

河口における密度流と浮遊物質の輸送 に関する数値計算

NUMERICAL SIMULATION OF THE DENSITY DRIVEN CURRENTS AND THE SUPENDED SEDIMENT AT A RIVER ESTUARY

細山田得三¹・早川典生²・青山了士³・J. F. Atkinson⁴・福嶋祐介⁵

¹正会員 工博 長岡技術科学大学 環境・建設系 助教授 (〒940-2188 長岡市上富岡1603-1)

²正会員 Ph.D 長岡技術科学大学 環境・建設系 教授

³学生会員 長岡技術科学大学大学院 建設工学専攻

⁴ Ph.D State Univ. of New York Buffalo, Dept of Civil, Structural and Environmental Engineering Professor

⁵正会員 工博 長岡技術科学大学 環境・建設系 教授

Two dimensional numerical simulations for runup of the unsteady salt wedge together with transport of the suspended sediment are conducted by directly integrating the governing equations. Velocity fluctuations caused by the gravity head exercise an influence on transport of suspended sediment. With the numerical simulations, it becomes possible to visualize the sinking of suspended sediment and resuspension caused by the strong velocity fluctuation around the head of salt wedge. Temporal developments for movements of velocity vectors, vorticity, suspended sediment, density deviation are consistent in the proceed of the salt wedge and are visualized satisfactorily. The vertical flux of the suspended sediment on the riverbed is estimated by an empirical model, which uses the bottom shear stress. Space-time chart of the suspended sediment fluxes, the bottom shear stress, total amount of sediment material show the influence of the salt wedge swashing on the riverbed and the velocity fluctuations.

Key Words : Salt wedge, Suspended sediment, Numerical simulation, Gravity head, River estuary

1. はじめに

従来、河口における密度流現象の研究は主に塩水くさびの遡上高の予測やその遡上対策が主要な目的であった。河口は塩水や河川から供給される淡水が混合する場であるとともに河川や海側から供給されるさまざまな物質が混合する複雑な場所でもある。例えば河川の上流からは生活排水や土砂・シルトが流入する。一方海岸からは潮汐や波動にともない、塩水や漂砂が河口域に輸送される。河口に浸入した物質は十分混合されて沖に運ばれる場合もあるが、河床に長時間沈殿するものも多いと考えられる。これらは春季の融雪時や夏季の洪水時に一気にフラッシュされるが、平時時には例えば塩水の遡上による場の変化に応じて再浮遊(resuspension)状態になる場合も十分考えられる。再浮遊状態となった化学物質が河口やその周辺の閉鎖性海域の水質に強い影響を及ぼすことも報告されている。

わが国においては、治水面での安全性確保や河口における航路確保が最優先されるため、塩水進入による

被害のおそれがあっても川積確保のための浚渫が行われることがある。その結果、河口部で塩水進入が増大し、河口における環境に強く影響することが十分考えられる。このことを理解するためには塩水くさびの動態を把握するとともに河床における物質輸送に対する影響を評価するモデルの構築が望まれる。

河口密度流の問題は古くから数多くの研究と知見が蓄積されてきている。河口密度流の形態分類(弱, 緩, 強混合型)や塩水くさびの形状と遡上高さについても一定の成果が得られていると考えられる。しかしながら、以下に列挙するような解決されるべき課題を含んでいると思われる。

- 非定常な塩水くさびの遡上の動態
- 密度界面における波動や界面抵抗の把握
- 河床底面に及ぼす塩水くさびの影響

このような問題を解決するためには従来行われていたような2成層流体の定常な界面形状を求める1次元の計算法では不十分である。一方、近年のコンピュー

タ処理速度の飛躍的な向上と低廉化に伴い、現象の基礎方程式を直接数値計算するシミュレーション技法が水工学や海岸工学の分野でも一般化しつつある。密度流れに関しては、細田ら³⁾、赤堀ら¹⁾、Yingら⁵⁾は、直接NS方程式を計算することによって種々の密度流の動態把握に成功している。またYingら⁶⁾は、水面から投入される土砂輸送に関する基礎的な数値計算を行っている。この手法によれば、離散化誤差と乱流の取り扱いの2点を除けば、原理的に仮定を含まないと見なすことができ、実用的な問題に対する拡張性にも優れている。

本研究では河口での河川水の流れおよび塩水くさびの挙動、土砂輸送の動態、河床底面での物質輸送の実態をとらえるため、直接ナビエストークス方程式に基づく2次元の数値計算を行った。本論文においてはその手法の概略を説明し、その出力結果である流体運動の特性、浮遊砂濃度や塩水くさびの時間発展、底面での摩擦抵抗や浮遊砂の鉛直フラックスの可視化結果について考察する。

2. 数値計算手法

(1) 基礎方程式と計算領域

河川流および塩水くさびの運動を支配する基礎方程式は、式(1)に示すブシネスク近似を用いた2次元のナビエストークス方程式(NS方程式)である。式(2)は非圧縮性の連続式である。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_m \frac{\partial u_i}{\partial x_m} = \left(1 + \frac{\Delta \rho}{\bar{\rho}}\right) g \delta_{i3} - \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu_i \nabla^2 u_i \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

ここに $i, u_i, t, x, g, \bar{\rho}, \Delta \rho, p, \nu$ はそれぞれベクトルを示す成分、流速ベクトルの i 成分、時間、空間座標、重力加速度、基準密度、密度偏差、圧力、分子粘性係数である。ブシネスク近似のため密度偏差は重力項のみにあらわれている。ブシネスク近似を用いない場合(非ブシネスク近似)は、圧力項の分母のみに密度があらわれる。本計算を行う前に非ブシネスク近似との比較を行ったが両者には大きな違いが無かったため、ブシネスク近似を採用した。圧力場は、まず圧力の初期条件を静水圧分布で与え、圧力増分を逐次計算して前の時間の圧力に加算して求められる。圧力増分の計算はSOLA法による流速圧力同時緩和法を用いた。

密度偏差および土砂濃度の分布は式(3)、式(4)による

移流拡散方程式を用いて求めた。

$$\frac{\partial \Delta \rho}{\partial t} + u_m \frac{\partial \Delta \rho}{\partial x_m} = A \nabla^2 \Delta \rho \quad (3)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + (w - w_s) \frac{\partial c}{\partial z} = D \nabla^2 c \quad (4)$$

ここに、 A, D, w_s は、密度の拡散係数、土砂の拡散係数、土砂の沈降速度である。浮遊砂の沈降速度は、土砂の粒径と密度差による浮力を考慮すべきであるが今回は固定値とした。密度場の基礎方程式の左辺は、非圧縮性の連続式から誘導される。右辺の拡散項は、塩分、温度などの密度変動の因子となる量の拡散を表現している。なお、流体の正味の密度は、基準密度と密度偏差の和として以下の式で計算される。

$$\rho = \bar{\rho} + \Delta \rho \quad (5)$$

計算に用いた各種パラメータは表1に示す。なお、計算対象は室内実験スケールを対象としたものと実河川スケールの現象を対象としたものがあり、それぞれTypeA、TypeBとして示している。ただし計算に用いた河口の形状はいずれも図1に模式的に示したものである。すなわち水平な河床勾配を持つ河川から一定の勾配で水深が大きくなる領域を計算対象とした。矩形の計算格子点数は両Typeともに水平、鉛直に200, 100である。図1の左端が河川上流方向であり流入条件を、右端の海側の境界では自由流出条件を課した。上端は水位変動がない固定境界であり接線方向にはすべりありとした。その他の固体境界面上は不透過およびすべりなしとした。河床形状の変化は矩形格子に属性を割り当てることによって表現した。すなわち境界形状は滑らかとはなっていない。このような計算手法は、境界適合座標系(一般・直交曲線座標系)に比して境界近傍の流れについて問題があることが考えられる。しかしながら、格子を十分小さくすればある程度この問題は回避されるものと思われる。

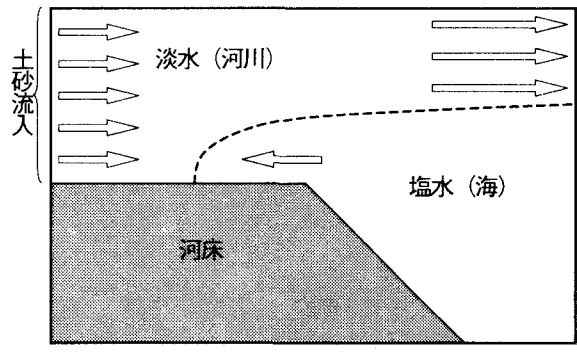


図-1 計算領域の模式図

(2) 乱流モデル

格子が十分小さいType Aの計算は格子が十分小さいため乱流モデルは使われていない。しかしながら、界面に生じる波動性の変動の構造は細山田⁴⁾に示されるように十分解像できるものである。Type Bは格子サイズが大きく実河口と同等のスケールを対象としているためLES乱流モデルを用いた。乱流粘性係数は格子スケールやスマゴリンスキー定数 C_s 、ひずみ速度テンソル S_{ij} などを用いて以下の用に表示される。

$$\nu_t = (c_s \nabla)^2 (2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{1/2} \quad (6)$$

$$\nabla = (dx \, dz)^{1/2}, \quad \bar{S}_{ij} = \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right).$$

河床底面境界に壁法則を用いた k - ϵ 乱流モデルを用いることが最も一般的と思われる。今回の計算では河川流と塩水くさびが逆方向に移動し、塩水くさびの先端部では激しく混合が起こることから壁関数を用いることが困難であるため比較的取り扱いが容易なLES乱流モデルを採用した。 C_s は従来用いられている値0.2よりもかなり小さな値を取っている。

(3) 河床底面での鉛直フラックス

河床底面での浮遊性物質の鉛直フラックスに関してはBurchardら⁸⁾によって提案された式(7),(8),(9)を用いて計算した。

$$F_e = \begin{cases} \frac{c_e}{\rho_0} (|\tau_b| - \tau_{ce})^+ & \text{for } B > 0 \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (7)$$

$$F_s = \frac{w_s c_b}{\tau_{cs}} (\tau_{cs} - |\tau_b|)^+ \quad (8)$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = F_s - F_e \quad (9)$$

ここに F_e 、 F_s 、 B はそれぞれ鉛直上向きのerosionフラックス、鉛直下向きのsedimentationフラックス、両フラックスの過不足によって変化する河床における浮遊砂材料の総量である。 τ_b は底面せん断応力であり、本研究では底面近傍の乱流粘性係数と速度勾配の積によって評価した。 ρ_0 、 w_s はそれぞれ流体の密度、浮遊物質の沈降速度である。 τ_{ce} 、 τ_{cs} はそれぞれせん断応力の閾値であり、式(7)、(8)内の記号 $()^+$ は括弧内が正の場合のみ有効で負の場合は0となることを意味している。すなわちこの式は、せん断応力が十分大きいと、erosionフラックスが生じ、sedimentationフラックスはゼロとなり、逆にせん断応力が十分小さいとerosionフラックスがゼロでsedimentationフラックス生じるという物理モデルとなっ

表-1 計算パラメータ

パラメータ	symbol	Lab. scale	Real field	単位
		Type A	Type B	
計算時間		60	1800	s
水平方向格子長	dx	1	500	cm
鉛直方向格子長	dy	0.2	15	cm
水平方向格子数	nx	200	200	
鉛直方向格子数	ny	100	100	
分子粘性係数	ν	0.015	0.015	$\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$
初期密度差	$\Delta\rho$	0.01	0.03	g cm^{-3}
河川流速	Ur	3.0	10.0	cm s^{-1}
erosionフラックス閾値	τ_{ce}		1.0	$\text{gcm}^{-1} \text{s}^{-2}$
sedimentationフラックス閾値	τ_{cs}		0.8	$\text{gcm}^{-1} \text{s}^{-2}$
erosionに関する比例係数	c_e		5.0	$\text{gcm}^{-4} \text{s}^{-1}$
浮遊物質の沈降速度	w_s	0.1	0.1	cm s^{-1}
スマゴリンスキー定数	C_s		0.02	
河床上の単位面積あたり材料質量	B		2.6	g cm^{-2}
拡散係数	D	0.1		$\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$

ている。 c_b 、 c_e は、それぞれ計算によって求めた底面近傍の浮遊砂濃度、erosionフラックスに関連した比例係数である。 c_e 、 τ_{cs} 、 τ_{ce} の値は目下、経験的に与えられているのみであり客観的な指標は与えられていない。

3. 計算結果

(1) 室内実験スケール(Type A)

Type Aでは、室内実験スケールを対象とした数値計算である。本研究で用いた数値計算法の密度流現象への適用性は、室内実験でのPIVによる流速計測によって十分確認されている。このタイプでは河川上流側で土砂濃度を一様に与え、河川流ともに土砂を流下させて、海側から遡上する塩水くさびとの相互作用を観察した。本研究に先立って、上流の流入流速を種々変更させて計算を行い、定常的な塩水くさびが形成される流入流速を調べた。その結果流速が3.0cm/sの場合、安定して遡上する擬定常的な塩水くさびが形成されたためここでは流入流速の値として3.0cm/sを与えた。

図2は、塩水くさび内部の流速ベクトルを示す。塩水くさび外側の河川流速のベクトルは示していない。塩水くさびの先端部ではかなり強い流速変動が形成されている。遡上するくさび先端と河口方向に流出する河川流とが衝突し、先端部の流速は河口側に強く曲げられている。塩水くさびの上部付近では河口方向に向かう河川流と遡上していく塩水くさびにより強いせん断が生じている様子が分かる。

図3は密度偏差の空間分布の時間変化を示す。密度差は、実際には塩分によって形成されるので塩分の分布と見ることもできる。塩水くさびの先端が、先端部にカルマンヘッドを形成しながら遡上している様子が分かる。先端部ではいったん強い流速変動によって巻

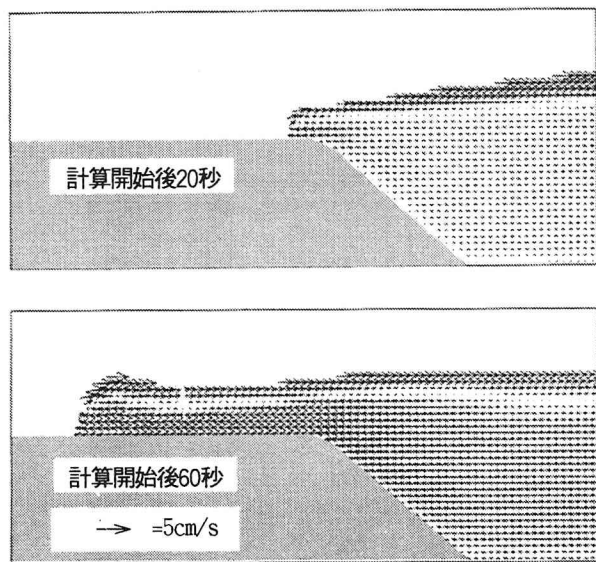


図-2 塩水くさび内部の流速ベクトル (TYPE A)

き上げに似た挙動を示し、河川流によって下流側に流下していく様子が分かる。またカルマンヘッド後方には波動性的変動パターンが観察される。

図4は浮遊砂濃度の空間分布の時間変化を示す。上流端に設定した一様な浮遊砂が河川流によって下流に沈降しながら広がっている。浮遊砂の上端は、流下するに従ってほぼ直線的に下降している。河床上には沈降した土砂により高濃度の土砂領域が形成されている。密度偏差と浮遊砂濃度を比較する計算開始後、30秒程度で両者は衝突する。河床に形成された高濃度の土砂が遡上してきた塩水くさびに起因する強力な上昇流によって持ち上げられている。その位置は塩水くさびの遡上とともに上流に移動している。浮遊砂は、いったん塩水くさび先端から持ち上げられるが、一部はヘッド後部の波動性的の下降流や浮遊砂の沈降流速によって沈み込む。以上の数値計算結果より海底付近の浮遊砂が

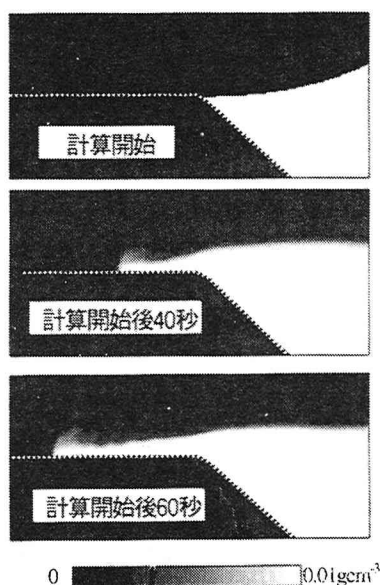


図-3 密度分布 (TYPE A)

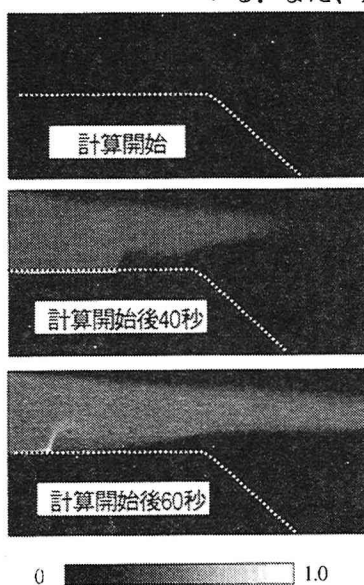


図-4 浮遊砂分布 (TYPE A)

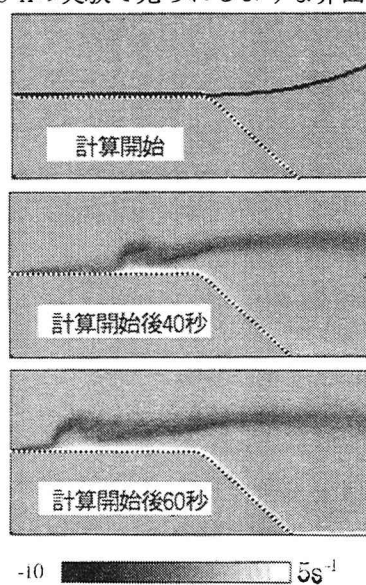


図-5 渦度分布 (TYPE A)

塩水くさびの影響を受ける可能性が示唆される。

図5は、渦度の空間分布の時間変化を示している。淡塩境界付近では初期条件によって形成された明瞭な渦層が時間とともに広がっていく様子がわかる。密度流先端部周辺にも高い渦層がそれを取り巻くように形成されており、渦度も大きな値をとっている。またヘッド後方の渦度の分布そのものにも波動性の強い揺らぎが観測されている。

(3)実河川スケール (TYPE B)

TYPE Aでは室内実験スケールを計算対象としたが、TYPE Bではほぼ実河川に近いスケールの現象を対象として計算を行った。このため渦動粘性係数を乱流モデルによって計算した。また河床底面での浮遊物質の移動を計算するため式(7), (8), (9)が方程式に組み込まれている。

図-6上段は塩水くさび内外の速度ベクトルの分布を示し、図-6下段にはLES乱流モデルを用いて計算した渦動粘性係数の分布を示す。密度流先端付近や密度界面、また河床上で大きな流速勾配が生じている。河川流は、遡上する塩水のために流路を妨げられるかたちとなり塩水くさび上で加速している。今回の計算は、自由表面の変動を含んでおらず、実際の現象で加速されるかどうか不明である。渦動拡散係数の分布には流速勾配や密度界面でのシアの影響が反映されている。渦動粘性係数は塩水くさびの先端で生じるとともに後方の密度界面でも大きな値をとる。Hosoyamada et al.⁹⁾では界面に生じるせん断力の値を広範な既往研究と比較しており、従来研究とはほぼ妥当な結果を得ている。

図-7上段および下段には密度および浮遊砂濃度の空間分布を示す。くさびの先端ではヘッド構造を形成し、その周囲の河川流によって若干後方に輸送されている。また、Type Aの実験で見られるような界面にお

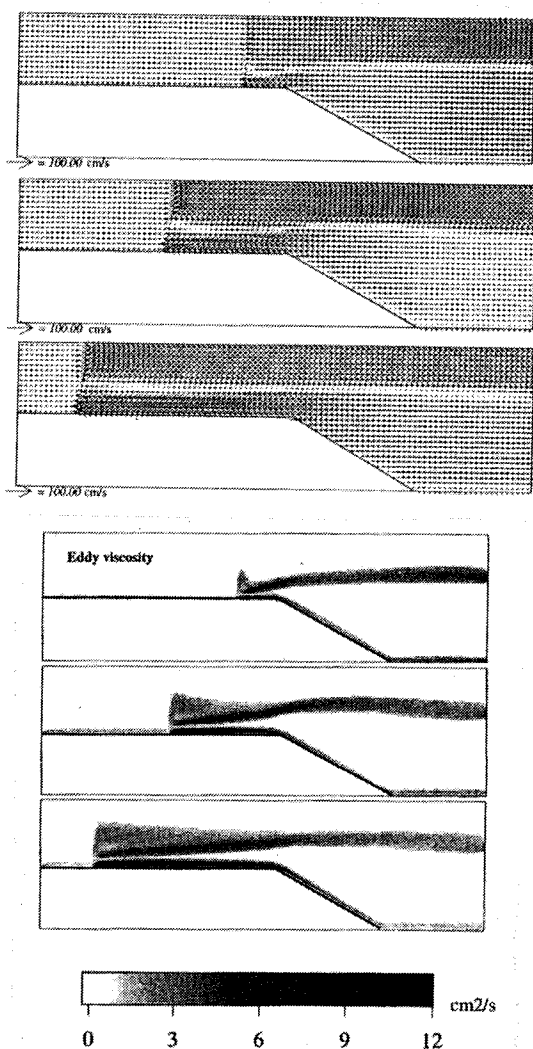


図-6 流速ベクトルと渦動粘性係数(TYPE B)

ける波動は明瞭ではない。浮遊砂は塩水くさびの進行に伴って底面から発生しており、特に密度界面の先端付近ではいったん浮遊状態になった浮遊砂がさらに高く舞い上げられて海側に輸送されている。

図-8にはそれぞれ底面での単位面積あたりの浮遊材料質量(B)、河床底面でのせん断応力(τ_b)、発生した浮遊砂の上向きフラックス(F_u)、浮遊砂の沈降によるフラックスの時空間変動(F_s)を示す。図の横方向は水平河床上1次元空間、図の鉛直下方に向かって時間の進行を示している。ほぼすべての図で右上方から左下方に向かう斜線が見えるが、塩水くさび先端の進行と対応している。塩水くさび先端で浮遊状態となった砂は塩水くさび上方を浮遊しつつ流下するため底面の砂の総量は塩水くさび内で低下している。底面せん断応力と発生した浮遊砂の上向きフラックスはほぼ同じような分布をしており、塩水くさびの先端による影響が塩水くさびの河床底面に影響していることがわかる。両方の図には波状のパターンが見られる。これは静止画では明らかではないが、塩水くさびの遡上を動画としてみ

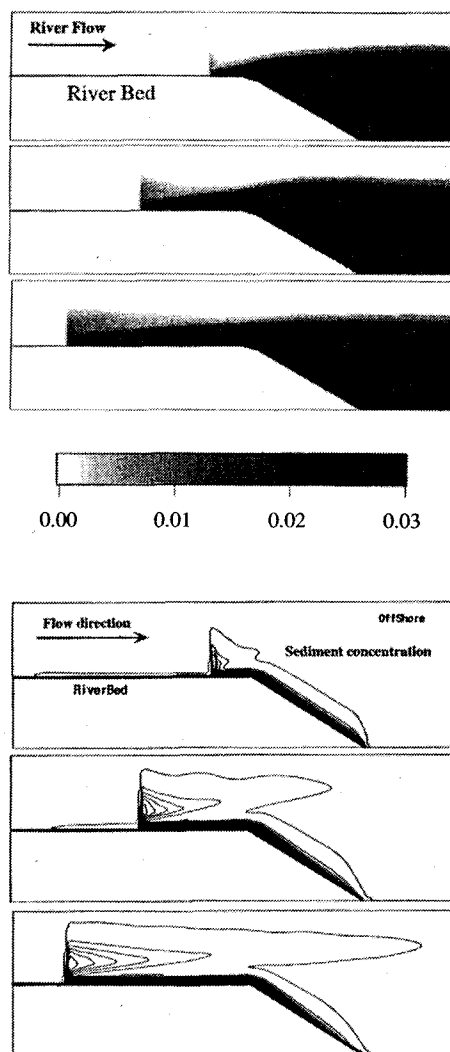


図-7 密度分布と浮遊砂濃度分布(TYPE B)

ると揺らぎながら進行しており、このことが影響していると考えられる。沈降フラックス(F_s)は塩水くさび内では生じずに塩水くさびの前面で発生している。

4 まとめ

本研究により河口における弱混合型の密度流である塩水くさびおよびその周辺の浮遊砂の挙動に関する動態を把握することができた。特に密度流先端のヘッド周辺の流速変動およびそれにともなう浮遊砂の巻き上げなどを表現することができたと思われる。これらの現象は今後、室内実験や実測によって検討されるべきである。この問題については今後の検討課題としたい。また、底面から発生する浮遊砂とその沈降に関するフラックスを底面せん断力を使ってモデル化することは物理的には正しいと思われる。しかしながらいくつかの調整パラメータが含まれていてその値を恣意的に操

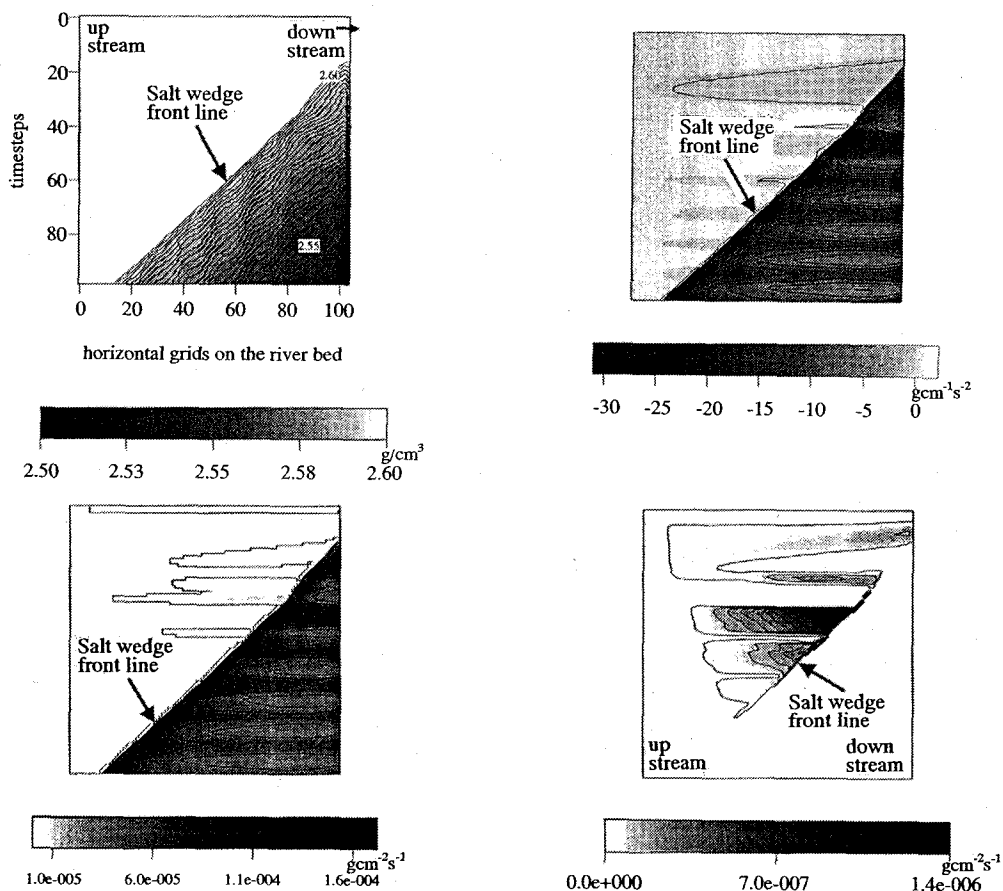


図8 B , τ_b , F_e , F_s (左上、右上、左下、右下) の時空間分布

作すれば結果が変わる。このパラメータ評価を客観的に行うための研究が必要である。特に τ_{ce} , τ_{cs} のようなせん断応力の閾値は、底面での植生、浮遊物質の材料特性、底面粗度によって変わる。これらは室内実験によって適宜決定される必要があり今後データを蓄積していく必要がある。

本数値計算は流れ場、密度場、浮遊砂濃度場を連立させて計算を行ったが、浮遊砂の振る舞いに関してはパッシブであり、流れの場に対して全く影響を与えない。すなわち浮遊砂の濃度が変化しても流体方程式にその事を取り込んで変化する部分が含まれていない。このことを考慮する方法としては、例えば浮遊砂濃度に応じて運動方程式に抵抗項を入れるというような方法が考えられる。流れの中で浮遊性の粒子が移動する問題は固液混相流という立場から数多くの研究が展開されている。これらの問題は構成則確立の立場から統一的な見解が得られるべきであると考えている。今後、河床形状の変化、塩分濃度による沈降速度の変化、潮汐等による水位変化を取り入れた解析や実際の3次元河川形状等で計算し、解析精度の確認と実験との比較を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 赤堀良介, 清水康行, 中山卓: 鉛直方向に密度界面を持つ流体の混合に関する数値計算, 水工学論文集, 第43巻, pp.521-526, 1999.

- 2) 日野幹雄: 密度流の乱流, 流体力学の進歩乱流(谷一郎編), 丸善, 1979.
- 3) 細田 尚, 西沢賢太郎, 福住 晃, 大久保賢治, 村本嘉雄: 交換密度流に生じる内部波に関する数値解析的研究, 水工学論文集, 第40巻, pp.525-530, 1996.
- 4) 細山田得三: コンピュータシミュレーションによるロックエクステンジ流れの可視化, ながれ, Vol.18, pp.133-134, 1999
- 5) Xinya Ying, Juichiro Akiyama, Masaru Ura: Numerical simulation of 2-D inclined strating plumes using LES, Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering, Vol.17, No.1, pp.117-129, 1999.
- 6) Xinya Ying, Juichiro Akiyama, Masaru Ura and Yayoi Nakanishi: Large Eddy Simulation of heavy turbulent thermal, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol.43, pp.899-904, 1999.
- 7) 福嶋祐介: 流体の非線形現象 第3章 境界の非線形, 朝倉書店, pp.67-79, 1992.
- 8) Burchard, H. and H. Baumert: The formation of estuarine turbidity maximum due to density effects in the salt wedge. A Hydraulic Process Study, Journal of Physical Oceanography, Vol.28, pp. 309-321, 1998.
- 9) Hosoyamada, T., N. Hayakawa, J.F. Atkinson, S. Aoyama: Exact Numerical Simulation of Suspended Sediment and Salt Wedge around a river mouth, HYDRODYNAMICS IV, Proceedings of the fourth international Conference on Hydrodynamics, pp.827-832, 2000.

(2000.10.2受付)