

# 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

## EVALUATION OF TIME-RELATED CAPTURE ZONE AND CAPTURE PROBABILITY OF WELL USING PARTICLE TRACKING METHOD

井上一哉<sup>1</sup>・Gerard UFFINK<sup>2</sup>・田中勉<sup>3</sup>

Kazuya INOUE, Gerard UFFINK and Tsutomu TANAKA

<sup>1</sup> 正会員 博士(農学) 神戸大学助教 大学院農学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

<sup>2</sup> Ph.D. デルフト工科大学准教授 土木工学部 (2628 CN Stevinweg 1 Delft, The Netherlands)

<sup>3</sup> 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)

The aim of this work is to assess time-related capture zones relevant to the activity of extraction wells with different pumping rates. The flow is steady and two-dimensional in a homogeneous domain with isotropic and anisotropic transmissivities. Spatial locations of time-related well capture zones for nonreactive solute are delineated using backward particle tracking approach. The results showed the effects of well configuration, pumping rate and interaction between individual capture zones belonging to each extraction well on the variation of second order spatial moments as well as the form of capture zones. Moreover, total probability that initial particle distributions associated with time-related capture zones were extracted by the well within a given time was identified through random walk particle tracking. Extraction well comprising the outer capture zone displayed a substantial increase of total probability due to the particle pass through a boundary between the inner and outer capture zones.

**Key Words:** *particle tracking, random walk, solute transport, time-related capture zone, capture probability of well, anisotropy*

### 1. 緒論

地下水の水質管理や汚染防止において取水井により構成される集水域の分布形態を把握することは健全な地下水管理につながる項目の一つである。また、汚染された帯水層を浄化する手段としては揚水処理が一般的であり、汚染物質の回収に要する時間ならびに回収効率を評価する上で帯水層内に存在する溶質の滞在期間、すなわち、対象溶質の取水井への到達時間に対する検討は意義ある事項である<sup>1)</sup>。

これまで集水域の評価は解析解による検討<sup>2),3)</sup>に加えて、半解析的に検討<sup>4),5)</sup>されてきた。一方で、取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ことから、数値解析的アプローチ<sup>6),7)</sup>も多くあり、最尤法やベイズ法による推定<sup>8),9)</sup>やモンテカルロ法の適用<sup>7)</sup>により、水理特性に応じた集水域の変化について検討されてきた。また、流速分布に基づいて粒子の移行軌跡を追跡する粒子追跡法は集水域の境界形状を時系列で表現できる特徴から適用されている<sup>10),11)</sup>。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取水井への到達過程に対する空間特性評価<sup>12)</sup>に関してはさほど議論されていない。

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<sup>13)</sup>。そのため、集水域に存在する粒子数と取水井にて回収できる粒子数の割合、すなわち取水井の粒子捕獲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、取水井と集水域の関係には多くの課題が残されていると言える。さらには、揚水量が大きく取水井群の集水域が干渉し合う状況では、集水域同士の間隔がない場合に比して各取水井の粒子捕獲確率は変動すると推察されるが、単独の取水井に関する議論<sup>14)</sup>に加えて、複数の集水域形状と捕獲確率の変動に関する議論は極めて少ない。

そこで本研究では、複数の取水井を対象として、浸透場の透水異方性と揚水量に応じた集水域の時系列変動を後方粒子追跡により捉え、空間モーメントの観点から集水域分布の変動特性を考察する。また、ランダムウォー

ク解析により粒子群の初期位置と取水井への粒子到達確率の関係ならびに、粒子到達確率に対するマイクロ分散長の影響について検討することで帯水層の汚染浄化や取水井の汚染防止に向けた一助とすることを目的とする。

## 2. 物質移動解析モデル

### (1) 浸透流解析

飽和条件下にある均質異方性帯水層内の地下水流れ場に取水井の存在を考慮した浸透流方程式は次式である<sup>2)</sup>。

$$\sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left( K_i \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) = Q(\mathbf{x}) \quad (1)$$

ここに、 $\mathbf{x}$ は取水井の位置ベクトル、 $h$ は全水頭、 $K_i$ は各軸方向の透水係数、 $Q$ は取水井位置での揚水量である。また、 $x_i$ は座標であり、添字の1から3はそれぞれ、 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 軸を表す。本解析では、透水係数の異方性を考慮するとともに、複数の取水井に既定の揚水量を与えることで揚水量に応じた水頭分布をFEM解析により導出する。また、次式により流速分布を求め、粒子追跡解析に供する。

$$v_i = - \sum_{i=1}^3 \frac{K_i}{n} \frac{\partial h}{\partial x_i} \quad (2)$$

ここに、 $v_i$ は実流速ベクトル成分、 $n$ は間隙率である。本解析では帯水層厚さを10 mに設定し、2次元の浸透流状態を対象とするため、異方性比を $\beta = K_x/K_y$ として表す。

### (2) ランダムウォーク粒子追跡と後方粒子追跡解析

粒子追跡法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、粒子固有の物理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の手法であり、ランダムウォーク法はその一種である<sup>15)–18)</sup>。粒子の移動経路は移動式と確率的分散式により次式で表現される<sup>16),19)</sup>。

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

ここに、 $X_{p,i}(t)$ は時間 $t$ における粒子位置の $i$ 成分、 $\Delta t$ は時間増分、 $\Xi_j$ は3つの成分を有するベクトルであり、平均0、分散1の正規分布に従う変数である。また、 $A_i$ は移流を表すドリフトベクトルであり、次式にて定義される。

$$A_i = \frac{v_i(\bar{X}_p(t)) + \sum_{j=1}^3 \frac{\partial D_{ij}}{\partial x_j}(\bar{X}_p(t))}{R(\bar{X}_p(t))}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (4)$$

ここに、 $R$ は遅延係数である。 $D_{ij}$ は分散係数テンソルであり、次式で表される<sup>20)</sup>。

$$D_{ij} = (\alpha_T |\mathbf{v}| + D_d)I_{ij} + (\alpha_L - \alpha_T) \frac{v_i v_j}{|\mathbf{v}|} \quad (5)$$

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、 $D_d$ は有効拡散係数、 $I_{ij}$ は単位マトリクスである。

また、 $B_{ij}$ は分散に関わる変位マトリクスである<sup>19)</sup>。

$$B_{ij} = \begin{pmatrix} \frac{v_1}{|\mathbf{v}|} \sqrt{\frac{2\alpha_L |\mathbf{v}|}{R}} & \frac{-v_1 v_3}{|\mathbf{v}| \sqrt{v_1^2 + v_2^2}} \sqrt{\frac{2\alpha_T |\mathbf{v}|}{R}} & \frac{-v_2}{\sqrt{v_1^2 + v_2^2}} \sqrt{\frac{2\alpha_T |\mathbf{v}|}{R}} \\ \frac{v_2}{|\mathbf{v}|} \sqrt{\frac{2\alpha_L |\mathbf{v}|}{R}} & \frac{-v_2 v_3}{|\mathbf{v}| \sqrt{v_1^2 + v_2^2}} \sqrt{\frac{2\alpha_T |\mathbf{v}|}{R}} & \frac{v_1}{\sqrt{v_1^2 + v_2^2}} \sqrt{\frac{2\alpha_T |\mathbf{v}|}{R}} \\ \frac{v_3}{|\mathbf{v}|} \sqrt{\frac{2\alpha_L |\mathbf{v}|}{R}} & \frac{\sqrt{v_1^2 + v_2^2}}{|\mathbf{v}|} \sqrt{\frac{2\alpha_T |\mathbf{v}|}{R}} & 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

流速分布に従って風上から風下へ粒子位置の時系列変化を追跡する前方粒子追跡解析<sup>20)</sup>は汚染源から取水井に至る粒子到達時間の評価に有益であるが、集水域境界を把握するには粒子群の初期配置を試行錯誤的に変えて解析する必要があるため、解析的に非効率となる。一方、後方粒子追跡(Backward particle tracking: BPT)は流れの逆方向に粒子の移動軌跡を追跡する方法<sup>7),14),16)</sup>であり、一度の解析で集水域境界の形状変化を表現できる利点を有している。後方粒子追跡による物質移動は次式(7)に基づいて評価される。

$$X_{p,i}(t + \Delta t) = X_{p,i}(t) - \frac{v_i(\bar{X}_p(t))}{R(\bar{X}_p(t))} \Delta t, \quad i = 1, 2, 3 \quad (7)$$

つまりは、式(3)から確率分散項と分散係数テンソルの空間微分項を取り除き、流速成分の符号を反転して後方粒子追跡を実施する。分散項を考慮して後方粒子追跡を実施する研究例<sup>16)</sup>も存在するが、分散現象は不可逆現象である点と後述するように、分散の影響は移流成分のみの後方粒子追跡結果を基に検討するため、本解析では式(7)に従って粒子を追跡し、集水域を評価する。また、時間更新の際には、取水井周辺部で急変する流線形状を追跡できるように、4次のルンゲ・クッタ法<sup>20)</sup>を用いる。

## 3. 集水域の時系列変動に関する評価

### (1) 後方粒子追跡による集水域評価

本解析では、**図-1**に示すように400 m × 400 mの領域において、原点から $(x, y) = (400, 400)$ の地点に向けて0.005の動水勾配下にある流れ場を対象とし、 $(x, y) = (150, 250)$ と $(250, 250)$ 、 $(250, 150)$ の地点に取水井PW1とPW2、PW3を設けて既定の揚水量を与える。各取水井に対する集水域の時間変化を検討するため、取水井PW1からPW3の位置にそれぞれ5000粒子を配置して後方粒子追跡により粒子の空間分布を追跡する。時間ステップ $\Delta t$ は2日、解析期間を3600日とし、取水井の井戸半径を0.3 mと仮定して、取水井地点を中心とした半径0.3 mの円上に一様乱数により粒子群を配置する。また、取水井同士の集水域の形状に対する干渉の程度を変化させるため、各取水井の揚水量を一定として、8、20、40 m<sup>3</sup>/dayの揚水量を対象とする。さらには、異方性比を0.5、1.0、2.0に変化させることで、揚水量の変化のみならず異方性に応じた集水域の時系列変動を捉える。**表-1**に解析パラメータを列記する。本解析では、0.125から5.0

表-1 解析に用いるパラメータ

粒子数	15000	縦分散長 $\alpha_L$ (m)	2.0, 4.0, 8.0	分散長比 $\alpha_T/\alpha_L$ (-)	0.2
時間ステップ $\Delta t$ (day)	2.0	有効拡散係数 $D_d$ ( $m^2/day$ )	0	遅延係数 $R$ (-)	1.0
透水係数 $K_x, K_y$ (m/day)	2.5, 5.0	異方性比 $\beta = K_x/K_y$ (-)	0.5, 1.0, 2.0	飽和帯水層厚さ (m)	10.0
間隙率 $n$ (-)	0.2	揚水量 $Q$ ( $m^3/day$ )	0, 8.0, 20.0, 40.0	ペクレ数 $Pe_x, Pe_y$ (-)	0.125 ~ 5.0

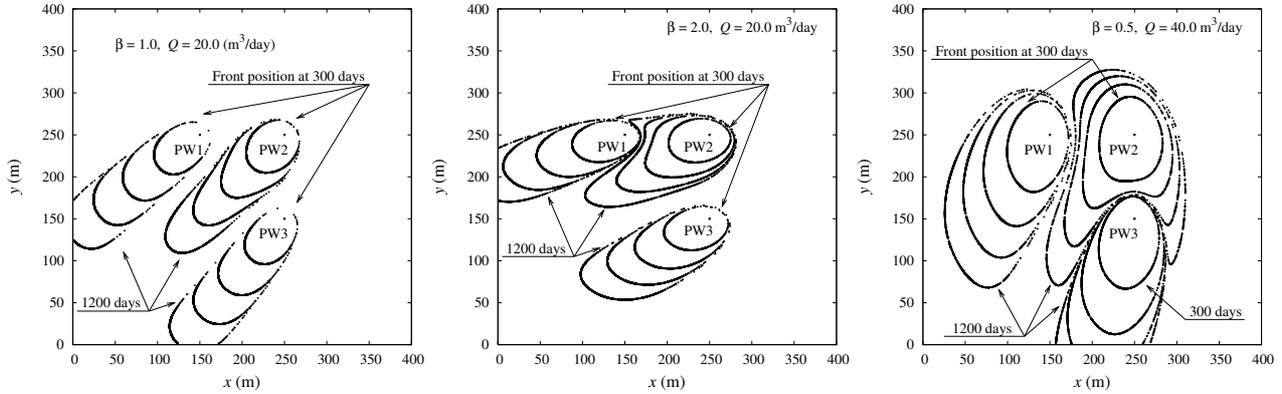


図-1 解析対象帯水層の平面図ならびに後方粒子追跡による300日ごとの集水域形状の変化: (左)異方性比1.0, 揚水量20  $m^3/day$ . (中)異方性比2.0, 揚水量20  $m^3/day$ . (右)異方性比0.5, 揚水量40  $m^3/day$ .

までのペクレ数領域を対象としており、透水係数や揚水量はフィールドの値<sup>21),22)</sup>を参考に設定している。また、1つの粒子の質量を0.01 gに設定するが、減衰や化学反応を伴わないため、粒子質量は解析結果に影響しない。

図-1に解析結果の例として、既定の異方性比 $\beta$ と揚水量 $Q$ に対する集水域形状の変化について、3つの取水井に配置された初期粒子位置ならびに各取水井が構成する集水域境界の分布を300日間隔で示す。1つの集水域境界は各取水井に発生させた5000個の粒子位置をプロットして描かれるが、図中では1000粒子を用いて境界を記しているため、プロット密度が疎になっている部分がある。

集水域境界の形状や規模は異方性比ならびに揚水量に応じて異なり、図-1の左および中に見られるように、風上方向に一部のフロントが延伸する状態と図-1の右のように揚水量がかなり大きい場合には全体的に集水域の境界は拡がりを見せる状態がある。集水域のフロントの一部が時間経過とともに拡大する浸透流状態では時間が経過しても主たる流れ方向に対して垂直方向に集水域の境界はさほど拡大せず、また、他の取水井の集水域とは接しない、あるいは集水域境界が接するのに時間を要する。例えば、例示した3つの浸透場において、取水井PW2の揚水量をゼロに設定した場合、解析期間内では取水井PW1とPW3の集水域は接することなく、領域内の異なる空間に2つの集水域が形成されることになる。また、図示していないものの、異方性比に関わらず揚水量を8  $m^3/day$ に設定した場合、小さい揚水量のため、互いの集水域は接することなく領域内に3つの独立した集水域が形成される。

一方で、揚水量の増大は集水域形状に影響を及ぼすため、異方性比の影響も相まって粒子群の分布状態は大きく異なり、図-1に示すように、取水井PW2の集水域は両側の集水域の影響を受けていびつな形状になる。加え

て、図-1の中と右のように、異方性比や揚水量、取水井位置の関係から取水井PW2の集水域は取水井PW1やPW3の集水域を周り込むように形成され、時間経過とともに各集水域の一部は結合する。この点はある地点に存在する汚染粒子の風下方向への挙動を考えた場合、異方性比や揚水量は粒子が到達する取水井位置や粒子到達時間に大きく影響することを示唆しており、それらを見積もる際の後方粒子追跡解析の有益性を示している。なお、例えば、図-1の右に示す取水井PW3では、解析領域外へ移行する粒子の存在により、900日と1200日の集水域は閉じていない。本解析では、粒子の初期配置と取水井への到達状態を検討するため、解析領域を小さく設定しており、この点に関しては後述する。

## (2) 空間モーメント変動特性

集水域の形状に加えて、集水域境界の変動特性に対する検討は集水域の性質を把握する上で意義ある事項である。そこで、後方粒子追跡解析により得られた集水域の経時変化を基に次式を用いて空間2次モーメント<sup>19)</sup>を導出し、粒子空間分布の変動特性について取水井ごとに検討する。

$$X_{G,i} = \frac{1}{m(t)} \sum_{k=1}^{NP_t} \frac{m_p^k X_{p,i}^k(t)}{R(X_p^k(t))}, \quad m(t) = \sum_{k=1}^{NP_t} \frac{m_p^k}{R(X_p^k(t))} \quad (8)$$

$$S_{ij}(t) = \frac{1}{m(t)} \sum_{k=1}^{NP_t} \frac{m_p^k X_{p,i}^k(t) X_{p,j}^k(t)}{R(X_p^k(t))} - X_{G,i}(t) X_{G,j}(t) \quad (9)$$

ここに、 $m(t)$ は空間内に存在する粒子の総質量、 $m_p^k$ はk番目の粒子の有する質量、 $X_{G,i}$ は粒子群の重心位置であり、添字iは軸方向を示す。また、 $S_{ij}$ は時間tの粒子空間分布に対する空間2次モーメント、 $NP_t$ は時間tの空間内の粒子総数、 $X_{p,i}^k$ はk番目の粒子位置座標である。図-2に各取水井位置に与えた粒子群の空間分布変化に対する空間2

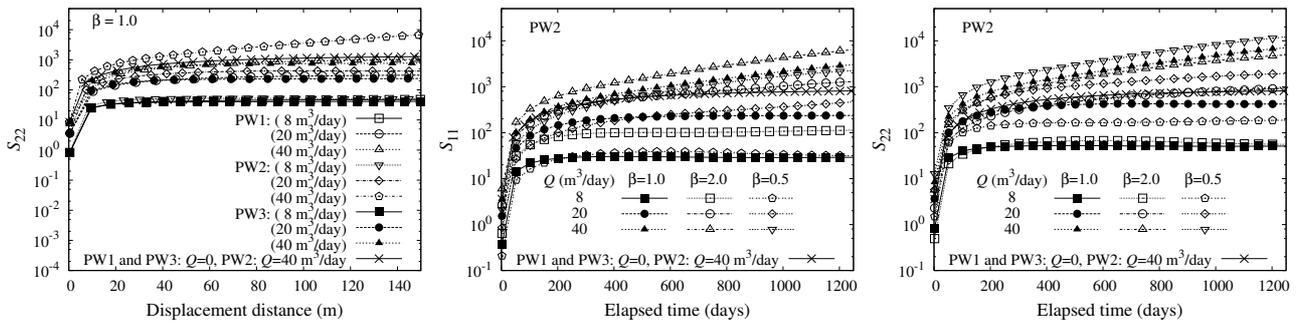


図-2 粒子群の移行に伴う空間2次モーメント変化: (左)重心位置の変位量とy方向空間モーメントの関係, (中)経過時間に対するx方向空間モーメントの変化, (右)経過時間に対するy方向空間モーメントの変化.

次モーメントの変化を示す. 図中の変位量は式(8)にて得られる粒子群の重心位置と各取水地点の距離を示す.

図-2の左に示すように, 小さい揚水量の場合は取水井間の空間モーメントに差異はなく, 短い変位量で空間モーメントは一定となる. これは粒子空間分布の時間変化がないことを示しており, 一定の割合で集水域は時間経過とともに拡大する状態にある. また, 揚水量の増加に伴い, 空間2次モーメントは粒子分布の延伸とともに増加し, 特に取水井PW2の変化率は大きく, 取水井PW2のみ揚水を考慮するケース(x印)と比較すると明確な差異が生じている. 取水井PW2の集水域は他の取水井を取り囲むように形状が進展することから, 対象とした変位量の範囲では非線形的な増加となる特性を有している. 一方, 取水井PW1とPW3は取水井PW2の揚水の影響により各軸方向への集水域の拡大に制約を受けるため, 比較的短い変位量で空間2次モーメントの変動は収まると考えられる. この点は取水井の位置や揚水量に応じて集水域の変化状態は異なることを示唆しており, 複数の取水井が影響を及ぼし合って稼動する場合の特徴的な点と言える.

図-2の中と右は取水井PW2を対象に, 時間経過に伴う空間2次モーメントの変動を異方性比の値ごとにプロットしている. 異方性の度合いに応じて空間2次モーメントの大きさには変化が見られ,  $S_{11}$ は異方性比 $\beta = 2.0$ の浸透場にて大きくなり, 対照的に $S_{22}$ の値は異方性比 $\beta = 0.5$ の状況において最も大きい変化となる. これは流速ベクトルのx成分とy成分の相違が空間2次モーメントに反映されている結果であり, 異方性の度合いはさほど大きくなくとも集水域形状の進展には影響を及ぼすと言える.

#### 4. 取水井の粒子捕獲確率に関する評価

##### (1) 粒子捕獲確率

後方粒子追跡解析は移流現象のみに基づいて実施されるため, 集水域の境界に位置する粒子群は同一の移行時間を要して取水井にすべて同時に到達することとなる. しかしながら, 取水井へ至る物質移行過程を考えた場合, 集水域内に存在する粒子数と取水井に到達する粒子数の割合, すなわち取水井の粒子捕獲確率は不可逆な分

散現象の影響により100%にはならない<sup>16)</sup>. また, 粒子初期位置に応じて取水井の捕獲確率は変動すると考えられる<sup>14)</sup>ことから, 集水域境界の分布位置と取水井の粒子捕獲確率を検討するため, 後方粒子追跡にて得られた各時刻の粒子群分布を初期配置として, 縦分散長 $\alpha_L = 2.0$  mと分散長比 $\alpha_T/\alpha_L = 0.2$ の下で式(3)に基づくランダムウォーク粒子追跡解析を実施する.

図-3に浸透流状態に応じた各取水井の粒子捕獲確率, すなわち取水井へ到達した粒子の累積質量分布を種々の粒子初期配置に対して示す. このとき, 各取水井へ到達した粒子の質量を該当取水井の集水域境界を構成する粒子群が有する総質量で基準化した相対値をプロットしている. つまりは, 単一の集水域に存在するすべての粒子が1つの取水井に捕獲された場合, 結果は1となる. 図-3より時間経過に伴う各取水井の捕獲確率の増加が見取れ, 異方性の度合いに関わらず揚水量の増加とともに, 最終的な捕獲確率は上昇する傾向にある. 図-1に見られるように小さい揚水量に対する集水域の場合, フロント部の時間的進展は一部の領域に限定されることから, 境界を越えた粒子は再度, 分散により集水域内へ戻らない限りは取水井に捕獲されないまま下流側に移行するため, 集水域の時系列形状に応じて捕獲確率に差が生じると考えられる. 他方, 揚水量が増加すると大部分のフロントが進展するため, 分散の影響下にあっても最も大きい集水域を越えて移行する確率は低くなり, 結果として, 揚水量の増加と捕獲確率の上昇は呼応すると推察される.

また, 対象とする3つの取水井の内, 特に, 取水井PW2の捕獲確率の変動は特徴的であり, 累積質量は1を上回る変化を見せている. これは取水井PW1やPW3の集水域内に存在する粒子が移行過程で集水域境界を越えて取水井PW2の方へ流入したことが要因である. したがって, 集水域が他の集水域を取り囲むように分布する場合には最も外側の集水域を構成する取水井は内側の取水井よりも多くの汚染物質を回収できると言える.

ところで, 領域サイズの関係上, 図-1の右に示すように, 揚水量 $Q = 40$  m<sup>3</sup>/dayの場合, 取水井PW3における900日目の粒子群はいくつかの粒子の領域外移行により粒子分布は閉じておらず, また大部分のフロント部分が取水井PW2の集水域と接している. Uffink<sup>16)</sup>が示すよ

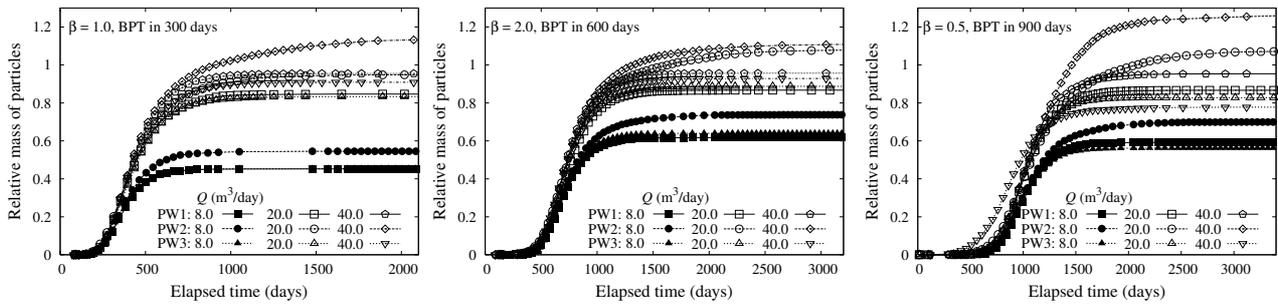


図-3 取水井の粒子捕獲累積曲線: (左)異方性比1.0, 初期粒子分布はBPT300日目, (中)異方性比2.0, 初期粒子分布はBPT600日目, (右)異方性比0.5, 初期粒子分布はBPT900日目.

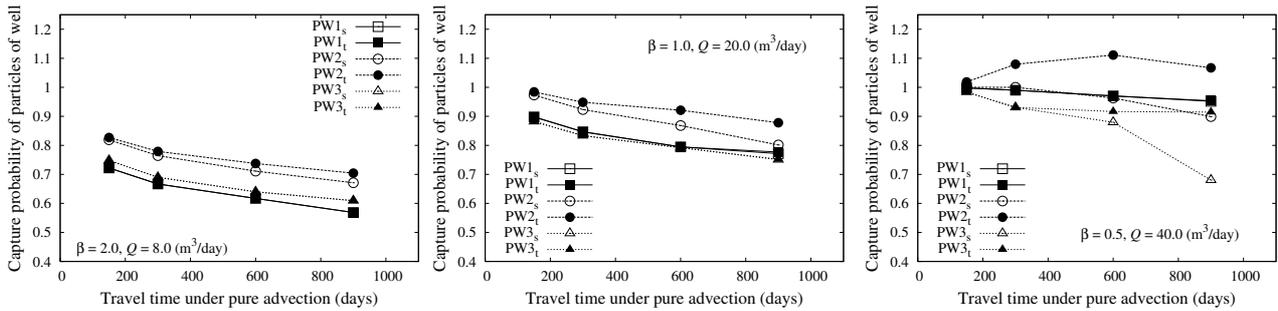


図-4 取水井の粒子捕獲確率の比較: (左)異方性比2.0, 揚水量8 m³/day, (中)異方性比1.0, 揚水量20 m³/day, (右)異方性比0.5, 揚水量40 m³/day.

うに、他の取水井の集水域付近に存在する粒子は分散により集水域境界をまたいで移動する可能性がある。実際に、取水井PW3の集水域を構成する粒子群の内、約32%は取水井PW2に取り込まれており、逆の移動は約10%である。一方、集水域が閉じている600日目の条件下では、取水井PW3の集水域に存在する粒子群の約12%が取水井PW2に取り込まれ、取水井PW2からは4%に満たない粒子群が取水井PW3へ到達する。取水井PW2とPW3の集水域を移動する粒子数の差異と取水井PW2からの粒子流入の影響を受けて、図-3の右に示す揚水量 $Q = 40 \text{ m}^3/\text{day}$ における取水井PW3の累積質量変化は他のケースよりも立ち上がり早い結果になっていると推察される。初期の粒子群は移流時間の等しい地点に位置している点を踏まえると、集水域の開閉状態ではなく、他の取水井の集水域と接する場所や規模に応じて取水井への粒子到達状態は変化すると言える。

さらに、各取水井の捕獲性能を比較するため、図-4に粒子群の初期配置、すなわち後方粒子追跡による粒子移行時間と取水井の捕獲確率の関係を示す。PW<sub>s</sub>は各取水井の構成する集水域に位置する粒子群に対する捕獲確率、PW<sub>t</sub>は他の集水域から流入する粒子数を考慮した捕獲確率である。全体的な傾向として、取水井と初期粒子位置までの距離、つまりは移流による移行時間が長くなるにつれて捕獲確率は低下している。いくつかの研究例<sup>14),16)</sup>が指摘するように、最も規模の大きい集水域の境界付近に位置する粒子は分散の影響を受けて境界を越える確率が高くなる。そのため、図-4の右に見られるように、取水井から離れた位置に初期粒子が分布するほど取水井PW2が取り込む粒子数は多くなる一方で、約1割

の粒子が取水井PW2の集水域境界を越えて取水井PW3に流入するため、最も遠くに粒子群が位置する場合には取水井PW2の捕獲確率は少し低下することとなる。加えて、取水井PW3単独の捕獲確率はかなり小さく、図示していないが、2.0の異方性比では逆に、取水井PW1単独の捕獲確率が大きく低下する結果となる。図-1の右にて観察されるように、後方粒子追跡の900日目に対応する取水井PW1とPW3の集水域はともに1200日目の集水域の内側に存在するものの、取水井PW3の集水域の大部分は重なり合っているため、分散により集水域を越える移動が発生しやすく、結果として取水井に到達する粒子数の減少につながると考えられる。

## (2) ミクロ分散長の影響

前述のように、分散現象は捕獲確率に影響を及ぼすことから、分散長比を $\alpha_T/\alpha_L = 0.2$ に固定して、縦分散長の値を変えたランダムウォーク解析を通じてミクロ分散長と捕獲確率の関係を検討する。図示していないものの、分散長と回収できない粒子数の変化は呼応しており、分散性の高さは捕獲確率の低下につながると言える。

取水井への流入粒子数を比較するため、後方粒子追跡による粒子移行時間に対するPW<sub>t</sub>/PW<sub>s</sub>の関係を図-5に示す。取水井PW1とPW3のPW<sub>t</sub>/PW<sub>s</sub>の値は概ね1であり、他の集水域からの粒子流入はほとんどなく、異方性による初期粒子分布の影響により移行時間が長くなる場合に限って取水井PW3には集水域をまたぐ粒子移行が生じる。また、揚水量ならびに分散長に関わらず、他の集水域に存在する粒子群の流入、あるいは他の取水井に取り込まれない粒子を回収することで取水井PW2の捕獲確率は上

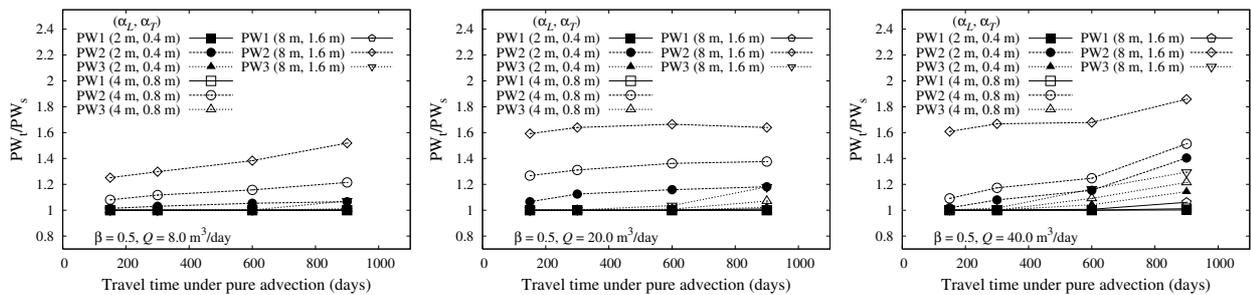


図-5 ミクロ分散長の差異による捕獲確率の変化: (左)揚水量 $8 \text{ m}^3/\text{day}$ , (中)揚水量 $20 \text{ m}^3/\text{day}$ , (右)揚水量 $40 \text{ m}^3/\text{day}$ .

昇することがわかる。加えて、分散長の増大とともに  $PW_i/PW_s$  は増加しており、捕獲確率は分散度合いに左右されることとなる。したがって、取水井の捕獲確率を評価する上で帯水層の分散特性は1つの不確実要素であるとともに、捕獲確率に関与する因子であると言える。

## 5. 結論

本研究では、均質異方性地盤を対象に粒子追跡法を適用して取水井の配置や揚水量に応じた集水域形状の時系列変化を追跡し、複数の取水井に対する集水域特性を評価した。その結果、揚水量の増加による集水域間の干渉が大きい場合、取水井の空間2次モーメント変動は非線形増加となる特性を有していることを示した。また、粒子群の初期位置と揚水量は取水井の捕獲確率に大きく影響を及ぼし、特に、集水域が他の集水域を取り囲むように分布する場合、捕獲確率は大きく変動すること、集水域同士の結合領域の規模に応じて捕獲確率は変化することがわかった。さらに、分散長と捕獲確率の関係は逆比例するものの、集水域間の粒子移動確率が高まり、下流側の取水井における捕獲確率は顕著に変動する結果を得た。

## 参考文献

- 1) Bedient, P.B., Rifai, H.S. and Newell, C.J.: *Ground water contamination*, Prentice Hall, 604p., 1999.
- 2) Bear, J. and Jacobs, M.: On the movement of water bodies injected into aquifers, *J. Hydrol.*, 3, pp.37–57, 1965.
- 3) Shan, C.: An analytical solution for the capture zone of two arbitrarily located wells, *J. Hydro.*, 222, pp.123–128, 1999.
- 4) Bakker, M. and Strack, O.: Capture zone delineation in two dimensional groundwater flow models, *Water Resour. Res.*, 32(5), pp.1309–1315, 1996.
- 5) Christ, J. and Goltz, M.: Hydraulic containment: analytical and semi-analytical models for capture zone curve delineation, *J. Hydrol.*, 262, pp.224–244, 2002.
- 6) Vassolo, S., Kinzelbach, W. and Schäfer, W.: Determination of a well head protection zone by stochastic inverse modelling, *J. Hydrol.*, 206, pp.268–280, 1998.
- 7) van Leeuwen, M., Butler, A.P., te Stroet, C.B.M. and Tompkins, J.A.: Stochastic determination of the well capture zones conditioned on regular grids of transmissivity measurements, *Water Resour. Res.*, 36(4), pp.949–957, 2000.
- 8) Feyen, L., Beven, K.J., de Smedt, F. and Freer, J.: Stochastic capture zone delineation within the generalized likelihood

uncertainty estimation methodology: conditioning on head observations: *Water Resour. Res.*, 37(3), pp.625–638, 2001.

- 9) Feyen, L., Dessalegn, A.M., de Smedt, F., Gebremeskel, G. and Batelaan, O.: Application of a bayesian approach to stochastic delineation of capture zones, *Ground Water*, 42(4), pp.542–551, 2004.
- 10) van Leeuwen, M., te Stroet, C.B.M., Butler, A.P. and Tompkins, J.A.: Stochastic determination of the Wierden (Netherlands) capture zones, *Ground Water*, 37(1), pp.8–17, 1999.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) Guadagnini, A. and Franzetti, S.: Time-related capture zones for contaminants in randomly heterogeneous formations, *Ground Water*, 37(2), pp.253–260, 1999.
- 14) van Kooten, J.J.A.: Groundwater contaminant transport including adsorption and first order decay, *Stochastic Hydrol. Hydraul.*, 8, pp.185–205, 1994.
- 15) Kinzelbach, W. and Uffink, G.: The random walk method and extensions in groundwater modeling, in *Transport Process in Porous Media*, edited by J.Bear and M.Y. Corapcioglu, Kluwers Acad., pp.761–787, 1989.
- 16) Uffink, G.: Analysis of dispersion by the random walk method, *Ph.D. Dissertation, TU-Delft*, 150p., 1990.
- 17) Tompson, A. and Gelhar, L.: Numerical simulation of solute transport in three-dimensional, randomly heterogeneous porous media, *Water Resour. Res.*, 26(10), pp.2541–2562, 1990.
- 18) 山下亮: 粒子追跡法による物質移行解析法の2重空隙モデルへの適用, *土木学会論文集*, 475/III-24, pp.79–88, 1993.
- 19) Salamon, P., F.-Garcia, D. and G.-Hernández, J.J.: A review and numerical assessment of the random walk particle tracking method, *J. Contam. Hydrol.*, 87, pp.277–305, 2006.
- 20) Zheng, C. and Bennett, G.D.: *Applied contaminant transport modeling*, Wiley Interscience, 621p., 2002.
- 21) Roelsma, J.: *Vergelijkende modelstudie naar de belasting van het grondwater met nitraat voor het intrekgebied 't Klooster*, Open Universteit, 186p., 2001 (in Dutch).
- 22) Uffink, G. and Mülschlegel, J.: *Toepassing van LGMCAD voor de berekening van nitraat in ruwwater op pompstations in Twente en de Achterhoek*, RIVM, 108p., 2001 (in Dutch).