

浸透層上の流れにおける物質輸送

京都大学工学部 正員 岩佐 義朗 京都大学工学部 正員 綾 史郎
 建設省 正員 三石 真也 京都大学大学院 学生員 中井 俊雄

1. はじめに; 浸透層上の流れの特色は、主流部と浸透層間の流れが存在し、これに伴い主流部と浸透層の間を運動量、物質が移動することであるが、本研究はこの物質輸送と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との関係を明らかにするものである。さらに、室内水路実験を行うことにより、物質交換速度、交換層厚、浸透層上の流れの分散係数の測定を行った。

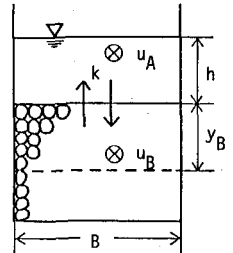
2. 浸透層上の流れにおける物質輸送現象とモデル化; 河川流のような浸透層上の流れを考え、主流について一次元解析法を適用すると、

(1)式が得られる。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{C}_A A) + \frac{\partial}{\partial x}(\bar{u}_A \bar{C}_A A) = \frac{\partial}{\partial x}(A A D \frac{\partial \bar{C}_A}{\partial x}) - \lambda K \Delta(\bar{C}_A - \bar{C}_B) \quad (1)$$

ここに、右辺第二項は、両層間の物質輸送量を表し、交換速度 K は、

(2)式で定義され、添字 A, B はそれぞれ主流、浸透流の諸量であることと示す。他の記号は、慣用のとおりである。



$$\int_A u_{amb} C_{nb} dA + \int_A \{u_b^2 C_b \cos(\alpha, n) + v_b^2 C_b \cos(\beta, n) + w_b^2 C_b \cos(\gamma, n)\} dA = \lambda K \Delta(\bar{C}_A - \bar{C}_B) \quad (2)$$

本研究で行う実験条件を考慮して、流れ場として二次元的に取り扱えるような場(図1参照)を考え、 $A_A = B h = \text{const.}$ $B = \text{const.}$ (B : 水路幅, h : 水深)、浸透面は、水路床のみに存在するとして、(1)式は、 $\frac{\partial \bar{C}_A}{\partial t} + \bar{u}_A \frac{\partial \bar{C}_A}{\partial x} = D_A \frac{\partial^2 \bar{C}_A}{\partial x^2} - \frac{\lambda K}{h}(\bar{C}_A - \bar{C}_B)$ (3)

浸透層についても単位幅当りの保存則として表示すると、

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

(ここに y_B : 浸透層のうち、主流との物質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 D_j は、

$$u_{jc} \equiv \frac{dM_{j1}}{dx} \quad (5) \quad D_j \equiv \frac{1}{2} \frac{d\sigma_j^2}{dx} = \frac{1}{2}(M_{j2} - M_{j1}^2) \quad (6)$$

で定義される。但し、 $j = A, B$, M_{jm} は、 C_j の m 次モーメントである。(3),(4)式を、フーリエ変換を用いて解き、 M_{jm} を求め、さらに(5),(6)式に代入すると $x \rightarrow \infty$ において、

$$\frac{u_{cA}}{u_{*}} = \frac{u_{cB}}{u_{*}} = \frac{S_A}{S_A + S_B} \cdot \frac{u_A}{u_{*}} + \frac{S_B}{S_A + S_B} \cdot \frac{u_B}{u_{*}} \quad (7)$$

$$\frac{D_A}{h u_{*}} = \frac{D_B}{h u_{*}} = \frac{S_A^2 S_B^2}{K(S_A + S_B)^3} \left(\frac{u_A}{u_{*}} - \frac{u_B}{u_{*}} \right)^2 + \frac{S_A}{S_A + S_B} \cdot \frac{D_A}{h u_{*}} + \frac{S_B}{S_A + S_B} \cdot \frac{D_B}{h u_{*}} \quad (8)$$

ここに、 $S_A = \frac{1}{K}$, $S_B = \frac{y_B}{K}$, $K = \frac{\lambda K}{h}$, u_{*} : 摩擦速度である。(7)(8)式より次のことが明らかである。

1) 移流速度及び分散係数は、主流、浸透流で同一である。

2) 移流速度は、主流の平均流速、浸透流の平均流速にそれぞれ主流流積、交換層流積を重みとしてつけて平均化したものに一致する。

3) 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

みとしてつけて平均化したものと、
 両層の速度の差とその間の物質輸
 送により生じる効果の和である。

$\overline{D_A}$, $\overline{D_B}$ を実験により求め、 S_j , u_j ,
 D_j が既知であれば、(8)式により交
 換速度を求めることが可能となる。

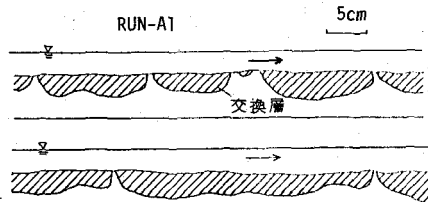


図2 染料実験の結果

表1 交換層厚

(1) RUN NO.	(2) y_b (cm)	(3) y_{bA}	(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

3. 物質輸送の実験的研究;

$B=5(\text{cm})$, 長さ34mの矩形断面水路に平均粒径2.77mmの砂
 を5cm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¹⁾。

(A)染料実験: 交換層厚 y_b を求めるため、染料を浸透層内に
 定常的に投入し交換層を可視化した(図2)。斜線部面積を
 区間長で除することにより、 y_b を求めた。表1の y_{bj} は、後
 述の実験値 u_{ej} , (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トレ
 ーサー実験を行った。分散重の1次、2次モーメントは、
 図3、図4に示すようであり、これらの傾きと、(5)、(6)式
 に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_{ep} は、(7)式による理論値であり、 u_{CA} , u_{CB}
 とよく一致する。また主流実流速 u_A (5)欄)に比べ著しく小さい。(7)

欄に同一のアスペクト比を有する不透透層上の流れでの分散係数の
 推定値(岩佐らの実験値²⁾の最小二乗法による回帰式による)を(9)欄
 に山田³⁾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を示す。 D_A , D_B に比べ、 D_H が大変大きい値とな
 っており、これは本実験において D_B (=1/2)が大きいため、主流、浸
 透流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(8)式により求めた交換速度を表2(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、物質交
 換速度はおおよそ $K=1.34 \times 10^{-2} u_*$ 程度の値をとる。

今後は、自然河川への適用や、交換層厚
 y_b の定量化を考えていきたい。

《参考文献》

- 1)三石; 京都大学修士論文, 1985
- 2)岩佐, 綾, 榎師; 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, 1982
- 4)Elder, J.W.; Jour. of Fluid Mech., 1959

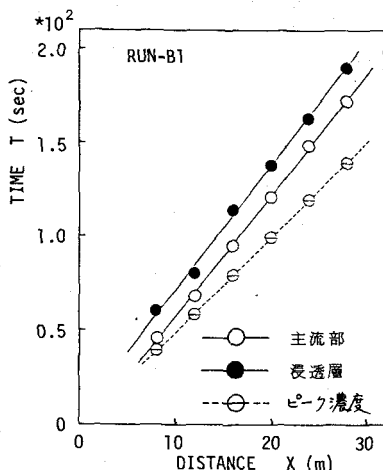


図3 1次モーメント

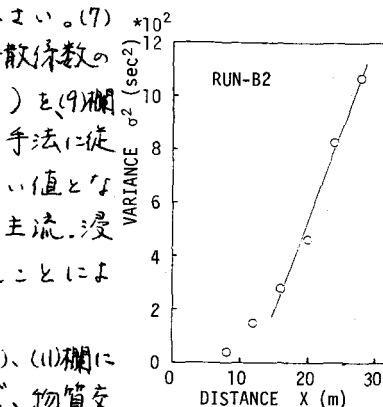


図4 2次モーメント

表2 実験結果

(1) RUN NO.	(2) u_{CA} (cm/sec)	(3) u_{CB} (cm/sec)	(4) u_{CP} (cm/sec)	(5) u_A (cm/sec)	(6) D_H (hu_*)	(7) D_A (hu_*)	(8) B/h	(9) D_B (hu_*)	(10) k/u_*	(11) k_A/u_* ($\times 10^{-2}$)
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