

礫層中の一本の水みちを模した一次元乱流拡散に関する研究

名古屋大学大学院 梅村 武史
 名古屋大学工学部 太田雄一郎
 名古屋大学工学部 正員 松林宇一郎
 名古屋大学工学部 正員 高木 不折

1. まえがき

砂利および礫などによって構成される自然河川における河床、河岸は、魚類や水棲生物の生息場所になると同時に、その空隙に生息するバクテリアによる水質浄化の場としても大きな役割を果たしている。したがって礫層内の流れの構造や物質輸送構造を知ることは河川の問題を考える上で基本的な事柄である。ところでこうした多孔体内の物質の分散過程は一般に、分子拡散と、多孔体の構造に依存する機構的分散によるといわれている。松林ら(1996)は自然の礫を用いた移流分散実験により、分散係数を求め、一方、空隙分布から得られる空隙流速の分布により、分散係数の推定を試みた。そして、こうした機構的分散のみでは大きな分散係数を説明できないことを示した。本研究では、その理由が礫の空隙が大きいことによる、空隙内での乱流にあると考え、礫の空隙の1つの水みちを模した水路を用いた移流分散実験を行い、その分散特性を検討した。

2. 一次元乱流拡散に関する理論的考察

多孔体の空隙網の中で互いに連続した一本の水みちを考えると、その中での物質移動が、移流分散過程で表現出来ると仮定すると、次の一次元移流分散の式で表すことが出来る。

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

この基礎式を瞬間点源に対して解くと次式が得られる。

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

(1)(2)式でCは溶質濃度、Dは拡散係数、vは平均実流速、Mは投入した溶質の総量である。ここでDの中には多孔体特有の機構的分散は含まれておらず、また、分子拡散は無視できるから、乱流拡散を表しているものと考えられる。3節では、(2)式を実験結果に適用して分散係数Dを求める。

3. 実験装置および実験方法

実験は図-1に示すアクリル樹脂製水路（長さ200cm、幅10cm）を用いて行った。空隙の寸法は松林ら(1996)の実験で用いた礫の空隙を模擬して2種類作成した。厚さは両者とも1cmである。水路の上流端から数cmの位置にトレーサーであるNaCl溶液注入用の注射器がとりつけてある。また水路の5カ所で比電気伝導度測定用のプローブ（水路上下面に電極として0.9cm×0.9cmのステンレス板をはりつけたもの）が設置してある。実験方法は定量ポンプで一定流量の水を流し、ある時刻(t=0)で高濃度のNaCl溶液を瞬間的に注入し、プローブにより比電気伝導度の時間変化を測定した。測定は導伝率計にプローブを接続し、その出力をコンピュータに取り込むという方法をとった。

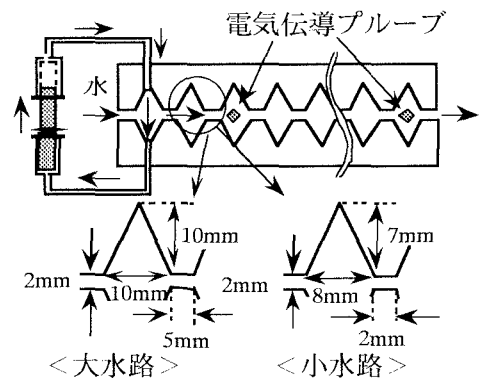


図-1 実験装置

4. 実験結果および考察

図2に各プローブにおける比電気伝導度の時間変化の一例を示す。同図には、(2)式により誤差の最小2乗規準でフィッティングしたv、Dを用いた理論曲線を併記してある。なお、実測値は理論曲線との

比較を容易にするため注入量を1 ($M=1$) として表示してある。

一般的傾向として注入点近傍は流速が小さい場合に理論値の方がシャープになる場合が多く、また、最下流端近傍のプルーブでは常に若干ピークが大きい傾向がある。

図3は、空隙寸法の異なる2つの水路について、分散係数 D を水路に沿った実流速(トレーサの平均移動速度)に対してプロットしたものである。

D に関する既往研究としては、

(1) 前述の礫層での結果では $D=1.40 v^{1.46}$ が得られている。

(2) Taborは滑面の円管乱流に対し理論的に $D=1.01 a v_*$ (a : 断面積, v_* : 摩擦速度)を得ている。(このことは $D \propto v$ を意味している。)

これらから、図3をみると、(1)の D は乱流拡散(ここで求めた値)と機構的分散の和となっている筈であるが、今回の結果は(1)の D より大きくなっており、矛盾する。これに関しては、(1)の礫層での実験では流れのpathは屈曲し、今回の実験値はその流れのpathに沿った分散であるから、(1)と比較するには D を屈曲度(約1.5程度)で割った値で比較しなければならない。しかしながら、それでも約4倍の開きがあり、結局、その理由は、今回の実験水路の空隙の形状および寸法が(1)の実験の礫層と異なっていたためと考えざるをえない。また、 v について2つの部分に分割でき、流速の低い部分

($v < 1 \text{ cm/s}$) ではほぼ $D \propto v$ 、流速の大きい部分では D は v に対して緩やかに増加もしくは一定と考えることができる。さらに、 D と v のべき乗の比較からは、(2)のTaborの実験結果とは、低流速領域に対応する可能性が指摘できる。また、小さい空隙の水路の D は、低流速域では小さく、流速が 1 cm/s より大きい場合には等しいか若干大きくなっていることがわかる。

4. まとめ

本研究では、礫など大空隙の透水層内の物質の移流分散過程について、空隙が大きいことにより生ずる乱流拡散の影響を調べるため、礫層の空隙を模擬した水路を用いた移流分散実験を行い、分散係数の特性を調べた。その結果以下の点が明らかとなった。

(1) D は 1 cm/s を境に特性が異なり、低速域では $D \propto v$ 、高速域では v に対して漸増する。

(2) 低速域では小水路の方が D は小さく、高速域では等しいか若干大きい。

(3) 今回の実験で得られた D は、礫層の D と比べかなり大きい。これは、空隙の形状や寸法が実際と異なったためと考えられる。

[参考文献]

松林ほか(1996):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(投稿中)

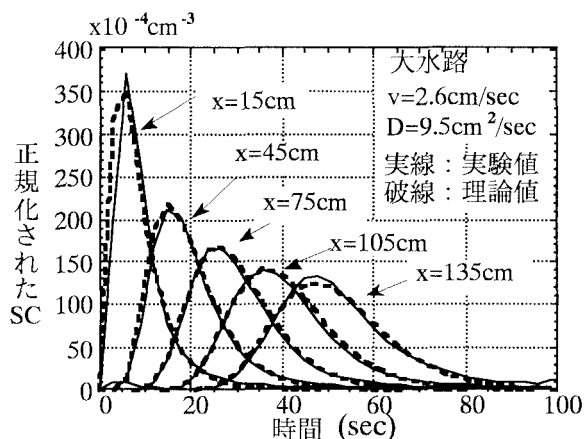


図-2 破過曲線の実験値と理論再現値

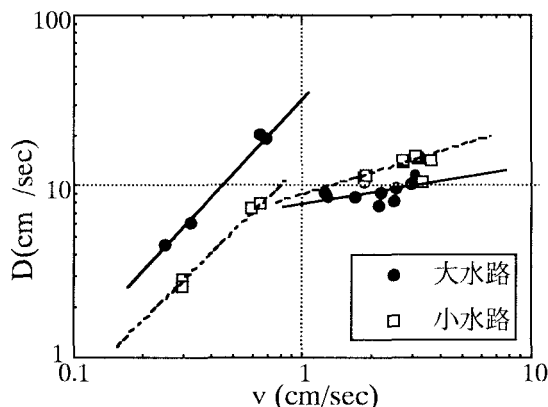


図-3 分散係数 D と平均実流速 v の関係