Homoは対象の 試料砂で均質地盤を形成する時の値である. 試料砂Aで は均質地盤の分散長が二層地盤下流側の分散長よりも大 きく、反対に試料砂Bでは均質地盤の分散長が二層地盤 の分散長よりも小さい傾向が見られる. これは二層地盤 下流側における分散長の値は上流層の地盤特性に影響さ れている結果である.均質地盤では試料砂Aの分散長は 試料砂Bに比べて大きい傾向がある. そのため, 試料砂A が下流側地盤を成すときは上流側の試料砂Bの影響によ り分散長が小さく推定され、試料砂Bが下流側の場合は 上流側の試料砂Aに影響されて分散長が大きく示される と考えられる. すなわち, 物質移行過程において地盤特 性の異なる層を通過する物質濃度を分散長推定に供する 場合、観測地点の地盤における分散長ではなく、移流分 散経路を経た地盤特性も反映した推定値になると言える.

# 5. 結論

本研究では均質地盤と流れ方向に2つの地盤が連続し た二層地盤を対象として飽和・定常流下で平面二次元物 質移動実験を実施し,画像解析と遺伝的アルゴリズム (GA)を用いた逆解析により分散長と分散係数を推定した. また,二層地盤がパラメータ推定値に及ぼす影響につい て検討した.以下に本研究で得られた知見をまとめる.

1. 画像解析手法は非破壊で物質移動特性を把握できる という点で有用性の高い手法であり,推定されたパ ラメータを用いてプルームの挙動を概ね再現できる.

- 2. 画像解析による分散長の推定値はGAの値よりも1 オーダー程度小さい.また,横分散長と縦分散長の 比は画像解析で約0.15から0.2,逆解析で約0.45で ある.解析手法により推定値に差異が見られるが, 既往の研究例と比較して妥当な値が得られている.
- 3. GAによる推定結果は各観測地点における濃度変化を よく再現しており、縦分散のみならず横分散の推定 に有効な手法である.
- 4. 二層地盤全体の分散長と分散係数の等価パラメータ は各層ごとに得られる推定値の範囲にある.
- 5. 二層地盤の下流側層に対する分散長の推定値は上流 側層の影響を受けて変化するため、観測点と移行経 路を踏まえたパラメータ推定が望まれる.

謝辞:本研究は文部科学省科学研究補助金(課題番号 16780169)の補助を受けて実施されたものである.記し て深謝の意を表する.

#### 参考文献

- Bouhroum, A. and Bai, M.: Experimental and numerical simulation of solute transport in heterogeneous porous media, *Int. J. Num. Ana. Meth. Geomechanics*, Vol.20, pp.155-171, 1996.
- De Smedt, F. and Wierenga, P.J.: Solute transfer through columns of glass beads, *Water Resour. Res.*, Vol.20(2), pp.1628-1637, 1988.
- Moltyaner, G.L. and Killey, R.W.D.: Twin lake tracer tests: Longitudinal dispersion, *Water Resour. Res.*, Vol.24(10), pp.1613-1627, 1988.
- Moltyaner, G.L. and Killey, R.W.D.: Twin lake tracer tests: Transverse dispersion, *Water Resour. Res.*, Vol.24(10), pp.1628-1637, 1988.
- Huang, K., Toride, N. and van Genuchten, M.Th.: Experimental investigation of solute transport in large, homogeneous and heterogenesous, saturated soil columns, *Transport in Porous Media*, Vol.18, pp.283-302, 1995.
- Matsubayashi, U., Devkota, L.P. and Takagi, F. : Characteristics of the dispersion coefficient in miscible displacement through a glass beads medium, *J. Hyd.*, Vol.192, pp.51-64, 1997.
- Schincariol, R.A. and Schwartz, F.W.: An experimental investigation of variable density flow and mixing in homogeneous and heterogeneous media, *Water Resour. Res.*, Vol.26(10), pp.2317-2329, 1990.
- Inoue, K., Kobayashi, A., Inoue, K. and Aoyama, S. : Examination of dispersion coefficients in two-dimensional saturated and unsaturated porous media, *Transaction of JSIDRE*, Vol.71(3), pp.33-35, 2003.
- Robbins, G. A. : Methods for determining transverse dispersion coefficients of porous media in laboratory column experiments, *Water Resour. Res.*, Vol.25(6), pp.1249-1258, 1989.