

ニュージェック 正員 梅村 武史
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

砂利や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。したがって生態系の維持、河川本来の自浄作用を考える上で空隙内での流れの構造や物質輸送現象を明らかにすることは重要である。本研究では浸透層内の流れを流下方向と、それに直交する水平方向の2つに分けて考え、その物質輸送過程から浸透層内の移流分散特性を明らかにする。

2. 2次元移流分散に関する理論的考察

本研究における浸透層内の物質移動は流れ方向を x 、横方向を y とすると次の2次元移流分散の式で表すことができる。

$$\frac{\partial \lambda C}{\partial t} = \lambda D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \lambda D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - u \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

C : 濃度, D_x, D_y : 分散係数, u : 実流速, λ : 空隙率

式(1)を本実験における条件, $x < 0, y > 0$ で $C = 1$, $x < 0, y < 0$ で $C = 0$, かつ時間的に定常として解くと次式が得られる。

$$C(x, y') = \frac{1}{2} + \frac{\alpha}{\pi} \exp(\alpha x) \int_0^{y'} K_0(\alpha \sqrt{x^2 + \xi^2}) d\xi \quad (2)$$

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. 実験装置及び実験方法

実験装置の概要を図1に示す。水路は透明アクリル樹脂製開水路（長さ600cm、深さ35cm、幅21cm）を用いた。勾配は任意に設定可能で、水路の上流端はトレーサであるNaCl溶液と砂糖水を分けて供給するために仕切板が設けてある。また、下流端の排水口は高さを変えることができ、水深を制御し、等流状態を作れるようになっている。浸透層は表1に示す3種類の焼成したセラミックス製球状材を用い、それぞれcase1, case2, case3とし、層厚はおおよそ13cmである。プルーブは長さ15cm、直径2mmのステンレス棒で、水路の横断方向に1cm間隔で20本、また流れ方向に仕切板の下流端から50, 100, 200, 300, 400, 500cmの6カ所に水路床より鉛直に設置した。

実験方法は等流量のNaCl溶液と砂糖水を定量ポンプによって仕切板の両側から水路に給水し等流状態をつくり、流れが定常状態になった後、全ての隣合う2本の電極間の比電気伝導度と流量を測定する。流量を変えて、粒径を変えて、これらの一連の操作を繰り返す。

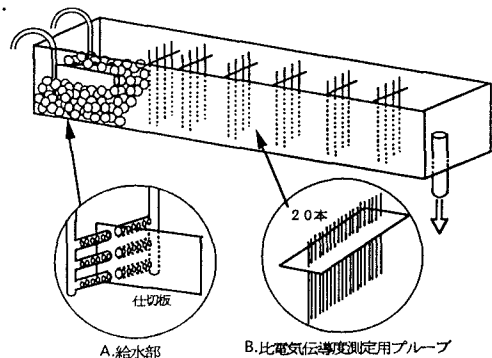


図1 実験装置

表1 浸透層の諸量

	粒径 (mm)	平均粒径 (mm)	空隙率
CASE 1	8~12	9.13	0.423
CASE 2	5~9	6.80	0.408
CASE 3	3~5	3.68	0.406

4. 結果と考察

浸透流の動水勾配と断面平均流速の関係よりDarcy法則が成り立っており，このことから浸透層内の流れは層流であるといえる．図2に比電気伝導度の y 方向の変化の一例を示す．別に行った1次元の移流分散実験によって求められた $u-Dx$ の関係を用いて実験値と理論解（式(2)）を比較することにより，両者が最も一致する分散係数 Dy を求める．図2における実線は最適な Dx を用いて求められた理論曲線である．実流速 u と同定された横方向分散係数 Dy の関係を図3に示す．同図より Dy は実流速 u に関して2次関数的に増加していることがわかる．同図によると Dx は粒径との間に規則性は認められないが Dy においては粒径が大きくなるほど大きくなっていることがわかる．横方向の分散においては，流体塊と粒子との衝突による強制的な流体塊の移動があり，本研究のような層流の浸透層場ではこのような要因による分散が機構的な分散よりも卓越していることを示唆している．

5. 分散係数の算定に関する数値実験

物質移動を理論的に再現するために数値実験を行う．モデルでは浸透層は全て球体であり，かつ面心立方型で構成されているとする．浸透層内が不飽和の場合，まず毛管力によって間隙保水され，次にこの水粒子は1/2の確率で最も近い球体の接点に移動する．本研究では流れは飽和であるが，このような移動が飽和状態に適用できるものと仮定し，Lagrangeの解析法により分散係数 D を求める．数値実験により求められた Dy と u の関係を図4に示す．同図には実験における Dy も併記してある．

本数値実験結果を混合距離によって考察を行う．数値実験において横方向の速度成分を計算し，それにより速度変動強度 $\sqrt{v'^2}$ を求め，混合距離 l を算出する．実験の流速範囲内で平均をとったところ，それぞれ以下のものであった． $l(\text{CASE1}) = 0.09$ ， $l(\text{CASE2}) = 0.05$ ， $l(\text{CASE3}) = 0.02(\text{cm})$ これによると，横方向の混合距離は粒径のおよそ1/10程度でありかなり小さいものであると言える．

6. まとめ

本数値実験において l がこのような小さな値になったことの原因として，今回用いたモデルでは不飽和から拡張したため，球体の接点を基準に考え，流体塊は接点から接点への移動を行うことにより必ず y 方向成分を持っているとした．そのため速度変動強度 $\sqrt{v'^2}$ が大きく評価され，それにより l が小さくなったと考えられる．本実験は層流であり，流体塊の移動は本モデルよりも直進性の強いものであったといえる．また空隙率についても，面心立方型としたことに実際の浸透層との差異が生じている．以上のことから，場の状態から物質輸送特性を明らかにするためには，より流れの特性，あるいはより浸透層の状態を捉えたモデルの構築が必要である．

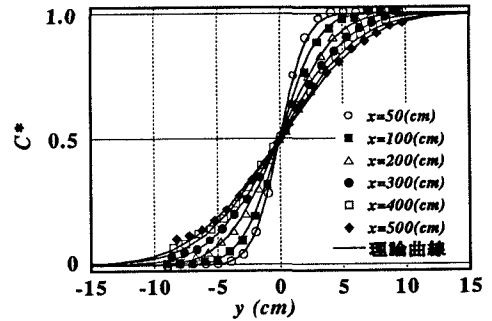


図2 比電気伝導度の空間分布(case2)

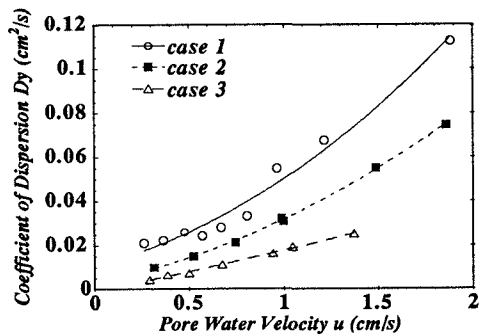


図3 横方向の分散係数と実質流速

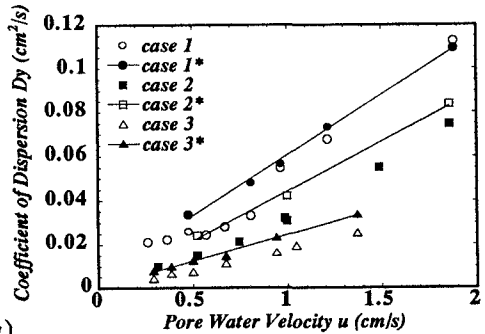


図4 モデル化による Dy と実質流速