



ランダムウォーク粒子追跡法による不均質帯水層内の溶質マクロ分散評価

井上, 一哉
藤原, 隆之
田中, 勉

(Citation)

土木学会論文集B1 (水工学) , 69(4):I_583-I_588

(Issue Date)

2013

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

©2013 公益社団法人 土木学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90003325>



ランダムウォーク粒子追跡法による 不均質帯水層内の溶質マクロ分散評価

USE OF RANDOM WALK PARTICLE TRACKING FOR MACRODISPERSION ASSESSMENT OF SOLUTE IN HETEROGENEOUS AQUIFERS

井上一哉¹・藤原隆之²・田中勉³

Kazuya INOUE, Takayuki FUJIWARA 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 神戸大学農学部 (〒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)

Conservative and sorptive transport simulations were conducted in heterogeneous aquifers to assess characteristics of macrodispersion. Heterogeneities in subsurface materials were represented as randomly correlated hydraulic conductivity and sorption partition coefficient fields. Transport computations were based upon a random walk particle tracking model linked with temporal and spatial moments. The simulations demonstrated that control plane and its middle element provide almost identical macrodispersivity estimates in terms of transverse mixing, but differ markedly from estimates of longitudinal mixing. The results also indicated that the increase of the physical or chemical heterogeneity provides the increase of the longitudinal and transverse macrodispersivities and affects late traveltimes of particles reaching a control plane, leading to the increase of the second-order temporal moment and relevant macrodispersion.

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

1. 緒論

地下水の流れや帯水層内を移動する水溶性物質の輸送挙動は地盤の不均質性、すなわち透水係数の空間分布状態に大きく影響を受ける¹⁾。この点はフィールド実験により広く認識されている^{2,3)}ものの、対象場の不均質性と溶質輸送、特にマクロ分散に関する量的議論は現在も継続している。空間内で不規則にばらついて分布する透水係数や有効間隙率を精緻に捉えることは極めて困難であり、特に、対象場を数値モデル化する際には不確実性の問題が生じる。また、フィールド調査におけるマクロ分散の推定結果は観測点の位置や数、サンプリング方法に依存する点と、高不均質の場合ほど不確実性は増加する点がマクロ分散推定を複雑にしている⁴⁾。

そのため、対象場の溶質輸送現象を確率統計的に扱うことにより、理論的^{1,5)}、あるいは数値解析的観点⁶⁾からスケール依存性を伴うマクロ分散の定量評価が進められている⁷⁾。フィールド実験における濃度データの解釈を鑑みると、観測点での破過曲線に基づく時間モーメント法⁸⁾や同一時刻における複数点での濃度計測に基づく空間モーメント法⁴⁾はマクロ分散量を推定する1つの手段と

して活用されている。両手法を溶質輸送の数値解析に組み込んだ研究はいくつかなされている^{9,10)}ものの、縦方向への分散に力点を置く傾向にあり、横方向へのマクロ分散を評価する事例は少ない。また、反応性トレーサのような吸脱着を伴う物質に対する検討実績も少なく^{6,9)}、透水係数分布のような物理的不均質性ととも化学的不均質性に対する結果も蓄積されていくことが望まれる。

そこで本研究では、物理的・化学的不均質度の異なる模擬透水場を対象に、時間・空間モーメント法とランダムウォーク粒子追跡法を連携し、不均質度とマクロ分散長との関係を求めた。本研究では、間隙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ミクロ分散、自然地盤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定義する⁵⁾。

2. ランダムウォーク粒子追跡法とマクロ分散推定

(1) 浸透流解析

本研究では、図-1に示す領域を対象として、不均質流れ場における浸透流方程式を扱った¹¹⁾。

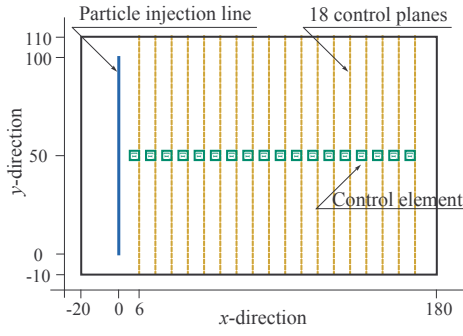


図-1 解析対象領域

$$\sum_{i=1}^2 \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_i \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) = 0 \quad (1)$$

ここに、 h はピエゾ水頭、 K_i は各軸方向の透水係数であり等方性を仮定する。また、 x_i は座標であり、添字の1と2はそれぞれ、 x と y 軸を表す。主たる流れ方向を x 軸方向のみに拘束するため、 $x = -20$ mと $x = 180$ mの面を0.001の動水勾配となる水頭境界、 $y = -10$ mと $y = 110$ 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、浸透場の間隙率 n_p を0.2として、Darcy則により実流速ベクトル成分 v_i の空間分布を求めた。

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

(2) 透水係数分布モデル

空間的なばらつきを有する模擬透水場を確率統計的に発生させるため、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¹²⁾。次に、所定の領域内に一様乱数にて、 10^3 個のソース点を生成し、各点に既定の対数正規分布に従う透水係数を乱数により発生させた¹³⁾。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Block Kriging予測¹²⁾し、1つの不均質度に対して、 10^2 個の模擬透水場（ 10^2 リアライゼーション）を生成した。比較的透水性の良い場^{2, 10)}を想定して、透水係数の幾何平均を116.7 m/dayとし、不均質度を広く考慮するため、0.09, 0.25, 1.0, 2.25の4種類の幾何分散 $\sigma_{\ln K}^2$ を対象とした。また、透水係数の空間相関は等方とし、相関長 λ を10 m、シルに幾何分散を用いて、指数型バリオグラム γ を採用した。

$$\gamma(h) = \sigma_{\ln K}^2 (1 - \exp(h/\lambda)) \quad (3)$$

ここに、 h は観測点間距離である。一連のパラメータ選定にあたっては、具体的なサイトデータではなく、現実の値と大きく乖離しない値に設定した。各不均質度に対する透水係数分布の一例を図-2に示す。

(3) ランダムウォーク粒子追跡法

マスバランスを維持しつつ、溶質の空間分布状態に基づいてマクロ分散を精度良く推定するため、本研究で

は、ランダムウォーク粒子追跡法^{2, 6)}を適用した。

$$X_{p,i}(t + \Delta t) = \left(v_i(\vec{X}_p(t)) + \sum_{j=1}^2 \frac{\partial D_{ij}}{\partial x_j}(\vec{X}_p(t)) \right) \Delta t / R(\vec{X}_p(t)) + \sum_{j=1}^2 B_{ij}(\vec{X}_p(t)) \Xi_j \sqrt{\Delta t} + X_{p,i}(t), \quad i = 1, 2 \quad (4)$$

ここに、 $X_{p,i}(t)$ は時間 t の粒子位置の i 成分、 $\vec{X}_p(t)$ は粒子位置ベクトル、 Δt は時間増分、 Ξ_j は平均0、分散1の正規乱数、 R は遅延係数、 D_{ij} は分散係数テンソルである¹¹⁾。

$$D_{ij} = (\alpha_T |\mathbf{v}| + D_d) I_{ij} + (\alpha_L - \alpha_T) \frac{v_i v_j}{|\mathbf{v}|}, \quad i, j = 1, 2 \quad (5)$$

ここに、 α_L はミクロ縦分散長、 α_T はミクロ横分散長、 $|\mathbf{v}|$ は流速のノルム、 I_{ij} は単位マトリクス、 D_d は有効拡散係数でありゼロとする。 B_{ij} は変位マトリクスである。

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

透水係数に関わる物理的不均質性に加えて、負の相関モデル⁶⁾を用いて、透水係数分布に応じた分配係数の空間分布、すなわち遅延係数の不均質性を考慮した。

$$R(\mathbf{x}) = 1 + \rho_b K_{dg} \exp(\beta(\ln K(\mathbf{x}) - \langle \ln K \rangle)) / n_p \quad (7)$$

ここに、 $\mathbf{x}$ は位置ベクトル、 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、 β は分配係数と透水係数の相関性を表すモデル定数である。また、文献⁶⁾に基づき、定数 β の値は-0.3と-0.1、 K_{dg} は0.526 cm³/gに設定した。さらに、分散の影響を大きくするため、縦分散長と横分散長をそれぞれ0.1 m, 0.01 mとした。一連のパラメータを表-1に示す。遅延係数の不均質度 σ_R^2 は透水係数の不均質度と負の相関モデル定数に応じて変化するため、表中には取り得る範囲を記す。このとき、遅延係数の平均値は1から5.77である。

(4) 時間モーメント法

図-1に示すように、本解析では18の評価面(Control plane: CP)を設けて、各面を通過する粒子群の時間的な質量変化を基に、粒子質量の破過曲線を求めた。全リアライゼーションをアンサンブル平均した破過曲線の n 次時間モーメント $M_{n,T}$ は次式から求めた⁹⁾。

$$M_{n,T} = \frac{1}{N_r} \sum_{r=1}^{N_r} \left(\sum_{k=1}^{NP_s} m_p^k(t_p^k(\xi_1))^n / \sum_{k=1}^{NP_s} m_p^k \right)^{(r)} \quad (8)$$

ここに、 m_p^k は k 番目の粒子質量、 ξ_1 は評価面の x 座標、 NP_s は評価面を通過する粒子数、 t_p^k は k 番目の粒子の評価面通過時間、 N_r はリアライゼーション数、カッコ付きの上添字はリアライゼーション番号である。また、 n 次中心時間モーメント $\Lambda_{n,T}$ は二項定理を用いて次式から求めた。

$$\Lambda_{n,T} = \sum_{r=0}^n \binom{n}{r} M_{n-r,T}(\xi_1) (-M_{1,T}(\xi_1))^r \quad (9)$$

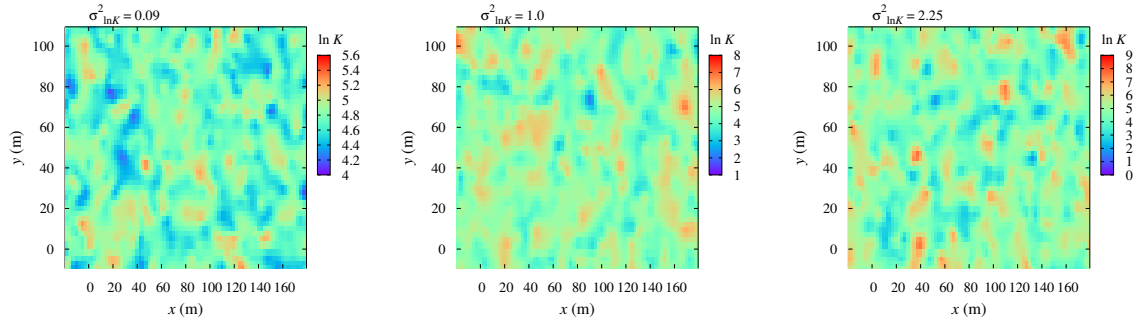


図-2 物理的不均質性に対する透水係数分布の一例

表-1 ランダムウォーク粒子追跡解析に用いるパラメーター一覧

平均透水係数 (m/day)	116.7	相関長 λ (m)	10
動水勾配 J (–)	0.001	間隙率 n_p (–)	0.2
ミクロ縦分散長 α_L (m)	0.1	ミクロ横分散長 α_T (m)	0.01
乾燥密度 ρ_b (g/m ³)	1.8×10^6	負の相関モデル定数 β (–)	–0.3, –0.1, 0
粒子数	2×10^5	分配係数 K_d (m ³ /g)	$0, 5.26 \times 10^{-7}$
粒子質量 m (g)	1.0×10^{-3}	時間ステップ Δt (day)	1.0
透水係数の不均質性 $\sigma_{\ln K}^2$ (m ² /day ²)	0.09, 0.25, 1, 2.25	遅延係数の不均質性 σ_R^2 (–)	0 ~ 1.26

マクロ縦分散長 A_{11} とマクロ横分散長 A_{22} は、

$$A_{11}(\xi_P) = \frac{\xi_P}{2} \frac{\Lambda_{2,T}(\xi_P)}{(M_{1,T}(\xi_P))^2} \quad (10)$$

$$A_{22}(\xi_P) = \frac{1}{N_r} \sum_{r=1}^{N_r} \left(\frac{1}{2\xi_P} \sum_{k=1}^{NP_a} m_p^k (\Delta b_p^k(\xi_P))^2 / \sum_{k=1}^{NP_a} m_p^k \right)^{(r)} \quad (11)$$

にて推定した。ここに、 ξ_P は粒子初期位置から断面までの距離、 NP_a は該当断面を通過する総粒子数、 Δb_p^k は k 番目の粒子に対する初期位置から水平方向への変位量である。

(5) 空間モーメント法

空間モーメント法を用いたマクロ分散を推定するため、次式により空間モーメント量を算定した⁶⁾。

$$X_{G,i} = \frac{1}{m(t)} \sum_{k=1}^{NP_t} \frac{m_p^k X_{p,i}^k(t)}{R(X_p^k(t))}, \quad m(t) = \sum_{k=1}^{NP_t} \frac{m_p^k}{R(X_p^k(t))} \quad (12)$$

$$S_{ij}(t) = \frac{1}{m(t)} \sum_{k=1}^{NP_t} \frac{m_p^k X_{p,i}^k(t) X_{p,j}^k(t)}{R(X_p^k(t))} - X_{G,i}(t) X_{G,j}(t) \quad (13)$$

ここに、 $X_{G,i}$ は時間 t における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_t は時間 t の空間内の粒子総数である。

すべてのリアライゼーションに対する空間2次モーメントのアンサンブル平均 Γ_{ij} は次式にて導出した。

$$\Gamma_{ij}(t) = \langle S_{ij}(t) \rangle + \langle (X_{G,i}(t) - \langle X_{G,i}(t) \rangle)(X_{G,j}(t) - \langle X_{G,j}(t) \rangle) \rangle \quad (14)$$

ここに、 $\langle \cdot \rangle$ はアンサンブル平均を意味する。最後に、縦

方向と横方向のマクロ分散長は次式により推定した。

$$A_{ii}(\langle \xi_G(t) \rangle) = \frac{\Gamma_{ii}(\langle \xi_G(t) \rangle)}{2\langle \xi_G(t) \rangle}, \quad i = 1, 2 \quad (15)$$

ここに、 $\xi_G(t)$ は時間 t における粒子群の重心位置の変位距離である。一連の数値解析には、井上ら^{10,14)}が開発したランダムウォーク粒子追跡コードを使用した。

時間モーメント法は、サイトにて複数の観測井を列配置し、観測井群を通過する溶質濃度の時系列計測を基にマクロ分散を推定する状況に相当するのに対して、空間モーメント法は、対象空間に広く配置された観測井群での一斉観測結果を基にマクロ分散を推定する状況に相当する。そのため、時間モーメント法は定点での破過状態、空間モーメント法は溶質の空間分布状態がマクロ分散結果に影響を及ぼす。

3. 結果と考察

(1) 物理的不均質性の効果

図-1に示すように、 $x=0$ の軸上に100 mにわたって、 2×10^5 粒子を一様に初期配置してランダムウォーク粒子追跡解析を実施した。時間モーメント法を用いて、設定した評価面にてリアライゼーションごとに推定されたマクロ分散長の値、ならびに、アンサンブル平均の結果を検討するため、物理的不均質性 $\sigma_{\ln K}^2$ が1、化学的不均質性を考慮しない($\sigma_R^2=0$)透水場にて得られた縦方向と横方向のマクロ分散長の結果を図-3に示す。図中には、すべてのリアライゼーションのアンサンブル平均に加えて、ランダムに抽出した10個のリアライゼーションの結果を

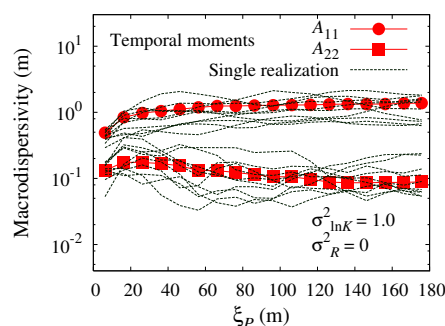


図-3 時間モーメント法によるマクロ分散推定結果

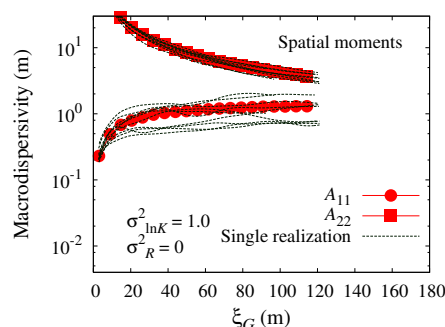


図-4 空間モーメント法によるマクロ分散推定結果

併記する。マクロ分散長と溶質の輸送距離の推移はリアライゼーションごとに異なるものの、マクロ縦分散長 A_{11} は約1.2、マクロ横分散長 A_{22} は約0.09に漸近しており、不均質度や輸送距離を考慮すると妥当な値³⁾と考えられる。

他方、図-4には、図-3と同一の場に対して、空間モーメント法により得られた縦方向と横方向のマクロ分散長の結果を示す。空間モーメント法を適用する際には、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へ移行するまでの期間が解析対象となり、結果として、時間モーメント法よりもマクロ分散長を推定できる距離は短くなる。縦方向のマクロ分散長は図-3の結果とほぼ同じ変化を示し、約1.2に漸近する一方で、マクロ横分散長はマクロ縦分散長よりも大きい値である。これは初期条件にて線状配置した時点で、重心位置($x = 0 \text{ m}, y = 50 \text{ m}$)から y 方向への拡がりは強制的に大きいため、式(13)の S_{22} が幾何形状に影響を受けて大きくなるのが要因である。粒子群の移行とともに初期形状の影響は減少するため、横分散長は急激に低下し、最終的にはマイクロ横分散長、あるいは、マクロ縦分散長よりは小さい対象場固有のマクロ横分散長に漸近すると推量される。そのため、空間モーメント法の適用に際しては、移行距離を長く、あるいは、初期分布範囲を小さくすることで、対象場固有の横分散長を推定できると考えられる。

物理的不均質性とマクロ分散長の関係を調べるため、化学的不均質性は無く、物理的不均質性の異なる4種類の場に対するアンサンブル評価結果を図-5に示す。図の縦軸には、推定結果をマイクロ分散長で除した値を設定し、評価距離が長く、粒子群の初期形状への依存性が小

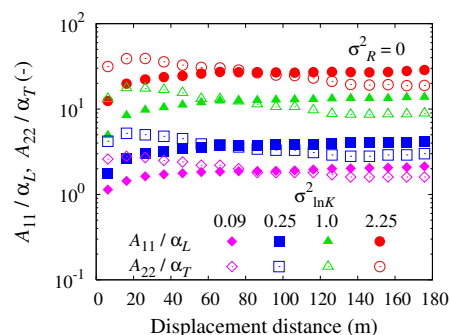


図-5 マクロ分散推定値とマイクロ分散値の比の変化

さい時間モーメント法のアンサンブル評価結果を示す。物理的不均質性の増加は粒子群の空間分布を拡大する方向に作用するため、図-5に見られるように不均質性の高い場合ほど比の値は大きくなる。物理的不均質度が約20倍変化することでマクロ分散長は縦方向・横方向ともに約10倍の変動を示している。特に、マクロ横分散長の大きさは特徴的であり、不均質性に対応した y 方向流速成分の影響と考えられる。この点は主たる流れ方向に並行な成層地盤では生じにくい現象¹⁰⁾であり、透水係数の空間的なばらつきが溶質輸送に及ぼす影響の1つと言える。

(2) 評価面と評価要素

フィールド試験を鑑みると、物理的・経済的制約から評価面のような同一断面内に多数の観測点を設けることは難しい。そのため、図-1に示すように、評価面内に評価要素 (Control element: CE) を設け、特定の要素のみを通過する粒子の累積質量変化に基づいてマクロ分散長を推定した。図-6に物理的不均質性の異なる場におけるマクロ縦分散長、図-7にマクロ横分散長の時間モーメント法による推定結果を示す。

マクロ縦分散に関しては、評価面と評価要素では通過する粒子群の累積質量が異なるため、評価要素での推定結果は過小評価される傾向にあるのに対して、評価面と評価要素に対するマクロ横分散長の結果には相違があまり見られない。これは式(11)に示すように、横分散の推定には粒子の初期位置からの水平変位量を用いる点に起因する。評価面や評価要素では、通過する粒子固有の水平変位量を記憶していくため、溶質の初期重心位置から主たる流れ方向に沿って観測井を配置すると単独の観測井であってもマクロ横分散長の推定ができると考えられる。

信頼性の観点からフィールド試験を整理した文献によると約100 mの輸送距離に対する縦分散長と横分散長はそれぞれ約 10^0 m 、約 10^{-1} m である^{3, 15)}。この点を踏まえて、本解析結果は一定の妥当性を有していると判断される。

(3) 化学的不均質性の効果

式(7)を用いて場の化学的不均質性を考慮すると、遅延係数の空間的ばらつきに対応して粒子群の輸送挙動には変化が生じる^{6, 10)}。本研究では、モデル定数 β を -0.3

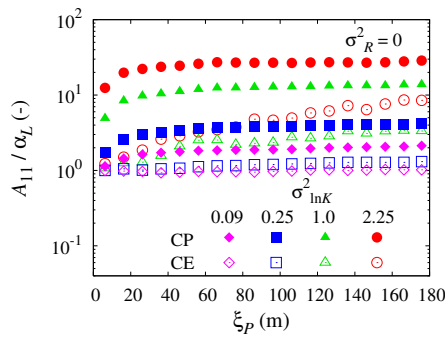


図-6 評価面と評価要素に関するマクロ縦分散の差異

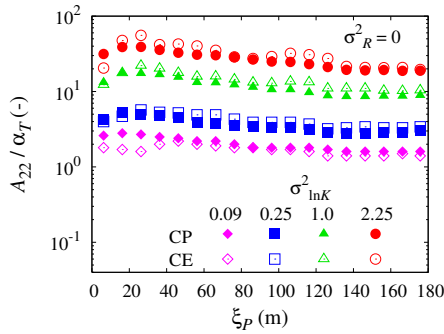


図-7 評価面と評価要素に関するマクロ横分散の差異

と-0.1に設定することで、分配係数と透水係数の相関度合いを変えて、化学的不均質性を考慮しない場 ($\beta = 0$) とともに解析対象とした。物理的不均質性が最も小さい $\sigma_{\ln K}^2 = 0.09$ の透水場において、化学的不均質性を变化させた場合の縦および横方向のマクロ分散長の推定結果を図-8に示す。図の凡例には、モデル定数 β に応じた化学的不均質度 σ_R^2 を記しており、 β が小さいほど化学的不均質度は大きくなる。また、同様に、物理的不均質度が最も大きい $\sigma_{\ln K}^2 = 2.25$ の透水場に対する結果を図-9に示す。図-3と図-4の結果と同様に、マクロ縦分散長の推移はモーメント法の違いに依存しないが、マクロ横分散長は初期粒子群の配置形状の影響により、モーメント法ごとの差異は顕著である。したがって、線状配置の下での横分散推定は観測方法に大きく左右されるといえる。

化学的不均質性が高くなるほど、マクロ縦分散長は増加し、図-9に示す物理的不均質性の高い場合ほど化学的不均質性の影響は顕著に現れるようになる。この点はTompsonの研究⁶⁾においても観察されている。マクロ横分散長に関しては、実際には数値的に微小な差異があるものの、化学的不均質性の影響はほとんど生じていない。分散の度合いは場の流速分布に左右され、物理的不均質性の高い場合ほど y 軸方向の流速成分の影響により横分散長は増加する¹⁰⁾。しかしながら、流速成分 v_x は v_y よりも大きいため、化学的不均質性の影響は縦方向に顕著に表れ、物理的不均質性に比べると化学的不均質性の寄与の度合いはかなり小さくなったと推察される。

ところで、不均質性の増加は任意の評価面における粒子群の累積質量変化に変化を与えられとえられる。この

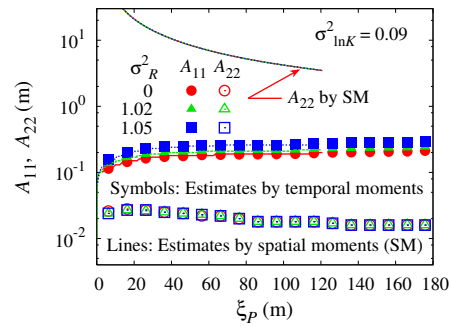


図-8 化学的不均質性に応じたマクロ分散の差異

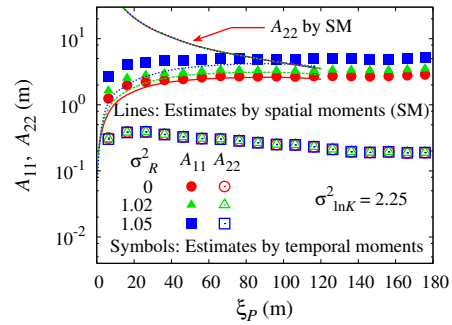


図-9 化学的不均質性に応じたマクロ分散の差異

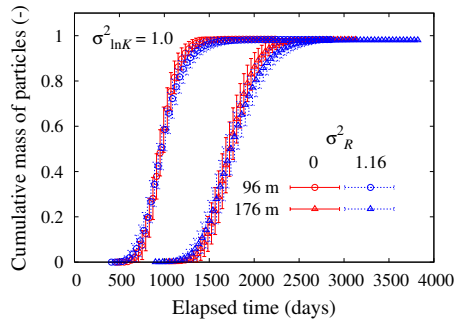


図-10 評価面における累積質量の差異

点を確認するため、 $\sigma_{\ln K}^2 = 1.0$ の物理的不均質場を例として、化学的不均質度の異なる2種類の場合に対する $x = 96$ と 176 m の評価面での累積質量変化を図-10に示す。 $\sigma_R^2 = 1.16$ のケースの横軸は、経過時間を平均遅延係数で除した値である。図にはアンサンブル平均した際の標準偏差をエラーバーとして併記している。不均質度の高い場合ほど累積質量の変化割合が緩くなっており、特に、累積質量が80%を超えてくると、その後の質量変動は小さくなる点がマクロ分散長の推定結果に寄与している。

図-10において評価面にて累積質量の50%に相当する時刻は、不均質性に関わらず概ね一致しており、前述のように、累積質量の大きい部分の差異が小さい部分よりも顕著である。そこで、物理的不均質性の異なる場合ごとに、化学的不均質性の度合いに応じた粒子群のトラベル時間とトラベル距離を求め、得られた関係を図-11に示す。図中の縦軸と横軸はそれぞれ無次元化したトラベル時間とトラベル距離であり、次式により求めた。

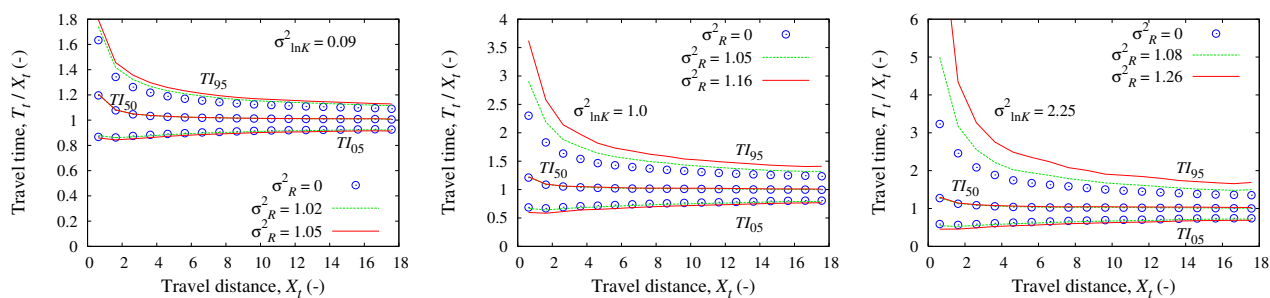


図-11 各不均質性に対するトラベル距離とトラベル時間の関係

$$X_t = \xi_P / \lambda, \quad T_t = TI_\varepsilon \bar{K} J / (\lambda n_p \bar{R}) \quad (16)$$

ここに、 X_t は粒子群のトラベル距離、 T_t は粒子群のトラベル時間、 TI_ε は評価面を通過する粒子群の累積質量の ε パーセントに相当する時間、 $\bar{K}$ は透水係数分布の幾何平均、 J は動水勾配、 $\bar{R}$ は対象場の平均遅延係数である。

図-11に示すように、 TI_{05} や TI_{50} は化学的不均質性の度合いに関わらず、ほぼ一致して推移しているのに対して、化学的不均質性の増加とともに、 TI_{95} の値、つまりは、評価面を通過する粒子群の95%質量に相当する時間は長くなっている。破過曲線の観点から考えると、テーリングの度合いが大きくなることになり、その結果、式(10)における2次中心時間モーメント $\Lambda_{2,T}(\xi_P)$ の増大につながる。したがって、物理的不均質性のみならず、化学的不均質性の高い場合ほど、マクロ縦分散長は大きくなると言える。一方で、マクロ横分散長には式(11)の $\Delta b(\xi_P)$ が大きく関与する。粒子初期位置からの水平変位量は化学的不均質性よりも物理的不均質性の寄与が大きく、場の流速分布とミクロ横分散長に影響を受けると推量される。この点が図-8と図-9にて、マクロ横分散長が化学的不均質性に低い依存性を示した要因である。

4. 結論

本研究にて得られた知見は以下のとおりである。

1. 時間・空間モーメント法ともに、不均質性に関わらず、類似したマクロ縦分散長の結果を導いた。一方、粒子群の初期配置は空間モーメント法によるマクロ横分散長の推定に大きく影響を及ぼした。
2. 評価要素にてマクロ分散長を推定すると、マクロ縦分散長は評価面よりも小さく、マクロ横分散長はほぼ同一の推定値となった。
3. マクロ横分散長の化学的不均質性への依存度は低い一方で、化学的不均質性の増加に伴って、マクロ縦分散長は増加する傾向にあり、物理的不均質性の高い場合ほど化学的不均質性の影響が顕著に現れた。
4. 粒子群のトラベル時間を検討した結果、化学的不均質性の効果は累積質量の高い部分、すなわち破過曲線のテール部分に現れることがわかった。

参考文献

- 1) Dagan, G.: Solute transport in heterogeneous porous formations, *J. Fluid Mech.*, 145, pp.151–177, 1984.
- 2) Uffink, G.J.M.: Analysis of dispersion by the random walk method, *Ph.D Dissertation, Delft University of Technology*, 150p., 1990.
- 3) Gelhar, L.W., Welty, C. and Rehfeldt, K.R.: A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers, *Water Resour. Res.*, 28(7), pp.1955–1974, 1992.
- 4) Adams, E.E. and Gelhar, L.W.: Field study of dispersion in a heterogeneous aquifer, 2. spatial moment analysis, *Water Resour. Res.*, 28(12), pp.3293–3307, 1992.
- 5) Gelhar, L.W. and Axness, C.L.: Three-dimensional stochastic analysis of macrodispersion in aquifers, *Water Resour. Res.*, 19(1), pp.161–180, 1983.
- 6) 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.
- 7) Wang, K. and Huang, G.: Effect of permeability variations on solute transport in highly heterogeneous porous media, *Adv. Water Resour.*, 34, pp.671–683, 2011.
- 8) Hoehn, E., and Santschi, P.H.: Interpretation of tracer displacement during infiltration of river water to groundwater, *Water Resour. Res.*, 23(4), pp.633–640, 1987.
- 9) 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.
- 10) 井上一哉, Uffink, G.J.M., 田中勉: 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, *水工学論文集*, 54, pp.607–612, 2010.
- 11) Bear, J.: *Dynamics of fluids in porous media*, Dover Publications, 764p., 1972.
- 12) Deutsch, C.V. and Journel, A.G.: *GSLIB: Geostatistical software library and user's guide*, Oxford University Press, 340p., 1992.
- 13) Ghorri, 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.
- 14) 井上一哉, 島田遥, 田中勉: 溶質のマクロ分散とトラベル時間に与える成層地盤のアップスケールの影響, *土木学会論文集A2分冊(応用力学)*, 67(2), pp.I.521–I.532, 2011.
- 15) Zheng, C. and Bennett, G.D.: *Applied contaminant transport modeling*, Wiley Interscience, 621p., 2002.

(2012.9.30受付)