

実河口域における塩水侵入の鉛直2次元数値シミュレーション

○九州大学大学院 学生員 橋本 彰博  
九州大学大学院 正会員 安達 貴浩  
九州大学大学院 フェロー 小松 利光

1. 目的 河川感潮域の塩水遡上を対象に数値シミュレーションを行う場合、幅方向の現象の変化が比較的小さいことから、鉛直2次元数値モデルが適用されることが多い。このようなモデルを実河口域の塩水遡上を対象に適用する際には、河道幾何の影響をモデルに組み込む必要があるが、1)実測の河口潮位変動を境界条件として与える場合には水表面近傍の水路幅を正確に評価しなければ、塩水遡上を規定する重要な要因である入退潮量を正確に評価できないこと、2)計算の対象となる塩水は水路の滞筋に沿って上流側に侵入すること、等の点を踏まえると、特に流水面積、滞筋部の水深、水表面近傍の水路幅という3要素を正確に組み込む必要があると考えられる。これに対して、代表幅あるいは代表水深等を用いて複断面形状を矩形に変換し、その幾何形状に対して計算を行うといった簡便な手法が適用された研究例も少なくないが、このような手法では上記の3要素の影響を同時に組み込むことができない。そのため、実河口域の塩水遡上を数値シミュレーションによって正確に再現するには、やはり複断面形状の影響を正確に取り込めるモデルの開発が不可欠といえる。

これらの点を考慮して、デカルト座標系を用いる場合については、水路幅の影響を考慮した数値モデルが既に構築されている<sup>1)</sup>。しかしながら水深に対して潮差が比較的大きな河口域を対象にする場合、デカルト座標系よりもむしろσ座標形を用いた方が自由水面等の取り扱いが各段に容易となる<sup>2)</sup>。このため、著者らはσ座標によって記述される複断面水路の影響を組み込んだ新たな鉛直2次元数値モデルを構築した。数値コードの妥当性のチェックも兼ねて、比較的シンプルな河道形状を対象に断面形状の違いが塩水遡上に及ぼす影響を上記のモデルを用いて調べたので、本稿ではその結果について紹介する。

2. 数値シミュレーションの概要 本研究で採用した基礎方程式は、以下に示す横断方向に積分された連続の式、運動方程式、塩分の質量保存式である。なお、鉛直方向の運動方程式には静水圧近似を適用し、水位変動や河床変動の数値的取り扱いを容易にするため、σ座標系により基礎式を記述した。

$$HB\dot{\sigma} = \frac{B}{B_{\sigma=1}} \sigma \int_0^1 \frac{\partial}{\partial x}(HBU)d\sigma - \int_0^2 \frac{\partial}{\partial x}(HBU)d\sigma \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{\partial(HBU)}{\partial t} + \frac{\partial(HUBU)}{\partial x} + \frac{\partial(H\dot{\sigma}BU)}{\partial \sigma} = -BHg(1+R\sigma)\frac{\partial H}{\partial x} - BHg\frac{\partial}{\partial x}\left(H\int_0^1 R d\sigma\right) - BHg(1+R)\frac{dz_b}{dx} + H\frac{\partial}{\partial x}\left(B(v_n+v)\frac{\partial U}{\partial x}\right) - 2H\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{v_n+v}{H}B\frac{\partial U}{\partial \sigma}\left[\sigma\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{dz_b}{dx}\right]\right) + B(v_n+v)\left[\sigma\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{dz_b}{dx}\right]^2\frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\frac{1}{H}\frac{\partial U}{\partial \sigma}\right) + \frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\frac{v_n+v}{H}B\frac{\partial U}{\partial \sigma}\right) - H\frac{\tau_{wall}}{\rho_0}\Big|_{\sigma} \dots \dots (2)$$

$$\frac{\partial(HBS)}{\partial t} + \frac{\partial(HUBS)}{\partial x} + \frac{\partial(H\dot{\sigma}BS)}{\partial \sigma} = H\frac{\partial}{\partial x}\left(B(D_n+D_m+D_l)\frac{\partial S}{\partial x}\right) - 2H\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{D_n+D_m+D_l}{H}B\frac{\partial S}{\partial \sigma}\left[\sigma\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{dz_b}{dx}\right]\right) + B(D_n+D_m+D_l)\left[\sigma\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{dz_b}{dx}\right]^2\frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\frac{1}{H}\frac{\partial S}{\partial \sigma}\right) + \frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\frac{D_n+D_m}{H}B\frac{\partial S}{\partial \sigma}\right) \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 $\sigma=(z-z_b)/(\zeta-z_b)$ であり、 $z_b$ :水平基準面からの河床高、 $\zeta$ :水位、 $g$ :重力加速度、 $U, \dot{\sigma}$ :水平及びσ方向の幅平均流速、 $B(x, \sigma; t)$ :河道幅、 $H$ :水深、 $\rho_0$ :基準密度、 $\nu$ :動粘性係数、 $\tau_{wall}$ :壁面でのせん断応力、 $R$ :基準水との比重差(= $(\rho-\rho_0)/\rho_0$ )、 $\rho$ :密度、 $S$ :塩分濃度、 $D_n$ :分子拡散係数、 $\nu_{tx}, \nu_{tz}, D_{tx}, D_{tz}$ :x及びz方向の渦動粘性係数と渦拡散係数、 $D_l$ :幅方向の移流分散係数(= $2.93U_{wall}$ )である。壁面の摩擦の効果は相当砂粒粗度 $k_s$ によって与え、 $k_s$ と壁法則を用いて壁面におけるせん断応力を評価した。また、乱流モデルとしては横断方向に積分した標準型k-ε乱流モデルを適用した。なお、k、ε中のproduction, dissipation等に含まれる幅方向の移流分散効果は正確な評価法が明らかでないので、現在と考慮していない。

$$\frac{\partial(HBk)}{\partial t} + \frac{\partial(HUBk)}{\partial x} + \frac{\partial(H\dot{\sigma}Bk)}{\partial \sigma} = H\frac{\partial}{\partial x}\left(B\frac{\nu_n}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x}\right) - 2H\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{B}{H}\frac{\nu_n}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial \sigma}\left[\sigma\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{dz_b}{dx}\right]\right) + B\frac{\nu_n}{\sigma_k}\left[\sigma\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{dz_b}{dx}\right]^2\frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\frac{1}{H}\frac{\partial k}{\partial \sigma}\right) + \frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\frac{B}{H}\frac{\nu_n}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial \sigma}\right) + \nu_{tz}\frac{B}{H}\left(\frac{\partial U}{\partial \sigma}\right)^2 + 2HC_kU_{wall}^2 + Bg\frac{\nu_{tz}}{\sigma}\frac{\partial R}{\partial \sigma} - HB\epsilon \dots \dots \dots (4)$$

$$\frac{\partial(HB\epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(HUB\epsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(H\sigma B\epsilon)}{\partial \sigma} = H \frac{\partial}{\partial x} \left( B \frac{v_n}{\sigma_c} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) - 2H \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{B}{H} \frac{v_n}{\sigma_c} \frac{\partial \epsilon}{\partial \sigma} \left[ \sigma \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{dz_b}{dx} \right] \right) + B \frac{v_n}{\sigma_c} \left[ \sigma \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{dz_b}{dx} \right]^2 \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{1}{H} \frac{\partial \epsilon}{\partial \sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{B}{H} \frac{v_n}{\sigma_c} \frac{\partial \epsilon}{\partial \sigma} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} v_n \frac{B}{H} \left( \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right)^2 + 2HC_c \frac{U_{wall}^4}{B} + C_{1\epsilon} C_{3\epsilon} \frac{\epsilon}{k} B g \frac{v_n}{\sigma_c} \frac{\partial R}{\partial \sigma} - HBC_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

$$v_{nz} = v_n = \frac{C_{\mu} k^2}{\epsilon} \quad D_{nz} = D_n = \frac{v_n}{\sigma_t} \quad \dots \dots (6) \quad C_k = \frac{1}{\sqrt{C_f}} = \varphi \quad C_{\epsilon} = 3.6\varphi^{1/2} C_{2\epsilon} C_{\mu}^{1/2} \quad \dots \dots (7)$$

ここで、k: 乱れエネルギー、ε: 粘性による乱れエネルギーの散逸率、σ<sub>t</sub>: 乱流シュミット数、σ<sub>k</sub>、σ<sub>ε</sub>、C<sub>μ</sub>、C<sub>ε1</sub>、C<sub>ε2</sub>、C<sub>ε3</sub>はk-ε乱流モデルのモデル定数で、それぞれ0.09、1.44、0.6、0.0である。また、U<sub>wall</sub>: 側壁での摩擦速度、C<sub>k</sub>、C<sub>ε</sub>: 壁面での乱れのproductionに関する係数、φ: 流速係数である。なお、乱流シュミット数はMunk&Andersonタイプのモデル式<sup>3)</sup>のモデル定数をフィッティングにより求めて評価した。また、Δσ=0.05、D<sub>n</sub>=0.0とし、実測の河口塩分濃度を境界条件として与えた。

**3. 計算結果およびその考察** 今回は室内感潮河川水路(幅25cm, 河口平均水深14.0cm)において弱混合形態(潮差0.5cm)を示す塩水侵入を基本ケース(case1)として、種々の数値実験を行った。まず、側壁が滑面(case1)と粗面(case2)である2ケースの比較を行った。図-1の結果を見ると、case2ではcase1よりも側壁の混合効果が大きいため、塩・淡水層の混合が促進され、case1に比べて塩水侵入長が短くなっていることが分かる。また、側壁からの乱れの生成は密度界面に直接作用するため、その混合効果が非常に大きいことが理解できる。次に、case2と同一の水理条件下で、流水断面積を固定し断面形状のみを逆三角形に変化させて計算を行った(図-1; case3)。case3ではcase2に比べて塩・淡水が著しく混合されているが、これは両者の水表面での水路幅の違いに起因して入退潮量が変化したために生じた結果と考えられる。実際、流速の鉛直分布を調べてみると(図-2)、case2とcase3では流速の分布形状や大きさが変化していることが確認できる。また、矩形と逆三角形断面の入退潮量がほぼ一致するようにcase3において潮差を半分にしたところ(case4)、完全な一致は見られないが、case2とかなり類似した塩水侵入状況が再現されることが確認された(図-1; 下)。

**4. 結論** 本研究では、実河口域の塩水遡上を精度よく再現するためにσ座標によって記述される複断面水路の影響を組み込んだ新たな鉛直2次元数値シミュレーション法を構築した。複断面水路の塩水侵入に対しては取り扱いが容易な検証データが存在しなかったため、今回はいくつかの数値実験によって数値モデルならびに数値コードの妥当性の確認を試みた。この結果、物理的にはほぼ妥当な結果が得られることが確認された。また、数値実験の結果、同一の流水断面積であっても、複断面形状の影響によって塩水侵入状況が大きく変化することが明らかとなったが、これは複断面形状の効果を正確に組み込むことの重要性を再確認させる結果とも言える。

**参考文献**

- 1) 石川ら: 水工学論文集, 第43巻, pp. 881-886, 1999.
- 2) 安達ら: 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 411-415, 2000.
- 3) 足立: 土木学会論文集, 第104号, pp. 33-44, 1964.
- 4) Uedaら: Quart. J. R. Met. Soc., 107, pp. 561-578, 1981.

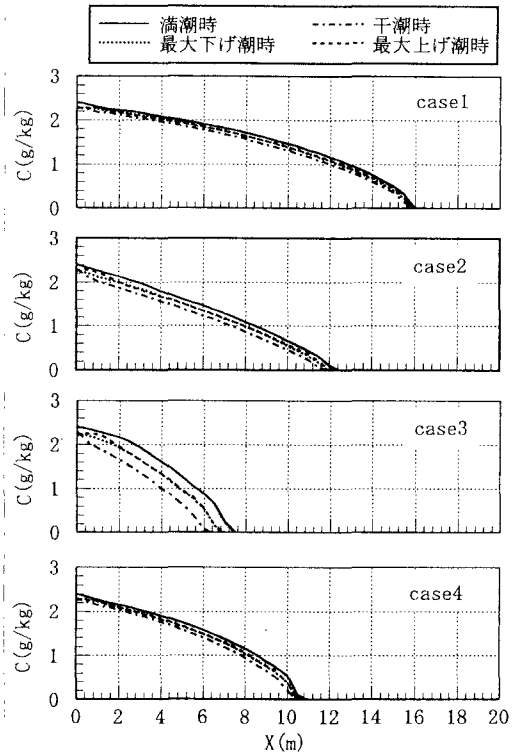


図-1 数値シミュレーション結果

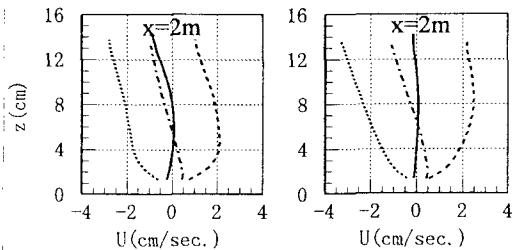


図-2 流速の鉛直分布(右: case2, 左: case3)