

境界適合型一般座標系を用いた河口部塩水侵入の数値計算

九州大学大学院 学生員 ○室永武司
九州大学大学院 フェロー 小松利光
日本学術振興会 正会員 安達貴浩

1. 目的

河口部塩水侵入の数値シミュレーションを行う場合、強混合形態には断面平均一次元モデル、弱混合形態には二層流モデルといった具合に、混合形態毎に別個の解析モデルが適用されることが多い。しかしながら、実際の河口域では潮差の非定常変化により同一河川でも混合形態が変遷することが多く、このような方法には限界がある。そこで本研究では、混合形態の遷移等を正確に再現できる鉛直2次元数値シミュレーション法の開発を試みた。河川感潮域は水深に対して潮差が比較的大きくデカルト座標系での取り扱いが難しいため、境界適合型の σ 座標系を用いてモデルの構築を行った。

2. σ 座標系および座標変換について

σ 座標系は $z=\zeta$ に水面を、 $z=z_b$ に底面をもつデカルト座標系の計算領域を、水面で $\sigma=1$ 、底面で $\sigma=0$ となるように水深 H で規格化したもので、座標変換式は式(1)で記述される(図-1)。

$$\sigma = \frac{z - z_b}{\zeta - z_b} = \frac{z - z_b}{H} \quad (1)$$

ここで、 z_b ：水平基準面からの河床高さ、 ζ ：水面位置

3. 基礎式

静水圧近似と Boussinesq 近似を仮定すると、 σ 座標系 (x, σ) に対して河口密度流を規定する基礎式は以下ようになる。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \int_0^1 \frac{\partial(Hu)}{\partial x} d\sigma = 0 \quad (2)$$

$$\dot{\sigma} = \frac{\sigma}{H} \int_0^1 \frac{\partial(Hu)}{\partial x} d\sigma - \frac{1}{H} \int_0^\sigma \frac{\partial(Hu)}{\partial x} d\sigma \quad \text{ただし} \quad \dot{\sigma} = \frac{\partial \sigma}{\partial t} + u \frac{\partial \sigma}{\partial x} + w \frac{\partial \sigma}{\partial z} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(Hu)}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(\sigma Hu)}{\partial \sigma} = & -gH \frac{\partial H}{\partial x} - gH \frac{dz_b}{dx} - g\sigma HR \frac{\partial H}{\partial x} - gH \frac{\partial}{\partial x} \int_0^1 HR d\sigma - gHR \frac{dz_b}{dx} + H \frac{\partial}{\partial x} \left[(v + v_{ix}) \frac{\partial u}{\partial x} \right] \\ & - 2H \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{v + v_{ix}}{H} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{dz_b}{dx} \right) \right] + (v + v_{ix}) \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{dz_b}{dx} \right) \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{1}{H} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right] + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{v + v_{ix}}{H} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(HR)}{\partial t} + \frac{\partial(HuR)}{\partial x} + \frac{\partial(\sigma HR)}{\partial \sigma} = & H \frac{\partial}{\partial x} \left[(D_L + D_{ix} + D_m) \frac{\partial R}{\partial x} \right] - 2H \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{D_L + D_{ix} + D_m}{H} \frac{\partial R}{\partial \sigma} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{dz_b}{dx} \right) \right] \\ & + (D_L + D_{ix} + D_m) \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{dz_b}{dx} \right) \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{1}{H} \frac{\partial R}{\partial \sigma} \right] + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{D_L + D_m}{H} \frac{\partial R}{\partial \sigma} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

$$v_{ix} = [\kappa \sigma H]^2 \frac{1}{H} \left| \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right| (1 + \beta R_i)^\alpha \quad (6)$$

$$D_{ix} = [\kappa \sigma H]^2 \frac{1}{H} \left| \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right| (1 + n R_i)^m \quad (7)$$

$$D_L = 2.93 B u_{*side} \quad (8)$$

ここで、 $u, \dot{\sigma}$ ： x, σ 方向の流速、 p ：圧力、 ρ ：密度、 ρ_0 ：基準密度、 $R=(\rho-\rho_0)/\rho$ ：相対密度差、 g ：重力加速度、 ν ：動粘性係数、 ν_{ix}, ν_{is} ： x, σ 方向の渦動粘性係数、 D_L ：幅方向の移流分散係数、 D_{ix}, D_{is} ： x, σ 方向の乱流拡散係数、 D_m ：分子拡散係数、 $l(=\kappa H \sigma)$ ：混合距離、 B ：水路幅、 u_{*side} ：側壁での摩擦速度、 κ ：カルマン定数、 R_i ：局所勾配型リチャードソン数、 α, β, m, n ：経験定数

4. 数値シミュレーションの概要

数値シミュレーションは、小松らにより開発された感潮河川実験水路での塩水侵入を対象とした。数値解

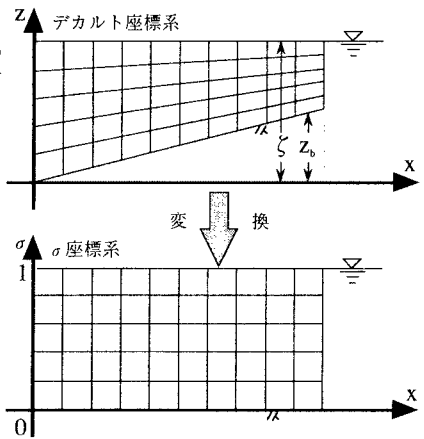


図-1 デカルト座標系と境界適合型座標系のイメージ図

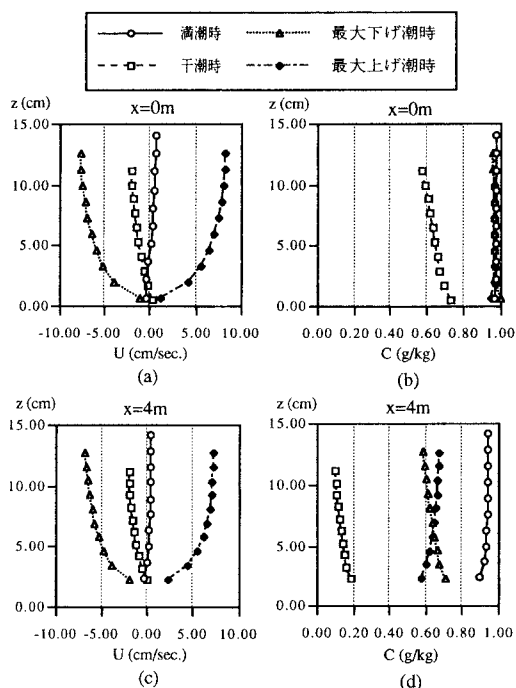


図-2 Case-1の流速及び塩分濃度の鉛直分布
(実験では弱混合形態)

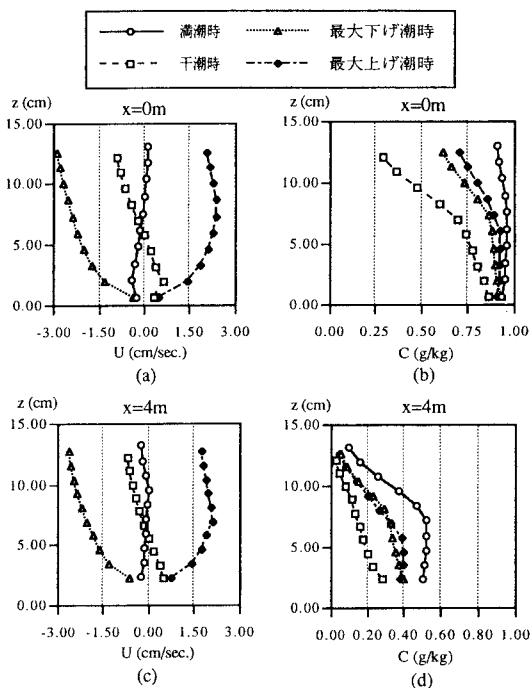


図-3 Case-2の流速及び塩分濃度の鉛直分布
(実験では弱混合形態)

析を行うにあたって、対象領域を x 方向に 20 分割、 σ 方向に 10 分割した。計算条件ならびに水理条件を、表-1 に示す。今回は、室内実験において強混合形態の塩水侵入が実現された潮位振幅 $A=1.5\text{cm}$ (Case-1) と弱混合形態が実現された $A=0.5\text{cm}$ (Case-2) の 2 ケースについてはほぼ準定常状態の塩水侵入が再現されるまで計算を行った。なお、Munk & Anderson 型の乱流モデルにおける経験定数は UEDA ら²⁾ の値を採用した。

5. 結果と考察

図-2 は Case-1 ($A=1.5\text{cm}$) における $x=0.4\text{m}$ での流速 U と塩分濃度 C の鉛直分布シミュレーション結果である。 $x=4\text{m}$ での C の分布を見ると、上げ潮時には成層が若干不安定になるのに対し、下げ潮時には安定成層が形成されており、室内実験において見られる濃度分布の鉛直構造の変化が良好に再現されている。次に、上流側への塩水侵入の程度を比較すると、実験結果に比べ計算結果では比較的長い塩水侵入が得られることが確認された (図示省略)。今回は簡便のため、河口での塩分濃度の境界条件を全ての時刻において一定としたためこのような不一致が生じたものと考えられる。

次に Case-2 ($A=0.5\text{cm}$) の $x=0.4\text{m}$ における U と C の計算結果を見ると、室内実験の結果に比べ鉛直方向に過剰な塩分の拡散が引き起こされ、弱混合というよりも緩混合型の塩水侵入の結果が得られている。弱混合型の塩水侵入長は内部重力の大きさによって規定されているため、鉛直拡散の過大評価により結果的に塩水侵入長も実測のものに比べて著しく短くなっていることが確認された。このような計算結果が得られた原因として、計算格子間隔 (特に $\Delta\sigma$) が粗かったこと、成層による非等方効果が乱流モデルに組み込まれなかったことなどが考えられるため、このような点を考慮に入れて高精度鉛直 2 次元モデルの開発を更に進めていく予定である。

参考文献

- 1) 小松利光ら (1995); 水工学論文集第 40 巻, pp512-523.
- 2) H.UEDA et al. (1981); Quart.J.R.Met.Soc, pp561-578.

表-1 計算条件ならびに水理条件

Δx (cm)	100	q_t ($\text{cm}^2/\text{sec.}$)	1.4
$\Delta\sigma$	0.1	H_0 (cm)	13.3
Δt (sec.)	0.005	C_0 (g/kg)	1.0

ここで、 q_t : 単位幅当たりの淡水流入流量
 H_0 : 河口の平均水位、 C_0 : 海域の塩分濃度