

地下水揚水法による溶質流入空間の確率的推定手法

A stochastic estimation methodology of time-related solute capture zones in pumping wells

○ 藤白 沙都*・井上 一哉*・田中 勉*

Sato Fujishiro, Kazuya Inoue and Tsutomu Tanaka

1. 緒論

水溶性汚染物質により汚染された帯水層を浄化するにあたり，地下水揚水法は採用頻度の高い対策法である．地下水揚水法では揚水井への汚染物質の流入空間や到達時間を推定することは経済的観点からも重要になるものの，透水係数分布は高い不確実性を有しているため，確定論的な評価は難しい．そこで，本研究では汚染物質の揚水井への流入空間を“集粒域”と称して，確率的に集粒域を推定する手法を考案した．

2. 三次元集粒域推定

2.1 対象領域と透水場

本研究では，図 1 に示す 50 m × 50 m × 20 m の上面は被圧面とした仮想三次元場を対象とした． $x = 0$ m と $x = 50$ m の面に 0.01 の動水勾配，他の面にゼロフラックスを課し，(30, 25, 10) の揚水点において 0.2 m³/day の揚水量を設定した．対象場の透水係数分布は対数正規分布に従い，空間相関性は距離とともに減少すると仮定してコレスキー分解¹⁾により透水係数分布を生成した．また，単一の透水係数分布で地盤の状態を表すことは困難なため，同一の不均質度を有する 250 種類の透水係数分布を生成した．幾何標準偏差が集粒域の空間形状に与える影響を比較するため，平均透水係数を 1 m/d として，不均質度 $\sigma_{\ln K}^2$ を 0.5, 1, 1.5 に変化させて浸透流方程式を FEM により求解し，流速分布を求めた．

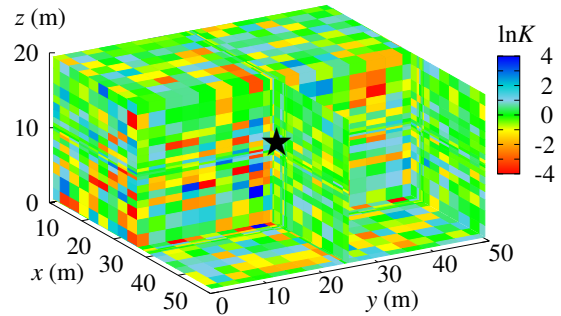


図 1：対象領域の概要（★は揚水点）

2.2 アルゴリズム

三次元集粒域を推定するため，任意の地点に存在する粒子が揚水井に流入する確率を求める．図 2(a) のように汚染物質に見立てた 5×10^4 個の粒子を対象領域にランダムに配置し，粒子輸送を時間間隔 Δt ごとにランダムウォーク粒子追跡法²⁾，

$$X_{p,i}(t + \Delta t) = X_{p,i}(t) + A_i(\vec{X}_p(t))\Delta t + \sum_{j=1}^3 B_{ij}(\vec{X}_p(t))\xi_j\sqrt{\Delta t}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

にて追跡しつつ，全粒子の揚水井への到達の有無と到達時間を記録することで時系列ごとに集粒域の確率空間分布を求めた．ここに，右辺第二項，第三項はそれぞれ移流成分と分散成分を表しており， $X_{p,i}(t)$ は時刻 t の粒子位置， Δt は時間ステップ， $\vec{X}_p(t)$ は位置ベクトル， $\xi(t)$ は正規乱数ベクトル， A_i はドリフトベクトル， B_{ij} は変位行列である．全ての透水係数分布で数値解析を実施し，結果をアンサンブルすべく，図 2(b) のように格子サイズ ΔS で領域を分割し，格子ごとに集粒域となり得る確率 $\Omega_{p,\lambda}^W$ を，

$$\Omega_{p,\lambda}^W = \frac{NPA(t)}{NP_\lambda}, \quad \lambda = 1, 2, \dots, \Lambda \quad (2)$$

にて求めた．ここに， NP_λ は任意の格子 λ に初期配置された粒子数， $NPA(t)$ は該当格子に配置された粒子のうち，既定の揚水経過時間 t 内に揚水井へ到達した粒子数である．

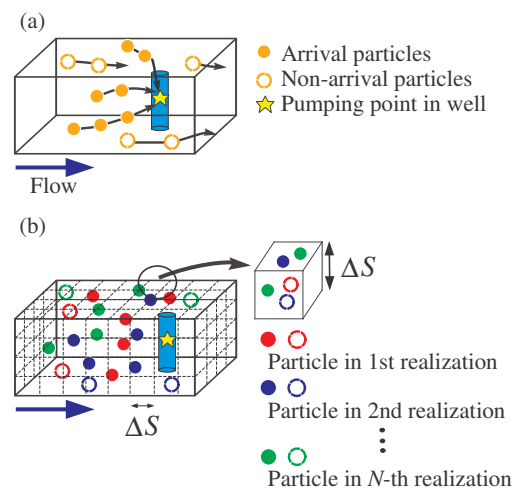


図 2：集粒域の推定方法

* 神戸大学大学院農学研究科：Graduate School of Agricultural Science, Kobe University.

地下水揚水法，ランダムウォーク粒子追跡法，確率的手法，エントロピー

3. 結果と考察

提案手法を用いると、不均質度 0.5 と 1.5 に対する集粒域の確率空間分布はそれぞれ図 3 と図 4 のように推定される。時間経過に伴ない揚水井はより下流側の汚染物質も回収される可能性が示唆されている。集粒域の実質的な規模を求めるため、 $V_{i,\lambda}$ を格子 λ の体積、 Λ を総格子数、 t を揚水開始からの経過時間として、

$$VP(t) = \sum_{i=1}^{\Lambda} V_{i,\lambda} \cdot \Omega_{p,\lambda}^W(t) \quad (3)$$

により重み付き体積 VP を定義し、 VP の時間変化を図 5 に併記する。重み付き体積の不均質度への依存性はなく、この点は揚水量と揚水経過時間で集粒域の規模は定まることを示唆している。

集粒域の確率空間分布を定量的に図るため、系の乱雑さを表すエントロピー³⁾を用いて、

$$H(t) = -\frac{(\Delta S)^3}{V_d} \sum_{\lambda=1}^{\Lambda} \Omega_{p,\lambda}^W(t) \log \Omega_{p,\lambda}^W(t) \quad (4)$$

により集粒域を検討する。ここに、 $H(t)$ は時刻 t の確率空間分布に関するエントロピー、 V_d は対象領域の体積である。図 5 にエントロピーの時間変化を示す。揚水時間と不均質度に呼応してエントロピーは増加している。不均質度の増加は輸送経路の多様性を誘発するため、集粒域の確率空間分布としての不確実性が増していると推量される。

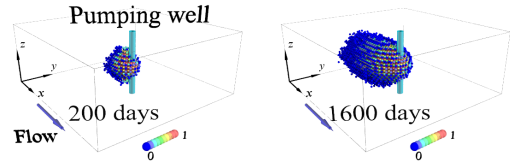


図 3：集粒域の確率空間分布 ($\sigma_{\ln K}^2 = 0.5$)

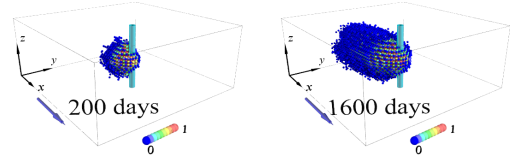


図 4：集粒域の確率空間分布 ($\sigma_{\ln K}^2 = 1.5$)

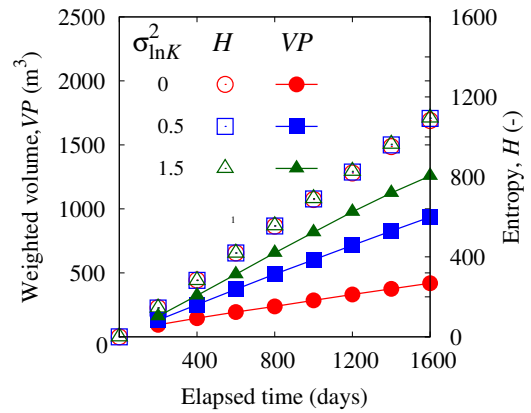


図 5：揚水経過時間と体積，エントロピーの関係

4. 汚染サイトへの適用

兵庫県内にある 1980 年代より漏洩したテトラクロロエチレン (PCE) による汚染サイトを対象に、集粒域の確率空間分布を本手法により求めた。領域は 5 層の沖積層から成る成層地盤であり、最下層の透水係数が他の層より大きくなっている。対象サイトは住宅街であるため現地踏査より 2 箇所に揚水井 W_1 と W_2 を想定した。実現性のある揚水量を考慮して、揚水量は 2 箇所とも $1 \text{ m}^3/\text{d}$ に設定した。領域の東西には南北に流れる河川を有しており、第一種境界条件に設定した。推定された集粒域の確率分布を重み付き体積として (a) に W_1 、(b) に W_2 の結果を図 6 に示す。対象場が層状地盤であるため集粒域は層状に拡大し、 W_2 の集粒域は W_1 の集粒域の下に潜り込んでいる。当サイトで地下水揚水法を実施すると帯水層の深い位置にある溶質を下流側に設置した W_2 にて回収できると期待される。

5. 結論

本研究ではランダムウォーク粒子追跡法を用いて揚水井への溶質流入空間を時系列で確率推定する手法を考案した。確率空間分布の重み付き体積は不均質度に依存せず、エントロピーの増大が確認された。また、汚染サイトに手法を適用し揚水井を複数設けると下流側の揚水井にて深い位置に拡大している汚染物質を回収できる可能性が示唆された。

参考文献：1) Kasama, K. and Whitte, A.J.: Bearing capacity of spatially random cohesive soil using numerical limit analyses, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137, pp.989–996, 2011. 2) Salamon, P., Fernández-García, D. and Gómez-Hernández, J.J: A review and numerical assessment of the random walk particle tracking method, *Journal of Contaminant Hydrology*, pp.277–305, 2006.3) 小出昭一郎: エントロピー, 共立出版, 112p., 1979.

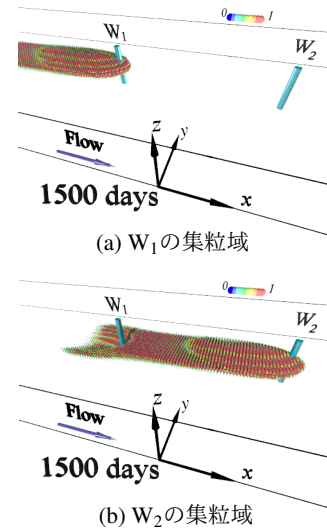


図 6：集粒域の確率空間分布