

浅瀬が流れや塩水の混合に及ぼす影響

THE EFFECT OF SHOAL ON FLOW AND MIXING OF DENSITY CURRENT

伊福 誠¹・吉井 勇²・合田宏隆²・中田正人³

¹正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科(〒790-8577 松山市文京町3番)

²学生会員 愛媛大学大学院 理工学研究科(〒790-8577 松山市文京町3番)

³正会員 (株)エイトコンサルタント 技術開発部(〒700-8617 岡山市津島京町3-1-21)

Three-dimensional numerical analysis is conducted for flow and mixing of density current in a channel with several shoals. The largest amplitude of the longitudinal velocity appears on the surface in the shallowest water. Through tidal period, the transverse velocity towards the shallower water occurs at the bottom of shoal and its velocity is maxima at the low water phase. The time and depth-averaged salinity around the shoal decreases about 40-60 percent in comparison with salinity that the shoal is not mounted. The control efficiency of shoal is high for saline water intrusion.

Key Words : three-dimensional model, shoal, control of saline water intrusion, shear

1. はじめに

河口域周辺の密度流は混合型の密度流、塩水楔、密度噴流の問題として数多くの研究がなされてきた。研究の多くは準定常状態を対象としたものであり、非定常状態を取り扱ったものは少ないのが実状である。しかしながら、現地河川における塩水侵入の挙動は、同一河川であっても大潮時に強混合、小潮時に緩混合形態を示すように潮位変動によっても混合形態が変化する。こうした塩水侵入の実態を十分に把握することは、河川水を灌漑水や飲用水等として利用する際には極めて重要となる。

Jirka・Arita¹⁾は、河道内に長く侵入する塩水楔の遡上を河口付近で阻止する技術の開発が環境水理学上の観点から重要であるとの考えから、河床に境界層の排除厚さに等しい高さの堰を設置して密度流の流動形態である塩水楔を密度カレントの流動形態に変化させる技術の開発を進めた。しかしながら、こうした堰の設置は比較的流下能力の低い河川に対しては治水上の問題が懸念される。

一方、気泡噴流は、ダムや貯水池の富栄養化防止対策としてのエアレーションや原子炉冷却装置、オイルフェンス等の様々な工業・環境プロセスで見受けられ、これらの流動構造を解明すること極めて重要である。小松ら²⁾は、密度成層を形成している場に気泡噴流を用いて塩水の遡上を制御する工法を提案し、現地河川において実験を行っている。この制御方法は、河川の流下能

力を低下させることなく塩水の遡上を制御できることが利点である。しかしながら、第一の著者は、2次元数値モデルを用い、小松らの実験結果に基づいた解析を行った結果、この制御工法は比較的高塩分の塩水遡上に対しては効果が薄いことを明らかにし、制御効率を増大するには気泡発生装置から放出される気泡の量を増大させるか、あるいは複数基の気泡発生装置が必要であることを指摘した³⁾。また、この制御方法は維持管理にかなりの手間と経費がかかることが推察される。

従来、塩水楔の挙動を予測する数値モデルは2次元がほとんどであった。しかしながら、計算機の処理能力の飛躍的な増大と高精度の計算手法の開発によって、3次元数値モデルによる解析も容易に行うことができるようになった。

Liら⁴⁾は、横断方向に水深が変化する水路において潮位変動を伴う場合の流れの特性について3次元非定常モデルを用いて検討し、浅水部と深水部においては時間平均した流れの大きさや向きが異なることを明らかにしている。しかしながら、淡水と塩水の混合にまで立ち入った解析はなされていない。

大西・田中⁵⁾は、水路に滞を設けた室内実験によって作滞工を用いると塩水の遡上を制御可能であり、塩水交換率も増大することを明らかにしている。さらに、藤原ら⁶⁾は、複断面水路における河口密度流の混合特性について調べ、低水路と高水敷の流速差により水平方向への混合が促進されることを明らかにしている。以上のように、縦横断方向の河床形状の違いによる流れの

構造や密度流の混合特性が少しずつ明らかになりつつある。

こうしたことから、本研究では、密度流に関する3次元数値モデルを開発するとともに維持・管理に手間と多額の経費を要しない浅瀬を用いた塩水遡上制御工法を提案する。さらに、浅瀬による塩水遡上制御効果を数値解析的に検討し、水環境の利用や保全に関する基礎的資料を得ようとするものである。

2. 数値計算

(1) 支配方程式

a) 運動方程式と連続の式

流体が非圧縮性で密度は塩分のみ関数とし、Boussinesq近似が適用できるとすると、 x 方向、 y 方向および z 方向の運動量方程式は x 軸を水平な基準面にとり、 y 軸および z 軸を、それぞれ x 軸と直角方向および基準面より鉛直上向きにとると次式で与えられる。

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\frac{Dw}{Dt} = -\frac{\rho}{\rho_0} g - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) \quad (3)$$

ここに、 t は時間、 u 、 v および w は、それぞれ x 方向、 y 方向および z 方向の流速成分、 ρ_0 は流体の基準密度、 ρ は流体の密度、 p は圧力、 g は重力加速度、 τ_{xx} 、 τ_{yx} 、 τ_{zx} 、 τ_{xy} 、 τ_{yy} 、 τ_{zy} 、 τ_{xz} 、 τ_{yz} および τ_{zz} はReynolds応力であり、テンソル表示すると以下のように表される。

$$\tau_{ji}/\rho_0 = (\nu + \nu_t) (\partial u_j / \partial x_i + \partial u_i / \partial x_j) \quad (4)$$

ここに、 ν は動粘性係数である。

また、 ν_t はSGS(subgrid-scale)の渦動粘性係数であり、次式で与えられる⁷⁾。

$$\nu_t = (c_s \Delta)^2 \left[\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right]^{1/2} \quad (5)$$

ここに、 c_s はSmagorinsky定数、 $\Delta = (\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z)^{1/3}$ 、 Δx 、 Δy および Δz は、それぞれ x 、 y および z 方向の格子間隔である。

また、連続の式は次式で与えられる。

$$\partial u / \partial x + \partial v / \partial y + \partial w / \partial z = 0 \quad (6)$$

c) 塩分の保存式

塩分の保存式は次式で表される。

$$\frac{DS}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial S}{\partial z} \right) \quad (7)$$

ここに、 S は塩分、 K_x 、 K_y および K_z は乱流拡散係数であり、 x 、 y および z 方向の流速成分に依存すると仮定すると次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} K_x &= \gamma_x [a_T (v^2 + w^2) + a_L u^2] / q \\ K_y &= \gamma_y [a_T (u^2 + w^2) + a_L v^2] / q \\ K_z &= \gamma_z [a_T (u^2 + v^2) + a_L w^2] / q \\ q &= (u^2 + v^2 + w^2)^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

ここに、 γ_x 、 γ_y および γ_z は正の係数、 a_T 、 a_L は乱流拡散係数に寄与する特性長であり、次式で与える。

$$a_T = (\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z)^{1/3}, \quad a_L = c_1 \cdot a_T \quad (9)$$

ここに、 c_1 は正の係数である。

d) 状態方程式

状態方程式は次式で表される。

$$\rho / \rho_0 = 1 + \beta S, \quad \beta = (\rho_s - \rho_0) / \rho_s \quad (10)$$

ここに、 ρ_s は、塩水の密度である。

(2) 初期条件および境界条件

初期条件は、静水位の状態とする。下流、上流、底面、自由水面および側方境界においては、以下のような境界条件を課す。

a) 下流

水面変動量 η は次式で与える。

$$\eta(t) = a \sin \sigma t \quad (11)$$

ここに、 a は潮汐の振幅、 σ は角周波数($\sigma = 2\pi/T$ 、 T :潮汐の周期)である。

x 、 y および z 方向の流速成分には以下の条件を課す。

$$\partial^2 u / \partial x^2 = 0, \quad v = w = 0 \quad (12)$$

また、塩分は上げ潮時および下げ潮時において以下の条件を課す。

$$\left. \begin{aligned} S &= S_0 G(t) \quad (\text{flood : } u > 0) \\ G(t) &= 1 - (1 - \sin \sigma t) S' \\ \partial^2 S / \partial x^2 &= 0 \quad (\text{ebb : } u < 0) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

ここに、 S_0 は塩分、 S' は重み係数である。

b) 上流

流速分布は次式で表す対数則分布を仮定する。

$$\left. \begin{aligned} u &= u_\xi \left[\ln \{ (e-1)(z-z_b) / (\xi-z_b) + 1 \} \right] \\ v &= w = 0 \\ \partial^2 S / \partial x^2 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

ここに、 u_ξ は水面における x 方向の流速成分、 e は自然対数の底、 ξ は基準面から自由水面までの高さである。

c) 底面

$$\left. \begin{aligned} u &= v = w = 0 \\ K_x(\partial S/\partial x)(\partial z_b/\partial x) - K_z(\partial S/\partial z) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

d) 自由水面

$$\left. \begin{aligned} p &= 0 \\ w_\xi &= \partial \xi / \partial t + u_\xi(\partial \xi / \partial x) + v_\xi(\partial \xi / \partial y) \\ \partial u / \partial z &= 0, \quad \partial v / \partial z = 0 \\ K_x(\partial S / \partial x)(\partial \xi / \partial x) - K_z(\partial S / \partial z) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

ここに、 u_ξ 、 v_ξ および w_ξ は、水面における x 、 y および z 方向の流速成分である。

e) 側方境界

$$u = v = w = 0, \quad \partial S / \partial y = 0 \quad (17)$$

(3) 座標変換および変数変換

自由水面の時・空間的変動や底面の空間的変化のため、対象とする数値解析領域は必ずしも直方体ではない。解析領域を直方体として取り扱ふと、境界における取り扱いが容易になり、領域内の流れ場をうまく記述するのに好都合である。そこで、対象とする物理座標に対して次式のような座標変換を行う。

$$\left. \begin{aligned} z' &= (z - z_b) f_b(x, y, t) \\ f_b(x, y, t) &= 1 / (\xi(x, y, t) - z_b(x, y, t)) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

ここに、 z_b は基準面から底面までの高さである。

座標変換によると従属変数が (x, y, z, t) から (x, y, z', t) に変わり、座標による微分は以下ようになる。

$$\left. \begin{aligned} \partial / \partial t &= \partial / \partial t + F_1 \partial / \partial z', \quad \partial / \partial x = \partial / \partial x + F_2 \partial / \partial z' \\ \partial / \partial y &= \partial / \partial y + F_3 \partial / \partial z', \quad \partial / \partial z = F_4 \partial / \partial z' \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

なお、 F_1 、 F_2 、 F_3 および F_4 は、次式のように表される。

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= z' / f_b (\partial f_b / \partial t) - f_b (\partial z_b / \partial t) \\ F_2 &= z' / f_b (\partial f_b / \partial x) - f_b (\partial z_b / \partial x) \\ F_3 &= z' / f_b (\partial f_b / \partial y) - f_b (\partial z_b / \partial y) \\ F_4 &= f_b \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

この座標変換を運動量方程式、連続の式、水面形の方程式および塩分の保存式に適用し、流れ場や塩分の時・空間的変動を計算する。

3. 解析結果

(1) 小松ら²⁾の実験に基づく解析

解析では、小松らが室内実験で用いた水路のうち海

域部と潮汐発生装置を除いた水路を対象とする(図-1)。

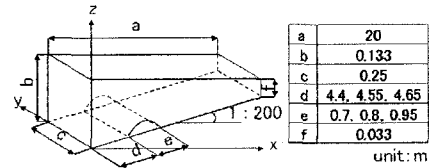
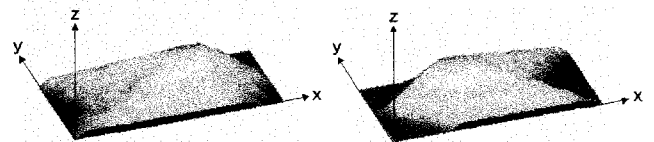


図-1 解析に用いた水路

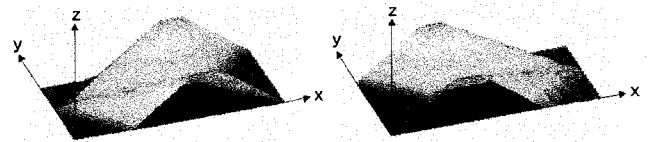
図-2に底設する浅瀬を示す。浅瀬頂部の高さは3 cmで頂部が水路中央と側壁にあり、頂部から翼状に伸びている部分と x 軸とのなす角度が30、45および90°の3通り、横断方向に浅瀬の断面が一定の場合の11通りを対象とした。また、下流側境界の塩分は3および5‰、潮汐の振幅は0.7 cm、周期は240 s、上流境界における淡水流入量は50 ml/sである。 x および y 方向の格子間隔は、それぞれ5 cmおよび2.5 cm、鉛直方向は10分割し、時間刻み Δt は潮汐の周期を8000等分し、20周期計算した。式(5)中のSmagorinsky定数は0.1⁸⁾、式(8)中の γ_x 、 γ_y および γ_z は、それぞれ0.1、 3×10^{-3} および 3×10^{-3} 、式(9)中の c_1 は50、式(13)中の S' は0.1とした。

解析に用いた浅瀬のうちで塩水遡上の制御効果が最大であったのは図-2(a)で最浅部から下流に向けて翼状に伸びている部分と x 軸とのなす角度が30°の場合(以後、type-a30と記す)であった。以後の考察には、type-a30と横断方向に浅瀬の断面が一定の場合(以後、type-x90と記す)の解析結果を用いる。



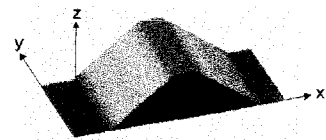
(a) type-a30

(b) type-b30



(c) type-c30

(d) type-d30

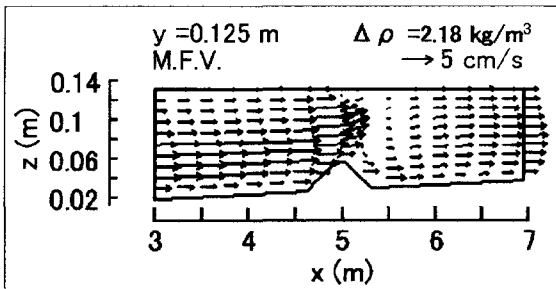


(e) type-x90

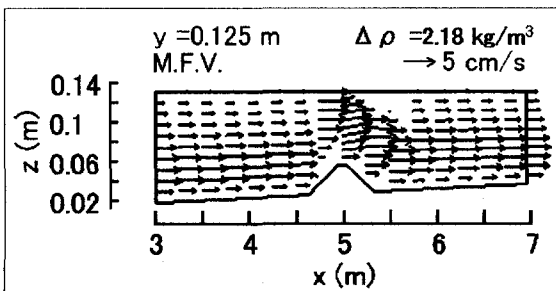
図-2 解析に用いた浅瀬の形状例

(2) 浅瀬周辺の流れ

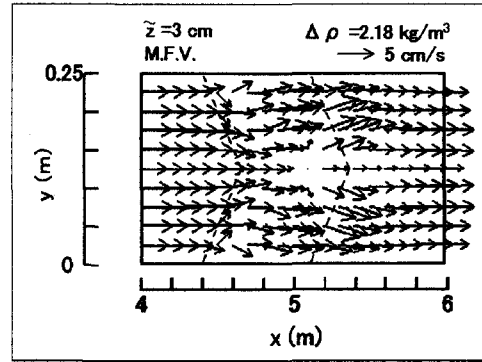
図-3は、上流向きの流速が最大となる位相（以後、MFVと記す）におけるtype-a30とx90の浅瀬周辺の流速ベクトルを示す。なお、下流側境界における塩分は3%であり、図中の破線は構造物の底設、(a)と(b)は水路中央における結果、(c)と(d)は構造物を底設しない場合の水路床より3 cmの高さにおける結果である。(a)と(b)を比較すると、両typeとも $x=5$ m付近において流速は最大となり、最大流速は水深の2/3程度の深さで生じている。また、type-a30の $x=5.25$ m付近では水平方向流速はかなり小さいものの、type-x90では浅瀬の頂部とほぼ同程度である。さらに、type-a30の浅瀬頂部付近においては、鉛直方向流速が大きくなっている。なお、浅瀬の下流側と $x=6$ m付近より上流側での流速は両typeともほぼ同一である。一方、(c)と(d)を比較すると、type-a30の場合、構造物の下流側では構造物の稜線に沿うように流れが収束し、また、構造物の上流側では逆に稜線に沿って流れは発散している。type-x90の場合、構造物の下流側では流れが収束しているが、type-a30と比較するとその度合いは小さい。なお、側壁付近を除けば、構造物の上流側における縦断方向流速はtype-a30より大きい。2次元構造物と3次元構造物の底設が流れに及ぼす影響は、構造物の上流側法尻において顕著である。こうした、縦断・横断方向の流速の歪みの大小は塩水の混合に影響を及ぼすと考える。



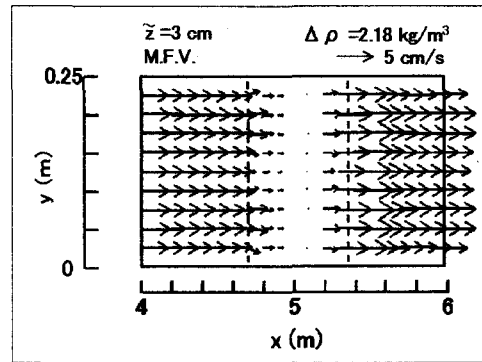
(a) type-a30(u-w)



(b) type-x90(u-w)



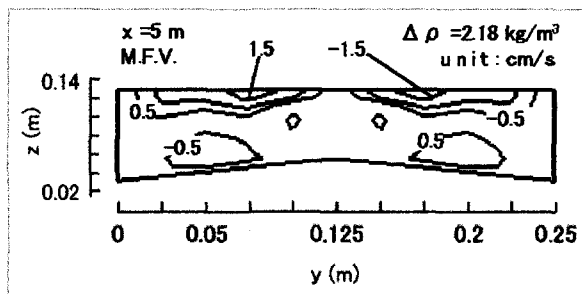
(c) type-a30(u-v)



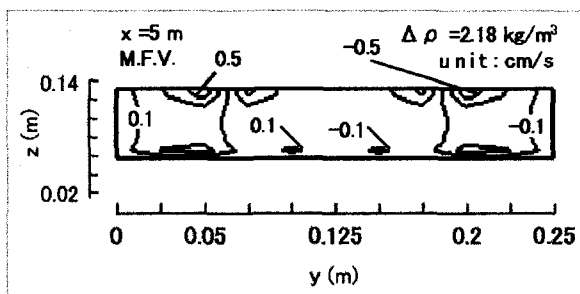
(d) type-x90(u-v)

図-3 MFVの位相における浅瀬周辺の流速ベクトル

図-4は、 $x=5$ mでのMFVにおける横断方向流速(v)の分布を示したものであり、(a)および(b)は、それぞれtype-a30およびx90の結果である。なお、 $y=0$ mから水路中央に向かう流れが正、 $y=0.25$ mから水路中央に向かう流れが負であり、上流からみたものである。(a)では、底面付近では深部から浅部へ、水面付近では水路中央から側壁へ向かう水深スケールの循環流が存在する。また、 $y=0.1$ mの底面付近においては、潮汐の一周期間を通して流向は変化しないが、水面付近では上げ潮時および下げ潮時には、それぞれ側壁および水路中央に向かう流れが生ずる。Li⁹⁾は、対称な横断面を有する水路を対象とした解析から、満潮時（以後、HWSと記す）および干潮時には、横断方向流速は、それぞれ深部から浅部および深部から浅部へ向かうこと、流速振幅は位相とともに変化することを指摘している。前述したように、本解析での結果は水深によって流れの時間変化が異なる。Liとの差は、水路床の形状に起因するのではないかと考える。(b)では、側壁から水路中央に向かう流れが存在し、流速振幅は $y=0.05$ あるいは 0.2 m付近の水面において最大となる。(a)と比較すると、水面および底面付近の流速振幅は、それぞれ1/3および1/5程度でありかなり小さく、流況も異なる。

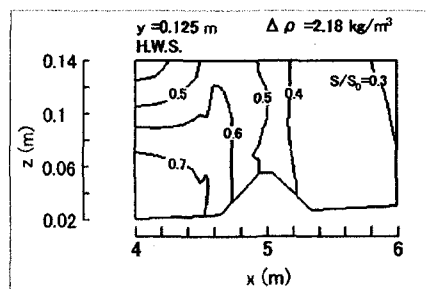


(a) type-a30

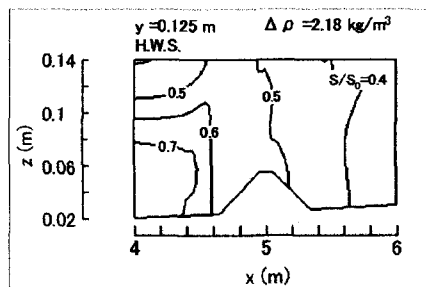


(b) type-x90

図-4 MFVの位相における横断方向流速



(b) type-a30



(c) type-x90

図-5 HWSの位相における等塩分線

(3) 満潮時における構造物周辺の塩分

図-5は、塩水の遡上距離が最大となるHWSにおける塩分の空間分布を示したものであり、(a)、(b)および(c)は、それぞれ浅瀬がない場合、type-a30およびx90の場合である。なお、下流側境界における塩分は3%であり、水路中央に相当する。

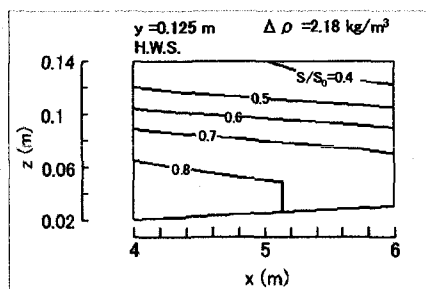
(a)では、底面近傍には、下流側境界の塩分の80%以上の淡塩混合水が存在し、成層化が顕著である。また、水面近傍においては下流側境界の塩分の1/3程度の比較的高塩分の淡塩混合水が存在する。(b)では、浅瀬に誘起される鉛直流の影響を受けて比較的高塩分の淡塩混合水が水面近傍まで舌状に拡がり、鉛直混合が顕著である。(a)での底面における $S/S_0=0.5$ の等塩分線の位置は $x=9.5$ m付近であり、浅瀬の設置により4.5 m程度侵入距離が短くなっている。一方、(c)では、浅瀬の下

流側では(b)とほぼ似た傾向を示すが、上流側では(b)よりも等塩分線の侵入距離が長くなっている。このことは、図-3あるいは図-4に示すように、流速勾配あるいは横断方向の流速振幅の増大によって水平方向の混合が強くなることに起因すると考える。

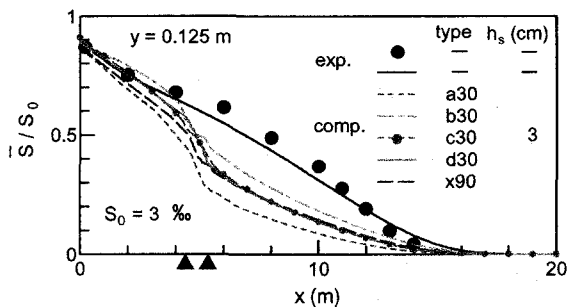
(4) 時間および水深平均した塩分の空間分布

図-6は、水路中央および側壁から2.5 cmにおける時間および水深平均した塩分の空間分布を示したものであり、図中の黒三角間は浅瀬の設置範囲である。なお、下流側境界における塩分は3%である。最浅部から翼状に伸びている部分とx軸とのなす角度が 30° の4通りとtype-x90の結果を小松らの実験結果、小松らの実験結果に基づく解析結果とともに示している。

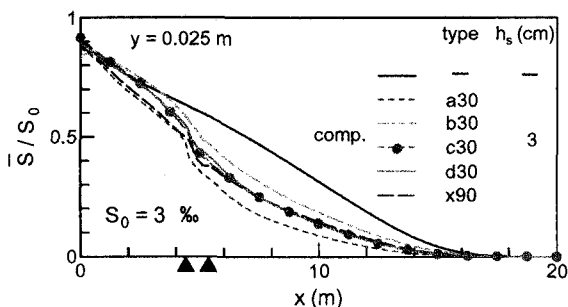
(a)の水路中央におけるけっかをみると、浅瀬がない場合、浅瀬の設置下流端である $x=4.4$ および上流端である5.35 mにおける S/S_0 は、それぞれ0.52および0.46程度である。一方、浅瀬を設置した場合、いずれの場合とも、 $x=3$ m付近から塩分は急激に低下している。また、 $x=3$ m付近の塩分 S/S_0 は、type-a30, b30, c30およびd30では、それぞれ0.61, 0.72, 0.68および0.68程度であったものが、 $x=5.35$ mでは、それぞれ0.27, 0.46, 0.41および0.38程度であり2/5-3/5に低下している。一方、(b)をみると、塩分の分布は(a)とよく似た傾向を示し、type-a30の場合が塩水遡上の制御効果が最も高い。



(a) 浅瀬なし



(a) $y = 0.125$ m



(b) $y = 0.025$ m

図-6 時間・水深平均した塩分 (▲-▲:浅瀬の設置範囲)

図-7は、浅瀬がない場合の時間および水深平均した塩分に対する type-a30 および x90 のそれらの空間分布を示したものであり、下流側境界における塩分は3および5 ‰である。下流側境界の塩分が5 ‰の場合、制御効率が若干悪くなっているものの、浅瀬より上流側では、下流側境界における塩分が3および5 ‰の場合とも、浅瀬がない場合の1/2以下であり、下流側境界からの距離の増大とともにその割合は減少する。こうしたことから、かなり小規模な浅瀬であってもその形状によって塩水の侵入を制御可能であることが判る。

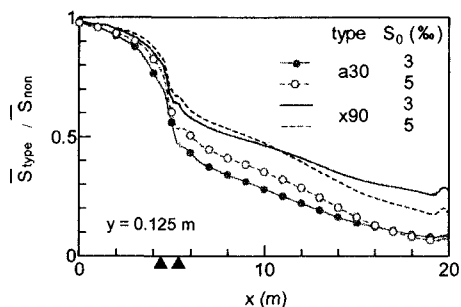


図-7 塩水遡上の制御効率 (▲-▲:浅瀬の設置範囲)

4. おわりに

潮位変動を考慮した塩水楔の遡上に関する3次元数値モデルを開発し、モデル水路を用いた数値解析を行なうとともに、塩水遡上の制御を目的とした浅瀬を底設した場合の解析を行い、塩水遡上の制御効果について調べた。得た結果を要約すると以下の通りである。

- (1) 浅瀬の存在によって、shear、横断・鉛直方向の流速が増大し混合が強くなり、塩水の侵入が制御される。
- (2) 11種類の浅瀬のうち、水路中央に最浅部があり側方ほど水深が増大する type-a30 の塩水遡上制御効果が最も高い。なお、塩水遡上の制御効果が浅瀬の形状に依存するのは、抵抗特性の違いによる鉛直循環流の変化のためではないかと考える。

- (3) 浅瀬の容積は、設置区間の全容積（静水時）の2%程度を占めるが、上流部での水位の上昇も生ぜず、浅瀬周辺では塩分を最大で2/5-3/5に低下させることが可能であることから、有用な制御構造物であると考えられる。

浅瀬を設置して、塩水の遡上を人工的に制御する方法を提案し、数値解析を通して制御方法の有用性を検証できた。しかしながら、一様勾配、水路幅一定のモデル水路における解析であり、現地への適用に対しては、さらに多くの解析を行い基礎的資料を蓄積する必要がある。

謝辞：本研究は、文部省科学研究費（基盤研究（A）, No. 10305036, 代表者：田中 仁）および河川整備基金（河川環境管理財団）の一部として行われた。

参考文献

- 1) Jirka, G.H. and M.Arita: Density currents or density wedge boundary layer influence and control method, J.F.M., Vol.177, pp.187-206, 1987.
- 2) 小松利光・安達貴浩・孫 双科・川上義幸・米須清彦：感潮河川における塩水遡上の人工的制御法についての研究，水工学論文集，第40巻，pp.517-522, 1996.
- 3) 伊福 誠・原槇利幸：気泡噴流による塩水遡上制御の数値解析，海岸工学論文集，第46巻(1)，pp.476-480, 1999.
- 4) Li, C., J.O'Donnel, A.Valle-Levinson, H.Li, K.-C.Wong and K.M.M.Lwiza: Tide induced mass-flux in shallow estuaries, Ocean wave measurement and analysis, Vol.2, pp.1510-1524, 1997.
- 5) 大西亮一・田中康一：河口附近の水源における水質（塩分濃度）対策について-利根川河口を例として-，農業土木試験場技報，第154号，WM第2号，pp.1-63, 1983.
- 6) 藤原広和・沢本正樹・神山尚人：複断面水路における河口密度流の混合特性，海岸工学論文集，第42巻(1)，pp.416-420, 1995.
- 7) 巽 友正編：乱流現象の科学，東京大学出版会，p.272, 1986.
- 8) 伊福 誠・原槇利幸：河口密度流の混合特性に及ぼす日潮不等の影響，水工学論文集，第44巻，pp.1011-1016, 2000.
- 9) Li, C.: 3D analytic model for testing numerical tidal models, Jour.Hydraulic Eng., Vol.127, No.9, pp.709-717, 2001.

(2001. 10. 1 受付)