

層地盤内の物質輸送に関する時間モーメント特性評価 Temporal Moment Analysis on Solute Transport in Layered Porous Media

○ 井上 一哉*・河端 俊典*・内田 一徳*・田中 勉*
Kazuya Inoue, Toshinori Kawabata, Kazunori Uchida and Tsutomu Tanaka

1. はじめに

一般的に、地盤の不均質度合いに関わらず移流分散方程式では縦・横分散長を領域内にて時空間的不変量として扱う。そのため、空間的に配置された各観測点の破過曲線に基づいて推定される分散長は場の不均質度に応じた値となり、再現性の高い移流分散モデルがいくつか提案されている¹⁾。一方、領域の不均質性に依存して破過曲線のテーリング形状は変化することから、破過曲線の情報は場の不均質性評価に応用できる可能性を有している。そこで本研究では層地盤と均質地盤を対象として物質移動実験を実施し、観測された時系列濃度データを基に時間モーメント解析を実施することで、層地盤内の移行に伴うモーメント量の変化について検討する。

2. 物質移動実験

本研究では図1に示す長さ80cm、幅50cm、深さ6cmの実験装置を用いて物質移動実験を実施する。均質地盤と層地盤の作成には表1に示す3種類の試料を用い、試料を水中落下により充填して、締め固めることで浸透場を作成する。試料AとBは兵庫県下のため池で採取された底泥土、試料Cはケイ砂であり、粒度分布を図2に示す。底泥土に含まれる礫分の影響を検討するため、最大粒径を19mmと2mmに調節し、それぞれを試料A、Bとする。均質地盤は試料Cを用いて作成し、この地盤における実験をケース1とする。層地盤は試料Cを装置の上流部から35cmの位置まで充填した後、所定の厚さで底泥土層を形成し、さらにケイ砂を充填することで三層地盤を形成する。底泥土層に試料Aを5cm充填させる実験をケース2、試料Bを5cm充填させる実験をケース3とする。また、底泥土層の層厚と分散性の関係を検討するため、試料Aを10cm充填させた実験をケース4、試料Bを10cm充填させた実験をケース5とする。すべての層において間隙率は0.42となるように密度管理しており、浸透地盤作成後、濃度 $5.0 \times 10^{-3} \text{g/cm}^3$ のNaCl水溶液を注入し、4地点に配置したNaClセンサーにより濃度を測定するとともに動水勾配を種々に変更して実験を実施している。

3. 時間モーメント解析

不均質地盤では物質の移行に伴い破過曲線がテーリングの形状を示す。これは不均質地盤の特性であり、テーリングに対する1つのアプローチとして時間モーメント解析²⁾を適用することで不均質性と時間モーメント量の関係について考察する。時間モーメント量は式(1)から式(3)で表され、各観測点の破過曲線に基づいて時間モーメント量を算定することにより各実験ケースの分散挙動について検討する。

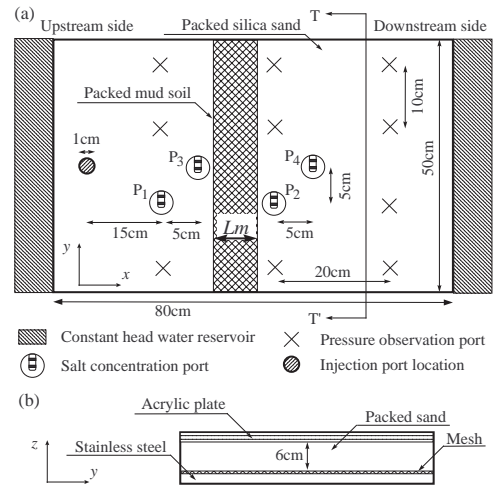


図1: 実験装置概略図: (a) 平面図, (b) 断面図

表1: 試料の物性値

試料	密度 (g/cm^3)	飽和透水係数 (cm/s)	均等係数 (-)
A	2.66	2.01×10^{-4}	6.25
B	2.66	1.40×10^{-4}	4.27
C	2.68	7.51×10^{-1}	1.80

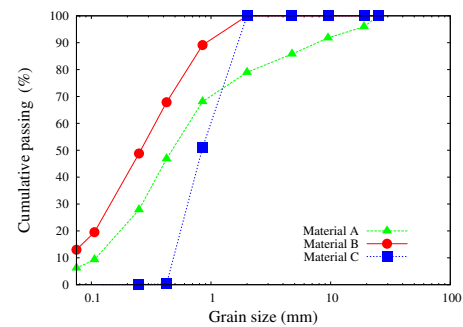


図2: 実験に用いる試料の粒度分布

$$m_j = \int_0^{\infty} t^j c_m(x, y, z, t) dt \quad (1)$$

$$\mu_j = \frac{m_j}{m_0} \quad (2)$$

$$\mu'_j = \frac{\int_0^{\infty} (t^j - \mu_1) c_m(x, y, z, t) dt}{m_0} \quad (3)$$

m_j : j 次絶対時間モーメント,
 μ_j : j 次標準化絶対時間モーメント
 μ'_j : j 次標準化中心時間モーメント
 c_m : 濃度, x, y, z : 座標, t : 時間

* 神戸大学大学院農学研究科: Graduate School of Agricultural Science, Kobe University.

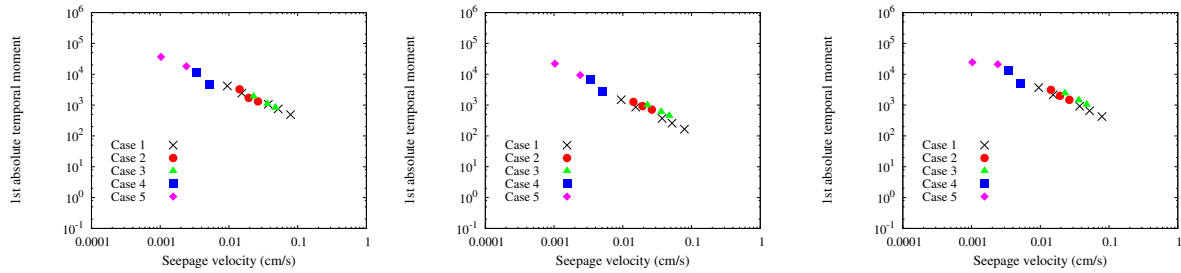


図 3: 各観測点における 1 次標準化絶対時間モーメント結果 : (左) 観測点 P_2 , (中) 観測点 P_3 , (右) 観測点 P_4

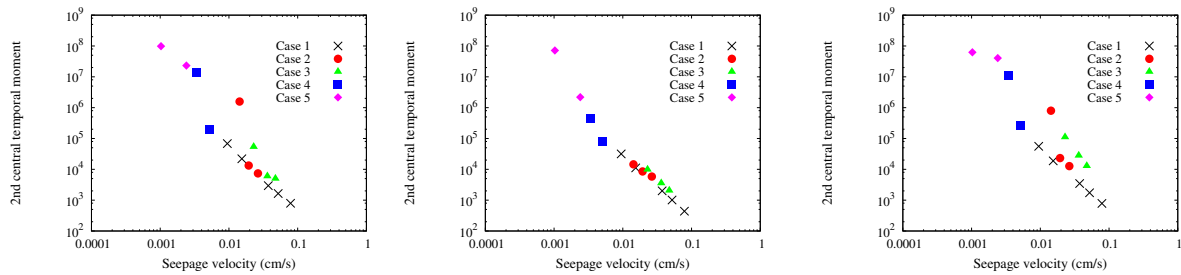


図 4: 各観測点における 2 次標準化中心時間モーメント結果 : (左) 観測点 P_2 , (中) 観測点 P_3 , (右) 観測点 P_4

4. 時間モーメント解析結果

図 3 に全実験ケースに対して、各観測点における 1 次標準化絶対時間モーメントの解析結果を計測した流量に基づいて算定した実流速の関数として示す。1 次時間モーメント量は流速の増加とともに減少し、いずれの観測点においても変化割合はほぼ同じである。これは層地盤の構成状況に関わらず、各層の浸透流速が同一であることを示しており、領域内の間隙率を調整した結果である。図 3 と同様に、各観測点における 2 次標準化中心時間モーメントの解析結果を実流速の関数として図 4 に示す。最上流部に位置する観測点 P_3 の 2 次モーメント量は下流側の影響を受けないため、1 次モーメント量と同様に、地盤の不均質状態に依存することなく線形関係にあることが見て取れる。一方、底泥土層を通過することにより、均質地盤に比して層地盤の観測点 P_2 と P_4 の 2 次モーメント量は増加する。これは粒度分布の異なる領域の移行により物質の分散挙動に変化が生じることが要因であり、底泥土層の存在が分散長の増加につながることを示している。

図 5 に示すように底泥土層下部の観測点ではテーリングが生じている。底泥土層の移行前後における 2 次モーメント量の変化を検討するため、観測点 P_1 と P_2 ならびに P_3 と P_4 の変動比を図 6 と図 7 に示す。いずれの図においても 2 次モーメント量の変動比は均質地盤よりも層地盤の方が大きく得られており、層地盤により分散特性が大きく変化していることを示している。また、流速と変動比の相関性は小さく、均質地盤に比して数倍から数十倍の範囲で変動比はばらつき、礫成分の含有に対する差異は見られない結果となっている。物質の移行過程における層地盤の存在により、縦・横分散ともに変動することが推察されるものの、横分散で物質が到達する観測点 P_1, P_2 と汚染源と同軸の観測点 P_3, P_4 の変動比は同程度にばらつき結果となっている。そのため、2 次モーメント量の増加に対する縦・横分散の寄与率の検討が今後の課題である。

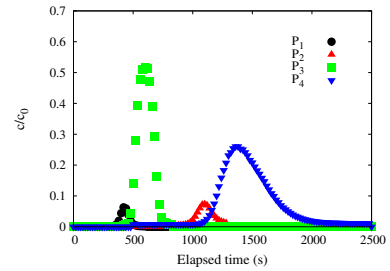


図 5: 実験ケース 3 の破過曲線の例

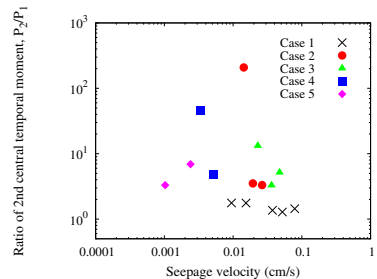


図 6: 2 次モーメントの変動比 P_2/P_1

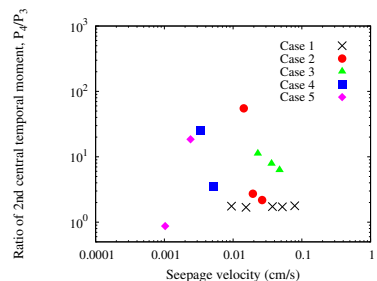


図 7: 2 次モーメントの変動比 P_4/P_3

参考文献: 1) Pachepsky, Y., D. Benson and W. Rawls: Simulating scale-dependent solute transport in soils with the fractional advective-dispersive equation, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64, pp.1234–1243, 2000. 2) Valocchi, J.A.: Validity of the local equilibrium assumption for modeling sorbing solute transport through homogeneous soils, *Water Resour. Res.*, 21(6), pp.808–820, 1985.