

(34) 地下水揚水処理と汚染防護領域評価に向けた 取水井の集水域分布と物質捕獲率に関する検討

井上 一哉^{1*}・高尾 幸宏¹・田中 勉¹

¹ 神戸大学大学院農学研究科 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1)

* E-mail: mornel@kobe-u.ac.jp

本研究では、地下水揚水処理による地下水中の汚染物質の効果的な回収ならびに取水井の汚染防護領域の策定に向けて、ラボスケールのトレーサ実験により取水井の集水域分布と物質捕獲率に関して検討するとともに、粒子追跡法を適用して、粒子位置と捕獲率変動の関係を評価した。また、フィールドを対象に取水井の配置や揚水量に応じた集水域形状の時間変動を追跡し、トラベルタイムの差異に応じた捕獲率の変動を考察した。その結果、揚水量と粒子の初期位置によっては分散の影響により集水域外にある粒子が取水井へ流入することがわかった。また、1つの集水域が他の集水域を取り囲むように分布する場合、取水井の配置状態と揚水量に応じて粒子群が到達する取水井は異なる結果を得た。

Key Words: capture zone, capture probability, particle tracking approach, tracer experiment

1. 結論

地下水は容易にアクセス可能な水源の1つであり、農業や産業など利用形態は多岐にわたる一方で、汚染に対する脆弱性を有している。そのため、水需要の増加ならびに潜在的汚染サイト数の増大を背景として、質の高い淡水の保護と汚染水の浄化は重要度の高い問題である。一般的に、取水井を用いて断続的あるいは恒常的に地下水を汲み上げることから、特に、地下水を飲用目的に供する場合、揚水量に応じた取水井への汚染物質の流入を予測することは不可欠な事項であり、取水井に水が流入する範囲、すなわち集水域の評価が重要となる^{1),2)}。また、地下水汚染の浄化対策手法の1つである地下水揚水を実施する際、取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価値の高い課題と言える。

ある取水井に対する集水域と非集水域の境界は流域で既定されることから、Bear³⁾やJavandelとTsang⁴⁾、BakkerとStrack⁵⁾は被圧帯水層における集水域の境界部を理論的に導出した。また、Grubb⁶⁾は被圧ならびに不圧帯水層に対する集水域を複素論を用いて算出しており、不完全貫入井戸を対象とした集水域評価に関する研究例も存在する^{7),8)}。取水井に流入する集水域の規模が変動しない場合、つまりは集水域が定常状態にある場

合、取水井に至るトラベルタイムを見積もることが可能であり、Shafer⁹⁾やColeとSilliman¹⁰⁾、Jacobsonら¹¹⁾は後方粒子追跡法により解析的・数値的に集水域規模の変動を捉えた。一方で、確率的な観点から集水域を評価した研究例^{12),13)}やフィールドへの適用例^{14),15)}など、取水井の配置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、集水域の規模および形状に関する検討は数多く見られる。

しかしながら、集水域の内外を移行する汚染物質挙動に対する評価や集水域近傍にある物質粒子群の取水井への移行過程はあまり議論されておらず¹⁶⁾、更なる知見の蓄積が望まれる。また、集水域内に存在する物質は高い確率で取水井へ流入すると考えられるものの、取水井に流入する確率、すなわち取水井の粒子捕獲確率の評価に関する議論¹⁷⁾もまた少なく、地下水揚水による汚染物質の回収性能を評価する上で価値ある課題と考えられる。井上ら¹⁸⁾は均質地盤を対象に汚染粒子の初期位置と取水井の粒子捕獲確率の関係について検討しているが、数値解析を用いた検討に留まっており、実験的視点からの議論が望まれる。ラボレベルで集水域と取水井の粒子捕獲確率を実験的に検討した研究例は見当たらないことから、数値解析と物質移動実験の連携を図ることで新たな試みとして有益な知見が得られると期待される。

以上の点を鑑みて、本研究ではトレーサ実験により取

水井への物質流入確率を検討するとともに、粒子追跡法を適用して集水域形状の変化を把握する。また、ラポベルに加えてフィールドレベルを対象として物質粒子群の初期配置と集水域規模、ならびに取水井の配置状態が取水井の物質捕獲率へ及ぼす影響を定量的に評価することで、飲用水利用における汚染防護領域の評価や汚染帯水層の地下水揚水処理など実行的な地下水管理に向けた一助とすることを目的とする。なお本研究では、取水井へ流入する物質粒子数と初期状態に領域内に存在する物質粒子総数の比を取水井の物質捕獲率と定義する。

2. 確率的汚染物質追跡手法

(1) 浸透流解析

地下水中に溶解した水溶性汚染物質の挙動を捉えるには、流れ場の水頭および流速分布状態が必要となる。地下水揚水を考慮した浸透流方程式は、アインシュタインの総和規約を用いて次式で表される³⁾。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) = Q, \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (1)$$

ここに、 x_i は座標であり、添字の1から3はそれぞれ x , y , z を表す。また、 K_{ij} は各軸方向の透水係数テンソル、 h はピエゾ水頭、 Q はシンクソース項であり本研究では各取水井の揚水量に相当する。

式(1)を有限要素法を用いて解くことにより得られた領域内の圧力分布を基に、次式により流速分布を求める。

$$v_i = -\frac{1}{n} \left(K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right), \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (2)$$

ここに、 v_i は実流速成分、 n は有効間隙率であり、本研究では K_{xx}/K_{yy} を異方性比 β と定義する。以上より得た流速分布を粒子追跡解析に用いる。

(2) ランダムウォーク粒子追跡法

多孔質体内の物質挙動を追跡する場合、流速や化学反応など移流分散現象に関わる要因により各粒子が有する質量や位置は時々刻々と変動する。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的手法であり、ランダムウォーク粒子追跡法はその一種である¹⁹⁾。

ランダムウォーク粒子追跡法では粒子の移動経路を次式により表現する^{20), 21)}。

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

ここに、 $X_{p,i}(t)$ は時間 t における粒子位置の i 成分、 $\vec{X}_p(t)$

は時間 t における粒子の位置ベクトル、 Δt は時間増分、 W_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。

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

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³⁾。

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

ここに、 α_L は縦分散長、 α_T は横分散長、 D_d は有効拡散係数、 I_{ij} は単位マトリクス、 $|\mathbf{v}|$ は流速のノルムである。また、 B_{ij} は間隙内の溶質移動に伴う分散現象に関わる変位マトリクスである²²⁾。

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

$$\Gamma = \sqrt{v_1^2 + v_2^2} \quad (7)$$

(3) 後方粒子追跡法

取水井への流入に寄与する集水域の分布形状を式(3)に基づく粒子追跡解析にて把握する場合、粒子の初期位置を試行錯誤的に変えることで取水井への粒子到達経路を評価することとなるため、膨大な解析回数を必要とする。汚染源から取水井などの流出地点に至る移行過程を含めて、一般的に物質移動解析は地下水流れ場の流速分布に従って風上から風下へ対象となる物理量の時系列変化を追跡する手段であり、粒子初期配置の問題や解析効率の点を鑑みると、既定の揚水量に応じた取水井の集水域の境界領域を前方粒子追跡により評価するのは困難である²³⁾。

一方、後方粒子追跡法は初期粒子を取水井の近傍に配置することで、流れ方向に逆らって粒子の移動軌跡を追跡する方法²⁴⁾であり、次式により粒子の移動経路を表現する。

$$X_{p,i}(t + \Delta t) = X_{p,i}(t) - v_i \frac{(\vec{X}_p(t))}{R(\vec{X}_p(t))} \Delta t, \quad i = 1, 2, 3 \quad (8)$$

右辺の第2項が逆流による移流現象を表しており、流速成分にマイナスを与えることで、逆流を表現している。本解析では、粒子追跡解析の精度向上を図るため、流速補間法²⁵⁾を組み込み、時間更新の際には、井戸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

表-1 実験ケース一覧

	取水井位置*	揚水量 Q_p (cm^3/s)	排水流量 Q_d (cm^3/s)	Q_p/Q_d (%)	トレーサ 注入位置
Case 1-A,B,C	#8	0.178	7.69	2.31	A,B,C
Case 2-A,B	#8, #7	0.172, 0.141	7.48	2.30, 1.89	A,B
Case 3-A,B	#8, #13	0.129, 0.390	8.02	1.61, 4.86	A,B

*取水井#7, #8, #13は論文の中ではそれぞれPW7, PW8, PW13と記す。

ゲ・クック法を用いて後方粒子追跡, ならびにランダムウォーク粒子追跡法を実施する。

後方粒子追跡では取水井の位置に初期の粒子群を配置するため, 時間経過に応じた粒子群の分布状態はトラベルタイムが等しい集水域境界として捉えることができ, 一度の解析で集水域形状の時系列変動を評価することが可能である。しかしながら, 領域内のある地点から取水井へ至る移行過程を考えた場合, 分散現象により集水域内に存在する物質は必ずしも取水井に流入するとは限らない^{18),20)}。この点を鑑み, 本研究では集水域の分布状態と取水井の粒子捕獲確率の関係について実験的・解析的に評価する。

3. 集水域と捕獲率に関する実験的・解析的検討

(1) トレーサ実験

本実験では浸透地盤を形成するために, $90 \times 50 \times 6 \text{ cm}$ の実験装置を使用して, 被圧状態にある定常浸透場を対象にトレーサ実験を実施した。実験装置の概略を図-1に示す。実験装置の上流側と下流側には貯水槽が設けられており, 供試体への導水部ならびに供試体からの排水部を構成するとともに動水勾配の制御と排水部における定常流量の計測を兼ねている。実験装置は天板部を除いてステンレス材で作成されており, これらをアクリル板で密閉することにより被圧状態の流れ場を形成した。本実験では, 多孔質体として平均粒径が 0.050 cm , 均等係数 1.25 , 飽和透水係数 0.15 cm/s のケイ砂を使用し, 浸透場を形成する際には, 下流側を上にして実験装置を垂直に立て, 飽和試料砂を水中落下法により 5 cm ずつ上流側から下流側へ締め固め, 間隙率が 0.44 となるように均質に充填した。

試料の充填完了後, 空気混入を防ぎながら下流側の定水頭装置を設置することで実験装置全体を密閉し, 実験装置を水平に設置して上下流部にある定水頭装置の水位差を調整した。その際, フィールドにおける揚水実験²⁰⁾の状況を参考にして浸透場内の動水勾配を約 0.17 となるように定水頭装置を調整し, 実験期間中は水位差を固定することにより, 地盤内に一様流を形成した。す

なわち, 本実験の浸透場では x 軸に沿った方向に領域流れを生成した。また, 実験装置底部に設置された20か所のピエゾメータ孔にビニルチューブを接続してマンメータを作成し, 1つあるいは2つのビニルチューブの末端を上流部と下流部の定水頭位置より低い地点に調整した。これにより領域内の浸透水を強制的に排水し, 取水井による揚水状態を実験的に模擬するとともに, 一様流状態にある領域内に取水井へ向かう非一様流が存在する状況を生じた。一方, 取水対象以外のビニルチューブの末端は定水頭部よりも高い位置に設置することで浸透場内の圧力測定に供した。

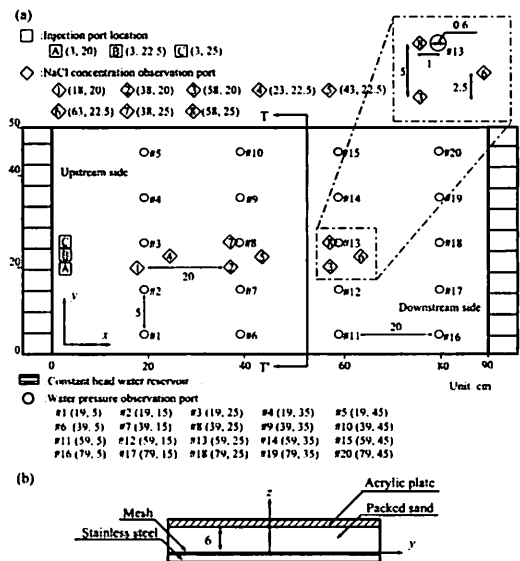


図-1 トレーサ実験装置概略図：(a)平面図, (b)T-T断面図

本実験では, 汚染物質に見立てた保存性トレーサとして, 初期濃度 $5.0 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ に調整したNaCl水溶液を使用し, 浸透場内の8か所の地点に電圧センサを埋設することで, スイッチボックスとデータロガを介してセンサ位置を通過するトレーサの濃度を時系列で計測した。センサの仕様は直径 5 mm , 長さ 10 cm であり, 先端部の電極にて電圧を計測することから, $z = 2.5 \text{ cm}$ の地点にセンサの先端を設置した。また, 電圧センサにはNaCl濃

度に対する出力電圧の関係について予めキャリブレーションを施しており、観測濃度の時間間隔を密にするため、すべての観測点において2秒間隔でNaCl濃度を計測した。さらに、電気伝導度計を用いて取水井に見立てたビニルチューブの末端から排水される浸透水のNaCl濃度を60秒から120秒間隔で計測した。

ピエゾ水頭と下流部からの排水流量の計測より透水地盤内が定常流状態にあることを確認した後、図-1に示すAからCの位置に20秒間で22 cm³のトレーサを注入することで、半径約0.8 cmの円柱形状に近いトレーサの初期分布形状を生成した。本実験では、揚水位置や揚水量を変えると同時にトレーサ注入位置を変えることで、取水井の物質捕獲率と集水域の関係を検討した。実験ケースとしては、取水井PW8のみから取水するCase 1を基準に、2つの取水井を主たる流れに対し垂直方向に設置したCase 2、ならびに2つの取水井を主たる流れに平行に配置したCase 3を設定し、ケース間の結果を比較した。実験ケースを表-1に示す。いずれの実験ケースにおいても最下流部より流出する排水流量に対して、約2%から5%の割合で揚水を実施した。

(2) 粒子追跡解析

トレーサ実験の状況を再現するとともに、取水井に寄与する集水域を把握するため、実験の浸透場を対象に浸透流解析と粒子追跡解析を実施した。浸透流解析では、透水試験結果を基に透水係数を 1.5×10^{-3} m/sに設定し、境界条件として上流と下流側にピエゾ水頭の観測値を与え、他の面を不透水層とすることで、領域内の水頭分布を求めた。また、ピエゾ水頭の算定値がマノメータの計測結果に合うように試行錯誤的にキャリブレーションすることで、異方性比の値を導出し、実験ケースに関わらず浸透場の異方性比は0.94となる結果を得た。

井上ら²⁶⁾は観測点における濃度変動を基に、時間モーメント解析ならびに逆解析を適用することで縦分散長と横分散長を推定する方法を提案している。本研究では、揚水を考慮しない浸透場における観測点の濃度変動に基づき、井上らの方法²⁶⁾により縦分散長と横分散長を推定し、それぞれ 4.8×10^{-4} mと 4.8×10^{-5} mに定めた。したがって、本実験場のペクレ数は約1.04であり、揚水量の設定において参考としたフィールドの状況²⁰⁾と大きな乖離はない。また、NaCl水溶液をトレーサとしている点を鑑み、非吸着の状態として遅延係数を1に設定し、分子拡散の影響は分散に比してかなり小さいと考えられるため、有効拡散係数をゼロに設定した。さらに、実験状況を反映して、トレーサ注入位置に総質量0.11 gとなるように 2×10^3 個の粒子を発生し、解析精度を保証することを目的に6秒の時間ステップ条件にてランダムウォーク粒子追跡解析を実施した。

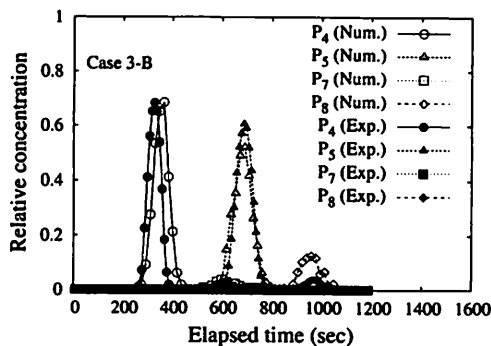


図-2 観測濃度の再現性の検討例 (Case 3-B)

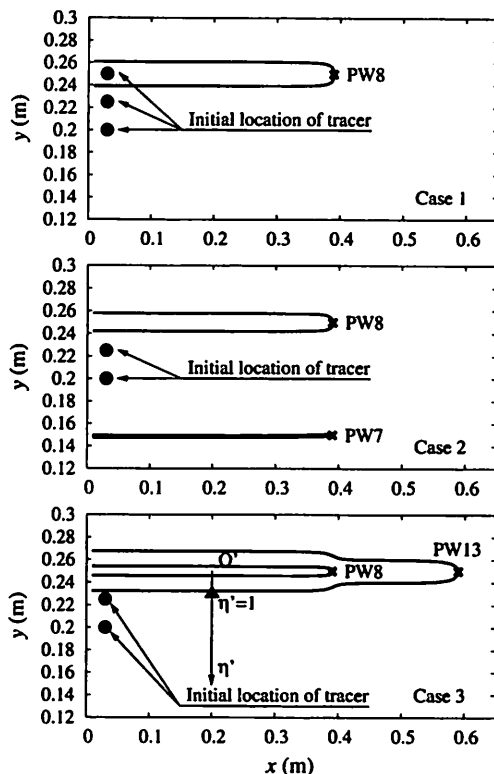


図-3 後方粒子追跡法による各実験ケースに対する集水域形状の結果

(3) 集水域評価と物質捕獲率

実験Case 3-Bを対象に、比較的高い濃度が発現した観測点4, 5, 7, 8にて計測した破過曲線と粒子追跡法による再現結果を図-2に示す。図の凡例には電圧センサの番号、すなわち図-1に示すNaCl濃度の観測点番号を示している。また図示した以外の観測点では、計測期間中に濃度の発現は得られていないため、示していない。図-2に見られるように、実験と解析における対象観測点でのピーク濃度ならびにピーク時間、濃度推移には観測点8

を除いて良好な一致が見られる。図-1に示すように、観測点8は浸透水の取水ポイントとなる取水井PW13とほぼ同じ地点に位置しているため、取水井付近では流れ方向が取水口に向かうことから、流速と流向ともに変化の大きい領域である。この領域では3次元的な流れとなり、他の領域よりも深さ方向に対する計測濃度のばらつきが大きくなると推察され、結果として、観測点8の再現性は他の観測点に比べて低くなったと考えられる。しかしながら、総合的に判断して濃度変動の再現性は十分と言え、物質移動解析に使用した流速分布や各物理量は妥当な値であり、これらのパラメータ群を後方粒子追跡法に適用することにより、実験場の集水域を把握できると考えられる。

そこで、浸透流解析より得られた流速分布を入力値として、各実験ケースにて稼動状態にある取水井の位置に粒子群を生成し、式(8)に基づいて後方粒子追跡を実施する。図-3に各実験ケースに対する集水域と非集水域の境界を表す流線群の結果を示す。後方粒子追跡法では取水井の近傍に初期配置された10個程度の粒子群を逆流方向に追跡し、最も移行距離が長い2つあるいは4つの粒子に対する移動軌跡を描くことで集水域境界を表現可能である。一方、前方粒子追跡法により集水域境界を捉える場合には、 $x = 0$ の地点に 10^2 から 10^3 個程度の粒子を配置し、風下方向への粒子移動を追跡することとなる。取水井へ到達する粒子群の中から初期のy座標位置が最大と最小の2つの粒子に対して移行軌跡を描くと集水域境界を得られるものの、領域の規模や流れ場の複雑さに応じて粒子数を増加させる必要があることから後方粒子追跡法と比較すると効率的な方法とは言い難い。

図-3より、すべての実験ケースに共通して、x軸を対称軸とする形状で集水域は分布することが見て取れる。Case 1の集水域分布に見られるように、本実験における揚水条件では集水域のy軸方向への幅は約2 cmであり、集水域内の水は取水井PW8へ流入することとなる。Case 2では2つの取水井の揚水量が異なり、取水井PW7の揚水量はPW8よりも約20%小さいため、各取水井の集水域規模には差異が生じている。また、両取水井の設置位置は10 cm離れていることから、揚水条件とも相まって、2つの独立した集水域が形成されている。一方、Case 3では一様流れ方向に沿って、取水井PW8とPW13が配置されているため、取水井PW8の集水域の外側に取水井PW13の集水域が形成される結果となる。取水井PW13はPW8の約3倍の揚水量であるものの、取水井間の距離に起因して取水井PW13の集水域はPW8の下流側において集水範囲が縮小する様子が観察される。また、Case 3における総揚水量はCase 1の約3倍であるが、集水域のy軸幅は約2倍となっており、揚水条件ならびに取水位置に起因して集水域分布は変動する点が伺える。以上

より、後方粒子追跡法を適用することで取水井の集水域を効率的に把握できると言える。

前述のように、集水域は取水井への流入に寄与する領域を表すものの、移流のみを考慮する集水域とは異なり、物質粒子の移行過程では分散現象により時々刻々と移流基盤となる流線が変わるため、van Kooten¹⁶⁾やUffink²⁰⁾も指摘するように、取水井へ汚染物質が流入する確率は流れ場の流速分布状態に依存すると考えられる。そこで、各実験場における揚水量と取水井への物質到達状態の関係について検討するため、実験Case 1とCase 3において観測された取水井の累積質量変化の結果を図-4に示す。実験ではパルス状態にてトレーサを注入していることから、注入総質量に対する取水井への到達物質質量を物質捕獲率と定義することで取水井の物質捕獲率を検討することができる。つまり、すべてのトレーサが1つの取水井に流入した場合、結果は1となる。また、Case 2に関しては、揚水量とトレーサ注入位置の関係上、取水井PW7では濃度は発現せず、PW8ではかなり低濃度となる結果を得ていることから図示していない。

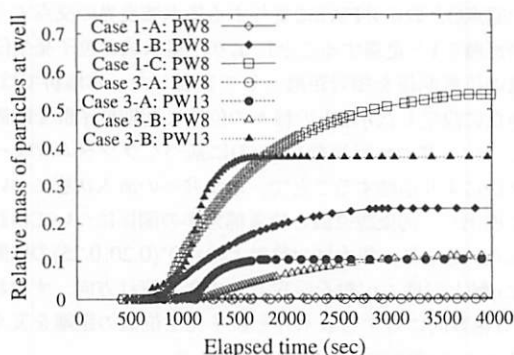


図-4 Case 1とCase 3の取水井の累積質量変動

図-4より、両実験ケースともにトレーサ注入位置が集水域の対称軸に近いほど捕獲率は上昇する傾向にあることがわかる。また、Case 1-Cのように、集水域内にトレーサが位置している場合でも最終的な物質捕獲率は50%を超える程度であり、分散の影響により、集水域外へ移行するトレーサの存在が示唆される。分散の効果は、2つの取水井を領域流れ方向に沿って配置したCase 3-Aにおいて注入位置Aに初期配置したトレーサの取水井PW8への到達確率はゼロである一方で、取水井PW13にて約1割のトレーサを捕獲していることから確認できる。すなわち、集水域内に存在するすべての物質が取水井へ到達するとは限らず、また、集水域の範囲外に汚染源が存在する場合であっても、初期位置に依存して取水井に物質が流入する可能性があり、分散の効果は

無視できないと言える。さらに、Case 3における両取水井の捕獲率を比較すると、注入位置AとBともに下流側に位置する取水井PW13へ到達する捕獲率が高いことがわかる。これより注入位置と集水域までの距離に加えて、取水井の配置状態に物質捕獲率は依存していると推察される。したがって、集水域境界と汚染源位置に応じた捕獲率変化に加えて、複数の取水井により形成された集水域が捕獲率に及ぼす影響について、実験状態に基づき、粒子追跡法の観点から更なる検討を進める。

4. 集水域形状と粒子発生位置による捕獲率変動

(1) 解析条件設定

本章では実験場を対象として、集水域と汚染源の位置関係が取水井群の捕獲率に及ぼす影響について検討した。実験状況を反映するため、前章にて議論した対象領域と取水井位置ならびに、解析に用いるパラメータは実験に基づいた値に設定した。また、図-5に示すように、集水域対称軸上の点O(0.03, 0.25)からy軸の負の方向に新たに η 軸を設定し、対象とする解析ケースごとに η 軸の原点Oと取水井PW8に寄与する集水域境界の交点までの距離を1と定義することにより、集水域と粒子発生位置の位置関係を相対距離として表現した。本解析では、新たに設定した η 軸上の種々の位置に初期粒子群を配置し、粒子群の移行挙動を式(3)に基づくランダムウォーク法により追跡することで、取水井への流入状態について導出し、汚染源位置と物質捕獲率の関係について検討した。さらに、集水域対称軸上の点O'(0.20, 0.25)の位置に η 軸と同様の η' 軸を設定し、主たる流れ方向、すなわちx軸方向に対する取水井と粒子発生位置の距離を変えることで捕獲率の変化を考察した。

解析ケースとしては3種類の揚水パターンを想定し、Case α は集水域の最大y軸幅が前述した実験Case 3におけるPW13の集水域に合致するようにPW8の揚水量を $3 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ に設定した。このため、図-3に示すように、実験Case 3の η 軸では取水井PW13の集水域と軸の交点を1に設定した。なお、図示していないが、 η 軸についても同様である。またCase β は、Case α の3倍の揚水量である $9 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ に設定し、Case γ は実験Case 3における揚水量の比を反映させ、取水井PW8とPW13の揚水量をそれぞれ $3 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ と $9 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ に定めた。

(2) 集水域分布と捕獲率結果

前章と同様に、後方粒子追跡法により各取水井に寄与する集水域を描いた結果を図-5に示す。揚水量の設定上、Case α とCase γ の取水井PW8の集水域は同じ形状であり、Case β のy軸方向に対する集水域の最大幅はCase α の3倍となっている。前章で見られたように、Case γ に

おいて取水井PW13の集水域形状は取水井PW8による揚水の影響を受けるため、取水井PW8の下流側にて縮小することが見て取れる。

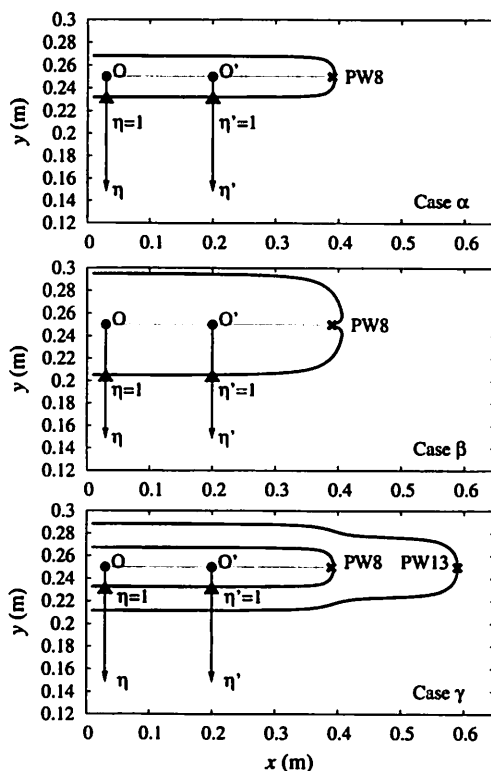


図-5 各解析ケースに対する集水域形状の比較

得られた集水域分布を対象に粒子発生位置と取水井の物質捕獲率の関係を評価するため、解析ケースごとに η 軸および η' 軸の種々の地点に粒子を発生させ、各取水井の物質捕獲率をランダムウォーク解析により算定した結果を図-6に示す。また、実験Case 3に対する累積捕獲率の結果を合わせてプロットする。図中に示す物質捕獲率の値は累積質量の最大値、つまりは取水井へ到達した粒子総数と初期配置した粒子総数の比を示している。

取水井PW8に関しては、 η および η' の値の増加とともに、捕獲率は低下する傾向にあり、 $\eta = \eta' = 2$ まで離れるとほとんどの粒子は取水井PW8へ流入せず下流域へ移行する結果となる。また、Case α とCase γ の取水井PW8に対する捕獲率の変動は粒子の初期位置に関わらずほぼ等しく、流れ方向に沿って取水井を複数配置した場合、下流側に存在する取水井が上流側に位置する取水井の捕獲率に与える影響は小さいことを示唆している。また、Case α とCase β の結果を比較すると集水域内(η or $\eta' \leq 1$)に粒子が存在する場合には揚水量の大きいCase β の捕獲率が高くなるものの、集水域の対称軸から

離れるとともに両者の捕獲率は逆転することがわかる。特に、集水域の境界付近においてCase β の捕獲率は大きく低下する結果となる。これは領域内の流速分布の相違に起因すると推察され、粒子の初期配置と取水位置の x 軸方向距離が等しく、集水域境界から初期粒子位置までの相対距離が等しい場合、流速変動の小さい集水域ほど集水域の外に存在する粒子の捕獲が可能であることを示している。領域内に1つの取水井が存在する状況に対しては、座標の設定方法は異なるものの、同様の傾向がいくつかの研究例^{27),28)}にも見られる。

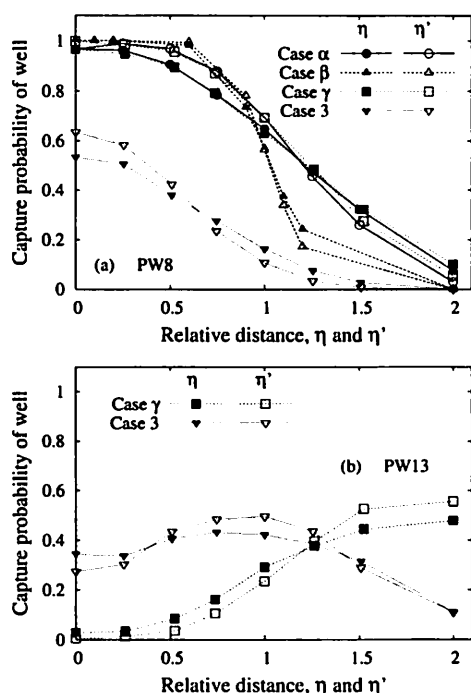


図-6 各解析ケースの捕獲率変動：(a) 取水井PW8の結果、(b) 取水井PW13の結果

一方で、Case α と実験Case 3の取水井PW8に関する捕獲率を比較すると両者には大きな開きが生じている。Case 3では低い揚水量であることに呼応して狭い集水域幅を形成するため、分散の効果により集水域の外側へ移行する確率が高くなり、結果として一部の粒子は取水井PW8へ流入せず、取水井PW13に取り込まれると考えられる。この点は図-6(b)の結果ともよく符号し、Case 3に対する取水井PW13の捕獲率は集水域境界部にてピークとなり、他のケースと同様に集水域から離れるに従って捕獲率は低下している。しかしながら、集水域内(η or $\eta' \leq 1$)に限ると取水井PW8とPW13を合算した総捕獲率はCase α の捕獲率よりも少し小さい結果となる。したがって、単独あるいは複数の取水井にて形成された集

水域の y 軸方向に対する幅が等しい場合、双方の捕獲率には差異が生じ、Case α のように1つの取水井にて集水域を構成する方が集水域内に存在する汚染粒子を捕獲できる確率が高いと言える。そのため、取水井を領域流れ方向に沿って配置する場合には、Case γ のように集水域を拡大することで物質捕獲率の改善がなされることとなる。

さらには、Case β を除いて、 η または η' が1.25より小さい範囲では η 軸よりも η' 軸上に存在する粒子の方が取水井群に取り込まれるトータル確率は高くなる傾向にあり、特に、集水域の境界付近では両者の差異が顕著である。 η 軸上に発生した粒子群は分散の効果により存在領域を拡大するため、 η' 軸へ至るまでに一部の粒子群の η 座標成分は初期位置よりも大きくなり、結果として取水井へ流入する確率が低下すると推量される。このため、Case γ やCase 3のように流下方向に取水井を配置することで、下流側の取水井での物質捕獲率が上昇すると考えられる。一方で、Case β に見られるように、揚水量の大きさに伴って集水域内の流速が比較的大きく、取水井の付近において流線形状が大きく変化する領域に近い位置に η' 軸が存在する場合には、取水井の物質捕獲率は低下する。これは非一様流条件下における分散移動は流速の大きい領域へ移行する確率が高くなる²⁹⁾ことが要因であると推察され、 η 軸上の粒子群の多くは η' 軸に至るまでに集水域の内側に存在する確率が高くなる結果、集水域の境界近傍では η' 軸よりも η 軸上での捕獲率が上回っていると考えられる。以上の議論より、粒子の初期位置や取水井の配置状態のみならず、揚水量に物質捕獲率は左右されると言える。

5. フィールドへの応用

(1) 集水域境界の時系列変化に対する評価

これまでの議論より、捕獲率の変動には粒子の存在位置ならびに取水井へ至る移行距離や揚水条件が関係すると考えられる。また前章までの議論では、取水井に寄与する最大の集水域を対象としており、取水井へ到達する粒子群のトラベルタイムは粒子の初期位置に応じて様々である。そのため、集水域内にてトラベルタイムの等しい地点に存在する粒子群と取水井への流入確率の関係については議論の余地があり、この点はフィールドにて分散の影響を考慮した集水域の評価や地下水揚水による回収性能の見積もりにおいて有用な項目であると言える^{30),31)}。これらの点を踏まえて、前章までの議論を補完するとともに、フィールドへの応用を図る基盤を形成することを目的に、対象領域をフィールドレベルに拡大し異方性比ならびに揚水量が異なる場における捕獲率と粒子位置の関係を把握する。

本解析では集水域の評価実績のあるフィールド^{30),32)}

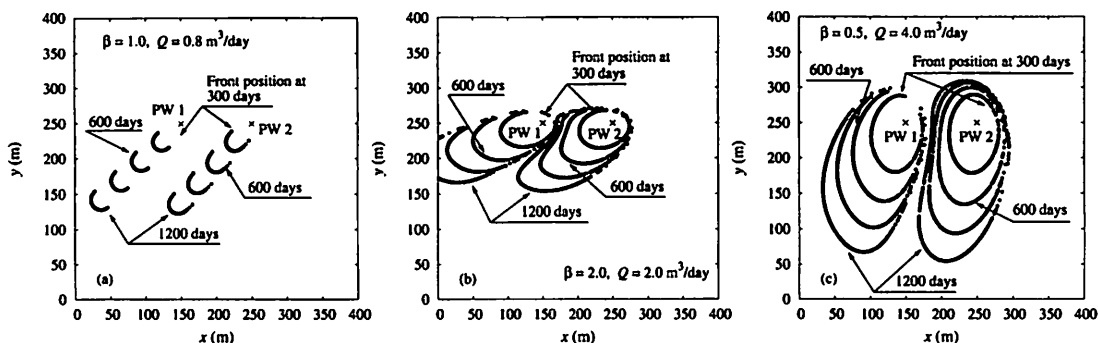


図-7 解析対象帯水層の平面図ならびに後方粒子追跡による300日ごとの集水域形状の変化: (a) 異方性比1.0, 揚水量 $0.8 \text{ m}^3/\text{day}$, (b) 異方性比2.0, 揚水量 $2.0 \text{ m}^3/\text{day}$, (c) 異方性比0.5, 揚水量 $4.0 \text{ m}^3/\text{day}$.

を想定して、 $400 \text{ m} \times 400 \text{ m}$ の領域を有し、原点から $(x, y) = (400, 400)$ の地点に向けて 0.005 の動水勾配にて圧力水頭が低下する均質異方性帯水層を対象とした。すなわち、 x 軸と 45° 度をなす方向に領域流れが存在する浸透場である。また、 $(x, y) = (150, 250)$ と $(250, 250)$ の地点に既定の揚水量を与えた取水井PW1とPW2を設け、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とPW2の位置にそれぞれ 5×10^3 粒子を配置して後方粒子追跡法により粒子の空間分布を追跡した。時間ステップ Δt は2日、解析期間を1200日とし、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、帯水層の単位厚さあたり $0.8, 2.0, 4.0 \text{ m}^3/\text{day}$ の揚水量を対象とした。さらに、透水係数の異方性比を $0.5, 1.0, 2.0$ 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た。本解析にて採用する透水係数はフィールドの値^{30), 32)}を参考に 1.0 m/day とし、同様に揚水量についてもフィールドの状態を反映した値に設定した。また、考察内容を明確にするため、均質地盤を解析対象として扱った。

図-7に解析結果の例として、既定の異方性比 β と揚水量 Q に対する集水域形状の変化について、2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 5×10^3 個の粒子位置をプロットして描かれるが、図中では2000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-7(a)に見られるように、小さい揚水条件では風上方向に一部のフロントが延伸し、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、他の取水井の集水域とは接しないため、領域内の異なる空間に2つの集水域が形成されるこ

となる。この点は前述したトレーサ実験Case 2の状況と同様である。

一方、図-7(b)ならびに(c)のように揚水量の増加に伴い、集水域の境界は全体的に拡がり、時間の進展につれて2つの取水井が構成する集水域境界の一部を共有する状態となる。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、取水井PW2の集水域は取水井PW1の影響を受けていびつな形状になる。加えて、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の集水域を周り込むように形成され、取水井ごとに時間あたりの粒子移動量に大きな相違が生じている。この点は領域内の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。

(2) 取水井の物質捕獲率評価

これまで議論してきたように、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を本来の流れ方向に従って移行させた場合、同一の移行時間を要して取水井にすべて粒子が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、分散現象の影響により粒子群の取水井への到達時間にはばらつきが生じる^{12), 19)}。また、トレーサ実験において検討したように、粒子初期位置に応じて取水井の捕獲確率は変動することから、トラベルタイムの等しい位置にある粒子分布と取水井の粒子捕獲確率を考察するため、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 $\alpha_L = 2.0 \text{ m}$ と分散長比 $\alpha_T/\alpha_L = 0.2$ の下³²⁾で式(3)に基づく移流分散混合型のランダムウォーク粒子追跡解析を

解析期間を1800日として実施した。

各取水井にて $2.0 \text{ m}^3/\text{day}$ で揚水する場合を対象に、移流単独による取水井への到達に600日を要する粒子配置を初期状態としてランダムウォーク粒子追跡法により得られた各取水井の累積質量変化を図-8に示す。分散を考慮しない場合、600日後にすべての粒子が同時に取水井に流入するが、分散の影響を考慮することにより粒子の到達時間は大きくぶれる結果となる。また、分散の効果に加えて、図-7に見られるように、取水井PW2はPW1よりも下流側に位置するため、取水井PW1の集水域の外側に取水井PW2の集水域は形成される影響を受けて、取水井PW1の集水域内に存在する粒子の一部は取水井PW2側の集水域へ移行する確率が生じる。したがって、取水井PW2に流入する粒子数が増加するため、両取水井の物質捕獲率は異なる結果となる。さらに、物質捕獲率は異方性の値に左右されており、異方性に応じた流速分布の変化に伴う分散度合いに差異が生じることから、取水井へ流入する粒子の総数は変化すると推察される。

次に、揚水量と物質捕獲率の関係を検討するため、0.5の異方性比を有する浸透場を対象に、移流単独による取水井への到達に900日を要する粒子配置を初期状態とした各取水井の累積質量変化の結果を図-9に示す。揚水量の増加は集水域の拡大のみならず、物質捕獲率の増加につながるが見て取れ、 $4.0 \text{ m}^3/\text{day}$ で揚水する場合には、大部分の粒子を取水井にて回収できることを示唆している。比較的小さい揚水条件にて形成される集水域では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、取水井に寄与する集水域から流出する確率は揚水量の低下とともに増加し、結果として物質捕獲率に相違が生じると推察される。一方で、図-7(c)に示すように、大きい揚水量の場合、例えば、600日の移流に対応する集水域は900日の集水域の内側に構成されることから、分散による粒子の集水域外への移行確率は低減し、最終的に取水井へ取り込まれ易い傾向にある。図-10には、一例として、粒子群の初期配置と一定時間経過後の粒子分布の状況を示す。一部の粒子群は移流分散過程において取水井へ取り込まれることなく集水域外へ移行するものの、多くの粒子は取水井PW1あるいは取水井PW2の集水域内に存在するため、移流単独のトラベルタイムよりも取水井への到達時間は長くなるが、揚水量の増加に伴い取水井に捕獲される確率は高くなると考えられる。

以上の議論より、揚水量の度合いに加えて、粒子の初期配置に依存して粒子群の一部は取水井の集水域境界を越えて取水井に流入しない、つまりは、捕獲ロスとなる確率に変化が生じる。そこで、各取水井の捕獲性能を比較するため、図-11に粒子群の初期配置、すなわち後方粒子追跡解析による粒子移行時間と取水井の捕獲確率の関係を示す。

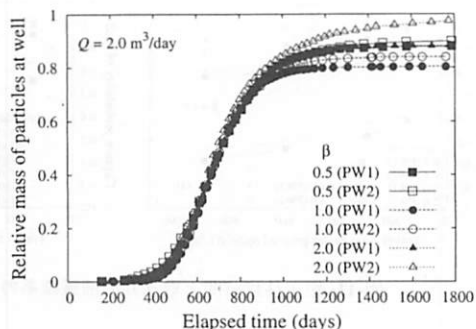


図-8 異方性比の変化に応じた累積粒子質量の変化

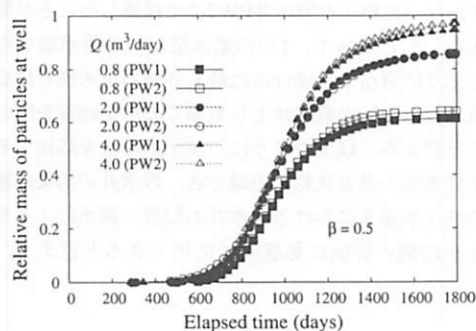


図-9 揚水量の変化に応じた累積粒子質量の変化

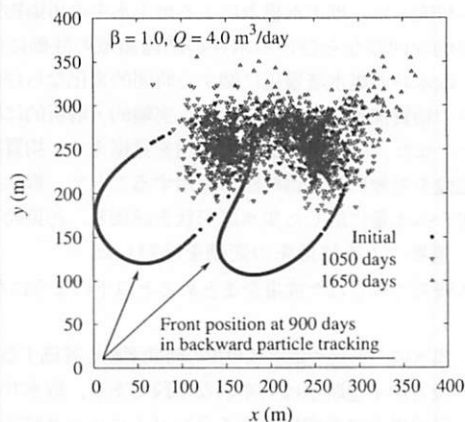


図-10 粒子群の分布状況の一例

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物質捕獲率は低下している。いくつかの研究例^{16),18)}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。また、対象とする2つの取水井の内、取水井PW2の捕獲確率の変動は特徴的であり、条件によっては累積質量は1を上回る結果となる。これは取水井PW1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

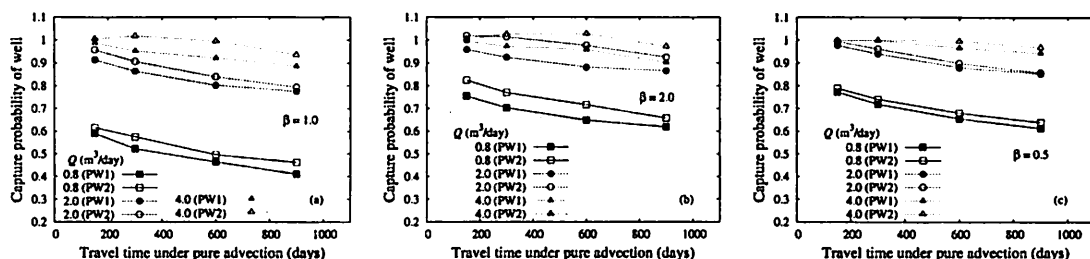


図-11 粒子移行時間と取水井の捕獲確率の関係: (a) 異方性比1.0, (b) 異方性比2.0, (c) 異方性比0.5.

水井PW2の方へ流入した、あるいは取水井PW1にて捕獲ロスとなった粒子を取水井PW2にて捕獲したことが要因である。したがって、1つの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。以上のように、粒子追跡法を応用することで集水域の進展状態を追跡でき、取水井の汚染防護領域や地下水揚水における取水井の配置、揚水による帯水層浄化時間の評価に発展的に応用できると言える。

6. 結論

本研究では、地下水揚水による地下水中の汚染物質の効果的な回収ならびに取水井の防護領域の評価に向けて、取水井の集水域規模に関する時間的変化ならびに取水井の物質捕獲率変動について、実験的・解析的に検討した。また、フィールドへの応用を見据えて、均質異方性地盤を対象に粒子追跡法を適用することで、取水井の配置や揚水量に応じた集水域形状を評価し、汚染物質位置の差異による捕獲率の変動を検討した。

本研究で得られた成果をまとめると以下になる。

1. 集水域の形状や集水域規模の時間変動を評価する上で後方粒子追跡法は効率的な手段であり、取水井の物質捕獲率の考察に対するランダムウォーク粒子追跡解析の有用性が示唆された。本研究にて扱ったように、粒子追跡法は取水井からトラベルタイムの等しい位置に粒子群を配置できるため、汚染物質の回収効率の推定に応用できる可能性を十分に有している。
2. 流下方向に沿って複数の取水井を配置する状況にあっては、汚染源位置と揚水量に応じて各取水井の捕獲率は変動することが確認された。
3. 平面的に浸透場を捉えた場合、単独あるいは複数の取水井にて形成される集水域の幅が領域流れに対して垂直方向に等しい状況にあっても双方の捕獲率には差異が生じ、1つの取水井にて集水域を構成する

方が集水域内に存在する汚染粒子は高い確率で取水井へ流入する結果を得た。

4. 分散の効果により集水域の境界を横断する可能性が生じることから、取水井へ流入する確率は集水域と汚染源の位置に依存して大きく変動することがわかった。
5. 透水系数の異方性は集水域形状には強く関与するものの、物質捕獲率へ及ぼす影響はあまり大きくなく、揚水量の集水域分布ならびに物質捕獲率に与える影響は大きいことが示された。
6. 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、1つの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結果を得た。また、下流側に位置する取水井の物質捕獲率は上流側の取水井よりも約1割高くなり、集水域内にある汚染粒子群の移行距離は短いほど捕獲率は上昇することがわかった。

参考文献

- 1) U.S. Environmental Protection Agency: *Guidelines for delineation of wellhead protection areas*, USEPA Washington D.C. EPA 440593001, 192p., 1987.
- 2) Spayd, S.E. and Johnson, S.W.: *Guidelines for delineation of well head protection areas in New Jersey*, New Jersey Department of Environmental Protection, New Jersey Geological Survey, 27p., 2003.
- 3) Bear, J.: *Dynamics of fluids in porous media*, Dover Publications, 764p., 1972.
- 4) Javandel, I. and Trang, C.-F.: Capture zone type curves: A tool for aquifer cleanup, *Ground Water*, 24(5), pp.616–625, 1986.
- 5) Bakker, M. and Strack, O.D.L.: Capture zone delineation in two-dimensional groundwater flow models, *Water Resour. Res.*, 42(5), pp.1309–1315, 1996.
- 6) Grubb, S.: Analytical model for estimation of steady-state capture zones of pumping wells in confined and unconfined aquifers, *Ground Water*, 31(1), pp.27–32, 1993.
- 7) Bair, E.S. and Lahm, T.D.: Variation in capture-zone geometry of a partially penetrating well in an unconfined aquifer, *Ground Water*, 34(5), pp.842–852, 1996.

- 8) Zlotnik, V.A.: Effects of anisotropy in the capture zone of a partially penetrating well, *Ground Water*, 35(5), pp.842–847, 1997.
- 9) Shafer, J.M.: Reverse pathline calculation of time-related capture zones in non-uniform flow, *Ground Water*, 25(3), pp.283–289, 1987.
- 10) Cole, B.E. and Silliman, S.E.: Utility of simple models for capture zone delineation in heterogeneous unconfined aquifers, *Ground Water*, 38(5), pp.665–672, 2000.
- 11) Jacobson, E.R., Andricevic, R. and Morrice, J.: Probabilistic capture zone delineation based on an analytic solution, *Ground Water*, 40(1), pp.85–95, 2002.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 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, pp.1081–1090, 2009.
- 15) Barry, F., Ophori, D., Hoffman, J. and Canace, R.: Groundwater flow and capture zone analysis of the Central Passaic River Basin, New Jersey: *Environ. Geol.*, 56, pp.1593–1603, 2009.
- 16) van Kooten, J.J.A.: Groundwater contaminant transport including adsorption and first order decay, *Stochastic Hydrol. Hydraul.*, 8, pp.185–205, 1994.
- 17) Guadagnini, A. and Franzetti, S.: Time-related capture zones for contaminants in randomly heterogeneous formations, *Ground Water*, 37(2), pp.253–260, 1999.
- 18) 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, Vol.53, pp.523–528, 2009.
- 19) Kinzelbach, W. and Uffink, G.J.M.: The random walk method and extensions in groundwater modeling, in *Transport Process in Porous Media*, edited by J.Bear and M.Y. Corapcioglu, Kluwer Acad., pp.761–787, 1989.
- 20) Uffink, G.J.M.: Analysis of dispersion by the random walk method, *Doctoral Dissertation, Delft University of Technology*, 150p., 1990.
- 21) Salamon, P., Fernández-García, D. and Gómez-Hernández, J.J.: A review and numerical assessment of the random walk particle tracking method, *J. Contam. Hydrol.*, 87, pp.277–305, 2006.
- 22) Lichtner, P.C., Sharad, K. and Bruce, R.: New form of dispersion tensor for axisymmetric porous media with implementation in particle tracking, *Water Resour. Res.*, 38(3), pp.21(1)–21(16), 2002.
- 23) 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.
- 24) Nahum, A. and Seifert, A.: Technique for backward particle tracking in a flow field, *Physical Review E*, 74, 016701, 2006.
- 25) Zheng, C. and Bennett, G.D.: *Applied contaminant transport modeling*, Wiley Interscience, 621p., 2002.
- 26) Inoue, K., Kobayashi, A., Matsunaga, N. and Tanaka, T.: Application of particle tracking method to dispersivity identification and its experimental verification, *J. Rainwater Catchment Systems*, 13(2), pp.7–16, 2008.
- 27) van Herwaarden, O.A.: Spread of pollution by dispersive groundwater flow, *SIAM J. App. Math.*, 54(1), pp.26–41, 1994.
- 28) van Kooten J.J.A.: An asymptotic method for predicting the contamination of a pumping well, *Adv. Water Resour.*, 18(5), pp.295–313, 1995.
- 29) 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.
- 30) Roelsma, J.: *Vergelijkende modelstudie naar de belasting van het grondwater met nitraat voor het intrekgebied 't Klooster*, Open Universiteit, 186p., 2001 (in Dutch).
- 31) Rock, G. and Kupfersberger, H.: Numerical delineation of transient capture zones, *J. Hydrol.*, 269, pp.134–149, 2002.
- 32) Uffink, G.J.M. and Mülschlegel, J.: *Toepassing van LGM-CAD voor de berekening van nitraat in ruwwater op pompstations in Twente en de Achterhoek*, RIVM, 108p., 2001 (in Dutch).

(2009.5.22受付)

Experimental and Numerical Investigation for Capture Zone and Capture Probability of Well for Application to Pump and Treat Method and Delineation of Wellhead Protection Zone

Kazuya INOUE¹, Yukihiro TAKAO¹ and Tsutomu TANAKA¹

¹ Graduate School of Agricultural Science, Kobe University

Delineating capture zones plays an important role in the protection of drinking water wells. This paper aimed at assessing capture zones relevant to the activity of extraction wells and capture probability of well that initial particle distributions are extracted by the well within a certain time. Laboratory tracer experiments linked with particle tracking approach were conducted to delineate capture zones according to the pumping rate and to investigate the relation between initial particle location and capture probability of well. Results indicated that dispersion phenomena in porous media yielded the particle pass across a boundary of capture zone and had an effect on the capture probability. Moreover, particle tracking approach was applied to a field to examine the variation of capture probability associated with the difference of travel time of particle, demonstrating the effects of well configuration and pumping rate on the capture probability. Interestingly, 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, suggesting the possibility in pump and treat application and delineation of wellhead protection zone.