II-229　相互連行を考慮した塩水くさびの挙動について

芝浦工業大学工学部　正員　菅　和利
東京大学工学部　正員　玉井　信行
飛島建設株式会社　正員　小島　一敏

1．はじめに

感潮河川河口部での塩水侵入を解析する数値シミュレーションモデルは種々提案されている。漸変二層流の仮定の基に注意深く積分した基礎式には連行に伴う項及び密度分布，流速分布の存在による一次元分散項が出現する。しかし従来のシミュレーションモデルでは，これらの項の取り扱いが不十分であり、又考慮されていない場合が多い。河口部での水資源の開発，塩分のフラッシュ操作等では下層，上層での塩分濃度の縦断方向の変化を知ることも必要である。

本研究では縦断方向の密度変化を，上下方向への相互の連行によるものと考え，さらに分散項を考慮することにより実河川での塩分侵入現象を精度良く再現計算することを目的としている。

2．数値計算手法

基礎となる式は上下層の体積・質量・運動量保存則の偏微分方程式であり，この６つの基本方程式を陽形式の差分で離散化し、定常の問題を取り扱った。

計算では、淡水流量・河口水深・淡水，塩水密度などの条件を入力するが、相互連行を考慮する為に計算区間の上下流端で境界条件を与える必要がある。本研究では、まず河口での下層流量を仮定し、河川全体における質量・体積保存の法則を満たすように、河口での諸量を決定する。それを用いて二分探索法にて収束演算を行なった。河口での水理条件を決定した後、これを用いて河口から上流に向かって１メッシュずつ各格子点の値を算出し、塩水くさび先端部での条件（下層の流量・水深がともにゼロ）を満たすように河口条件を修正しながら最終的な塩水くさびの形状を算定した。数値計算上の特徴的な点として、改良二分探索法と区間拡大法が上げられ、収束計算より高速で安定した解を決定することが出来た。

3．基礎式　（体積・質量・運動量保存則）

$$\frac{\partial h_1}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(U_1 h_1)=\underbrace{E(|U_1|-|U_2|)}_{1}$$

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t}+U_1\frac{\partial \rho_1}{\partial x}+\frac{I_1}{h_1}\cdot\frac{\partial}{\partial x}(\Delta\rho_1\Delta u_1 h_1)=\frac{\rho_2-\rho_1}{h_1}E|U_1|$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial U_1}{\partial t}+U_1\frac{\partial U_1}{\partial x}=&\frac{1}{\rho_1 h_1}\left[-\frac{1}{2}g\frac{\partial}{\partial x}(\rho_1 h_1^2)-g\frac{\partial}{\partial x}(\lambda_1\Delta\rho_1)\right.\\&\left.-\rho_1 g h_1\frac{\partial h}{\partial x}\right]-\underbrace{\frac{\rho_2}{\rho_1 h_1}(U_1-U_2)E|U_1|}_{2}-\frac{1}{2h_1}f_1\\&\times|U_1-U_2|(U_1-U_2)-\frac{1}{\rho_1 h_1}\left[I_1\frac{\partial}{\partial t}(h_1\Delta\rho_1\Delta u_1)\right.\\&+I_1U_1\frac{\partial}{\partial x}(h_1\Delta\rho_1\Delta u_1)+2I_1h_1\Delta\rho_1\Delta u\frac{\partial U_1}{\partial x}\\&\left.+I_2\frac{\partial}{\partial x}(\rho_1 h_1\Delta u_1^2)+I_3\frac{\partial}{\partial x}(h_1\Delta\rho_1\Delta u_1^2)\right]\end{aligned}$$

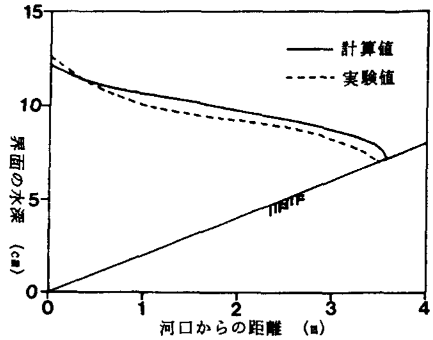
下線部①は、相互連行を記述した項で、下線部②は連行に伴う付加応力を示したものである。さらに I_1，I_2，I_3がかかった項は見かけの分散項を表わしている。

4．河口条件・抵抗係数・連行係数

計算に用いた河口条件は、近似的に密度フルード数を１に決定した。この場合に上層の流量としては、下層からの連行総流量に上流端淡水流量を加えたものとして計算を行なった。今回の計算で用いた内部抵抗係数、連行係数は著者らの研究結果、従来から提案されている経験式を参照して次式を用いた。

$$f_i = 0.35 \times \phi^{-0.5} \quad , \quad \phi = |U_1|^3 / \nu \varepsilon g$$

$$E = 2.0 \times 10^{-3} \times Fr_1 \quad , \quad Fr_1 = U_1 / \quad \varepsilon g h_1$$



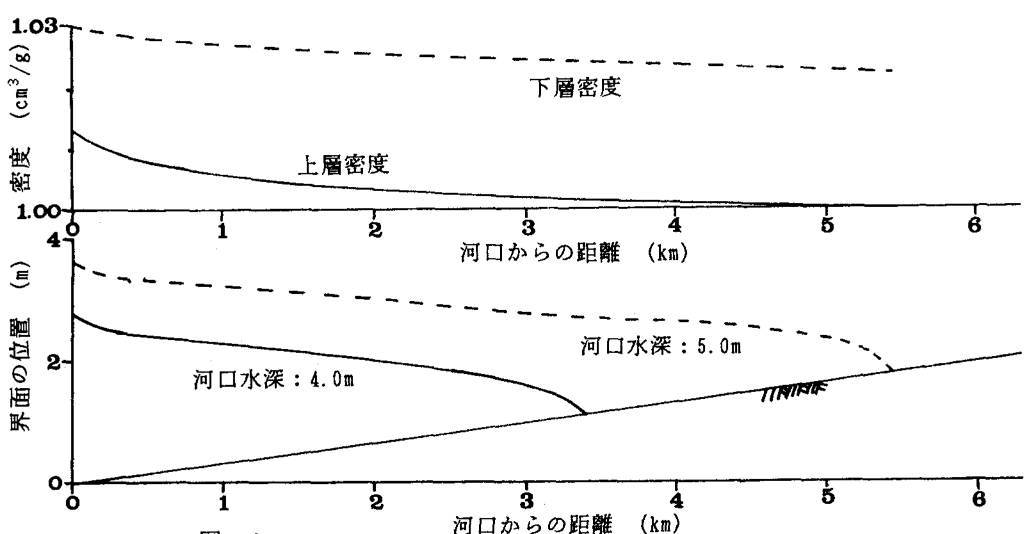
図－１

5．結果及び考察

図－１は、室内実験で得られた塩水くさびの密度界面の位置と、再現計算とを比較したものである。室内実験では河床勾配が１／５０と急であり、又河口での密度フルード数１がなかなか作り出せなく、数値計算での境界条件とは必ずしも一致していないにもかかわらず、十分な精度で再現し得ていることがわかる。この結果より本計算プログラムによって、実河川での実用計算が可能であると思われる。

図－２は、実河川規模での感潮区間の河床勾配１／３０００、単位幅流量０．５m^2／ｓを想定した二次元直線河道での定常計算の結果を示したものである。図－２（ａ）の実線は、下層から連行された塩水による上層の密度の縦断方向の変化を示したものであり、点線は逆に淡水の下層への連行に伴う密度の縦断方向変化を示したものである。又、図－２（ｂ）は塩水くさび界面位置を示したものである。なお、図－２（ｂ）中の点線は単位幅流量、その他の条件は同一で、河口での水深を１ｍ上昇させた場合のくさびの形状を示したものである。これらの図からみられるように、相互連行を考慮することにより、上下層の縦断方向の密度変化を表わすことができ、又見かけの分散項を考慮することにより河口部に近い界面勾配の急な区間での再現計算を精度良く行えていることがわかる。

弱混合，緩混合状態の一要因として相互の連行を考え、二層漸変流としての取り扱いにより、高精度な数値シミュレーション手法を開発した。今後は三層流モデルによりさらに実際現象に近い扱いのできる数値シミュレーションの開発を行なっていく予定である。



図－２