

PDF issue: 2025-07-11

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

<mark>(Citation)</mark> 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¹·田中 勉²

 ¹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
 ²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¹⁾.地下水揚水にて汚染物質を回収でき る空間的拡がりは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²⁾.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³⁾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⁴⁾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 5)6) 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 7)8). 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¹⁾,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270m×160m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⁷⁾を参考に,単位 面積・単位深さあたり、0.8 dav⁻¹の揚水量を設定した。 便宜上, (180,80) に位置する揚水井を W₀ 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 W₁ と W₂ 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⁷⁾.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 $\langle \ln K \rangle$ 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、〈·〉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⁹⁾した.また、文献⁷⁾¹⁰⁾を参 考に、相関長入を13m、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.

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

ここに、 γ 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4m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10³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¹¹⁾,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¹²⁾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 のことを不均質度と称する.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¹³⁾.

$$\nabla \cdot (K(\boldsymbol{x})\nabla h) = Q(\boldsymbol{x}) \tag{2}$$

ここに、hはピエゾ水頭、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(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 m とx = 270 m の地点を第1種境界 条件に設定し、文献⁷⁾を参考にして 0.05 の動水勾配を 与えた.また、y = 0 m とy = 160 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,

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

により流速分布を求めた.ここに、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.



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¹⁴⁾.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¹⁵⁾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¹⁶⁾.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 ることで集粒域の時間変動を追跡することができる¹⁷⁾. 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

 $X_{p,i}(t + \Delta t) = X_{p,i}(t) - v_i(\vec{X}_p(t))\Delta t, \quad i = 1,2$ (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, Δt 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 ¹⁸⁾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¹⁹⁾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,揚水ポイント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 1×10³ 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ー覧

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)	4×10^4
時間増分 Δt (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0.1m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¹⁹⁾.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¹⁹⁾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 day⁻¹, 0.4 day⁻¹の揚水量を設定 し、井上ら¹⁹⁾の手法を拡張して集水域の拡がりを推定 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¹⁹⁾.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 W₀ と W₁ 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



The nearest particle from (1) particle at each realization #m Particle number within particles at corresponding realization

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、

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

DM

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¹⁹⁾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粒 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 W₀ と W₂ 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 ⁵⁾⁶⁾ 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 day⁻¹, 0.4 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 ロットおり,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 Wo と W1 にてそれぞれ 単位面積・単位深さあたり 0.8 day⁻¹, 0.4 day⁻¹ の揚水 量を設定した際の揚水井 W1 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 W₀ と W₁ 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 W₀, ならびに, 揚水井 W₁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粒域推定

(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¹⁾.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⁷⁾(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,

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

にて表される³⁾⁷⁾.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, Δt は時 間増分, Ξ_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,

$$A_{i} = \frac{1}{R(\vec{X}_{p}(t))} \left(v_{i}(\vec{X}_{p}(t)) + \sum_{j=1}^{2} \frac{\partial D_{ij}}{\partial x_{j}} (\vec{X}_{p}(t)) + \frac{1}{n_{p}} \sum_{j=1}^{2} D_{ij} \frac{\partial n_{p}}{\partial x_{j}} \right), \quad i = 1, 2$$

$$(7)$$

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,

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

にて表される¹⁸⁾. ここに、 α_L は縦分散長、 α_T は横分散長、|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、

$$A_{i} = \frac{v_{i}(\vec{X}_{p}(t)) + \sum_{j=1}^{2} \frac{\partial D_{ij}}{\partial x_{j}} (\vec{X}_{p}(t))}{R(\vec{X}_{p}(t))}, \quad i = 1, 2$$
(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、

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

$$\Gamma = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}$$
(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一覧

縦・横分散長 α_L, α_T (m)	0.02, 0.005
遅延係数 R (-)	1.0
時間ステップ Δt (day)	1.0
井戸半径 r (m)	0.3
粒子数 N	5×10^4
アンサンブル格子間隔 ΔS (m)	2.0

にて表される.ここに、 α_L は縦分散長、 α_T は横分散 長であり、文献⁷⁾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⁷⁾として本研究では,

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

$$\mu_2 = \frac{\sqrt{D_2}}{\sqrt{D_1} + \sqrt{D_2}} \tag{13}$$

を採用した²⁰⁾. ここに, μ_1 は粒子が存在する要素内に 留まる確率, μ_2 は粒子が隣接する要素へ移行する確率, $D_1 \ge D_2$ 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 day⁻¹、揚水 井 W_2 に0.4 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 W₀と揚水井 W₂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 W2 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, ーか所からの揚水を考慮した井上らの方法⁸⁾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.

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

$$\chi_{W_i}(p_j) = \begin{cases} 1 & \text{if } p_j \in W_i \\ 0 & \text{if } p_j \notin W_i \end{cases}$$
(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, ΔS 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 λ が既定の揚



水井 \mathbf{W}_i の集粒域となる確率 $G^{W_i}_{p,\lambda}$ を

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

として定義する.ここに、 $NP_{G_{\lambda}}$ は任意の格子 λ に初 期配置された粒子数、 Λ 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,

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

により,任意の格子 λ 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 1/3, 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 $rac{0}{2}$, $rac{1}{2}$ であり, $G_{p,\lambda}^W$ は $rac{0+1}{2}$ となる.ア ンサンブル格子の間隔 ΔS 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 5×10^4 、アンサンブル格 子間隔 ΔS 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 W₀ または W₁ へ到達する集粒域, (b) 揚水井 W₀, (c) 揚水井 W₁ へ到達する集粒域. 揚水量は W₀ にて 0.8 day⁻¹, W₁ にて 0.4 day⁻¹ である.



図-10 集粒域の空間分布: (a) 揚水井 W₀ または W₁ へ到達する集粒域, (b) 揚水井 W₀, (c) 揚水井 W₁ へ到達する集粒域. 揚水量は W₀ にて 0.8 day⁻¹, W₁ にて 0.8 day⁻¹ である.



図-11 集粒域の空間分布: (a) 揚水井 W₀ または W₁ へ到達する集粒域, (b) 揚水井 W₀, (c) 揚水井 W₁ へ到達する集粒域. 揚水量は W₀ にて 0.8 day⁻¹, W₂ にて 0.4 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 day^{-1} , 揚水井 W_1 の揚水 量を 0.4 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⁸⁾²¹⁾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 W₁は W₀の 下流側に位置するため, 揚水井 W₀の集粒域を取り囲 むように W₁の集粒域は形成されることになる.その ため,揚水井 W₀ 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 W₁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 W₀の揚水量を 0.8 day⁻¹ に保ったまま,揚水井 W₁の揚水量を 0.8 day⁻¹ に保ったまま,揚水井 W₁の揚水量を 0.8 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 W₀の集粒域分布には変動がない一方で, 図-10(c)の揚水井 W₁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 W₀の揚水量を 0.8 day⁻¹ に保っ たまま,揚水井 W₂ にて 0.4 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 W₀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W0またはW1へ到達する集粒域において, y座標が 60m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 として、該当 格子をすべて抽出し、面積 A_u と面積 A_c の比

$$UF = \frac{A_u}{A_c} \tag{17}$$

を不確実係数 $UF^{8)}$ 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、不確実係数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、 $0 < G_p^W < 1$ となる面積と不確実係数は減少する傾向



図-12 揚水井 W1 の揚水量と集水域面積,不確実係数の関係

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のっ て揚水井に引き込まれやすいと推量される.その結果, 揚水量の高い場ほど,各格子の集粒域確率の上昇と連 動して不確実係数は低下すると考えられる.

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 λ 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

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

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 λ 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) W₀ または W₁ への到達時間分布, (b) W₀, (c) W₁ への到達時間分布. 揚水量は W₀ に て 0.8 day⁻¹, W₁ にて 0.4 day⁻¹ である.



図-14 平均到達時間の空間分布: (a) W₀ または W₁ への到達時間分布, (b) W₀, (c) W₁ への到達時間分布. 揚水量は W₀ に て 0.8 day⁻¹, W₁ にて 0.8 day⁻¹ である.



図-15 平均到達時間の空間分布: (a) W₀ または W₁ への到達時間分布, (b) W₀, (c) W₁ への到達時間分布. 揚水量は W₀ に て 0.8 day⁻¹, W₂ にて 0.4 day⁻¹ である.

また,

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

により,任意の格子 λ 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 day⁻¹、揚水 井 W_1 の揚水量を 0.4 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 流時間の長さと対応するため、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 day⁻¹ に固 定して、揚水井 W_1 の揚水量を 0.8 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 day⁻¹ の条件を揚水井 W₂ 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 day⁻¹, 0.4 day⁻¹, 0.4 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.

- 後方粒子追跡法とナンバリング付き粒子挿入法¹⁹⁾ 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-163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^W_p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, $0 < G_p^W < 1 \ge G_p^W = 1$ 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^W_t 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 流れは非定常となり,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

- U.S. Environmental Protection Agency: *Pump-and-tread* 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.
- Boice, R.: Extraction rate problems lead to increased costs at pump-and-treat facilities, *Ground Water Monitor*. *Remed.*, 22, pp.76–81, 2002.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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. Remedi.*, 30(2), pp.46–52, 2010.
- Uffink, G.J.M.: Analysis of dispersion by the random walk method, *Ph.D Dissertation*, *Delft University of Technol*ogy, 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.I_229–I_234, 2015.
- 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 parame-

ter estimation using geophysical data: a review of selected techniques, *J. Contam. Hydrol.*, 45(1-2), pp.3–34, 2000.

- 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.
- 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., Gemitzi, 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.
- 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.
- 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.I_51–I_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.