II-194　強混合河川における塩分の数値計算法と縦分散係数について

長崎大学工学部　正員　古本勝弘

1. まえがき

強混合型感潮河川の塩分侵入状況を予測することは原理的には一次元の拡散方程式を周期的に変化する流速U, 河積A, 縦分散係数D_Lなどの非定常な水理条件を与えて解くことに帰する。しかし実河川においてD_Lを評価することが困難なことゝ, 非定常係数をもつ拡散方程式の取り扱いが面倒であるため, D_Lの推定法と式の簡略な解法について種々の研究がなされてきた。末尾にあげた文献で著者らは簡略な解法を紹介しているが, 本報告はその解法を若干手直し, 筑後川の塩分について計算を行って実測値とよく一致するD_Lを内挿し, その値が実河川でどの程度か, また潮汐および河川固有流量によりどの様に変化するかを求めたものである。

2. 基礎拡散方程式

外海に注ぐ多くの河川では河口でのFlushing作用が強いため下げ潮時に放出される河川水は外海で充分混合稀釈され, 上げ潮時に河道に流入する流れは一定の塩分をもつ海水である。従って河口ではいかなる潮時でも一定の海水塩分濃度を保つと考えられる。この境界条件のもとに一次元拡散方程式

$$\partial c/\partial t + U(\partial c/\partial x) = (1/A)\ \partial/\partial x(AD_L\cdot\partial c/\partial x) \quad \cdots\cdots (1)$$

をU, AおよびD_Lを与えて数値的に解くことは可能である。しかし位置x, 潮時もとゝもに変化するそれら外的条件を与えることはかなり面倒な仕事である。そこで計算を簡略化するため(1)式を次の様に変形する。感潮部最上流端を原点とし下流に向ってx軸をとり, 任意のx断面までの感潮部の水量をVとし(2)式で表わせば, 上流端より流入する河川流量をRとすると, x点における流速は連続の式から(3)式で与えられる。

$$V = \int_0^x A(x.t)\,dx \quad \cdots\cdots (2) \qquad U = \left(R - \frac{\partial V}{\partial t}\right)/A \quad \cdots\cdots (3)$$

(1)式の独立変数(x,t)を(2)を用いて(V,t)に変換すると, (1)式は次式となる。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + R\cdot\frac{\partial c}{\partial V} = \frac{\partial}{\partial V}\left(A^2D_L\frac{\partial c}{\partial V}\right) \quad \cdots\cdots (4)$$

この式でRは勿論Vの関数ではなく, 時間的に一定ならばRとゝもに移動するV座標から見て$V' = V - Rt$とおけば(4)式の左辺第2項は消え計算は数段簡略化される。更に, A^2D_Lの値に一潮汐間の平均値をVの関数として与えると(4)式は数値的に解ける。一潮汐間の平均値を用いることは少々粗らすぎる置き方のようであるが, Vが一定な点は入退潮とゝもに地理的に移動しており一定のVに対するAあるいは径深の時間的変化は非常に小さいと考えられるので不合理ではなく, 独立変数をVとした利点でもある。但しD_Lは流速, 径深の関数であると考えられており, この流速に平均化した値を使う不合理だけは残る。この様に$A^2D_L(\equiv K)$をVのみの関数とおき(4)式を差分式に直す。explicitな差分式は安定性の問題が付きまとうが, その心配のないデュフォ・フランケルの差分式を用いる。V, tを等しい間隔に分割し$V = m\cdot\Delta V$, $t = n\Delta t$における濃度を$C_{m.n}$とするとΔV, Δtの高次微小項を省略して,

$$C_{m.n+1}(1+2K_m\cdot\lambda) = C_{m,n-1}(1-2K_m\lambda) + C_{m-1,n}\{(-K_{m+1}+K_{m-1}+2K_m)\lambda/2 + R\,\Delta t/\Delta V\}$$
$$+ C_{m+1,n}\{(K_{m+1}-K_{m-1}+2K_m)\lambda/2 - R\,\Delta t/\Delta V\} \quad \cdots\cdots (5)$$

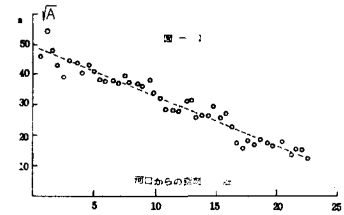
こゝに$\lambda = \Delta t/\Delta V^2$. 前述のように$R$は塩分を$V$に対して平行移動させる効果をもつのみであるから(5)は次の様に置く方が濃度の曲率を無視した影響も避けられ好都合である。

$$C_{m,n+1}(1+2K_{m'}\lambda) = C_{m',n-1}(1-2K_{m'}\lambda) + C_{m'-1,n}(-K_{m'+1}+K_{m'-1}+2K_{m'})\lambda/2$$
$$+ C_{m'+1,n}(K_{m'+1} - K_{m'-1} + 2K_{m'})\lambda/2 \quad \cdots\cdots (6)$$

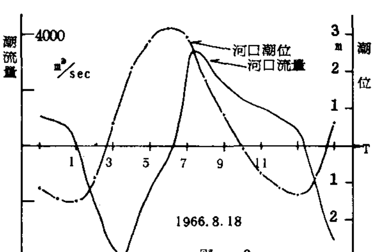
こゝに　$m' = m - [2(n+1)R\,\Delta t/\Delta V] + [2nR\,\Delta t/\Delta V]$　　$[\cdots]$ = Gaussの整数記号

3. 筑後川に対する計算と縦分散係数について．

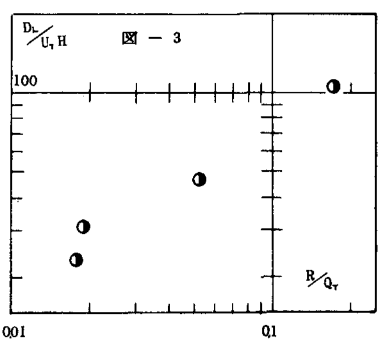
大きな潮汐の有明海に注ぐ筑後川感潮部は小潮時に緩混合型となることを除けば典型的な強混合型の塩分々布を呈す． 平均潮位時の河積 A の場所的変化を図－1 に示す． 感潮部とみられる 30 km まではばらつきはあるものゝ，$\sqrt{A}$ と距離とはほゞ直線関係にあり，或る時刻の (2) 式で定義する V は x^3 に比例するとみられる． 潮汐波の位相おくれが無いものとすれば河道中の水体は形状を変へることなく潮汐とゝもに河道を移動していると考えてよい． この場合潮流々速は V には依らないことゝなり，$D_L \propto H$ (径深) $\propto V^{1/3}$． 故に $A^2 D_L \propto V^{5/3}$ の関係を仮定する． 境界条件を与えるべき地理的固定点河口の V_0 は潮汐とゝもに増減するが，干潮時の河口の V に入潮量を加えて V_0 を与えることができる． 河口での入退潮量は潮時とゝもに図－2 に示すような波形であり Fourier 級数で表示して与えた． 筑後川は有明海の湾奥に位置しており，下げ潮時放出される河川水は河口を出たところに停滞し上げ潮時その一部は再び河道に流入するため満潮時近くまで河口の塩分濃度は上昇を続ける． このため地理的河口に境界条件を与えることは現実と合致せず少くとも 5～6 km 以上外海に出たところを境界条件の与点としなければならない． 従って，その点まで仮想的に河道を延長した．その点の入退潮量は河口のそれから外挿した． 計算は過去に実施された四回の塩分観測に対応して行った．その観測時の水理条件その他を表－1 に総めて示した． 表中の D_L は観測された塩分々布と計算分布とがよく合致するように try and error で求められた．$V_m \doteqdot 1.2 \times 10^7 m^3$ なる点での値である．



Stroke は V_m なる点が干→満潮間に河道を移動する距離．
$U_T = 2 \times (\text{Stroke})/(\text{一潮周期})$，すなはち V_m の点が移動する平均速度である．
H は V_m の点の径深であり，ほゞ 2 m． Q_T は河口における平均入退潮量．
Harleman は D_L を平均潮流速と径深の積で表示することを提案しており，$D_L/U_T H$ を表中に示したが一定値とはならない． 河道内での分散は潮流と河川流によると考えられるので R/Q_T との関係を調べると相関がかなり強いことを認めた．(図－3) 河道内だけの現象であれば周期流が分散には最も支配的と考えられるが，図－4 に示す通り，下げ潮では河道内塩分は殆んど河川外に出て大きな混合稀釈を受け，再び流入している． 従って，R が大であれば塩分を河川外に流掃する効果が大であり，間接的に縦分散係数を大きくする役目を果していると考えられる．



図－2



図－3

おわりに，貴重な観測資料を与えられた建設省筑後川工事事務所に謝意を表します．

文献） Shinohara, Tsubaki, Awaya & Furumoto "Numerical Analysis on the Salt Intrusion in the Tidal Estuary of Well-Mixed Type" Proc. of 13th Congress of I.A.H.R., (c) 1969

表－1

観測日	潮位差	R	Q_T	Stroke	U_T	D_L	$D_L/U_T \cdot H$	R/Q_T
1966.8.18	4m59	95.0 m³/s	1820 m³/s	13.9 km	.644 m/s	60 m²/s	46.6	0.0522
1966.9.23	1.72	111.0	640	5.1	.236	50.5	107.0	0.1730
1967.9.1	3.53	24.4	1380	11.5	.532	25.0	23.5	0.0177
1967.10.5	4.78	34.5	1840	14.0	.648	41.5	32.0	0.0187