

河口における塩分侵入

長崎大学工学部 正 古 本 勝 弘 正 椿 東 一 郎
正 武 政 剛 弘 正 薦 田 広 章

1. まえがき

緩・強混合型の感潮部における塩分の侵入は一般に分散現象とみなされて、断面平均濃度を問題とするときには、1次元移流分散方程式が解析手段として用いられる。分散係数は流れに支配される量であるが、感潮部の流れは、淡水流入による流れ、潮汐による往復流および流れ方向密度勾配に起因する循環流により構成され、極めて複雑であるために感潮部の分散係数を与える式は未だ確立されていない。本報告は、筑後川と川内川の感潮部における塩分の観測資料をもとに、分散係数の各種物理量による表現を試みたものである。

2. 基礎式

断面平均塩分濃度 C についての1次元移流分散方程式は A , U , D を流水面積、断面平均流速、分散係数とし

$$\partial C / \partial t + U \cdot \partial C / \partial x = 1 / A \cdot \partial (A D \cdot \partial C / \partial x) / \partial x \quad (1)$$

ここで、河道内貯留水量 $V = \int_0^L A(x, t) dx$ (x 軸は、感潮部最上流端を原点とし、下流向きにとる) を用いて、変数を x から V に変換すると、 Q_r を河川固有流量として、(1)式は、

$$\partial C / \partial t + Q_r \cdot \partial C / \partial V = \partial (A^2 D \partial C / \partial V) / \partial V \quad (2)$$

この式で、移流項の係数が Q_r となっており、これが一定の場合には、 V 座標に対する塩分 C の時間的変化は小さくなる筈である。

筑後川で観測された塩分の分布を V 座標に対してプロットして図-1に示した。ただし、塩分 C は海水塩分 C_0 で、貯留量 V は満潮時の河口における値 V_H で規準化し (以下、 $c = C/C_0$, $v = V/V_H$ とする)、満潮、干潮およびその中間の潮時における塩分分布を示している。これらによると、 c は v に対してほぼ一定であり、潮時には依らないことがわかる。従って、式(2)で非常項を省略することができ、 $v=0$ で $c = dc/dv = 0$ として積分し、

$$Q_r \cdot c = (A^2 D / V_H) \cdot (dc / dv) \quad (3)$$

$A^2 D$ を v に対して与えることができれば、適当な境界条件のもとにこれを解いて塩分 c の分布を得ることができる。逆に、調査により得られた塩分 c の分布と平均面積 A とを v に対して知ると、この式から分散係数 D を算出することができる。

3. 分散係数

Fischer¹⁾ は均質で定常な河川流の分散係数を次のように与えた。

$$D = - \frac{1}{A} \int \hat{u} \hat{c} dA / \frac{\partial c}{\partial x} = \langle \hat{u}^2 \rangle T_L = K \frac{U^2 B^2}{d u_*} \quad (4)$$

ここに、 $\langle \rangle$, $\hat{}$ は断面平均とそれからの偏差を示し、 B , d , u_* , T_L は河幅、最大水深、摩擦速度、Lagrangian time scaleである。

往復流では横断方向の混合が大きくなければ充分な縦分散が生じないことが起こる。この場合、縦分散は往復流の周期 T と横断面内の混合に要する代表時間 T_L との比に支配される。往復流に関する研究はいくつかあるが、古本・島田²⁾ は往復流の分散係数として

$$D_T / D_0 = 1 - 4 (T_L / T) \tanh(T / 4 T_L) \\ \approx (1/48) \cdot (T_L / T)^2 \quad \dots\dots\dots T_L / T \geq 0.2 \quad (5)$$

を与え、放物形断面に対して、 $\varepsilon_t = 1.0 d u_*$ として、

$$D_0 = 1.3 \times 10^{-3} B^2 U^2 / d u_*$$

$$T_L = 0.027 B^2 / d u_*$$

を得た。この場合、 U には U_T (潮流流速の $r \cdot m \cdot s$)、 u_* には U' / φ (U' は実流速の $r \cdot m \cdot s$ 、流速係数 $\varphi=15$) を用いると

$$D_T = 2.48 \times 10^{-3} U_T^2 T^2 / (B^2 / U' d)$$

感潮部では流下方向の密度勾配に起因して縦横断方向の循環流が存在し、分散現象に大きく影響する。Fischer³⁾ は Mersey エスチュアリにおいて、種々の要因による

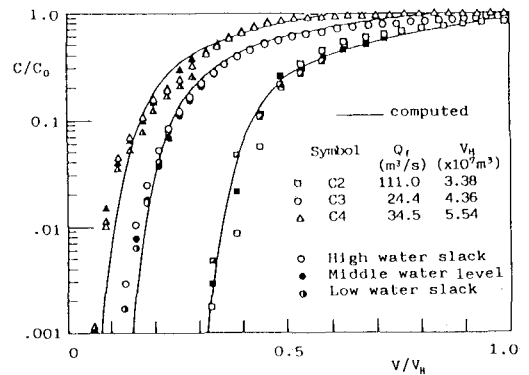


図-1 筑後川における $C \sim V$

表-1 筑後川、川内川の諸元

River, No. (date)	Q_r m^3/s	ΔH m	$d\rho/\rho$	A_r m^2	B_r m	U_r m/s	V_{Hr} $\times 10^6 m^3$	R_{Hr}	U_r/U'	K_c	K_f	U_*
Chikugo, C-1 (1966.8.18)	95.0	4.69	.0216	3570	1020	.515	5.64	.213	.041	0.5	.02	0.8
Chikugo, C-2 (1966.9.23)	111.0	1.75	.0233	3020	990	.170	3.38	3.56	.129	0.6	.005	1.1
Chikugo, C-3 (1967.9.1)	24.4	3.53	.0234	3230	970	.379	4.36	.134	.017	0.7	.015	0.8
Chikugo, C-4 (1967.10.5)	34.5	4.78	.0257	3540	1010	.536	5.54	.086	.014	0.7	.03	0.6
Sendai, S-1 (1973.9.26)	69.0	2.73	.0255	1650	570	.311	1.72	1.35	.224	0.8	.03	0.85
Sendai, S-2 (1980.10.29)	85.0	2.00	.0301	1620	620	.236	1.64	3.23	.139	0.7	.02	0.9

分散係数を評価して、この横断方向循環流が最大の効果をもつことを指摘した。しかし、彼が与えた分散係数の関係式は、渦動粘性を一定とした Hansen-Rattray の理論を基にしており、成層流の効果を的確に取り込んだものとは言えない。そこで、密度循環流が存在する場合においても分散係数は基本的には、(4)式の形をもち、係数 K' が循環流の影響を受けるものと考え、次元的な考察から、 K' は Overall Richardson 数 Ri の関数とした。すなわち、最も単純な形として、重力循環流に起因する分散係数を次のように置いた。

$$R_i = \frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dx} \frac{d^2}{U^2}, \quad D_c = K'_c g d \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} B^2 / u_* = K_c g d \frac{\Delta \rho}{\rho} \frac{\partial c}{\partial x} B^2 / U' \quad (6)$$

ただし $\Delta \rho$ は海水と淡水の密度差である。従って、分散係数を重力循環流によるもの、往復流によるもの、および流入淡水によるものの和として

$$D = K_c g d \frac{\Delta \rho}{\rho} \frac{\partial c}{\partial x} \frac{B^2}{U'} + K_T U_T'^2 T \left(\frac{T}{B^2/U'd} \right) + K_f \frac{B^2 U_f}{d} \quad (7)$$

これを (3) 式に用いる。ただし、 $dc/dx = A \cdot dc/dv$ 、 $d \doteq A/B$ として、2次式を解いて

$$\frac{dc}{dv} = -F(K_T, K_f) + \sqrt{F(K_T, K_f)^2 + \frac{Q_f U_f^2 V_H^2}{K_c \frac{\Delta \rho}{\rho} g A^4 B}} c, \quad F(K_T, K_f) = \frac{K_T U_T'^2 T^2 V_H}{2 K_c \frac{\Delta \rho}{\rho} g A B^4} + \frac{K_f Q_f U_f^2 V_H}{2 K_c \frac{\Delta \rho}{\rho} g A^4 / B^2} \quad (8)$$

4. 実河川への適用

河道形状が既知である河川で、潮汐条件及び、 Q_f が与えられると、 A 、 B 、 U 等は v に対して求められる。便宜上、境界条件を $v = v_* = V_* / V_H$ で $c = 1$ として、(7)式を数値的に解くが、係数 K_c や v_* が未知である。そこで、先ず筑後川と川内川について、 K_c と v_* の近似値を求めた。両河川の観測口の諸元は表-1の通りである。塩分の勾配が大きな領域では、往復流と淡水流による分散効果は相対的に小さいとして、(8)式で $F(K_T, K_f)$ を省略する。残りの項に含まれる $(A^4 B)^{1/2}$ は v に対して次のように近似される。 $(A^4 B)^{1/2} = p V^n = p V_H^n v^n$ (9) 筑後川で $p = 5.45 \times 10^{-7}$ 、 $n = 1.97$ 、川内川で $p = 1.92 \times 10^{-8}$ 、 $n = 2.22$ である。 U' はほぼ一定で、 U' (添字) は河口の値を示す)とおき、(9)を用いて、(8)を解くと、

$$1 - c^{1/2} = \frac{1}{2(n-1)} \left(\frac{U_e Q_f}{K_c \frac{\Delta \rho}{\rho} g p^2 V_H^2 v^{2(n-1)}} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{v^{n-1}} - \frac{1}{v_*^{n-1}} \right) \quad (10)$$

$c^{1/2}$ の観測値を $v^{-(n-1)}$ に対してプロットして図-2 に示す。 K_c は同図中の直線の勾配から決り、 v_* は直線が $c = 1$ を切る v の値となる。この第1近似の K_c 、 v_* は一定とはならない。これらは、更に感潮部の全体的な密度流効果の大小にも関係すると考えられるので、Fischerが提案した Estuarine Richardson 数 $Ri_E = Q_f T (\Delta \rho / \rho) g d_* / V_H U_*'^2$ で整理して、図-3 に $\bullet$ で示した。全体的な塩分分布を求めるには(8)式の全ての項を含めて計算する必要がある。前出の $K_T = 2.48 \times 10^{-3}$ を用いて、計算結果が観測の c の分布によく一致する K_c 、 K_T 、 v_* を探した。その結果を図-3に□で示した。それらの値を用いた塩分分布の計算結果を図-1 に実線で示した。 x 座標で c を知るためには、各時刻の $V \sim x$ 関係を用いて変換する。

各係数については、多少のバラつきはあるものの潮汐条件が大きく異なり、別の河川の係数が近い値となる。このことは、与えた分散係数の関数形がほぼ妥当なことを示している。 おわりに、ここで用いた観測資料は建設省筑後川、川内川各工事事務所から提供されたものである。ここに記して、感謝の意を表します。

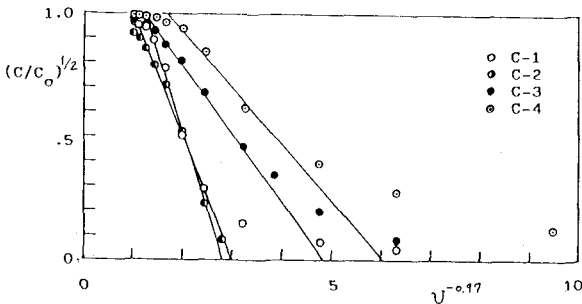


図-2 式(10)の解に対する表示

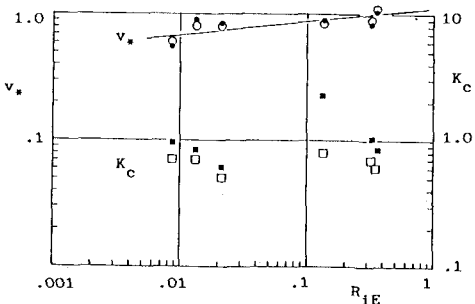


図-3 K_c 、 $v_* \sim Ri_E$

参考文献 1) Fischer, H.B. "Mixing in Inland and Coastal Water", Academic Press, 1979.
 2) 古本・島田、九大工学集報、43巻、2号、pp.109-115, 1970.
 3) Fischer, H.B. J.F.M., Vol. 53, part 4, pp.671-687, 1972.