

京都大学大学院 学生員 〇中井 俊雄

京都大学工学部 正員 岩佐 義朗

京都大学工学部 正員 後 史郎

1. はじめに; 河川流のように浸透性の境界を有する流れにおける分散現象を考える際には, 主流部と浸透層間の流れの存在と, これに伴う置換量, 物質の移動による効果を考慮する必要がある。本報では, この物質輸送を主流と浸透層間の物質交換速度を用いてモデル化し, 物質交換速度と移流分散係数の関係と連動的に検討した。ついで, 浸透層上の流れにおける移流分散係数に関する基本的知見を得ることを目的として行われた室内実験結果を報告し, 河川流における分散係数に及ぼす浸透層の影響を検討した。

2. 浸透層上の流れにおける物質輸送現象とモデル化; 1. で述べたように, 浸透性を有する流れを考え, 主流における物質輸送の基礎方程式に一次元解析法を適用すると, (1)式が得られる。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{C}_A A_A) + \frac{\partial}{\partial x}(\bar{U}_A \bar{C}_A A_A) = \frac{\partial}{\partial x}(A_A D_A \frac{\partial \bar{C}_A}{\partial x}) - \lambda \Delta K (\bar{C}_A - \bar{C}_B) \quad (1)$$

$$\lambda K \Delta (\bar{C}_A - \bar{C}_B) \equiv \int_0^A u_{Ab} C_{b0} da + \int_0^A \{u_{bC} \cos(\alpha, n) + v_{bC} \cos(\beta, n) + w_{bC} \cos(\gamma, n)\} da \quad (2)$$

ここに, 添字 A, B はそれぞれ主流, 浸透流の諸量であり, λ ; 空隙率, Δ ; 粗度, K ; 交換速度, $\bar{C}_A, \bar{C}_B$; 平均濃度であり, (1)式右边第2項は, 両層間の物質輸送量を表わし, (2)式で定義される。他の記号は慣用の通りである。

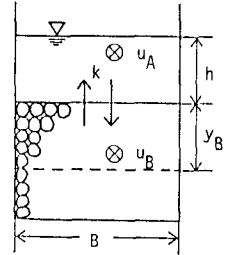


図1 物質輸送の模式図

本報で行う実験条件を考慮して, 図1に示すような濃度場として二次元的に取り扱うような場を考え, $A_A = B h = \text{const.}$, $B = \text{const.}$ (B ; 水路幅, h ; 水深), 浸透層は本路床のみに存在するとして, A_A で(1)式の両辺を除すと, (3)式となる。

$$\frac{\partial \bar{C}_A}{\partial t} + \bar{U}_A \frac{\partial \bar{C}_A}{\partial x} = D_A \frac{\partial^2 \bar{C}_A}{\partial x^2} - \frac{\lambda K}{h} (\bar{C}_A - \bar{C}_B) \quad (3)$$

浸透層についても $\lambda = \text{const.}$ として, 単位幅当りの保存則として表示すると,

$$\frac{\partial \bar{C}_B}{\partial t} + \bar{U}_B \frac{\partial \bar{C}_B}{\partial x} = D_B \frac{\partial^2 \bar{C}_B}{\partial x^2} - \frac{K}{y_B} (\bar{C}_B - \bar{C}_A) \quad (4)$$

である。ここに, y_B は浸透層のうち主流との交換が顕著な交換層の厚さである。

トレーサークラウドの移流速度 U_{jc} , 分散係数 $\bar{D}_j$ は,

$$U_{jc} \equiv \frac{dM_{j1}}{dt} \quad (5), \quad \bar{D}_j \equiv \frac{1}{2} \frac{d}{dt} (M_{j2} - M_{j1}^2) \quad (6)$$

で定義され, ここに $j = A, B$, M_{jn} は C_j の n 次モーメントである。(3), (4)式と $C_A|_{t=0} = \delta(x)$, $C_B|_{t=0} = 0$ なる初期条件のもとでフーリエ変換を用いて解き, M_{jn} を求め, さらに(5), (6)式に代入すると $t \rightarrow \infty$ で, (7), (8)式が得られる。

$$\frac{U_{cA}}{U_*} = \frac{U_{cB}}{U_*} = \frac{S_A}{S_A + S_B} \frac{U_A}{U_*} + \frac{S_B}{S_A + S_B} \frac{U_B}{U_*} \quad (7)$$

$$\frac{D_A}{h U_*} = \frac{D_B}{h U_*} = \frac{S_A^2 S_B^2}{k (S_A + S_B)^2} \left(\frac{U_A}{U_*} - \frac{U_B}{U_*} \right)^2 + \frac{S_A}{S_A + S_B} \frac{D_A}{h U_*} + \frac{S_B}{S_A + S_B} \frac{D_B}{h U_*} \quad (8)$$

ここに, $S_A = 1/\lambda$, $S_B = y_B/h$, $k = K/U_*$, U_* ; 摩擦速度である。(7), (8)式は移流速度, 分散係数がともに主流, 浸透流で同一であり, 移流速度は, 主流, 浸透流の速度をそれぞれ主流流積, 交換層流積を重みとして重みつき平均したもの, および, 分散係数は, 主流の分散係数, 浸透流の分散係数にそれぞれ主流流積, 交換層流積を重みとして重みつき平均したもの(8)式右边第2,3項)と両層の速度の差とその間の物質輸送により生じる効果(8)式右边第1項)の和で表わされることを示している。次に, 第1項について若干の検討を行うと以下のようなのである。第1項中 $\frac{S_A^2 S_B^2}{(S_A + S_B)^2} \equiv \gamma$ と定義すると, γ は明らかに $\lambda (=S_A)$, $y_B/h (=S_B)$ の関数である。後述する実験で測定された

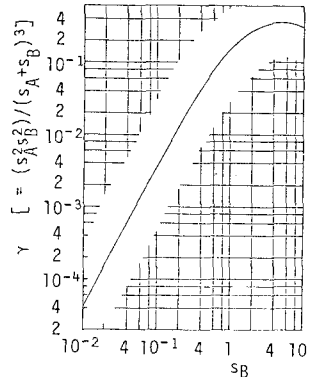


図2 γ と S_B の関係

$\lambda = 0.416$ を用いて γ と S_B の関係を示したものが図2であり、 γ は $10^{-2} \leq S_B \leq 10$ に対応して $4 \times 10^{-5} \leq \gamma \leq 4 \times 10^{-1}$ の値で変化する、しかも $S_B = 2.5A$ で極大値を有する。このことから、第1項においては $y_b(S_B)$ の評価が極めて重要であることがわかる。

3. 物質輸送現象の実験的研究; $B = 5$ cm の矩形断面水路に平均粒径 2.70 mm

の砂を 5 cm 厚積み上げ浸透性水路を作り、以下に示す2種類の実験を行った。

(A) 染料実験; 交換層厚さ y_b を求めるた

めに、染料を浸透層内に定常的に投入し、図3 染料実験の結果

交換層を可視化した(図3)。 y_b は斜線部面積 / 区間長で求められる。また、表1中の y_{bj} は、後述の実験値 u_{cj} 、(7)式より逆算されたものである。

(B) 分散実験; 移流速度、分散係数の測定を目的として塩水トレーサ実験を行った。分散雲の1次、2次モーメントの挙動は、図4、図5に示す

ようであり、これらの傾きを用いて、(5)、(6)式より算出される移流速度、分散係数は表2(2)(3)、(6)欄のようである。 u_{cp} は(7)式による理論値であり、主流流速 u_A に比べて著しく小さく、 u_{CA} 、 u_{CB} とよく一致している。(7)

欄に同一アスペクト比を有する不浸透層上の流れでの分散係数の推定値 D_A (岩佐らの実験値の最小二乗法による回帰式による)を、(9)欄に山田らの

提案する浸透層内流速分布を用いてElder⁴⁾の手法に従って求めた分散係数 D_B を示す。 D_A 、 D_B に比べて D_M が非常に大きな値をとっているが、これは本実験において S_B が $0.87 \leq S_B \leq 2.2$ と大きいため、主流、浸透層間の

交換の効果である(8)式右辺第1項が大きくなったことによる。以上の諸量を用いて(9)式より求めた交換速度を(10)、(11)欄に示す(K_A は、表1の y_{bA} を用いた値である)。

(11)欄によれば、およそ $K = 1.34 \times 10^{-2} u_{*}$ 程度の値をとる。

4. 河川における分散係数に及ぼす浸透層の影響; Godfrey・Frederickらが河川において移流分散実験を行った時の水理諸量を用いて D_p (8)式第1項)の値を推定する。

交換速度は本実験で得た $\frac{K}{u_{*}} \approx 2.0 \times 10^{-2}$ を用いるものとして、 $\lambda = 0.42$ 、 $\frac{u_b}{u_{*}} = 0$ とする。Godfrey・Frederickらの資料より $\frac{u_b}{u_{*}} \approx 10$ 、 $h \approx 10^2$ cm 程度である。まず、 $r = r_{max}$ ($= 4 \times 10^1$)として y_b の影響を最大に見積って試算した D_p と実験値 D_{ob} とを比較する(表3)と、 D_p の影響が小さくないケースもある。しかし、奥河川においても $y_b \approx 2 \sim 4$ cm 程度の値とすると、 $\gamma = 10^{-2} \sim 10^{-3}$ の値であり、結局 $\frac{D_p}{D_{ob}}$ は $0.5 \sim 5$ 程度の値となり、 $\frac{D_{ob}}{h u_{*}}$ や先述の回帰式を $20 \leq \frac{B}{h}$

と 50 に外挿して得られる $\frac{D_A}{h u_{*}} = 125 \sim$

313 に対して無視し得る大きさのものとなる。河川においては y_b の推定が重要な課題となるが、浸透層の存在による分散係数の増大は、さほど

大きなものではないと考えられる。

《参考文献》1) 三石; 京都大学修士論文, 1985 2) 岩佐, 緩, 葉師寺; 京都大学防災研究所年報, 1983

3) 山田, 川端; 土木学会論文報告集 4) Elder, J.W.; Jour. of Fluid Mech., 1959 5) Godfrey and Frederick; U.S. Geological Survey, 1970

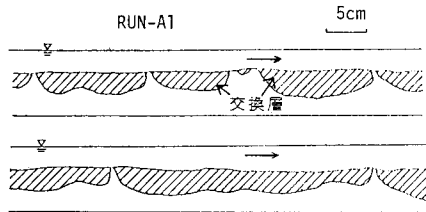


表1 交換層厚

(1) RUN NO.	(2) y_b (cm)	(3), y_{bA} (cm)	(4), y_{bB} (cm)
A1	2.08	0.79	1.32
A2	2.55	2.87	2.83
B1	2.71	1.43	1.57
B2	3.27	2.11	2.04
C1	3.36	2.28	3.54
C2	2.95	2.22	2.43

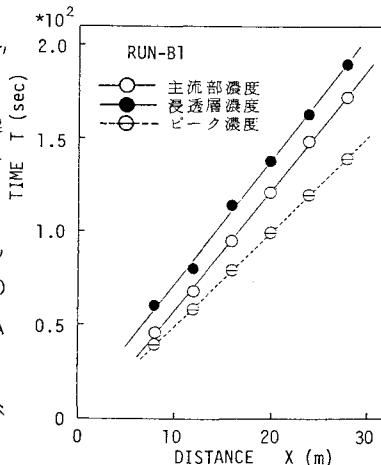


図4 1次モーメント

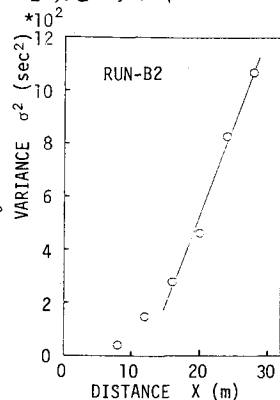


図5 2次モーメント

表3 分散係数に及ぼす浸透層の影響

(1) RUN NO.	(2) u_{CA} (cm/sec)	(3) u_{CB} (cm/sec)	(4) u_{CP} (cm/sec)	(5) u_A	(6) $\frac{D_M}{h u_{*}}$	(7) $\frac{D_A}{h u_{*}}$	(8) B/h	(9) $\frac{D_B}{h u_{*}}$	(10) $\frac{K}{u_{*}}$	(11) $\frac{K_A}{u_{*}}$
A1	13.0	12.0	11.5	14.8	178	13.1	2.10	8.06	7.54	1.65
A2	5.31	5.35	6.19	10.6	1204	26.2	4.20	11.3	1.97	1.73
B1	15.5	15.2	13.6	19.8	663	14.5	2.33	8.29	2.68	1.16
B2	10.7	10.8	9.28	16.9	1454	21.1	3.38	8.43	1.71	1.12
C1	24.5	21.2	22.0	34.3	1039	13.2	2.13	5.44	2.57	1.68
C2	20.0	19.4	18.4	30.4	1023	17.9	2.88	4.89	2.75	2.07

(1) RUN NO.	(2) $\frac{D_p}{h u_{*}}$	(3) $\frac{D_{ob}}{h u_{*}}$
Test-1	157	556
Test-2	219	222
Test-3	30	211
Test-4	130	210
Test-5	153	238
Test-6	539	258
Test-7	1398	252
Test-8	5510	154
Test-10	832	182