

大型浸透層を用いた縦分散特性のスケール 依存性に関する実験的検討

THE EXPERIMENTAL STUDY OF THE SCALE EFFECT ON DISPERSION USING A LONG SOIL CHANNEL

井上 康¹・目黒 亨²
Yasushi INOUE, Toru MEGURO

¹正会員 工修 名古屋大学助手 難処理人工物研究センター (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²正会員 工修 中日本建設コンサルタント株式会社 (〒460-0003 名古屋市中区1-8-6スト・ビル名古屋)

A series of one-dimensional tracer experiments were carried out in a 20 m long homogeneous sand media to see the scale effect on dispersion. Dispersivity was found increasing with distance. This may be due to the segregation of the smaller sized sand and larger sized sand particles in micro scale. Similar experiments in a 10 m long heterogeneous media, prepared by inserting a number of large permeable blocks into the previous sand media, also showed the similar behavior. However, the rate of increase of the dispersivity is smaller in heterogeneous media.

Key Words : Longitudinal dispersion, Dispersivity, Scale effect

1. はじめに

近年, 環境汚染の一つとして土壌・地下水汚染が緊急の問題としてクローズアップされるにつれ, 地下水の問題も単に流量だけではなく, 物質そのものの移動を把握することが重要になって来ている. その中でも分散特性は, とくに, 場の不均一性との関係で様々に議論されている.

浸透流に伴う分散係数 D は分子拡散と機構的分散の和として式(1)で表わされる.

$$D = D_m + \alpha v^n \quad (1)$$

ここで, 分子拡散係数 D_m は機構的分散係数 αv^n に比較して無視できるとされており, 通常は機構的分散だけで議論される. n は定数であり1~2の値を取るといわれており, α は分散度といわれ土の間隙の構造を表わす長さである.

Gelhar¹⁾ は分散度の現地観測データを集め, 分散度が観測スケールによって変化し, 10cmから100kmの観測スケール範囲に対し分散度は1cmから10 kmに及ぶ事を示した. これは, スケールが大きくなるに伴い, より大きな不均一場を取り込むことにより分散度が増加するものと解釈されている. 一方, これに対して, Jury²⁾, Neuman³⁾ などによる確率統計的立場からモデル化の研究もある. また, 数値実験による検討もあり, 中川⁴⁾ はミクロな透水係数の空

間相関を持つ場での移流分散数値実験により, 相関の積分長と分散度の関係を議論している.

本研究では, こうした議論を念頭に置きながら, また, 小規模の実験室レベルの現象と現地規模の現象をつなげる実験が無いことも考慮し, 長さ20mという大型の土槽を用いて, 縦分散特性のスケール依存特性を実験的に検討したものである.

本研究では場の不均一性が議論の中心となる. ここでは不均一性の概念と用語を整理しておく. すなわち浸透層を構成する土粒子とその配置により, 均一, 不均一, 均質, 不均質という四つの種類に分類し, 以下のように定義する.

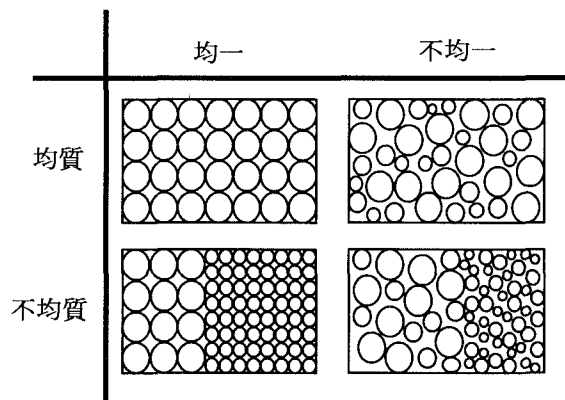


図-1 不均一性の定義

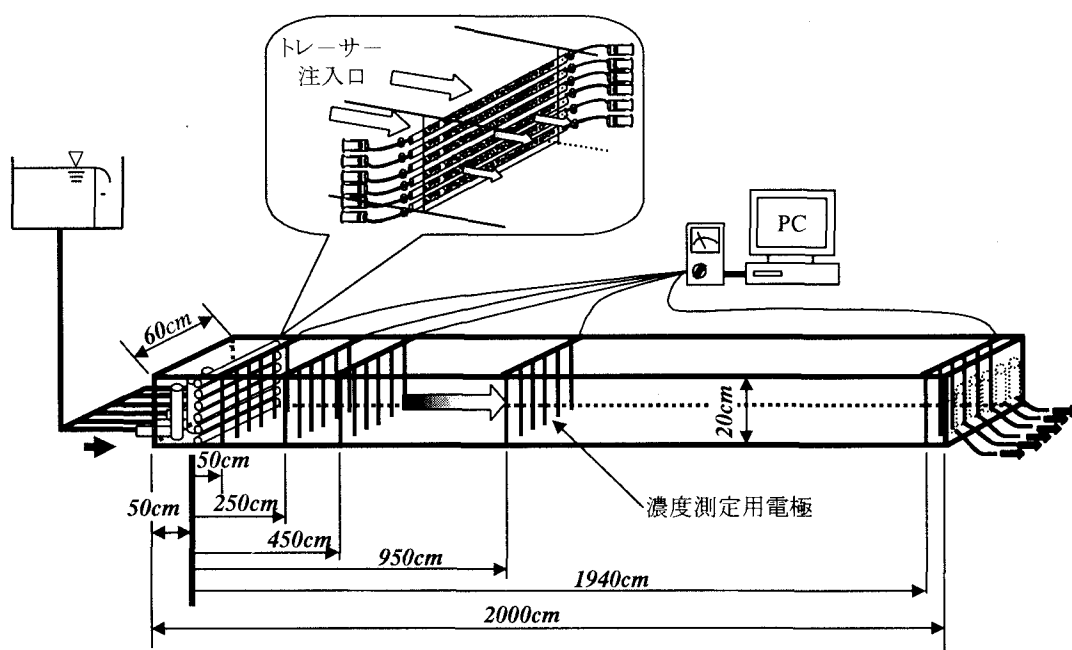


図-2 実験装置の概略図

- ・均一場……粒径が一定、もしくは一定粒径群の組み合わせから成る場
- ・不均一場…粒径に分布を持ち、散らばっている場
- ・均質場……粒径が一定である、もしくは粒径に分布を持っていたとしてもほぼ同じ割合でばらついている場
- ・不均質場…粒径に分布を持ち、異なる特性のものが偏って存在する場

図-1はこれらの定義を図で表したものである。

2. 実験

(1) 実験装置

a) 実験水路

実験装置の概略図を図-2に示す。水路は厚さ1.5mmの鉄製であり、縦20cm、横60cm、長さ2mのユニットを10個連結することによって総延長20mとなっている。

本実験ではトレーサーとして取り扱いが簡単で化学的に変化しにくいNaCl溶液を用いた。図-2に注入装置、計測装置の設置状況も示してある。水路上流端から50cmの地点にストレーナー6本が水路の横断方向に断面全体に渡って等間隔に設置してあり、ストレーナーに取り付けたシリンジにより、片側からNaCl溶液を注入すると同時に反対側からストレーナー内の水を引き抜くことによって瞬間面源として与えることができるようになっている。

水路内のトレーサー濃度は比電気伝導度を測定することによって調べた。この測定のため直径3mm、長さ19cmのステンレス棒6本による電極をトレーサー注入点から流下方向に50cm、250cm、450cm、950cm、1940cmの地点に設置した。計測はコン

ピュータで管理した。(サンプリング間隔60秒)なお、ここで得られる値は比電気伝導度そのものではないが簡単のため「比電気伝導度(SC)」という用語を用いる。

b) 浸透場

本実験では浸透場として均質な場と不均質な場に分けて二つの実験を行った。

均質場は溶質の吸着がほとんど起こらない珪砂(3号珪砂)を用いた。珪砂の粒径加積曲線(図-3)より有効粒径 D_{50} は1.41mm、均等係数 $U_c(=D_{60}/D_{10})$ は1.55、曲率係数 $U_c'(=D_{30}^2/D_{10}D_{60})$ は1.06であった。これらの指標を日本統一分類法の分類基準に照らし合わせると「均等粒度の砂」であることが分かる。

不均質場は3号珪砂を詰めた浸透場に部分的に粒径が大きく、透水性の大きい焼成セラミック製球状ろ材(平均粒径3.8mm)を直方体ブロック(幅6cm、長さ1m、高さ20cm)として埋め込む形で行った。ろ材の透水係数は珪砂の約1.4倍であった。このようにしてつくった不均質場の概略図を図-4に示す。

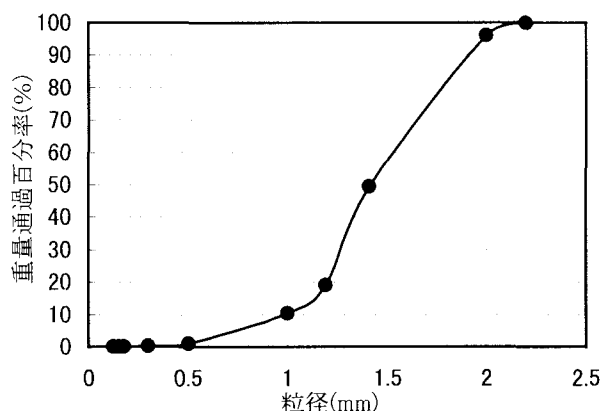


図-3 珪砂の粒径加積曲線

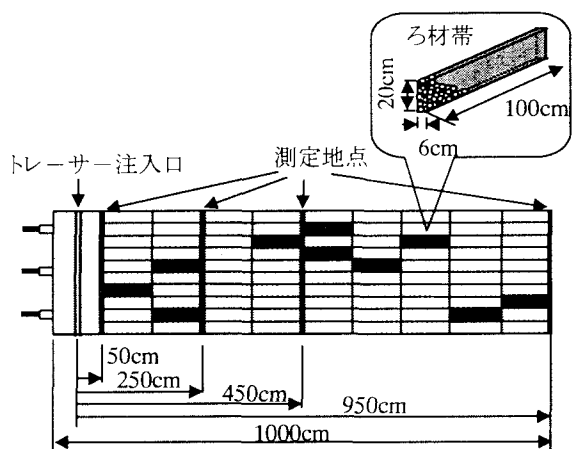


図-4 不均質場の概略図

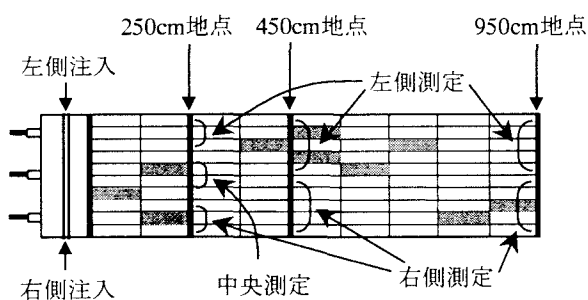
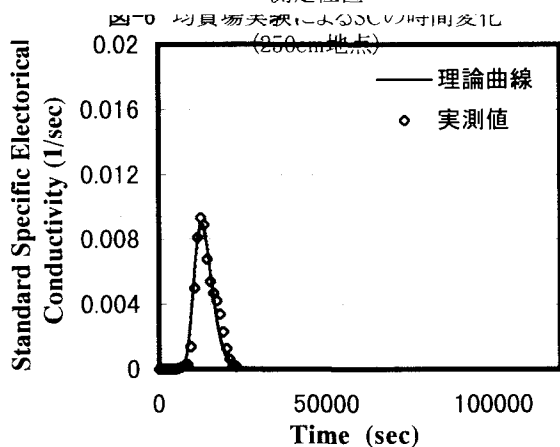


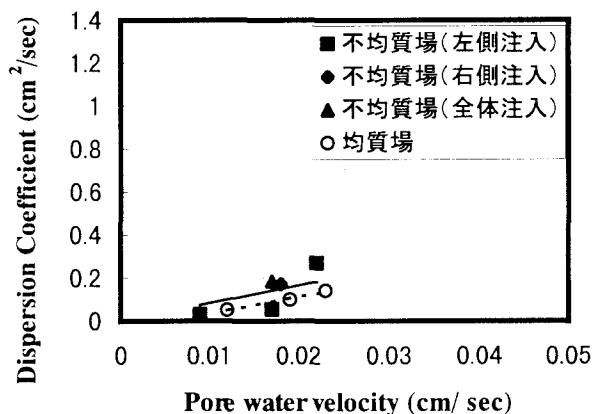
図-5 不均質場の流れの特性を調べるための濃度測定位置



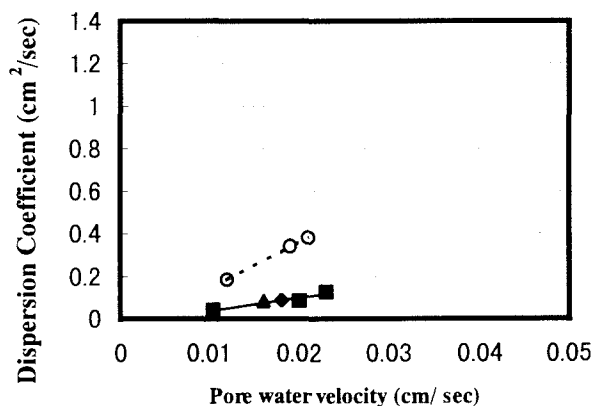
(2) 実験方法

定常な浸透場を作るため上流側と下流側に水頭差をつけて数時間水を流し続け、4箇所のマノメータの水路内の圧力状態と排水流量が一定となった時点で実験を開始した。

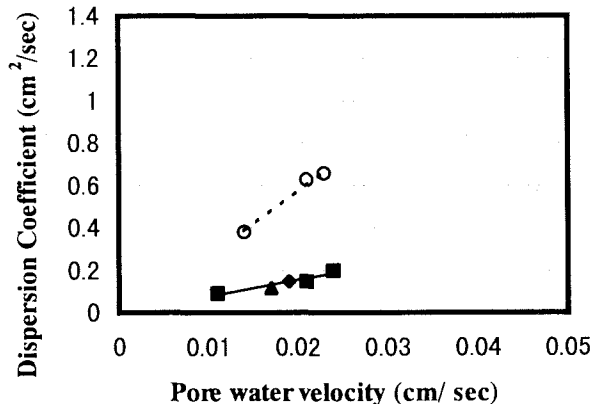
トレーサー注入は、均質場実験では一定濃度（約 $19400 \mu\text{S/cm}$ ）のNaCl溶液 360cm^3 を前出の注入法により断面で均一に行った。一方、不均質場実験では断面均一な注入と左右から半分注入し断面内で偏りを持たせる注入の3ケースを行った。図-5に偏り注



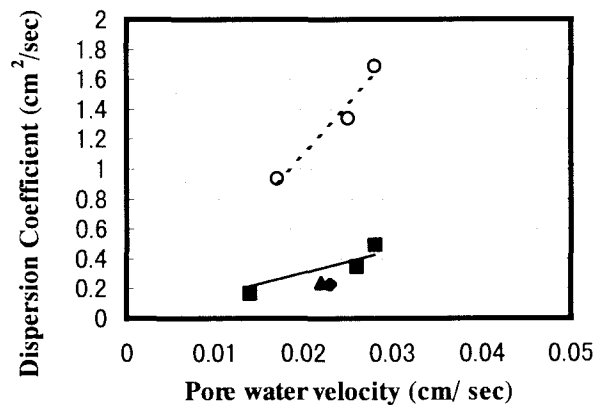
(a) 250cm地点



(b) 450cm地点



(c) 950cm地点



(d) 1940cm地点

図-7 実流速と分散係数の関係

入位置と計測位置を示す。

トレーサー注入と同時に各測定位置における比電気伝導度の時間変化の測定を開始し、1ケースの実験は最遠端の測定点である1940cm地点の値が実験前の値に戻った時点で終了した。

3. 実験結果と考察

(1) 分散係数の算定

局所的な分散係数は一般に式(2)で定義される。

$$D = \frac{1}{2} \frac{d\sigma^2}{dt} \quad (2)$$

ここに、 σ^2 はトレーサのピーク周りの分散である。

一方、実際の実験室や野外での実験ではトレーサ濃度の空間分布を測定することは難しいので、定点での濃度の時間波形を所定の初期・境界条件に対する解析解に当てはめることによって推定する。ここでは、後者の方法を用いた。解析解としては式(3)を用いた。

$$C = \frac{M}{\rho} \frac{1}{\sqrt{4\pi}} \exp\left[-\frac{(x-vt)^2}{4Dt}\right] \quad (3)$$

ここに、 M は注入総量、 ρ は中入水中の単位体積の量、 x は注入点からの距離、 v は実流速、 t は時刻である。フィッティングは図-6に示すように全般に良好であった。

(2) 実験結果と解析

a) D - v 関係

図-7に、フィッティングによって得られた分散係数と実流速の関係を均質場、不均質場を併せて示す。データの数はずしも十分ではないが D と v にはいずれの場合にもほぼ線形関係が認められる。不均質場については、均質場ほどではないが、注入の仕方にかかわらず同一の線形関係が認められる。また、観測地点が450cmを越えると分散係数が均質場より小さくなるという予想しなかった特性が見られた。

b) 分散度とスケールの関係

図-8は分散度 α とスケールの関係を均質および不均質場について両対数軸を用いて示したものである。図には各々の回帰直線とNeumanが求めた回帰直線を参考のため示してある。図から、均質場については直線上によく乗っており、Newmanが得た関係ともよく対応していることがわかる。これに対し、不均質場の場合には、図-7で見たように250cmまでは均質場とよく一致しているが450cm以上では分散度がかなり小さくなっており、したがって、Neumanの関係ともかけ離れている。

c) 不均質場の水筋の特性

前述の特性を検討するため、不均質場実験での各地点でのピーク発生位置について検討してみよう。図-9は例として左側注入の場合の250、450、950cm位置での比電気伝導度の変化を見たものである。これ

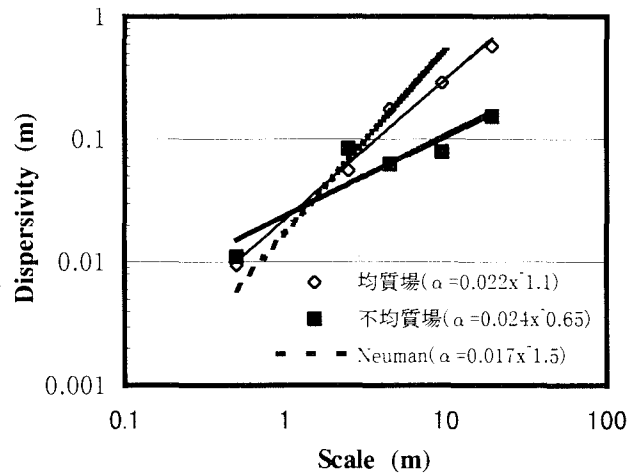
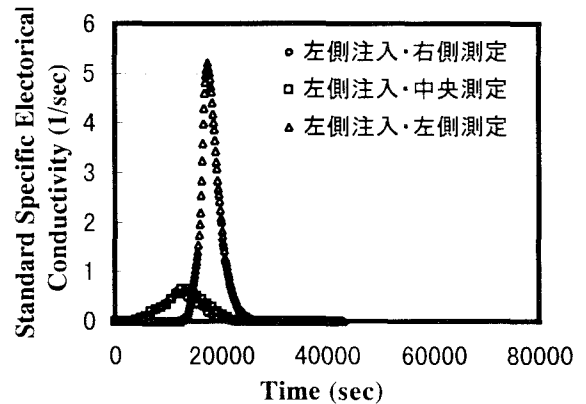
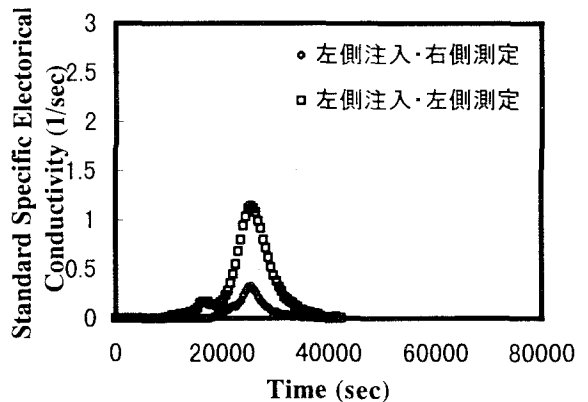


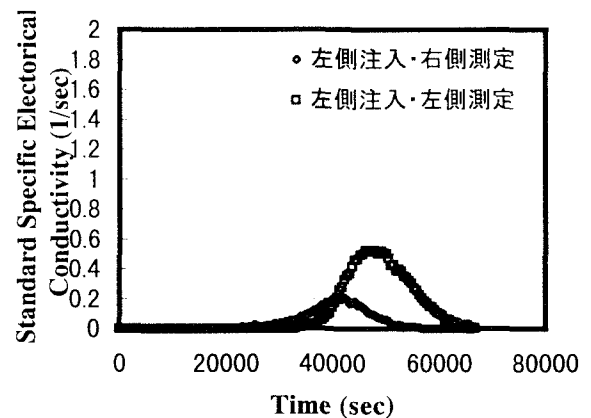
図-8 不均質場における分散度のスケール依存性



(a) 250cm地点



(b) 450cm地点



(c) 950cm地点

図-9 SCの時間変化(左側注入)



図-10 不均質場の流れの特性

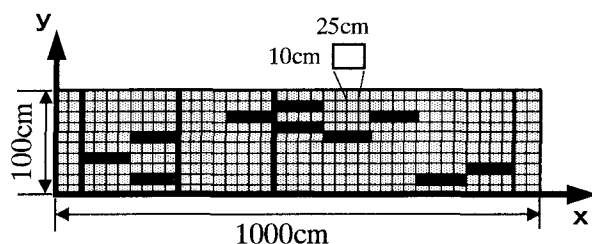


図-11 シミュレーションの対象とする不均質場

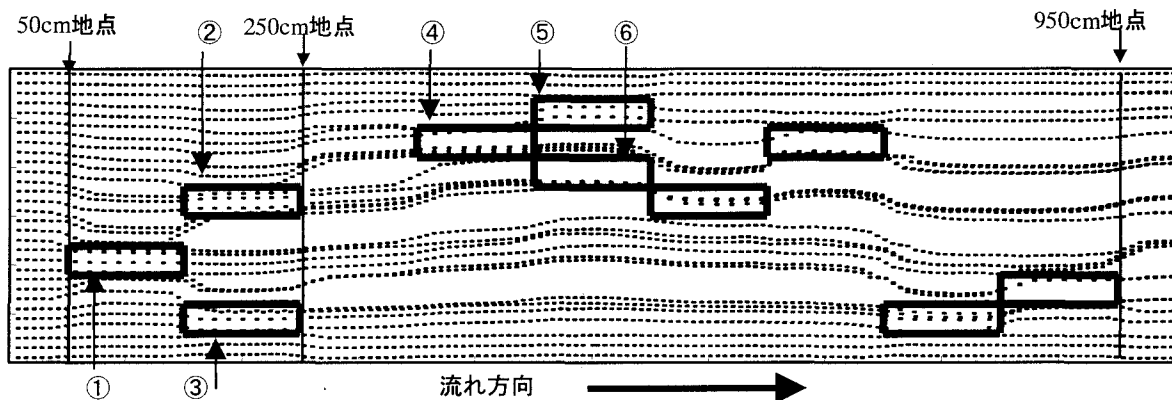


図-12 数値シミュレーション対象範囲の流れの概要図

によると、250cmではろ材が存在する中央と右でピークが早く現われ、左では遅く現われている。これが、450cm位置になると、途中の左側ではろ材があり、右側でないためピークはほぼ同時となっている。しかしよく見ると左側で1700秒に小さなピークがみられ、これは、250cm地点で中央もしくは右を通過した早い流れが450cm地点で左に引っぱられ早く現われたものと解釈できる。950cm地点においても450-650cmの左側のろ材と650-950cmの右側のろ材により、流れが曲げられ、右側で早く左側で遅くピークが現われている。これらより、図-10のような水筋が想定される。

d) 数値シミュレーションによる検討

以上述べてきた、実験結果を数値シミュレーション結果と比較した。数値シミュレーションでは、まず、本実験と同様の配置で珪砂とろ材を配置した場について定常状態の流れ場を有限要素法により計算（メッシュサイズは幅10cm、長さ25cm）した。図-11は場の座標とメッシュ分割を示したものである。この流れ場にたいし、上流端の $\Delta x = 6\text{cm}$ の範囲にランダムに1000個のトレーサ粒子を発生させ、それぞれ、次式によって移動させた。そして、その密度を250, 450, 950cmの地点で計測し、実験と同様に式(2)に当てはめて分散係数を求めた。

$$\begin{aligned} x(0) &= x_0 & x(t + \Delta t) &= x(t) + u'_x \Delta t + P_x \\ y(0) &= y_0 & y(t + \Delta t) &= y(t) + u'_y \Delta t + P_y \end{aligned} \quad (3)$$

ここに

$$\begin{aligned} u'_x &= u_x + \frac{\partial D_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial D_{xy}}{\partial y}, & u'_y &= u_y + \frac{\partial D_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial D_{yy}}{\partial y} \\ u_x &= u_x(x(t), y(t), t), & u_y &= u_y(x(t), y(t), t) \\ P_x &= \frac{u_x}{u} P_L - \frac{u_y}{u} P_T, & P_y &= \frac{u_y}{u} P_L + \frac{u_x}{u} P_T \\ P_L &= Z \sqrt{2\alpha_L u \Delta t}, & P_T &= Z' \sqrt{2\alpha_T u \Delta t} \\ u &= \sqrt{u_x^2 + u_y^2} \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 x_0, y_0 は出発点の座標、 Z は $N(0, 1)$ の正規乱数、 α_L, α_T は縦、横分散度であり、 $\alpha_L = 0.05\text{m}$ 、 $\alpha_T = 0.002\text{m}$ を用いた。 Δt は時間増分であり60秒を用いた。

数値シミュレーション結果について、まず、図-12は定常流れの流線を描いたものである。流れの概況はc)で推定したものとほぼ対応している事が分かる。一方、表-1に実流速、マクロな分散係数、マクロな分散度をスケールごとに示したが、 α はほぼ一定であり、実験で見られたようなスケール依存性は認められなかった。

表-1 シミュレーション結果

x (cm)	v (cm/s)	D (cm ² /s)	α (cm)
50	0.019	0.116	6.11
250	0.017	0.075	4.41
450	0.017	0.076	4.47

(3) 考察

以上の結果から、次のような特性が指摘できる。
-均質な材料を用いた実験においても分散度のスケール依存性が現われ、しかも、Neumanの示した

多くの実験・観測結果の回帰線上にほぼ乗る。

-ろ材を配置した不均質場の実験においては、450cm以上では分散係数は均質場よりかえって小さくなる。また、分散度のスケール依存性は存在するが均質場より小さい。

-不均質場を模擬した数値実験からは分散度のスケール依存性は認められない。

このように、実験結果は通常の理論、傾向からはずれる点が多い。

まず、第1の点について、中川⁴⁾らの数値計算によれば均質場では積分特性距離の約3.4倍を越えると分散係数は流れ場の特性によって決まる一定値に収束し、観測スケールには依存しないとされており本研究の結果はそれに反している。これについては、均質材料を用いても場の空間相関がスケールによって拡大する構造を今後検討する必要がある。

第2点に関しては、一般に不均質場では均質場より分散が大きくなると予想されるが、本研究のような、水筋の発生により分散が抑えられる構造について検討する必要がある。

4. 結論

本研究では、通常の実験室の小規模実験とは異なり、現地規模に近いスケールでの移流分散実験を行い、分散係数や分散度がスケールによってどのように変るかを検討した。

その結果、理論や数値シミュレーションとは異なる、分散係数のスケール依存特性を見い出した。す

なわち、均質場でも分散度はスケールに依存して増加すること、場を不均質にしても必ずしも分散係数は大きくならないことである。本研究はこの問題に回答を与えるものではないが、従来考えられてきた分散現象の構造とは異なる何かの存在を示唆することができた。

謝辞:この論文は去る1999年7月10日、御逝去されました名古屋大学難処理人工物研究センター・教授であられた松林宇一郎先生の遺稿を共同研究者である筆者が加筆、纏めたものです。先生の研究に対する御努力と御尽力に尊敬の念を抱き、感謝の意を表すると共に、御冥福を心からお祈りいたします。

参考文献

- 1) Lynn W. Gelhar, Claire Welty and Kenneth R. Rehfeldt: A Critical Review of Data on Field-Scale Dispersion in Aquifers, *Water Resources Research*, Vol.28, No.7, pp1955-1974, July 1992.
- 2) W. A. Jury: Simulation of solute transport using a tracer function model, *Water Resources Research*, Vol.18, pp363-368, 1982.
- 3) Shlomo P. Neuman: On advective transport in fractal permeability and velocity fields, *Water Resources Research*, Vol.31, No.6, pp.1455-1460, June 1995.
- 4) 中川啓, 神野健二, 細川仕佐男: 不均一浸透場におけるトレーサー輸送の微視的分散と巨視的分散に対する水理学的考察, 水工学論文集 第42巻, pp.385-390, 1998.

(1999.9.30受付)