

地下水揚水法による汚染地下水浄化範囲の推定 Estimation of capture zone of pumping well

○ 藤白 沙都*・井上 一哉*・鈴木 麻里子*・田中 勉*
Sato Fujishiro, Kazuya Inoue, Mariko Suzuki and Tsutomu Tanaka

1. 緒論

地下水汚染が発生した場合によく用いられる地下水揚水法を実施するにあたり、経済的な観点から揚水井によって汚染地下水を浄化できる範囲を推定することが望まれる。本研究においては揚水井による汚染物質の浄化範囲を“集粒域”と称して、三次元領域において集粒域の推定方法を確率論を用いて提案する。さらに、領域の不均質度や揚水井の揚水量は集粒域の規模に影響を与えると考えられるため、これらが集粒域の規模に与える影響を定量的に評価する。

2. 数値シミュレーション

2.1 対象領域の概要

本研究では 50 m × 50 m × 20 m の仮想三次元領域を想定し、水頭境界を $x = 0$ m と $x = 50$ m の面に動水勾配 i を 0.01 とするよう設定した。揚水点を (30, 25, 10) に設定し、揚水量 Q を 0.2 m³/day とし揚水井を模擬した。領域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共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。有効間隙率 n を 0.2、平均透水係数 K を 1 m/day とし、領域の透水係数分布を十分に表すために、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。不均質度 $\sigma_{\ln K}^2$ は帯水層中の汚染物質の挙動に影響し、集粒域の規模に影響を及ぼすと考えられるため、 $\sigma_{\ln K}^2$ を 0, 0.5, 1.5 に変化させて $\sigma_{\ln K}^2$ の違いが集粒域の規模に与える影響を検討した。生成した各領域の透水係数分布に対する流速分布を浸透流方程式を FEM を用いて解くことで求めた。

2.2 集粒域推定のアルゴリズム

対象領域に図 1(a) のように汚染物質に見立てた粒子を配置し、各粒子をランダムウォーク粒子追跡法²⁾,

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

により、時間間隔 Δt ごとに追跡した。ここに、右辺第二項は移流項、第三項は分散項を表し、 $X_{p,i}(t)$ は時刻 t の粒子位置、 $\vec{X}_p(t)$ 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} は変位行列を表す。各粒子に対して図 1(b) のように揚水井への到達の是非を記録し、揚水井に到達した粒子には到達に要した時間も記録することで、任意時刻における集粒域を求めた。生成した全ての領域の結果をアンサンブルして、集粒域を確率空間分布により求める。アンサンブルした領域を任意の大きさ ΔS の格子に分割し、格子ごとに集粒域確率 $\Omega_{p,\lambda}$ を、

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

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、 Λ は総格子数、 $NPA(t)$ は該当格子に配置された粒子のうち、既定の揚水開始からの経過時間 t 内に揚水井へ到達した粒子数である。

3. 結果と考察

3.1 揚水井の汚染物質回収領域

提案した手法により $\sigma_{\ln K}^2 = 0$ の領域で集粒域の確率空間分布を求めると図 2(a) のようになる。図 2 には、集粒域確率に応じて色分けした球体を各格子にプロットしている。また、図 2(b) と図 2(c) にそれぞれ集粒域確率が 0.5 以上、1 となる領域を示す。高い確率の領域に着目するに従って集粒域の範囲は

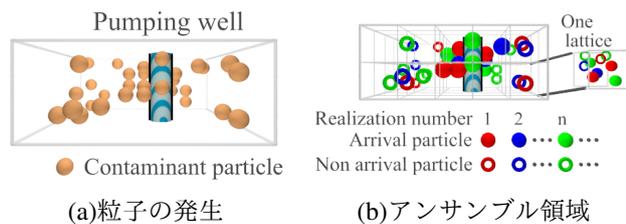


図 1：集粒域の推定方法

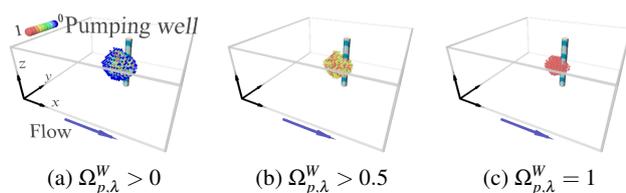


図 2：集粒域の形状

* 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，無次元化

小さくなる。実務上、揚水井が汚染物質を浄化できる範囲を考える際に、ある程度高い確率で汚染物質を浄化できる範囲に着目することが望まれる。本研究では、集粒域確率が0.5以上の領域を平均以上の確率で汚染地下水を浄化できる領域であると考えた。

3.2 不均質性による比較

図3(a)に $\sigma_{\ln K}^2 = 0$ の集粒域に揚水点を設定した $z = 10$ mの面を緑色で描画しており、図3(b)には図3(a)で示した面の横断面を示す。本研究では、集粒域の規模を定量的に評価するため、図3(b)に赤色と黄色で示す長さを求めた。赤色で示した揚水井から集粒域の上流側の端までの距離を登録長、黄色で示した集粒域の $z = 10$ mにおける最大幅を型幅と呼ぶこととする。

対象とする場に汎用性を持たせるため、任意時刻での登録長と型幅の無次元化を図る。本研究で用いたパラメータは、帯水層厚さを H として、流速が0になるよどみ点と揚水井の距離 L_s と地下水が L_s の距離を移動するのに要する時間 T_0 ,

$$L_s = \frac{Q}{2\pi(KHi)}, \quad T_0 = \frac{nHQ}{2\pi(KHi)^2} \quad (3)$$

である³⁾。図4と図5にはそれぞれ登録長、型幅の $\Omega_{p,\lambda} > 0$, $\Omega_{p,\lambda} > 0.5$ の領域を取り出した距離を示す。

登録長は時間経過に伴い増加し、型幅は一定値に漸近する様子が見て取れる。これより揚水井が汚染物質を浄化できる範囲は上流側の向きへは拡大を続ける一方、流れと直角する向きへの拡大は限度があることがわかる。上流に存在する汚染地下水は地下水流れに従い下流側へ移動し、揚水井によって回収されるため、登録長は時間経過に伴い増加すると考えられる。型幅が一定値に漸近するのは、揚水井の汚染浄化範囲は揚水量により制限されるためと考えられる。また、登録長、型幅共に $\Omega_{p,\lambda} > 0$ の領域に着目すると $\sigma_{\ln K}^2$ の増加に伴い距離が増大しており、 $\sigma_{\ln K}^2$ は揚水井が汚染物質を浄化できる範囲に影響することを示唆している。一方、 $\Omega_{p,\lambda} > 0.5$ の領域に着目すると $\sigma_{\ln K}^2$ に依存せず各長さは概ね一致する。これは、 $\sigma_{\ln K}^2$ の増加により分散が誘発されるためと考えられる。つまり、 $\sigma_{\ln K}^2$ の増加によって $\Omega_{p,\lambda} < 0.5$ の不確実な領域が増大しているといえる。よって、場の $\sigma_{\ln K}^2$ が未知の領域において $\Omega_{p,\lambda} > 0.5$ の領域を考えることで集粒域を概算できる可能性が示唆された。

3.3 揚水量による比較

集粒域の規模は Q に影響されると考えられるため、 Q を0.2, 0.3, 0.4に変化させた場合の型幅の結果を図6に示す。揚水量が増加した場合でも、型幅は一定値に近づく傾向がみられる。これは、揚水量を増加させても揚水井が汚染地下水を浄化できる可能性のある範囲は制限されていることを示し、このことに留意して揚水井を設置することが望まれる。

4. 結論

本研究では、解析手法で三次元場を対象に揚水井が汚染地下水を浄化できる範囲を求める手法を提案した。不均質性の増加による浄化範囲の拡大は浄化確率の低い領域の増加に起因することがわかった。揚水井が汚染浄化範囲は揚水量により制限されていることがわかった。

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) Admir, C. and Henk, H.: On using simple time-of-travel capture zone delineation methods, *Ground Water*, pp.408–412, 2003.

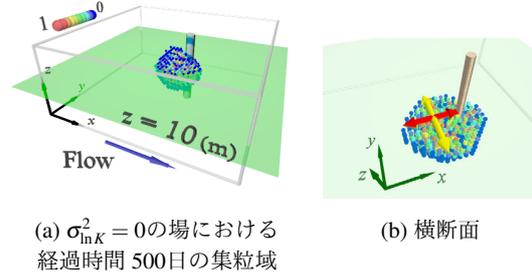


図3：集粒域の横断面

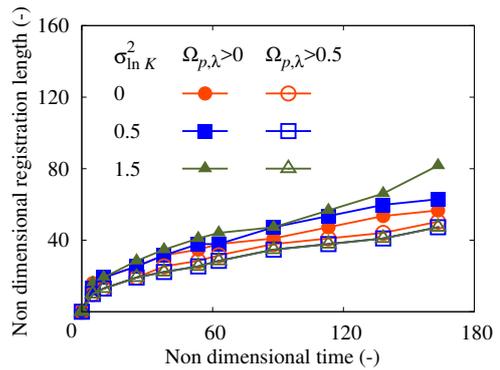


図4：不均質性で比較した登録長

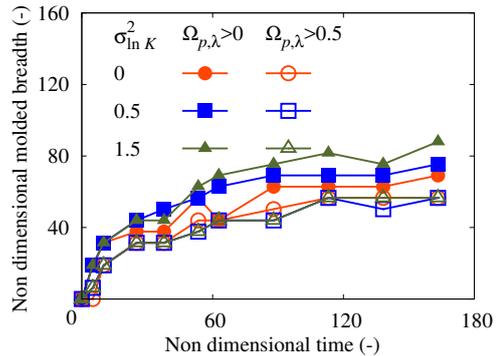


図5：不均質性で比較した型幅

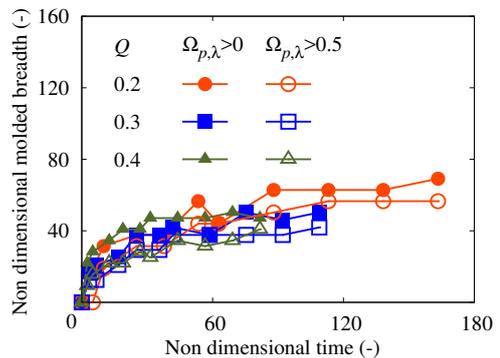


図6：揚水量で比較した型幅