

# 取水井の集水域分布と物質捕獲率に関する実験的・解析的検討 Experimental and Numerical Investigation for Capture Zone and Capture Probability of Well

井上 一哉<sup>1</sup>・高尾 幸宏<sup>1</sup>・田畑 見紗<sup>1</sup>・○光田 和希<sup>2</sup>・田中 勉<sup>1</sup>  
Kazuya Inoue, Yukihiro Takao, Misa Tabata, Kazuki Mitsuda and Tsutomu Tanaka

## 1. はじめに

地下水汚染対策として地下水揚水を実施する際、取水井の位置や揚水量選定の基準として取水井に水が流入する範囲、すなわち集水域の評価は重要である。また地下水を飲用目的に供する場合、集水域の評価は取水井への汚染物質の流入予測に応用できる可能性を有しているため価値の高い課題と言える。本研究では、集水域近傍に存在する水溶性汚染物質が取水井に流入する確率を実験的ならびに解析的観点から検討する。

## 2. 粒子追跡アルゴリズム

水溶性汚染物質の挙動を捉えるには流れ場の圧力分布と、流速分布が必要となる。物質粒子の移行過程の追跡は有限要素法により領域を離散化した後、浸透流方程式ならびにダルシー則を適用して得られた流速分布に式(1)で表されるランダムウォーク法を導入することで可能となる<sup>1)</sup>。

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

ここに、 $X_{p,i}$  は時間  $t$  での粒子位置ベクトルであり、 $A_i$  は移流項、 $\Delta t$  は時間増分、 $\Xi_j$  は正規乱数、 $B_{ij}$  は変位マトリクスである。ランダムウォーク粒子追跡解析は汚染源から取水井などの流出地点に至る物質移行経路や移行時間を見積もる際に有効な手法である。

一方、集水域形状の評価には流れの逆方向に粒子移動経路を追跡する後方粒子追跡法により一度の解析で時系列での集水域を捉えることが可能であり次式で表される<sup>2)</sup>。

$$X_{p,i}(t + \Delta t) = X_{p,i}(t) - \frac{v_i(\vec{X}_p(t))}{R(\vec{X}_p(x))}\Delta t, \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

ここに、 $R$  は遅延係数であり、右辺の第 2 項が逆流による移流現象を表す。

本研究では、ランダムウォーク法で実験状況下での粒子移行過程の再現を行い、後方粒子追跡法を適用することにより、揚水量に応じた取水井の集水域を把握する。

## 3. トレーサ実験

本研究では図 1 に示すように 90×50×6cm の被圧状態の定常浸透場を対象にトレーサ実験を実施する。汚染物質に見立てたトレーサには初期濃度  $5.0 \times 10^{-3} \text{g/cm}^3$  に調整した NaCl 水溶液を使用し、図 1 に示す A~C の位置に注入する。装置底部にはピエゾメータを設置し、ビニルチューブと接続してマンメータを作成する。また揚水状態を模擬するため、マンメータの位置を調整することで浸透水

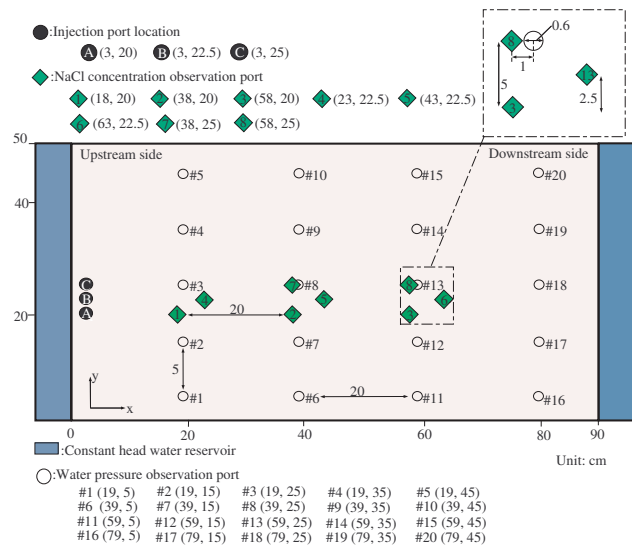


図 1 物質移動実験装置

<sup>1</sup> 神戸大学大学院農学研究科 : Graduate School of Agricultural Science, Kobe University.

<sup>2</sup> 神戸大学農学部 : Faculty of Agriculture, Kobe University.

キーワード :

集水域, ランダムウォーク法, 後方粒子追跡法

を排水し、NaCl 濃度を計測する。さらに、浸透場内の 8 か所に電圧センサを埋設し、トレーサ濃度を時系列で計測する。実験ケースとしては揚水量  $1.78 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$  に設定した取水井 PW8 のみを配置した Case 1 を基準に、取水井 PW7 と PW8 の揚水量をそれぞれ  $1.72 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $1.41 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$  に設定した Case 2, ならびに取水井 PW8 と PW13 の揚水量をそれぞれ  $1.29 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $3.90 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$  に設定した Case 3 を設定する。これらのケースを比較することで、取水井とトレーサ注入位置の位置関係が物質捕獲率に及ぼす影響を検討する。

#### 4. 粒子追跡解析

実験地盤を対象に浸透流解析と粒子追跡解析を実施することで実験状況を再現するとともに、取水井の集水域を把握する。透水係数の値は透水試験結果を基に  $1.5 \times 10^{-3} \text{ m/s}$  に設定し、マノメータ計測結果に合うようにキャリブレーションすることで、透水係数の異方性比  $K_x/K_y$  の値を 0.94 とする。一方、揚水を考慮しない浸透場における観測点の濃度変動に基づいて縦・横分散長を推定し、また実験状態から判断して遅延係数は 1 に設定した上で、2000 粒子を用いて粒子追跡法を実施する。

#### 5. 結果と考察

実験 Case 3-B を対象に、観測点にて計測した破過曲線を粒子追跡法により再現した結果を図 2 に示す。図 2 に見られるように、実験と解析における各観測点でのピーク濃度ならびにピーク時間、濃度推移は良好な一致が見られる。したがって、解析に使用した流速分布や各物理量は妥当であり、後方粒子追跡に適用することにより、実験場の集水域を把握できると考えられる。

後方粒子追跡法により得られた各ケースにおいて最大となる集水域を図 3 に示す。すべての実験ケースに共通して、 $x$  方向に対して対称軸を有する形状で分布することがわかる。また、Case 3 における取水井 PW13 の集水域は取水井 PW8 の下流側にて変化し、PW8 の位置を境に拡大する様子が見てとれる。これは浸透場において PW13 に流入する水量が上流側に設置された PW8 の影響を受けて減少するためである。また、取水井間の距離と揚水量の関係から、PW13 の集水域は PW8 の下流側において集水域が縮小すると考えられる。

図 4 には実験 Case 1 と Case 3 における取水井のトレーサ捕獲率の結果を示す。図よりトレーサ注入位置が集水域の対称軸に近いほど捕獲率は上昇することがわかる。また注入位置 A からトレーサを注入すると、PW8 の捕獲率はゼロとなる傾向にあるが、Case 3-A では PW13 にて約 1 割のトレーサを捕獲している。これは集水域の範囲外に汚染源が存在する場合、初期位置に依存して取水井に物質が流入する可能性を示唆しており、分散の効果は無視できないと考えられる。さらに Case 3 における PW8 と PW13 の捕獲率を比較すると、PW13 の捕獲率が高いことがわかる。この結果より揚水量のみならず、注入位置と集水域までの距離が捕獲率変動に寄与すると言える。

参考文献：1) 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. 2) Nahum, A. and Seifert, A. : Technique for backward particle tracking in a flow field, *Physical Review E*, 74, 016701, 2006.

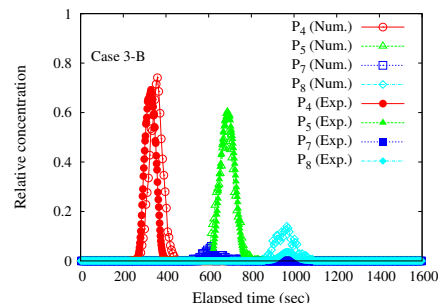


図 2 観測濃度の再現性の検討 (Case 3-B)

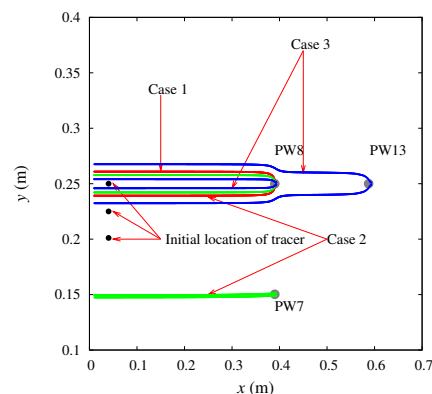


図 3 実験ケースに対する集水域形状の比較

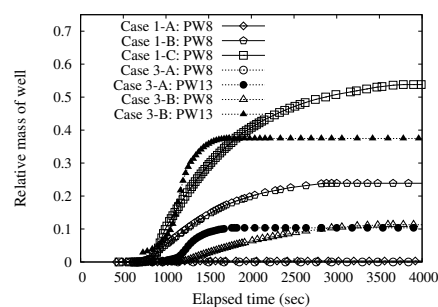


図 4 Case 1 と Case 3 の井戸累積質量