Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-12-04

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

井上，一哉
倉澤，智樹
田中，勉

(Citation)
土木学会論文集B1（水工学）,71(4):I_229-I_234

(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/20.500.14094/90003327

土木学会論文集B1(水工学) Vol.71, No.4, I_229-I_234, 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

RANDOM WALK PARTICLE TRACKING APPROACH TO ESTIMATE SOLUTE CAPTURE ZONE OF PUMPING WELL AND SOLUTE TRAVEL TIME

井上一哉[1]・倉澤智樹[2]・田中勉[3]
Kazuya INOUE, Tomoki KURASAWA and Tsutomu TANAKA

[1] 正会員　博士(農学)　神戸大学准教授 大学院農学研究科（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1）
[2] 学生会員　神戸大学大学院生 大学院農学研究科（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1）
[3] 正会員　農博　神戸大学教授 大学院農学研究科（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1）

This paper presents a stochastic methodology using random walk particle tracking to estimate solute capture zones in a pumping well. Realizations of heterogeneous aquifer are represented as randomly correlated hydraulic conductivity and partition coefficient fields. By superposition of all solute capture zones, probability distributions are obtained that describe the probability of a certain grid space from which a solute particle will reach the well and the corresponding travel time. Proposed methodology demonstrated that a larger pumping rate and less heterogeneity of hydraulic conductivity lead to the decrease of the uncertainty factor, which is defined by the ratio of the area having the probability of non-zero and less than 1 to the area having the probability of 1. Chemical heterogeneity related to the retardation factor distribution has little influence on the both spatial distributions of solute capture zone and travel time.

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

1. 緒論

地下水は地下空間に賦存する貴重な水資源であると同時に汚染に対する脆弱性を有している．有害物質が帯水層へ侵入すると長期の浄化時間，莫大な浄化費用を要し，ヒトの健康や生活環境への悪影響が懸念されることから，地下水の水量・水質管理は重要な課題である．汚染地下水の浄化において，地下水揚水処理は高い頻度で実行される策であり，既定の揚水量条件で汚染物質を回収できる範囲や回収に要する時間の見積もりを課題とする[1)]．一方，地下水の飲用水利用においては，汚染物質が取水井へ流入しない範囲の推定や不慮の事故を想定した汚染源から取水井に至る物質のトラベルタイムを推定することが望まれる．したがって，揚水の目的に関わらず，取水井を用いて帯水層から地下水を汲み上げる際には，汚染物質の流入範囲や到達予想時間を推定することとなる[2)]．

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事例[3)] に比べると，取水井に汚染物質が流入する領域を確率的に推定する研究はかなり少ない[4)]．また，溶質の移流成分のみを対象とする事例[2)5)]が多く，分散の影響はあまり考慮されていない．井上ら[6)]は粒子追跡法を用いて集水域の推定と取水井での溶質回収に関して検討しているが，帯水層に存在する汚染物質を捕獲可能な領域については十分に議論していない．

これらの点を踏まえて本研究では，ランダムウォーク粒子追跡法を用いて，地下水揚水に伴い取水井に溶質が流入する領域を確率的に推定する方法を考案した．提案手法を揚水量条件や不均質条件を変えた透水場に適用することで，想定する状況に応じた溶質の取水井への到達確率や到達に至るトラベルタイムについて検討した．なお，本研究では，地下水汚染物質の溶質部分を輸送の対象とし，地下水揚水の際に地下水が取水井へ流入する領域を集水域と称する[1)]点を反映して，取水井に溶質が流入する領域を“集粒域”と定義する．

2. 集粒域の推定方法

(1) 解析対象領域と模擬透水係数分布

本研究では，オランダ国デンハーグ市近郊にあるサイトを対象として，**図-1**に示すように，南北方向をx軸，東西方向をy軸に設定し，270 m × 160 mの二次元

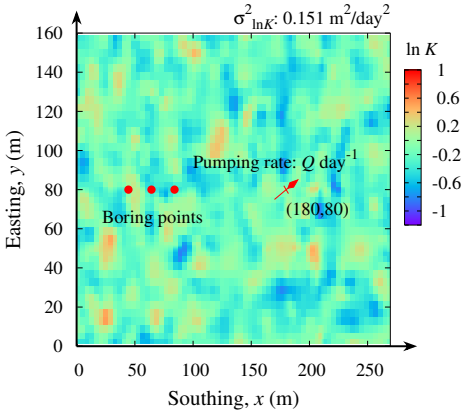

図-1 解析対象領域の概略と透水係数分布の例

領域を設けた．対象サイトはx軸の正方向への領域流れ，約20 mの帯水層厚さを有する被圧帯水層であり，$(x,y)=(180\ \mathrm{m}, 80\ \mathrm{m})$の位置に取水井がある[7]．

図-1に示すように，サイト内には3箇所のボーリング孔にて深さ方向の透水係数が測定されており，透水係数分布の幾何平均と幾何分散$\sigma^2_{\ln K}$はそれぞれ0.821 m/dayと0.151 m^2/day^2，間隙率は0.35である．便宜上，本研究では幾何分散のことを不均質度と称する．透水係数の空間分布をモデル化するにあたり，対象サイトの測定は局所的であり，透水係数の空間分布を唯一に定めるのは極めて難しい状況にある．そのため，対象場の透水係数は対数正規分布に従い，特定のバリオグラムに従って分布すると仮定した上で，領域内に10^3個のソース点をランダム抽出し，各点に既定の対数正規分布に従う透水係数をランダム生成した[8]．また，対象領域の分割要素の透水係数をソース点の透水係数からブロッククリギング予測[9]し，透水係数の不均質性を有する場（リアライゼーション）を生成した．領域規模や推定対象の類似した研究[2)10)]を参考にして，リアライゼーション数を30に設定し，同一の不均質性を有する30種類の場を生成した．このとき，0.5 m～4 mの有限要素を採用したことから，要素サイズの影響は微小と考えられる．また，透水係数データが少ないため，文献[7)11)]を参考に，相関長λを13 m，シルにはサイトの幾何分散を設定[7]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γを採用した．

$$\gamma(h)=\sigma^2_{\ln K}(1-\exp(h/\lambda)) \tag{1}$$

ここに，hは観測点間距離である．透水係数の空間分布例を**図-1**に示す．

(2) 浸透流解析

被圧帯水層内の完全貫入井での揚水を考慮して，定常流状態にある浸透流方程式は次式で表される[12]．

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

ここに，hはピエゾ水頭，$\boldsymbol{x}$は位置ベクトル，$K(\boldsymbol{x})$は透水係数テンソルであり，等方性を仮定した．また，Qは揚水量であり，サイトのデータ[7]を参考に，単位面積・単位深さあたり，1 day^{-1}，あるいは，3 day^{-1}の揚水量Qを設定した．サイトの状態を反映して，$x=0$ mと$x=270$ mの面を0.05の動水勾配となる水頭境界，$y=0$ mと$y=160$ mの面を不透水境界に設定し，有限要素解析により水頭分布を導出した．次に，間隙率n_pは対象空間内で一定と見なして，0.35に設定し，Darcy則により実流速ベクトル$\boldsymbol{v}$の空間分布を求めた．

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

表-1 ランダムウォーク粒子追跡法に用いたパラメータ

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)	0.5
粒子数N	5×10^4

(3) ランダムウォーク粒子追跡法と集粒域推定

ランダムウォーク粒子追跡法（Random Walk Particle Tracking: 以下，RWPTと記す）は溶質に見立てた大量の粒子群を領域内に発生させて，各粒子の質量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[6)7)]．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，

$$\boldsymbol{X}_p(t+\Delta t)=\boldsymbol{X}_p(t)+(\boldsymbol{v}+\nabla\cdot\boldsymbol{D})\Delta t/R+\boldsymbol{B}\boldsymbol{\Xi}\sqrt{\Delta t} \tag{4}$$

となる[7]．ここに，$\boldsymbol{X}_p(t)$は時刻tにおける粒子位置ベクトル，Δtは時間増分，Rは遅延係数，$\boldsymbol{\Xi}$は平均0，分散1の正規乱数ベクトル，$\boldsymbol{D}$は分散係数テンソルであり，

$$\boldsymbol{D}=\alpha_T|\boldsymbol{v}|\boldsymbol{I}+(\alpha_L-\alpha_T)v_iv_j/|\boldsymbol{v}|,\quad i,j=1,2 \tag{5}$$

である[12]．ここに，v_iは実流速成分，$|\boldsymbol{v}|$は実流速ノルム，$\boldsymbol{I}$は単位マトリクス，$\boldsymbol{B}$は変位マトリクスであり，

$$\boldsymbol{B}=\begin{pmatrix}\sqrt{2\alpha_L v_1^2/(|\boldsymbol{v}|R)} & 0\\ 0 & \sqrt{2\alpha_T v_1^2/(|\boldsymbol{v}|R)}\end{pmatrix} \tag{6}$$

である．また，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．対象サイトの不均質度は低いため，文献値を分散長として採用した．本解析では，取水井の位置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取水井位置を中心とした半径rの円と交わる，または接する場合を該当粒子の取水井流入と判定した．また，遅延係数は1，時間ステップは1日とした．**表-1**にRWPTに用いたパラメータを記す．

RWPTの例として，領域内の任意地点に初期配置した8つの粒子の移動経路を**図-2**に示す．対象場の揚水量は3 day^{-1}であり，透水係数分布は生成した30種類のリアラ

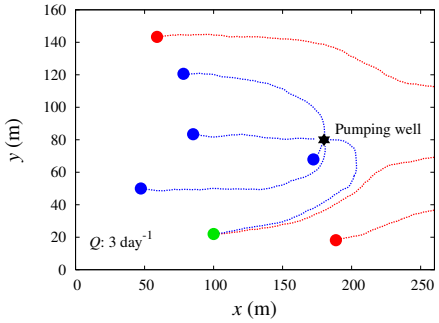

図-2 粒子群の移動経路の一例．緑色の部分には2つの粒子がある．

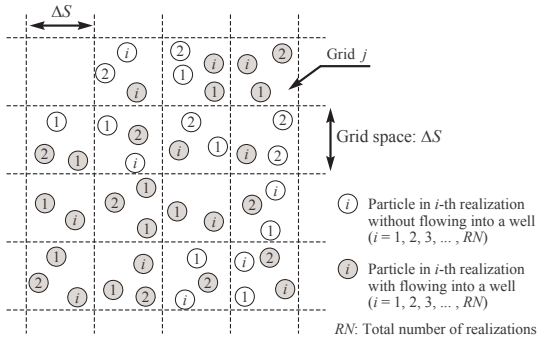

図-3 仮想格子の設定

イゼーションの1つを採用している．青色の粒子は移流分散しながら取水井に到達するのに対して，赤色の粒子は取水井へ流入せずに領域外へ移動する様子がわかる．つまりは，粒子の初期位置に応じて取水井への到達状態は異なることを示している．しかしながら，緑色の粒子は同一の初期位置にある2つの粒子を表しており，一方は取水井へ流入し，他方は領域外へ移動している．これは分散の効果により，輸送経路が顕著に異なった結果であり，分散現象により初期位置だけでは取水井への到達状態は決まらないことを示唆している．さらに，透水場の透水係数分布が異なると流線は透水係数分布に依存して変化するため，取水井への到達の有無についても影響が及ぶことになる．したがって，取水井に溶質が流入する領域，すなわち，集粒域は一意には定まらないと言える．

そこで本研究では，確率的に集粒域の分布を推定するため，第一のステップとして，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取水井への到達の有無を求める手段を講じた．領域の境界部を避けて，x方向は10 mから250 m，y方向は10 mから150 mの33600 m^{2}の範囲内にN個の粒子を初期配置させ，すべての粒子が取水井に到達するか，領域外へ移行するまで，全粒子の移流分散挙動をRWPTにより解析した．生成した30種類の透水場に対して同様の過程を経ることで，$30 \times N$個の粒子に対して，取水井へ到達する粒子と領域外へ移動する粒子を判別した．便宜上，取水井へ到達した粒子を到達粒子，領域外へ移動した粒子を非到達粒子と記す．

すべての粒子に判別フラグを付すことで，ある座標(x, y)に位置する粒子数nとその中で取水井へ到達する粒子数mの除算m/nにより，当該地点が集粒域と成り得る確率を0から1の範囲で求めることができる．しかしながら，図-2の緑色の粒子のように，同一の座標に繰り返して粒子が配置される可能性は極めてゼロに近く，点座標での集粒域推定は現実的ではない．実際問題として，特定の地“点”を潜在的な汚染源と見なすような予測・予見はせず，任意の“面”を汚染源に想定した上で揚水規模や揚水位置などの浄化策・回避策を講じるのが一般的である[1)]．そこで第二のステップとして，有限要素とは別に，仮想格子を導入することで集粒域確率を面推定した．

図-3に示すように，領域全体を任意幅ΔSの仮想格子で覆い，単一のリアライゼーションiで初期配置した全粒子を格子内に収めた．また，RWPTの解析結果に基づき，到達粒子と非到達粒子を判別することにより，既定の格子jに収まる粒子数n_i^j，ならびに，到達粒子数m_i^jを定めた．同様の過程を30リアライゼーションすべてに繰り返して重ね合わせることにより，格子jの集粒域確率P^jを

$$P^j = \sum_{i=1}^{RN} m_i^j \Big/ \sum_{i=1}^{RN} n_i^j \tag{7}$$

と定義し，すべての格子について集粒域確率を求めた．ここに，RNはリアライゼーション総数であり，本解析では30である．たとえば，16分割した図-3では，左下と右上の格子の確率は1，右下は0.5，左上は0である．

前述のように，33600 m^{2}の範囲内にN個の粒子を初期配置するため，幅ΔSの格子には，理論上，

$$\frac{N}{33600} \cdot \Delta S^2 \cdot RN \tag{8}$$

の粒子が存在する．仮想格子の導入は集粒域確率を推定したい解像度に応じてΔSを任意に変更できる特徴を有しているものの，過度に大きい，あるいは，小さい設定は現実的ではないため，$\Delta S = 2$ mを基準に設定した．また，集粒域確率を推定する際には，各格子内に収まる粒子数が少ないと信頼性に影響するため，確率上，100個以上の粒子が存在するように，初期粒子総数Nを定めることとした．したがって，単一のリアライゼーションにて発生する粒子数Nを5×10^4に設定した．

3. 結果と考察

(1) 集粒域と不確実定数

不均質度$\sigma^2_{\ln K} = 0.151$ m^2/day^{2}を有する対象サイトにて1 day^{-1}の揚水量を考慮した透水場に対する集粒域分布の推定結果を図-4に示す．また，揚水量を3 day^{-1}として考慮した場に対する集粒域分布の推定結果を図-5に示す．図-4と図-5ともに，格子間隔に応じた推定結果の差異を可視化するため，格子間隔ΔSを2 m，3 m，4 mに変えた3種類の推定結果を示している．揚水に伴って取水井へ向かう地下水流れの領域が存在するため，取水井より上流側において，図-4ではy座標60 mから100 mの範

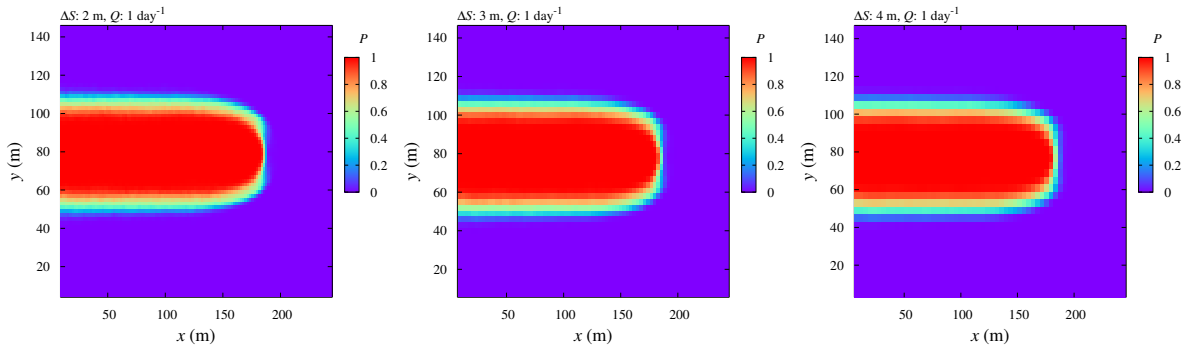

図-4 低い揚水量条件での格子間隔に応じた集粒域分布の推定結果

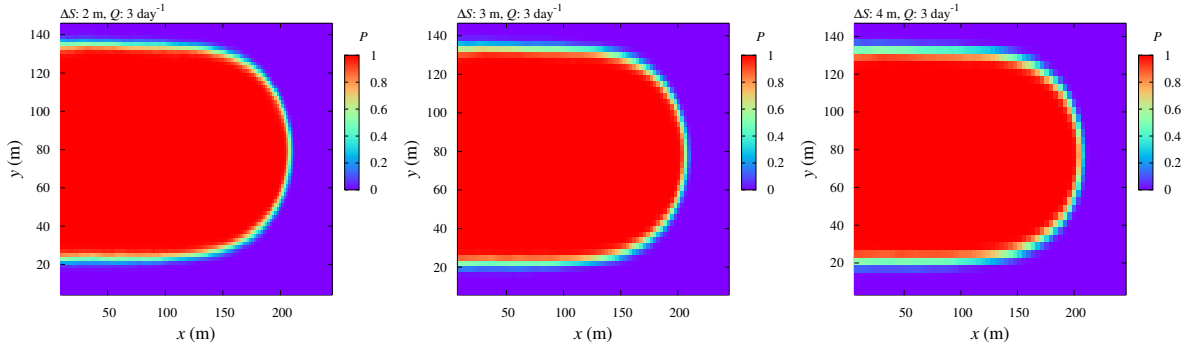

図-5 高い揚水量条件での格子間隔に応じた集粒域分布の推定結果

囲，図-5ではy座標20 mから130 mの範囲ではほとんどの格子で確率は1となっている．また，確率の高い範囲から外側に向かって徐々に確率は低下していき，確率ゼロに至る傾向は揚水量に関わらず共通の結果であり，既往の研究傾向[2)]とも合致する．

各格子の集粒域確率P^jについて図-4と図-5を比較すると，低い揚水量の場の方が$P^j \neq 0$かつ$P^j \neq 1$となる格子が領域に占める割合は大きい．この点を定量化するため，集粒域確率$P^j = 1$となる面積をA_c，$P^j \neq 0$かつ$P^j \neq 1$となる面積をA_uとして，該当格子を抽出し，格子間隔に応じたA_cとA_uの変化を図-6に示す．揚水量の高い場の方が広い範囲から溶質を回収できるため，揚水量に呼応して面積A_cは大きくなる．また，格子間隔が大きくなるほど，$P^j = 1$となる格子は少なくなり，逆に，$P^j \neq 0$かつ$P^j \neq 1$となる面積A_uの値が上昇する．このとき，低揚水量の場の方が高揚水量の場よりも面積A_uは広くなる点は特徴的であり，本解析領域では，低揚水量の場ほど確率が0か1に定まらない範囲が広く存在することを示している．

集粒域確率について吟味するため，面積A_uと面積A_cの比A_u/A_cを不確実係数UFとして導入し，図-6の結果を基に，格子間隔に応じた不確実係数の変化を図-7に緑色で示す．横軸には格子間隔を領域x方向距離$L = 270$ mで除した無次元数を設定している．揚水量に関わらず，格子間隔が増加するにつれて，不確実係数は増加し，低揚水場の不確実係数の方が大きくなる．また，高揚水量の場ほど取水井方向に向く流速成分は多くなり，低揚水量の場よりも多くの粒子が取水井に流入する[6)]ことから，流速ベクトルの方向や大きさ，さらには溶質分散の効果が複合することで集粒域確率，特に，$P^j \neq 0$かつ$P^j \neq 1$と

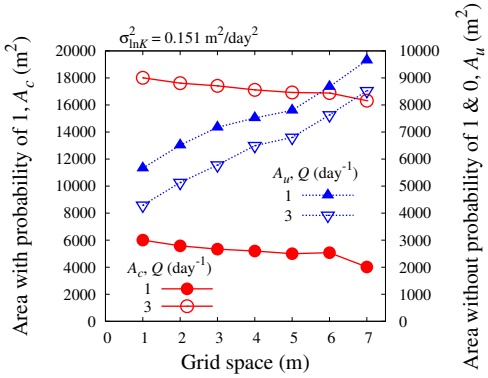

図-6 格子間隔に応じた集粒域面積の相違

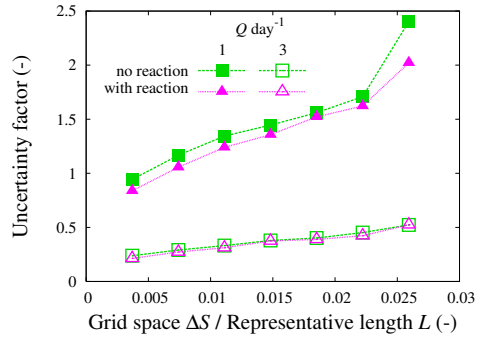

図-7 無次元化した格子間隔と不確実係数の関係

なる範囲に影響を及ぼしていると推察される．集粒域の確率分布は格子間隔依存ではあるものの，任意の格子間隔で集粒域を推定できることは本手法の利点と言える．

汚染物質の揚水処理や到達予測では，集粒域の空間分布に加えて，取水井に至るトラベルタイム推定が重要となる[1)]．トラベルタイムを推定するため，本手法では，到達粒子の初期位置から取水井までのトラベルタイムを記

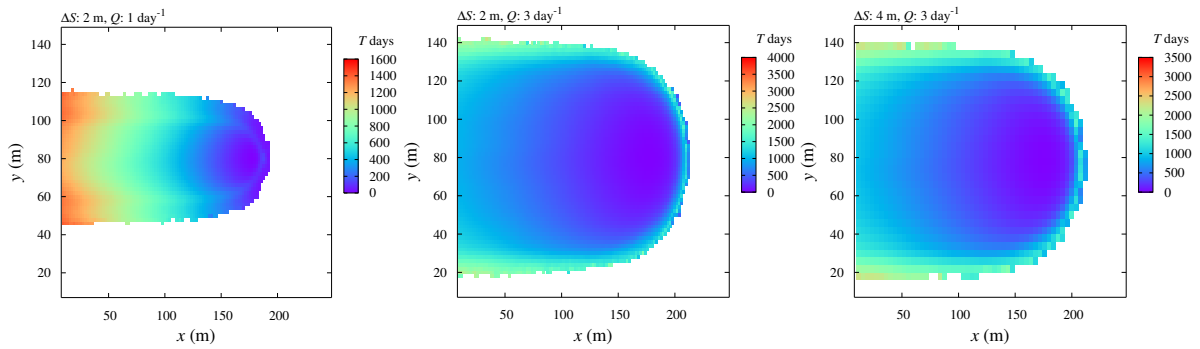

図-8 揚水量や格子間隔に応じたトラベルタイム分布の推定結果

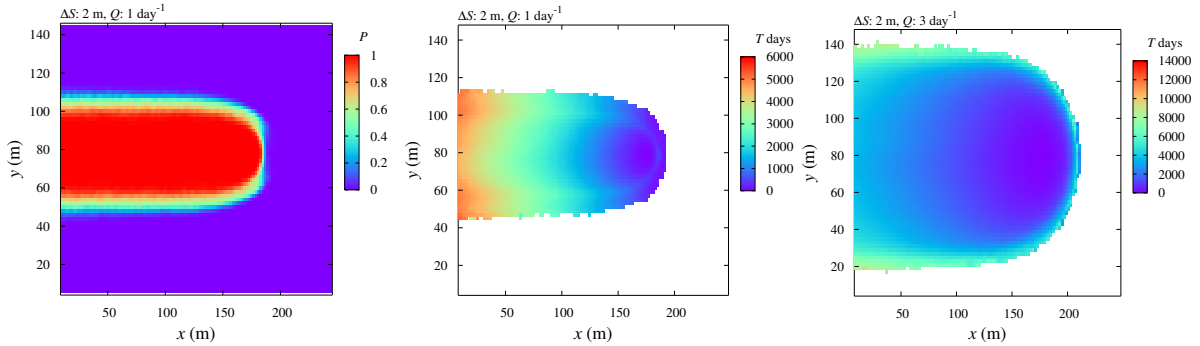

図-9 遅延係数のばらつきを考慮した場に対する集粒域分布とトラベルタイム分布の推定結果

憶した．また，集粒域推定に用いた格子を再度利用して，格子内の到達粒子の平均トラベルタイムを該当格子のトラベルタイムTとすることで，トラベルタイムの空間分布推定を可能にした．**図-8**に代表的な結果として，揚水量や格子間隔に応じたトラベルタイムの空間分布の推定結果を示す．取水井よりも上流側ほど，また同一x座標のうち，取水井からの幾何距離が長い地点ほどトラベルタイムは長くなる一般的な結果が得られており，推定結果は妥当であると判断される．したがって，本手法では，任意の格子に位置する汚染物質が取水井へ到達する確率と到達するまでの予測時間を推定することが可能である．

(2) 化学的不均質性の影響

一般的に，帯水層内の溶質輸送過程では，物質と土粒子間で吸脱着反応が生じる[12]ため，帯水層管理の一環として集粒域確率を推定する場合，吸脱着を反映した化学的不均質モデルを扱うことは十分に考えられる．本解析では，透水係数と遅延係数の相関モデル[13]を採用し，

$$R(\boldsymbol{x}) = 1 + \rho_b K_{dg} \exp(\beta(\ln K(\boldsymbol{x}) - \langle \ln K \rangle))/n_p \qquad (9)$$

により，透水係数のリアライゼーションに応じた遅延係数の空間分布を生成した．ここに，$\langle \ln K \rangle$は透水係数の幾何平均である．文献を参考にして，分配係数の幾何平均K_{dg}は0.526 m^3/Mg，乾燥密度ρ_bは1.5 Mg/m^{3}とした[7]．また，定数βは分配係数と透水係数の相関強さを表す定数である．十分な解像度で透水係数のみならず分配係数を求めることは現実的には難しいことから，文献[13]を参考に定数βは平均−0.2，分散0.24の正規分布となるように，ラテンハイパーキューブ法[14]により30個生成し，透水係数のリアライゼーションごとに異なるβを設定した．つまりは，定数βを正規確率変数と考えることで，種々の相関強さを有する化学的不均質場となるように配慮した．

化学的不均質性を考慮した場合の集粒域確率の分布，ならびに，トラベルタイムの分布結果を**図-9**に示す．化学的不均質性を考慮した場の平均遅延係数は3.25であり，**図-4**や**図-8**の結果と比較して，トラベルタイムの数値が遅れに対応して増えているものの，分布形状には際立った差異はない．また，**図-7**に紫色で示すように，格子間隔と不確実係数の関係は化学的不均質性を考慮していない緑色の結果とほぼ同じである．これは遅延係数のバラツキが取水井に至る溶質輸送経路を大幅に変化させる効果を有していないことに起因すると考えられ，対象サイトのように物理的不均質度の低い場においては，化学的不均質性は集粒域にあまり影響せず，平均的な遅れを加味したトラベルタイム分布になる．

(3) 透水係数の不均質度合いの影響

対象サイトの透水係数分布の幾何分散は0.151 m^2/day^{2}であり，不均質度としては比較的低いサイトである．そこで，透水係数の幾何分散を1.0 m^2/day^{2}にして，30リアライゼーションの模擬透水場を生成することで不均質度を上げた場に対して本手法を適用した．**図-10**に，2 mの格子間隔にて得られた集粒域分布とトラベルタイムの推定結果を示す．不均質度が高くなることにより，集粒域の推定確率のバラツキは大きくなり，トラベルタイムの空間分布は**図-8**に示す低不均質度の場よりもいびつな形状を呈している．

不均質度の変化を評価するため，**図-11**に格子間隔と

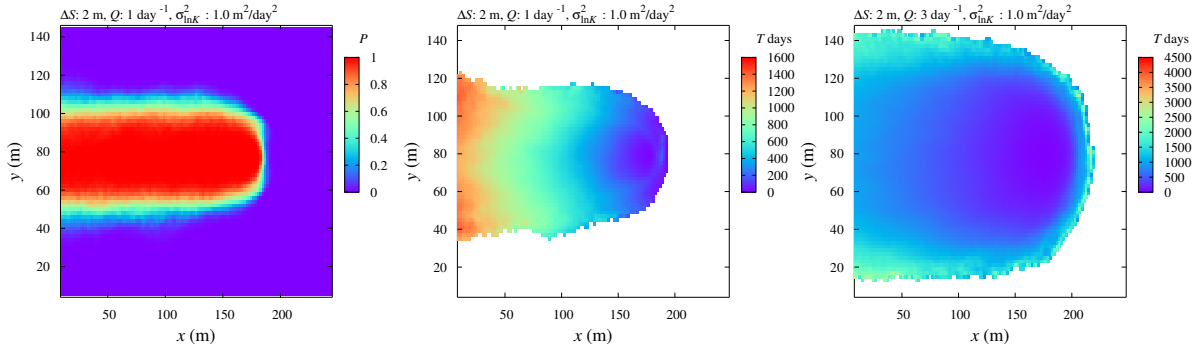

図-10 不均質性の高い場に対する集粒域分布とトラベルタイム分布の推定結果

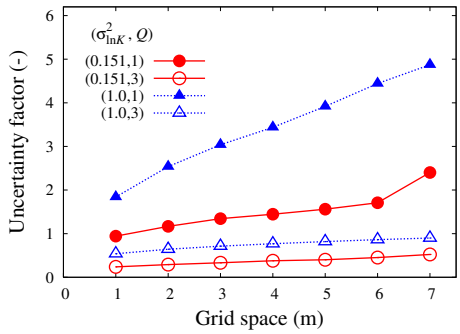

図-11 不均質度に応じた格子間隔と不確実係数の関係

不確実係数の関係を不均質度0.151 m^2/day^2のケースと合わせてプロットする．格子間隔に依存して不確実係数は二倍から数倍大きくなっており，透水係数の不均質度合いが増すことにより，溶質輸送経路は大きく変化し，到達粒子の数に強く影響を及ぼすことがわかる．

4. 結論

本研究では，取水井に溶質が流入する領域を集粒域と定義し，ランダムウォーク粒子追跡法と格子の重ね合わせを用いた集粒域・トラベルタイム分布の確率的推定方法を考案した．オランダのサイトを対象として，透水係数の空間分布を地球統計学的に30リアライゼーション生成し，揚水量条件や不均質条件を変えた透水場に本手法を適用した．また，集粒域の評価手段として，各格子の取り得る確率に基づいた不確実係数を導入した．その結果，高い揚水量の場ほど，集粒域確率が0より大きく1未満となる面積が小さくなり，不確実係数は小さく評価された．また，化学的不均質性はトラベルタイムの数値にのみ影響を及ぼし，集粒域の分布にはあまり影響しないことがわかった．さらに，透水係数のバラツキの増加は不確実係数の上昇につながる結果を得た．

今後の課題として，透水係数分布の相関長の影響や複数取水に対する集粒域推定が挙げられる．

参考文献

1) U.S. Environmental Protection Agency: *Design guidelines for conventional pump-and-treat systems*, U.S. Environmental Protection Agency, EPA/540/S-97/504, 38p., 1997.
2) 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.
3) Riva, M., Guadagnini, A. and De Simoni, M.: Assessment of uncertainty associated with the estimation of well catchments by moment equations, *Adv. Water Resour.*, 29, pp.676–691, 2006.
4) Kunstmann, H. and Kinzelbach, W.: Computation of stochastic wellhead protection zones by combining the first-order second-moment method and Kolmogorov backward equation analysis: *J. Hydrol.*, 237, pp.127–146, 2000.
5) 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.
6) 井上一哉，Uffink, G.J.M.，田中勉：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，水工学論文集, 53, pp.523–528，2009.
7) Uffink, G.J.M.: Analysis of dispersion by the random walk method, *Ph.D Dissertation, TU-Delft*, 150p., 1990.
8) 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.
9) Deutsch, C.V. and Journel, A.G.: *GSLIB: Geostatistical software library and user's guide*, Oxford University Press, 340p., 1992.
10) 齋藤雅彦，高山裕介，中川啓：数値シミュレーションによる不均一地盤内の塩水侵入挙動に関する研究，土木学会論文集B1（水工学），67(4)，pp.595–600，2010.
11) 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.
12) Bear, J.: *Dynamics of fluids in porous media*, Dover Publications, 764p., 1972.
13) 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.
14) McKay M.D., Beckman R.J. and Conover W.J.: A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code, *Technometrics*, 21(2), pp.239–245, 1979.

（2014.9.30受付）