

河口密度流の混合特性に及ぼす日潮不等の影響

THE EFFECT OF DIURNAL INEQUALITY ON THE MIXING OF DENSITY CURRENT IN ESTUARY

伊福 誠¹・原楨利幸²

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)

Two-dimensional numerical model is developed. The effect of diurnal inequality and river discharge on the mixing of density current in estuary is investigated. Numerical results coincide almost with observed ones for the higher isohaline but for the lower isohaline the difference between numerical and observed results is large. The effect of the diurnal inequality on saline intrusion is classified into two patterns. This classification is explainable by the new parameter, which is defined by the tidal amplitude. When the river discharge exceeds 1000 m³/s, the intrusion of saline water is almost stopped.

Key Words : diurnal inequality, two-dimensional model, salt intrusion, Boussinesq approximation

1. はじめに

国内の河川においては、異常気象や水資源需要の増大などによって河川水の減少、河道浚渫、河口堰の建設等に起因する塩水の新たな遡上が河口域の環境保全と持続的な水資源の確保の観点から重要な問題となってきた。また、河川水の利用にあたっては、河口密度流の混合形態や時空間的な非一様性を詳細に把握する必要がある。こうした検討は、塩水遡上機構だけでなく重力循環や乱れの変動によって誘発される汚染物質の拡散・循環や底泥の輸送を解明するのに重要である。さらに、河口部における流れは、様々な因子によって支配され、その河口の特徴によって複雑な流動形態が見られる。

従来、河川における塩水の挙動を予測する数値モデルでは、海側の境界条件となる潮位を日潮不等を考慮しない正弦波の形で与えて取り扱っているのがほとんどである¹⁾。しかしながら、現地河川においては、潮位の変化に伴って緩混合や強混合の混合形態を呈する。こうした河川における密度流の実態を把握するには、潮位変動を正弦型で与えた解析では不十分である。

こうしたことから、本研究では日潮不等を考慮した密度流の流速場や密度場を予測できる2次元数値モデルを開発し、既存の水槽実験結果²⁾に基づいた解析を行って数値モデルの妥当性を検証する。さらに、愛媛県の

肱川を対象として、日潮不等および河川流量が密度流の混合特性に及ぼす影響を検討する。

2. 数値計算

(1) 支配方程式

a) 運動量方程式と連続の式

x 方向の運動量方程式は x 軸を水平な基準面にとり z 軸を鉛直上向きにとると次式で与えられる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x} (Bu^2) + \frac{\partial}{\partial z} (uw) = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x} (B\tau_{xx}) + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \quad (1)$$

ここに、 t は時間、 u および w は、それぞれ x 方向および z 方向の流速成分、 B は水路幅、 p は圧力、 ρ_0 は流体の基準密度である。また、 τ_{xx} および τ_{xz} はせん断応力であり、テンソル表示すると以下のように表される。

$$\tau_{ij}/\rho_0 = (\nu + \nu_t) (\partial u_j / \partial x_i + \partial u_i / \partial x_j) \quad (2)$$

ここに、 ν は動粘性係数である。また、 ν_t はSmagorinsky³⁾が提案したSGS (subgrid-scale) の渦動粘性係数であり、次式で与えられる。

$$\nu_t = (c_s \Delta)^2 \left[\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right]^{1/2} \quad (3)$$

ここに、 c_s はSmagorinsky定数、 Δ は格子平均サイズ($\Delta = (\Delta x \cdot \Delta z \cdot 1)^{1/3}$)、 Δx および Δz は、それぞれ水平

および鉛直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。

$$\frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x} (Bu) + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

b) 水面形の方程式

水面形の方程式は連続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。

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x} (B \int_{z_b}^{\xi} u dz) = 0 \quad (5)$$

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

圧力は静水圧分布を仮定すると次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} p &= \rho_0 g (\xi - z) + \beta g \int_z^{\xi} S dz \\ \beta &= \rho_0 (\rho_s - \rho_0) / \rho_s \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ここに、 ρ_s は、海水の密度である。

また、状態方程式は次式で表される。

$$\rho = \rho_0 + \beta S \quad (7)$$

c) 乱流拡散方程式

乱流拡散方程式は次式で表される。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x} (BuS) + \frac{\partial}{\partial z} (wS) \\ &= \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x} \left(BK_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial S}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

ここに、 S は塩分、 K_x 、 K_z は乱流拡散係数であり、水平および鉛直方向の速度成分に依存すると仮定すると次式で与えられる。

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

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

$$\left. \begin{aligned} a_T &= (\Delta x \cdot \Delta z \cdot 1)^{1/3} \\ a_L &= c_1 \cdot a_T \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

ここに、 c_1 は正の係数である。

(2) 初期条件および境界条件

初期条件は、潮汐および上流からの淡水流入量がない状態とする。河口、上流、河床および自由水面においては、図-1に示す境界条件を課す。下流境界においては、日潮不等を考慮した水位および水面変動量を微小振幅波理論で算出した水位を与える。また、塩分は流速が正(下流から上流方向)の場合は水位と同位相の正弦型、

流速が負の場合には $\partial^2 S / \partial x^2 = 0$ とする。一方、上流境界においては、流速分布は対数分布則を仮定する。浅水長波方程式を特性曲線法で解き、水位および断面平均流速を算出する。仮定した対数分布則の流速分布を河床から自由水面まで積分し水深方向に平均して得られる平均流速と特性曲線法で算出した断面平均流速から比例係数を求め、対数分布則の流速分布を決定する。さらに、長波近似を用い下流から伝播する潮汐波の変動を算出して透過させる方法を取った。

$\eta(t) = a \sin \sigma t$ $\partial^2 u / \partial x^2 = 0$ $w = 0$ flood: $u > 0$ $S = S_0 G(t)$ ebb: $u < 0$ $\partial^2 S / \partial x^2 = 0$ 日潮不等無視 $G(t) = 1 - (1 - \sin \sigma t) S'$ $+ S' \sin \sigma t$ 日潮不等考慮 $G(t) = 1 - \{1 - \eta(t) / \eta_{\max}\} S'$	$p = 0$ $\partial w / \partial z = 0$ $w_\xi = \partial \xi / \partial t + u_\xi (\partial \xi / \partial x)$ $w_\xi S - K_z (\partial S / \partial z) = 0$	自由水面 $z = \xi$ 下流 $x = 0$ 上流 $x = L$ 河床 $z = z_b$	u : logarithmic $S = 0$ $p = \rho g (\xi - z_b)$ $\partial S / \partial z = 0$ $u = w = 0$
--	--	---	--

図-1 境界条件

(3) 座標変換

自由水面の時空間的変動や河床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矩形ではない。解析対象領域を矩形として取り扱おうと、境界における取り扱いが容易になり、領域内の流れ場を記述するのに好都合であると考えられる。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。

$$\left. \begin{aligned} z' &= (z - z_b) f_b(x, t) \\ f_b(x, t) &\equiv 1 / |\xi(x, t) - z_b(x, t)| \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

すなわち、座標変換によると、独立変数が (x, z, t) から (x, z', t) に変わる。この場合、座標変換による微分は以下のようなになる。

$$\left. \begin{aligned} \partial / \partial t &= \partial / \partial t + F_1 \cdot \partial / \partial z' \\ \partial / \partial x &= \partial / \partial x + F_2 \cdot \partial / \partial z' \\ \partial / \partial z &= F_3 \cdot \partial / \partial z' \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

なお、 F_1 、 F_2 および F_3 は、それぞれ次式のように表される。

$$\left. \begin{aligned} F_1 &\equiv z' / f_b (\partial f_b / \partial t) - f_b (\partial z_b / \partial t) \\ F_2 &\equiv z' / f_b (\partial f_b / \partial x) - f_b (\partial z_b / \partial x) \\ F_3 &\equiv f_b \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

以上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乱流拡散方程式に適用し、流れ場や塩分の時空間的変動を計算した。

3. 解析結果

(1) Perrels・Karelseの実験結果²⁾に基づく解析

海水と淡水の密度差は $\Delta\rho(\Delta\rho = \rho_s - \rho_0)$, は23.8 kg/m³, 下流側境界で振幅2.5 cm, 周期558.75 sの潮汐を正弦波で与え, 上流境界での淡水流入量が 2.9×10^{-3} m³/sである場合の密度流場の流速分布について検討した. 水平方向の空間刻みは0.915 m, 鉛直方向は20分割, 時間刻み Δt は潮汐の周期を2,000等分した. また, 式(9)中の γ_x , γ_z および式(10)中の c_1 は, それぞれ 10^{-4} , 10^{-3} および100とした. なお, 河床における境界条件はnonslipである.

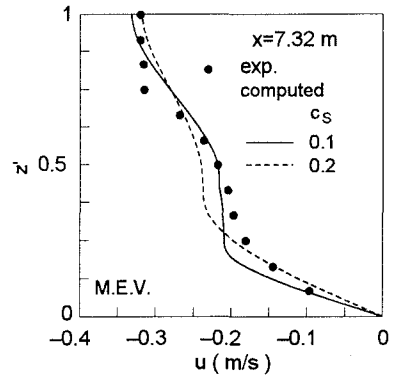
a) 水平流速の鉛直分布

図-2は, 河口から7.32 m地点における4つの特徴的な時間における水平流速の鉛直分布を示したものである. なお, 図中の黒丸は実験結果, 実線および破線は, それぞれ式(3)中のSmagorinsky定数が0.1および0.2の場合の計算結果である.

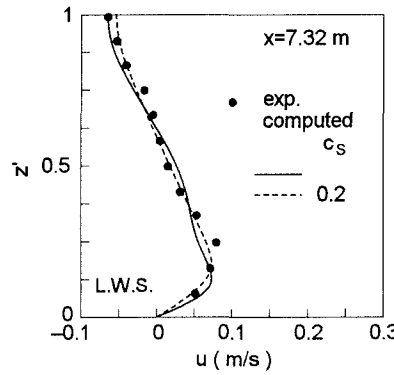
(a)は, 落潮時における下流方向への水平流速が最大となる位相(M.E.V.)における結果である. c_s が0.1の場合には, 底面から水深のほぼ1/5の深さまでは計算結果の鉛直勾配が実験結果より小さいため, 計算結果が実験結果よりも大きい. また, 中層域においては, 実験結果と計算結果はほぼ等しい. さらに, 水深のほぼ3/4の深さから水面までの計算結果の鉛直勾配は実験結果よりも小さく, 水面では計算結果は実験結果よりも大きい. しかしながら, これらの差は僅かであり, 計算結果は実験結果をうまく再現し得ている. 一方, c_s が0.2の場合には, c_s が0.1の場合と比較すると, 底面から水深のほぼ3/8の深さまでは鉛直勾配が大きく, 中層域では計算結果が実験結果より大きい. また, 実験結果にみられる中層域から水深のほぼ3/4の深さにおける鉛直勾配の小さい領域が計算結果ではみられず, 水面近傍では計算結果は実験結果より小さい.

(b)は, low waterの位相(L.W.S.)における結果である. 計算結果は, Smagorinsky定数の値に関わらず定性的にも定量的にもよく似た分布をしている. また, 計算結果は実験結果とよく符合している.

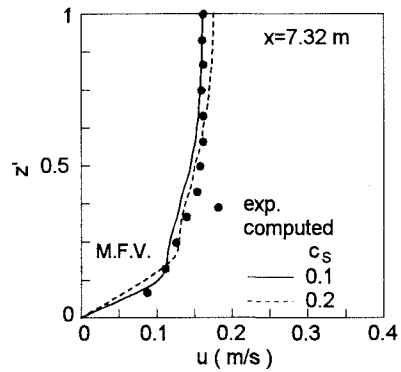
(c)は, 漲潮時における上流方向への水平流速が最大になる位相(M.F.V.)における結果である. c_s が0.1の場合には, 中層域において実験結果より計算結果が幾分小さいようであるが, その差はごく僅かなものである. また, 底面近傍および水面近傍では計算結果と実験結果はよく一致しており, 全体的には実験結果をうまく再現し得ている. 一方, c_s が0.2の場合には, 底面近傍では実験結果が計算結果より大きく, 水面近傍では計算結果が実験結果より大きい.



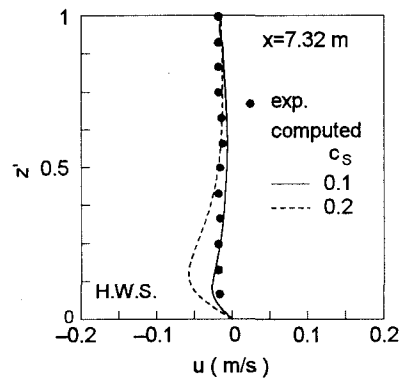
(a) M.E.V.



(b) L.W.S.



(c) M.F.V.



(d) H.W.S.

図-2 水平流速の鉛直分布

(d)は、high waterの位相(H.W.S.)における結果である。 c_s が0.1の場合には、計算結果は実験結果をよく再現し得ている。一方、 c_s が0.2の場合には、水深のほぼ1/2の深さから水面まで計算結果は実験結果とよく符合しているが、底面近傍における水平流速の計算結果は実験結果の約3倍程度であり、その差はかなり大きい。

以上の結果から、SGSの渦動粘性係数を適用してせん断応力を評価しても、成層状態の流れの鉛直構造を再現できることがわかった。また、Smagorinsky定数は0.1程度とすればよいことがわかった。以下の解析においてはSmagorinsky定数 c_s は0.1を用いるものとする。

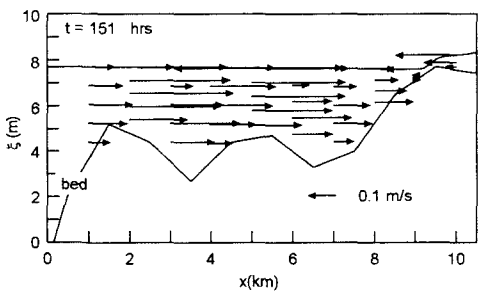
(2) 肱川の観測結果⁴⁾に基づく解析

肱川管内図によれば肱川における感潮区間上流端は河口から約9 kmの位置である。そこで解析する水路長は河口から上流側に10.5 kmとした。また、河床は肱川管内図に記載されている1978年の最深河床高を使用した。解析対象とした観測日は1978年9月14日、10月24日および11月29日である。なお、潮位データはアプリケーションソフト“潮時表”から得た⁵⁾。水平方向の空間刻みは25 m、鉛直方向は20分割、時間刻みは2 sである。また、式(9)中の γ_x 、 γ_z および式(10)中の c_1 は、それぞれ0.15、 4×10^{-5} および100とした。なお、河床における境界条件はnonslip、海水と淡水の密度差は30 kg/m³とした。

a) 流速ベクトルの空間分布

図-4は、計算して得た1978年9月14日の代表的な2つの位相における流速のベクトルの空間分布を示したものである。

(a)は、下げslackの位相における結果である。図中の時間 t は、計算開始時刻からの経過時間である。潮位の低下に伴う河川流量の流出により、ベクトルの向きは、ほとんど下流方向を示している、また、 $x=3$ および6 kmの河床付近では河床の影響により反時計回りの循環流が形成されている。(b)は、上げslackの位相における結果である。潮位の上昇に伴い海水が侵入するために、 $x=8$ kmより海側では、ベクトルの向きは上流方向である。しかしながら、 $x=9.5$ km付近に浅瀬が存在するため



(b) 上げ slack

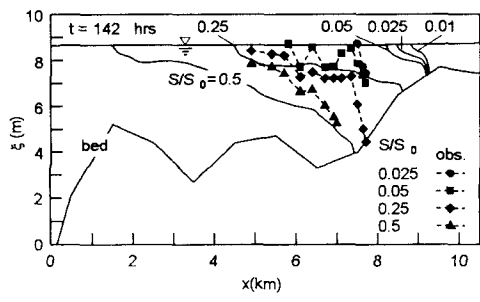
図-4 流速ベクトルの空間分布

下流方向への流速が増大し、 $x=9$ kmより上流ではベクトルの向きは下流方向である。

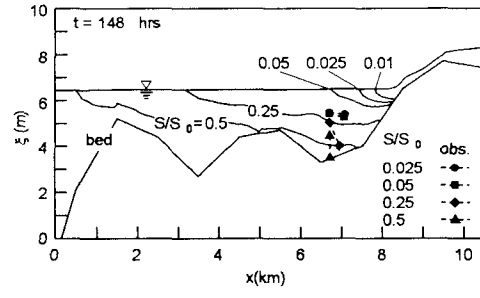
b) 塩分の空間分布

図-5は3つの代表的な位相における等塩分線の空間分布を示したものである。また、図中の黒丸、黒矩形、黒菱形および黒三角は、それぞれ $S/S_0=0.025$, 0.05, 0.25および0.5の観測結果、実線は計算結果、 S_0 は海域における塩分である。なお、 $S/S_0=0.01$ は水道源水基準の3類の塩素イオンの限界値を塩分に換算した値である⁵⁾。

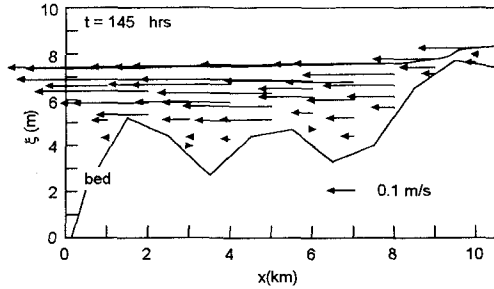
(a)は、1978年9月14日のhigh waterの位相における結果である。潮位が最も高いために、等塩分線は密度差によって最も上流側へ侵入している。(b)は、low waterの位相における結果である。潮位の低下に伴い等塩分線は下流方向に後退する。水面付近と比較すると、河床付近は河床形状の影響で海水が後退する速さは遅い。このため、 $x=5.5$ kmから $x=7$ kmの河床の窪地に比較



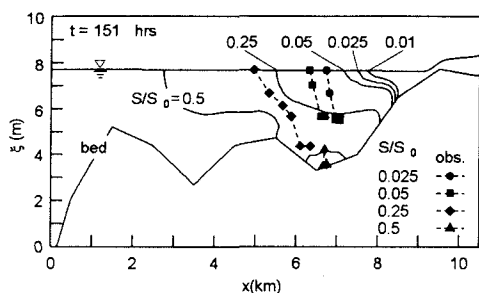
(a) high water



(b) low water



(a) 下げ slack



(c) 上げ slack

図-5 等塩分線の空間分布 (観測日：1978年9月14日)

的高濃度の淡・塩混合水が残留している。(c)は、上げ slack も位相における結果である。潮位の上昇に伴い等塩分線は上流側に侵入している。また、河床における淡・塩混合水の残留の領域は狭くなり、等塩分線の勾配は増大している。等塩分線は $x=9.5$ kmに浅瀬が存在するため下流方向への流速が増大するため上流側へ侵入できないことを示している。この距離は肱川管内図の感潮区間上流端とほぼ一致する。

計算結果は、観測結果を十分に再現し得ているとは言い難い。その原因としては、観測時の局所的な水深変化を無視して計算したこと、流路断面を矩形として取り扱い潮位や河川流量の変化に伴う自由水面の幅の変化を無視したこと等が考えられる。

c) 日潮不等の有無による塩水侵入距離の比較

図-6は、1978年9月14日、10月24日および11月29日の日潮不等を考慮した場合および無視した場合の等塩分線 $S/S_0=0.5$ の侵入距離を比較したものである。図中の L_{st} および L_{sa} は、それぞれ日潮不等を考慮した場合および無視した場合の侵入距離である。9月および10月は日潮不等を考慮した場合がより上流側に侵入し、11月は日潮不等を無視した場合がより上流側に侵入している。

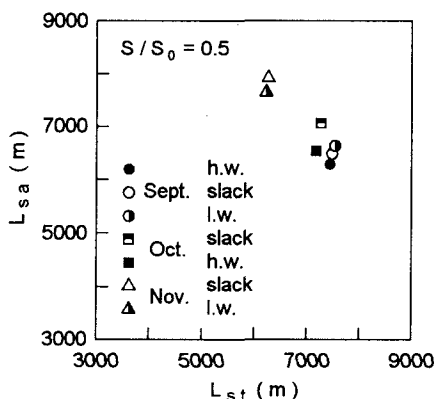


図-6 日潮不等の影響による侵入距離の比較

上述した2つの異なる結果を新たに定義する日潮不等パラメータを用いて考察する。図-7のモデル潮汐の

時刻 $t_0 \sim t_1$ 、 $t_1 \sim t_2$ および $t_2 \sim t_3$ 間の積分量をそれぞれ A_1 、 A_2 および A_3 とし、日潮不等パラメータを次式で定義する。

$$P_t = 2A_2 / (A_1 + A_3) \quad (14)$$

日潮不等を無視する場合(正弦波)、日潮不等パラメータは次式となる。

$$P_t = 1 \quad (A_1 = A_2 = A_3) \quad (15)$$

表-1は、9月、10月および11月の解析期間中のパラメータを算出し平均したものである。9月および10月の値はそれぞれ1.5および1.35で1より大きい。11月の値は0.85で1より小さい値をとる。これは、日潮不等を無視した場合と比較すると、9月および10月は平均潮位からの正への変動量が大きく、逆に11月は平均潮位から負への変動量が大きいことを示している。

日潮不等を無視して侵入距離を予測すると、 $P_t > 1$ の場合は塩水の侵入距離を過小に評価することになり、 $P_t < 1$ の場合は塩水の侵入距離を過大に評価することになる。現地河川において河川水の取水施設を設けようとする場合には日潮不等を考慮した解析を行って、淡・塩混合水の挙動を詳細に把握する必要がある。

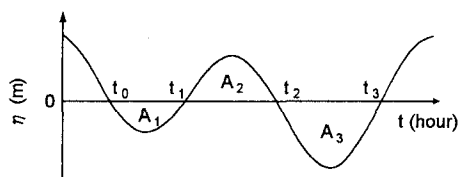


図-7 モデル潮汐

表-1 日潮不等パラメータの平均値

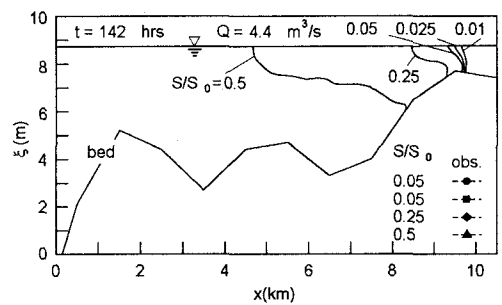
観測日	P_t
1978年9月14日	1.5
1978年10月24日	1.35
1978年11月29日	0.85

d) 河川流量が密度流に及ぼす影響

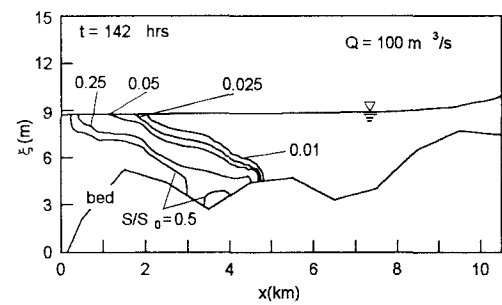
1978年9月8日～14日間の潮位をもとに河川流量が密度流の流動形態に及ぼす影響について解析したものが図-8である。なお、河川流量は4.4、100および500 m^3/s でhigh waterの位相における結果である。

(a)は、河川流量が観測日の流量の約1/2の4.4 m^3/s の結果である。河川流量が9.4 m^3/s の結果(図-5(a))と比較すると、河川流量が少ないため $S/S_0=0.01$ 、0.025および0.05の等塩分線は9.5 km付近の浅瀬を越えて上流側へ侵入している。河床における $S/S_0=0.01$ および0.5の等塩分線の位置における水面の塩分は河床のそれの、32%および17%程度である。(b)は河川流量が100

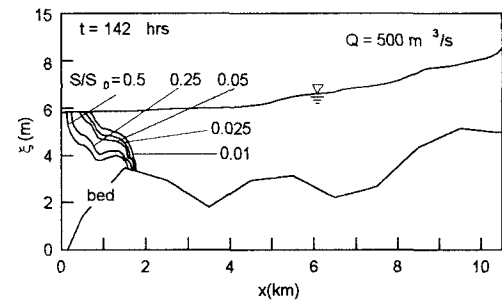
m^3/s の結果である。(a)と比較すると河川流量が増大しているために等塩分線は下流側へかなり後退している。 $S/S_0=0.01\sim0.05$ の等濃度線の間隔は(a)と同様密である。(c)は河川流量が $500\text{ m}^3/\text{s}$ の結果である。河川流量が非常に大きいために塩水の侵入は河口付近で阻止されている。等濃度線の間隔も(a)および(b)より密である。



(a) $Q = 4.4\text{ m}^3/\text{s}$



(b) $Q = 100\text{ m}^3/\text{s}$



(c) $Q = 500\text{ m}^3/\text{s}$

図-8 各流量における等塩分線の空間分布

図-9は河川流量が $4.4\sim1000\text{ m}^3/\text{s}$ の場合の high water および low water の位相における等塩分線 $S/S_0=0.5$ の侵入距離と上流境界で与えた流量との関係を示したものである。上流境界における流入量が $100\text{ m}^3/\text{s}$ と $200\text{ m}^3/\text{s}$ の間で侵入距離はかなり短くなる。海側の境界における潮位の振幅は同一であることから、侵入距離も河川流量によってほぼ一意的に決定される。

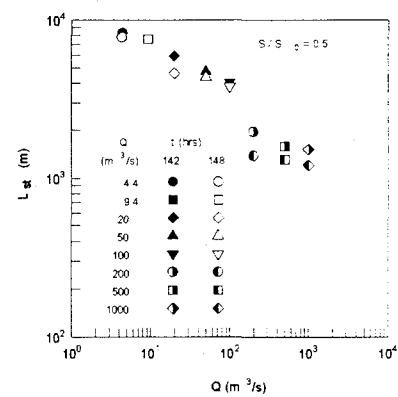


図-9 河川流量と塩水侵入距離

4. おわりに

本研究では2次元数値モデルを用いて密度流の混合特性を数値解析的に検討し、塩分の分布が観測結果とほぼ符合することや塩水侵入距離も河川流量によってほぼ一意的に決定されること等を得た。しかしながら、河幅方向の地形変化を無視しているため、水深変化に伴う流況変化が混合特性に及ぼす影響については考究できない。今後は現地河川における密度流の実態を十分に再現できる数値モデルによる解析が必要になると考える。

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。なお、河川流量等の貴重な資料は建設省四国地方建設局大洲工事事務所に提供して頂いた。

参考文献

- 1) 池永 均, 山田 正, 内島邦秀, 笠井雅広, 向山公人, 大東淳一: 塩水遡上の3次元数値解析と潮汐を考慮した塩水楔の破壊に関する研究, 水工学論文集, 第41巻, pp.509-514, 1997.
- 2) Perrels, P.A.J. and M. Karelse: A two-dimensional numerical model for salt intrusion in estuaries, In: J.C.J. Nihoul (editor), *Hydrodynamics of Estuaries and Fjords*, Elsevier Scientific Publishing Company, pp.107-125, 1978.
- 3) Smagorinsky, J.: General circulation experiments with primitive equations, *Month Weather Rev.*, Vol.9, No.3, pp.99-164, 1963.
- 4) 伊福 誠: 塩水くさびに関する研究(第1報) - 肱川における現地観測, 愛媛大学紀要, 第3部(工学), 第9巻, 第4号, pp.313-331, 1981.
- 5) 酒巻輝幸: 潮時表, 1996.
- 6) 合田 健編著: 水環境指標, 思考社, p.382, 1986.

(1999.9.30 受付)