

時間モーメント情報による分散特性評価と透水係数推定への応用
**Application of Temporal Moments to
 Dispersion Characterization and Hydraulic Conductivity Identification**

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

1. はじめに

地下水汚染対策や環境リスク管理では限られた情報下で迅速かつ効率的な地盤特性の把握が求められる．特に，物質挙動予測の信頼性向上を図る上で不均質性，すなわち透水係数の空間分布推定は重要な因子となる．そこで本研究では，物質移動実験を実施し，時間モーメント解析により地盤性状による分散特性を検討するとともに，透水係数推定への応用を試みる．

2. 物質移動実験

物質移動実験では図 1 に示す平面二次元実験装置内に 5 種類の試料を組み合わせ 3 層地盤を形成する．各試料の土質特性を表 1 に，粒度分布を図 2 に示す．試料 A から C はケイ砂，D と E はフィールドで採取した試料であり，最大粒径を 19mm と 2mm に調節している．試料 A は基準ケースとなる均質地盤 (Case 1) の形成ならびに 3 層地盤の 1 層目と 3 層目に用いる．2 層目は観測点間の中心地点に層が位置するように層厚を 2.5cm, 5cm, 10cm に変えて形成し，試料 B (Case 2-1, 2-2, 2-3), C (Case 3-1, 3-2, 3-3), D (Case 4-1, 4-2, 4-3), E (Case 5-1, 5-2, 5-3) を充填する．密度管理の下，各層の間隙率は 0.42 に調整し，浸透地盤作成後，濃度 $5.0 \times 10^{-3} \text{g/cm}^3$ の NaCl 水溶液を注入して 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えて実験を実施する．

3. 時間モーメントによる分散特性評価

対象とする浸透場の分散特性について検討するため，観測点の破過曲線情報を基に式 (1) により時間モーメントを導出し，式 (2) により縦分散長推定へ応用する．

$$\mu'_j = \frac{\int_0^\infty (t - \mu_1)^j c_m(\vec{x}, t) dt}{\int_0^\infty c_m(\vec{x}, t) dt} \quad (1), \quad \alpha_L(\xi_p) = \frac{\xi_p}{2} \frac{\mu'_2(\xi_p)}{(\mu_1(\xi_p))^2} \quad (2)$$

ここに， μ'_j は j 次標準化中心時間モーメント， μ_1 は 1 次標準化絶対時間モーメント， c_m は濃度， \vec{x} は座標， t は時間， α_L は縦分散長， ξ_p は観測点の x 座標である．

2 層目の層厚が 5cm の浸透場を対象に，観測点 P_4 の縦分散長の推定結果を 2 層目の平均粒径の関数として図 3 に示す．また，縦分散長は平均粒径に等しいとする Bear の経験式¹⁾と本実験と類似した Xu と Eckstein の結果²⁾を示す．2 層目に粒度の揃った試料を充填した場合 (Case 1, 2, 3) の縦分散長はばらつきが少ないものの，Case 2 と 3 は均質地盤を対象としている Bear 式よりも過大評価されている．これより 2 層目の試料により縦分散長は増加することがいえる．一方，均等係数の大きい試料が層を成す場合 (Case 4, 5)，縦分散長は均質地盤の Case 1 に比して 2 倍から 10 倍に変化する．この点

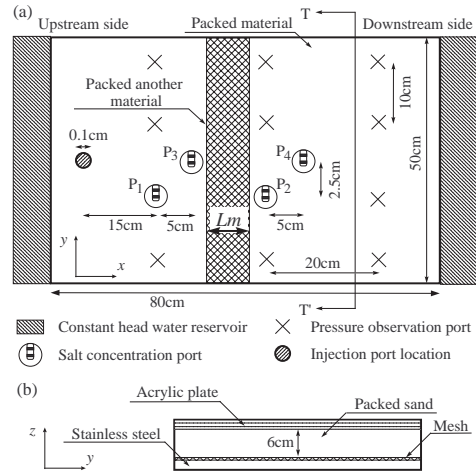


図 1: 実験装置概略図: (a) 平面図, (b) 断面図
 表 1: 試料の物性値

試料	透水係数 (cm/s)	平均粒径 (cm)	均等係数 (-)
A	7.51×10^{-1}	0.085	1.80
B	5.71×10^{-2}	0.031	1.30
C	1.36×10^{-2}	0.017	1.76
D	2.01×10^{-4}	0.045	6.25
E	1.40×10^{-4}	0.025	4.27

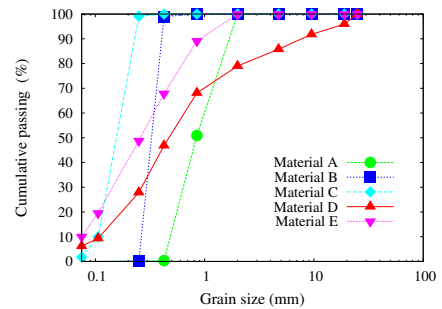


図 2: 実験に用いる試料の粒度分布

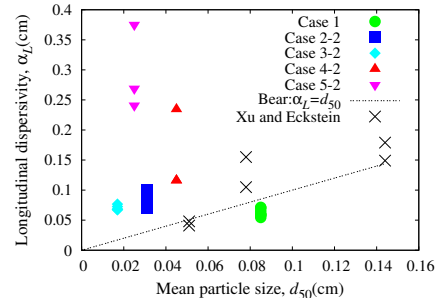


図 3: 平均粒径と縦分散長の関係

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

は物質移行に及ぼす粒度分布の影響、ならびに、試料 B と E のようにほぼ同じ平均粒径であっても縦分散長は一致しない事実を示唆している。したがって、平均粒径に加えて粒度分布に呼応した地盤の分散特性が時間モーメントとして表現されることから、観測点の濃度変動情報を透水係数推定へ応用することを試みる。

4. 時間モーメント情報の透水係数推定への応用

観測点の濃度変動を検討するため、2 次および 3 次時間モーメントを観測点ごとに算定し、上流側と下流側のモーメントの比を変動比として導出する。図 4 と図 5 に層厚 5cm のケースを代表として、観測点 P₃ と P₄ の変動比と観測点 P₁ と P₂ の変動比をレイノルズ数の関数として併記する。すべての試料に対して、観測点位置に応じた変動比の差異は顕著には表れていない一方で、Case 1 から 3 はレイノルズ数に関わらずほぼ一定の変動比となっており、本実験場の層厚条件下では均等係数が小さい場合、層前後のモーメントはさほど変化しないと言える。対照的に、均等係数の大きい試料の場合は層内の物質移行により 2 次モーメントの増加傾向が見られ、物質分散経路の拡大が推察される。また、図 5 に示すように 3 次モーメント変動比は均等係数の大きい試料 D と E でばらつきが大きくなり、試料 A から C に比して約 3 オーダーの差異が生じている。これは粒度分布ならびに不均質具合に応じた破過曲線のテーリング形状の変化を示唆しており、モーメント情報を透水係数推定へ応用できる可能性がある。そこで試料の分布特性を示す 10% 粒径を用いて、2 層目の透水係数を推定する。

図 6 と図 7 に 2 次と 3 次モーメントの変動比をレイノルズ数および層厚に関わらず平均した結果を 2 層目内の 10% 粒径の関数として示す。また試料 A から C は 10% 粒径への依存性は低く、これらの試料の平均値と試料 D, E の結果を対象に近似曲線を描く。ここで、レイノルズ数と分散現象は非線形関係にあるため、非線形近似式を採用している。2 次モーメントの変動比は観測点に関わらず 0.9 以上の決定係数が得られるのに対して、3 次モーメントの変動比はテーリングの影響により試料に応じてばらつきが大きく、定量化は困難であることから、透水係数推定には 2 次モーメントに対する回帰式の利用を検討する。

時間モーメント変動比を用いることで図 6 に示す回帰式により 10% 粒径が導かれるため、Hazen 式と Slichter 式³⁾を用いて透水係数を推定する。図 8 に 2 層目の透水係数の推定値を試料固有の透水係数で除した値を示す。層厚の影響を考察するため、横軸には観測点間の距離 20cm に対する各試料の層厚を記す。均等係数の大きい試料 D と E の推定値は過大推定される傾向にあるが、試料 B と C は精度の良い結果が得られている。また、Slichter 式の方が本実験データに適合しており、均一粒径を対象とした Hazen 式よりも均等係数の大きい試料に対する Slichter 式の有効性が伺える。また、本実験では観測点間の情報から 2 層目の透水係数を推定しているため、図 8 が示すように、層厚の増加に伴い推定精度は向上する。以上より、観測点の濃度変動情報は透水係数推定に利用できる可能性を十分に有していると言える。

5. まとめ

本研究では時間モーメント情報を層地盤の分散特性評価と透水係数推定に応用し、観測情報の活用に対する 1 つの可能性を検討できた。しかし、観測点位置・配置に関する議論や高精度推定に向けた検討は不可欠であり、実験試料やデータ数の増加とともに、今後の課題とする。

参考文献: 1) Bear, J.: *Dynamics of fluids in porous media*, Dover Publications, 764p., 1972. 2) Xu, M. and Eckstein, Y.: Statistical analysis of the relationship between dispersivity and other physical properties of porous media, *Hydrogeo. J.*, 53, pp.4-20, 1997. 3) Fraser, H.J.: Experimental study of the porosity and permeability clastic sediments, *J. Geol.*, 34(8), pp.910-1010, 1935.

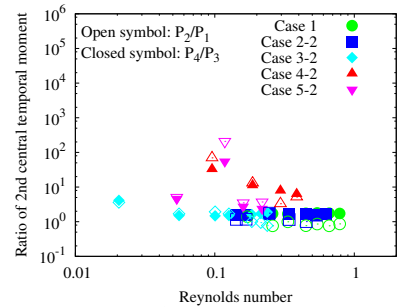


図 4: 2 次モーメントの変動比

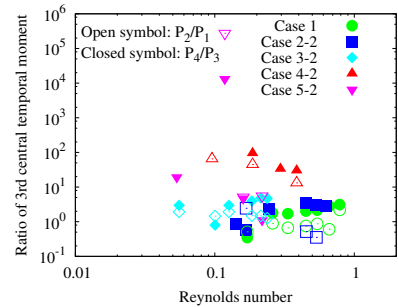


図 5: 3 次モーメントの変動比

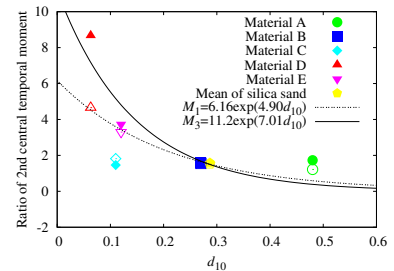


図 6: 2 次変動比と 10% 粒径の関係

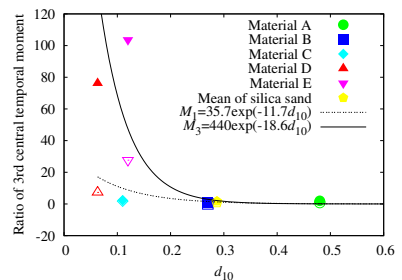


図 7: 3 次変動比と 10% 粒径の関係

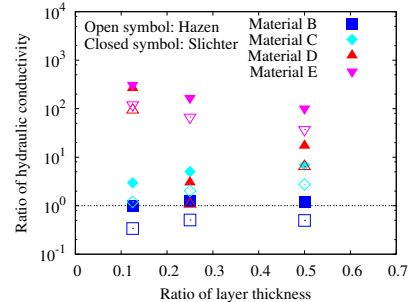


図 8: 実測値と推定値の比