



# ランダムウォーク粒子追跡法を用いた不均質帯水層内の複数揚水井への溶質到達領域と到達時間の空間分布推定

井上, 一哉  
田中, 勉

---

**(Citation)**

土木学会論文集A2 (応用力学), 71(2):I\_79-I\_90

**(Issue Date)**

2015

**(Resource Type)**

journal article

**(Version)**

Version of Record

**(Rights)**

©2015 公益社団法人 土木学会

**(URL)**

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90003780>



# ランダムウォーク粒子追跡法を用いた 不均質帯水層内の複数揚水井への 溶質到達領域と到達時間の空間分布推定

井上 一哉<sup>1</sup>・田中 勉<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 博(農) 神戸大学准教授 農学研究科食料共生システム学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)  
E-mail: mornel@kobe-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 農博 神戸大学教授 農学研究科食料共生システム学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)  
E-mail: ttanaka@kobe-u.ac.jp

本研究では、複数箇所からの揚水を伴う不均質地盤を対象に、揚水井の集水域境界を推定する方法を考案した。地球統計学的に 30 種類の透水係数分布を生成し、後方粒子追跡法を用いて得られた 30 種類の粒子群分布の座標情報をアンサンブルすることで簡便に集水域境界が推定できることを示した。また、揚水井に溶質が到達する領域を集粒域と定義して、ランダムウォーク粒子追跡法の応用により集粒域を確率的に推定する方法と揚水井への粒子到達時間の空間分布を推定する方法について考案した。揚水量と揚水位置を変えて集粒域確率を推定した結果、揚水量の増加とともに不確実性は減少することがわかった。本提案手法を用いて、単一の揚水井、あるいは、複数の揚水井に対する集粒域分布と平均到達時間の分布を同時に推定できることを提示した。

**Key Words:** *solute capture zone, travel time, pumping well, random walk particle tracking*

## 1. 緒論

汚染された帯水層を浄化する、あるいは、帯水層に存在する汚染物質の広域拡散を防ぐ手段として、地下水揚水法はコスト面や技術面の観点から採用頻度の高い工法である<sup>1)</sup>。地下水揚水にて汚染物質を回収できる空間的拡がりや揚水量に応じて異なり、揚水井に汚染物質が到達する輸送時間は汚染物質の初期位置に大きく依存する。そのため、浄化可能エリアを検討する上で、また、浄化所要時間を見積もる上で、揚水井への汚染物質の到達領域と到達時間の空間分布を推定することは重要な検討項目である。この点は、飲用を目的として地下水を揚水する場合においても共通の事案であり、汚染された地下水が到達しない揚水地点を検討する情報と成り得る<sup>2)</sup>。しかしながら、自然地盤では場所ごとに透水係数が異なるだけでなく、対象領域の全体にわたって透水係数分布を高い精度で推定することは現実的に難しい事項である。地下水、ならびに、地下水に溶解した汚染物質の輸送挙動は場の透水係数分布に強く依存する現象<sup>3)</sup>であることから、揚水により地下水を集水可能な範囲や汚染物質を回収可能な範囲を推定することには大きな不確実性を伴う。物理的・経済的側面や実験内容、計測項目を鑑みると、原位置トレーサ実験<sup>4)</sup>は容易な手段とは言い難く、問題の性質上、数値解析が実現性の高い推定手段となる。

揚水井の位置や揚水量の選定は浄化効果ならびに浄化に要する時間を左右するため、集水域の評価は地下水を適切に管理する上で主要な課題である一方で、透水係数分布の不均質性と不確実性が集水域の推定を難しくしている一要因であり、移流分散現象の不確実性にも影響を及ぼしている。溶質の分散現象はランダム性の強い不可逆現象であり、地下水流線のように任意の地点と揚水井を結ぶ経路は唯一ではなく多様な輸送経路をとる。そのため、確率的に集水域を推定する研究<sup>5)6)</sup>に加えて、確率的に揚水井への溶質到達領域を評価する研究例もあるものの、ほとんどが単一の揚水井のみを対象としている<sup>7)8)</sup>。汚染のレベルや対象場の地質状況に応じて、複数の揚水井により地下水揚水は実施され<sup>1)</sup>、その際には、各井戸の揚水量が相互に影響を及ぼし合い、地下水の流速分布のみならず、溶質の輸送経路にも影響が伝播する。複数の揚水を考慮した溶質到達領域の推定事例は希少であり、溶質の到達時間を空間的に推定する研究例は無い。

以上の点を鑑みて、本研究では、不均質透水場において複数存在する揚水井からの地下水揚水に伴う集水域境界を簡便に推定する方法を案出するとともに、ランダムウォーク粒子追跡法を応用して揚水井への溶質到達領域、ならびに、到達所要時間を確率的に空間推定する方法を考案した。提案手法を検討すべく、揚水量と揚水位置を変えることにより、集水域形状や到達

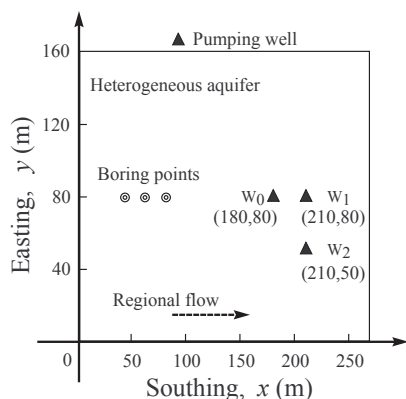


図-1 対象サイトの概略

確率、溶質到達時間の変化について検討した。なお、本論文では、揚水井に溶質が流入する領域を“集粒域”と定義する。

## 2. 対象サイトと不均質透水場

### (1) 対象サイトの概要

本研究ではオランダ国デンハーグ市近郊にある砂質系サイトを解析対象とした。対象サイトの主たる流れ方向は  $x$  軸の正方向、被圧帯水層の厚さは約 20 m であり、南北方向を  $x$  軸、東西方向を  $y$  軸に設定した。また、現地調査を踏まえて、対象領域の規模を 270 m × 160 m に設定した。帯水層の厚さは平面の規模に比べて約 10 分の 1 であり、二次元的に揚水井の集水域、ならびに、集粒域を推定することが本研究の主眼であることから、対象サイトを平面的にモデル化した。図-1 に対象サイトの概略を示す。対象サイトを反映して、 $(x, y) = (180, 80)$  の位置に完全貫入井として揚水井を設けるとともに、過去に実施された原位置トレーサ実験<sup>7)</sup>を参考に、単位面積・単位深さあたり、 $0.8 \text{ day}^{-1}$  の揚水量を設定した。便宜上、 $(180, 80)$  に位置する揚水井を  $W_0$  と記す。また、複数の揚水条件を設けるため、仮想的に  $(210, 80)$  と  $(210, 50)$  の位置に完全貫入井  $W_1$  と  $W_2$  を想定し、揚水量を種々に与えることで、揚水量や揚水位置に応じた集粒域の変化について検討した。なお、揚水量と揚水時間の関係によっては不飽和水分状態となる可能性があるため、揚水可能な条件は対象とするサイトに応じて異なる。

### (2) 透水係数の空間分布設定

対象サイト内では、図-1 に示す 3 箇所のボーリング地点において深さ方向の透水係数が測定されている<sup>7)</sup>。本研究ではサイトの測定データに基づいて、透水係数分布の幾何平均 ( $\ln K$ ) と幾何分散  $\sigma_{\ln K}^2$  をそれぞれ  $-0.197$  と  $0.151$  に設定し、 $0.34$  の有効間隙率の値を採用した。

ここに、 $\langle \cdot \rangle$  は平均を表す。一方で、局所的な計測結果であることを考慮して、透水係数を空間的にばらつかせるため、場の透水係数分布は対数正規分布に従い、空間相関性を有すると仮定<sup>9)</sup>した。また、文献<sup>7)10)</sup>を参考に、相関長  $\lambda$  を 13 m、場の分散を表すシルに幾何分散を設定し、透水係数の空間相関は等方として次式の指数型バリオグラムを採用した。

$$\gamma(d) = \sigma_{\ln K}^2 (1 - \exp(-d/\lambda)) \quad (1)$$

ここに、 $\gamma$  はバリオグラム、 $d$  は観測点間距離である。

後述する浸透流解析のため、揚水井の近傍を 0.5 m の有限要素サイズ、最大 4 m の要素サイズにて対象空間を離散化した。合わせて、対象領域内に  $10^3$  個のソース点をランダム生成し、各点に対数正規性のある透水係数を発生させて<sup>11)</sup>、すべての有限要素の中心位置でブロッククリギング予測<sup>12)</sup>により透水係数を与えた。有限要素のサイズに大きい相違はないことから、クリギングに与える要素サイズの影響は微小と考えられる。

前述の過程を経て模擬生成された透水係数分布は既定の幾何平均  $-0.197$  と幾何分散  $0.151$  を反映した 1 つの空間分布にすぎない。そのため、複数の透水係数分布を検討できるように、同様の手順により、同一の幾何平均と幾何分散を有する 30 種類の透水係数分布を生成した。便宜上、本研究では透水係数分布の幾何分散のことを不均質性と称する。生成した透水係数の空間分布例を図-2 に示す。

### (3) 浸透流解析

揚水井からの地下水揚水を考慮した地下水流れ場における浸透流方程式は次式で表される<sup>13)</sup>。

$$\nabla \cdot (K(\mathbf{x}) \nabla h) = Q(\mathbf{x}) \quad (2)$$

ここに、 $h$  はピエゾ水頭、 $\mathbf{x}$  は位置ベクトル、 $Q$  は単位面積・単位深さあたりの揚水量、 $K(\mathbf{x})$  は位置ベクトルに対応した透水係数テンソルであり等方性を仮定する。図-1 に示す  $x = 0 \text{ m}$  と  $x = 270 \text{ m}$  の地点を第 1 種境界条件に設定し、文献<sup>7)</sup>を参考にして  $0.05$  の動水勾配を与えた。また、 $y = 0 \text{ m}$  と  $y = 160 \text{ m}$  の地点を不透水条件として第 2 種境界条件に設定し、揚水井の位置と重なる有限要素節点に所与の揚水量を外力項として付与することで揚水を考慮した。これらの境界条件と生成した透水係数分布の下で、式 (2) の浸透流方程式を有限要素法により求解し、揚水条件と透水係数分布に応じた水頭分布を導出した。

得られた水頭分布を基に、

$$\mathbf{v} = -\frac{K(\mathbf{x}) \nabla h}{n_e} \quad (3)$$

により流速分布を求めた。ここに、 $\mathbf{v}$  は実流速ベクトルである。また、 $n_e$  は有効間隙率であり、領域内で一定とした。

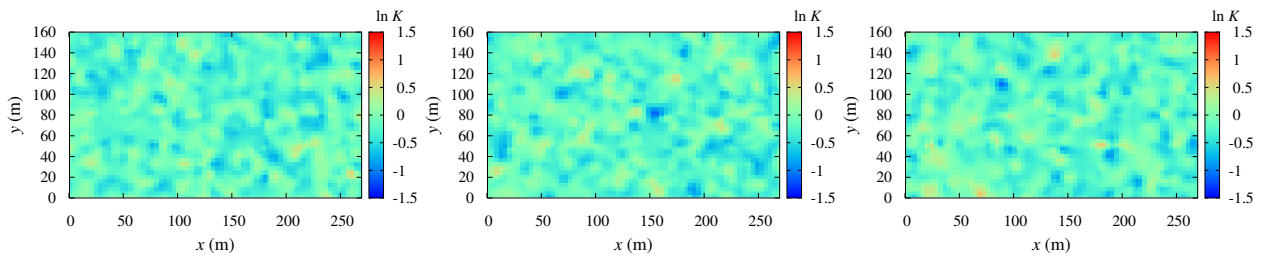


図-2 透水係数の空間分布の一例

### 3. 複数ある揚水井の集水域推定

#### (1) 後方粒子追跡法

揚水井が地下水を取り込むことができる範囲、つまり揚水井の集水域規模は揚水量に強く依存し、計測可能な物理量ではないため、集水域推定は数値解析的アプローチを必要とする課題である<sup>14)</sup>。透水係数の空間分布の不確実性に起因して、集水域を一意に求めることは現実には難しいことから、確率的な観点から集水域を推定する手段<sup>15)</sup>が取られている一方で、不均質地盤の集水域推定では解析効率や不確実性の点で多くの課題を残している<sup>16)</sup>。後方粒子追跡法は流速分布に基づいて地下水に見立てた粒子の移行を本来の流れ方向とは逆方向に追跡する方法であり、地下水の流線を辿ることで集水域の時間変動を追跡することができる<sup>17)</sup>。集水域の推定にあたり、本研究でも後方粒子追跡法を採用し、揚水井位置を起点とする粒子群の移動経路を

$$X_{p,i}(t + \Delta t) = X_{p,i}(t) - v_i(\vec{X}_p(t))\Delta t, \quad i = 1, 2 \quad (4)$$

にて表す。ここに、 $X_{p,i}(t)$  は時間  $t$  の粒子位置の  $i$  成分、 $v_i$  は実流速成分、 $\vec{X}_p(t)$  は粒子位置ベクトル、 $\Delta t$  は時間増分であり、右辺第 2 項がマイナスの流速成分による逆流現象を表している。流線の曲率が大きく変化する揚水井の周辺部での精度低下を防ぐため、式(4)を求解するにあたり、4 次のルンゲ・クッタ法、および、2 重ステップ法<sup>18)</sup>を適用した。

一般的に、後方粒子追跡法を用いて集水域の空間形状を精度良く得るには膨大な粒子数を必要とし、解析効率の面で難があるため、井上らのナンバリング付き粒子挿入法<sup>19)</sup>を用いることで解析の効率化を図った。しかしながら、この方法では単一の揚水井を起点とする集水域しか描くことができないため、粒子を初期配置する際に、粒子の属する揚水井をフラグ付けすることにより、複数の揚水井においても集水域を求めることができるように拡張した。その際、各揚水井の半径を 0.3 m に設定し、揚水井となる有限要素節点を中心とした半径 0.3 m の円上に 40 粒子を均等に初期配置して後方粒子追跡を開始した。便宜上、各粒子の質量を  $1 \times 10^3$  g に設定し、後方粒子追跡過程では隣り合う粒子同士の幾何距離が 2 m を超えた場合には、質

表-1 後方粒子追跡解析に用いたパラメータ一覧

|                       |                 |
|-----------------------|-----------------|
| 揚水井の半径 (m)            | 0.3             |
| 揚水井半径上に配置する初期粒子数      | 40              |
| 粒子総質量 (g)             | $4 \times 10^4$ |
| 時間増分 $\Delta t$ (day) | 1.0             |
| 2 重ステップ法安全係数 (-)      | 0.9             |
| 2 重ステップ法許容誤差 (m)      | 0.01            |
| 粒子挿入の許容距離 (m)         | 2               |
| 粒子融合の距離 (m)           | 0.1             |

量の一部を分配して、新しい粒子を挿入した。一方で、隣り合う粒子同士の距離が 0.1 m を下回った場合には、どちらかの位置に質量とともに 1 つに融合することで、粒子数の急激な増加を抑えた<sup>19)</sup>。なお、ナンバリング付き粒子挿入法を用いた後方粒子追跡法の詳細は井上ら<sup>19)</sup>を参照されたい。表-1 に後方粒子追跡解析に用いたパラメータを列記する。

#### (2) 集水域境界の推定方法

図-1 に示す揚水井  $W_0$  と  $W_1$  にてそれぞれ単位面積・単位深さあたり  $0.8 \text{ day}^{-1}$ 、 $0.4 \text{ day}^{-1}$  の揚水量を設定し、井上ら<sup>19)</sup>の手法を拡張して集水域の拡がり推定した結果を図-3(a) に丸印 (●) で示す。青と緑の丸印はそれぞれ揚水井  $W_0$  と  $W_1$  を起点として、純粋移流時間を 1000 日間とした輸送結果に基づく粒子群の位置を表している。また、見易さのため、30 種類のリアライゼーションのうち 7 種類の結果をランダム抽出してプロットしており、各揚水井の集水域を分離して図-3(b) と図-3(c) に示している。

図-3 に見られるように、集水域の形状、すなわち既定の移流時間経過後の粒子群分布はリアライゼーションごとに異なる。複数の不均質透水場を対象とする場合、個々のリアライゼーションを統合する有用な手段がないことから、井上らは確率的に集水域を推定するため、アンサンブル格子を導入することでリアライゼーションごとに得られる集水域の結果を対象空間の確率分布として推定している<sup>19)</sup>。つまり、空間内の任意の格子において当該格子が集水域となる確率を空間全体

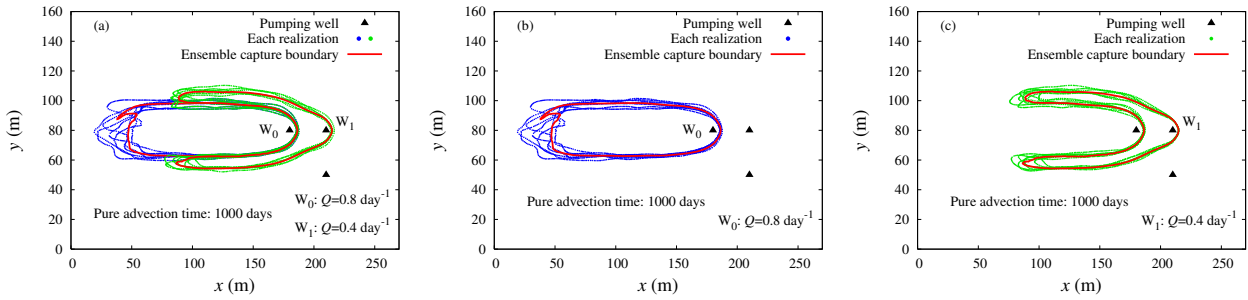


図-3 揚水井  $W_0$  と  $W_1$  にて揚水がある場に対する集水域分布と集水域境界のアンサンブル結果

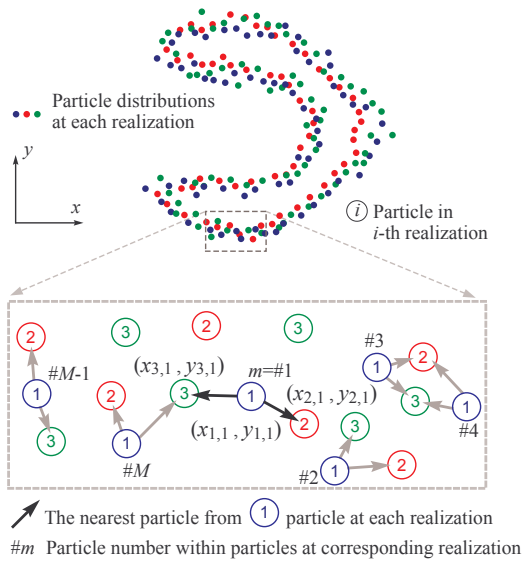


図-4 集水域境界のアンサンブル推定方法. リアライゼーション 1 番をアンサンブル基準とした例.

で推定しており、集水域と非集水域の境界を描くことには言及していない。前述のように、複数のリアライゼーションを扱う場合、集水域境界は一意に定まらないため、場所ごとに確率を求める方法は自然な方法である。しかしながら、不確実性を有していたとしても、集水域と非集水域の境界が得られるならば、地下水管理において有益と言える。そこで本研究では、井上らのナンバリング付き粒子挿入法を適用しつつ、簡易に集水域境界を求める方法を考案した。

簡単のため、3種類のリアライゼーションに対して得られた粒子群の位置を模式的に図-4に示す。リアライゼーションごとに個々の粒子を線でつなぐことにより、集水域境界を可視化できる一方で、各リアライゼーションで透水係数分布は異なるため、粒子群の位置も同一にはならない。この点は図-3にて観察されるとおりであり、リアライゼーションごとに得られた粒子群の位置情報を用いて、すべてのリアライゼーションを統合することを考える。たとえば、リアライゼーション  $i$  番にて得られた粒子群のうち、1番目の粒子位置を

$(x_{i,1}, y_{i,1})$  とする。当該粒子から最も近い位置にあるリアライゼーション  $i+1$  番の粒子を探索し、その粒子座標を  $(x_{i+1,1}, y_{i+1,1})$  とし、他のリアライゼーションに対しても同様に探索して、アンサンブル平均することで、

$$\bar{X}_m = \frac{\sum_{i=1}^{RN} x_{i,m}}{RN}, \quad \bar{Y}_m = \frac{\sum_{i=1}^{RN} y_{i,m}}{RN}, \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (5)$$

により、集水域境界の1点  $(\bar{X}_m, \bar{Y}_m)$  とする。ここに、 $RN$  は全リアライゼーション数、 $m$  は統合基準となる粒子群の中の粒子番号、 $M$  は統合基準となる粒子群の総粒子数である。リアライゼーション  $i$  番にある  $M$  個すべての粒子について、また、揚水井ごとに同様の探索と演算過程を経ることで揚水井の数に関わらず集水域境界をアンサンブル推定できる。

### (3) 集水域境界

提案した方法に基づいて描いた各揚水井の集水域境界を図-3の赤色実線にて示す。赤色実線部分はランダムに例示した7つの結果のおおよそ中間の位置に描かれており、30種類ある各結果を代表する値と見なすことができる。揚水井の周辺は揚水の影響が強く生じる区域であるため、透水係数の分布に関わらず、類似した集水域形状となる。他方、場の不均質性の影響を受けて、上流側ほど集水域境界は他の境界部分よりも不確実性が高くなる<sup>19)</sup>ため、いびつな形状となる。

透水係数の分布状態によっては解析領域の上流側に高透水性の部分が多く存在し、結果的に1000日を超えた時点で粒子の  $x$  座標成分が  $x = 0$  m を下回り、解析領域の外側に移行する粒子が出現してくる。設定した解析領域との兼ね合いから、そのような状況では集水域境界の最上流部を得ることができず、空間的に閉じた集水域境界を描くことはできない。揚水の影響を受けて、流速ベクトルの  $y$  成分の空間変動が多様な揚水井周辺部とは異なり、揚水井から離れるほど揚水の効果は小さくなって境界条件として定めた  $x$  軸方向に沿った動水勾配の影響のみが生じる結果、流速ベクトルの  $y$  方向成分はゼロに近づく。そのため、 $y$  軸方向へ集水域

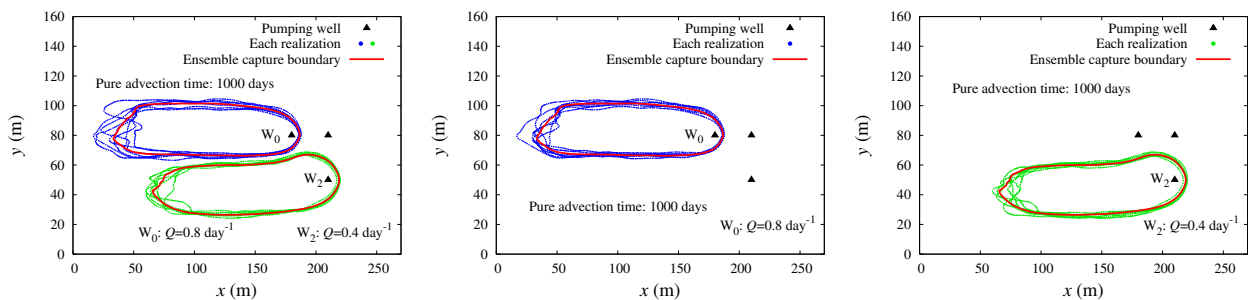


図-5 揚水井  $W_0$  と  $W_2$  にて揚水がある場に対する集水域分布と集水域境界のアンサンブル結果

が拡大する大きな要因がないことから、時間が経過したとしても集水域の  $y$  軸方向の規模は変化せず、理論上、集水域境界の最上流端は際限なく無限遠方まで進展する。図-3を例にとると、 $y$  軸方向への集水域の規模は揚水井  $W_0$  でおおよそ  $y = 60 \text{ m} \sim 100 \text{ m}$ 、揚水井  $W_1$  でおおよそ  $y = 50 \text{ m} \sim 110 \text{ m}$  の規模を保ったまま上流方向へ進展していく。そのため、多くの研究例<sup>5)6)</sup>と同様に、集水域境界の最上流部を評価する、すなわち、閉じた集水域形状を提示するため、本研究では最大の純粋移流時間を 1000 日としている。

揚水井  $W_0$  と  $W_2$  の揚水量をそれぞれ  $0.8 \text{ day}^{-1}$ 、 $0.4 \text{ day}^{-1}$  とした条件の下で、最大純粋移流時間 1000 日に対応する集水域境界の結果を図-5に赤色実線で示す。丸印(●)は7種類の結果をランダムに抽出してプロットあり、図-3と同様に、各揚水井の集水域を分離して描いている。提案手法により、揚水井の位置や数に関わらず、集水域境界を表現できていることがわかる。

#### (4) アンサンブル基準

式(5)において基準とする粒子群は任意に選定でき、該当粒子群の総数に応じて各粒子の最近接粒子を探索していくことになる。異なる3つのリアライゼーションをアンサンブル基準とした場合の集水域境界を図-6に示す。図-3と同様に、揚水井  $W_0$  と  $W_1$  にてそれぞれ単位面積・単位深さあたり  $0.8 \text{ day}^{-1}$ 、 $0.4 \text{ day}^{-1}$  の揚水量を設定した際の揚水井  $W_1$  に対する集水域境界を描いている。基準となるリアライゼーションに関わらず、集水域境界はほとんどの領域で一致していることがわかる。しかしながら、図-6において、2つ又のフォーク状に分岐した集水域境界の先端部分では相違が生じている。揚水井  $W_0$  と  $W_1$  にて揚水しているため、揚水井の周辺では強制的に井戸へ向かう地下水流れとなり、不均質性の度合いはあまり流速分布には影響しない。一方で、揚水井から離れるほど揚水の影響よりも透水係数分布の影響が卓越してくるため、図-6に見られるように、集水域境界の相違が生じてくると推測される。揚水井から離れた区域ほど集水域形状の多様性が生じる点は、揚水量や揚水位置に依存しないと言える。

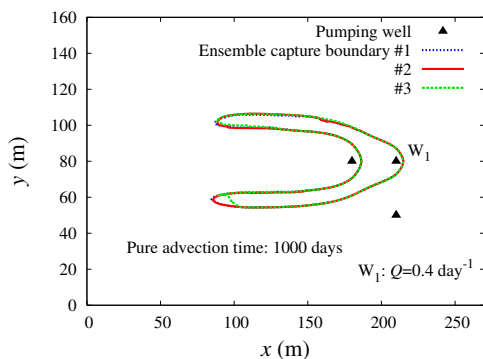


図-6 アンサンブル基準となるリアライゼーションを変えた場合の集水域境界の結果

図-3に丸印にて例示的に示した7つの集水域において、揚水井  $W_0$ 、ならびに、揚水井  $W_1$  の集水域を構成する粒子群の数は、それぞれ 285 ~ 315 粒子、395 ~ 436 粒子である。この点は透水係数分布に応じて集水域の規模は異なることを明示しており、アンサンブル推定の基準となる粒子群分布や粒子数の違いが図-6のような差異となって現れる。集水域境界は一意に定まらないものの、アンサンブルによる集水域の平均化をとるため、本研究では、30ある粒子群分布のうち、中間の粒子数となるリアライゼーションをアンサンブル推定の基準とした。結果的に、アンサンブルしたとしても不確実性の高い上流部ほどいびつな形状となる場合がある。図-3の赤色実線がその一例であり、図-5の赤色実線ほど滑らかな集水域形状とはならない。地下水管理の観点からは、滑らかな分布の方が利便性は高いと考えられることから、不確実性のさらなる低減と分布形状の表現については、今後の課題とする。

## 4. 複数の揚水井に対する集水域推定

### (1) ランダムウォーク粒子追跡法

地下水汚染予防や対策を実行する際には、限られたコストの中でヒトの健康や生活環境への悪影響に対する懸念を払拭しなければならない。汚染された地下水を地下水揚水により浄化する場合、領域内のある地点に存在する汚染物質の取り込みの有無であったり、浄

化作業に要する時間が検討項目となる。また、飲用や農業利用のために地下水を揚水している場合には、揚水井への物質到達の有無のみならず、上流域にある汚染物質の到達時期が問題となる<sup>1)</sup>。つまり、地下水を揚水できる範囲に加えて、揚水活動と汚染物質輸送の関係が焦点となる。

地下水流速や地質性状など移流分散現象に関わる要因により帯水層内の物質輸送の様子は時々刻々と変動する。移流分散現象に従って、ある地点に位置する汚染物質の揚水井に至る過程を数値的に求解する手段として本研究では、ランダムウォーク粒子追跡法<sup>7)</sup> (Random Walk Particle Tracking: 以下, RWPT と記す) を採用した。RWPT は対象物質に見立てた大量の粒子群を領域内に発生させて、粒子位置と質量に対する空間分布変動を時系列で表現するラグランジュ的手法であり、

$$X_{p,i}(t + \Delta t) = X_{p,i}(t) + A_i(\vec{X}_p(t))\Delta t + \sum_{j=1}^2 B_{ij}(\vec{X}_p(t))\Xi_j\sqrt{\Delta t}, \quad i = 1, 2 \quad (6)$$

にて表される<sup>3)7)</sup>。ここに、 $X_{p,i}(t)$  は時間  $t$  における粒子位置の  $i$  成分、 $\vec{X}_p(t)$  は粒子位置ベクトル、 $\Delta t$  は時間増分、 $\Xi_j$  は平均 0、分散 1 の正規乱数ベクトルである。また、 $A_i$  は粒子のドリフトベクトルであり、

$$A_i = \frac{1}{R(\vec{X}_p(t))} \left( v_i(\vec{X}_p(t)) + \sum_{j=1}^2 \frac{\partial D_{ij}}{\partial x_j}(\vec{X}_p(t)) + \frac{1}{n_p} \sum_{j=1}^2 D_{ij} \frac{\partial n_p}{\partial x_j} \right), \quad i = 1, 2 \quad (7)$$

にて表される。ここに、 $R$  は遅延係数である。また、 $D_{ij}$  は分散係数テンソルであり、

$$D_{ij} = \alpha_T |\mathbf{v}| I_{ij} + (\alpha_L - \alpha_T) \frac{v_i v_j}{|\mathbf{v}|}, \quad i, j = 1, 2 \quad (8)$$

にて表される<sup>18)</sup>。ここに、 $\alpha_L$  は縦分散長、 $\alpha_T$  は横分散長、 $|\mathbf{v}|$  は流速のノルム、 $I_{ij}$  は単位マトリクスである。本解析では、有効間隙率  $n_e$  の空間変動は考慮しないため、

$$A_i = \frac{v_i(\vec{X}_p(t)) + \sum_{j=1}^2 \frac{\partial D_{ij}}{\partial x_j}(\vec{X}_p(t))}{R(\vec{X}_p(t))}, \quad i = 1, 2 \quad (9)$$

となる。

また、 $B_{ij}$  は溶質の分散現象に関わる変位マトリクスであり、

$$B_{ij} = \begin{pmatrix} \frac{v_1}{|\mathbf{v}|} \sqrt{\frac{2(\alpha_L |\mathbf{v}|)}{R}} & -\frac{v_2}{\Gamma} \sqrt{\frac{2(\alpha_T |\mathbf{v}|)}{R}} \\ \frac{v_2}{|\mathbf{v}|} \sqrt{\frac{2(\alpha_L |\mathbf{v}|)}{R}} & \frac{v_1}{\Gamma} \sqrt{\frac{2(\alpha_T |\mathbf{v}|)}{R}} \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\Gamma = \sqrt{v_1^2 + v_2^2} \quad (11)$$

表-2 ランダムウォーク粒子追跡法に用いたパラメーター一覧

|                                 |                 |
|---------------------------------|-----------------|
| 縦・横分散長 $\alpha_L, \alpha_T$ (m) | 0.02, 0.005     |
| 遅延係数 $R$ (-)                    | 1.0             |
| 時間ステップ $\Delta t$ (day)         | 1.0             |
| 井戸半径 $r$ (m)                    | 0.3             |
| 粒子数 $N$                         | $5 \times 10^4$ |
| アンサンブル格子間隔 $\Delta S$ (m)       | 2.0             |

にて表される。ここに、 $\alpha_L$  は縦分散長、 $\alpha_T$  は横分散長であり、文献<sup>7)</sup>を基にそれぞれ 0.02 m、0.005 m に設定した。また、揚水井への粒子の到達を判別する際には、揚水ポイントの周りに仮想的な井戸半径  $r$  を設け、ある時刻  $t$  から  $t + \Delta t$  間の粒子移動で描く線分が揚水ポイントを中心とした半径  $r$  の円と交わる、または接する場合を該当粒子の井戸到達と判定した。また、遅延係数は 1、時間ステップは 1 日とした。表-2 に RWPT に用いたパラメータを記す。

前述のように、不均質地盤を数値的に表現するため、透水係数分布を地球統計学的に生成し、有限要素ごとに生成した値を与えている。透水性の差異が溶質粒子の分散挙動に及ぼす物質輸送モデル<sup>7)</sup>として本研究では、

$$\mu_1 = \frac{\sqrt{D_1}}{\sqrt{D_1} + \sqrt{D_2}} \quad (12)$$

$$\mu_2 = \frac{\sqrt{D_2}}{\sqrt{D_1} + \sqrt{D_2}} \quad (13)$$

を採用した<sup>20)</sup>。ここに、 $\mu_1$  は粒子が存在する要素内に留まる確率、 $\mu_2$  は粒子が隣接する要素へ移行する確率、 $D_1$  と  $D_2$  は各要素の分散係数である。

## (2) 集粒域推定方法

30 種類ある透水係数分布のうち、ある 1 つのリアライゼーションに対して、揚水井  $W_0$  に  $0.8 \text{ day}^{-1}$ 、揚水井  $W_2$  に  $0.4 \text{ day}^{-1}$  の揚水量条件を与えた場において、純粋移流時間 1000 日の集水域分布を図-7 に点線で示す。同一の場にて、青と緑の丸印の位置にある粒子の移流分散挙動を RWPT にて追跡するとそれぞれ揚水井  $W_0$  と揚水井  $W_2$  に到達する。一方、赤丸の位置にある粒子は揚水井に到達することなく最終的には領域外へ移行する。紫の丸印の位置には粒子が 2 つ存在し、1 つの粒子は領域外へ移行し、他方の粒子は揚水井  $W_2$  に到達する。このように揚水井への粒子到達の有無は必ずしも初期位置で決まるとは限らず、揚水量や透水係数分布に依存して到達の可能性は変動する。そこで、RWPT による移流分散解析を地下水揚水と連携すべく、一か所からの揚水を考慮した井上らの方法<sup>8)</sup>を拡張することで、同時に複数箇所から揚水がある場に対して

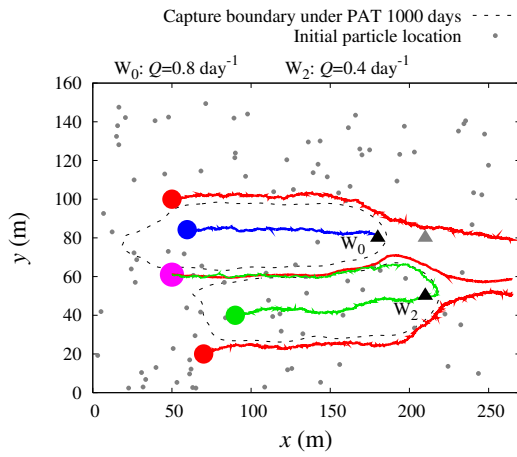


図-7 集粒域推定における粒子初期配置と軌跡。紫の丸印の位置には粒子が2つ存在する。

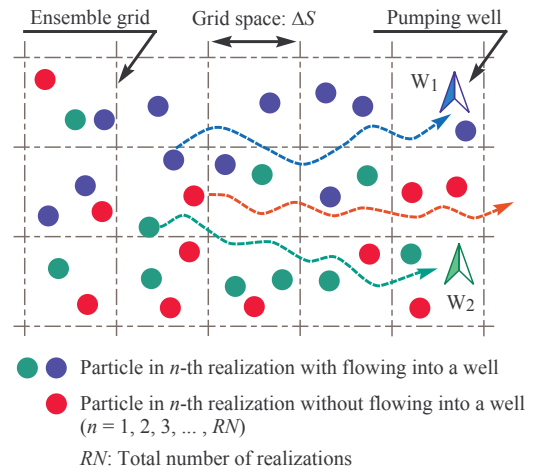


図-8 集粒域確率の推定方法

確率的に集粒域を推定する方法を考案した。

まず、図-7に示すように、一様乱数により対象領域全体に  $N$  個の粒子をランダム配置させ、RWPT 解析の粒子群の初期位置に設定した。このとき粒子の初期位置として、 $x = 250$  m 以上の区間に存在する粒子は揚水井に到達しないことが明白であるため、ランダム初期配置の対象外とした。次に、すべての粒子が揚水井に到達するか、領域外へ移行するまで、流速分布に従って全粒子の移流分散挙動を RWPT により解析した。地球統計学的に生成した 30 種類の透水場に対して、ランダム初期配置と RWPT の過程を経ることで、 $30 \times N$  個の粒子すべてを揚水井へ到達する粒子と領域外へ移動する粒子に区別した。便宜上、揚水井へ到達する粒子を到達粒子、領域外へ移動する粒子を非到達粒子と記す。図-8に集粒域の推定方法を模式的に表し、到達粒子を青または緑、非到達粒子を赤で表す。また、到達粒子の中で、最終的に到達した井戸を区別できるように、到達粒子は揚水井  $W_i$  に属すると見なして、二値関数

$$\chi_{W_i}(p_j) = \begin{cases} 1 & \text{if } p_j \in W_i \\ 0 & \text{if } p_j \notin W_i \end{cases} \quad (14)$$

を定義した。ここに、 $\chi_{W_i}(p_j)$  は粒子  $p_j$  が揚水井  $W_i$  への到達粒子であれば 1、非到達粒子であれば 0 となる関数である。

続いて、任意の地“点”ではなく、任意の“面”から放出される汚染物質の揚水井への到達可能性を吟味できるように、有限要素とは別にアンサンブル格子を導入した。図-8に示すように、 $\Delta S$  間隔のアンサンブル格子で領域全体を覆い、初期に格子内に存在する粒子の総数で到達粒子数を除すことにより、各格子の集粒域確率と定義した。すなわち、任意の格子  $\lambda$  が既定の揚

水井  $W_i$  の集粒域となる確率  $G_{p,\lambda}^{W_i}$  を

$$G_{p,\lambda}^{W_i} = \frac{\sum_{j=1}^{NP_{G_\lambda}} \chi_{W_i}(p_j)}{NP_{G_\lambda}}, \quad \lambda = 1, 2, \dots, \Lambda \quad (15)$$

として定義する。ここに、 $NP_{G_\lambda}$  は任意の格子  $\lambda$  に初期配置された粒子数、 $\Lambda$  は総格子数である。これにより当該格子が集粒域となる確率を 0 から 1 の範囲で求めることができ、すべての格子に対して揚水井  $W_i$  の集粒域確率  $G_{p,\lambda}^{W_i}$  を導出することにより、集粒域確率を空間全体で推定できる。

さらには、

$$G_{p,\lambda}^W = \frac{\sum_{i=1}^{NW} \left( \sum_{j=1}^{NP_{G_\lambda}} \chi_{W_i}(p_j) \right)}{NP_{G_\lambda}}, \quad \lambda = 1, 2, \dots, \Lambda \quad (16)$$

により、任意の格子  $\lambda$  がいずれかの揚水井の集粒域となる確率を求めることができる。ここに、 $NW$  は稼働している揚水井の数である。たとえば、図-8の左上の格子では、個別の揚水井に対する集粒域確率  $G_{p,\lambda}^{W_1}$  と  $G_{p,\lambda}^{W_2}$  はそれぞれ  $\frac{1}{3}$ 、 $\frac{1}{3}$  であり、いずれかの揚水井の集粒域となる確率  $G_{p,\lambda}^W$  は  $\frac{1+1}{3}$  となる。左下の格子では、 $G_{p,\lambda}^{W_1}$  と  $G_{p,\lambda}^{W_2}$  はそれぞれ  $\frac{0}{2}$ 、 $\frac{1}{2}$  であり、 $G_{p,\lambda}^W$  は  $\frac{0+1}{2}$  となる。アンサンブル格子の間隔  $\Delta S$  は言わば空間の解像度であり、任意に設定できる柔軟さを有しているものの、高い解像度を求めると必要な粒子総数も莫大になる。本研究では、初期粒子総数  $N$  を  $5 \times 10^4$ 、アンサンブル格子間隔  $\Delta S$  を 2 m とすることで、確率上、100 個以上の粒子が単一の格子内に存在するように設定した。なお、移流卓越の場である点と、淀み点の部分に粒子の初期位置がランダム決定される可能性は小さい点を考慮して、分子拡散の影響は加味していない。



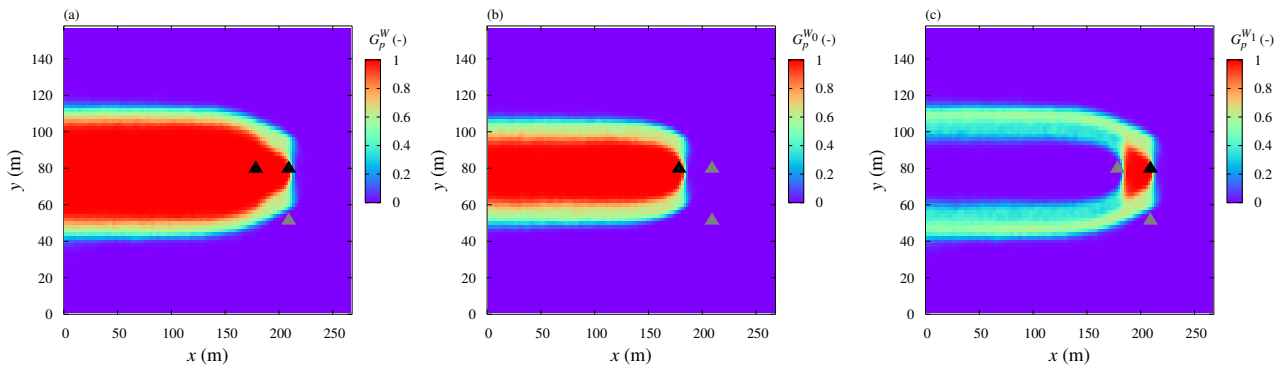


図-9 集粒域の空間分布：(a) 揚水井  $W_0$  または  $W_1$  へ到達する集粒域，(b) 揚水井  $W_0$ ，(c) 揚水井  $W_1$  へ到達する集粒域。揚水量は  $W_0$  にて  $0.8 \text{ day}^{-1}$ ， $W_1$  にて  $0.4 \text{ day}^{-1}$  である。

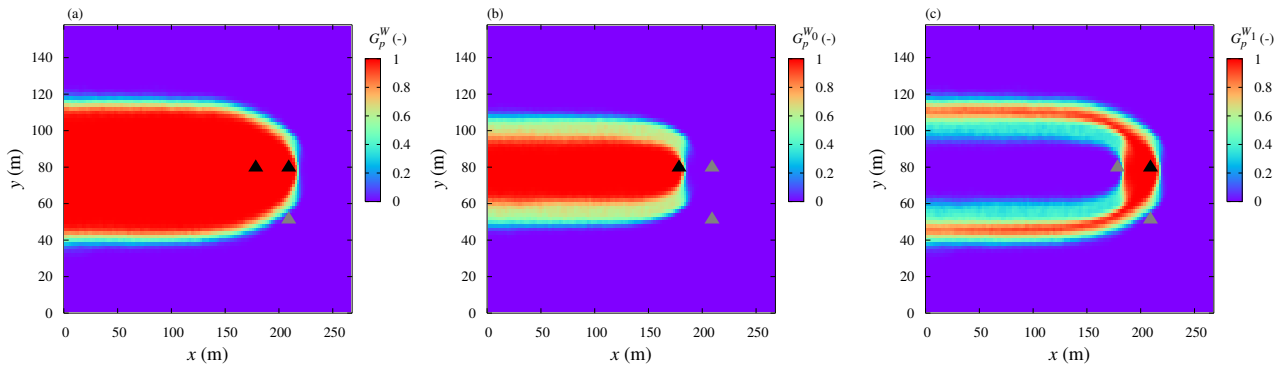


図-10 集粒域の空間分布：(a) 揚水井  $W_0$  または  $W_1$  へ到達する集粒域，(b) 揚水井  $W_0$ ，(c) 揚水井  $W_1$  へ到達する集粒域。揚水量は  $W_0$  にて  $0.8 \text{ day}^{-1}$ ， $W_1$  にて  $0.8 \text{ day}^{-1}$  である。

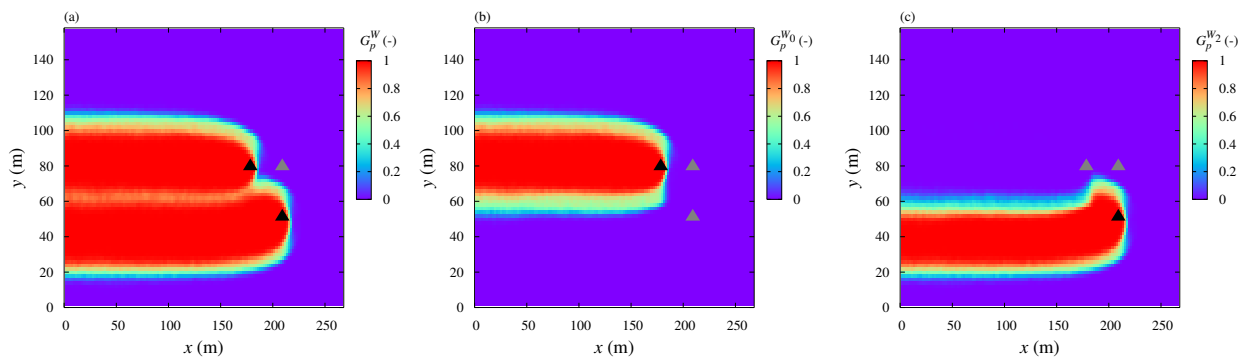


図-11 集粒域の空間分布：(a) 揚水井  $W_0$  または  $W_1$  へ到達する集粒域，(b) 揚水井  $W_0$ ，(c) 揚水井  $W_1$  へ到達する集粒域。揚水量は  $W_0$  にて  $0.8 \text{ day}^{-1}$ ， $W_2$  にて  $0.4 \text{ day}^{-1}$  である。

### (3) 集粒域の空間分布

揚水井  $W_0$  の揚水量を  $0.8 \text{ day}^{-1}$ ，揚水井  $W_1$  の揚水量を  $0.4 \text{ day}^{-1}$  とした透水場に対する集粒域の推定結果を図-9に示す。図-9(a)は揚水井  $W_0$  または  $W_1$  へ到達する集粒域分布であり，図-9(b)と(c)はそれぞれ揚水井  $W_0$ ，揚水井  $W_1$  単独の集粒域分布である。各格子の色が赤いほど当該格子からリリースされた粒子は揚水井に取り込まれる確率が高く，紫になるほど低確率であることを表している。集水域内にある粒子は比較的高い確率で揚水井に到達する<sup>8)21)</sup>ため，集水域の形状と集粒域の高確率部分の形状は類似する傾向にある。図-3に示す集水域形状と図-9に示す集粒域の高確率部分の形状は特に， $y$  軸方向の規模や揚水井周辺にお

いて似通った形状となっている。一方で，非ゼロ確率となる格子全体を1つの集粒域と見た場合，明らかに集水域よりも集粒域の方が面積的に大きくなる。この点は $y$  軸方向の規模に顕著に現れており，集水域境界の外側に位置する格子からの粒子リリースであっても，揚水井に到達するいくらかの可能性を有していることを示唆している。これは溶質の分散過程に起因する結果であり，不規則に粒子位置を変えながら移行する過程で集水域の外側から境界を越えて内側へ流入し，最終的には揚水井に達するためである。

図-9(c)の分布は特徴的であり，揚水井  $W_1$  は  $W_0$  の下流側に位置するため，揚水井  $W_0$  の集粒域を取り囲むように  $W_1$  の集粒域は形成されることになる。その

ため、揚水井  $W_0$  に到達しない位置にある溶質であっても、たとえば、図-9 (b) において確率ゼロとなる格子であっても、揚水井  $W_1$  には粒子到達する可能性があり、地下水揚水にて揚水井を複数設ける意義や効果を表している。そこで、揚水井  $W_0$  の揚水量を  $0.8 \text{ day}^{-1}$  に保ったまま、揚水井  $W_1$  の揚水量を  $0.8 \text{ day}^{-1}$  に倍増した状況に対する集粒域の推定結果を図-9 と同様の並びで図-10 に示す。図-10 (a) を見ると、高確率領域は図-9 (a) よりも明らかに増加しており、全体的に 1 に近い高確率領域の占める割合も増加している。図-10 (b) に示す揚水井  $W_0$  の集粒域分布には変動がない一方で、図-10 (c) の揚水井  $W_1$  が発揮する回収能力が上昇していることがわかる。揚水量の増加は集水域規模の増加につながるため、連動してアンサンブル格子内の到達粒子数も増えることになると考えられる。

図-11 には、揚水井  $W_0$  の揚水量を  $0.8 \text{ day}^{-1}$  に保ったまま、揚水井  $W_2$  にて  $0.4 \text{ day}^{-1}$  の揚水量条件を課した場に対する集粒域の推定結果を示す。対象場全体に負荷する揚水量条件、ならびに、揚水井  $W_0$  の条件は、図-9 と図-11 は同じである。しかしながら、2 つ目の揚水井の位置が変わることによって、集粒域の形状は全く異なることがわかる。図-9 や図-10 と異なり、揚水井  $W_0$  または  $W_1$  へ到達する集粒域において、 $y$  座標が  $60 \text{ m}$  付近の領域では周辺部よりも到達確率が低くなっている。これは図-5 の集水域分布に示すように、各揚水井の集水域が隣り合う形で分布しているため、集水域同士に挟まれる部分は“非”集水域となる。したがって、非集水域に位置する格子からリリースされる粒子のいくつかは非到達粒子となり、それに応じた集粒域確率として図-11 (a) に表されている。この点は図-7 の紫の丸印の位置にある 2 つの粒子が移流分散過程の結果、全く異なる位置に到達する事実と対応している。

図-9 と図-10 に示すように、揚水量と集粒域は密接に関係し、揚水量に応じて高確率となる格子の占有面積は変動する。揚水量と集粒域確率を吟味するため、いずれかの揚水井に到達する集粒域確率  $G_p^W$  のうち、集粒域確率  $G_p^W = 1$  となる格子の総面積を  $A_c$  とし、 $G_p^W \neq 0$  かつ  $G_p^W \neq 1$  となる格子の総面積を  $A_u$  とし、該当格子をすべて抽出し、面積  $A_u$  と面積  $A_c$  の比

$$UF = \frac{A_u}{A_c} \quad (17)$$

を不確か係数  $UF$ <sup>8)</sup> として評価した。揚水井  $W_1$  の揚水量を種々に変えることにより、集粒域確率  $G_p^W = 1$  となる面積  $A_c$ 、ならびに、 $0 < G_p^W < 1$  となる面積  $A_u$  の変化を図-12 に示す。また、不確か係数  $UF$  と揚水量の関係についても図-12 に併記する。揚水量の増加とともに  $G_p^W = 1$  となる面積は線形的に増える傾向にあり、 $0 < G_p^W < 1$  となる面積と不確か係数は減少する傾向

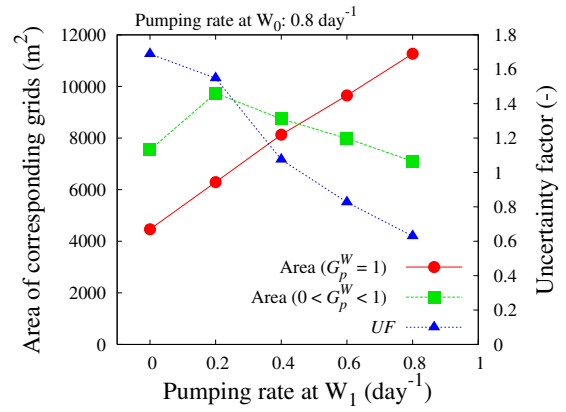


図-12 揚水井  $W_1$  の揚水量と集水域面積、不確か係数の関係

にある。これは対象領域全体として、揚水井への粒子到達の確実性が上昇していることを示唆している。揚水量が増加すると、揚水井へ向かう流速ベクトル成分、特に  $y$  方向成分は大きくなる。そのため、低い揚水量の場合に集水域の境界付近でランダムに外側と内側を往来する粒子に対して、高い揚水量の場合には一旦集水域の内側に入り込むと揚水井へ向かう流速成分によって揚水井に引き込まれやすいと推量される。その結果、揚水量の高い場合ほど、各格子の集粒域確率の上昇と連動して不確か係数は低下すると考えられる。

## 5. 複数の揚水井に対する到達時間推定

### (1) 到達時間の空間分布の推定方法

集粒域の空間分布は任意の場所にある汚染物質を揚水できる可能性を示す情報となる一方で、揚水井に到達するまでの所要時間については未知のままである。この点に対応できるように、RWPT の実行時にすべての粒子に対して、到達粒子、非到達粒子に関わらず、それぞれ揚水井への到達時間、領域外への到達時間を記憶した。これにより粒子  $p_j$  ごとに初期位置から井戸への到達、あるいは、領域外への移行に要する到達時間  $t_{p_j}$  が得られ、任意格子  $\lambda$  に初期配置された粒子群が揚水井  $W_i$  へ到達する平均到達時間  $G_{t,\lambda}^{W_i}$  を

$$G_{t,\lambda}^{W_i} = \frac{\sum_{j=1}^{NP_{G_\lambda}} \chi_{W_i}(p_j) \cdot t_{p,j}}{NP_{G_\lambda}}, \quad \lambda = 1, 2, \dots, \Lambda \quad (18)$$

として定義できる。ここに、 $NP_{G_\lambda}$  は式 (15) と同様、任意の格子  $\lambda$  に初期配置された粒子数である。

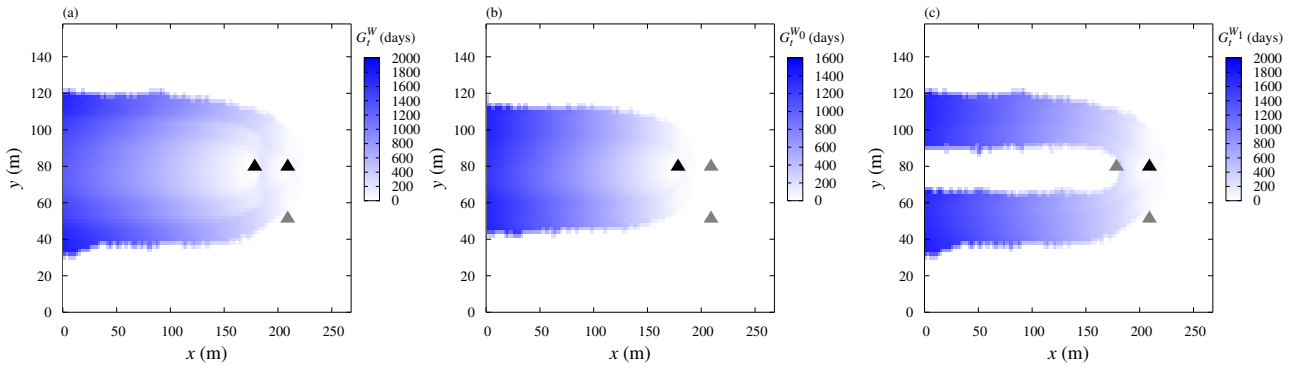


図-13 平均到達時間の空間分布：(a)  $W_0$  または  $W_1$  への到達時間分布，(b)  $W_0$ ，(c)  $W_1$  への到達時間分布．揚水量は  $W_0$  にて  $0.8 \text{ day}^{-1}$ ， $W_1$  にて  $0.4 \text{ day}^{-1}$  である．

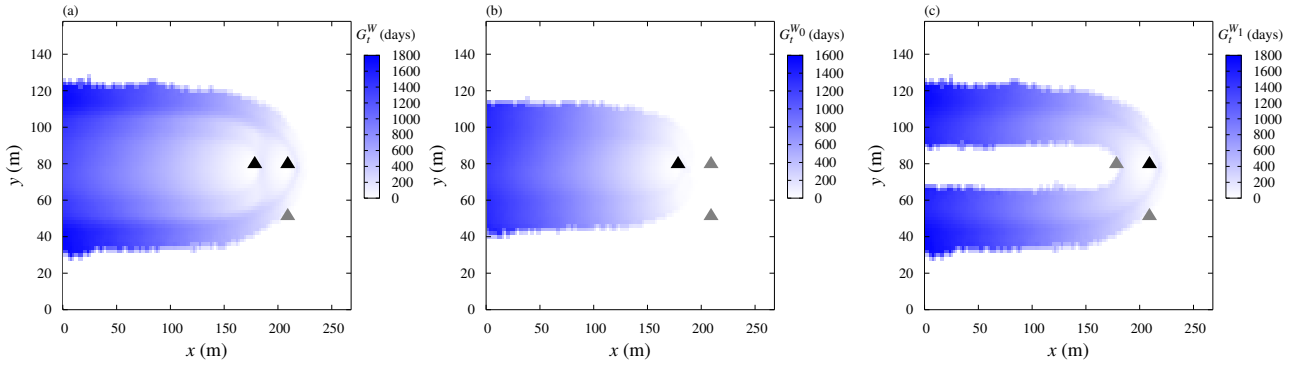


図-14 平均到達時間の空間分布：(a)  $W_0$  または  $W_1$  への到達時間分布，(b)  $W_0$ ，(c)  $W_1$  への到達時間分布．揚水量は  $W_0$  にて  $0.8 \text{ day}^{-1}$ ， $W_1$  にて  $0.8 \text{ day}^{-1}$  である．

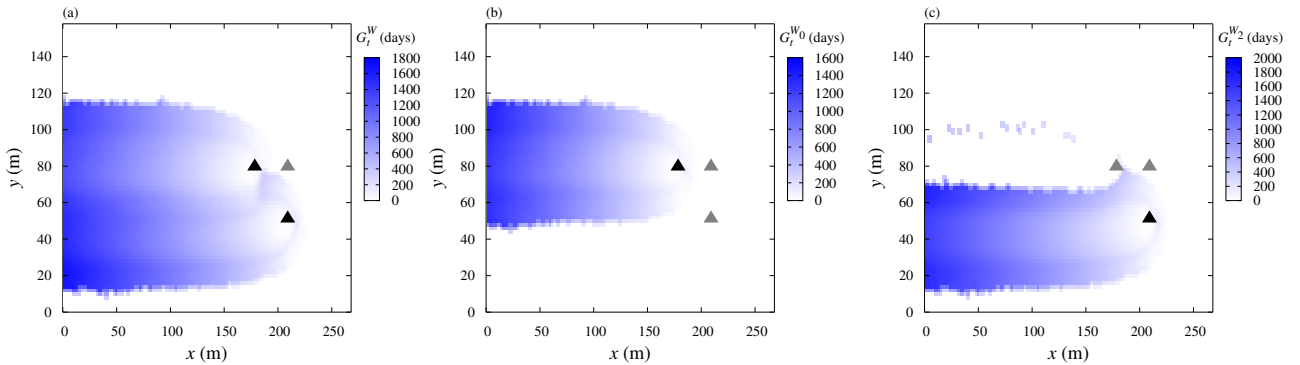


図-15 平均到達時間の空間分布：(a)  $W_0$  または  $W_1$  への到達時間分布，(b)  $W_0$ ，(c)  $W_1$  への到達時間分布．揚水量は  $W_0$  にて  $0.8 \text{ day}^{-1}$ ， $W_2$  にて  $0.4 \text{ day}^{-1}$  である．

また，

$$G_{t,\lambda}^W = \frac{\sum_{i=1}^{NW} \left( \sum_{j=1}^{NP_{G_\lambda}} \chi_{W_i}(p_j) \cdot t_{p,j} \right)}{\sum_{i=1}^{NW} \left( \sum_{j=1}^{NP_{G_\lambda}} \chi_{W_i}(p_j) \right)}, \quad \lambda = 1, 2, \dots, \Lambda \quad (19)$$

により，任意の格子  $\lambda$  に初期配置された粒子群がいずれかの揚水井に達する平均到達時間を算定できる．ここに， $NW$  は稼働している揚水井の数である．平均到達時間の推定において，式 (18) と式 (19) の分母がゼロとなる場合，つまり格子内に到達粒子が存在しない場

合には当該格子を到達時間推定の対象から外した．

## (2) 平均到達時間の空間分布

図-13 には，揚水井  $W_0$  の揚水量を  $0.8 \text{ day}^{-1}$ ，揚水井  $W_1$  の揚水量を  $0.4 \text{ day}^{-1}$  とした平均到達時間の空間分布を示す．一般的に，平均到達時間の長い地点は移流時間の長さに対応するため，揚水井の周辺では短い平均到達時間となる一方で，揚水井からの幾何距離が長い上流側ほど平均到達時間は長くなる．これは移流分散現象を考えると自然な結果であり，分布として妥当と判断される．揚水井  $W_0$  の揚水量を  $0.8 \text{ day}^{-1}$  に固定して，揚水井  $W_1$  の揚水量を  $0.8 \text{ day}^{-1}$  とした場に対

する平均到達時間の空間分布を図-14に示す。図-9と図-10の集粒域分布の結果とは異なり、揚水量を倍増させることによる顕著な変化は見られない。前述のように、揚水量を増すことによって、非ゼロの集粒域確率となる格子面積は増えるものの、平均到達時間は格子の位置と揚水井までの流速分布に依存する物理量である。揚水井に近い地点では流速ノルムの増加によって、平均到達時間の減少度合いは揚水量に敏感に反応する一方で、全体的には平均到達時間の変動量はあまり大きくならない。

揚水量  $0.4 \text{ day}^{-1}$  の条件を揚水井  $W_2$  に課した場に対する平均到達時間の結果を図-15に示す。集粒域の結果と同じく、空間分布自体は揚水位置の変化により大きく変化することがわかる。溶質の到達時間は任意の地点と揚水井の幾何距離に依存するのではなく、移流時間に依存するため、流速ノルムの小さい領域ほど到達時間は長くなる。領域全体として、揚水井を増やすことで汚染物質を揚水井へ溶質を引き込む確率は高まるものの、揚水井の位置や揚水量によっては、揚水井同士の間を通過して揚水井に到達しない領域や到達時間が長い領域が存在することを示している。これは図-7に例示したように、各揚水井の集水域が互いに影響を及ぼし合っていることが根底にあると言える。

本手法により推定した、3か所からの揚水条件下にある集粒域と平均到達時間の結果をそれぞれ図-16と図-17に示す。揚水井  $W_0, W_1, W_2$  の揚水量はそれぞれ  $0.8 \text{ day}^{-1}, 0.4 \text{ day}^{-1}, 0.4 \text{ day}^{-1}$  である。双方の図に示すように、本論文にて提案した手法は、揚水井の数や場所に関わらず、集粒域と平均到達時間の空間分布を同時に推定できることがわかる。

## 6. 結論

本研究では、不均質帯水層内に複数存在する揚水井からの地下水揚水に伴う集水域境界を簡便に推定する方法を案出した。また、複数ある揚水井への粒子到達領域を確率的に推定する方法と揚水井への粒子到達時間の空間分布を推定する方法について考案した。ランダムウォーク粒子追跡法を応用した本研究から得られた知見は以下の通りである。

1. 後方粒子追跡法とナンバリング付き粒子挿入法<sup>19)</sup>を適用して、複数の透水係数分布に対する集水域形状を求めた。任意の透水係数分布について得られた粒子群分布を基準として、他の透水係数分布に対する粒子群分布の座標情報を統合することで、代表的な集水域境界を求める方法を提示した。
2. 任意幅をもつアンサンブル格子を導入して、到達粒子数と初期に格子に存在する粒子総数の比を各

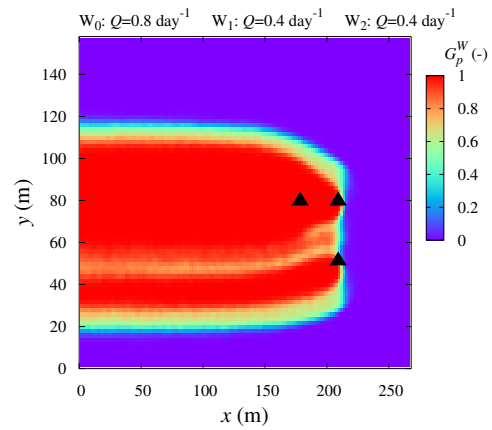


図-16 3か所からの揚水条件下にある集粒域分布

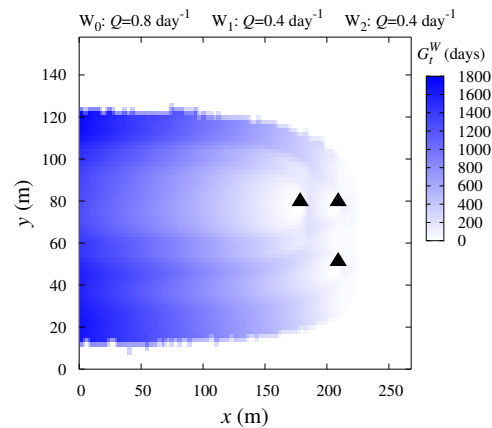


図-17 3か所からの揚水条件下にある平均到達時間分布

格子の集粒域確率と定義し、任意の格子が揚水井の集粒域となる確率  $G_p^W$  を空間全体で推定する方法を考案した。結果として、揚水量や揚水位置の差異に応じた集粒域の確率分布を適切に表現できた。

3. 地球統計学的に生成した30種類の不均質透水場を対象に、揚水量と揚水位置を変えて集粒域確率を推定した結果、 $0 < G_p^W < 1$  と  $G_p^W = 1$  の面積比は揚水量の増加とともに減少することがわかった。
4. 任意の格子から揚水井へ到達するまでの粒子のトラベルタイムを記憶し、到達粒子数で除すことで各格子の平均到達時間  $G_t^W$  と定義し、平均到達時間を空間全体で推定する方法を考案した。
5. 本提案手法は、単一の揚水井に対して、あるいは、複数の揚水井に対して集粒域と平均到達時間の空間分布を同時に推定できる点に特徴がある。

日当たりの揚水時間制限のあるサイトでは、地下水流は非定常となり、溶質輸送にも影響を及ぼす。また、汚染の状況に依存して複数ある揚水井の稼働状態は個々に異なるため、集粒域分布や到達時間分布を推定するのは一層複雑になると考えられる。本手法の最適揚水量の設定や目的に応じた最適観測点の探索への応用を含めて、これらの点は今後の課題と考えられる。

謝辞: 本研究を遂行するにあたり, オランダ・デルフト工科大学の Uffink 博士にはフィールドデータを提供していただき, 論文全体を通して貴重な助言をいただいた。また, 神戸大学農学部の小尾泰輝氏には有益な意見をいただいた。ここに記して深謝の意を表する。

#### 参考文献

- 1) U.S. Environmental Protection Agency: *Pump-and-treat ground-water remediation: a guide for decision makers and practitioners*, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EPA/625/R-95/005, 74p., 1996.
- 2) Boice, R.: Extraction rate problems lead to increased costs at pump-and-treat facilities, *Ground Water Monitor. Remed.*, 22, pp.76–81, 2002.
- 3) Tompson, A.F.B.: Numerical simulation of chemical migration in physically and chemically heterogeneous porous media, *Water Resour. Res.*, 29(11), pp.3709–3726, 1993.
- 4) Brusseau, M.L. and Srivastava, R.: Non-ideal transport of reactive solutes in heterogeneous porous media, 2. Quantitative analysis of the Borden natural-gradient field experiment, *J. Contam. Hydrol.*, 28, pp.115–155, 1997.
- 5) Feyen, L., Ribeiro Jr., P.J., Gómez-Hernández, J.J., Beven, K.J. and De Smedt, F.: Bayesian methodology for stochastic capture zone delineation incorporating transmissivity measurements and hydraulic head observations, *J. Hydrol.*, 271, pp.156–170, 2003.
- 6) Tosco, T., Di Molfetta, A. and Sethi, R.: Automatic delineation of capture zones for pump and treat systems: a case study in Piedmont, Italy, *Ground Water Monitor. Remed.*, 30(2), pp.46–52, 2010.
- 7) Uffink, G.J.M.: Analysis of dispersion by the random walk method, *Ph.D Dissertation, Delft University of Technology*, 150p., 1990.
- 8) 井上一哉・倉澤智樹・田中勉: ランダムウォーク粒子追跡法による取水井の溶質捕獲領域とトラベルタイム推定, 土木学会論文集 B1 (水工学), 71(4), pp.1.229–1.234, 2015.
- 9) Turcke, M.A. and Kueper, B.H.: Geostatistical analysis of the Borden aquifer hydraulic conductivity field, *J. Hydrol.*, 178, No.1-4, pp.223–240, 1996.
- 10) Hubbard, S.S. and Rubin, Y.: Hydrogeological parameter estimation using geophysical data: a review of selected techniques, *J. Contam. Hydrol.*, 45(1-2), pp.3–34, 2000.
- 11) Ghori, S.G., Heller, J.P. and Singh, A.K.: An efficient method of generating random permeability fields by the source point method, *Math. Geol.*, 25(5), pp.559–572, 1993.
- 12) Deutsch, C.V. and Journel, A.G.: *GSLIB: Geostatistical software library and user's guide*, Oxford University Press, 340p., 1992.
- 13) Bear, J.: *Dynamics of fluids in porous media*, Dover Publications, 764p., 1972.
- 14) Moutsopoulos, K.N., Gemtzi, A. and Tsihrintzis, V.A.: Delineation of groundwater protection zones by the backward particle tracking method: theoretical background and GIS-based stochastic analysis, *Environ. Geol.*, 54(5), pp.1081–1090, 2009.
- 15) van Leeuwen, M., Butler, A.P., te Stroet, C.B.M. and Tompkins, J.A.: Stochastic determination of well capture zones conditioned on regular grids of transmissivity measurements, *Water Resour. Res.*, 36(4), pp.949–957, 2000.
- 16) Guadagnini, A. and Franzetti, S.: Time-related capture zones for contaminants in randomly heterogeneous formations, *Ground Water*, 37(2), pp.253–260, 1999.
- 17) Nahum, A. and Seifert, A.: Technique for backward particle tracking in a flow field, *Phys. Rev. E*, 74, 016701, 2006.
- 18) Zheng, C. and Bennett, G.D.: *Applied contaminant transport modeling*, Wiley Interscience, 621p., 2002.
- 19) 井上一哉・松山紗希・田中勉: 粒子追跡法を用いた不均質帯水層における揚水井の集水域と汚染物質流入確率のアンサンブル推定, 土木学会論文集 A2 分冊 (応用力学), 70(2), pp.1.51–1.62, 2014.
- 20) Hoteit, H., Mose, R., Younes, A., Lehmann, F. and Ackerer, Ph.: Three-dimensional modeling of mass transfer in porous media using the mixed hybrid finite elements and the random-walk methods, *Math. Geol.*, 34(4), pp.435–456, 2002.
- 21) 井上一哉・光田和希・Uffink, G.J.M.・田中勉: 粒子追跡法と時間・空間モーメント法による取水井の物質回収評価, 応用力学論文集, 土木学会, 13, pp.847–858, 2010.

(2015. 6. 23 受付)

## Estimating spatial distributions of solute capture zone and solute travel time in multi-pumping wells in heterogeneous aquifer using random walk particle tracking

Kazuya INOUE and Tsutomu TANAKA

This paper presented a methodology for delineating capture zones of multi-pumping wells using backward particle tracking in geostatistically generated hydraulic conductivity fields based on field data. Under multi-pumping conditions, random walk particle tracking was applied to estimate spatial probability distributions of introduced ensemble cells having the probability that particles within cells reach the pumping wells. Ensemble of the particle evolutions toward pumping wells from a cell was also proposed as the ensemble travel-times and was presented another aspect relevant to spatial distributions of travel-times of cells. Proposed methodologies provided some proper outcomes corresponding to the pumping rates and pumping locations.