

河川部の流れと拡散の数値シミュレーション

佐賀大学理工学部 正 大串浩一郎

佐賀大学大学院 学 牛島隆夫

佐賀大学理工学部 学 川崎淳司

1. はじめに

河川から流入する淡水と海水との僅かな密度差によって河口部には塩水遡上などの特異な密度流現象が現れる。このような河口部の水理特性については、環境問題や利水の面から数多くの調査研究がなされており、そのメカニズムはある程度明らかになりつつあり、いくつかの実用式も提案されている。しかしながら、河口感潮域では、潮汐や波浪、風や気圧変動などの種々の外的因子が複雑に関与して、流動・拡散現象の詳細は未だ明らかにされていない。河口における塩分遡上に関しては、従来より弱混合型あるいは強混合型について多くの研究が行われている。一方、我国の河川の約7割は、両者の中間にあたる緩混合型に属しており、密度構造が縦断方向と水深方向に変化するため弱混合や強混合の場合のような一次元の簡単な支配方程式で記述することはできず、連行・拡散を考慮した二次元・三次元の解析が必要となる。

これまで、河川の塩水くさび等の成層密度流モデル化に関する研究は数多く行われているが、この分野において二次元・三次元の数値シミュレーションは最近行われ始めたばかりであり、その内部機構を明らかにすることは各方面で強く望まれている。本研究では、河口部の潮汐の効果を考慮した塩分遡上を室内実験で再現し、鉛直二次元成層密度流の数値シミュレーションとの比較をもとに、その流動・拡散特性を考察するものである。

2. 基礎式

河口部における流れと拡散を規定する基礎式は、以下のものを用いた。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial z} \quad (1) \quad -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3) \quad \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (4)$$

$$D_z = D_{z0} \exp(-3Ri) \quad (5)$$

ここで、 u, w は流速成分、 p は圧力、 C は塩分濃度である。これら4つの変数に関する4つの式の他に、流体の密度を規定する基礎式として、Eckartの式を導入した。上記の式(5)は、岩佐らが採用した鉛直方向の拡散係数のモデルで、成層の度合いを表すリチャードソン数 Ri によって拡散係数が指数関数的に低減するとしたものである。

3. 数値計算法

計算の大まかな概略は岩佐らの方法と同じで、自由水面を含むセルとそうでないセルに分け、空間的にスクッガード格子に切り、各時刻毎に流速あるいは濃度と圧力を交互に計算した。また、比較のため2 step Lax-Wendroff スキームによる1次元の流れと拡散の計算も行った。

4. 室内水理模型実験

本研究では、河川表流水が定常的に流下する感潮河川を想定し、周期変動に応答する塩水くさびの発生が可能な模型装置を用いた。潮汐の発生は、鉄製の箱を上から押え込むプランジャ型で、調整により潮汐周期のある範囲で変えることができる。水理諸量の計測については、容量式波高計、電磁流速計及び導電率計を用いて行った。また、塩水はウランで着色し、ビデオカメラにより密度界面の挙動を時系列的に観察・記録した。実験に際しては、潮汐の周期と振幅及び河床の粗度の大きさを変えることにより、混合形態を弱混合型、緩混合型及び強混合型の広い範囲の水理条件で変化させることができた。

5. 結果及び考察

弱混合、あるいは緩混合のケースについて室内実験で得られた流速分布、あるいは塩分濃度分布を図示すると図-1から図-4のようになる。密度成層がある場合には、上層の淡水層での往復流が増幅されるのが分かる。また、弱混合、緩混合として実験した結果を見ると、やはり鉛直方向の濃度勾配はそれに応じて傾きが異なることが分かる。

また、塩水楔の縦断形状を図-5に示す。塩水楔はほぼ水平面に平行である。なお、数値計算については、境界条件の与え方が悪かったせいで安定した解が得られず、この概要集には間に合わなかったので、発表時に比較の結果を示す予定である。

6. 結論

今回、塩分過上の室内実験と同時に数値シミュレーションを行うことができ、ある程度のデータの蓄積ができたと思われる。本研究で得られた成果を利用することにより、今後、鉛直方向の密度効果が顕著な場合の拡散係数、連行係数の信頼できるモデル化が可能になるはずである。また、そのモデル化が完了すれば、実際の河川のように他の因子、例えば風や波浪、複雑な地形などの影響を考慮する必要がある場合への適用も容易になると考えられる。

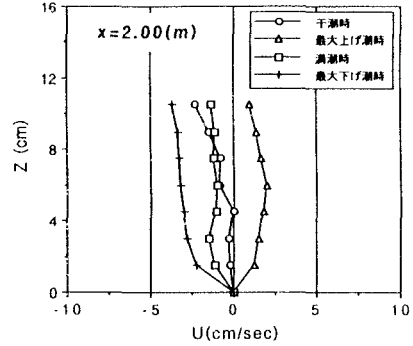


図-1 淡水時の流速分布

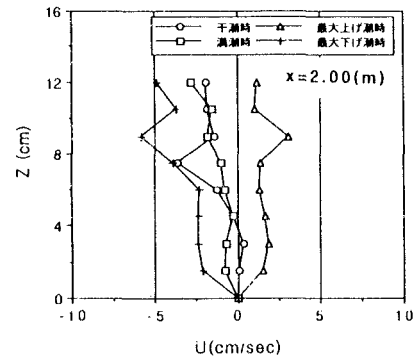


図-2 弱混合時の流速分布

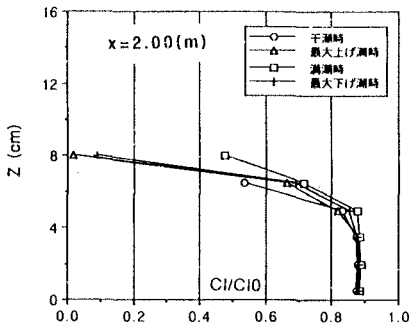


図-3 弱混合時の濃度分布

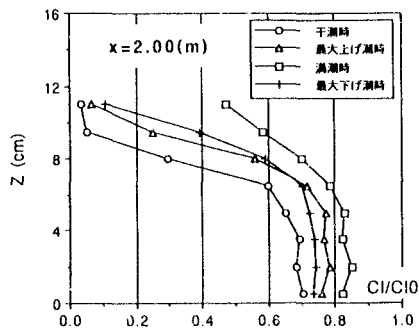


図-4 緩混合時の流速分布

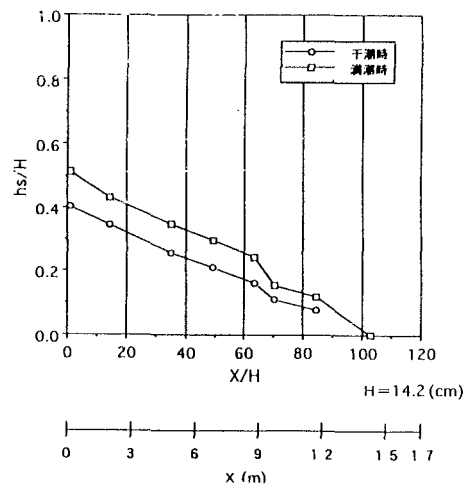


図-5 塩水楔の縦断形状