

2次元密度流の数値シミュレーション

九州大学大学院 学生員○安達 貴浩
 九州大学工学部 正 員 朝位 孝二
 九州大学工学部 正 員 小松 利光
 九州大学大学院 学生員 矢野真一郎

1. 緒言

筑後川に見られるような感潮河川域は、河川の淡水と潮汐運動により海域から侵入する塩水とが混合した低塩分濃度の汽水域として、貴重種を含む種々の生物に不可欠な独特の生活環境水圏を形成している。したがって、今後の水資源開発は、このような環境、特に塩分濃度に影響を及ぼすものと考えられ、感潮河川域の塩分濃度の挙動は、環境問題を考える上で大いに興味をもたれる。本研究の目的は、河道内の塩分濃度分布や流況をシミュレートできる解析モデルおよび解析コードを作成することである。今回はこの目的を念頭におき、同一方程式、同一アルゴリズムを用いて2次元底層密度噴流のモデル計算を行った。

2. 基礎方程式

感潮河川域の流れ場、濃度場を解析するための基礎式を鉛直2次元の場合について以下に示す。

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(UU) + \frac{\partial}{\partial y}(UV) \\ = (1+RC)g_x - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu_t \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(UV) + \frac{\partial}{\partial y}(VV) \\ = (1+RC)g_y - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(UC) + \frac{\partial}{\partial y}(VC) \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t \frac{\partial C}{\partial y} \right) \end{aligned}$$

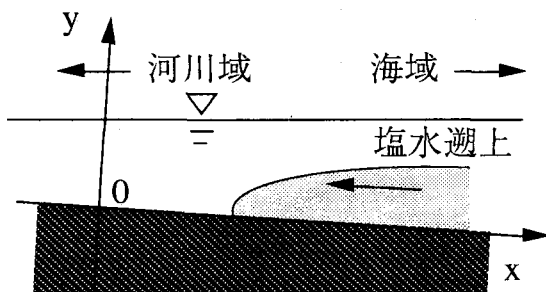


図-1 感潮河川域および座標系

ここに、 U, V は x, y 方向の平均流速成分、 g_x, g_y はそれぞれ x, y 方向の重力加速度、 ρ_0 は規準密度、 R は相対密度差と濃度の比、 C は拡散物質の濃度、 σ_k は乱流シュミット数である。

3. 数値解析

モデル計算として図-1に示すような水路床勾配のない開水路2次元密度噴流について解析を行った。噴出口での噴出速度 U_0 を代表流速に、噴出口厚 H_0 を代表長さを選び、基礎式を無次元化すると以下ようになる。更に以下のようなフルード数、渦動粘性係数を与え、無次元時間150まで計算を行った。

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial \bar{V}}{\partial \bar{y}} = 0$$

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial \bar{t}} + \frac{\partial \bar{U} \bar{U}}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial \bar{V} \bar{U}}{\partial \bar{y}} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial}{\partial \bar{y}} \left[\bar{\nu}_t \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial \bar{y}} + \frac{\partial \bar{V}}{\partial \bar{x}} \right) \right]$$

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial \bar{t}} + \frac{\partial \bar{U} \bar{V}}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial \bar{V} \bar{V}}{\partial \bar{y}} = -\frac{1}{Fr^2} \left(1 + \frac{\Delta \rho}{\rho_0} \right) - \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{y}} \quad \bar{\nu}_t = 0.1, \quad Fr = 1.5$$

$$\frac{\partial}{\partial \bar{t}} \left(\frac{\Delta \rho}{\rho_0} \right) + \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left(\bar{U} \frac{\Delta \rho}{\rho_0} \right) + \frac{\partial}{\partial \bar{y}} \left(\bar{V} \frac{\Delta \rho}{\rho_0} \right) = \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left[\bar{\nu}_t \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left(\frac{\Delta \rho}{\rho_0} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial \bar{y}} \left[\bar{\nu}_t \frac{\partial}{\partial \bar{y}} \left(\frac{\Delta \rho}{\rho_0} \right) \right]$$

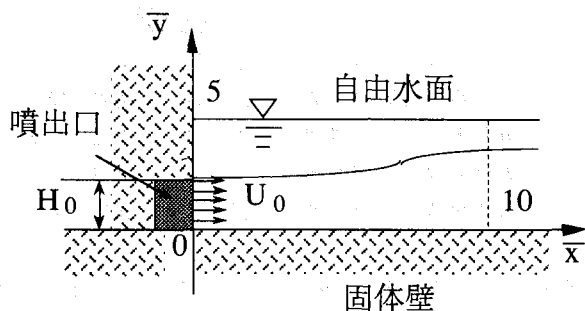


図-2 開水路2次元噴流および座標系

表-1 計算条件

計算格子間隔	$\Delta x = \Delta y = 0.25$
時間格子間隔	$\Delta t = 0.005$
規準密度	$\rho_0 = 1.0$
乱流シュミット数	$\sigma k = 1.0$
噴出口境界条件	$U = 1.0$ $V = 0.0$ $\Delta \rho / \rho_0 = 0.001$

ただし、 $\Delta \rho / \rho_0$ は相対密度差である。流れの計算法にはMAC法を、格子系にはスタッガード格子を、離散化法として時間項にはAdams-Bashforthスキームを、移流項にはQUICKスキームを用いた²⁾。解析の際に用いる諸条件は表-1に示す。

4. 結果の考察

$x = 2.5, 5.0, 7.5, 10.0$ における相対密度差鉛直分布および流下方向流速成分を図-3に示す。

噴出口に比較的近い $x = 2.5$, 5.0 では流れは噴流的であるので、連行により流下にしたがって密度界面が上昇していく。しかし、噴出口から離れるにつれ流れは開水路流れ的になり密度は乱流拡散により一様化していく。

5. 終わりに

以上の解析結果は渦動粘性係数、渦動拡散係数を流れの場合全体で一定としているため、開水路2次元密度噴流の特性を忠実に再現しているわけではないが、採用した解析アルゴリズムの妥当性が確認できた。感潮河川域の数値シミュレーションの精度を向上するためには渦動粘性係数の正確なモデル化が重要である。

講演時には、感潮河川の塩分遡上のシミュレーションを報告する予定である。

6. 参考文献

- (1) 福島祐介、高島哲雄：下層密度噴流の形成領域の乱流モデルによる解析、第33回水理講演会論文集、P.P. 589 - 594, 1989
- (2) 大野豊、磯田和夫：数値計算ハンドブック、オーム社

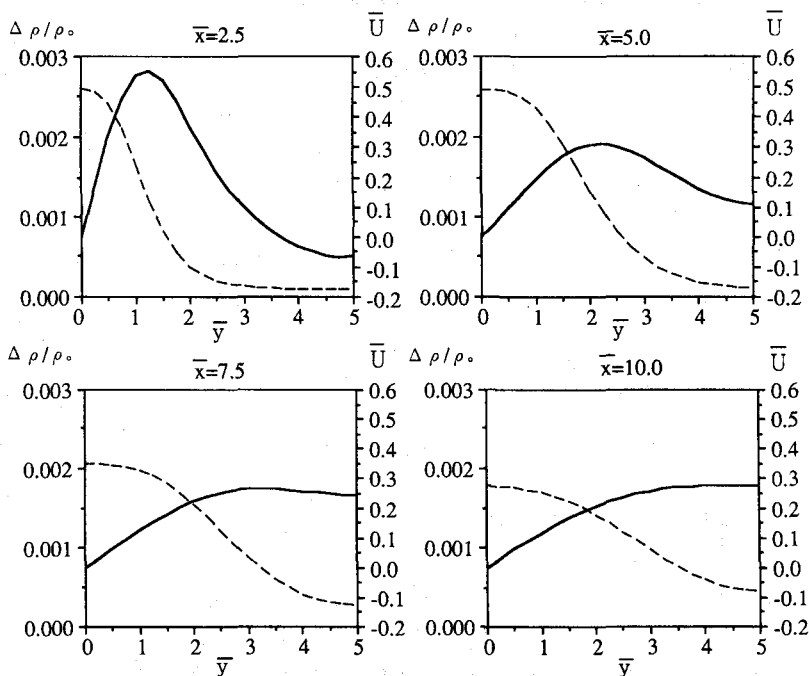


図-3 流下方向流速成分と相対密度差の鉛直分布

