

ベーン型構造物周辺における流れの構造と塩水の混合特性

伊 福 誠*・吉 井 勇**

1. ま え が き

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。

近年、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は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が進められている (Jirka・Arita, 1987)。しかしながら、この堰を比較的流下能力の低い河川に設置することへの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は極めて重要である。小松ら (1996) 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、著者ら (1999) 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ている。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鉛直 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 (1997) は、主流と直角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 (1983) は、水路に渇を設けた室内実験によって作渇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。また、藤原ら (1995) 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る shear 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、河床の形状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塩水遡上制御構造物を提案する。さらに、その構造物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 解 析

2.1 基礎方程式

a) 運動量および連続の方程式

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。

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

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

* 正 会 員 工 博 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科
** 学生会員 愛媛大学大学院理工学研究科

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

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_{yz} 、 τ_{zz} 、 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。

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

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。

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

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。

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

b) 水面形の方程式

水面形の方程式は連続の式を底面から水面まで積分して、次式のように与えられる。

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_b}^{\xi} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{z_b}^{\xi} v dz = 0 \quad (7)$$

ここに、 ξ は基準面から自由水面までの高さ、 z_b は基準面から底面までの高さである。

c) 塩分の保存式

塩分の保存式は次式で表される。

$$\frac{DS}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial S}{\partial z} \right) \quad (8)$$

ここに、 S は塩分濃度、 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。

$$\left. \begin{aligned} K_x &= \gamma_x \{ a_T (v^2 + w^2) + a_L u^2 \} / q \\ K_y &= \gamma_y \{ a_T (u^2 + w^2) + a_L v^2 \} / q \\ K_z &= \gamma_z \{ a_T (u^2 + v^2) + a_L w^2 \} / q \\ q &= (u^2 + v^2 + w^2)^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

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、次式で与えられる。

$$a_T = (\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z)^{1/3}, \quad a_L = c_1 \cdot a_T \quad (10)$$

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。

$$\rho/\rho_0 = 1 + \beta S, \quad \beta = (\rho_s - \rho_0)/\rho_s \quad (11)$$

ここに、 ρ_s は海水の密度である。

2.2 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。

$$\eta(t) = a \sin \sigma t \quad (12)$$

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。

$$\partial^2 u / \partial x^2 = 0, \quad v = w = 0 \quad (13)$$

また、塩分濃度は漲潮時 (flood) および落潮時 (ebb) において以下の条件を課す。

$$\left. \begin{aligned} S &= S_0 G(t) \quad (\text{flood: } u > 0) \\ G(t) &= 1 - (1 - \sin \sigma t) S' \\ \partial^2 S / \partial x^2 &= 0 \quad (\text{ebb: } u < 0) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

ここに、 S_0 は海域における塩分濃度、 S' は 1 より小さい値である。

b) 上流

流速分布は次式で表す対数則分布を仮定する。

$$\left. \begin{aligned} u &= u_e \{ \ln \{ (e-1)(z-z_b)/(\xi-z_b)+1 \} \} \\ v &= w = 0 \\ \partial^2 S / \partial x^2 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

ここに、 u_e は水面における x 方向の流速成分、 e は自然対数の底である。

c) 底面

$$u = v = w = 0, \quad \partial S / \partial z = 0 \quad (16)$$

d) 自由水面

$$\left. \begin{aligned} p &= 0 \\ w_e &= \partial \xi / \partial t + u_e (\partial \xi / \partial x) + v_e (\partial \xi / \partial y) \\ \partial u / \partial z &= 0, \quad \partial v / \partial z = 0 \\ w_e S - K_z (\partial S / \partial z) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

ここに、 u_e 、 v_e および w_e 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

$$u = v = w = 0, \quad \partial S / \partial y = 0 \quad (18)$$

2.3 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变化のため、対象とする数値解析領域は必ずしも直方体ではない。解析対象領域を直方体として取り扱うと、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。

$$\left. \begin{aligned} z' &= (z - z_b) f_b(x, y, t), \\ f_b(x, y, t) &= \frac{1}{\xi(x, y, t) - z_b(x, y, t)} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

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

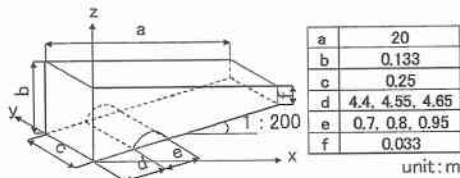


図-1 解析に用いた水路の諸元

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial t} + F_1 \frac{\partial}{\partial z'}, \quad \frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} + F_2 \frac{\partial}{\partial z'} \\ \frac{\partial}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial y} + F_3 \frac{\partial}{\partial z'}, \quad \frac{\partial}{\partial z} = F_4 \frac{\partial}{\partial z'} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (20)$$

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

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= z' / [f_b (\partial f_b / \partial t) - f_b (\partial z_b / \partial t)] \\ F_2 &= z' / [f_b (\partial f_b / \partial x) - f_b (\partial z_b / \partial x)] \\ F_3 &= z' / [f_b (\partial f_b / \partial y) - f_b (\partial z_b / \partial y)] \\ F_4 &= f_b \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (21)$$

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

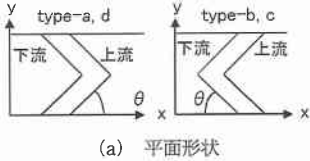
解析では、小松らが室内実験で用いた水路のうち海域部と潮汐発生装置を除いた水路を対象とする (図-1)。

図-2(a) はベーン型構造物の平面形状を示す。θは30, 45 および 90°の3通りであり、河口から4.4~5.35 mの区間に図-2(b)のような形状の構造物を設置した。また、海域の塩分濃度は1および3 g/kg、潮汐の振幅は0.25 および 0.7 cm、周期は240 s、上流境界における淡水流入量は35 および 50 ml/sである。解析では、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、時刻刻みは潮汐の周期を8000等分し、20周期計算した。

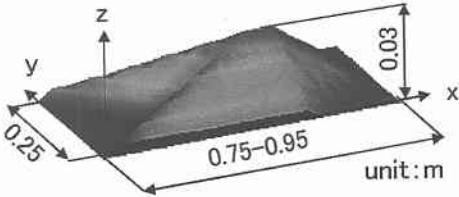
解析に用いたベーン型構造物は表-1に示す通りである。type-aとdはベーンが上流方向に凸、type-bとcはベーンが下流方向に凸である。また、type-aとbは水路中央の水深が最も浅く側方ほど徐々に深くなり、type-cとdは水路中央の水深が最も深く側方ほど徐々に浅くなる。pattern 1, 2 および 3 はθが30, 45 および 90°である。x_{down} および x_{up} は、それぞれベーン型構造物の設置下流端および上流端のx方向位置である。なお、type-aとbのpattern 3 および type-cとdのpattern 3の形状は同一である。

3.1 構造物周辺の流れ

図-3は、type-aのpattern 1のベーン型構造物周辺の流速ベクトルであり、水位が最大となるt/T=0.25の位相におけるものである。潮汐の振幅および淡水流量は、



(a) 平面形状



(b) 鳥瞰図 (type-a)

図-2 ベーン型構造物の形状とサイズ

表-1 解析したベーン型構造物の種類

type	pattern	θ (degree)	x _{down} (m)	x _{up} (m)
a	1	30	4.4	5.35
	2	45	4.55	
	3	90	4.6	
b	1	30	4.4	
	2	45	4.55	
	3	90	4.6	
c	1	30	4.4	
	2	45	4.55	
	3	90	4.6	
d	1	30	4.4	
	2	45	4.55	
	3	90	4.6	

それぞれ0.7 cm および 50 ml である、また、図中のzはベーン型構造物を設置しない場合の底面からの高さである。なお、ベーン型構造物を設置しない場合、主流と直角方向の流速は、主流方向のその1/1000~1/200であり極めて小さい。x=4.4~4.6 mの側方境界付近を除けば、ベクトルの向きは水路中央方向であり、主流と直角方向の流速成分がかなり大きい。一方、x=5.2~5.4 mにかけては、水路中央を除けばベクトルの向きは側方境界方向であり、x=4.4~4.6 mの流速振幅とほぼ同一である。さらに、ベーン型構造物上流端より上流側では、水路中央を除けばベクトルの向きは水路中央方向である。ベーン型構造物の設置によって、流れがかなり複雑になり、水平方向の流速勾配 (以下、shear と記す) がかなり大きくなる。

図-4は、t/T=0.25の位相におけるベーン型構造物周辺の流速勾配∂u/∂yの空間分布を示したものである。なお、この断面は水路中央における下流側の法尻に相当する。絶対値が0.4 s⁻¹程度のshearが水路の側方境界付近に生じている。これは側方境界においてnon-slipの境界条件を課したためである。また、水路中央付近においては、水深の1/3程度の深さでshearが大きい。なお、構

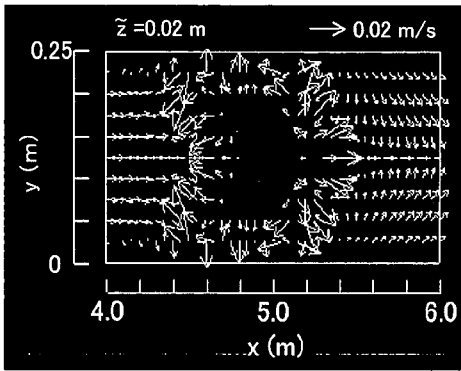
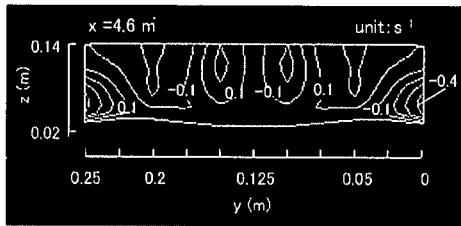


図-3 構造物周辺の流速ベクトル


 図-4 流速勾配の分布 (コンターの間隔: 0.1 s^{-1})

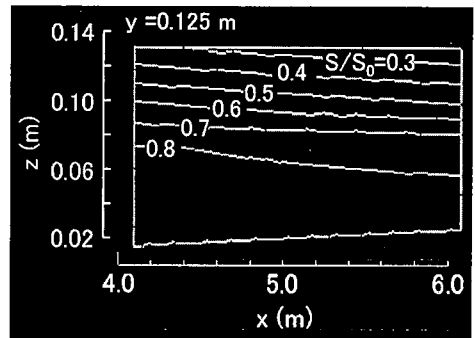
造物を設置しない場合, shear の絶対値は側方境界において 0.1 s^{-1} 程度であり, その他の領域ではかなり小さい。図-3 および 4 に示した流速振幅の空間的な差違や shear の大小は, 物質の移流・拡散に大きな影響を及ぼすと考えられる。

3.2 高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高潮時 ($t/T = 0.25$) における塩分の空間分布を示したものである。なお, 潮汐の振幅, 淡水流量および海域の塩分濃度は, それぞれ 0.7 cm , 50 ml および 3 g/kg である。

(a) の構造物がない場合, 底面近傍には, 海域の塩分濃度の 80% 以上の淡塩混合水が侵入し, 成層化が顕著である。また, 水面近傍においては海域の塩分濃度の 1/3 程度の比較的高塩分の淡塩混合水が存在する。(b) は type-a, pattern 1 の構造物を設置した場合の $y = 0.05 \text{ m}$ における結果である。(a) と比較すると, $S/S_0 = 0.7$ の等塩分線は $x = 4.3 \text{ m}$ 付近までしか侵入しておらず, 構造物の下流側で塩水の遡上が制御されている。また, $x = 5.5 \text{ m}$ の水面近傍には, $S/S_0 = 0.4$ の等塩分線が存在する。さらに, $x = 5 \text{ m}$ 付近では $S/S_0 = 0.5$ の等塩分線が水深の 1/2 程度まで拡がる。一方, 構造物より上流側では緩混合型の混合形態を示している。(a) と比較して, 構造物周辺の成層化が破壊したのは, 構造物の設置により y 方向の流速成分の増大や鉛直流が誘起され混合が強くなったためであると考えられる。 $y = 0.125 \text{ m}$ の結果である (c) では,

$S/S_0 = 0.6$ および 0.7 の等塩分線は, それぞれ $x = 4.7$ および 4.5 m 付近まで侵入している。なお, $S/S_0 = 0.5$ の等塩分線は, $x = 4.9 \text{ m}$ 付近まで侵入し, 底面から水面近傍までほぼ同一の値であり, 強混合型の混合形態を示している。また, $S/S_0 = 0.4$ の等塩分線は $x = 5.2 \text{ m}$ 付近に位置し, $S/S_0 = 0.5$ の等塩分線よりも強混合の度合いが大きく, (b) と比較すると侵入距離は 1.5 m 程度短い。 $S/S_0 = 0.4$ 以下の等塩分線も似た傾向を示す。以上のような, 浅部と深部における塩水侵入の特性は, 藤原らが複断面水路における実験で得た結果と似た傾向を示す。



(a) 構造物なし

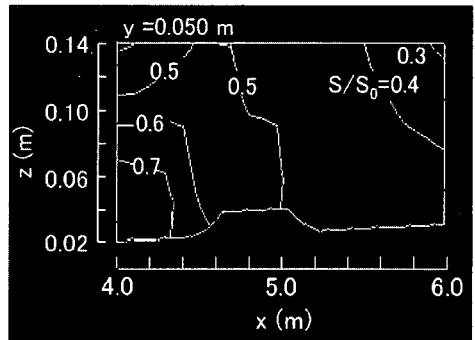
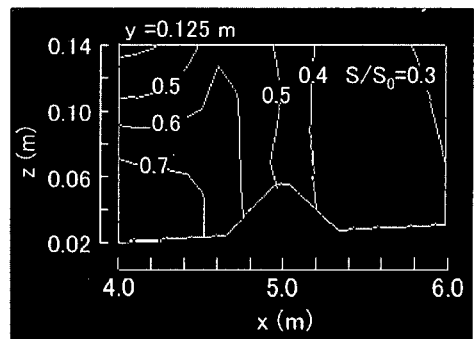
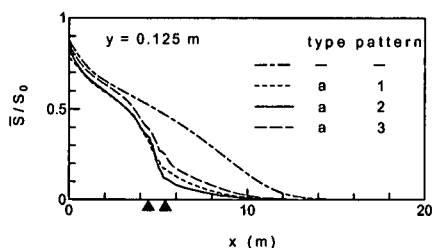
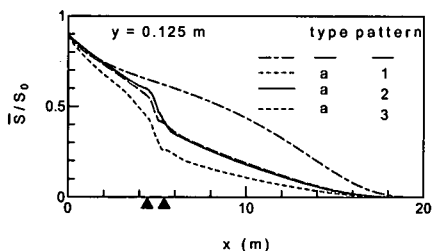

 (b) $y = 0.05 \text{ m}$ (type-a, pattern 1)

 (c) $y = 0.125 \text{ m}$ (type-a, pattern 1)

 図-5 塩分濃度の分布 ($t/T = 0.25$)



(a) 潮汐振幅: 0.25 cm, 淡水流量: 35 ml, S_0 : 1 g/kg



(b) 潮汐振幅: 0.7 cm, 淡水流量: 50 ml, S_0 : 3 g/kg

図-6 時間・水深平均した塩分濃度 (▲-▲: 構造物設置区間)

3.3 時間および水深平均した塩分の空間分布

図-6は、時間および水深平均した塩分濃度の空間分布を示したものであり、図中の黒三角間はベーン型構造物の設置範囲を示したものである。なお、ベーン型構造物のtypeはaであり、水路中央断面 $y=0.125$ mにおける結果である。また、(a)および(b)は、それぞれ潮汐の振幅と淡水流量が0.25 cmと35 mlおよび0.7 cmと50 mlの結果である。

(a)をみると、構造物がない場合、構造物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、構造物を設置した場合、いずれのpatternにおいても、 $x=3$ m付近から塩分濃度は急激に低下している。また、 $x=3$ m付近の S/S_0 は、pattern 1, 2および3では、それぞれ0.52, 0.52および0.57程度であったものが、 $x=5.35$ mでは、それぞれ0.17, 0.12および0.25程度であり1/3~2/5に低下している。なお、pattern 2の塩水遡上制御効率が最も高い。

(b)をみると、構造物がない場合、構造物の設置下流端である $x=4.4$ および設置上流端5.35 mにおける S/S_0 は、それぞれ0.65および0.62程度であり、(a)と比較するとその差は小さい。これは、海域の塩分濃度や潮汐振幅の増大に起因するものである。一方、構造物を設置した場合、いずれのpatternにおいても、 $x=4$ m付近から塩分濃度は急激に低下している。また、構造物の設置下流端である $x=4.4$ mの S/S_0 は、pattern 1, 2および3では、それぞれ0.45, 0.6および0.56程度であっ

たものが、 $x=5.35$ mでは、それぞれ0.26, 0.42および0.4程度であり1/2~7/10程度に低下している。しかしながら、pattern 1を除けば、塩分濃度の低下率は(a)と比較すると小さい。なお、pattern 1の塩水遡上制御効率が最も高く、(a)とは異なる結果を示す。

4. あとがき

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、塩水の遡上を制御する構造物を底面に設置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) 底面に構造物を設置することによって、主流と直角方向や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) 10種類のベーン型構造物のうち、水路中央に最浅部があり側方ほど水深が増大するtype-aのpattern 2あるいはpattern 1の塩水遡上制御効果が高い。

(3) ベーン型構造物の容積は、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じず、塩分濃度を最大で1/3~1/2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。

ベーン型構造物を設置して、塩水の遡上を人工的に制御する方法を提案し、その構造物の有用性は検証できた。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る。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

- 伊福 誠・原根利幸 (1999): 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.
- 大西亮一・田中康一 (1983): 河口附近の水源における水質(塩分濃度)対策について一利根川河口を例として一, 農業土木試験場技報, 第154号, WM第2号, pp. 1-63.
- 小松利光・安達貴浩・孫 双科・川上義幸・米須裕彦 (1996): 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.
- 藤原広和・沢本正樹・神山尚人 (1995): 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.
- Jirka, G. H. and M. Arita (1987): Density currents or density wedges: boundary-layer influence and control method, J. F. M., Vol. 177, pp. 187-206.
- Li, C., J. O'Donnel, A. Valle-Levinson, H. Li, K. -C. Wong and K. M. M. Lwiza (1997): Tide induced mass-flux in shallow estuaries, Ocean wave measurement and analysis, Vol. 2, pp. 1510-1524.