

序論 河口から流出する河川流は、地形、河川および海域での水理特性、流体の密度などによって海域で複雑な拡散をする。そのflow patternの一般的特徴は柏根¹⁾によって、potential流型から噴流型まで種々の型があるとされ、河川水と海水との密度差が一定である場合には、河川流のFroude数が大きい程、噴流型の流出になることが知られている。この場合は洪水時の流出に対応するもので、この状態では最近のように工業地帯を通る河川において、洪水時に一挙に汚濁水を海域に放出してしまうことのある場合には、海域での汚濁河川水の拡散問題として河口流出の実態を知る必要が生じてくる。この問題に取り組む一段階の作業として、上記のような噴流型河口流出の水理特性と、密度噴流(plume)の理論として考察したものを以下に示すものである。

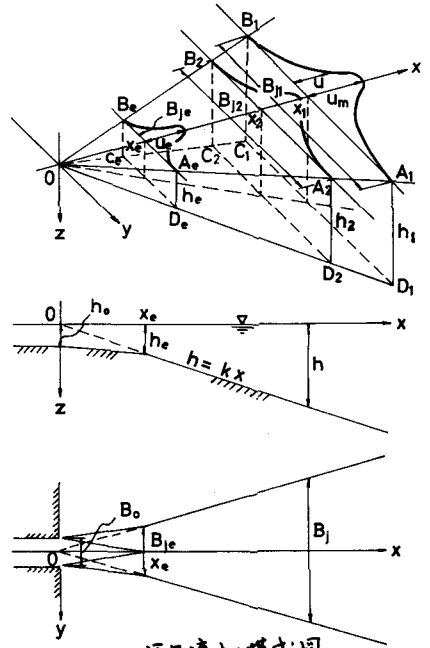


図-1 河口流の模式図。

1. 理論的考察 噴流型流出では混合は強混合的であり、したがって噴流と同じく自己保存型の流れと考えられる。いま、海底勾配が緩やかで、海底摩擦が無視できる場合には、近似的に深さ方向の混合は一様とみなせ、流体密度と流速はx方向に一定と仮定できる。また経験的に流速と密度の分布は相似性が保たれていると考えてよく、これらを以下のように仮定する。

$$\text{流速: } u = u_m \exp \{-a(y/x)^2\} \quad (1)$$

$$\text{濃度: } c = (\rho - \rho_1) / (\rho_2 - \rho_1), \quad \text{ここに } \rho_1, \rho_2, \rho: \text{河川水, 海水, 任意点での密度として}$$

$$c = 1 - (1 - c_m) \exp \{-\mu a(y/x)^2\} \quad (2)$$

式中、 u_m, c_m はx軸上の流速および濃度であり、 a, μ は流速および濃度が海域で拡がって行く程度を示す係数である。次に地形であるが、その形状は図-1に示すように単純なモデルを考え、河口における水深: h_0 、河口幅: B_0 、海底勾配を k として任意点で

$$\text{水深 } h = h_0 x \quad (3)$$

とする。plume源は原点Oから発する点源plumeとする。したがって、河口で有限幅をもつ噴流ではその数倍の距離: $x = x_e$ まではpotential coreを有する領域であるので、本論では $x > x_e$ で考察するもので、 $x < x_e$ では別に理論の組立てを必要とする。

基礎方程式は、まず、噴流の保存性のために解析の有利な運動量方程式を考える。即ち

$$\iint [(\rho u^2) \cos(x, n) + (\rho uv) \cos(y, n)] dS = - \int p \cos(x, n) dS - \int (\rho u \bar{w}) \cos(y, n) dS \quad (4)$$

ここに S は横断面であり、 n は S に立てた外向きの法線である。連続方程式は

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u h) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v h) = 0, \text{ または } \frac{d}{dx} \int_0^\infty \rho u h dy = -\rho_2 v_\infty h \quad (5)$$

で、質量保存式である。しかし基礎式が(4)(5)式のみでは条件式不足であるので、いま一つの条件式を必要とする。本来これには y 方向の運動量方程式を用いるのが妥当であるが、これは解析困難であるため、従来の plume 問題に体積保存式と称して用いられる $\rho = \text{const}$ とした連続方程式

$$\frac{\partial}{\partial x}(u h) + \frac{\partial}{\partial y}(v h) = 0, \text{ または } \frac{d}{dx} \int_0^\infty u h dy = -v_\infty h \quad (6)$$

を用いる。この意味は、流体が非圧縮性で、淡水海水間の密度変化では体積が変らないこと、またこの程度の密度変化では、強混合としての噴流の混合モデルを根本的に変えることはないと考えられる。 (5)(6)式より v_∞ が直ちに消去されて

$$\frac{d}{dx} \int_0^\infty \left(1 - \frac{\rho}{\rho_2}\right) u h dy = 0 \quad (7)$$

u, ρ, h に (1)(2)(3) 式を代入し、 $x = x_e$ で $u_m = u_0, c_m = 0$ の条件で解くと、

$$U_m X^2 (1 - c_m) = 1, \text{ ここに } U_m = u_m/u_0, X = x/x_e, u_0: \text{ 河口の流速} \quad (8)$$

一方、運動量方程式(4)式の S には、図-1に示すように x_1, x_2 の二断面で囲まれる角錐台を考える。 y 方向の長さ B_{j1}, B_{j2} は自己保存流の限界、即ち plume の拡散幅を示すもので、そこでの水理特性から(4)式左辺[]中のオ2項、右辺のオ2項は共に0である。残る項のうち、 ρ に関しては密度が y 方向に一様であることから $\rho_2 = \rho g_2$ とおける。ただし、水面は水平面とし、流出による水面上昇量は一切無視している。(4)式を計算するに当って、(3)式を考慮し、最後に $x_2 - x_1$ を小さくにとって dx とおくと、

$$\frac{d}{dx} \left[x \int_{-\frac{1}{2}B_j}^{\frac{1}{2}B_j} \rho u^2 dy + \rho g \left\{ \frac{1}{2} x^2 \int_{-\frac{1}{2}B_j}^{\frac{1}{2}B_j} \rho dy - F(x) - \frac{1}{6} \rho \beta x^3 \right\} \right] = 0 \quad (9)$$

ここに $F(x)$ は不定積分 $F(x) = \int \left[\int_{-\frac{1}{2}B_j}^{\frac{1}{2}B_j} \rho dy \right] x \cdot dx$, また $\beta = \frac{dB_j}{dx}$

(9)式中、積分の範囲 $\pm \frac{1}{2}B_j$ は $\pm \frac{1}{2}\alpha x$ と書ける。(9)式で $\rho = \rho_1 = \rho_2 (= \text{一定})$ とおけば、[]中オ2項が0となり、密度差のない噴流の運動量保存則に帰着する。(9)式に(1)(2)式を代入して整理すると

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \rho_2 u_m^2 x - \frac{1}{\sqrt{2+\mu}} (\rho_2 - \rho_1) (1 - c_m) u_m^2 x^2 - k (\rho_2 - \rho_1) g \left[\frac{1}{2} (1 - c_m) x^3 + \int (1 - c_m) x^2 dx \right] = \text{const} \quad (10)$$

$$\text{または } \frac{1}{\sqrt{2}} U_m^2 X - \frac{\Delta \sigma'}{\sqrt{2+\mu}} (1 - c_m) U_m^2 X^2 - \frac{k'}{F_r^2} \left[\frac{1}{2} (1 - c_m) X^3 - \int (1 - c_m) X^2 dX \right] = \text{const}$$

ここに $k' = k/(\alpha\beta)$, $\alpha = h_0/B_0$, $\beta = B_0/x_e$, $k = dh/dx$ (海底勾配)

$\Delta \sigma' = (\rho_2 - \rho_1)/\rho_2$, $F_r^2 = u_0^2/\Delta \sigma' g h_0$ (内部 Froude 数)

(8)(10)式より c_m を消去し、 X で一回微分すると

$$\frac{dU_m}{dX} = - \frac{\sqrt{2} U_m^2 X + \frac{1}{2} \frac{k'}{F_r^2} \frac{1}{U_m}}{\sqrt{2} U_m X^2 + \frac{1}{2} \frac{k'}{F_r^2} \frac{X}{U_m} - \frac{\Delta \sigma'}{\sqrt{2+\mu}}} \quad (11)$$

(11)式を $X=1$ のとき $U_m=1$ の条件で計算し、求めた U_m を(8)式に代入すれば C_m の分布もわかる。なお、(11)式において $\Delta\sigma' \rightarrow 0$, $Fr^2 \rightarrow \infty$ とすれば解は $U_m=1/X$ となり、三次元噴流の流速分布と一致する。

2. 計算結果と検討 海底勾配 R , および α, β は河口、海域の地形によって決まる値で、これから作られる $R' = R/(\alpha\beta)$ は地形係数とでも名付けられよう。また Fr^2 は内部 Froude 数, $\Delta\sigma' = (\rho_2 - \rho_1)/\rho_2$ は淡水海水の密度より通常 $1/40$, α は式中では X_e の値に包含されてしまっているが Albertson²⁾ の実験より $\alpha=42$, μ は本来未知な値であるが Abraham³⁾ の plume の実験より $\mu=0.8$ 程度と考えられ、以上の値を用いて(11)式が計算できる。これらの係数の値は、我が国の河川を想定して以下の表のような値をとると推定される。紀の川についてはその詳細な値を付記してみた。

	B_0 m	R_0 m	U_0 m/sec	R	$\alpha = \frac{R_0}{B_0}$	$\beta = \frac{B_0}{X_e}$	$R' = \frac{R}{\alpha\beta}$	Fr^2	$\frac{R'}{Fr^2}$	$\Delta\sigma'$	μ
(小河川)	約 100	2~3	4~5	$1/40$	$1/40$	$1/5$	5	30	$1/6$	$1/40$	0.8
(大河川)	約 500	4~8	2~3	$1/100$	$1/100$	$1/5$	5	5	1	$1/40$	0.8
紀の川	480	5.54	2.50	$1/100$	$1/87$	$1/5$	4.35	4.61	0.94	$1/40$	0.8

$R'/Fr^2 = 0, 1/6, 1$ のときの U_m, C_m の値を計算したのが図-2 である。 $R'/Fr^2 = 0$ は密度が一定の流体による河口流出に相当する。図-2 より、流速に関しては、大河川になる程減衰が著しく、濃度に関してはかなり沖合にならないうと軸上濃度は海水に等しくなると予想される。

以上のように、河口流出を plume とみなす解析法では、その一般的特性を把握するには役立つが、実際には解析可能なためだけの諸近似に若干の問題がある。すなわち、(1) 流速、濃度の分布を仮定して、その相似性が保たれるとみる。(2) 流速、濃度分布が鉛直方向に一定とみなす。(3) 海域での潮汐振動、海流、波浪、海底摩擦などの影響を無視する。(4) 水面は水平とし水面上昇は考えない。(5) 地形を単純化している。などがあげられ、今後この諸近似をある程度実情に合う条件にして解析に導入することは可能であるが、実際河川の河口流出にはやはり数値解析の手法が必要となろう。

参考文献

- 1.) 柏村正和 他; 河口の流れの構造, 河口流の実態, 才15~17回「海講」講演集, 昭43~45.
- 2.) M.L. Albertson et al.; Diffusion of Submerged Jets, Trans. ASCE, vol. 115, 1950.
- 3.) G. Abraham; Horizontal Jets in Stagnant Fluid of Other Density, Proc. ASCE, HY.4, vol. 91, 1965.

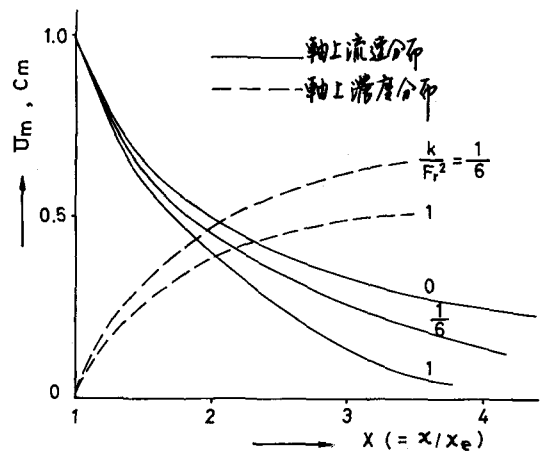


図-2 噴流軸上の流速および濃度分布