

大阪市立大学院工学部研究科 学生員 ○宋 元平

大阪市立大学工学部

正員 小田一紀

1. はじめに

河口密度流は図-1に示すように塩水侵入の状況から弱混合、緩混合および強混合型の3つに区分されるが、潮汐の変動に応じて、上げ潮時には強混合となり、緩混合を経て、下げ潮時には弱混合になることもしばしば観測される。今まで多くの研究者が様々な要因を考えて混合形態を分類しているが、人によって混合形態の判別方法が異なる。しかし、もともとこの分類は塩分分布の相対的な形状によってなされており、定量的な定義はなく、いささかあいまいなものである。そこで、本研究では、成層係数 $N = (S_b - S_a) / S_m$ 、ここで、 S_b 、 S_a は底層と表層の塩分、 S_m は鉛直平均塩分を用いて、定量的に混合形態を定義し、2次元河口密度流の3つの混合形態がいかなる河川流速 U_0 と潮汐全振幅(潮差) H の組合せで生じるかを数値シミュレーションによって検討してみる。

ここでは、数値シミュレーションの計算結果から計算領域内に一定間隔に設けた鉛直検査断面で成層係数を計算し、有効な値が得られた範囲内でそれらの平均値を求め、それを代表成層係数 $\bar{N}$ と定義し、 $\bar{N} \geq 0.80$ の場合を弱混合、 $\bar{N} \leq 0.3$ の場合を強混合、 $0.3 < \bar{N} < 0.8$ の間のときを緩混合と定義することとした。

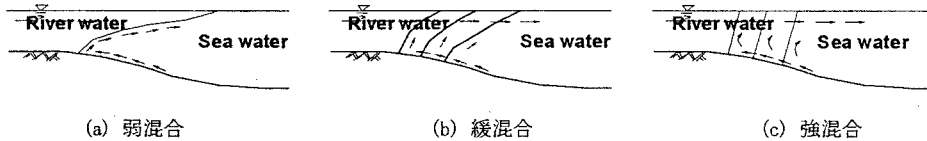


図-1. 河口域密度流の鉛直構造

2. 数値解析

1) 概要 長江河口域を想定した図-2に示すような計算領域 200km で一定な縦断面形状の鉛直2次元河口水域を設定し、河口密度流の混合形態に及ぼす河川流量、潮汐変動を検討した。密度流の計算には、浅海域における潮汐流の連続式と渦動粘性を考慮した運動方程式、塩分の拡散方程式、密度に関する状態方程式を基本とし、差分法による2次元多層レベルモデルを用いた。河口部での水深変化による層数変化の問題点を改善するた σ -座標系を採用した。

2) 境界条件 河川上流端には、一定の流速を与え、海側下流端には、潮汐変動と塩分を与えた。

(上流端) 水深: $h_{riv} = 6.0\text{m}$, 水位変動: $\zeta = 0$, 流速: $u = U_0(8.5 + 2.5 \ln z / k_s)$ (U_0 : 断面平均流速, k_s : 底面粗度高さ) (1)

(下流端) 水深: $h_{sea} = 30.0\text{m}$, 潮汐変動: $\zeta = H/2 \sin(2\pi t/T)$, $T = 12\text{hrs}$, 塩分: $S = 35\text{‰}$ (2)

3) 計算パラメーター 計算メッシュの $\Delta x = 1000\text{m}$, $\Delta \sigma = 0.05$ (20層)とし、 $\Delta t = 6.0\text{sec}$ とした。渦動粘性係数、乱流拡散係数は従来用いられてきた値を参考としながら、試行錯誤を繰り返して、次のように設定した。

$$\begin{aligned} \mu_x &= 1.0 \times 10^4 (\text{cm}^2 / \text{sec}), K_x = 1.0 \times 10^4 (\text{cm}^2 / \text{sec}) \\ \mu_z &= 10.0(1 + Ri)^{-1/2} (\text{cm}^2 / \text{sec}), K_z = 10.0(1 + 10Ri/3)^{-3/2} (\text{cm}^2 / \text{sec}) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{ここに, } Ri \text{ は局所 Richardson 数を表わし, } Ri = -\frac{\rho}{g} \frac{\partial p}{\partial z} \left/ \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right. \quad (4)$$

4) 計算結果 図-3は、潮汐全振幅(潮差)を $H=0.5\text{m}$ と一定に保ち、河川流速を $U_0 = 10, 20, 30, 50$ および 100 cm/sec と増大させていったときの塩分と流速ベクトル分布図の計算結果を表したものである。いずれも計算開始時刻から 360 時間後 ($t = 30T$; 下流端境界で丁度静水面から上昇しようとしているところ)の瞬間場を表している。この図によると、一定潮差の下では、上流端で与えられる河川流速が小さいときは塩水楔が顕著に発達し、その先端がかなり河川上流まで侵入するが、河川流速が次第に大きくなることもあって次第に海側に後退していく様子が明瞭に再現されていることがわかる。流速もこれと呼応するように、上流端で与えられる河川流速が次第に大きくなるにつれて河川域における流速ベクトルが大きくなり、潮汐流の侵入を抑制していることが推察される。

図-4は、以上の上流端における河川流速 U_0 および下流端における潮汐全振幅 H を様々に組み合わせ求めて 240 時間後 ($t = 20T$) の塩分分布の計算結果である。図中の M は前述の代表成層係数、 $\lambda = U_0 / U_t$ (U_0 : 河川流速、 U_t : 河川域に進行してきたときの潮汐波の最大水粒子速度)を表す。この λ をここでは混合形態係数と呼ぶこととする。なお、 U_t は水深変化による長波の波高変化を考慮し、式(5)で計算した。

$$U_t = \frac{H}{2} \left(\frac{h_{\text{sed}}}{h_{\text{riv}}} \right)^{1/4} \left(\frac{g}{h_{\text{riv}}} \right)^{1/2} \quad (5)$$

ここに、 H : 下流端における潮汐全振幅。

これらの図から混合形態係数 λ と代表成層係数 $\bar{N}$ との関係を表したものが図-5である。この図によると、 λ と $\bar{N}$ との間には強い線形関係があることが分かる。ここで、前述のように $\bar{N} \geq 0.8$ のときを弱混合、 $0.3 < \bar{N} < 0.8$ のときを緩混合、 $\bar{N} \leq 0.3$ を強混合と定義すると、今回の地形条件と2次元数値シミュレーションという前提条件の下では、 $\lambda \geq 0.76$ のときは弱混合型、 $0.35 < \lambda < 0.76$ のときは緩混合型、 $\lambda \leq 0.35$ のときは強混合型の密度流現象が起こるといえる。各混合形態を区分する混合形態係数の値は、3次元流れの影響が無視できない実河川域では、直ちに適用できないと考えられるし、今回のような2次元モデル河川域でも、河川地形(上流端と下流端の水深、河口角度など)が変われば若干変化するものと推察される。

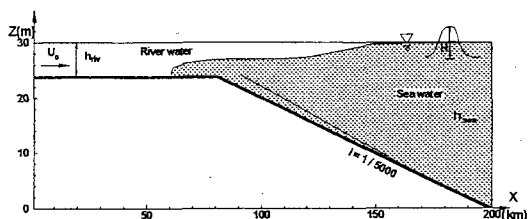


図-2 計算領域と座標系

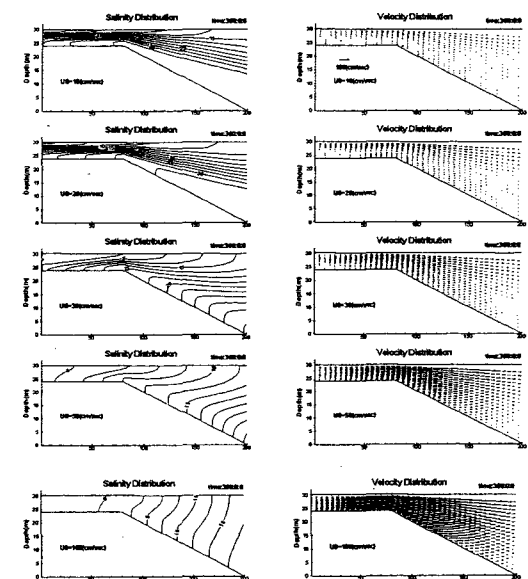


図-3 河川流速による混合形態の変化

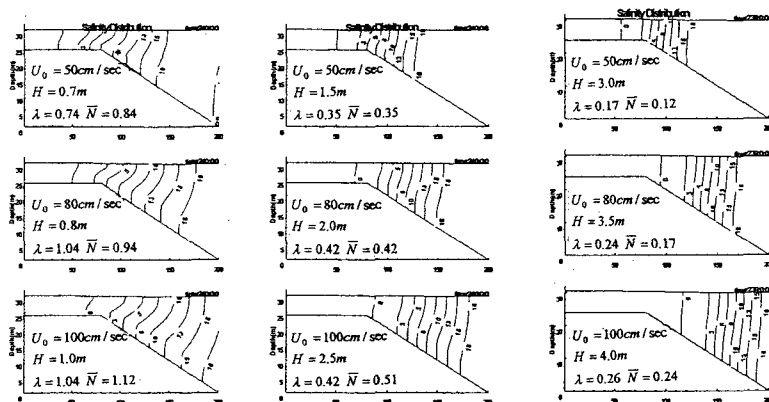


図-4 河川流速と潮汐全振幅による混合形態の変化

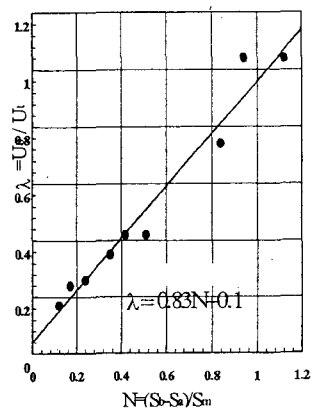


図-5 λ と $\bar{N}$ との関係