

京都大学大学院 学生員 青木 学  
 京都大学工学部 正員 岩佐 義朗  
 京都大学工学部 正員 井上 和也

1. まえがき 感潮河川における塩分の混合形態は個々の河川によって定ま、ているのではなく、潮位、流量、あるいは地形などによ、て時間的かつ場所的に絶えず変化するものとするのが一般的であろう。従来から数多く行われている二層流モデルによる研究は弱混合型を想定したものと考えられるが、実際の河川ではむしろ強混合型の出現が圧倒的に多く、二層流モデルではその適用に限界があるのは明らかである。そこで本報は、感潮河川における塩分の混合形態の変遷の追跡を数値解析によ、て実現するモデルの構成を目的とし、その第一歩として横断方向の一様性を仮定した鉛直二次元モデルによ、て仮想河口部を対象に数値シミュレーションを実施し、モデルの妥当性を検討しようとするものである。

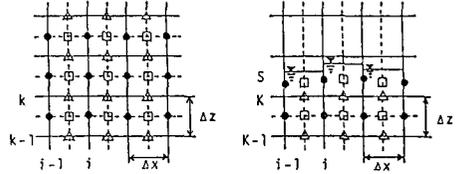
2. 基礎方程式 鉛直二次元モデルでの流況および物質拡散の数学モデルは、流況の鉛直方向の加速度が重力のそれに比して小さいとすれば、次式で構成される。

$$\text{運動方程式} \quad \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial UV}{\partial x} + \frac{\partial UW}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \quad (1)$$

$$0 = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (2)$$

$$\text{連続式} \quad \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$\text{拡散方程式} \quad \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial UC}{\partial x} + \frac{\partial WC}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (D_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (D_z \frac{\partial C}{\partial z}) \quad (4)$$



内部差分スキーム 表面差分スキーム  
 ● U 計算位置 △ W 計算位置 □ 濃度計算位置

図-1 差分スキーム

3. 離散式 (1)~(4)式を Control Volume について積分し、つぎのような離散式に変形する。

$$\text{運動方程式 表面} \quad \bar{c}_{i+1/2, s}^{n+1} \frac{U_{i+1/2, s}^{n+1} - U_{i+1/2, s}^n}{\Delta t} + \bar{U}_{i, s}^{n+1} \frac{1}{2} \left\{ \frac{c_{i+1/2, s}^{n+1} - c_{i+1/2, s}^n}{\Delta t} + \frac{c_{i+1/2, s}^{n+1} - c_{i+1/2, s}^n}{\Delta t} \right\} + \frac{1}{\Delta x} \left\{ c_{i+1/2, s}^{n+1} U_{i+1/2, s}^{n+1} \bar{U}_{i+1/2, s}^{n+1} - c_{i+1/2, s}^n U_{i+1/2, s}^n \bar{U}_{i+1/2, s}^n \right\} - W_{i, k}^{n+1} U_{i, k+1/2}^{n+1} + \frac{1}{\Delta x} \frac{1}{\rho} \left\{ c_{i+1/2, s}^{n+1} \bar{P}_{i+1/2, s}^{n+1} - c_{i+1/2, s}^n \bar{P}_{i+1/2, s}^n \right\} + \frac{1}{\rho} \bar{c}_{i, k}^{n+1} = 0 \quad (5)$$

$$\bar{P}_{i+1/2, s}^{n+1} = \frac{1}{2} \bar{P}_{i+1/2, s}^{n+1} g \{ H_{i+1/2} - \Delta z (K-b) \} \quad (6)$$

$$\text{内部} \quad \frac{U_{i+1/2, k}^{n+1} - U_{i+1/2, k}^n}{\Delta t} + \frac{1}{\Delta x} \left\{ U_{i+1/2, k}^{n+1} \bar{U}_{i+1/2, k}^{n+1} - U_{i+1/2, k}^n \bar{U}_{i+1/2, k}^n \right\} + \frac{1}{\Delta z} \left\{ W_{i, k+1}^{n+1} \bar{U}_{i, k+1/2}^{n+1} - W_{i, k}^{n+1} \bar{U}_{i, k-1/2}^{n+1} \right\} + \frac{1}{\Delta x} \frac{1}{\rho} \left\{ \bar{P}_{i+1/2, k}^{n+1} - \bar{P}_{i+1/2, k}^n \right\} - \frac{1}{\Delta z} \frac{1}{\rho} \left\{ \bar{c}_{i, k+1}^{n+1} - \bar{c}_{i, k}^{n+1} \right\} = 0 \quad (7)$$

$$\bar{P}_{i+1/2, k}^{n+1} = g \left\{ \sum_{k=k}^{k+1} \Delta z \bar{P}_{i+1/2, k}^{n+1} - \frac{1}{2} \Delta z \bar{P}_{i+1/2, k+1}^{n+1} \right\} + 2 \bar{P}_{i+1/2, s}^{n+1} \quad (8)$$

$$\text{連続式 表面} \quad \frac{c_{i+1/2, s}^{n+1} - c_{i+1/2, s}^n}{\Delta t} + \frac{M_{i+1/2, s}^{n+1} - M_{i+1/2, s}^n}{\Delta x} = 0 \quad (9)$$

$$\text{内部} \quad \frac{U_{i+1/2, k}^{n+1} - U_{i+1/2, k}^n}{\Delta t} + \frac{W_{i+1/2, k+1}^{n+1} - W_{i+1/2, k}^{n+1}}{\Delta z} = 0 \quad (10)$$

$$\text{拡散方程式 表面} \quad \bar{c}_{i+1/2, s}^{n+1} \frac{C_{i+1/2, s}^{n+1} - C_{i+1/2, s}^n}{\Delta t} + C_{i+1/2, s}^{n+1} \frac{1}{2} \left\{ \frac{c_{i+1/2, s}^{n+1} - c_{i+1/2, s}^n}{\Delta t} + \frac{c_{i+1/2, s}^{n+1} - c_{i+1/2, s}^n}{\Delta t} \right\} + \frac{1}{\Delta x} \left\{ c_{i+1/2, s}^{n+1} U_{i+1/2, s}^{n+1} \bar{C}_{i+1/2, s}^{n+1} - c_{i+1/2, s}^n U_{i+1/2, s}^n \bar{C}_{i+1/2, s}^n \right\} - W_{i+1/2, k}^{n+1} C_{i+1/2, k}^{n+1} - \frac{1}{\Delta x} \bar{D}_x \left\{ c_{i+1/2, s}^{n+1} \bar{C}_{i+1/2, s}^{n+1} - c_{i+1/2, s}^n \bar{C}_{i+1/2, s}^n \right\} + \bar{D}_z \frac{C_{i+1/2, s}^{n+1} - C_{i+1/2, s}^n}{\Delta z} = 0 \quad (11)$$

$$\text{内部} \quad \frac{C_{i+1/2, k}^{n+1} - C_{i+1/2, k}^n}{\Delta t} + \frac{1}{\Delta x} \left\{ U_{i+1/2, k}^{n+1} \bar{C}_{i+1/2, k}^{n+1} - U_{i+1/2, k}^n \bar{C}_{i+1/2, k}^n \right\} + \frac{1}{\Delta z} \left\{ W_{i+1/2, k+1}^{n+1} \bar{C}_{i+1/2, k+1}^{n+1} - W_{i+1/2, k}^{n+1} \bar{C}_{i+1/2, k}^n \right\} - \frac{1}{(\Delta x)^2} \bar{D}_x \left\{ C_{i+1/2, k}^{n+1} - 2 C_{i+1/2, k}^n + C_{i+1/2, k}^{n-1} \right\} - \frac{1}{(\Delta z)^2} \bar{D}_z \left\{ C_{i+1/2, k}^{n+1} - 2 C_{i+1/2, k}^n + C_{i+1/2, k}^{n-1} \right\} = 0 \quad (12)$$

ここに、 $M_{i+1/2, s}^{n+1} = \sum_{s=1}^{n+1} U_{i+1/2, s}^{n+1} ds$ であり、また  $\bar{U}$  および  $\bar{C}$  の添字に現われている a, b, c, および d は隣接点の流速の正負により、たとえば(5)式の  $\bar{U}_{i+1/2, s}$  はつぎのように与えられる。

$$\begin{cases} \bar{U}_{i+1/2, s}^{n+1} = \frac{1}{2} \{ U_{i, s}^{n+1} + U_{i+1, s}^{n+1} \} \geq 0 & a=0 \\ \bar{U}_{i+1/2, s}^{n+1} = \frac{1}{2} \{ U_{i, s}^{n+1} + U_{i+1, s}^{n+1} \} < 0 & a=1 \end{cases}$$

4. 拡散係数について 中立状態の鉛直方向の拡散係数を  $K_{v0} = 50 \text{ cm}^2/\text{s}$  とし、成層が発達しているときの鉛直方向のそれには  $K_v = K_{v0} e^{-3.0Kz}$  を適用した。ここに、R<sub>0</sub> 数は Overall Richardson 数である。流況方向の拡散係数は成層の有無にかかわらず  $10^9 \text{ cm}^2/\text{s}$  とした。

5. 塩分濃度と密度の関係 海水密度は一般に塩分と水温との関数とされているが、本研究では水温を20℃としたときのEckartの式を適用した。すなわち

$$\rho = (6500.0 + 3.0S) / \{ (1974.7 + 4.0S) + 0.6780 (6500.0 + 3.0S) \}$$

ここに、 $\rho$ : 密度(g/cm<sup>3</sup>),  $S$ : 塩分(g/kg)である。

6. 自由表面の取扱 平均水位 $\bar{H}_{i+1/2}$ ,  $\bar{H}_{i-1/2}$ を用いて位置(i)での水位を

$$H_i = \frac{1}{2} \{ \bar{H}_{i+1/2} + \bar{H}_{i-1/2} \} \quad (14)$$

と定義する。さらに平均水位 $\bar{H}_{i+1/2}$ を満足するように位置(i+1/2)において水位 $H_{i+1/2}$ を定義すれば、簡単な計算によって

$$H_{i+1/2} = \frac{1}{4} \{ 6\bar{H}_{i+1/2} - \bar{H}_{i+3/2} - \bar{H}_{i-1/2} \} \quad (15)$$

で表わされる。このようにして決定された水位(--- $H_i, H_{i+1/2}, H_{i+1}$ ---)が水面形を表わすものとする。

7. せん断応力項の評価  $\tau = \rho K z' (\frac{\Delta U}{\Delta z})^2$ と表わす。ここで、 $\Delta z$ を計算格子高さとし、 $z'$ に水深

方向の平均値 $z = H_i/2$ をとって

$$\frac{\tau_{ik}}{\rho_{i,k+1/2}} = f_i (U_{i,k+1/2} - U_{i,k+1/2})^2 \quad (16)$$

とした。ただし、 $f_i = 0.04 (\frac{H_i}{\Delta z})^2$  ( $K=0.4$ としている)である。

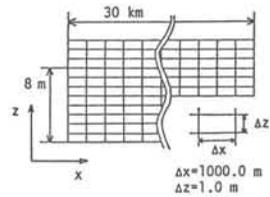


図-2 格子分割図

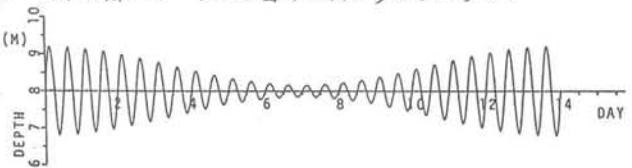


図-3 水位-時間曲線

8. 計算対象領域と境界条件 計算対象領域としては仮想河口部を考えて、これを図-2に示すような格子に分割した。上流端からの河川流量を0.5 m<sup>3</sup>/s/mとし、下流端の水位は潮位変動を想定して図-3のように入力した。また下流端の塩分濃度は水深方向に一定とし、NaCl濃度で20‰を入力した。

9. 計算結果 図-4は数値シミュレーションの結果を示したものであり、混合形態の変遷が再現されているものとみられる。大潮時の潮位変動幅が1〜2.5 mの河川における混合形態に関する一般的傾向として「小潮時に潮汐変動幅が非常に小さくなる。た場合弱混合の状態が出現し、また感潮区間が長い河川では大潮時に強混合に近い状態となることもある」と報告されている。この計算では大潮時の潮汐変動幅は図-3にみられるように2.4 mに設定されており、計算開始後約7日目の小潮時に塩水楔状の

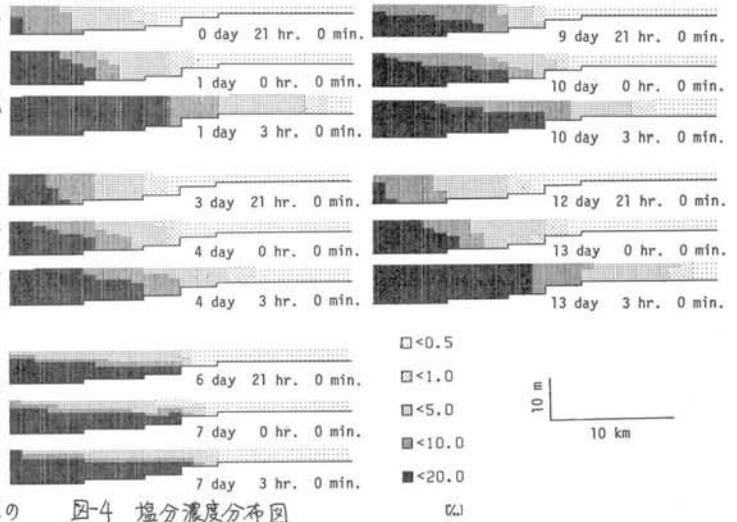


図-4 塩分濃度分布図

混合形態となっていることは、上述のことが計算上も実現されたということができよう。

以上の経過から明らかかなように、本研究では河口感潮域での塩分の混合形態がつねに同じ形態をとるのではなく、潮位変化(月齢)によって変遷することを示した。しかし、現実の河口では3つの混合形態がつねに変わるとも限らず、地形、流量、取排水の方法などによって混合形態は複雑に変化すると考えられる。さらに、特定の河口に限っても混合形態をつねに的確に示す統一的方法は見い出されていないようである。本モデルで河口感潮域の流況と塩分濃度の挙動についての基本的な解析は実行可能なたと判断されるので、今後は実際への適用を図りつつ、混合形態の変遷の予測へ進めたい。最後に、本研究を遂行するにあたって多大なるご協力を頂いた田中靖氏(現水資源開発公団)に深く謝意を表します。(参考文献)1) 田中若生・井上: 土木学会第36回年講, II-158, 1981. 2) 堀江毅: "沿岸海域の水の流況と物質の採取に関する水理学的研究", 京都大学博士論文, 1981. 3) "Momentum and Mass Transfer in Stratified Flow", Delft Hydraulics Lab, Report R880, Dec., 1974. 4) "感潮河川における塩水くさびの水理に関する基礎的研究", 土研資料第1537号 建設省土木研究所 河川研究室