

空間濃度分布と空間モーメント解析による 分散長推定

DISPERSIVITY ESTIMATION USING SPATIAL CONCENTRATION DISTRIBUTION AND SPATIAL MOMENT ANALYSIS

井上一哉¹・正木一平²・小林晃³・田中勉⁴

Kazuya INOUE, Ippei MASAKI, Akira KOBAYASHI and Tsutomu TANAKA

¹正会員 博士(農学) 神戸大学助手 農学部食料生産環境工学科 (〒657-5801 神戸市灘区六甲台町1-1)

²学生会員 神戸大学大学院生 大学院自然科学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

³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)

⁴正会員 農博 神戸大学教授 農学部食料生産環境工学科 (〒657-5801 神戸市灘区六甲台町1-1)

Laboratory tracer experiments are implemented in homogeneous flow field under saturated steady flow condition with a pulse source. Application of dye tracer with Brilliant Blue FCF is allowed to visualize solute behavior and to obtain the images of plume evolution. Through an image processing, spatial concentration distributions of dye tracer with 0.125, 0.250 and 0.500 of initial concentration as well as plume outlines are extracted to ensure the further development of parameter identification. Based on these image data, an image analysis with plume outline and a spatial moment analysis linked with extracted concentration distributions are applied to the estimation of longitudinal and transverse dispersivities. Results show that spatial moment analysis provides an adequate estimate of dispersivities as compared to the image analysis, indicating the improvement of estimation accuracy. Whereas estimates using spatial moment analysis depend on the number of spatial concentration contours, spatial moment analysis represents a potentially useful alternative for estimating longitudinal and transverse dispersivities.

Key Words : *dye tracer experiment, homogeneous porous media, spatial concentration distribution, dispersivity, image analysis, spatial moment analysis*

1. はじめに

地盤環境汚染に対する汚染浄化や封じ込め、環境影響評価、土地マネジメントおよび健康リスク管理などを適切に実施する上で、汚染物質の挙動を把握することは不可欠な要素である。帯水層に混入した汚染物質は移流や分散といった地下水中の物理的作用を受けて濃度を変化させながら汚染領域を拡大していくため、縦および横分散は汚染物質の空間分布に関与する本質的な現象であり、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。

実験室レベルにおける分散長や分散係数推定の代表的な研究事例としてはカラム試験があり、いくつかの観測点においてトレーサ濃度の破過曲線を得ることでパラメータを同定している例^{1),2)}が多い。しかしながら、実際の汚染サイトでは観測点数の制約により十分な破過曲

線を得ることが困難な場合があることから、汚染物質の空間濃度分布データに着目し、空間モーメントにより現象を解析する研究例^{3),4)}が報告されている。一方、濃度データを取得するためには土壌コアの採取や計器の埋設等が必要であるため、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。こうした状況に対し、色素トレーサを用いて現象を可視化し、画像データを用いて物質移行特性を把握する研究例がいくつか報告されている^{5),6)}。画像データは観測点数の制約がなく空間的な情報量が多いため、解析対象データとして有用であると言える。井上ら⁵⁾は色素トレーサの輪郭形状の時間的变化を捉えた画像を使用することで分散長を推定しているが、トレーサ濃度の空間分布は明らかにされていない。また、他手法と比較して画像解析により推定される分散長は過小評価されることが示唆されており、分散長の推定精度の向上が求められる。

そこで、本研究では飽和・定常流下での二次元物質移

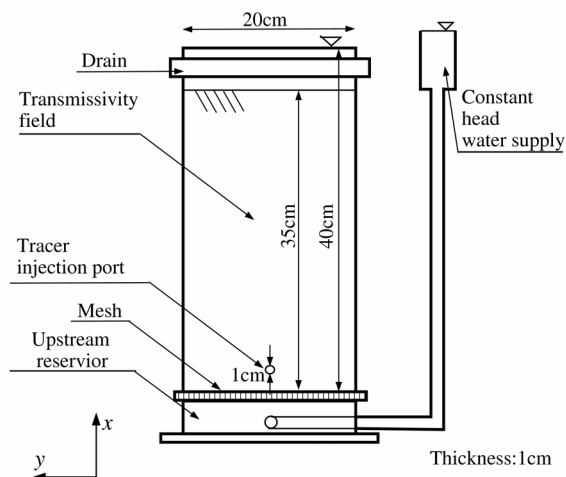


図-1 物質移動実験装置概略図

動実験を実施し、トレーサの移流分散挙動を表す画像データに基づく高精度の分散長推定を目的とする。得られた画像を解析することでトレーサ濃度の空間分布を抽出し、空間モーメント解析へ組み込むことにより、既往の画像解析手法⁵⁾より優れた分散長推定が達成されることを示す。

2. 二次元物質移動実験

(1) 実験試料および装置

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を $0.1 \times 10^{-3} \text{g/cm}^3$ の濃度に調整した比重1.0001の水溶液を使用し、トレーサの移行過程を可視化する。試料砂には平均粒径0.050cm、土粒子密度2.66、均等係数1.25のケイ砂を用いる。本実験では間隙率の違いによる移流分散挙動の差異を検討するため、試料充填時に締め固め強さを調整することで間隙率が0.42と0.47の地盤を作成し、それぞれ地盤A、地盤Bとする。

浸透場は図-1に示す高さ40cm、幅20cm、厚さ1cmの亚克力製装置内に作成する。実験装置の下部には貯留タンクが設けられており、動水勾配を調節する給水装置が連結されている。また、実験装置上部には流量測定のための排水口が設置されており、装置下部から上部へ向かう流れ場の作成が可能となる。さらに、トレーサ注入口が装置背面に設けられており、注射針を挿入するためのゴム栓をする。実験室内は所定のライトのみを点灯することで光量を一定にし、実験装置とカメラ、ライトの位置を一定に保つことでピクセル画像の色彩に対応するトレーサ濃度の判定精度を上げる。

(2) 実験方法

飽和条件下にある浸透場を形成するため、予め飽和させた試料砂を装置に水中落下させることで実験地盤を作

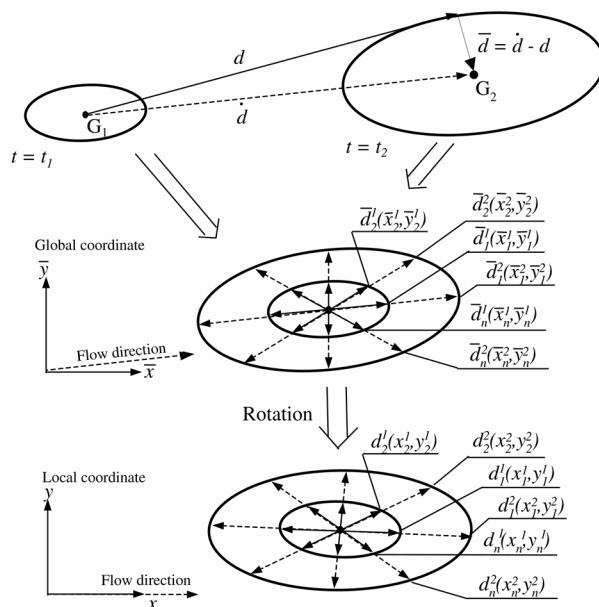


図-2 輪郭抽出による分散係数推定方法

成する。間隙率を調整するため、地盤の高さが2.5cm増すごとに突き固め棒を用いて所定の回数締め固め、浸透路長が35cmの実験地盤を作成する。

地盤作成後、動水勾配を調節した給水装置から水を供給し、地盤内に飽和流れを形成する。流量の計測により定常流状態にあることを確認した後、注入口より注射器を用いて奥行き方向の中心部に 5.0cm^3 のトレーサを一気に注入し、奥行き方向に均一なトレーサ分布を形成する。実験中は装置前面に設置されたデジタルカメラにより、トレーサの挙動を一定の時間間隔で撮影する。本実験では各浸透場に対して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回繰り返して実験している。

実験では装置前面と背面から見られるトレーサ形状が同一であることを確認しており、水平方向に一定濃度であると考えられる。また、微生物などの作用によるトレーサの分解や亚克力板とトレーサの物理的反応および密度流や重力の影響は無視できるものとする。

3. 分散長推定方法

(1) プルーム輪郭抽出に基づく画像解析

色素トレーサの分布範囲と移行に伴う形状変化を捉えることで分散係数と分散長の推定に応用する。分散係数とプルームの分散との関係は次式(1)で表される⁷⁾。

$$D_l = \frac{1}{2} \frac{d\sigma_l^2}{dt} \quad (1)$$

ここに、 σ_l^2 はプルームの縦分散、 D_l は分散係数、 t は時間である。この関係式を応用することにより以下の手

順によって分散係数が推定される⁵⁾。(1)トレーサ注入前と注入後の画像の比較により、色彩に変化のあるピクセルを1、変化のないピクセルを0とする二値表現に変換することでブルームを判別し、ブルーム輪郭を構成するピクセルを抽出する。(2) $t = t_1$ と $t = t_2$ におけるブルームの重心 G_1 と G_2 を輪郭形状より求める。本解析にて t_1 はトレーサ注入後、数分経過した時刻に固定し、 t_2 を様々な時刻に変化させている。(3) x 方向に対するトレーサの移動速度 $|V_x|$ を経過時間 Δt と G_1 と G_2 の距離から得る。(4) 図-2に示すように、 t_1 と t_2 のブルーム重心を重ね合わせたときの重心から輪郭へのベクトルの差 $\bar{d}_n^i(\bar{x}_n^i, \bar{y}_n^i)$ を n 方向に対して算定する。本解析では $n=360$ として1度ごとにブルームの移動量を求めており、上付き添字は時間ステップ番号であり、下付き添字は重心周りの角度の番号である。(5) Δt の間に移動するブルームの分散係数テンソル D_{ij} を次式によって計算する。

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

続いて、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。

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

ここに、添字 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。

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

ここに、 α_L は縦分散長、 α_T は横分散長、 $|V_x|$ はトレーサの移動速度である。井上ら⁵⁾はこの方法により分散長を推定しているが、現象の再現性は不十分であることを指摘しており、以下の方法により推定精度の向上を図る。

(2) トレーサ濃度の空間分布把握

トレーサ内部の濃度変動を把握するため、既知濃度を有するトレーサのサンプル画像と比較して同等の色彩を有するピクセルを判定することによりトレーサ内部の濃度分布を捉える。サンプル画像は実験時と同条件下にある実験地盤に種々の既知濃度を有するトレーサを注入し、その画像を撮影することで取得する。

本研究ではサンプル画像の濃度を初期濃度の0.500、0.250、0.125の3段階に設定する。サンプル画像のブルーム内においてもピクセルごとに明度の相違が見られるため、濃度判定の対象となる色域にはある程度の幅をもたせる必要がある。その結果、濃度判定の段階を細かくすると濃度が重複するピクセルが出てくるため、明確に識別できる上記の3段階をサンプル画像の濃度とする。既往の画像解析⁵⁾では初期濃度の0.125倍よりも低い濃度

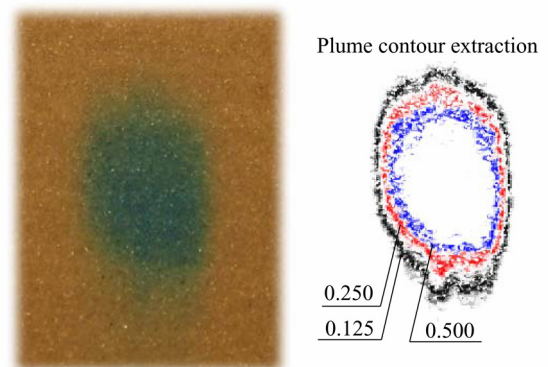


図-3 ブルームの濃度分布コンタ

を輪郭として捉えているが、信頼性のある濃度判定は現段階では困難であることから今後の課題の1つとし、種々のサンプル濃度について吟味した結果、濃度判定の下限値として初期濃度の0.125倍に設定する。図-3には実験で得られたブルーム画像から上記の方法により各濃度を抽出した結果を示す。各濃度ともはつきりと識別されたコンタが描かれていることがわかる。抽出された各濃度分布を空間モーメント解析に組み込むことで、精度の高い分散長推定を可能にする。

(3) 空間モーメント解析

所定の時刻における濃度の空間分布を評価する1つの方法として、空間モーメント量が挙げられる。二次元場における ij 番目の濃度分布の空間モーメントは次のように定義される³⁾。

$$M_{ij}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} C(x, y, t) x^i y^j dx dy \quad (5)$$

ここに、 $C(x, y, t)$ は濃度、 x, y は座標、 t は時刻である。パルス注入された反応性のないトレーサに関して、0次モーメント M_{00} はトレーサの溶質量と等しく、時間に関係なく一定である。0次モーメント M_{00} で正規化された原点についての1次モーメントとトレーサ重心の間には次の関係が成り立つ。

$$x_c = \frac{M_{10}}{M_{00}}, \quad y_c = \frac{M_{01}}{M_{00}} \quad (6)$$

ここに、 (x_c, y_c) はトレーサ重心の座標である。

トレーサ重心についての2次モーメントは空間における共分散テンソルと定義され、以下の式で表される³⁾。

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\sigma_{xx} = \frac{M_{20}}{M_{00}} - x_c^2, \quad \sigma_{yy} = \frac{M_{02}}{M_{00}} - y_c^2,$$

$$\sigma_{xy} = \sigma_{yx} = \frac{M_{11}}{M_{00}} - x_c y_c$$

共分散テンソルの各要素はトレーサ重心からの濃度分散を表している。

本解析では3段階のトレーサ濃度により形成されるブルーームの 픽セル画像が得られていることから、ある時刻における空間モーメントを以下の手順で求める。(1) トレーサ初期濃度の0.125, 0.250, 0.500倍の濃度を示すブルーームコンタを抽出する。(2) コンタ外郭で形成される面積を n 方向に対して求める。さらに、対応する外郭座標との関係より、0次、1次および2次の空間モーメントを離散的に次式で求める。

$$M_{00} = \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n C^k A_l^k \quad (8)$$

$$M_{10} = \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n C^k A_l^k x_l^k, \quad M_{01} = \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n C^k A_l^k y_l^k \quad (9)$$

$$M_{20} = \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n C^k A_l^k (x_l^k)^2, \quad M_{02} = \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n C^k A_l^k (y_l^k)^2 \quad (10)$$

ここに、上付き添字と下付き添字はそれぞれコンタ番号とブルーームの重心周りの角度の番号を表す。本解析では $m=3$ であり、 C^1, C^2, C^3 はそれぞれ0.125, 0.250, 0.500となる。また、 $n=360$ であり、 A_l^k は該当する濃度と角度で区切られた範囲の面積、 (x_l^k, y_l^k) はその境界座標を示す。

均質地盤における飽和・定常流下でトレーサ注入がパルス型であり、物質移動現象が移流分散モデルに基づくと仮定すると縦および横分散係数は共分散テンソルの要素を用いて次のように表される。

$$D_{xx} = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \sigma_{xx}, \quad D_{yy} = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \sigma_{yy} \quad (11)$$

ここに、 D_{xx} は縦分散係数、 D_{yy} は横分散係数である。さらに、縦・横分散長は式(4)と同様に、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。

4. 結果と考察

(1) 輪郭抽出による画像解析における輪郭濃度の影響

前述のように、既往の画像解析において抽出されるブルーームの輪郭は濃度に関して明確な定義がなされていない⁵⁾。そこで、画像の二値化に基づいた輪郭抽出による画像解析結果と初期濃度の0.125倍の濃度コンタを輪郭と仮定した画像解析結果を比較することで、輪郭抽出による画像解析における輪郭濃度の設定が分散長推定に及ぼす影響について考察する。

種々の浸透場にて実験を行い、ブルーーム輪郭と0.125の濃度コンタを輪郭として推定した分散長と移動距離との関係を図-4に示す。縦・横分散長ともブルーームの移動速度および移動距離と分散長の間には明確な関係は見られない。また、ブルーーム輪郭に基づく縦分散長と横分散長の平均値は、地盤Aでは $1.99 \times 10^{-2} \text{cm}$ と $3.94 \times 10^{-3} \text{cm}$ 、地盤Bでは $3.20 \times 10^{-2} \text{cm}$ と $3.03 \times 10^{-3} \text{cm}$ である。一方、0.125の濃度コンタを輪郭とした場合の縦分散長と横分

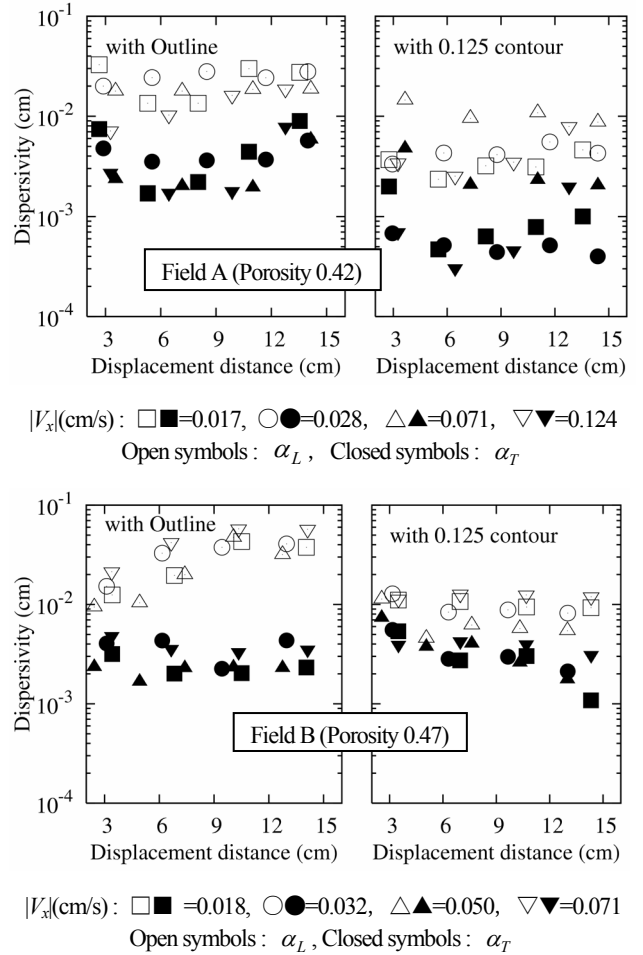


図-4 輪郭抽出による画像解析による分散長推定結果。左：ブルーーム輪郭に基づく結果。右：0.125の濃度コンタに基づく結果。

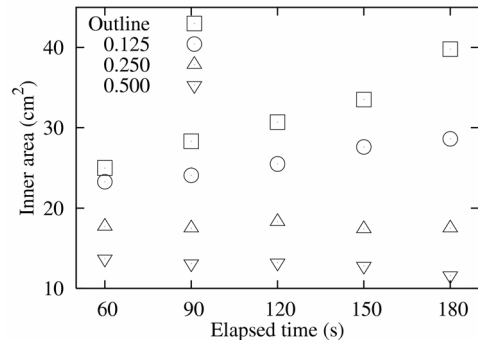
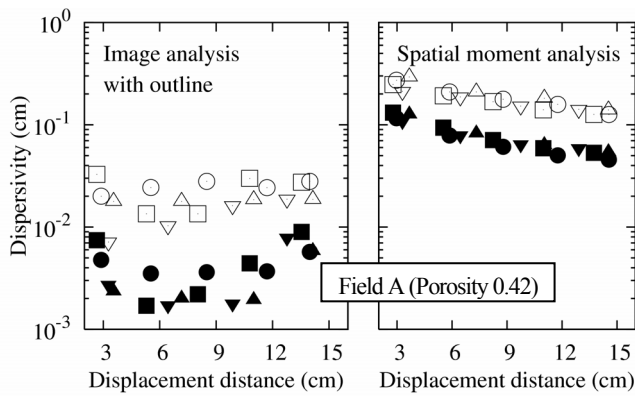
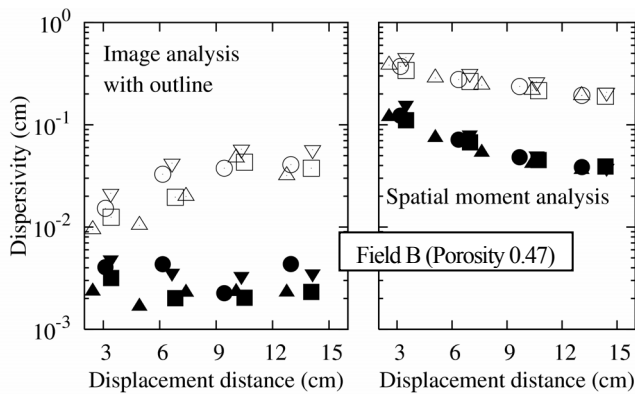


図-5 地盤A、トレーサの移動速度0.124cm/sにおけるブルーーム輪郭および濃度コンタ内部の面積

散長の平均値は、地盤Aでは $5.73 \times 10^{-3} \text{cm}$ と $1.28 \times 10^{-3} \text{cm}$ 、地盤Bでは $9.62 \times 10^{-3} \text{cm}$ と $3.53 \times 10^{-3} \text{cm}$ である。すなわち、地盤Aにおける縦分散長と横分散長および地盤Bの縦分散長に関しては、既定の濃度コンタを追跡した推定結果がブルーーム輪郭を捉えた結果、つまりは既往の画像解析結果よりも小さく得られている。これは、0.125の濃度コンタの時間的変化がブルーーム輪郭の時間変動と比較して小さいことが要因である。この点を確認するため、地盤



$|V_x|(\text{cm/s})$: $\square \blacksquare=0.017$, $\circ \bullet=0.028$, $\triangle \blacktriangle=0.071$, $\nabla \blacktriangledown=0.124$
Open symbols: α_L , Closed symbols: α_T



$|V_x|(\text{cm/s})$: $\square \blacksquare=0.018$, $\circ \bullet=0.032$, $\triangle \blacktriangle=0.050$, $\nabla \blacktriangledown=0.071$
Open symbols: α_L , Closed symbols: α_T

図-6 輪郭抽出による画像解析(左)と空間モーメント解析(右)による分散長推定結果の比較。

Aにおいてトレーサ移動速度0.124cm/sでのプルーム輪郭および濃度0.125, 0.250, 0.500のコンタで囲まれた面積を図-5に示す。特定の濃度コンタとプルーム輪郭の時間的変化の度合いは一致しないことが見て取れる。さらに、0.500濃度のコンタが示すように、高濃度のコンタで囲まれた面積は時間経過とともに縮小する傾向がある。以上のことから、輪郭抽出による画像解析では下限濃度を特定の値に設定してその濃度をプルームの輪郭とすることは妥当でなく、濃度が明確でなくても画像の二値化により判別される輪郭を抽出する方が適切であると言える。

(2) 輪郭抽出による画像解析と空間モーメント解析による結果の比較

地盤AおよびBについて、輪郭抽出による画像解析と空間モーメント解析により推定された分散長の推定結果とトレーサ移動距離との関係を図-6に示す。空間モーメント解析結果ではトレーサの移動距離が増すに従って分散長がわずかに低下する傾向が見られる。これは移動距離の増加に伴ってプルームの低濃度部分が拡大している、

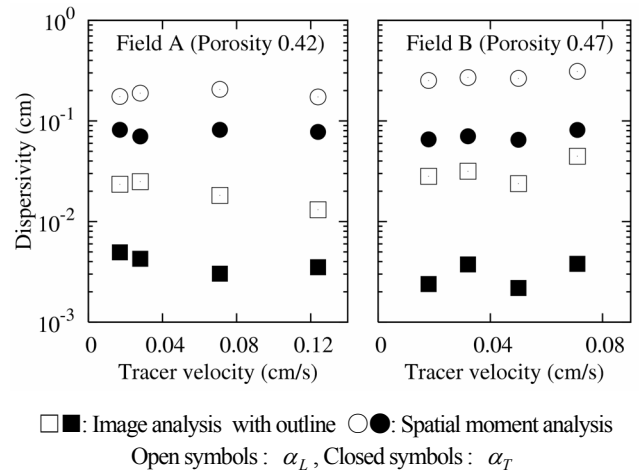


図-7 トレーサ移動速度ごとに平均した分散長推定結果。

すなわち、初期濃度の0.125倍より小さい濃度をもつ面積が大きくなっていることが一因である。低濃度面積はプルームとして捉えられていないため、2次モーメント量が実際より小さく見積もられ、その結果、分散長が過小評価されたと推察される。

図-7に図-6の結果をトレーサ移動速度ごとに平均した分散長の値を示す。空間モーメント解析による地盤Aにおける縦分散長と横分散長の平均値は $1.86 \times 10^{-1} \text{cm}$ と $7.78 \times 10^{-2} \text{cm}$ であり、地盤Bではそれぞれ $2.75 \times 10^{-1} \text{cm}$ と $7.06 \times 10^{-2} \text{cm}$ である。空間モーメント解析は輪郭抽出による画像解析より1オーダー程度大きい値になっている。また、横分散長に対する縦分散長の比の平均値は輪郭抽出による画像解析では地盤Aで0.201、地盤Bで0.123であるのに対し、空間モーメント解析ではそれぞれ0.414と0.243となる。解析手法の違いにより推定値自体に差異が見られるが、地盤Aと地盤Bを比較すると間隙率の大きい地盤Bの縦分散長は地盤Aにおける推定値と比較して1.5倍程度増加するという共通点が見られる。

両手法による推定値に関して既往の研究例と比較してみると、内径10cm、長さ83cmのカラムに平均粒径0.048cmのガラスビーズを均質に充填して行われたRobbins¹⁾の実験では $3.9 \times 10^{-4} \text{cm}$ から $1.3 \times 10^{-2} \text{cm}$ の横分散長が得られ、輪郭抽出による画像解析の推定値と類似している。また、内径5cm、長さ30cmのカラムに粒径が0.0074cmから0.0125cmのガラスビーズを用いたDe smedtとWierenga⁸⁾の実験では、流速が $1.90 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ と $5.47 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ の条件下でそれぞれ $1.21 \times 10^{-1} \text{cm}$ と $2.13 \times 10^{-2} \text{cm}$ の縦分散長を推定している。一方、小橋ら⁹⁾の内径9cmまたは2.2cm、長さ30cmの小規模カラム試験では、砂分91%の美浦砂を用いて縦分散長を0.14cmから1.07cmの範囲で得ている。また、本研究と実験条件の類似している30cmまたは60cmのカラムに平均粒径0.051cmの砂を間隙率0.42から0.45で充填したChao²⁾のカラム試験では $8.0 \times 10^{-2} \text{cm}$ から $1.2 \times 10^{-1} \text{cm}$ の縦分散長を破過曲線から推定している。これらの研究例は空間モーメント解析による推

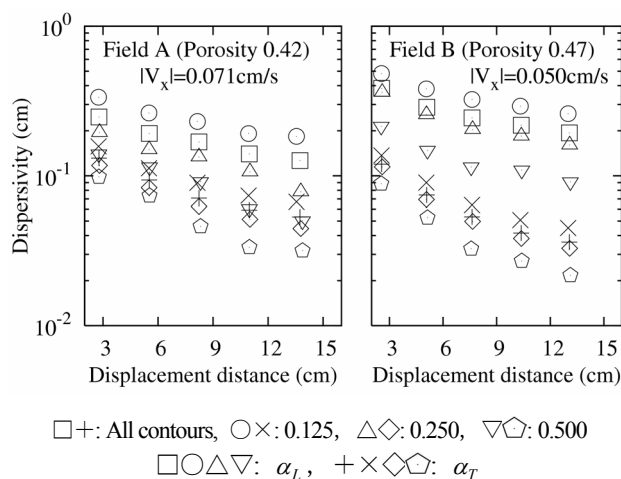


図-8 解析に用いる濃度コンタ数を変化させた空間モーメント解析の分散長推定結果。

定値に類似した値を示している。さらに、本研究と同様の試料砂を用いた長さ100cmの実験⁹⁾では、画像解析にて $8.8 \times 10^{-3}\text{cm}$ から $2.2 \times 10^{-2}\text{cm}$ の縦分散長と $2.6 \times 10^{-3}\text{cm}$ から $2.2 \times 10^{-2}\text{cm}$ の横分散長を得ており、逆解析にて0.06cmから0.25cmの縦分散長と0.01cmから0.10cmの横分散長を推定している。破過曲線の再現性から逆解析による推定値の妥当性を示唆しており、この推定値は本研究における空間モーメント解析による値と酷似している。既往の研究例との比較から、本研究における空間モーメント解析による推定値は妥当な範囲にあると言える。

空間モーメント解析ではプルームの濃度分布を3段階に捉えることで、輪郭抽出による画像解析と比較してより多くの情報量に基づいて分散長を推定する結果、精度は向上すると考えられる。この点を確認するため、図-8に3段階全ての濃度コンタを用いた結果に加え、各濃度コンタを単独で使用して分散長を推定した結果を示す。全コンタによる推定値と比較して、0.125のコンタのみによる結果は大きな分散長を推定し、0.500のコンタのみを用いると分散長の推定値は小さくなることが示されている。従って、空間モーメント解析による分散長推定は用いるコンタの濃度およびコンタの段階数の影響を受けていることがわかる。本研究では画像処理過程で判別可能な3段階の濃度を空間モーメント解析に用いたが、初期濃度の0.500より高濃度のコンタを抽出していないことが推定値に影響している可能性がある。濃度コンタの抽出レベルを細分化することで、現実のプルームの空間分布をよりの確に再現することが今後の課題であると言える。

5. 結論

本研究では均質地盤における飽和・定常流下で色素トレーサを用いた二次元物質移動実験を実施することで物

質移動現象を画像で捉え、プルーム輪郭抽出に基づく画像解析に加えて濃度コンタ抽出による空間モーメント解析により分散長の推定精度の向上を図った。その結果、プルーム輪郭抽出による画像解析における分散長推定では、既定の濃度をプルーム抽出の下限値、すなわちプルーム輪郭と定義してその形状を追跡することは妥当でなく、画像の二値化により判断される輪郭を抽出する方が適切であることが示された。また、空間モーメント解析による推定値は輪郭抽出による画像解析の値と比較して1オーダー程度大きく、既往の研究例との比較から空間モーメントによる推定値の妥当性が示された。さらに、空間モーメント解析は輪郭抽出による画像解析に比して濃度の情報量が多い点を踏まえて、空間濃度分布の抽出と空間モーメント解析の連携は分散長の推定精度向上に有用な方法であると言える。

謝辞：本研究は文部科学省科学研究費補助金（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

- 1) 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.
- 2) Chao, H.C. : Scale dependence of transport parameters estimated from forced-gradient tracer tests in heterogeneous formations, *Doctoral Thesis*, Univ. of Colorado, 2000.
- 3) Freyberg, D.L. : A natural gradient experiment on solute transport in a sand aquifer 2. spatial moment and the advection and dispersion of nonreactive tracers, *Water Resour. Res.*, Vol.22(13), pp.2031-2046, 1986.
- 4) Goltz, M.N. and Roberts, P.V. : Using the method of moments to analyze three-dimensional diffusion-limited solute transport from temporal and spatial perspectives, *Water Resour. Res.*, Vol.23(8), pp.1575-1585, 1987.
- 5) 井上一哉, 正木一平, 小林晃, 田中勉 : 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, 土木学会水工学論文集, Vol. 50, pp. 235-240, 2006.
- 6) Yu, Z. and Schwartz, F.W. : Determining concentration fields of tracer plumes for layered porous media in flow-tank experiments, *Hydrogeology J.*, Vol. 7, pp.236-240, 1999.
- 7) Bear, J. : *Dynamics of fluids in porous media*, Dover Publications, 1972.
- 8) De Smedt, F. and Wierenga, P.J. : Solute transfer through columns of glass beads, *Water Resour. Res.*, Vol.20(2), pp.1628-1637, 1988.
- 9) 小橋秀俊, 三木博史, 平山光信, 菱谷智幸, 山本博之, 大北康治 : 地盤汚染の影響予測に用いる分散長の決定法について, 土木学会論文集, Vol. 764 (III-67), pp. 53-67, 2004.

(2006. 9. 30受付)