

粗空隙浸透層内の水みちの不均質性による 分散への影響

The Effects of Dispersion Phenomena by heterogeneity of Water Paths
in the Large Grain Sized Porous Medium

井上 康¹・松林宇一郎²・杉原浩明³・高木不折⁴

Yasushi INOUE, Uichiro MATSUBAYASHI, Hiroaki SUGIHARA, Fusetsu TAKAGI

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 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)

²正会員 工博 名古屋大学教授 難処理人工物研究センター (〒464-01 名古屋市千種区不老町)

³名古屋大学大学院生 工学研究科地圏環境工学専攻 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)

⁴フェロー会員 工博 名古屋大学教授 工学研究科地圏環境工学専攻 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)

The dispersion phenomena of the convective-dispersive transport of solutes through a porous medium is usually discussed by mechanical dispersion. However, experimental study in large grain sized porous medium showed that mechanical dispersion, and dispersion due to a velocity distribution inside a pore and the turbulent diffusion occur simultaneously. To gain further understanding on dispersion phenomena, one-dimensional convective-dispersive experiments were conducted using models with a single water path and a number of water paths in the porous media. Experimental results show that the dispersion coefficient changes its characteristics depending on flow regimes, laminar or turbulent. It is also shown that both the mechanical dispersion and dispersion due to a velocity distribution inside a pore increases with the increase in heterogeneity of the medium.

Keywords : *Self-purification, Dispersion, Flow Regime, Heterogeneity*

1. はじめに

都市河川等において水質汚濁対策の一手法として自然の礫を使用した礫間接触酸化法が多くの場所で用いられている。また、近年の河川環境における自然要素を取り入れた改修や自然環境の創出や回復という動向が活発な中で、河床や河岸が元来有する汚濁物質の自然浄化作用も注目されている。このような機能は、実際には礫層を流下する間に吸着、濾過、沈殿等の物理的作用に加え、層内に生息する微生物による分解という生物的作用を経て、浄化機能として働くことになる。

水域では土壌、礫・砂層、護岸コンクリートブロックなどの多孔体質で、水と接し、分解微生物が生

息する可能性がある場であるなら、能力の大小はあるが水質浄化機能を有していると考えて良い。しかし、浄化が行われる場を構成する材料やその構造は径や層自体の大きさどれを取ってもばらばらで物質の移動の度合いが違い、それぞれに能力が異なる。どのような場でどのようにまたどの程度の浄化が成されるか良く分かっていないのが現状である。

浄化システムの性能評価の第一段階として、汚染物質が層内をどのように拡がっていくのかという物質移動に着目しなければならない。これは物質の移流分散過程として捉えられ一般には物理的、生物的反応項を含む移流分散方程式により表現される。礫層など浸透層における縦方向分散係数に関する研究は Harleman & Rumer¹⁾などにより成されているが、こ

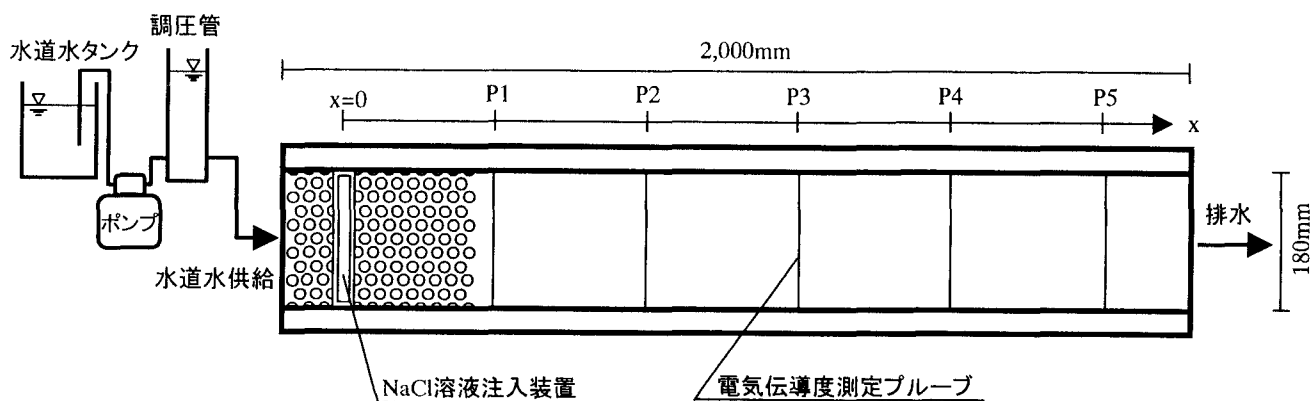


図-1 実験水路（二次元均質、平面図）と装置の概要

れは地下水域を対象とし、流れの非常に緩やかな層流領域における研究であり、粗な空隙を持つ礫層での層流から遷移流、乱流領域はこれまでほとんど対象とされていない。分散は層内の流れの空間的な速度偏差に起因する現象であるために、細粒層と粗空隙層では起こっている現象が異なっていると考えられる。

浸透層内の分散は層の構造に強く依存した機構的分散により説明されてきた。特に砂、ガラスビーズなど地下水帯を対象とした小粒径材料で構成される浸透層の場合、流れは層流領域であり Darcy 則に従い、そのように説明できた。前々報²⁾において平均径 18mm の礫を用いた浸透層における分散係数の計測および混合距離理論の援用、乱れ速度の評価から、粗な空隙を有する浸透層においては機構的分散のみではなく、さらに個々の空隙内で生ずる分散・拡散も考慮に入れなければならないのではないかとということが推察された。この粗空隙浸透層において流れは Forchheimer 則に従う層流～遷移流～乱流領域に及ぶ。また前報³⁾においては、前々報での推察された観点から、空隙内での分散について一本の水みちのモデル水路を用い、実験により分散係数を求め、その機構について Taylor⁴⁾の移流分散理論で説明した。これにより分散係数と空隙の実質流速との関係が明らかに非線形の応答となることが確認され、またその傾向は水みちの流れの状態に対応しているのではないかと推察された。そこで本研究ではこの概念に基づいて、浸透層における分散現象についてその発生機構を起因別に、つまり機構的分散と空隙内分散

とに区別して考える。分散現象の流れの状態による分散係数の変化に加えて、場の不均質性による機構的分散への影響について実験を行い、定性的な場の構造と分散の発生機構について検討した。

2. 実験装置と実験方法

(1) 実験装置の概要

本研究では粗空隙浸透層内の分散現象の素過程を原因別に調べることににより、層全体での分散機構を捉えようとするものであり、個々の水みちに注目し、水みち内の分散と機構的分散の分散全体における関係について理解することを目的とする。実際の浸透層と水みちの構造は三次元的で極めて複雑であるが、これを平面的モデルとし、礫の形状と空隙の構造を理想化・単純化することにより、水みちの曲がり、拡張などの形状による流れおよび分散への影響が理解容易となり、形状パラメータとの関連を規定しやすくなると考えられる。ただし、礫の間隔、形状が単純化されたことから壁面の状態や水みちの形態に関して、分散機構への定性的理解は得られても定量的な分散への説明にはならないことには注意すべきである。

実験は構造が異なる①一本の水みちを持つ一次元水路、②互いに連絡している 10 本の水みちが横方向に存在し、礫の配列が均質な二次元均質水路、③同様に 10 本の水みちを持つが礫の配列が不均質な二次元不均質水路の 3 種類を用いた。二次元均質水路を例として概要を図-1 に示す。水路外郭は塩化ビ

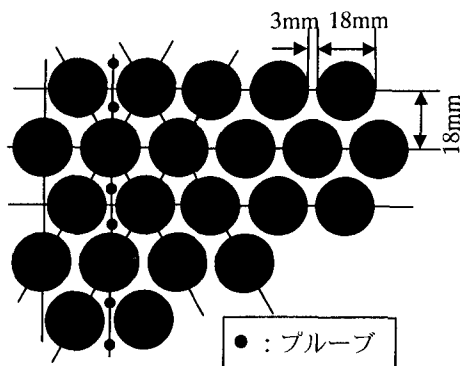


図-2 礫の基本配列

ニル板で上下面は透明な物を用い、内部の状況が目視可能である。内寸は長さ 2000mm、高さ 10mm、幅は一次元水路では 18mm、二次元水路では 180mm である。また、礫に相当する物として径 18mm、高さ 10mm の塩化ビニルパイプを使用した。礫の配置は規則的な千鳥配列を基本とし、パイプの中心間隔を流下方向に 21mm（パイプ間隔 3mm）、流れを横断する方向に 18mm となるように配置し、これにより間隙率は 0.403 となる。その基本配置を図-2 に示す。不均質水路に関しては流下方向にのみパイプ中心位置を移動させ、礫配置の不均質性を与えた。これは二次元確率過程⁹⁾を利用した方法で、全ての礫の中心位置座標に関して、ある相関と標準偏差を持たせた確率分布により新たな座標を計算した。横方向の礫位置とは直接の相関はない。水路の最上部に水道水の供給部、それより 50mm 下流に NaCl 水溶液の注入装置を設けた。また、水路内には NaCl 水溶液注入口を原点とし、表-1 に挙げる位置に電気伝導度測定用のステンレス製プローブ（径 3mm）を水路上面底面向かい合わせで一对となるよう各水みち毎に設置した。（P1～P5 とする。）

(2) 実験方法の概要

NaCl 水溶液をトレーサーとする分散係数を求めるため①を用いて a.一次元実験、②を用いて b.二次元一水みち実験と c.均質実験、③を用いて d.不均質実験という 4 つの一次元移流分散実験を行った。ただし、b の実験は二次元水路内の水みちを側壁に近い方から第一列、第二列...第五列としたときの一本水みちのみを対象とした実験である。トレーサーは瞬間面源として水みちへ注入し、同時に水路内の流量が

表-1 各水路のプローブの位置

水路/Probe	P1 (cm)	P2 (cm)	P3 (cm)	P4 (cm)	P5 (cm)
一次元	31.5	63.0	94.5	126.0	157.5
二次元/均質	32.0	63.5	95.0	126.5	158.0
不均質	31.4	58.7	82.4	—	—

トレーサー注入により変化し分散に著しい影響を与えないようにするため、上流側で注入量と同量の水道水を吸引し流量変化を防ぐよう工夫した。NaCl 水溶液注入後、設置した電気伝導度測定用プローブと電気伝導度計により水路の水みちの濃度時間変化を連続的に計測した。濃度測定と同時に水路原点と下流端の水頭差と流出流量を測定した。二次元一水みち実験は 10 本の水みちのうち任意の 1 本のみの計測であるが、これに対し均質実験、不均質実験は各々の水みちに存在するプローブを並列接続し、水路全幅に対する測定である。

一次元実験と二次元実験の比較から一本の水みちで起こっている分散を捉え、さらに均質実験と比較することにより、一本の水みちでの分散と複数の水みちの平均的な分散の相違を検討する。最後に均質実験と不均質実験を比較し、不均質性の機構的分散への寄与について考える。

3. 実験結果と考察

(1) 実験結果の解析

生成、分解等の物質反応項がない、つまり物質の移流分散のみを考えた場合、浸透層中の物質の移動は(1)式により表現される。鉛直方向の移動可能距離は小さいので、分散は一次元方向のみを考える。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

実験によりトレーサーの濃度-時間曲線が得られるが、この計測値 $C(t)$ と解析解である (2), (3) 式に適当な分散係数と実質流速の組合せを代入した時の C の

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

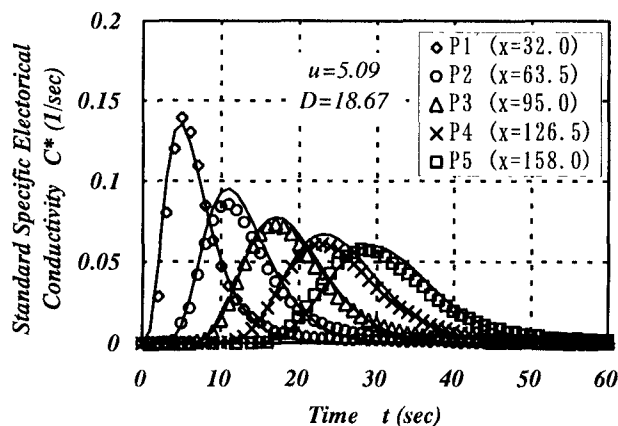


図-3 濃度-時間曲線 (均質水路)

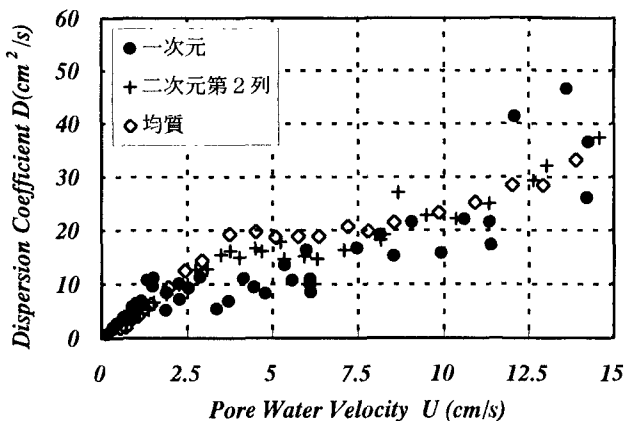


図-5 実質流速と分散係数の関係 (一次元水路、二次元水路、均質水路)

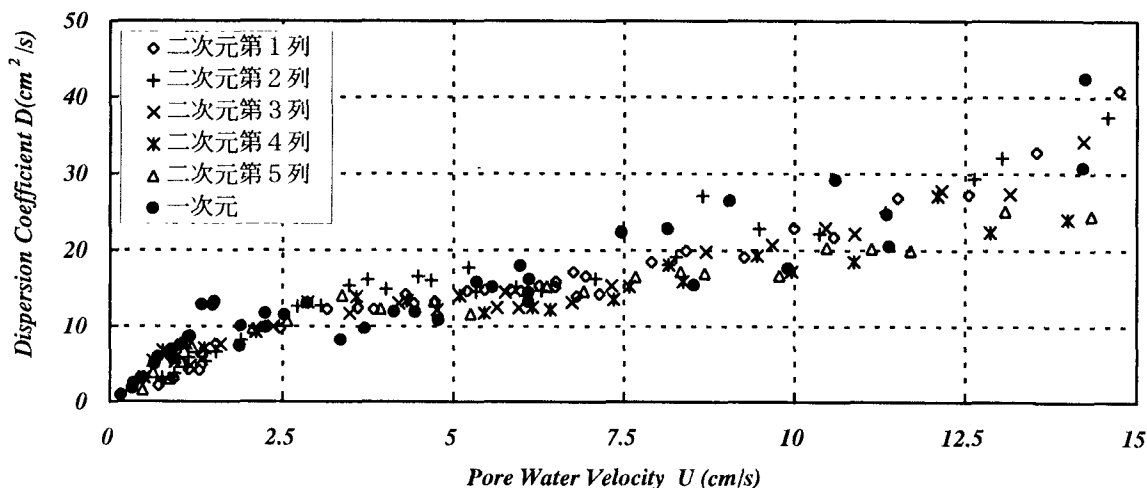


図-4 実質流速と分散係数の関係 (一次元と二次元各列)

$$\frac{M}{\rho} = \int_{-\infty}^{\infty} C dx \quad (3)$$

値を物質投入量が1となるように基準化した下で比較し、両者が最も合致する縦方向分散係数と実質流速の組合わせを試行錯誤による2乗誤差最小の基準で求めた。一般的に実質流速は断面平均流速と空隙率から求められるが、トレーサーの中心の速度が実質流速であり、濃度のピークが到達する時刻により流速が決定できるため、より正確な値を求めるためこの方法から求めた。ここでCはトレーサー濃度、Dはx方向分散係数、xは流下方向座標、uは実質流速、tは時刻、Uは平均実質流速、Mは投入物質量、ρは密度である。図-3に実験により得られた各水路の濃度-時間曲線の一例を示す。実験結果をプロットで、計算により求めた値を用いた理論曲線を実線で示した。流下に伴いピーク濃度が減衰し、トレーサーが広がっていく。

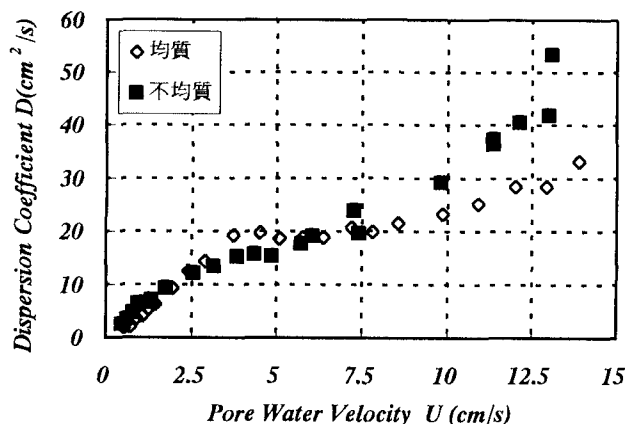


図-6 実質流速と分散係数の関係 (均質水路と不均質水路)

(2) 分散係数と実質流速の関係

得られたDとUの関係を示すと、一次元と二次元各水みち実験の結果比較が図-4、一次元と二次元一水みち(代表的な第二列を表示)と均質の結果比較を図-5、均質と不均質の結果比較を図-6となる。DとUの関係はどの水路の結果においても非線形であり、次の特徴がある。まず、傾きが大きく変

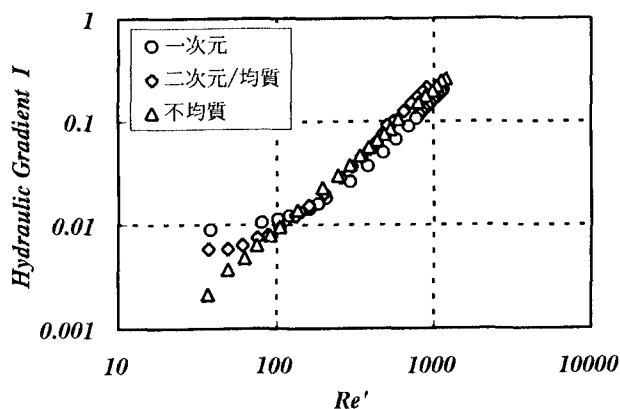


図-7 レイノルズ数と動水勾配の関係

化する点の存在がそれぞれ2カ所確認されることである。但し、変化点の流速は水路により異なり、特に第1の変化点での流速は一次元(約1.5cm/s)、不均質(約2.2cm/s)、均質(約3.7cm/s)の順になっている。次に第1の変化点までの低流速域では直線的に D が増加し、変化点流速に達すると D がほぼ一定値となり、さらに流速が増すと再び増加傾向を示すが、その傾きは低流速域よりも小さいことがわかる。不均質実験では第1の変化点やや不鮮明だが、

$$D = \alpha U^n \quad (4)$$

徐々に一定値に近づいている。砂礫など小粒径浸透層における D と U の関係は従来から(4)式で n が1程度となり、ほぼ線形の関係があると指摘されてきたが、実際の礫層における分散係数の測定と同様に、本実験水路においては大きく異なる結果となった。ここでこのような傾向となる原因について考察する。各水路の断面平均流速を用いた Re' と動水勾配 I の関係は図-7に示すように層流～乱流領域に達する流れであることが分かる。分散係数の折れ曲がりところで見られる層流から乱流の変化がはっきり対応しているかわかりにくい、流れの状態の簡単な確認法として水みちにMetylen Blue溶液を流して可視化し、その流線の状態を目視により確認するという実験を各水路で行った結果、完全に層流が保たれる限界実質流速は一次元では2.5cm/s、二次元及び均質では3.5cm/s、不均質では2.35cm/s程度であった。層流限界が各水路の第1変化点の流速値とほぼ一致するかあるいはその値以上であることから、低流速域

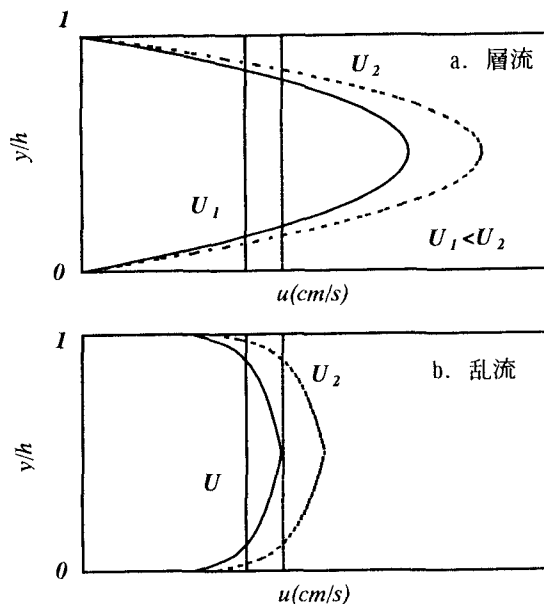


図-8 層流-乱流の流速分布の比較

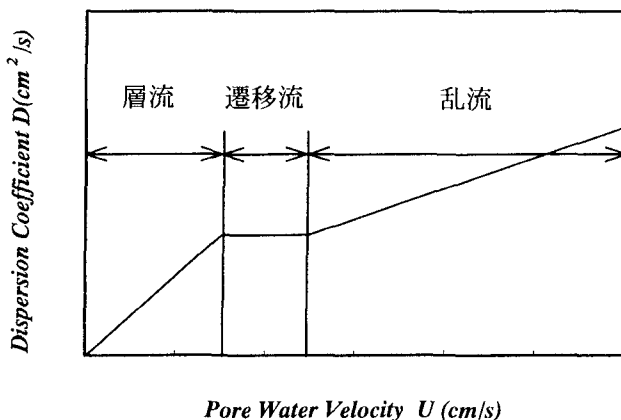


図-9 分散係数の傾向

の線形変化は層流に対応する、つまり D の変化は流れの状態により決まるのではないかと推察された。Taylorは河川などにおけるせん断流ではその流速分布により分散が起こると述べており、その原因として断面平均流速と実際の流速分布との偏差の存在とそれによる濃度分布の形成であるとしている。水みちの断面を円形と仮定してある流速における流速分布を層流ではHagen-Poiseuille流れとし、乱流ではPrandtl-Karmanの対数分布則を用いて計算すると図-8となる。断面平均流速からの流速分布の偏りが大きければ分散も大きくなることから、乱流よりも層流である方が分散係数 D の増加率が大きくなる。層流から乱流の遷移領域はほぼ一定値であり、規則的配列を持つ浸透層における分散現象において分散係数と実質流速の関係は図-9に示すようになっていと考えられる。

(3) 水みちの分散機構

次に一次元と二次元の水みちでの結果について比較する。明らかに異なるのは実質流速 3cm/s 程度までの勾配と分散係数が一定値に達する流速である。二つの水路の相違点は横断方向の壁面の有無である。一次元の場合は両側面に壁面が存在し、二次元では固定的境界が存在しないという横方向の境界面の性質による窪み内の流れの状態や乱れの発生形態の相違のため、分散機構が異なるのではないかと考えられる。すなわち、これは礫層の横方向スケールが縦方向分散に影響を与える可能性を示しており、この観点からの検討が必要であろう。

均質の結果と不均質の結果を比較するといくつかの相違が見られる。まず、不均質では D の変化が均質と比べ緩やかになっており、第 1 の変化点は明瞭ではない。不均質場では機構的分散も加わると考えられ、ごく小流速では不均質の値が大きいが、変化点を過ぎると値の逆転が起こり、第 2 の変化点後は不均質の値が大きくなっている。またその第 2 変化点の流速も不均質の方が小さくなっている。機構的分散は平均実質流速からの空隙ごとの流速偏差を原因として生ずるため、均質な場では発生しないと考えられる。このため当初の予想としては常に不均質の分散係数が均質より大きいと考えられた。しかし、流速に従い、逆転が起こることから先に述べた流速分布による分散と機構的分散の関係により実験結果のようになったと考えられる。

最後に、 D の折れ曲がりの前と二度目の折れ曲がり後の傾きに注目すると、一次元では 7.4, 1.4、均質では 5.6、1.8、不均質では 4.5, 3.8 程度となり、層流では図-7 における勾配と Re' の傾きの順番に対応している。乱流ではそのような傾向を見ることはできないが、浸透性と分散係数に関連が認められる。つまり、層流域では流れやすいと分散性が高いということである。乱流域においても不均質が最も浸透性が良いが、分散係数も他より大きく、このことを示していると言えよう。

これらの考察は実験による計測値としての分散

係数の傾向を定性的に考えたにすぎず、実際の流速、流速分布の測定による分散機構、礫の粒径・配置や形状による影響、不均質性の度合いと分散係数の関係などを定量的に解明するための研究・実験を行う必要がある。

4. 結論

本研究は粗空隙浸透層内での分散特性を空隙内の分散に着目して、浸透層の水みちモデルによる実験を行い、分散係数の実質流速に対する傾向から流れの状態による分散係数の機構および不均質性による分散への影響について定性的な説明を行った。以下に本研究で得られた結果を示す。

- 1) 分散係数は浸透流の状態と密接な関係があり、水みちの流速分布による分散が大きく影響し、層流領域では大きな増加率を示し、遷移領域ではほぼ一定値、乱流領域では緩やかな増加率を示す。
- 2) 機構的分散の原因と考えられる不均質性は分散に影響を与えるが、分散係数に単なる機構的分散を加える形で寄与するのではなく、水みち形状の変化により生ずる流れの変化で分散係数の傾向に影響を与える。

参考文献

- 1) Harleman, D. R. F. and Rumer, R. R. : *Longitudinal and Lateral Dispersion in an Isotropic Porous Medium*, J. Fluid Mech. , 16, pp.385-394
- 2) 松林宇一郎, 井上康, 奥田卓, 高木不折: 大空隙をもつ浸透層における物質の移動特性に関する研究, 水工学論文集第 40 巻, 1996, pp.431-436
- 3) 井上康, 松林宇一郎, 杉原浩明, 高木不折: 粗空隙浸透層の一本の水みちにおける拡散特性に関する研究, 水工論文集第 41 巻, 1997, pp.557-562
- 4) G. I. Taylor : *The Dispersion of Matter in Turbulent Flow through a Pipe* , Proc. Roy. Soc.A.223, 1954, pp446-468
- 5) Rafael L. Bras ,Ignacio Rodriguez-Iturbe : *Random Function and Hydrology* , Addison-Wesley Publishing Company , 1985, pp.281-294

(1997.9.30 受付)