



地下水揚水による汚染物質回収範囲と回収所要時間の確率的評価

井上, 一哉
上田, 祥央
田中, 勉

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 20:173-186

(Issue Date)

2016-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/81011519>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81011519>



地下水揚水による汚染物質回収範囲と回収所要時間の確率的評価

Stochastic approach for estimating time-related capture zones of solute and travel time distributions in pumping wells

井上 一哉¹⁾

Kazuya Inoue

上田 祥央²⁾

Akihiro Ueda

田中 勉³⁾

Tsutomu Tanaka

概要：本研究では、粒子追跡法により時系列の集水域と集粒域を推定する手法を応用して、兵庫県内のテトラクロロエチレン（PCE）による地下水汚染サイトに適用した。集水域推定には後方粒子追跡法、集粒域推定にはランダムウォーク粒子追跡法を応用した。集水域や集粒域を時系列の空間確率分布として推定すると、揚水可能範囲の変化を視覚的に捉えることができ、集水域と集粒域ともに浸透場に広がった PCE を回収できる範囲の把握につながった。また、汚染源に達するまでに 2400 日程度要すること、不均質度の増加に伴って集水域や集粒域では不確実性が増加することがわかった。集水域と集粒域を比較すると、集粒域の方が分散の影響を含むため、不確実性が大きくなる結果を得た。不確実性の定量的評価の試みとして、エントロピーを導入した結果、時間変化に伴うエントロピーの増加、不均質度の増加に呼応した不確実性の増加をうまく定量化できた。

キーワード：地下水揚水, 後方粒子追跡法, ランダムウォーク粒子追跡法, 不均質帯水層, 空間確率分布, 揚水井

1. 緒論

地下水は地下空間に賦存する貴重な水資源であり、農業用水や工業用水として価値の高い水源であると同時に、地表水とは異なり、汚染に対する脆弱性を有している。地下水汚染サイトにおいて採用される主たる浄化手段として、地下水揚水処理が挙げられ、簡易で実行性の高い方策であることから、長年にわたる適用実績を有している（Mackay and Cherry, 1989 ; United States Environmental Protection Agency, 1996）。地下水揚水処理では、既定の揚水量・揚水時間の下で、揚水井から地下水を汲み上げることにより、帯水層内に存在する汚染物質を地下水とともに回収することから、揚水井の設置位置や揚水量、揚水井数に帯水層の改善効果は強く依存することとなる（Boice, 2002 ; Moutsopoulos et al., 2009）。地下水揚水の実施に至る過程や実施期間中では、地下水を汲み上げることと期待される浄化効果や対策期間の見積もりが議論的となるものの、制約の強い物理的・経済的側面を鑑みると、試験揚水や地質の類似したサイトを対象とした原位置トレーサ実験（日本地下水学会, 2009 ; Russell and Rabidean, 2000）は容易に実施可能な手段であるとは言いがたい。そのため、既に汚染が進行しているサイトや将来的に汚染が懸念されるサイトを対象とした地下水揚水の効果を検討にあたり、数値解析の果たす役割は大きいといえる。また、汚染サイトの地質状態に応じて汚染物質の挙動は異なるため、種々の環境要因を想定した上で、

汚染物質の存在位置と揚水井での回収状況に関する議論を進めていくことが望まれる。

地下水揚水の際に地下水が取水井へ流入する領域、すなわち集水域に関するこれまで研究は、解析解 (Bear and Jacobs, 1965 ; Shan, 1999), 半解析的アプローチ (Christ and Goltz, 2002) に始まり、揚水井群の配置形態や揚水量に依存して集水域の形状は複雑な様相を呈する事実を踏まえた数値解析的アプローチ (Moutsopoulos et al., 2009 ; 井上ら, 2014) が検討されてきた。特に、最尤法やベイズ法 (Feyen et al., 2004) やモンテカルロ法の適用 (van Leeuwen et al., 2000), 粒子追跡法の適用など数多くの数値解析手段が研究されてきた。しかしながら、集水域の規模に対する検討は多く見られる一方で、集水域の時間的進展あるいは集水域内にある物質粒子群の揚水井への到達過程に対する空間特性評価に関してはさほど議論されていない (Riva et al., 2006 ; 井上ら, 2010)。また、集水域に存在する汚染物質は高い確率で取水井へ到達するものの、分散作用により集水域外へ移行する粒子が存在する (Guadagnini and Franzetti, 1999 ; 井上ら, 2015) ため、揚水井にて溶質を回収できる確率は地盤の水理特性に応じて種々に変化すると考えられるが、この点に関する議論についても少ないのが現状であり、多くの課題が残されているといえる。そこで本研究では、集水域の確率空間分布を推定する方法、ならびに、既定の時間内に汚染物質が揚水井へ到達する領域を確率空間分布として推定できる方法を考案し、地下水汚染サイトにて空間分布を提示した。なお、本研究では、既定の時間内に溶質が到達する領域を“経時集粒域”と定義する。

2. 対象サイト

2.1 サイトの概要

本研究では、兵庫県内のクリーニング場より漏洩したテトラクロロエチレン(PCE) によって地下水汚染されたサイトを対象とする。図-1 に対象サイトの概略を示す。PCE の地下水への溶解部分を揚水井にて地下水揚水する状態を想定し、 x 方向に $x = 20$ m から $x = 480$ m, y 方向に $y = 0$ m から $y = 100$ m の 2 次元平面モデルとして対象領域を設定した。汚染源は、 $x = 100$ m, $y = 50$ m の地点に存在するクリーニング場であり、PCE を保管・使用している洗浄機周辺から継続的に漏洩したと考えられている。PCE の漏えいが発覚して以降は、土壤ガス吸引法による浄化処理を継続して実施しているものの、現在においても土壤ガス濃度は環境基準値を超えて検出されている地点もあり、また、地下水中に溶解した PCE 濃度も環境基準濃度を超えており、汚染サイトの管理は継続されている。さらに、PCE 漏洩の原因である洗浄機は 1970 年頃から使用されていることから、汚染の履歴は 20 年から

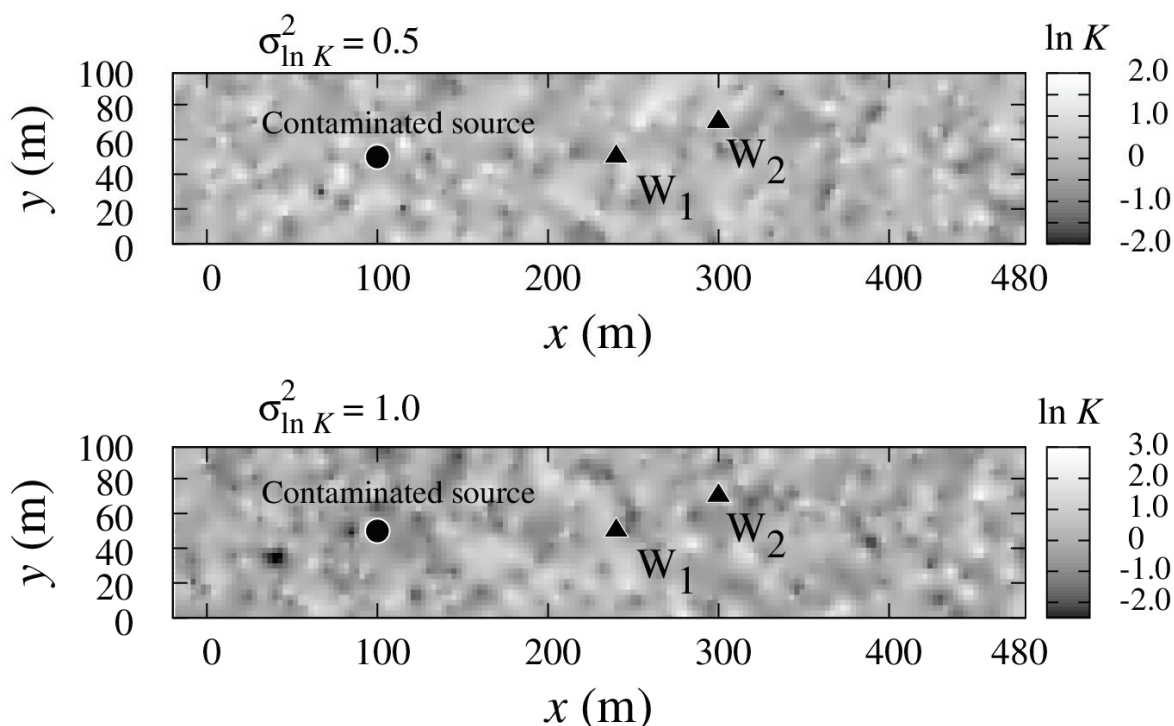


図-1 解析対象領域の概略と透水係数分布の例

30 年程度と推定される。加えて、地下水に溶解した PCE は地下水流れに従って移動するため、対象サイトの下流部に汚染領域を拡大しながら進行していると推定される。このような状況を踏まえて本研究では、地下水中に溶解した PCE を回収することを想定して、地下水揚水による対策に貢献し得る集水域と集粒域の確率的評価を試みた。

2.2 ランダム場の設定

汚染源の周辺は住宅地であり、現地踏査の結果、住宅間にある空きスペースを揚水地点の候補地とし、サイト内の $x = 240$ m, $y = 50$ m と $x = 300$ m, $y = 70$ m を揚水場所として完全貫入井を設け、便宜上、 $x = 240$ m, $y = 50$ m の揚水井を W_1 , $x = 300$ m, $y = 70$ m の揚水井を W_2 とする。揚水井 W_1 での揚水量を Q_1 , W_2 での揚水量を Q_2 とし、現実的な揚水可能量を参考に単位面積・単位深さあたりの揚水量を 0.2 day^{-1} , または、 0.6 day^{-1} に設定した。対象サイトでは透水係数の空間分布は得られていないため、対象場の透水係数は空間相関性を有し、特定のバリオグラムに従って分布すると仮定した上で、空間的なばらつきを有する模擬帯水層を確率統計的に発生させた。まず、領域内の 10^3 点をランダムに抽出し、各点に対象サイトの平均透水係数 1.15 m/day , ならびに既定の幾何分散を有する対数正規分布に従う透水係数をランダム生成した。本研究では透水係数の幾何分散を不均質性と称する。これらの状態に従って、対象領域全体を Block Kriging 予測 (Deutsch and Journel, 1992) することにより、不均質な透水係数分布を生成した。透水係数の空間的相関は等方として次式で表される指数型バリオグラムを採用した。

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

ここに、 d は観測点間距離、 λ は相関長である。また、 $\sigma_{\ln K}^2$ はシルであり、透水係数分布の幾何分散を設定した。相関長は文献 (Hubbard and Rubin, 2000) を参考に 15 m とし、サイトの規模や推定対象の類似した研究 (Feyen et al., 2003) を参考にして、不均質度を 0.5 と 1.0 に設定し、同一の不均質度を有する透水係数分布をそれぞれ 30 リアライゼーション生成した。各不均質度に関する透水係数分布の例を図-1 に示す。

2.3 浸透流解析

対象場の $x = 20 \text{ m}$ と $x = 480 \text{ m}$ の部分には河川が存在することから、境界条件として動水勾配が 0.01 となる水頭境界を設け、 $y = 0 \text{ m}$ と $y = 100 \text{ m}$ に地下水の分水嶺として不透水境界を設定した。次式に示す浸透流方程式 (Bear, 1972) を有限要素法により求解することで、すべての有限要素節点において圧力水頭を求めた。

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

ここに、 h はピエゾ水頭、 $\mathbf{x}$ は位置ベクトル、 Q は揚水量、 $K(\mathbf{x})$ は透水係数テンソルであり、等方性を仮定した。また、対象領域の有効間隙率を一定とみなし、対象サイトの情報から 0.2 に設定し、求めた圧力分布から次式のダルシー則に従って実流速ベクトル $\mathbf{v}$ の空間分布を求めた。

$$\mathbf{v} = -\frac{1}{n_e} K(\mathbf{x}) \nabla h \quad (3)$$

ここに、 n_e は有効間隙率である。

2.4 後方粒子追跡法

粒子追跡法は浸透流方程式の解から得られた流速場を利用して、多孔質体内の粒子移動を追跡する数値解析手法である (Salamon et al., 2006)。地下水の流れにより集水域を求める場合、解析場の全体に粒子を配置すると、粒子の数が大量に必要となり解析の範囲によっては膨大な時間を要する。効率的な集水域の推定を目指すことから、本解析における地下水流れに従う解析手段として、後方粒子追跡法を採用する。後方粒子追跡法とは、揚水井の

表-1 後方粒子追跡法に用いたパラメータ一覧

粒子群初期配置半径	r (m)	1.0
初期粒子数	N (-)	40
時間増分	Δt (days)	1.0
2重ステップ法安全係数	f_s (-)	0.9
2重ステップ法許容誤差	ΔS_0 (m)	0.01
粒子挿入の許容距離	ΔA (m)	1.0
粒子融合の許容距離	ΔS (m)	0.1
アンサンブル格子幅	ΔK (m)	1.0
リアライゼーション総数	RN (-)	30
有効間隙率	n_e (-)	0.2

まわりに所定の粒子群を配置し、実際の地下水流れとは逆の方向に粒子を移動させることにより、粒子の軌道を逆追跡する方法 (Nahum and Seifert, 2006) であり、

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

として表される。ここに、 $X_{p,i}(t)$ は時刻 t での粒子位置の成分、 v_i は実流速成分、 $\bar{X}_p(t)$ は粒子位置ベクトル、 Δt

は時間増分であり、マイナス成分となっている項が逆流現象を表している。後方粒子追跡法の精度を維持するため、4 次のルンゲ・クッタ法と二重ステップ法 (Zheng and Bennett, 2002) を組み込み、許容誤差を 0.01、安全係数を 0.9 に設定した。

後方粒子追跡法では粒子を揚水井の中心から任意の位置に N 個の粒子を等間隔に配置し、粒子に番号を与えた複数の粒子を配置する。後方粒子追跡法にて粒子を逆流させると粒子群に囲まれた範囲を集水域と見なすことができるものの、時間が経過するにつれて粒子間隔が大きくなり、初期の粒子群では的確に集水域を描くことは難しくなる。そのため、初期粒子数を増やすことによる精度の維持は一案に成り得る一方で、井上ら (2009) が指摘するように、精度を維持するためには数万や数十万の粒子が必要となり、対象領域の規模に応じて指数関数的に計算量が増加する。そこで本解析では、粒子間の距離が既定値より大きくなったスペースに粒子を追加挿入する粒子挿入法 (Schafer-Perini and Wilson, 1991) を用いており、粒子挿入の基準となる許容誤差を ΔA とする。他方、後方粒子追跡法を進めると粒子と粒子の間が極端に狭くなる部分が出てくる。狭くなった部分は集水域の範囲に影響はないものの、計算を効率化するために粒子同士が近くなると粒子を統合する粒子融合を採用している。本解析では粒子融合の基準距離 ΔS を 0.1、時間増分 Δt を 1 日とした。後方粒子追跡法に用いたパラメータを表-1 に示す。

2.5 後方粒子追跡法による集水域の空間確率分布推定方法

実地盤において、空間的に高い解像度で透水係数を測定することは難しいことから、本解析では確率統計的に複数の透水係数の空間分布 (リアライゼーション) を想定した上で流速分布を求めている。集水域の形はリアライゼーションごとに異なり集水域を一意に決めることは難しい。集水域の形を評価する方法として井上ら (2014) は対象領域を一定間隔の格子で覆い、すべての粒子群を対象にすべてのリアライゼーションに存在する粒子総数とリアライゼーション数の除することで、集水域境界となる確率としてすべての格子を確率評価する方法を提案した。確率的に集水域の境界領域を示すことにより、境界部分の確率分布としては定量的に示されている一方で、内部領域の確率は不明であり、集水域全体の評価となっていないことに改善の余地がある。その点を踏まえて、井上らの手法を拡張したアンサンブル手法 (井上・田中, 2016) を採用することにより、集水域の確率空間分布を求めた。

まず、領域全体に任意幅 ΔK の格子を設け、フラグとしてすべての格子にゼロを与えた。次に、単一のリアライゼーション i に対して揚水井位置を起点とする後方粒子追跡法を実施し、既定の時刻 t までに各粒子が通過した格子のフラグを 1 に更新するとともに、時間経過に応じた格子のフラグを記憶した。粒子群の空間分布はリアライゼーションごとに異なるため、リアライゼーションごとに粒子は異なる輸送経路をたどることで各格子のフラグの値にも影響する。判別フラグが 1 になる格子はリアライゼーションごとに一致するとは限らないので、すべてのリアライゼーションに対して同様の過程を繰り返すことでリアライゼーションごとに既定の経過時間における格子のフラグ値を記憶した。既定の経過時間における格子 j の判別フラグの値を $F^{i,j}(t)$ 、リアライゼーションの総数を RN とし、時刻 t における格子 j の集水域と成り得る確率 $P_W^j(t)$ を

$$P_W^j(t) = \frac{1}{RN} \sum_{i=1}^{RN} F^{i,j}(t) \quad (5)$$

により求めた。すべてのリアライゼーションに対して格子ごとの粒子の通過の有無を判定することにより、集水域に成り得る確率をアンサンブルすることができ、また、既定の時間に対して集水域の確率空間分布を推定することができる。本研究で用いている後方粒子追跡法は移流のみで考えており、実際の地下水流れを考えた場合、判定フラグが 1 となる位置に存在する粒子は揚水井に流入する確率が極めて高く当該格子は集水域となる確率が高いと推定される。本手法は領域の規模や条件に応じて任意の格子幅 ΔK に設定できる点に特徴を有するものの、格子幅が小さいと粒子が通過しない可能性があり、精度を低下させる原因となる。一方、後方粒子追跡法では精度を維持するため粒子挿入法を用いており、挿入するための許容距離 ΔA は安全側に低めの値に設定される。粒子間隔の許容距離 ΔA が格子幅 ΔK よりも大きい場合、隣り合う 2 つの粒子間隔よりも格子幅 ΔK の方が小さくなり、粒子が当該粒子を通過せずに精度を下げてしまう。逆に格子幅 ΔK を過大に設定すると粗い空間分布となるため、粒子挿入法の利点と適度な解像度をもつ確率分布とするため、格子幅 ΔK を粒子間隔の許容距離 ΔA と同値として、 $\Delta K = 1 \text{ m}$ の正方格子とした。

3. 集水域の時刻歴

3.1 単一揚水井における集水域の確率分布推定

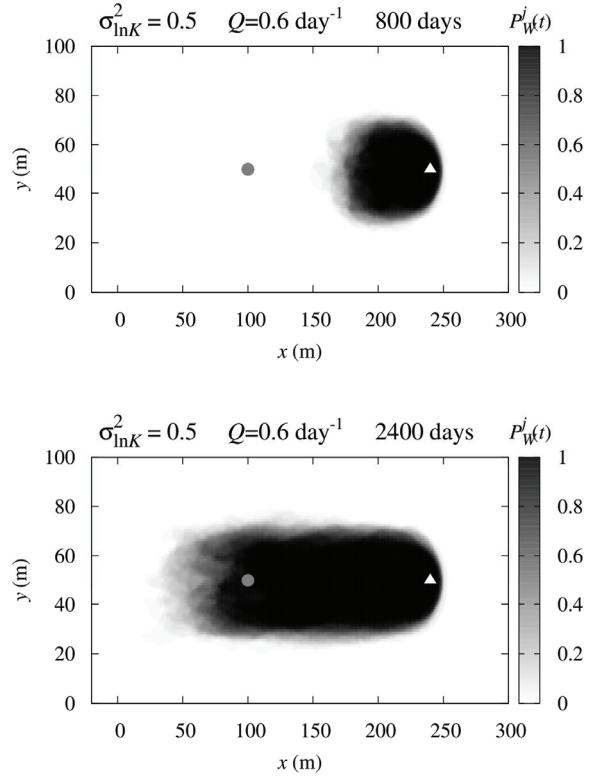


図-2 集水域の空間確率分布結果（不均質度 0.5）

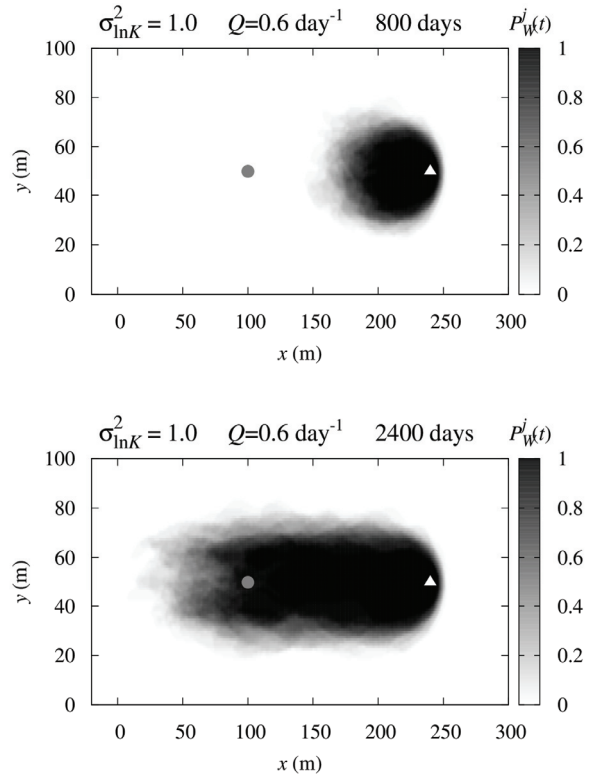


図-3 集水域の空間確率分布結果（不均質度 1.0）

揚水井 W_1 から $Q = 0.6 \text{ day}^{-1}$ の条件にて地下水揚水した状況に対する集水域の推定結果を図-2と図-3に示す。図-2は不均質度 0.5, 図-3は不均質度 1.0 の推定結果であり、揚水開始から 800 日, 2400 日の時間経過時点での空間確率分布を示している。また、図中の黒色三角は揚水井の位置を表し、黒色の丸は汚染源を示している。後方粒子追跡法の経過時間が長いほど集水域となる領域は流れの上流側に向かって広がり、揚水開始から 2400 日には汚染源に到達する。経過時間が進むにつれて最上流では確率がゼロから 1 の間である不確実な領域が増加していく。また、集水域となる範囲は集水域の中心から外側に向かうにつれて確率コンターの色が白色となり、確率が徐々に下がっていくことから、集水域の形として妥当といえる。

最上流側において、グレーの領域面積が広がっているのは、透水係数分布の影響により集水域の形がリアライゼーションによって異なるためであり、上流側での影響が大きいことに起因する。一方、集水域の下流側では不確実な領域は少なく、下流側の集水域の境界は揚水量によってある程度に決まり、リアライゼーションごとに大きな変化が生じないために不確実な領域の幅が小さいと考えられる。また、 y 方向への広がり是不均質度に関わらず、約 40 m の幅を有しており、不均質度に依存しない結果となっている。

3.2 複数揚水井における集水域の確率分布推定

揚水井 W_1 と W_2 からともに揚水量が $Q = 0.2 \text{ day}^{-1}$ の条件にて揚水したときの集水域分布を図-4と図-5に示す。図-4は不均質度 0.5, 図-5は不均質度 1.0 の推定結果であり、揚水開始から 800 日, 2400 日の時間経過時点での空間確率分布を示している。

単一の揚水井の場合と同様に、流れの上流方向に集水域となる領域が広がっており、2400 日には汚染源に達しているものの、流れの下流に存在する W_2 の揚水井は W_1 の影響を受け、上流の揚水井の集水域を避けるような形状となる。これは揚水井が複数ある場合では集水域の形状は揚水井の位置関係に強く依存し、特に下流側に存在する揚水井の形状に大きな変化を与えることを示している。また、 $x = 200 \text{ m}$, $y = 60 \text{ m}$ 付近の集水域で挟まれた領域では確率が 0.5 付近の緑色の領域が多くなっており、設定揚水量では集水域で挟まれた領域に PCE が存在する場合、揚水井で PCE を回収できずに下流に漏出する可能性を有している。このように、複数の取水位置を扱うことに加えて、群井戸の中にある特定の井戸に対する集水域を個別に図示することも、群井戸全体の集水域を視覚的に捉えることもできる点は採用した手法の利点であり、有用な点といえる。

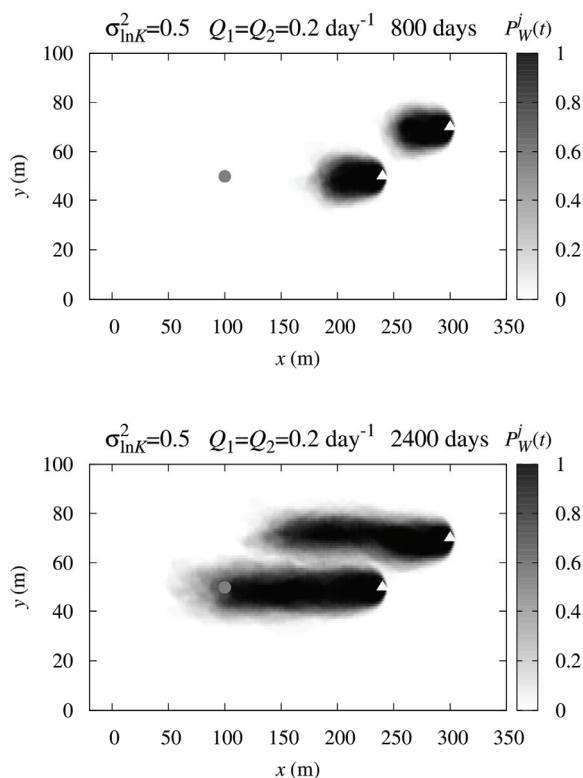


図-4 集水域の空間確率分布結果（不均質度 0.5）

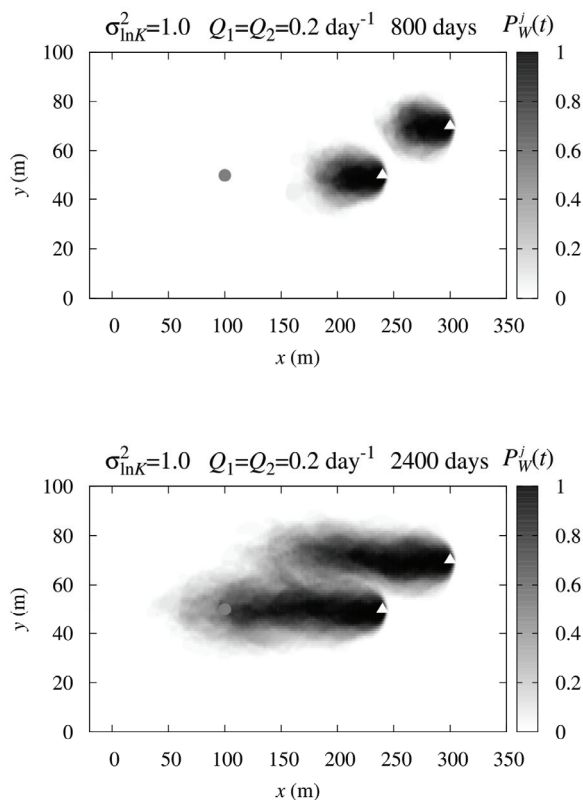


図-5 集水域の空間確率分布結果（不均質度 1.0）

集水域となる確率を不確実性の観点から評価するため、 $P_w(t)=1$ となる面積を A_c 、 $0 < P_w(t) < 1$ となる面積を A_u として当該格子を抽出した。同時に、各揚水井の集水域、ならびに、複数揚水に対する集水域について、揚水経過時間に応じた A_c と A_u の変化を不均質度 0.5 と 1.0 の結果をそれぞれ図-6 と図-7 に示す。面積 A_c は揚水井の位置に関わらず、大きな差が見られない値となっているものの、面積 A_u では複数の揚水井のうち上流側に位置する W_1 よりも下流側に位置する W_2 の集水域の方が小さい値となっており、不確実な面積は小さいことを示している。下流側の揚水井の集水域の形状は上流側の揚水井の集水域に影響を受け、透水係数分布によらず、集水域の形状が決まる領域が増加するため、下流側の集水域は不確実性が減少すると考えられる。

4. 経時集粒域推定

4.1 ランダムウォーク粒子追跡法

汚染された地下水を揚水によって浄化する場合には汚染物質の取り込める範囲、浄化に要する時間が検討対象となる。地下水中で溶質輸送には移流と分散の物理的要因が存在し、帯水層内を移動する汚染物質は移動の様子は時々刻々と移動する。移流や分散を含み揚水井に至る過程を数値解析で再現するために、本解析ではランダムウォーク粒子追跡法 (Random Walk Particle Tracking : 以下, RWPT と記す) を用いた。RWPT は溶質に見立てた大量の粒子を領域内に発生させ、各粒子の位置ならびに位置ベクトルの空間分布変動を時系列で追跡するラグランジュ的手法である (Uffink, 1990)。粒子追跡過程における主たる移動経路はドリフト成分と確率的分散成分から構成され、3次元空間に対して次式で表される (Tompson and Gelhar, 1990 ; 井上ら, 2014)。

$$\mathbf{X}_p(t + \Delta t) = \mathbf{X}_p(t) + (\mathbf{v} + \nabla \cdot \mathbf{D})\Delta t + \mathbf{B}\Xi\sqrt{\Delta t} \quad (6)$$

ここに、 $\mathbf{X}_p$ は時間における粒子位置ベクトル、 Δt は時間増分、 Ξ は平均 0、分散 1 の正規乱数ベクトルである。また、 $\mathbf{D}$ は分散係数テンソルであり、次式で表される。

$$\mathbf{D} = \left(\alpha_{TH} |\mathbf{v}| + \frac{v_3^2}{|\mathbf{v}|} (\alpha_{TV} - \alpha_{TH}) + D_d \right) \mathbf{I} + (\alpha_{TV} - \alpha_{TH}) \left(e_i e_j |\mathbf{v}| - \frac{v_3}{|\mathbf{v}|} (e_i v_j + e_j v_i) \right) + (\alpha_L - \alpha_{TH}) \frac{v_i v_j}{|\mathbf{v}|} \quad (7)$$

ここに、 α_L は縦分散長、 α_{TH} は水平方向横分散長、 α_{TV} は鉛直方向横分散長、 D_d は有効拡散係数、 e_i は z 方向の基底ベクトル成分、 $\mathbf{I}$ は単位マトリクスである。また、 $\mathbf{B}$ は変位マトリクスであり、

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \frac{v_1}{|\mathbf{v}|} \sqrt{2\alpha_L |\mathbf{v}|} & \frac{-v_2 \sqrt{J}}{\sqrt{v_1^2 + v_2^2}} & \frac{-v_1 v_3 \sqrt{2\alpha_{TV} |\mathbf{v}|}}{|\mathbf{v}| \sqrt{v_1^2 + v_2^2}} \\ \frac{v_2}{|\mathbf{v}|} \sqrt{2\alpha_L |\mathbf{v}|} & \frac{v_1 \sqrt{J}}{\sqrt{v_1^2 + v_2^2}} & \frac{-v_2 v_3 \sqrt{2\alpha_{TV} |\mathbf{v}|}}{|\mathbf{v}| \sqrt{v_1^2 + v_2^2}} \\ \frac{v_3}{|\mathbf{v}|} \sqrt{2\alpha_L |\mathbf{v}|} & 0 & \frac{\sqrt{v_1^2 + v_2^2} \sqrt{2\alpha_{TV} |\mathbf{v}|}}{|\mathbf{v}|} \end{pmatrix} \quad (8)$$

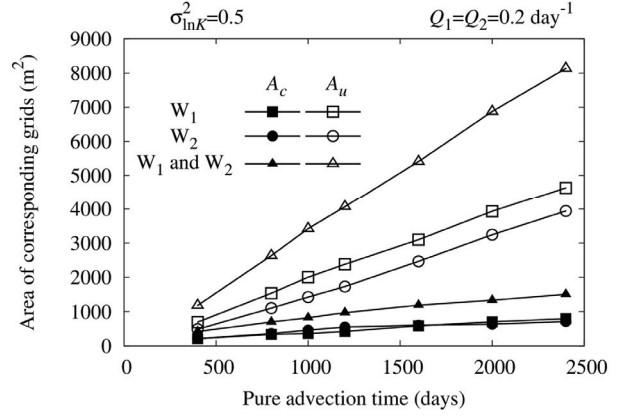


図-6 集水域の不確実性評価 (不均質度 0.5)

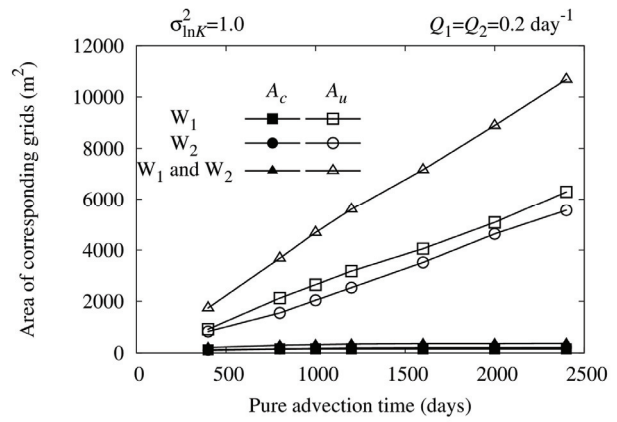


図-7 集水域の不確実性評価 (不均質度 1.0)

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

縦分散長	$\alpha_L(\text{m})$	0.02
水平方向横分散長	$\alpha_{TH}(\text{m})$	0.005
時間増分	Δt (days)	1.0
遅延係数	$R(-)$	1.0
有効拡散係数	$D_d(\text{m}^2/\text{day})$	0
井戸半径	$r(\text{m})$	1.0
粒子数	$N(-)$	50000
アンサンブル格子幅	$\Delta L(\text{m})$	2.0

$$J = 2 \left(\frac{\alpha_{TH}(v_1^2 + v_2^2) + \alpha_{TV}v_3^2}{|\mathbf{v}|} \right) \quad (9)$$

のように表され (Lichtner, 2002), 1 次元または 2 次元の溶質輸送現象に対しては, 対応する軸の項を有効とする. 本解析では, 土粒子と溶質間の吸脱着, ならびに, 分子拡散の影響はないと仮定した. また, 文献 (Uffink, 1990) を参考に縦分散長を 0.02 m, 水平方向と鉛直方向の分散長を 0.005 m とした. 本研究では対象領域に一様乱数を用いて粒子を大量に配置し, RWPT により溶質輸送を解析することですべての粒子に対して揚水井へ到達の有無を求めた. 領域の下流部では揚水井への流入がないため, x 方向に $x = 0 \text{ m}$ から $x = 330 \text{ m}$ の範囲内に N 個の粒子を初期配置し, 範囲内に配置した全粒子が揚水井に到達するか, 領域の外に出るまで RWPT を実施した. 本解析に用いたパラメータを表-2 に示す.

4.2 集粒域の空間確率分布推定方法

汚染物質の揚水井への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, 分散によって揚水井に到達する可能性が変動する. 透水係数分布や分散はリアライゼーションごとに異なるために集粒域の範囲を一意に決めることは難しい. そこで, 確率的に対象領域の集粒域分布を求めるため, 生成したリアライゼーションの透水場において, RWPT を実施することで, N 個の粒子すべてに対して, 揚水井に到達する粒子と, 領域の外に出る粒子を判別した. 便宜上, 揚水井に到達する粒子を到達粒子, 領域の外に出た粒子を非到達粒子と記す. 次に, 時刻ごとの集粒域を確率的に表す手段として, アンサンブル格子を導入し, 領域を任意の幅 ΔL の格子で区切り, リアライゼーション i ごとに初期配置した全粒子を格子内に収めた. また, RWPT の解析結果から時刻 t での到達粒子と非到達粒子を判別することで, 格子 j に含まれる粒子数を n_i^j , また, 時刻 t までに揚水井に到達する粒子数を $m_i^j(t)$ とした. 同様の過程を全リアライゼーションで繰り返し実施し, アンサンブルすることで格子 j が時刻 t に集粒域となる確率 $P_s^j(t)$ を次式で定義し, すべての格子で時刻 t における経時集粒域の確率について,

$$P_s^j(t) = \frac{\sum_{i=1}^{RN} m_i^j(t)}{\sum_{i=1}^{RN} n_i^j} \quad (10)$$

により求めた. ここに, RN はリアライゼーション数である. 粒子は x 方向に 0 m から 330 m , y 方向に 0 m から 100 m までの 33000 m^2 の空間に初期配置しているため, 単位面積あたり,

$$\frac{N \cdot RN}{33000} \quad (11)$$

の粒子が理論上存在する。仮想格子の ΔL は本研究では $\Delta L = 2 \text{ m}$ に設定し、仮想格子に100粒子以上存在するように、初期粒子総数 N を50000とした。

4.3 集粒域の空間確率分布

揚水井 W_1 から揚水量 $Q = 0.6 \text{ day}^{-1}$ の条件下にて揚水したときの経時集粒域に関するアンサンブル推定結果を図-8と図-9に示す。図-8は不均質度0.5、図-9は不均質度1.0の経時集粒域の結果であり、両者ともに800日と2400日の経過時間に対する結果を示している。また、黒色三角は揚水井の位置を表し、黒色の丸は汚染源を示している。

揚水井に流入する確率が高い領域では黒色に近く、流入する確率が低くなるにつれて白色に近づいていく。経過時間が増加するにつれて、揚水井で粒子を捕獲できる領域は流れの上流側に広がっていき、集粒域の領域は増加していく。一方、 y 軸方向への集粒域の広がりには集水域と同様に40 mの幅を有している。揚水井までの流入時間が長い最上流部でもあまり y 方向への広がりには変わらず、ほぼ一定の幅のままである。揚水井から遠い上流部では揚水の影響が小さくなり、浸透流は x 軸方向に卓越して流れているのに対して、揚水井付近では浸透流が揚水井の方向へ向かうため、 y 軸方向の流れ成分が卓越する。したがって、 y 軸方向への集粒域の広がりには揚水量の大きさに応じて決まると考えられる。また、2400日には集水域と同様に汚染源に集粒域と成り得る領域が到達しており、汚染物質が汚染源の下流に広がっている場合であっても揚水可能であることを示している。

揚水井 W_1 と W_2 からともに揚水量 $Q = 0.2 \text{ day}^{-1}$ で揚水したときの集粒域分布を図-10と図-11に示す。図-10は不均質度0.5、図-11は不均質度1.0の結果を示しており、両者ともに800日と2400日の時間経過に対応した空間確率分布を示している。経時集粒域として汚染物質の揚水井への到達確率を推定すると、前章において提示した複数揚水による集水域の結果と同様に、汚染源に経時集粒域が達するまでに約2400日を要しており、複数揚水の条件下にあるため、下流側の集粒域は上流側の集粒域を避けるような形状をしている。また、不均質度を高く見積もった透水場の方が不均質度の低い場よりも確率が1に満たない不確実領域は増加しており、傾向としては単一揚水の場合と同様の結果になっている。各揚水井に流入する2つの集粒域で挟まれた領域ではいずれかの揚水井に汚染物質は流入する可能性があるため、確率として高い数値となる領域が広く分布しているものの、上流側の揚水井を起点とする集粒域を避けるように下流側の揚水井の集粒域が存在するため、集粒域に挟まれた地点にある汚染物質は井戸をすり抜けて領域外へと移行する可能性が生じる。

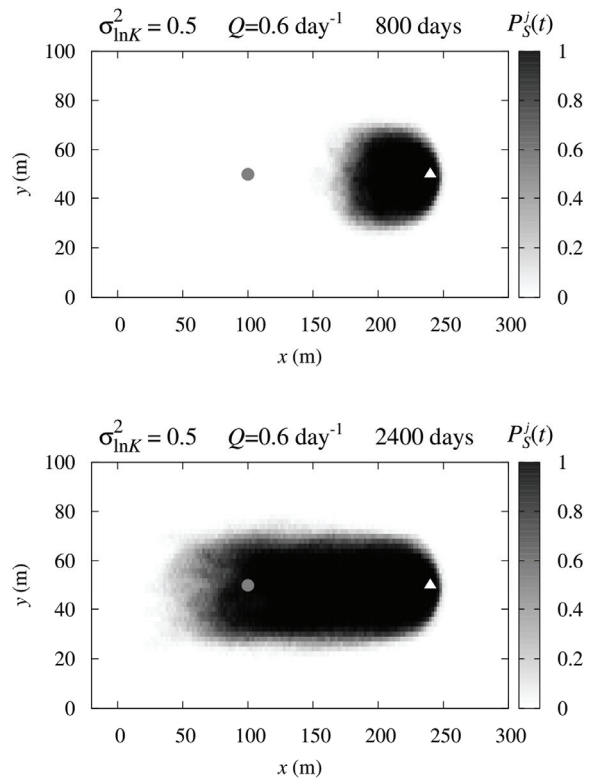


図-8 集粒域の空間確率分布（不均質度0.5）

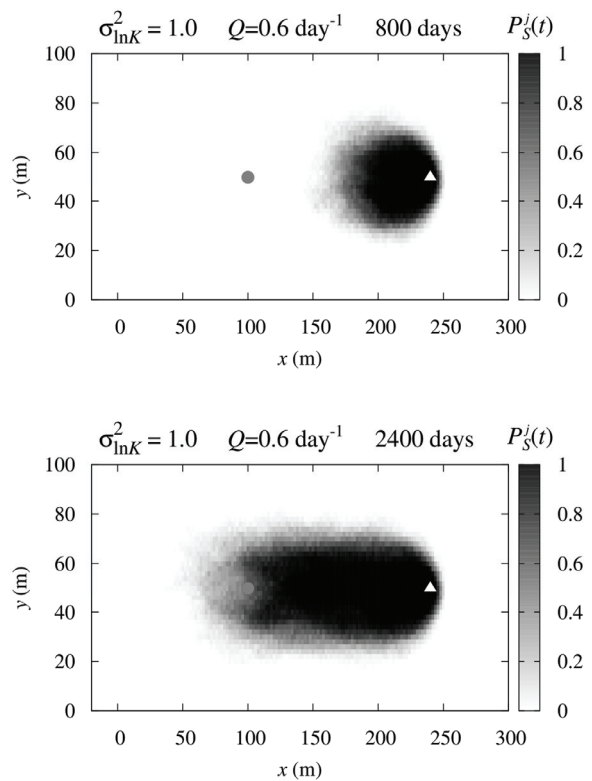


図-9 集粒域の空間確率分布（不均質度1.0）

集粒域の確実に揚水井に流入する領域と不確実な領域を調べるため、単一の揚水井の場合と同様に、経時集粒域となる確率 $P_S^j(t)$ について、確率が 1 である面積 Ac 、確率が $0 < P_S^j(t) < 1$ となる面積を Au として当該格子を抽出し、経過時間に応じた面積 Ac と Au の変化を図-12 に示す。確率が 1 である Ac の面積は不均質度が 0.5 の場よりも 1.0 の場の方が小さくなっており、1.0 の場では面積 Ac はほとんど存在しない結果となっている。また、時間が経過しても面積 Ac は増加しないことから、揚水井のまわりのみが確実に溶質を回収できることを示している。2 つの揚水井の揚水量が $Q = 0.2 \text{ day}^{-1}$ であり、揚水能力が低く、加えてリアライゼーションごとの集粒域の形状にばらつきがあるために Ac の面積が小さいと考えられる。

4.4 集粒域のエントロピー評価

各格子の経時集粒域確率 $P_S^j(t)$ の不確実な領域について不確実性の度合を定量的に評価するために、系の乱雑さを表すエントロピーの概念（岡部，2008）を用いて、次式によって集粒域の空間分布の不確実性について検討した。

$$H(t) = - \sum_{j=1}^n P_S^j(t) \log P_S^j(t) \quad (12)$$

ここに、 t はランダムウォーク粒子追跡法における経過時間、 $H(t)$ は時刻 t の確率分布に関するエントロピー、 $P_S^j(t)$ は時刻 t における各格子の集粒域確率、 n は総格子数である。均質地盤、ならびに、唯一の透水係数分布のみを対象とする不均質地盤において集水域を推定する場合、集水域内部のすべての格子を粒子は通過するため、格子の確率はすべて 1 となる結果、エントロピーはゼロとなる。式(12)にて表すエントロピーを確率分布の不確実性の尺度と考えると、エントロピーゼロの状態は不確実性を伴わないため、一般的に用いられるエントロピーと整合性はとれている。

図-13 に不均質度が 0.5 と 1.0 の地盤において、揚水量が $Q = 0.6 \text{ day}^{-1}$ の単一揚水による集粒域の確率分布のエントロピーを移流時間の関数で示す。不均質度の高い場において不均質度の低い場よりもエントロピーの値は大きくなっており、集粒域の空間分布がより不確実であることを示している。これはリアライゼーションごとの集粒域の形状の変化に加え、分散の影響によって不均質度の度合いが大きいほど不確実性が増加するためと考えられる。また、揚水井への到達に要する時間が長くなるほどエントロピーの値は増加している。経過時間が長ければ、より広範囲の領域にある粒子を回収できる可能性が上昇し、

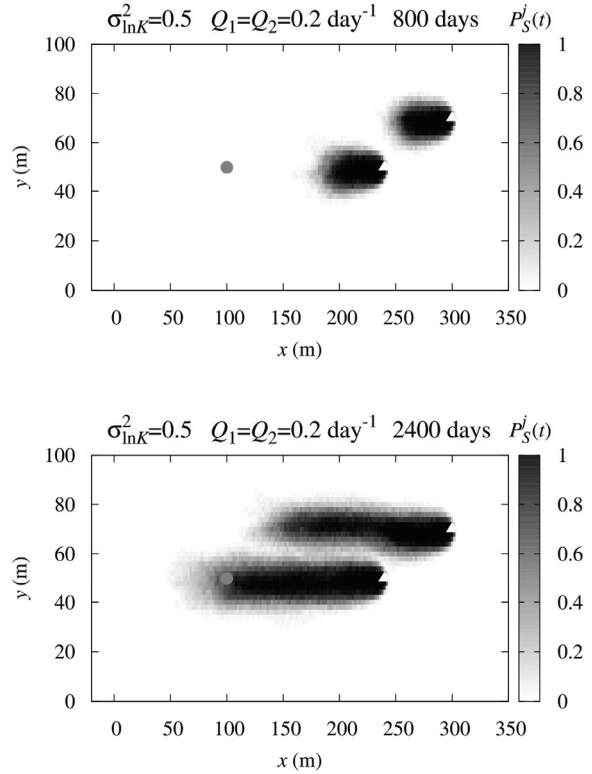


図-10 集粒域の空間確率分布（不均質度 0.5）

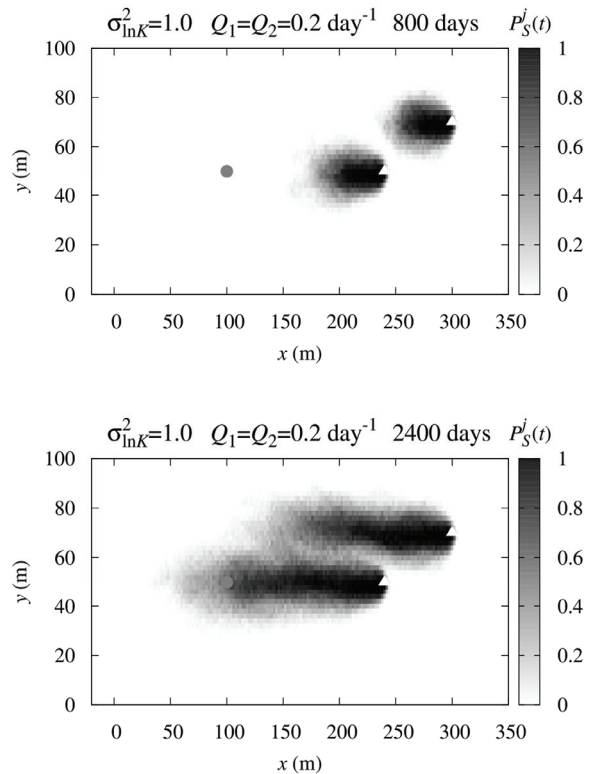


図-11 集粒域の空間確率分布（不均質度 1.0）

不確実領域の大きさは増加するためエントロピーが増加すると考えられる。

次に、揚水量が $Q = 0.2 \text{ day}^{-1}$ である複数揚水井の集粒域の確率分布のエントロピーを移流時間の関数により図-14に示す。図-14は各揚水井のエントロピーといずれかの集粒域に成り得る確率のエントロピーを示している。単一揚水井の場合と同様に、揚水時間が進むにつれてエントロピーは増加していることがわかる。また、揚水井 W_1 の集粒域のエントロピーよりも下流に位置する W_2 の集粒域のエントロピーの方が小さい値となっており、不確実性が小さいことを示している。さらに、各揚水井の集粒域のエントロピーを合計した値よりもいずれかの揚水井に流入する集粒域のエントロピーの方が小さい値となる。集粒域に挟まれた領域ではどちらの揚水井にも流入する可能性が存在し、片方のみの場合よりも確率が上昇することで不確実性は減少する。そのため、不確実性を示すエントロピーは減少すると考えられる。

5. 結論

本研究では、兵庫県内の地下水汚染サイトを対象として、粒子追跡法によって集水域と集粒域を時系列ごとに確率分布を推定した。対象サイトと平均透水係数から過去の研究を参考に不均質度が 0.5 と 1.0 の幾何分散を有する場をそれぞれ 30 リアライゼーション生成し、有限要素法による浸透流解析により圧力分布を求めた。圧力分布からダルシー則によって流速分布を求め、後方粒子追跡法を用いて、時系列ごとの集水域を推定した。また、ランダムウォーク粒子追跡法を用いて、時系列ごとの集粒域を推定するとともに、推定結果の集水域と集粒域の面積を比較した。本研究より得られた知見は以下のとおりである。

1. 集水域と集粒域の拡がり流れの上流方向に大きくなり、汚染物質の回収に約 2400 日を要し、 y 方向への拡がり揚水量によって決定される。
2. 不確実係数を導入した結果、集水域と集粒域ともに不確実な領域は不均質度が高い場の方が大きい結果を得た。また、時間変化に伴う不確実性の増加を定量化できた。
3. 複数揚水の場合、上流に位置する揚水井に影響を受け、下流に位置する集水域と集粒域は上流の集水域または集粒域を避けるような形状となる。結果として、汚染源から汚染物質が拡がっている場合であっても、揚水井によって回収できる範囲を推定することができる。
4. 集水域と集粒域の不確実な領域の不確実性の度合を定量的に表すためにエントロピーによって評価した。その結果、時間が経過するごとにエントロピーは増加し、不均質度が高い場ほどエントロピーが増加する結果が得られた。また、複数揚水の場合、エントロピーは個々の揚水井のエントロピーを足し合わせた場合より

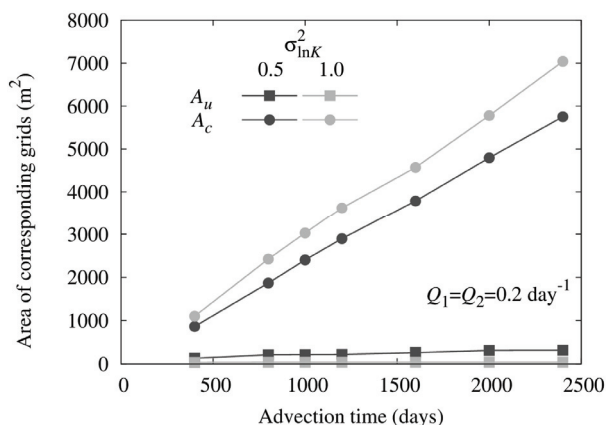


図-12 揚水時間に応じた確率分布の面積の変化

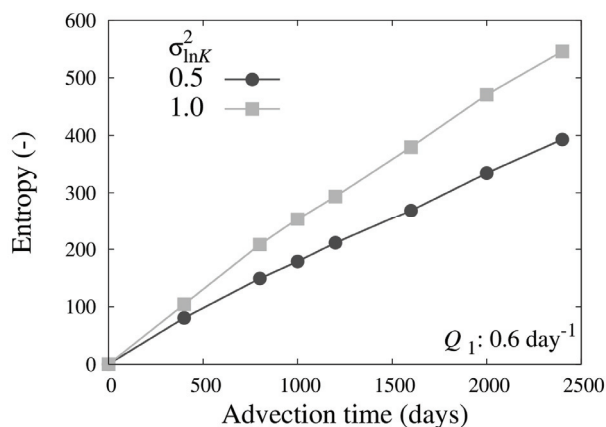


図-13 経時集粒域とエントロピーの変化

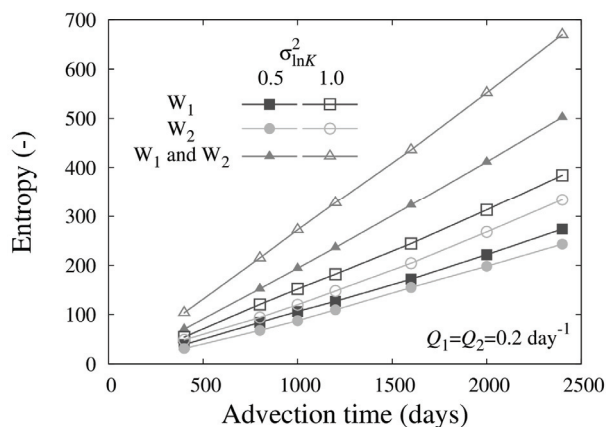


図-14 経時集粒域とエントロピーの変化

もいずれかの揚水井に流入する場合のエントロピーの方が小さくなることがわかった。

5. 地下水の挙動（移流）に基づく経時集水域、移流と分散に基づく溶質の経時集粒域、いずれの空間確率分布を用いても対象領域の汚染物質の回収範囲や回収時間の見積りに寄与すると期待される。

本研究において提示した集水域や集粒域の更なる高精度化・高機能化を図りつつ、地下水変動や境界条件などの外的・内的環境要因に合わせた空間確率分布を確率マップとして生成することにより、汚染サイトや地下水管理に応用できると考えられる。この点は今後の課題とする。

謝辞

本研究は、平成 27 年度神戸大学都市安全研究センタープロジェクト研究助成金（研究代表者：井上一哉）の援助の基に遂行された研究成果の一部である。ここに記して、感謝の意を表する。

参考文献

- Bear, J. (1972): *Dynamics of fluids in porous media*, Dover Publications, 764p.
- Bear, J. and Jacobs, M. (1965): On the movement of water bodies injected into aquifers, *Journal of Hydrology*, 3, pp.37-57.
- Boice, R. (2002): Extraction rate problems lead to increased costs at pump-and-treat facilities, *Ground Water Monitoring and Remediation*, 22, pp.76-81.
- Deutsch, C.V. and Journel, A.G. (1992): *GSLIB: Geostatistical software library and user's guide*, Oxford University Press, 340p.
- Feyen, L., Dessalegn, A.M., de Smedt, F., Gebremeskel, G. and Batelaan, O. (2004): Application of a Bayesian approach to stochastic delineation of capture zones, *Ground Water*, 42(4), pp.542-551.
- Feyen, L., Riberio Jr., Gómez-Hernández, J.J., Beven, K.J. and De Smedt, F. (2003): Bayesian methodology for stochastic capture zone delineation incorporating transmissivity measurements and hydraulic head observations, *Journal of Hydrology*, 271, pp.156-170.
- Guadagnini, A. and Franzetti, S. (1999): Time-related capture zones for contaminants in randomly heterogeneous formations, *Ground Water*, 37(2), pp.253-260.
- Hubbard, S.S. and Rubin, Y. (2000): Hydrogeological parameter estimation using geophysical data: a review of selected techniques, *Journal of Contaminant Hydrology*, 45(1-2), pp.3-34.
- 井上一哉, Uffink, G.J.M., 田中勉 (2009) : 粒子追跡法による集水域の時間変動と粒子捕獲確率に関する評価, 工学論文集, Vol.53, pp.523-528.
- 井上一哉, 倉澤智樹, 田中勉 (2015) : 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, 71(4), pp.I_229-I_234.
- 井上一哉, 田中勉 (2016) : 後方粒子追跡法による取水井の集水域の確率分布推定法, 土木学会論文集 B1, 72(4), pp.I_271-I_276.
- 井上一哉, 松山紗希, 田中勉 (2014) : 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, 70(2), pp.I_51-I_62.
- 井上一哉, 光田和希, Uffink, G.J.M., 田中勉 (2010) : 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, 13, pp.847-858.
- Lichtner, P., Sharad, K. and Bruce, R. (2002): New form of dispersion tensor for axisymmetric porous media with implementation in particle tracking, *Water Resources Research*, 38(3), 21(1)-21(6).
- Mackay, D.M. and Cherry, J.A. (1989): Groundwater contamination: pump-and-treat remediation, *Environmental Science and Technology*, 23(6), pp.630-636.
- Moutsopoulos, K.N., Gemitzi, A. and Tsihrintzis, V.A. (2009): Delineation of groundwater protection zones by the backward particle tracking method: theoretical background and GIS-based stochastic analysis, *Environmental Geology*, 54(5), pp.1081-1090.
- Nahum, A. and Seifert, A. (2006): Technique for backward particle tracking in the flow field, *Physical Review E*, 74, 016701, 2006.
- 日本地下水学会原位置トレーサー試験に関するワーキンググループ (2006): 地下水のトレーサー試験—地下水の動きを知る, 技報堂出版, 396p.
- 岡部豊 (2008) : 熱・統計力学, 朝倉書店, 139p.
- Russell, K.T. and Rabidean, A.J. (2000): Design analysis for pump-and-treat design, *Ground Water Monitoring and Remediation*, 20, pp.159-168.

- Schafer-Perini, A.L. and Wilson, J.L. (1991): Efficient and accurate front tracking for two-dimensional groundwater flow models, *Water Resources Research*, 27(7), pp.1471–1485.
- Salamon, P., Fernández-García, D. and Gómez-Hernández, J.J. (2006): A review and numerical assessment of the random walk particle tracking method, *Journal of Contaminant Hydrology*, 87, pp.277-305.
- Shan, C. (1999): An analytical solution for the capture zone of two arbitrarily located wells, *Journal of Hydrology*, 222, pp.123-128.
- Tompson, A.F.B. and Gelhar, L.W. (1990): Numerical simulation of solute transport in three-dimensional, randomly heterogeneous porous media, *Water Resources Research*, 26(10), pp.2541-2562.
- Uffink, G.J.M. (1990): *Analysis of dispersion by the random walk method*, Ph.D Dissertation, Delft University of Technology, 150p., 1990.
- U.S. Environmental Protection Agency (1996): *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.
- van Leeuwen, M., Butler, A.P., te Stroet, C.B.M. and Tompkins, J.A. (2000): Stochastic determination of the well capture zones conditioned on regular grids of transmissivity measurements, *Water Resources Research*, 36(4), pp.949-957.
- Zheng, C. and Bennett, G.D. (2002): *Applied Contaminant Transport Modeling*, Van Nostrand Reinhold, 656p.

筆者：

- 1) 井上 一哉, 神戸大学大学院農学研究科, 准教授
- 2) 上田 祥央, 神戸大学大学院農学研究科, 大学院生
- 3) 田中 勉, 神戸大学大学院農学研究科, 教授

Stochastic approach for estimating time-related capture zones of solute and travel time distributions in pumping wells

Kazuya Inoue
Akihiro Ueda
Tsutomu Tanaka

Abstract

The objectives of this study were to demonstrate two stochastic methodologies using backward particle tracking and random walk particle tracking to estimate time-related groundwater capture zones and time-related solute capture zones, respectively, in pumping wells and to apply these methodologies to a contaminated site by tetrachloroethylene (PCE) in Hyogo Prefecture, Japan. As for backward particle tracking, lattice cells with a certain length were introduced to assign binary values corresponding to particle pathlines within a certain travel time. Also, for the purpose of time-related solute capture zone estimation, ensemble of the particle evolutions toward pumping wells from a cell was conducted as the ensemble travel-times and was presented another aspect relevant to spatial distributions of travel-times of cells. Based on the particle travel histories in geostatistically generated hydraulic conductivity fields, ensemble of the lattice cell values provided the probability distributions of time-related capture zones in terms of groundwater flow and solute transport. These methodologies were investigated for a two-dimensional geometry with single and multiple wells in heterogeneous aquifers under steady state flow conditions. The probability of each lattice cell was applied to the calculation of a quantitative measure expressing the uncertainty relevant to the probability distributions of the groundwater and solute capture zones, demonstrating the effect of the heterogeneity on the uncertainty of time-related capture zones. In addition, these methodologies provided some proper outcomes corresponding to the pumping rates and pumping locations. Furthermore, entropy was introduced to evaluate the uncertainty of time-related capture zones and exhibited an increase tendency with the increase of magnitude of capture zones.

©2016 Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, All rights reserved.