

河川河口域における塩水遡上の鉛直 2 次元数値シミュレーション

安達 貴浩*・小松 利光**・橋本 彰博***

1. 本研究の目的

シャープな密度勾配をもつ内部境界面を数値シミュレーションにより正確に再現することは一般に難しく、成層場の乱流構造や平均流動場を厳密に再現するためには、数値モデルの空間分解能を高めるとともに乱流場の異方性を考慮しなければならないことが従来より指摘されている。しかしながらここ最近、 $k-\epsilon$ 乱流モデルのような等方性乱流モデルを用いて実河口域の弱混合もしくは緩混合型の塩水侵入を再現しようとする鉛直 2 次元（あるいは 3 次元）数値シミュレーションがいくつかなされており、実用レベルで十分良好な結果も得られている（例えば、石川ら, 1999）。このような結果は従来の指摘とは一見相反するものであるが、河口域の塩水遡上を対象とした検証結果はそれほど多くなく、しかも実河口域の現象を対象とした場合には境界条件等に不明な点が多いことから、上記の結果が $k-\epsilon$ 乱流モデルの汎用性を意味するとは必ずしも断言できない。

適用される数値モデルの妥当性を確認し精度を検証するためには、室内実験結果を用いた検討が最も有効な手段になると考えられる。しかしながら、河口部塩水侵入を対象としたこのような取り組みは今のところほとんど行われておらず、数少ない検討例である伊福ら（1998）の数値シミュレーションにおいても、境界条件等に十分な配慮がなされていない、乱流モデルが標準的なものではない、等の問題があり、一般性のある知見を引き出すまでには到っていない。一方、成層場における乱流モデルの有効性については、表層密度噴流を対象とした詳細な検討が行われているが（室田ら, 1989）、表層密度噴流には混合形態を決定する上で重要なファクターである潮汐や壁面乱流の影響が含まれていないため、得られた知見を河口部塩水侵入にそのまま適用できるとは考えにくい。

以上のような状況を踏まえて、本研究ではまず、鉛直 2 次元の塩水侵入の室内実験を行い、塩分濃度および流速を詳細に計測することにより数値シミュレーション

の検証データの充実化を試みた。次に、塩分濃度の実測値を境界条件として与えた鉛直 2 次元数値シミュレーションを行い、 $k-\epsilon$ 乱流モデルや混合距離モデルが実験結果をどの程度再現できるかについて調べた。

2. 室内実験の内容

小松ら（1996a）は室内感潮河川水路（小松ら, 1996b）において、他の水理条件を固定し潮位振幅 A のみを変化させる室内実験を行い、それぞれの準定常状態での塩水侵入長や混合形態を比較して塩水侵入の基本特性を明らかにしている。この結果を対象に伊福ら（1998）は数値シミュレーションを行っているが、上記の実験結果は検証データとして必ずしも十分なものではなかったため、今回新たな条件下で同様の室内実験を行い、塩分濃度と流速について詳細な計測を行った。室内実験水路の諸元を表-1 に、また今回行った室内実験ならびに小松ら（1996a）の実験の水理条件を表-2 に示す。

塩分濃度の測定には温度補償付導電率計（KENEK 社製 MK-206）を用い、塩水が侵入している領域全体を網羅できるように計 10 点の測定断面を設け、各断面について塩分濃度の鉛直分布を測定した。また流速の測定には電磁流速計（本体：KENEK 社製 VM-201 H 型、検出部：VMT 2-200-08 PI 型）を用い、河口から 2 m 上流地点および河口と侵入塩水先端部のほぼ中間に位置する地点において、鉛直方向に 1 cm 間隔で測定を行った。なお、バロクリックな流動が支配的となる弱混合形態の塩水侵入（Run 2-1）に関しては、測定範囲が限定される電磁流速計のみでは流速分布の全体像を把握することが出来なかったため、レーザー・ドップラー流速計（LDV）によりデータの補完を行った。

上記の測定で得られたデータに重み付き移動平均操作を施し、潮汐変動よりも周期の十分小さい変動成分を除去して、各物理量のアンサンブル平均値を求めた。また、

表-1 室内実験の諸元

実験水路の寸法 (単位: cm)	海域部	300 (長さ) × 150 (幅) × 80 (深さ)
	河川域	2000 (長さ) × 25 (幅) × 25 (深さ)
河床勾配		1/200
底面粗度		1 cm の正四角柱を流下方向に 10 cm 間隔で配置

* 正 会 員 工博 九州大学大学院工学研究院助教授 環境都市部門
沿岸域環境学講座
** フェロー 工博 九州大学大学院工学研究院教授 同上
*** 学生会員 工修 九州大学大学院工学研究科海洋システム工学専攻

表一2 実験条件

実験ケース名	潮位振幅 A(cm)	河口部平均水深 H ₀ (cm)	潮汐周期 T(sec.)	海域塩分濃度 C ₀ (g/kg)	淡水供給流量 Q _f (cm ³ /sec.)	塩水供給流量 Q _s (cm ³ /sec.)
Run 1-1	0.0	13.3	240	1.0	35	125
Run 1-2	0.5					
Run 1-3	0.7					
Run 1-4	0.8					
Run 1-5	1.2					
Run 1-6	1.5					
Run 1-7	2.0					
Run 2-1	0.5	14.0	240	3.0	60	40
Run 2-2	1.0					
Run 2-3	1.5					
Run 2-4	2.5					

座標系には水平上流側に x 軸、鉛直上方に z 軸をもつ鉛直 2 次元のデカルト座標を用い、海域と河川域の境界断面における河床上を原点として結果を整理した。

3. 数値シミュレーションの概要

(1) σ 座標系による基礎式の記述

本研究で採用した基礎方程式は、以下に示す幅方向に平均された運動方程式、連続の式、塩分の質量保存式、状態方程式の 4 種類である。なお、 $z(\sigma)$ 方向の運動方程式にはエスチャリー域の流動を対象とした他の多くの数値シミュレーションと同様に静水圧近似を適用した。ところで、河床の凹凸や潮汐の干満差が水深に対して比較的大きい場合には、デカルト座標系による記述では数値的な取り扱いが厄介となることがある。このような問題を回避するために、本研究では佐々木 (1998) の座標変換の方法を参考に σ 座標系により基礎式を記述して数値シミュレーションを行った。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(HU)}{\partial t} + \frac{\partial(HUU)}{\partial x} + \frac{\partial(H\sigma U)}{\partial \sigma} \\ &= -gH(1+R\sigma)\frac{\partial H}{\partial x} - gH\frac{\partial}{\partial x}\left(H\int_{\sigma}^1 R d\sigma\right) \\ & - gH(1+R)\frac{dz_b}{dx} + H\frac{\partial}{\partial \sigma}\left((\nu_{ix} + \nu)\frac{\partial U}{\partial \sigma}\right) \\ & - 2H\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{\nu_{ix} + \nu}{H}\frac{\partial U}{\partial \sigma}\left(\sigma\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{dz_b}{dx}\right)\right] \\ & + \frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\frac{\nu_{ix} + \nu}{H}\frac{\partial U}{\partial \sigma}\right) \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

$$H\dot{\sigma} = \sigma \int_0^1 \frac{\partial(HU)}{\partial x} d\sigma - \int_0^{\sigma} \frac{\partial(HU)}{\partial x} d\sigma \dots\dots\dots (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(HU)}{\partial t} + \frac{\partial(HUC)}{\partial x} + \frac{\partial(H\sigma C)}{\partial \sigma} \\ &= H\frac{\partial}{\partial x}\left((D_L + D_{ix} + D_m)\frac{\partial C}{\partial x}\right) \\ & - 2H\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{D_L + D_{ix} + D_m}{H}\frac{\partial C}{\partial \sigma}\left(\sigma\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{dz_b}{dx}\right)\right] \\ & + \frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\frac{D_{ix} + D_m}{H}\frac{\partial U}{\partial \sigma}\right) \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

$$R/R_0 = C/C_0 \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $\sigma = (z - z_b)/(\zeta - z_b)$ であり、 ζ : 水位、 z_b : 水平基準面からの河床高さ、 H : 水深、 g : 重力加速度、 U , W , σ : それぞれ x , z , σ 方向の平均流速成分、 ν : 動粘性係数、 ν_{ix} , ν_{iz} ならびに D_{ix} , D_{iz} : x , z 方向の渦動粘性係数と乱流拡散係数、 D_L : 幅方向の移流分散係数、 D_m : 分子拡散係数、 R : 基準水との比重差 ($R = (\rho - \rho_0)/\rho_0$)、 ρ : 密度、 C : 塩分濃度である。また、添字 0 は各物理量の海域での値を意味する。

次に今回乱流モデルとして採用した混合距離モデル並びに標準型 $k-\epsilon$ 乱流モデルを以下に示す。

<混合距離モデル>

$$\nu_{iz} = \nu_{ix} = [\kappa \sigma H]^2 \frac{1}{H} \left| \frac{\partial H}{\partial \sigma} \right| (1 + \beta Ri)^{-\alpha} \dots\dots\dots (5)$$

$$D_{ix} = D_{iz} = \nu_{ix} / \sigma_i \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 α , β : 減衰関数のモデル定数、 κ : カルマン定数、 σ_i : 乱流シュミット数である。また、 Ri は局所勾配型リチャードソン数で以下の関係により記述される。

$$Ri = -gH \frac{\partial R / \partial \sigma}{(\partial U / \partial \sigma)^2} \dots\dots\dots (7)$$

<標準型 $k-\epsilon$ 乱流モデル>

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(Hk)}{\partial t} + \frac{\partial(UHk)}{\partial x} + \frac{\partial(\sigma Hk)}{\partial \sigma} \\ &= \frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\frac{\nu_{ix}}{\sigma_k} \frac{1}{H} \frac{\partial k}{\partial \sigma}\right) + H(P + G - \epsilon) \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(H\epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(UH\epsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(\sigma H\epsilon)}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\frac{\nu_{ix}}{\sigma_\epsilon} \frac{1}{H} \frac{\partial \epsilon}{\partial \sigma}\right) \\ & + C_{\epsilon 1} H \frac{\epsilon}{k} (P + C_{\epsilon 3} G) - C_{\epsilon 2} H \frac{\epsilon^2}{k} \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

$$\nu_{ix} = \nu_{iz} = C \mu k^2 / \epsilon \dots\dots\dots (10)$$

$$D_{ix} = D_{iz} = \nu_{ix} / \sigma_i \dots\dots\dots (11)$$

但し、

$$P = \frac{\nu_{ix}}{H^2} \left(\frac{\partial U}{\partial \sigma} \right)^2 \dots\dots\dots (12)$$

$$G = \frac{\nu_{ix}}{\sigma_i} \frac{1}{H} \frac{\partial R}{\partial \sigma} g \dots\dots\dots (13)$$

ここで、 k : 乱れエネルギー、 ϵ : 粘性による乱れエネルギー

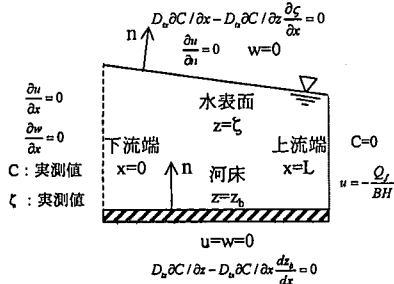


図-1 境界条件について (デカルト座標での記述)

ギーの散逸率である。また、 σ_k , σ_ε , C_μ , $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, $C_{\varepsilon 3}$ は k - ε 乱流モデルのモデル定数でそれぞれ 1.0, 1.3, 0.09, 1.44, 0.6, 0.0 を与えた。更に、幅方向の移流分散係数は次式で評価した。

$$D_L = 2.93 B u_{* \text{slide}} \quad (14)$$

ここで、 $u_{* \text{slide}}$ は側壁の摩擦速度である。

(2) 境界条件

本数値モデルで適用した境界条件をまとめて図-1 に示す。室内実験結果を対象に数値シミュレーションを行う際には、実測の塩分濃度を境界条件として忠実に与える必要があるが、離散的な塩分濃度の測定点が計算格子点上に必ず存在しているとは限らない。しかしながら、 z 方向の塩分濃度の測定間隔は比較的密であったため、

各時刻における z 方向の離散データを線形内挿し、これを連続的な鉛直分布と見なすことにした。また、得られた鉛直分布を各コントロール・ボリュームについて平均し、それらを INDUS 法 (Komatsu ら, 1996) により時間的に内挿して、各タイムステップの河口における塩分濃度を格子点上で求め、境界条件として与えた。また、 k 並びに ε の境界条件は以下のように与えた。

$$\text{上流端: } k/U_*^2 = 4.78 \exp(-2\sigma) \quad (15)$$

$$\varepsilon H/U_*^3 = 9.76 \exp(-3\sigma)/\sqrt{\sigma} \quad (16)$$

$$\text{下流端: } \partial k/\partial x = 0 \quad (17)$$

$$\partial \varepsilon/\partial x = 0 \quad (18)$$

$$\text{水表面: } \partial k/\partial \sigma = 0 \quad (19)$$

$$\varepsilon = k^{3/2}/aH (a=0.08) \quad (20)$$

$$\text{河床: } \partial k/\partial \sigma = 0 \quad (21)$$

$$\varepsilon = \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{\kappa H \Delta \sigma} \ln \frac{H \Delta \sigma + z_0}{z_0} \quad (22)$$

ここで、 U_* は底面の摩擦速度、 B は水路幅、 a は実験定数 (Nakagawa ら, 1975) である。

(3) 底面粗度の取り扱い

室内感潮河川水路の河床には、棧粗度が 1 cm 間隔で配置されているが、その相当砂粒粗度 k_s は足立 (1964) によって実験的に明らかにされている ($k_s \approx 4.5$ cm)。このため、以下の壁法則を利用して河床におけるせん断応力を評価する際にその効果を組み込んだ。

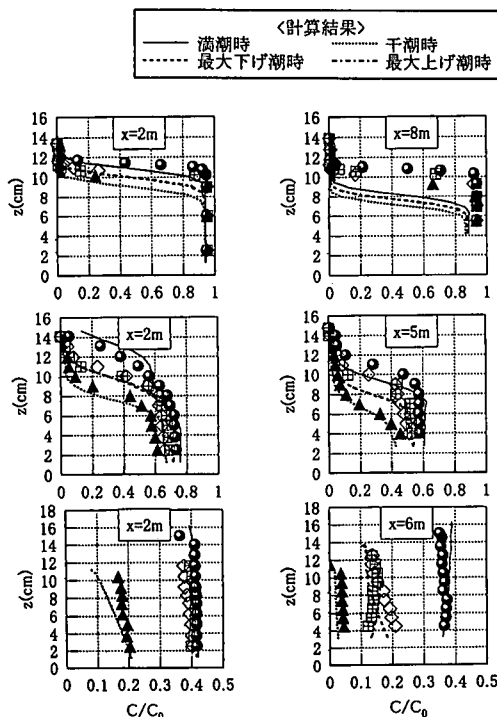
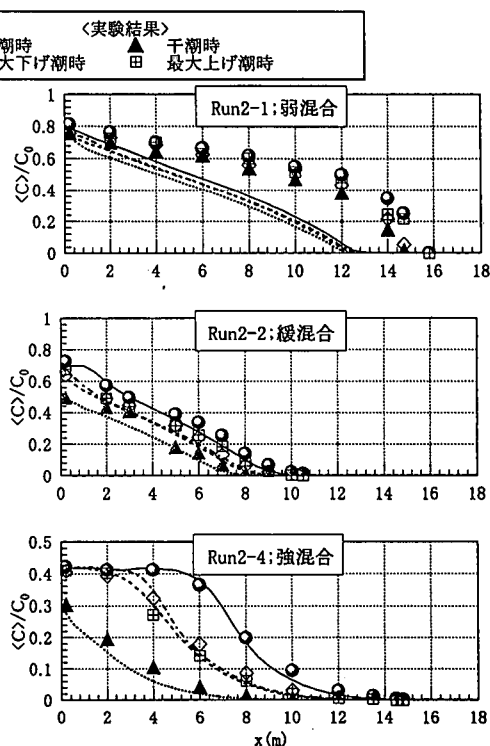


図-2 塩分濃度の鉛直分布 (上段: Run 2-1 (弱混合), 中段: Run 2-2 (緩混合), 下段: Run 2-4 (強混合))

図-3 断面平均塩分濃度 $\langle C \rangle$ の流下方向分布

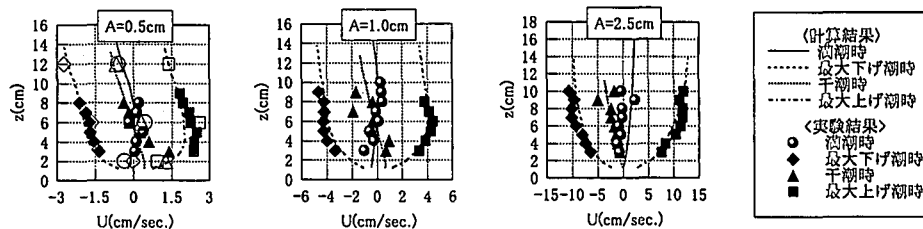


図-4 河口より2 m上流地点における流速 U の鉛直分布 (但し、白抜きのプロットはLDVによる測定を意味する)

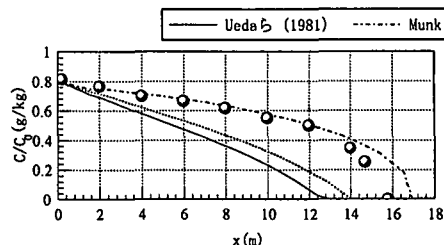


図-5 σ_t の評価法 ($k-\epsilon$ モデル)

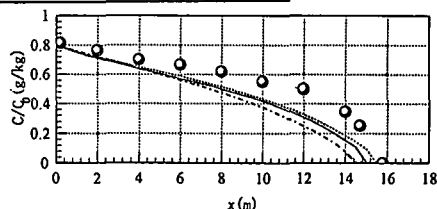


図-6 σ_t の評価法 (混合距離モデル)

$$\frac{U_b}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{H\sigma_b + z_0}{z_0} \quad (\text{但し, } z_0 = \frac{k_s}{33}) \quad \dots\dots (23)$$

ここで、添字 b は河床に接するコントロール・ボリュームの代表点での値を意味する。

4. 数値シミュレーションの結果

(1) 各混合形態についての計算結果

まず、乱流モデルには標準型 $k-\epsilon$ モデルを、 σ_t にはUedaら(1981)のモデル(式(24))を適用し、Run 2-1~Run 2-4の実験結果に対して数値シミュレーションを行った。 $A=0.5$ cm (Run 2-1; 弱混合), 1.0 cm (Run 2-2; 緩混合), 2.5 cm (Run 2-4; 強混合)の時の塩分濃度 C の鉛直分布を見ると(図-2), 強混合型と緩混合型の塩水侵入に関しては、いずれの位相においても実験結果がかなり良好に再現されていることが分かる。一方、弱混合型の塩水侵入の計算結果については、塩・淡水の鉛直混合が過大評価され、下層の塩分濃度が上流に行くにつれて実際よりも著しく低減している。この結果を反映して、弱混合型の結果では塩水侵入長も2 m程度過小評価されており、断面平均塩分濃度 $\langle C \rangle$ が実際よりも単調な分布となっている(図-3)。

次に水平流速 U の計算結果を見ると、弱混合型塩水侵入の内部循環流が鉛直方向に均されて実験結果との間に微妙な違いが見られるものの、往復流の振幅や壁近傍の流速勾配は比較的良好に再現されていることが分かる(図-4)。

なお、本論文の全ての計算結果は空間格子間隔を $\Delta x=50$ cm, $\Delta \sigma=0.05$ とした時のものであるが、更に Δx , $\Delta \sigma$ を細かくして計算を行っても結果にほとんど違

いが見られなかった。従って、適用された空間格子間隔は本実験の密度流場を表現するのに十分な分解能を有していると判断できる。

(2) 乱流モデルの違いが計算結果に及ぼす影響

前節で行った計算では、緩・強混合型の塩水侵入は精度良く再現されるのに対し、弱混合型塩水侵入の再現性は必ずしも満足のいくものではなかった。この数値シミュレーションでは $k-\epsilon$ 乱流モデルとUedaらの σ_t の評価モデルを用いているが、 σ_t 評価法については他の関数形が種々提案されており、適用されたUedaらのモデルは普遍的なモデルというよりはむしろ代表的なモデルの1つと考えることができる。このため、 σ_t を評価する以下の3種類のモデル(Uedaら(1981), Munkら(1948), Kondo(1978))を、 $k-\epsilon$ モデルあるいは混合距離モデルと組み合わせて、 σ_t の評価法の違いが計算結果に及ぼす影響を調べた。

$$\langle \text{Uedaら} \rangle \quad \sigma_t = (1 + 2.5 Ri)^2 \quad \dots\dots\dots (24)$$

$$\langle \text{Munkら} \rangle \quad \sigma_t = (1 + 3.33 Ri)^{2/3} / (1 + 10 Ri)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (25)$$

$$\langle \text{Kondo} \rangle \quad \sigma_t = 6.873 Ri + 1 / (1 + 6.873 Ri) \quad \dots\dots\dots (26)$$

また、混合距離モデルを適用する場合 ν_t の減衰関数は全てUedaら(1981)のモデルによって評価した。

Run 2-1 ($A=0.5$ cm; 弱混合)の満潮時における塩水侵入を対象とした時の、 $k-\epsilon$ モデルについての検討結果を図-5に、混合距離モデルについての結果を図-6に示す。 $k-\epsilon$ モデルを適用した場合、 σ_t が大きくなると、拡散方程式中の鉛直拡散フラックスが抑制されると同時に、 k 方程式中の浮力による乱れエネルギーの生成項 G の吸い込みとしての効果も弱められてくる。前者(成層の安定化)と後者(混合促進)は成層に対して全く逆の働

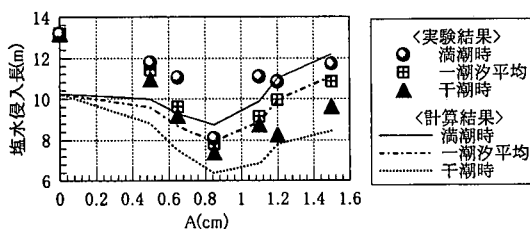


図-7 潮位振幅と塩水侵入長の関係

きを有しているが、後者の効果の方が現象に対して支配的となるため、 Ri の増加に伴う σ_t の増加が最も緩やかな Munk らのモデルを用いた場合に、鉛直混合が最も弱く、塩水侵入長が最大となっている。一方、混合距離モデル中の σ_t は鉛直拡散フラックスの抑制にしか寄与しないため、 ν_t を評価する減衰関数を固定して混合距離モデルを適用すると、Munk らのモデルを用いた時にはむしろ塩水侵入長が最短となっている。また、混合距離モデルよりも $k-\varepsilon$ モデルを適用した時の方が σ_t の評価法の違いに計算結果が敏感に反応しており、 σ_t の評価法によっては混合距離モデルよりもむしろ精度が悪くなっている。

次に同様の検討を緩・強混合型の塩水侵入に対して行ったところ、この場合には計算結果にほとんど違いが見られず、実験結果が良好に再現されることが確認された。

(3) 塩水侵入の代表的な特性量の再現性

次に小松ら (1996a) の室内実験の結果を対象に4の(1)と同様のモデルを用いて数値シミュレーションを行い、潮位振幅 A の変化に対する塩水侵入の代表的な特性量の挙動の再現性について検討を行った。代表的な結果として A と塩水侵入長の関係を図-7に示す。前節までの結果のような一致は見られないが、この時の実験の測定精度が検証データとしては不十分であったことを考慮すると、 A が比較的大きな範囲での計算結果は実験結果と比較的良好に一致していると判断できる。一方、 A が小さな弱混合形態を示す範囲での塩水侵入長は、4の(1)の結果と同様にあまり正確には再現されていない。しかしながら、「潮差のみが変化する場合、潮差の増加に伴って弱混合から緩混合にかけては塩水侵入長は減少し、反対に緩混合から強混合にかけては塩水侵入長が増加する」という実験結果のマクロな特性は概ね再現されていることが分かる。

5. 結 論

1) 乱流モデルとして、 $k-\varepsilon$ モデル、混合距離モデルの

いずれを適用しても、かなり良好に緩・強混合型の塩水侵入を再現できる。

2) 乱流シュミット数 σ_t の評価方法として種々のモデルが提案されている。比較的良く用いられるモデルの範囲でも、 $k-\varepsilon$ 乱流モデルを弱混合型塩水侵入に適用した場合には、 σ_t の評価法の違いによって塩水侵入長等の計算結果が大きく変化することが示された。この結果、 σ_t の評価法によっては混合距離モデルよりも $k-\varepsilon$ モデルの方がむしろ精度が悪くなる場合もあるという知見が得られた。 U や C の鉛直分布や緩・強混合型の塩水侵入の再現性を含めて判断すると、現象の再現能力としてはやはり $k-\varepsilon$ モデルの方が優位という印象を受けるが、 $k-\varepsilon$ モデルを適用するには上記の知見を十分踏まえた取り扱いが必要と言える。

3) 適用した数値モデルにより塩水侵入の代表的な指標である塩水侵入長および混合形態の定性的な挙動も概ね再現されることが確認された。

参 考 文 献

- 足立昭平 (1964): 人工粗度の実験的研究, 土木学会論文集, 第104号, pp. 33-44.
- 石川忠晴・鈴木伴征 (1999): 利根川河口堰下流部における貧酸素水塊の発達・流動に関する現地観測と数値実験, 水工学論文集, 第43巻, pp. 881-886.
- 伊福 誠・楠 芳洋 (1998): 潮汐波の伝播を考慮した塩水侵入の数値計算, 水工学論文集, 第42巻, pp. 781-786.
- 小松利光・孫 双科・安達貴浩・川上義幸・米須清彦 (1996a): 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. 517-524.
- 小松利光・安達貴浩・孫 双科・柴田敏彦 (1996b): 強混合型感潮河川における見掛けの拡散フラックスの評価法, 水工学論文集, 第40巻, pp. 505-510.
- 佐々木淳 (1998): 3次元密度流としての内湾の流れのモデリング, 第34回水工学に関する夏期講習会講義集, pp. B-3-1-20.
- 室田 明・中辻啓二・藤崎 豊 (1989): 乱流モデルによる二次元表層密度噴流の鉛直混合現象の数値計算, 土木学会論文集, 第411号/II-12, pp. 35-44.
- Komatsu, T., K. Asai and M. Mizunuma (1996): Development of highly-accurate and explicit interpolation polynomial, JHHE, Vol. 123, No. 1, pp. 41-50.
- Kondo, J., O. Kanechika and N. Yasuda (1978): Heat and momentum transfer under strong stability in the atmospheric surface layer, J. Atm. Sci., 35, pp. 1012-1021.
- Munk, W. H. and E. R. Anderson (1948): Notes on a theory of thermocline, J. Mar. Res., 7, pp. 276-295.
- Nakagawa, H., Nezu, I. and Ueda, H. (1975): Turbulence of open channel flow over smooth and rough beds, Proc. JSCE, 241, pp. 155-168.
- Ueda, H., S. Mitsumoto and S. Komori. (1981): Bouyancy effects on the turbulent transport processes in the lower atmosphere, Quart. J. R. Met. Soc., 107, pp. 561-578.