

分散性の異なる不均質多孔質体内における 縦分散現象に関する実験的検討

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF LONGITUDINAL DISPERSION PHENOMENA IN HETEROGENEOUS POROUS MEDIA

井上一哉¹・松永尚子²・正木一平³・田中勉⁴

Kazuya INOUE, Naoko MATSUNAGA, Ippei MASAKI 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 学生会員 学士(農学) 神戸大学大学院生 大学院農学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

³ 正会員 修士(農学) (株)日水コン 環境事業部 (〒163-1122 新宿区西新宿6-22-1)

⁴ 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)

Dispersivity is a medium-dependent hydrodynamic parameter that characterizes solute dispersion in a porous medium. Under saturated unidirectional flow condition, laboratory tracer experiments with a pulse source were conducted in homogeneous flow field as well as in less heterogeneous porous formation, which was comprised by a few combinations with three types of soil particles. Mean grain sizes and flow velocities in a region were varied in order to investigate a linear relation between grain size and longitudinal dispersivity under the approximately one order range of Reynolds and Peclet numbers, which were non-linearly expressed as a function of longitudinal dispersion coefficient. Laboratory study was extended by a comprehensive literature search to compare the new results with earlier work, demonstrating good agreement between the experimental and published empirical relations in heterogeneous porous media of concern.

Key Words: *solute transport experiment, heterogeneous porous media, longitudinal dispersion, mean particle size, Reynolds number, Peclet number*

1. はじめに

多孔質体内の物質輸送において縦分散および横分散は汚染物質の空間分布変動に関与する本質的な現象である。特に、多孔質体の間隙構造に依存する因子である分散長は分散係数とともに水力学上、興味の対象となる要素であり、水文地質学を始め、土壌物理学、化学工学の分野において古くから実験的・理論的研究が進められている^{1),2)}。保存性物質に関するラボレベルでの移流分散実験はミクロ的分散を評価する上で極めて効果的な手段であり、保存性物質を用いて導出した分散長をフィールドにおける反応性物質の移行挙動評価に応用する事例もあり³⁾、信頼性のある分散長推定は汚染物質の挙動説明や将来予測へ活用する上で本質的な事項と言える。

比較的均等な土粒子を対象として、カラム実験を通じた分散長や分散係数の同定は数多くの研究例があり^{1)~6)}、対象とする地盤材料は多岐に渡る。Bear⁷⁾は多孔質体の場合、分散長は土粒子の平均粒径に強く依存して変動することを指摘し、均質地盤を中心に経験式を表している。一方で、透水係数分布に応じて分散性が異なる不均質地

盤に関する平均粒径と分散長の評価や流体力学的に重要な物理量であるレイノルズ数やペクレ数と関連させた分散挙動の研究はデータ蓄積過程にあり^{8),9)}、無次元数の有効活用を図る上で大変有意義な課題である。さらには不均質地盤を実験対象とする場合、粒度分布の広い試料を用いる⁵⁾、あるいは均等係数の小さい試料を複数充填する¹⁰⁾ことで浸透場を形成するものの、透水係数分布や粒径に応じた移流分散現象を呈するため、不均質場の分散評価は容易ではなく、特に後者の研究例は少ない。

そこで本研究では、不均質地盤における分散評価の礎を構築することを目的として、粒径の異なる試料を種々に充填することにより、約1オーダーの範囲内で透水係数分布が変化する不均質性地盤を対象とした物質移動実験を実施する。また、計測破過曲線に基づく縦分散長推定を通じて平均粒径と縦分散長の関係について評価し、レイノルズ数やペクレ数と縦分散係数の関係式を導出するとともに、既往の研究と比較することで縦分散現象に主眼を置いた実験的検討を実施する。本研究は不均質性の高い地盤に対する分散評価の基盤形成段階に位置づけられ、対象とする浸透場を不均質性の低い地盤と定義する。

2. 物質移動実験

(1) トレーサおよび実験装置

実験には初期濃度を $5.0 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ に調整したNaCl水溶液を用いて浸透場内に設置された観測点において時系列濃度変動を計測する。また、物質移行過程を可視化することを目的として、色素であるBrilliant Blue FCFを $4.0 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^3$ の濃度に調整してNaCl水溶液と混合することで実験に供している。

図-1に示す長さ80cm、幅50cm、深さ6cmの実験装置に試料砂を充填することで浸透場を形成し、実験装置の上流側と下流側に据え付けた定水頭装置を用いて一方向流れを生成するとともに、実流速を制御している。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するとともに、色素混合水溶液の移動状態を視覚的に捉えることが可能である。下流側の定水頭装置は排水装置を兼ねており、定常流量の計測に供される。また、実験装置基盤部には12個の圧電メータ孔が取り付けられており、ビニルチューブと組み合わせることで圧電水頭値を計測している。

色素混合水溶液を注入するため、浸透場の最上流域に直径0.1cmのトレーサ孔を設けており、注入孔を原点として、 $(x, y) = (15, 0), (35, 0), (55, 0), (20, 2.5), (40, 2.5), (60, 2.5)$ の6地点に電圧センサを挿入し、データログと連結することでNaCl濃度の時系列測定が可能になっている。センサには予めキャリブレーションを施しており、センサごとに電圧とNaCl濃度の関係を得ている。

(2) 浸透場形成と実験方法

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充填している。図-1に示すようにトレーサ注入孔から下流側へ45cmの地点までを領域1とし、20cmの幅で領域2を形成して領域2から最下流部までを領域3とする。多孔質体として均等係数が小さく平均粒径の異なる3種類のケイ砂を使用し、表-1に示すように平均粒径は約3倍、透水係数は約1オーダーの差異がある。均質地盤の作成には浸透場全体で同一の試料砂を充填する一方で、流下方向に分散性の異なる不均質浸透場を形成する場合は所定領域で充填試料を変えている。また、試料砂に関わらず間隙率が0.45になるように密度管理しながら、5cm層ごとに上流側から締め固め、各領域に2本のセンサを埋設している。

試料を充填した後、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て地盤内に飽和流れを形成している。圧電水頭と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、注射針とシリンジポンプを用いて 22 cm^3 のトレーサを奥行き方向に数箇所に分割して注入するとともに、浸透場ごとにトレーサの初期形状にばら

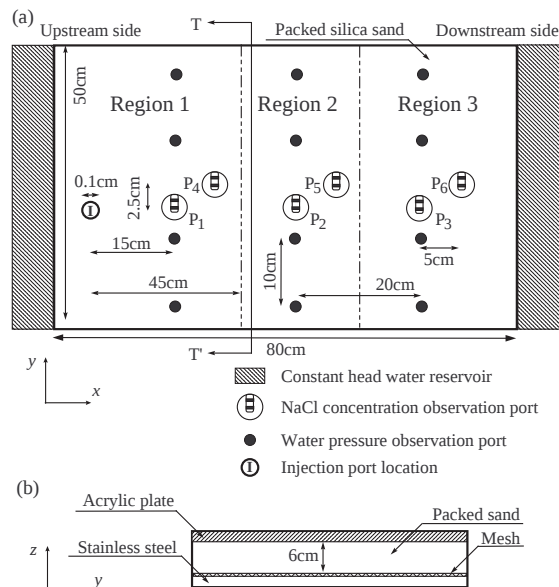


図-1 物質移動実験装置：(a)平面図，(b)断面図

表-1 試料砂の物性値

試料	土粒子密度 (g/cm^3)	平均粒径 (cm)	均等係数 (-)	透水係数 (cm/s)
A	2.68	0.085	1.80	0.751
B	2.68	0.050	1.25	0.268
C	2.68	0.030	1.31	0.0571

つきが生じないように注入に要する時間を20秒間に統一することで、直方体に近いトレーサの初期分布形状を生成している。

本実験では各試料砂を単独で充填した均質地盤ならびに試料砂の充填領域を種々に変えることで透水係数が約1オーダーの範囲で異なる不均質度の低い地盤を作成し、各浸透場に対して動水勾配を種々に変化させて実験している。本実験ではトレーサ注入直後あるいは一定時間経過後に浸透場を解体することで深度方向に均一のトレーサ分布であることを定期的に確認しており、多少ばらつくものの、鉛直方向に一定濃度であると考えられる。また、色素混合水溶液の比重は1.0044であることから密度流や重力の影響は無視できる程度に小さいと見なす。

3. 分散長推定と信頼性の検討

(1) 時間モーメント解析による縦分散長推定

本解析では計測されたNaCl濃度の破過曲線に対して、時間モーメント量を算定することにより縦分散長を推定する。ある観測点において計測された破過曲線に対する j 次標準化時間モーメント μ_j は次式により表される^{11), 12)}。

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

ここに、 c_m は濃度、 x, y, z は座標、 t は時間である。さらには1次標準化絶対時間モーメント μ_1 を用いて、 j 次標

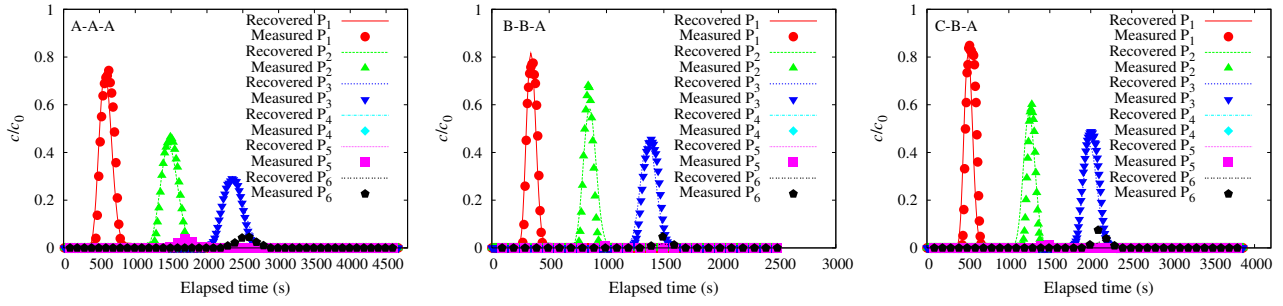


図-2 種々の浸透場における破過曲線と再現結果：(左)試料A単独，(中)試料B-B-A，(右)試料C-B-Aを領域1から3に充填

準化中心時間モーメント μ'_j は次式で定義される。

$$\mu'_j = \frac{\int_0^\infty (t - \mu_1)^j c_m(x, y, z, t) dt}{\int_0^\infty c_m(x, y, z, t) dt} \quad (2)$$

これらの時間モーメント量を各観測点にて計測された破過曲線に基づいて算定し，各観測点の縦分散長を次式で推定する^{11), 13)}。

$$\alpha_L(\zeta_P) = \frac{\zeta_P}{2} \frac{\mu'_2(\zeta_P)}{(\mu'_1(\zeta_P))^2} \quad (3)$$

ここに， α_L は縦分散長， ζ_P は観測点の x 座標である。

(2) 移流分散方程式と逆解析

本節では縦分散長を既知とした逆解析による物質移動パラメータの同定を通じて，推定縦分散長の妥当性を検討する。そのために多孔質体内の物質移動を移流分散方程式により表現する。

$$R \frac{\partial c}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - v \frac{\partial c}{\partial x} + c_v \quad (4)$$

$$D_x = \alpha_L v + D_d, \quad D_y = \alpha_T v + D_d, \quad D_z = \alpha_T v + D_d \quad (5)$$

ここに， c は濃度， x, y, z は座標， t は時間， α_L は縦分散長， α_T は横分散長， $D_{x,y,z}$ は分散係数， D_d は有効拡散係数， R は遅延係数， v は実流速であり，本実験地盤では間隙率と有効間隙率は等しいと仮定して実流速を求める。また， c_v は汚染源濃度に対する関数である¹⁴⁾。

$$c_v = \begin{cases} c_0 f(t), & 0 < x < x_0, -y_0 < y < y_0, z_1 < z < z_2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

ここに， c_0 は汚染源初期濃度， $f(t)$ は時間の関数である。また， x_0 は x 軸方向汚染源長さ， $2y_0$ は y 軸方向汚染源長さ， $z_2 - z_1$ は z 軸方向汚染源長さである。逆解析の過程に必要な順解析には以下に示す解析解¹⁴⁾を適用する。

$$c = \int_0^t \frac{c_v}{4B} \left(\operatorname{erfc} \left(\frac{x - v'\xi - x_0}{2\sqrt{D'_x\xi}} \right) - \operatorname{erfc} \left(\frac{x - v'\xi}{2\sqrt{D'_x\xi}} \right) \right) \left(\operatorname{erfc} \left(\frac{y - y_0}{2\sqrt{D'_y\xi}} \right) - \operatorname{erfc} \left(\frac{y + y_0}{2\sqrt{D'_y\xi}} \right) \right) \left(z_2 - z_1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{G} \right. \\ \left. (\sin(Gz_2) - \sin(Gz_1)) \cos(Gz) \exp(-D'_z G^2 \xi) \right) d\xi \quad (7)$$

表-2 決定変数の定義域

決定変数	下限値	上限値	間隔	ビット数
縦横分散長比： α_T/α_L	0.025	0.8125	0.0125	6
遅延係数： R	0.90	1.21	0.01	5
汚染源長さ： x_0	1.14	4.95	0.03	7

$$v' = \frac{v}{R}, \quad D'_x = \frac{D_x}{R}, \quad D'_y = \frac{D_y}{R}, \quad D'_z = \frac{D_z}{R}, \quad G = \frac{n\pi}{B} \quad (8)$$

ここに， B は帯水層厚さである。実験状況を反映して解析に用いる既知パラメータは， $z_2 - z_1 = 6\text{cm}$ ， $B = 6\text{cm}$ とし，有効拡散係数は $9.5 \times 10^{-6} \text{cm}^2/\text{s}$ に設定¹⁵⁾する。この解析解は直方体形状を有する汚染源から所定の時間継続した物質漏洩現象を表現可能であり，定常流を有する実験場を再現するのに十分適したモデルである。

次に，時間モーメント解析により推定された観測点 P_1 から観測点 P_3 の縦分散長の平均値を既知量として，遺伝的アルゴリズム(GA)により横分散長を含む3つのパラメータを逆推定する。GAパラメータは個体数を500，最終世代交代数を1000，トーナメントサイズを3，交叉確率を0.8，突然変異確率を0.075に設定する。表-2に解析に用いる決定変数とそれらの定義域を記す。本解析ではトレーサ注入時の面的分布が実験ごとに多少ばらつくため，汚染源長さを決定変数に組み込み，結果として実測値とほぼ同じ値が得られており，遅延係数は1.00から1.02の範囲にある。また， y 軸方向の汚染源長さは実験状況より次式にて間接的に推定可能である¹³⁾。

$$y_0 = \frac{V_s/n(z_2 - z_1)}{2x_0} \quad (9)$$

ここに， V_s はトレーサ注入量， n は間隙率である。

逆解析結果の例として，図-2に試料の充填状態が異なる3種類の浸透場に対する破過曲線の再現結果を実測値とともに示す。いずれの浸透場に対しても再現性は高いものの，3種類の試料砂で構成された浸透場に関しては他に比して実測と解析間に若干の乖離が生じている。これは3つの観測点に対する平均縦分散長を用いている点が必要であり，浸透場の分散性が異なる場合には全観測点の濃度変動を最適に再現できる解が導かれるため，乖離を生じる結果となる。しかしながら，良好な再現結果

であることから、推定縦分散長ならびに逆解析により同定された値の信頼性は十分であると判断する。

(3) 時間モーメント解析による縦分散長に関する仮定

式(3)に基づく縦分散長推定は本実験のように一次元流れの条件下でパルス汚染源の状況にあり、汚染源から流れ方向に観測点が位置する場合に適用可能な方法^{11)–13)}であり、逆解析に用いたように本実験では観測点P₁からP₃にて測定された破過曲線に対してのみ有効である。

また、均質地盤に対して有効な手段であり、不均質性を有する場合、観測点至るまでの平均的な分散特性を反映すると考えられる。本研究では、充填状態の異なる浸透場に対する平均的な縦分散長の評価ならびに縦分散長と種々の物理量の関係を検討することが目的であり、分散性が大きく異なる試料を用いていない点も踏まえて、式(3)で得られる縦分散長を推定値とする。なお、逆解析により求まる横分散長は本研究の主たる対象ではなく、以降の議論では縦分散長に焦点を絞って検討を進める。

4. 縦分散に関する考察

(1) 縦分散長と平均粒径の関係

前述のように、縦分散長はトレーサ注入孔から流れ方向に沿った観測点P₁からP₃にて推定される。このとき、試料砂が浸透場を構成する状態に応じて観測点P₁からP₃にて得られる縦分散長は変動するため、3つの観測点の平均値を領域全体の縦分散長と見なした結果を図-3に示す。図の凡例において、例えばC-B-Aという表記は領域1から3に試料CとB、Aを充填していることを示す。

浸透場を同一の試料砂で形成する均質地盤の場合、実流速に関わらず充填する試料砂固有の値をとることが図から見て取れる。また、複数の試料を充填した不均質場においても流速への依存性は小さく、観測点P₁からP₃の縦分散長の平均値を浸透場全体の代表値として採用した結果、縦分散長が最大となる試料Aと最小となる試料Cの範囲内に推定値が分布している。一方で、3つの試料の充填位置に応じて取り得る縦分散長は異なり、試料Aを上流域に配置するほど値は大きくなる傾向にある。したがって、物質が流下する際には、領域構成に応じた分散特性を受けることで領域全体としての縦分散長の値に変化が生じていると推察される。

領域全体の代表値と特定領域に対する縦分散長の値を比較するため、最下流にある領域3の観測データのみを用いて縦分散長を推定した結果を領域2単独の観測データに基づく推定結果とともに図-4に示す。前述の縦分散長に及ぼす流速の影響は極めて小さい結果を受けて、均質地盤に対する縦分散長の平均値を試料Aは直線、試料Bは点線、試料Cは一点鎖線によりそれぞれ示している。

領域3に試料Aが存在する場合は全観測点から導出される値に近い結果が得られる一方で、その他の浸透場に

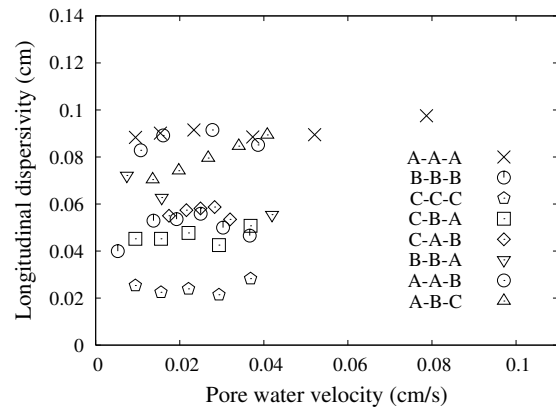


図-3 全観測点に基づく縦分散長推定結果

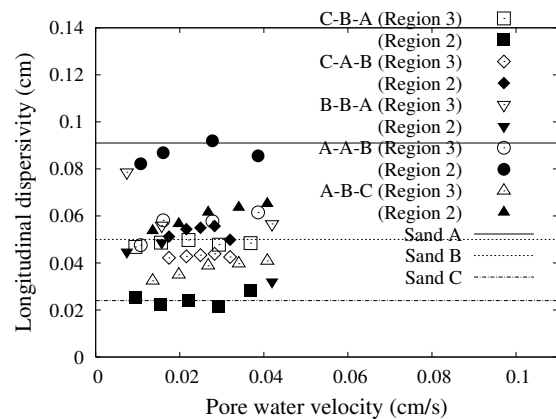


図-4 領域3または領域2の観測点に基づく縦分散長推定結果

対して領域3単独の縦分散長と全領域の縦分散長の比を算定するとC-A-Bは0.89、A-A-Bは0.65、A-B-Cは0.47となる。また、領域2にて評価される縦分散長は領域3の分散特性の影響を受けないため、概ね領域1と2の縦分散長に対する平均値となり、全観測点に基づく縦分散長結果と比較すると0.66から1.1倍の範囲で変化している。観測点上流側の領域構成状態と観測点の位置する試料に応じて特定の領域から得られる推定値は領域全体の縦分散長と異なるものの、浸透場を構成する試料の均等係数ならびに場の不均質性は小さいことから、対象浸透場の分散長は試料Aと試料C固有の縦分散長の範囲内に収まる結果となる。この点は領域全体の平均値として縦分散長を捉えた場合、不均質性の低い浸透場の縦分散長は領域を構成する粒径と関係していると言える。よって、縦分散長の流速依存性は小さい点を踏まえ、本実験場のように均等係数の小さい試料により浸透領域が区分される場合には、浸透場を構成する全試料砂の平均粒径と領域全体の縦分散長を関連付けることができると考えられる。

Bear⁷⁾あるいはKlotzら⁵⁾の研究例を始めとして、縦分散長は土粒子の平均粒径に比例することが指摘されており、次式にて表現される。

$$\alpha_L = ad_{50} \quad (10)$$

ここに、 a は比例定数、 d_{50} は土粒子の平均粒径である。

図-5に平均粒径と縦分散長の関係について評価式ならびに本研究の実験状況が類似したXuとEcksteinの結果⁸⁾と比較として示す。評価式に対する決定係数は0.740であり、本実験場の有する不均質性に対しては平均粒径の関数として縦分散長を評価できると言える。Bearは a の値を本実験結果と酷似した1.0と推定し、ArisとAmundsonは a を1.75と算定しており²⁾、この点からも既往の研究例と比較して良好な結果が得られていると考えられる。

(2) レイノルズ数と縦分散係数の関係

縦分散係数の評価に際して、分散係数は間隙構造、つまりは分散長と実流速の関数として、次式の表現が一般的に用いられている⁷⁾。

$$D_L = \alpha_L v \quad (11)$$

ここに、 D_L は縦分散係数であり、 v は実流速である。また、式(10)に示すように、縦分散係数は平均粒径に比例することから、式(10)を式(11)へ代入し、動粘性係数で割ると次式となる。

$$\frac{D_L}{\nu} = a R_e \quad (12)$$

ここに、 a は比例定数であり、 ν は動粘性係数である。また、レイノルズ数は流れの状態を表す無次元数であり、次式により定義される⁷⁾。

$$R_e = \frac{v d_{50}}{\nu} \quad (13)$$

HarlemanとRumer⁴⁾は均一な粒径を用いて実験した結果、次式によりレイノルズ数と縦分散係数の関係を表現できることを示している。

$$\frac{D_L}{\nu} = b R_e^f \quad (14)$$

ここに、 b と f は定数である。本研究ではHarlemanとRumerの研究成果⁴⁾を踏まえ、式(14)により実験結果を整理し、図-6にレイノルズ数と縦分散係数の関係の評価式とともに示す。本実験では実験ケースにより浸透水の温度にばらつきがあるため、計測される流量を15℃に温度補正してすべての結果を整理していることから、動粘性係数の値は0.0114cm²/sに設定している。

本実験より得られる評価式の定数値 b は1.25、 f は1.10であり、決定係数は0.940である。また、均質地盤の結果のみを対象とすると、 b は1.07、 f は1.12となり、大きな差を生じていない。HarlemanとRumerの経験式⁴⁾では b は0.66、 f は1.2であり、図-6に示すように本実験結果に比して小さい縦分散係数となることがわかる。これはHarlemanとRumerの実験では試料砂Aに近い粒径を使用しているものの、本実験よりも均等係数は小さいため、その影響が現れていると考えられる。また本実験場のように、複数の試料を組み合わせる不均質浸透場を構成することで均質場よりもわずかに大きい縦分散係数となり、結果として評価式の差異につながると推察される。

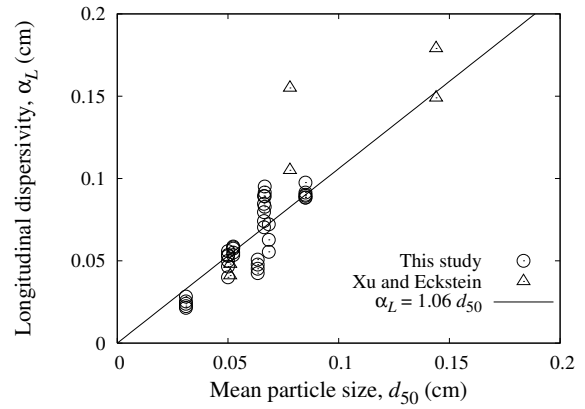


図-5 平均粒径と縦分散長の関係

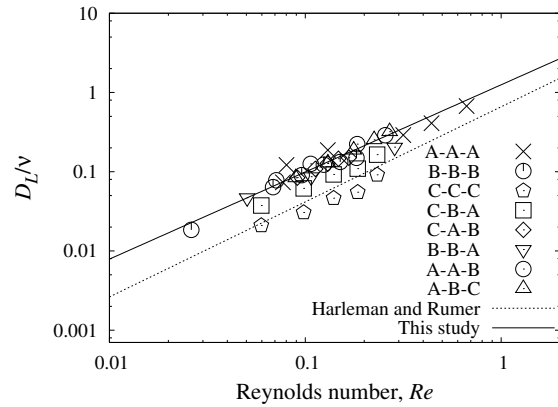


図-6 レイノルズ数と縦分散係数の関係

しかしながら、実験状態の似通った両者の回帰曲線に顕著な差は生じていないことから、本実験場のように不均質度の低い場に対するレイノルズ数と縦分散係数の関係は式(14)により表現可能であると言える。

(3) ペクレ数と縦分散係数の関係

ペクレ数は移流分散現象における移流と分散あるいは拡散の卓越性を評価する際に頻繁に使用される無次元数であり、次式により定義される⁷⁾。

$$P_e = \frac{v d_{50}}{D^*} \quad (15)$$

ここに、 D^* は分子拡散係数であり、NaClを使用する本実験では 2.11×10^{-5} cm²/sに設定する¹⁵⁾。非線形で定義したレイノルズ数と縦分散係数の関係式と同様に、ペクレ数と縦分散係数の関係を次式で定義する⁹⁾。

$$D_L = D_d + D^* m (P_e)^k \quad (16)$$

ここに、 m と k は定数、 D_d は有効拡散係数であり、間隙率 n を用いて次式により定義する⁶⁾。

$$D_d = D^* n \quad (17)$$

図-7にペクレ数と縦分散係数の関係を回帰曲線とともに示す。本実験の非線形式では、 m は0.521、 k は1.10であり、決定係数は0.938である。また比較対象として、 m を

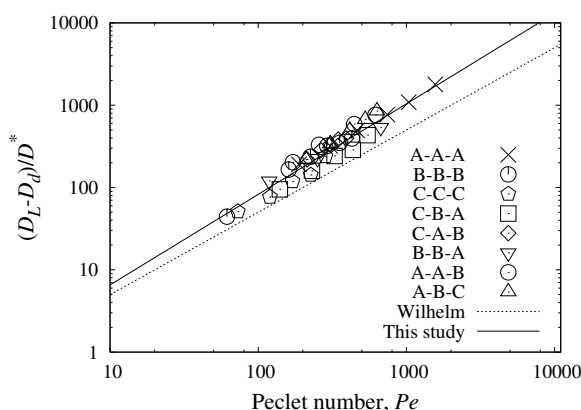


図-7 ペクレ数と縦分散係数の関係

0.5, k を1としたWilhelmの線形式¹⁶⁾を示している。本実験結果に対して k を1とした線形式で表すと m は1.06となり、線形・非線形のいずれの式でも表現可能であると言える。しかしながら、いくつかの研究例^{9), 17)}が指摘するように、より広範囲なペクレ数領域を包括するには非線形表現の方が適用性の高い評価式であると考えられる。

以上の結果より、均質地盤のみならず複数の試料砂で構成される不均質地盤に対しても不均質具合が低い浸透場であればペクレ数と縦分散係数の関係を式(16)に基づいて表現できると言える。

5. 結論

本研究では不均質性の高い地盤に対する分散評価の基礎を築くため、粒度の揃った3種類の試料砂を用いて均質地盤ならびに試料砂の充填領域を種々に変えた不均質性の低い地盤を対象として移流分散実験を実施した。その結果、浸透場を形成する試料の均等係数が小さく平均粒径の差が3倍程度であるならば、係数は異なるものの、均質地盤を対象とした既往の研究例と同様に平均粒径と縦分散長は線形的に表現できることがわかった。また、縦分散係数とレイノルズ数ならびにペクレ数の関係は非線形式で表され、浸透場の構成状態に関わらず両者の関係を既往の研究例と遜色なく表現できた。

レイノルズ数とペクレ数ともに本実験において対象とした範囲では、また対象試料砂の平均粒径の範囲では、縦分散長や実流速と密接な関係にあることから、不均質浸透場における移流分散現象の評価に対する無次元数の更なる活用が期待される。そのためには無次元数の取り得る範囲をさらに拡大するとともに、より不均質性の高い地盤に対する実験的検討が望まれる。この点を今後の課題とする。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、イスラエル工科大学のJacob Bear先生に貴重なご意見をいただいた。記して深謝の意を表する。

参考文献

- 1) De Josselin de Jong, G. : Longitudinal and transverse diffusion in granular deposits, *Transactions - American Geophysical Union*, 39, pp.67-74, 1958.
- 2) Aris, R. and Amundson, N.R. : Some remarks on longitudinal mixing or diffusion in fixed beds, *AIChE Journal*, 3, pp.280-282, 1957.
- 3) Brusseau, M.L. : The influence of solute size, pore-water velocity, and intraparticle porosity on solute dispersion and transport in soil, *Water Resour. Res.*, 29(4), pp.1071-1080, 1993.
- 4) Harleman, D.R.F. and Rumer, R.R. : Longitudinal and lateral dispersion in an isotropic porous media, *J. Fluid Mech.*, 16, pp.385-394, 1963.
- 5) Klotz, D., Seiler, K.P., Moser, H. and Neumaier, F. : Dispersivity and velocity relationship from laboratory and field experiments, *J. Hydro.*, 45, pp.169-184, 1980.
- 6) Boving, T. and Grathwohl, P. : Matrix diffusion coefficients in sandstones and limestones: relationship to permeability and porosity, *J. Contam. Hydrol.*, 53, pp.85-100, 2001.
- 7) Bear, J. : *Dynamics of fluids in porous media*, Dover Publications, 1972.
- 8) Xu, M. and Eckstein, Y. : Statistical analysis of the relationships between dispersivity and other physical properties of porous media, *Hydrogeology J.*, 5, pp.4-20, 1997.
- 9) Guedes de Carvalho, J.R.F. and Delgado, J.M.P.Q. : The effect of fluid properties on dispersion in flow through packed beds, *AIChE Journal*, 49, pp.1980-1985, 2003.
- 10) Fernández-García, D., Sánchez-Vila, X. and Illangasekare, T.H. : Convergent-flow tracer tests in heterogeneous media: combined experimental-numerical analysis for determination of equivalent transport parameters, *J. Contam. Hydrol.*, 57, pp.129-145, 2002.
- 11) Goltz, M.N. and Roberts, P.V. : Using the method of moments to analyze three-dimensional diffusion-limited solute transport from temporal and spatial perspectives, *Water Resour. Res.*, 23(8), pp.1575-1585, 1987.
- 12) Valocchi, A. : Validity of the local equilibrium assumption for modeling sorbing solute transport through homogeneous soils, *Water Resour. Res.*, 21(6), pp.808-820, 1985.
- 13) 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*, (in press).
- 14) Park, E. and Zhan, H. : Analytical solutions of contaminant transport from finite one-, two- and three-dimensional sources in a finite-thickness aquifer, *J. Contam. Hydrol.*, 53, pp.41-61, 2001.
- 15) Pickens, J.F. and Grisak, G.E. : Scale-dependent dispersion in a stratified granular aquifer, *Water Resour. Res.*, 17(4), pp.1191-1212, 1981.
- 16) Wilhelm, R.H. : Progress towards the a priori design of chemical reactors, *Pure Appl. Chem.*, 5, pp.403-421, 1962.
- 17) Johnson, G.W. and Kapner, R.S. : The dependence of axial dispersion on non-uniform flows in beds of uniform packing, *Chem. Eng. Sci.*, 45, pp.3329-3339, 1990.

(2007.9.30受付)