

成層地盤のマクロ分散に及ぼす物理的・化学的不均質性の影響に関する粒子追跡アプローチ

PARTICLE TRACKING APPROACHES TO ASSESS MACRODISPERSION IN PHYSICALLY AND CHEMICALLY HETEROGENEOUS STRATIFIED AQUIFERS

井上一哉¹・Gerard UFFINK²・田中勉³

Kazuya INOUE, Gerard UFFINK and Tsutomu TANAKA

¹ 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)

² 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)

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)

A series of chemical transport simulations in physically and chemically heterogeneous stratified aquifers were conducted to assess the impacts on macrodispersion. Transport computations were based upon a random walk particle tracking model linked with spatial and temporal moment approaches. The results indicated that the longitudinal macrodispersivity depends upon the variance of hydraulic conductivity and the travel distance and is several orders of magnitude larger than the microdispersivity. The first-order irreversible rate reaction exhibited the early breakthrough, leading to the considerable reduction of the second-order temporal moment and macrodispersion. Moreover, the spatially variable distribution coefficient and the logarithm of the hydraulic conductivity were modeled as chemically heterogeneous aquifers. It was demonstrated that the increase of a negative correlation between the two variables leads to the increase of the longitudinal macrodispersivity, which approaches a certain value at larger travel distances.

Key Words: *random walk particle tracking, macrodispersion, spatio-temporal moment, stratified aquifer, physical and chemical heterogeneity*

1. 緒論

自然地盤における透水係数の空間分布は不均質であり、溶質の分散性に大きく影響を及ぼす主たる要因である¹⁾。溶質の分散現象は観測スケールにより異なり、間隙構造のような微視的スケールでの多孔質特性に起因した流速分布による分散をマイクロ分散と呼び、フィールドのような巨視的スケールでの透水係数の空間変動に起因した流速分布による分散をマクロ分散と呼ぶ²⁾。マクロ分散はマイクロ分散に比して数倍から数オーダー大きく、溶質の移行距離に伴う分散性の増加、すなわちスケール依存性を示すことがフィールドにおいて観察されている³⁾。帯水層内の長期的な溶質挙動を予測する数値モデルの構築において、スケール効果の評価方法やそのモデル化は結果の信頼性を左右することから、長く取り組まれている課題である²⁾⁻⁵⁾。

マクロ分散の評価は理論的²⁾⁶⁾あるいは解析的⁷⁾⁸⁾視点からアプローチされており、一様流⁹⁾あるいは非一様流¹⁰⁾の地下水流れ場を想定した議論がなされている。また、フィールドでのトレーサ試験に基づいて実験的に

マクロ分散を評価する研究例も存在し、数値解析やモーメント解析との連携が図られている¹¹⁾。さらに、フィールドの地質状況や限りある調査データ数によっては対象サイトを層構成と見なして、成層地盤に力点を置いたマクロ分散推定も実施されている¹²⁾。透水係数に代表される物理的不均質性に加えて、分配係数などの化学的要素もフィールドでは不均質に分布しており、微生物等による分解作用や土粒子との吸着反応により、分散現象へ影響を及ぼすと考えられる¹³⁾¹⁴⁾。そのため、長期の溶質移行に焦点を当てた場合、化学的不均質性に対するモデル化の有無に応じて実現象と予測結果の乖離が懸念される。また、フィールドにてマクロ分散の変化を観察することは困難であることから、数値的アプローチは効果的な手段と言える。

遅延現象とマクロ分散現象を関連付けた研究例¹⁵⁾はいくつか存在するものの、成層地盤に対する濃度減衰や吸着の効果のマクロ分散変動に及ぼす影響を検討した研究例は少ない点を踏まえて、本研究では、物理的・化学的不均質性を有する帯水層を対象として、ランダムウォーク粒子追跡法によるマクロ分散の検討を実施す

る。また、分配係数と透水係数の相関モデルを導入するとともに、時間・空間モーメント解析を粒子追跡法に組み込むことにより、成層地盤に対する化学的不均質性とマクロ分散の進展について検討する。なお、本研究にて対象とする不均質場は定常確率場であると仮定し、不均質場に対する確率統計的な特性は時間・空間において均質であるとみなす。

2. ランダムウォークモデル

(1) 対象サイトの概略

本研究ではオランダのデンハーグ近郊のサイトを対象とする。図-1に示すように、 x 方向に120 m、 y 方向に160 m、帯水層の厚さは19 mの規模を有するサイトであり、地表付近に厚い粘土層が存在することから被圧状態と見なすことができる¹⁶⁾。また、サイト内の観測井 R_a と R_b にて図-2に示すように、鉛直方向の透水係数分布が測定されており、透水係数の幾何平均と幾何分散 $\sigma_{\ln K}^2$ はそれぞれ0.8213 m/day、0.226であり、間隙率は0.34である。

Uffink¹⁶⁾は対象サイトおよびサイト周辺の地質構成から判断して、成層地盤として領域をモデル化しており、図-2の実線と黒丸(●)で示す透水係数分布を設定した。また、透水係数は等方と仮定し、各層の厚さを0.5 mとして z 軸方向に38層から成る地盤を扱った。本研究では、結果の比較を目的として、Uffinkの透水係数分布を採用するとともに、不均質度つまりは透水係数の幾何分散の差異とマクロ分散の関係を検討するため、幾何平均の値を固定しつつ、幾何分散を1.506、3.197、6.104、11.90に変えた成層地盤を解析対象とする。一例として、図-2に幾何分散6.104の鉛直方向透水係数分布を示す。

(2) 浸透流解析

飽和条件下にある不均質帯水層を流下する地下水流れ場における浸透流方程式は次式で表される¹⁷⁾。

$$\nabla \cdot (K(\mathbf{x})\nabla h) = Q(\mathbf{x}) \quad (1)$$

ここに、 h はピエゾ水頭、 \mathbf{x} は位置ベクトル、 $K(\mathbf{x})$ は位置ベクトルに対応した透水係数テンソル、 Q はシンクソース項である。本解析では、 x 軸方向に一樣流れを形成するため、 $x=0$ と $x=124$ mの $y-z$ 面を水頭既知境界、他の面を不透水境界とすることで圧力の空間分布を有限要素解析により導出する。また、次式により流速分布を求めることで粒子追跡解析に供する。

$$n_p \mathbf{v} = -K(\mathbf{x})\nabla h \quad (2)$$

ここに、 \mathbf{v} は実流速ベクトル、 n_p は間隙率である。

(3) ランダムウォーク粒子追跡法

本研究では、ランダムウォーク粒子追跡法⁷⁾¹⁶⁾を用いて物質の移行挙動を評価する。粒子追跡過程における主

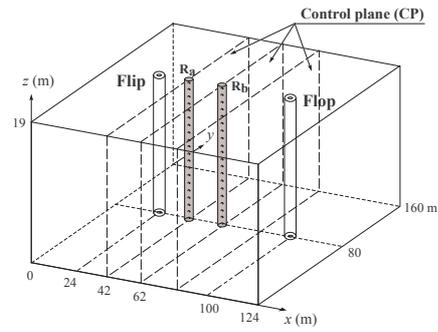


図-1 解析対象領域

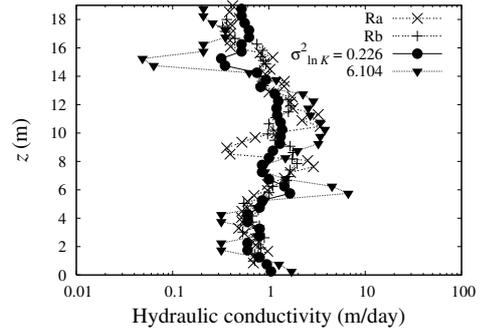


図-2 透水係数分布

たる移動経路はドリフト成分と確率的分散成分により構成され、次式で表現される¹³⁾。

$$\mathbf{X}_p(t + \Delta t) = \mathbf{X}_p(t) + \frac{1}{R} \left(\mathbf{v} + \nabla \cdot \mathbf{D} + \frac{1}{n_p} \mathbf{D} \cdot \nabla n_p \right) \Delta t + \mathbf{B}\boldsymbol{\Xi}(t)\sqrt{\Delta t} \quad (3)$$

ここに、 $\mathbf{X}_p(t)$ は時間 t における粒子位置ベクトル、 Δt は時間増分、 $\boldsymbol{\Xi}$ は平均0、分散1の正規分布に従うベクトル、 R は遅延係数である。また、 \mathbf{D} は分散係数テンソルであり、次式で表される¹⁸⁾。

$$\mathbf{D} = \left(\alpha_{TH}|\mathbf{v}| + \frac{v_3^2}{|\mathbf{v}|}(\alpha_{TV} - \alpha_{TH}) + D_d \right) \mathbf{I} + (\alpha_{TV} - \alpha_{TH}) \times \left(e_i e_j |\mathbf{v}| - \frac{v_3}{|\mathbf{v}|}(e_i v_j + e_j v_i) \right) + (\alpha_L - \alpha_{TH}) \frac{v_i v_j}{|\mathbf{v}|} \quad (4)$$

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、 v_i は実流速成分、 $|\mathbf{v}|$ は実流速のノルム、 D_d は有効拡散係数、 \mathbf{I} は単位マトリクス、 e_i は z 軸の単位ベクトルである。

\mathbf{B} は分散現象に関わる変位マトリクスであり、次式により定義される¹⁹⁾。

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \frac{v_1}{|\mathbf{v}|} \sqrt{\frac{2\alpha_L|\mathbf{v}|}{R}} & \frac{-v_1 v_3 \sqrt{2\alpha_{TV}|\mathbf{v}|}}{|\mathbf{v}|\Gamma} & -\frac{v_2 \sqrt{J}}{\Gamma} \\ \frac{v_2}{|\mathbf{v}|} \sqrt{\frac{2\alpha_L|\mathbf{v}|}{R}} & \frac{-v_2 v_3 \sqrt{2\alpha_{TV}|\mathbf{v}|}}{|\mathbf{v}|\Gamma} & \frac{v_1 \sqrt{J}}{\Gamma} \\ \frac{v_3}{|\mathbf{v}|} \sqrt{\frac{2\alpha_L|\mathbf{v}|}{R}} & \frac{\Gamma}{|\mathbf{v}|} \sqrt{\frac{2\alpha_{TV}|\mathbf{v}|}{R}} & 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\Gamma = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}, \quad J = 2 \left(\frac{\alpha_{TH}\Gamma^2 + \alpha_{TV}v_3^2}{|\mathbf{v}|} \right) \quad (6)$$

(4) 時間・空間モーメント解析

本解析では、図-1に示すように、種々の x 座標位置における $y-z$ 面を評価面として定義し、評価面を通過する粒子群質量の時系列変動に基づく n 次標準化絶対時間モーメント $M_{n,T}$ を次式により導出する⁸⁾。

$$M_{n,T} = \sum_{k=1}^{NP_s} m_p^k (t_p^k(x_1))^n / \sum_{k=1}^{NP_s} m_p^k \quad (7)$$

ここに、 m_p^k は k 番目の粒子の有する質量、 x_1 は評価面の x 座標、 NP_s は基準面を通過する粒子数、 t_p^k は k 番目の粒子が評価面を通過する時間である。また、 n 次標準化中心時間モーメント $\Lambda_{n,T}$ を二項定理を用いて次式にて算定する⁸⁾。

$$\Lambda_{n,T} = \sum_{r=0}^n \binom{n}{r} M_{n-r,T}(x_1) (-M_{1,T}(x_1))^r \quad (8)$$

これらの時間モーメント量を基に、マクロ縦分散長 A_{11} を次式にて推定する。

$$A_{11}(\xi_P) = \frac{\xi_P}{2} \frac{\Lambda_{2,T}(\xi_P)}{(M_{1,T}(\xi_P))^2} \quad (9)$$

ここに、 ξ_P は粒子初期位置と評価面の距離である。

時間モーメント解析は面を通過する粒子の質量変動に基づくことから、横分散の評価は困難である。粒子追跡法の利点の1つは粒子群の空間分布状態を確実に捉えることができる点にあり、空間モーメント量の導出によりマクロ縦・横分散長評価への応用を図る⁷⁾。

$$X_{G,i} = \frac{1}{m(t)} \sum_{k=1}^{NP_i} \frac{m_p^k X_{p,i}^k(t)}{R(X_p^k(t))}, \quad m(t) = \sum_{k=1}^{NP_i} \frac{m_p^k}{R(X_p^k(t))} \quad (10)$$

$$S_{ij}(t) = \frac{1}{m(t)} \sum_{k=1}^{NP_i} \frac{m_p^k X_{p,i}^k(t) X_{p,j}^k(t)}{R(X_p^k(t))} - X_{G,i}(t) X_{G,j}(t) \quad (11)$$

ここに、 $X_{G,i}$ は時間 t の粒子空間分布に対する重心位置を表す空間1次モーメント、 $m(t)$ は時間 t において空間内に存在する粒子の総質量、 S_{ij} は粒子空間分布に対する空間2次モーメント、 NP_i は時間 t の空間内の粒子総数である。また、空間モーメントを用いてマクロ縦・横分散長を次式により推定する。

$$A_{ii} = \frac{S_{ii}(\xi_G(t))}{2(\xi_G(t))}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (12)$$

ここに、 A_{22} は水平方向マクロ横分散長、 A_{33} は鉛直方向マクロ横分散長、 $\xi_G(t)$ は時間 t における粒子群の重心位置の変位距離である。

3. マクロ分散評価

(1) 物理的不均質性

ランダムウォーク粒子追跡解析を実施するに当たり、図-1に示すFLIPの位置に深さ方向に様な分布となるように 2×10^5 個の粒子をパルスのランダムに発生させ、一様流条件下における粒子位置の時系列変化を追跡す

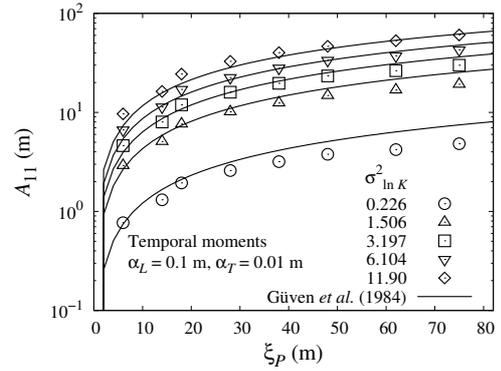


図-3 時間モーメントによる不均質性とマクロ縦分散長の評価

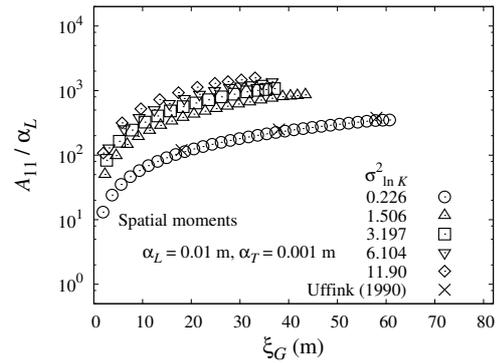


図-4 空間モーメントによる不均質性とマクロ縦分散長の評価

る。本解析では、Uffinkの研究例¹⁶⁾を参考にして、各粒子の初期質量を 0.384 g に設定するが、初期質量は極端に小さい値でない限り解析結果には影響を及ぼさない。また、マイクロ横分散長 α_{TH} と α_{TV} は等しい値に設定し、図中では α_T と記す。加えて、マイクロ縦分散長 α_L とマイクロ横分散長の比は10に固定し、本節では吸着ならびに反応に伴う質量減衰は考慮しない。なお、拡散の効果は分散に比べて小さいため、本研究では有効拡散係数の値をゼロに設定する。

マクロ分散に及ぼす透水係数の空間分布、すなわち不均質性の影響を検討するため、時間モーメント法により各評価面にて得られたマクロ縦分散 A_{11} の結果を幾何分散ごとに図-3に示す。また、解析結果の信頼性を評価することを目的として、図中には成層地盤にてマクロ縦分散長の進展を検討したGüvenらの解²⁰⁾を対応する幾何分散ごとに記している。評価面位置が粒子の初期位置から離れるほど、すなわち粒子の移行距離が長くなるほどマクロ縦分散長の値は増加し、幾何分散ごとに異なった値へ漸近していく様子が見て取れる。また、時間モーメントにより推定された値はGüvenらの解とよく符合していることから、良好な算定結果であると言える。さらに、同一の評価面では幾何分散の値とマクロ縦分散長の増加は呼応しており、幾何分散が最大と最小のケースでは得られるマクロ分散に1オーダー以上の開きがある。これは不均質度の増大に応じた粒子群の空間分布の拡大を示しており、不均質場の溶質移行として特徴的な点である。

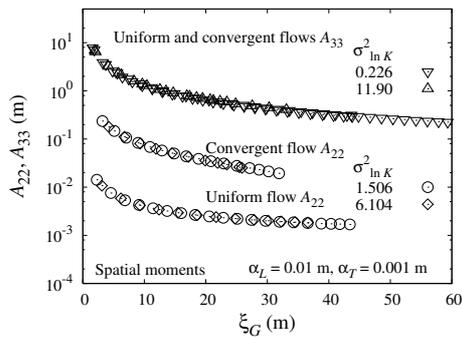


図-5 空間モーメントによる不均質性とマクロ横分散長の評価

時間モーメント解析結果と同様に、空間モーメント解析によるマクロ縦分散と粒子移行距離の関係を、対象サイトにて理論的にマクロ分散長を導出したUffinkの結果¹⁶⁾とともに図-4に示す。空間モーメント解析では領域内に生成した全粒子の存在が前提となるため、初期配置から領域外移行に至る期間が解析対象となり、不均質度の小さい場合ほど長い距離にわたってマクロ分散を算定することが可能である。幾何分散の値が0.226のケースはUffinkが採用した透水係数分布と同一であることから、本解析とUffinkの推定値は一致する結果が得られており、粒子追跡解析の妥当性が示唆される。また、図-3と同様に、移行距離ならびに幾何分散の増加に伴いマクロ分散長は増加しており、粒子追跡解析の入力値として用いたマイクロ縦分散($\alpha_L = 0.01$ m)に比してマクロ縦分散 A_{11} は10倍から100倍以上となることがわかる。

前述のように、空間モーメント解析は時間モーメント解析よりもマクロ分散を評価できる期間や距離が短くなるものの、横分散推定が可能である。対象地盤のマクロ横分散について考察するため、幾何分散に応じたマクロ横分散長 A_{22} と A_{33} の結果を図-5に示す。また、流れ状態と横分散長の関係に対する検討項目を追加する目的で、図-1のFLOPの位置にて、 $530 \text{ m}^3/\text{day}$ の定常揚水¹⁶⁾を考慮した流れ場を形成する。一樣流と同様に、断面的な流れは層構成に並行しているものの、揚水井FLOPへ向かう流れ場となることから便宜的に収束流と示す。

一樣流条件における水平方向の横分散 A_{22} に関しては、水平方向への透水係数変動がないため、幾何分散に依らずマイクロ分散長の0.001 mに漸近する一方で、収束流のケースでは水平方向への流速成分が生じることにより、見かけ上、横分散長はマイクロ分散より大きく導出される結果となる。他方、鉛直方向の横分散 A_{33} は流れ状態や幾何分散に関わらず、同一の変動を示しており、マイクロ分散長よりも約2から3オーダー大きい範囲で変化している。これは鉛直方向には透水係数が変化するため、横分散による粒子の混合が生じる結果、分散量は増大し、マクロ的要素が発現していると考えられる。成層地盤の各層は均質、かつ層に並行する流速ベクトル場の場合、横分散は縦分散とは異なり、不均質度に依存せず、流れ状態に固有の値となる点は注目に値すると言える。

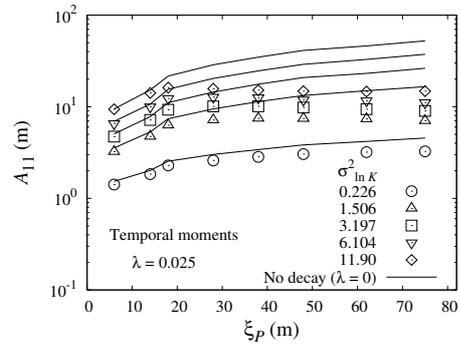


図-6 マクロ縦分散に及ぼす崩壊定数の影響

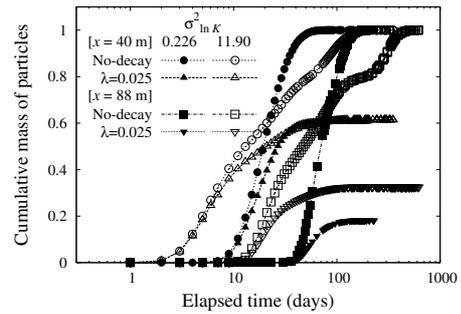


図-7 評価面における累積質量変化

(2) 崩壊定数を考慮したマクロ分散

保存性の物質を除いて、多くの物質は移行過程において微生物による分解作用や化学反応による形態変化を起こすことで質量の減衰を伴う。移流分散方程式では崩壊定数 λ として濃度減衰を表現することが多くあり¹⁸⁾、またトレーサ試験として非保存性物質を使用することもある³⁾。本節では質量減衰の効果を粒子追跡法に組み込み、マクロ分散への影響について検討する。なお、フィールドにて崩壊定数の空間分布を同定することは困難であり、定数として扱われることから、崩壊定数の空間分布は均質状態にあると仮定する。

分解作用や化学反応による質量変化を1次不可逆反応と考えて、粒子の質量減衰を次式により評価する¹⁸⁾。

$$m_p^k(t + \Delta t) = m_p^k(t)e^{-\lambda \Delta t} \quad (13)$$

ここに、 m_p^k は k 番目の粒子の有する質量、 λ は崩壊定数である。粒子追跡法では式(13)に基づき、時間ステップごとの粒子移行とともに既定の崩壊量に応じて粒子の質量を減少させる。図-6に、崩壊定数 $\lambda = 0.025$ (1/day)に対するマクロ縦分散長の変化をプロットする。図中には、透水係数分布の幾何分散ごとに、崩壊を考慮しない場合の結果を実線で併記している。

幾何分散の値が大きくなるほど、また移行距離が長くなるほど質量減衰の効果が強く現れ、崩壊の有無に対する差が顕著である。幾何分散の大きい場では透水性の低い領域が形成されるため、そこに存在する粒子は評価面への到達時間が長くなり、粒子質量の減衰につながると考えられる。この点を検討するため、幾何分散が最小と最大のケースに対して、2つの評価面を通過する粒子群

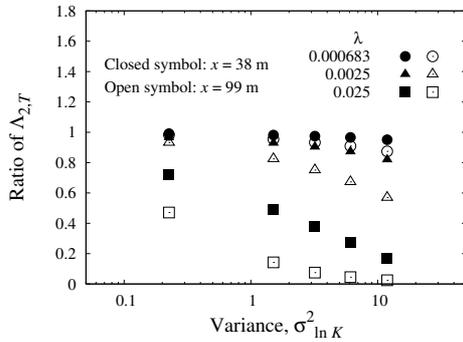


図-8 中心2次時間モーメント比

の累積質量変化の様子を図-7に示す。質量減衰の効果を考慮することで各評価面の累積質量変化は大きく異なり、解析上、いずれのケースでもすべての粒子が評価面を通過するもの、最大で約80%の質量減衰が生じている。また、大きい幾何分散ほど評価面における累積質量の立ち上がりが早く、最大累積値へ至る時間が長い傾向にある。これは透水性の高い層を流下する粒子群は比較的高い質量の状態で評価面を通過することで、立ち上がりの早い累積変化に寄与していると推察される。

図-7に見られるように、移行過程での質量低下に伴って累積質量変化は大きく異なることから、マクロ分散長の導出に關与する時間モーメント量にも変化が生じると考えられる。崩壊定数の値に応じた時間モーメント量の変動について検討するため、3種類の崩壊定数に対して、中心2次時間モーメントと幾何分散の関係を図-8に示す。図の縦軸は所与の崩壊定数と幾何分散条件にて得られた中心2次時間モーメントを崩壊を考慮しないケースでの中心2次時間モーメントにて除した値である。すべてのケースで1を下回っていることから、質量減衰により評価面での2次時間モーメント量は低下することを示している。以上の議論より、非保存性物質をマクロ分散の観測対象とする場合、観測距離や不均質性によっては保存性物質よりも小さいマクロ分散が観察されると言える。

(3) 分配係数の不均質性

反応性物質の土粒子への吸着過程は可逆性のある線形あるいは非線形関数として分配係数を用いて表現され¹⁸⁾、最もシンプルな遅延係数 R は次式となる。

$$R = 1 + \frac{\rho_b}{n_p} K_d \quad (14)$$

ここに、 ρ_b は乾燥密度、 K_d は分配係数である。吸着過程は物質により多様かつ複雑であるものの、粘土のように表面積の大きい土粒子への吸着性は高く、土粒子粒径が大きくなるほど吸着性は低下すると考えられる²¹⁾。つまりは、透水性の高い領域ほど低い吸着効果により分配係数や遅延係数は小さくなることから、負の相関モデルとして次式が提案されている²²⁾。

$$R(x) = 1 + \frac{\rho_b}{n_p} K_{dg} \exp(b(\ln K(x) - \langle \ln K \rangle)) \quad (15)$$

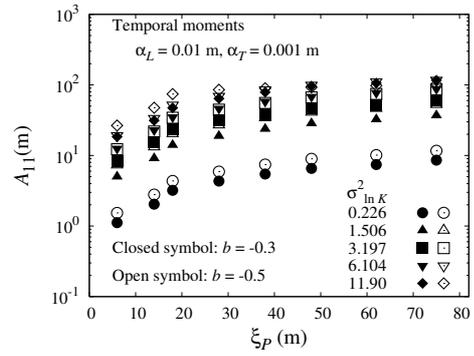


図-9 マクロ縦分散に及ぼす化学的不均質性の影響

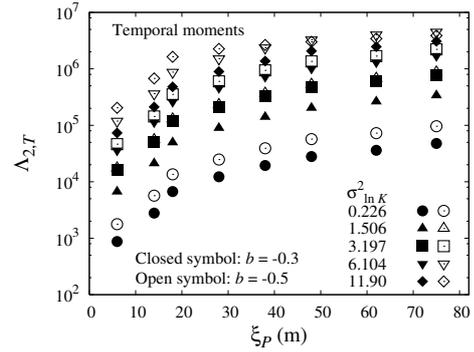


図-10 中心2次時間モーメントと移行距離の関係

ここに、 K_{dg} は分配係数の幾何平均、 $\langle \ln K \rangle$ は透水係数の幾何平均、 b は分配係数と透水係数の相関性を表す定数である。式(15)はストロンチウムやテトラクロロエチレンに対して適用されており²¹⁾²²⁾、本解析では化学的不均質性とマクロ分散の関係を検討するため、式(15)により分配係数の不均質性を表現する。また、フィールドの結果や文献¹³⁾²¹⁾に基づき、定数 b の値は -0.3 と -0.5 に設定し、 K_{dg} は $0.526 \text{ cm}^3/\text{mg}$ 、 $\langle \ln K \rangle$ は 0.8213 とする。

遅延係数の空間分布を考慮した粒子追跡解析によるマクロ分散の推定結果を図-9に示す。定数 b の値が小さくなることで、わずかではあるがマクロ分散は大きく推定されていることが見て取れる。これは分配係数と透水係数の負の相関性が強くなると透水係数の最大値と最小値の開きが大きくなるためである。一方で、透水係数の幾何分散が 6.104 や 11.9 のケースでは移行距離が増加してもマクロ分散の値はあまり変化しない結果となる。この点を考察するため、中心2次時間モーメントの変化を図-10に示す。大きい幾何分散の場合では移行距離に伴う2次時間モーメントの増加量は小さくなり、 $\xi_G = 76 \text{ m}$ の評価面では各幾何分散が取り得る時間モーメント量の変動幅は他の評価面よりも狭くなる。幾何分散や負の相関性の増加は粒子の移動速度のばらつきを増す方向に作用するため、評価面への到達状況には変化が生じる。合わせて、横分散の効果により時間の経過とともに低透水性の層に留まる粒子数は減少し、高透水性の領域へ移行することで評価面への到達時間は早まると推察され、結果として、2次モーメント量の低下につながると考えられ

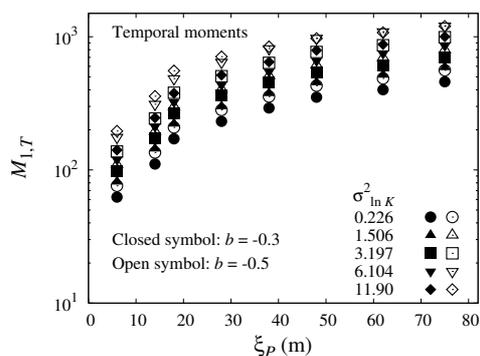


図-11 絶対1次時間モーメントと移行距離の関係

る。図-11に示すように、 $b = -0.5$ の場合、長い移行距離では1次時間モーメントはさほど変化しておらず、この点からも、ある程度の移行距離になると粒子群の平均的な到達時間に差異は生じないことが示唆される。

4. 結論

本研究では、物理的・化学的不均質性を有する成層地盤を対象にランダムウォーク粒子追跡法によりマクロ分散変動を評価した。マクロ分散推定に時間・空間モーメント法を適用した結果、不均質度ならびに粒子群の移行距離の増加とともにマクロ縦分散長は増加しながら一定値に漸近し、約100 mの移行距離ではマイクロ分散に比べて十倍から数千倍になることが確認された。また、地下水の流れが層に沿う場合、鉛直方向マクロ横分散は幾何分散や移行距離に依存しない一方で、流速の水平方向成分の有無に応じて水平方向マクロ横分散は変化する結果を得た。さらに、非保存性物質のように質量減衰を伴う場合、透水係数分布の幾何分散が大きいくほど、時間2次モーメント量は大きく減少し、保存性物質に比べてマクロ縦分散は小さく推定される結果となった。また、吸着性物質の場合、分配係数の不均質性が高い地盤ほどマクロ縦分散は大きく推定される傾向にあることがわかった。

参考文献

- 1) Dagan, G. and Neuman, S.P.: *Subsurface flow and transport: a stochastic approach*, Cambridge University Press, 256p., 1997.
- 2) Gelhar, L.W. and Axness, C.L.: Three-dimensional stochastic analysis of macrodispersion in aquifers, *Water Resour. Res.*, 19(1), pp.161–180, 1983.
- 3) Gelhar L.W., Welty, C. and Rehfeldt, K.W.: A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers, *Water Resour. Res.*, 28(7), pp.1955–1974, 1992.
- 4) Mercado, A.: The spreading pattern of injected waters in a permeability stratified aquifer, *IAHS AISH Publication*, 72, pp.23–96, 1967.
- 5) Hill, D.J., Minsker, B.S., Valocchi, A.J., Babovic, V. and Keijzer, M.: Upscaling models of solute transport in porous media through genetic programming, *J. Hydroinformatics*, 9(4), pp.251–266, 2007.

- 6) Dagan, G.: Solute transport in heterogeneous porous formations, *J. Fluid Mech.*, 145, pp.151–177, 1984.
- 7) Tompson, A.F.B. and Gelhar, L.W.: Numerical simulation of solute transport in three-dimensional, randomly heterogeneous porous media, *Water Resour. Res.*, 26(10), pp.2541–2562, 1990.
- 8) Fernández-García, D., Illangasekare, T.H. and Rajaram, H.: Differences in the scale-dependence of dispersivity estimated from temporal and spatial moments in chemically and physically heterogeneous porous media, *Adv. Water Resour.*, 28, pp.745–759, 2005.
- 9) Kitanidis, P.K.: Prediction by method of moments of transport in a heterogeneous formation, *J. Hydrol.*, 102, pp.453–473, 1988.
- 10) Neuweiler, I., Attinger, S. and Kinzelbach, W.: Macrodispersion in a radially diverging flow field with finite Peclet numbers 1. Perturbation theory approach, *Water Resour. Res.*, 37(3), pp.481–493, 2001.
- 11) Rajaram, H. and Gelhar, L.W.: Three-dimensional spatial moments analysis of the Borden tracer test, *Water Resour. Res.*, 27(6), pp.1239–1251, 1991.
- 12) Uffink, G.J.M.: A random walk method for the simulation of macrodispersion in a stratified aquifer, *Relation of Groundwater Quality and Quantity, IAHS Publications*, 146, pp.103–114, 1985.
- 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) Sugita, F. and Gillham, R.W.: Pore scale variation in retardation factor as a cause of nonideal reactive breakthrough curves 1. conceptual model and its evaluation, *Water Resour. Res.*, 31(1), pp.103–112, 1995.
- 15) Michalak, A.M. and Kitanidis, P.K.: Macroscopic behavior and random-walk particle tracking of kinetically sorbing solutes, *Water Resour. Res.*, 36(8), pp.2133–2164, 2000.
- 16) Uffink, G.J.M.: Analysis of dispersion by the random walk method, *Ph.D. Dissertation, Delft University of Technology*, 150p., 1990.
- 17) Bear, J.: *Dynamics of fluids in porous media*, Dover Publications, 764p., 1972.
- 18) Zheng, C. and Bennett, G.D.: *Applied contaminant transport modeling*, Wiley Interscience, 621p., 2002.
- 19) Burnett, R.D. and Frind, E.O.: Simulation of contaminant transport in three dimensions, 2. Dimensionality effects, *Water Resour. Res.*, 23(2), pp.695–705, 1987.
- 20) Güven, O., Moltz, J.M. and Melville, J.G.: An analysis of dispersion in a stratified aquifer, *Water Resour. Res.*, 20(10), pp.1337–1354, 1984.
- 21) Burr, D.T., Sudicky, E.A. and Naff, R.L.: Nonreactive and reactive solute transport in three-dimensional heterogeneous porous media: Mean displacement, plume spreading, and uncertainty, *Water Resour. Res.*, 30(3), pp.791–815, 1994.
- 22) Robin, M.J.L., Sudicky, E.A., Gillham, R.W. and Kachanoski, R.G.: Spatial variability of strontium distribution coefficients and their correlation with hydraulic conductivity in the Canadian forces base Borden aquifer, *Water Resour. Res.*, 27(10), pp.2619–2632, 1991.