

河 口 濁 度 流 に つ い て の 研 究

A Study on Turbidity Discharge from a River Mouth

李 立 亜

東北大学 正員 沢本 正樹

1. はじめに

出水時、土砂を多量に含んだ河川水は海域へ流出すると、海水と混合しながら表層に拡がっていく。この間、土砂も沈殿、拡散する。この様子は人工衛星や空中写真によっても明瞭に認められ、特に近年この種の観察事例が増えている。この現象は、海岸への土砂供給や沿岸環境問題と関連し、古くより研究が行なわれている¹⁾²⁾。河口流出と似た密度流現象に、火力および原子力発電所の温排水の放出があり、これについても数多くの研究がある²⁾³⁾⁴⁾。

著者らは最近衛星データの水工学での利用の可能性を検討し河口流出流の解析を行なった³⁾⁴⁾。それによると、河口より10km程度までの領域での濁度の拡散、減衰の様子が、MSSデータより明瞭に観察されることが明らかとなった。また、沿岸流の効果、流れの型による違いなどが重要であることも明らかとなった。本研究では、このように観察された現象を数理モデルを用いて定性的に検証することを目的としている。用いたモデルは、都司⁵⁾の理論解析にさらに濁度の拡散計算を加えたものである。

2. 基本方程式

河口の地形としては、図1に示すような単純化した場を考える。座標原点は幾何学的な河口中央の静水面上にとる。海側の水深 D は、河口水深 H_0 より十分大きいものとする。

基本方程式は Boussinesq 近似を用いた Navier-Stokes の式、連続の式、拡散の式である。これらをそのまま解くのは容易ではないので、今回は現象の本質を考えながら次のような簡略化を行なった。なお、ここでは問題を定常として扱うものとする。

まず、水平運動では運動方程式中の慣性項を無視し渦動粘性項と圧力項との均衡のみを考える。鉛直方向については静水圧分布を考え、鉛直流速については、連続の式を介して水平流速分布から求めるものとする。密度の鉛直分布としては後述のような二つのモデルを用いる。以上より、最初に流れ場の解析を行ない、次にその流れ場における濁度、塩分の拡散計算を行なう。計算された塩分と濁度から密度場を求め、同様の計算を繰り返すことにより、精度を上げることもできるが、今回は繰り返し計算までは行なわなかった。以上まとめると、

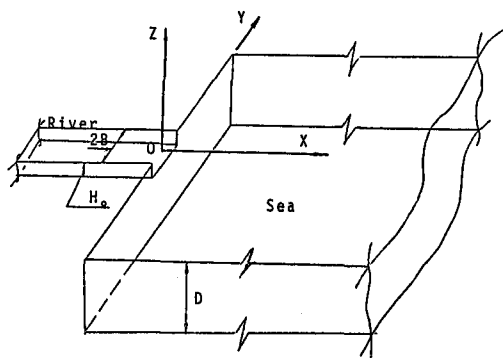


図-1 計算領域

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\rho_s} \frac{\partial p}{\partial x} &= f_v + A_h \nabla^2 u + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}, \quad \frac{1}{\rho_s} \frac{\partial p}{\partial y} = -f_u + A_h \nabla^2 v + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = -g$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = K_h \nabla^2 c + K_v \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + w_0 \frac{\partial c}{\partial z} \quad (3)$$

となる。ここに、 A_h, A_v は、水平、鉛直方向の渦動拡散係数、 K_h, K_v は拡散係数、 c は濁度または塩分濃度、 w_0 は沈降速度で濁度の計算時にのみ考慮する。 f はコリオリ係数、 ∇^2 は水平方向のラプラシアンである。なお、拡散物質 c については 0 から 1 までの値に基準化して用いた。

境界条件は、河口では、 $u=U_0, v=w=0$ 、塩分の相対濃度 0、濁度の相対濃度 1、計算領域の端では流速は沿岸流速 V_0 、拡散質のフラックスゼロとした。

3. 理論解析および数値解析

簡単な場合には都司⁵⁾により理論的検討が行なわれている。今回はそれを利用し、さらに濁度分布などについて数値計算を行なう。

A) 理論解析

運動方程式および連続の式を鉛直方向に積分すると次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} A_h \nabla^2 M_x + f M_y &= \frac{1}{\rho_s} \frac{\partial P}{\partial x} \\ A_h \nabla^2 M_y - f M_x &= \frac{1}{\rho_s} \frac{\partial P}{\partial y} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial M_y}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

$$\text{ここに } M_x = \int_{-D}^{\zeta} u \, dz, \quad M_y = \int_{-D}^{\zeta} v \, dz, \quad P = \int_{-D}^{\zeta} p \, dz$$

ここで、 M_x, M_y に関する流関数 ψ を導入すると、上式は次のような 4 次のラプラスの式にまとめられ、その解は重調和関数で与えられる。

$$M_x = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad M_y = -\frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad \nabla^4 \psi = 0$$

河口での境界条件および沿岸流を考えると、 ψ は次のように得られる

$$\psi = \frac{U_0 H_0 B}{\pi} \left\{ (\eta+1) \tan^{-1} \frac{\eta+1}{\xi} - (\eta-1) \tan^{-1} \frac{\eta-1}{\xi} \right\} - V_0 D B \xi \quad (6)$$

ここで、 ξ, η は、河口の半幅で無次元化した座標である。ここで、図 2 のような密度分布を仮定すると河川水の拡がり層厚は次のように求まる⁵⁾。

$$\left. \begin{aligned} h^2 &= \frac{2C}{g} \frac{U_0 H_0 \rho_s}{\Delta \rho} A_h \left\{ -\frac{f B^2}{2 A_h} \left[(1+\eta) \tan^{-1} \frac{1+\eta}{\xi} - (1-\eta) \tan^{-1} \frac{1-\eta}{\xi} \right] \right. \\ &\quad \left. + \frac{1+\eta}{(1+\eta)^2 + \xi^2} + \frac{1-\eta}{(1-\eta)^2 + \xi^2} \right\} + \frac{C f}{g} V_0 D B \xi \frac{\rho_s}{\Delta \rho} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ここに C は定数で、モデル 1 では 2、モデル 2 では 0.4、 $\Delta \rho$ は海水と河川水の密度差である。

B) 数値解析

理論解析で求めたものは鉛直方向に積分された総流量であるので、次にこれを数値解析により各地点での流速に分配する。さらに計算された流速場での塩分と濁度の拡散計算を行なう。計算の流れは、図 3

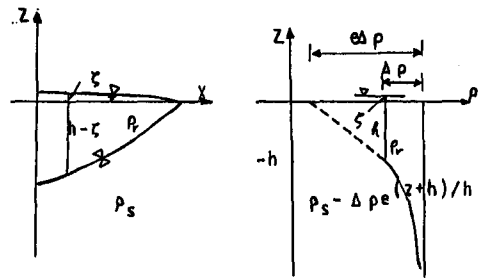


図-2 密度分布モデル

に示す。計算にはBryan⁶⁾の提案したBox法を用いた。使用した計算機は東京工業大学のM280Hで、1ケースあたり4MB、4minを要した。計算に用いた各種パラメータは、 $A_h=10\sim20\text{m}^2/\text{s}$ 、 $A_v=0.01\text{m}^2/\text{s}$ 、 $K_h=100\sim200\text{m}^2/\text{s}$ 、 $K_v=0.01\text{m}^2/\text{s}$ 、沈降速度 $0.05\sim0.5\text{cm/s}$ 、海水の比重 1.021～1.024、河川水の比重 1.002 である。これら各種組合わせについて計算を行ない、結果の定性的な比較検討を行なった。

4. 結果と考察

式(6)で計算される流関数の分布を図4に示す。図中の M_0 は $U_0 H_0$ である。沿岸流速の増加とともに、河口から流れが大きく偏向される様子がわかる。写真には参考のためにLANDSATで観察された1985年5月の出水時の天竜川からの河口流出の様子を示す。これに示されるように、一般に沿岸流が河口からの流れに及ぼす影響はきわめて大きく、この種の計算を行なう場合には無視することはできない。沿岸流による流れの偏向と、それにともなうフロントの形成は他の河川においても明瞭に観察されている^{4), 7)}。

さらに数値計算により、流速分布、塩分および濁度分布を計算した一例を図5に示す。沿岸流により河口より沿岸

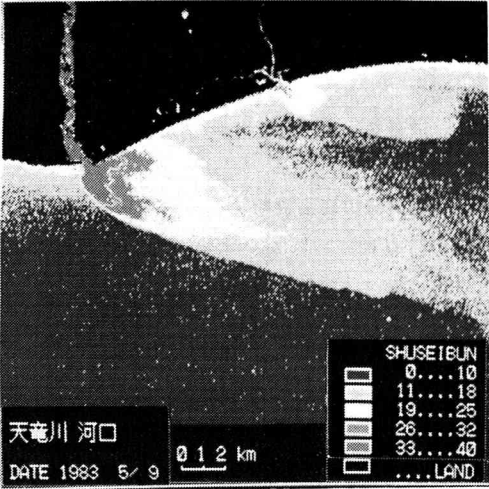
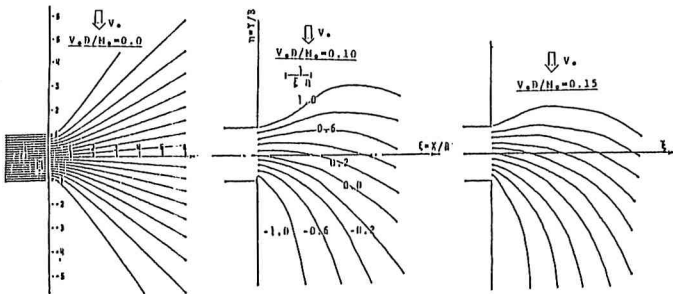
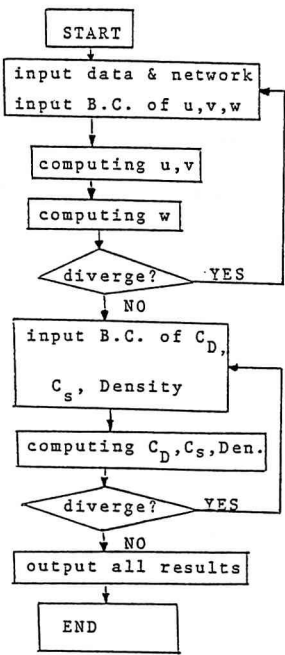


写真 天竜川からの河口流出



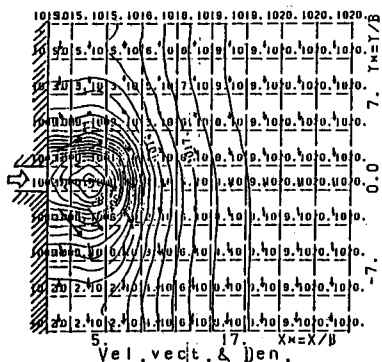
図－4 流関数の分布



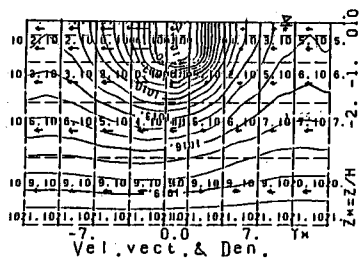
図－3 計算の流れ

度線が計算され、フロントの形成があることがわかる。濁度と塩分の分布を比較すると、沈降効果のため高濁度部は河口の比較的近くに集中するのに対し、塩分は広い範囲で変化している様子がわかる。流れは二次元的に拡がるため、高流速部は河口近くに限られる。実際の河口流出の場合には直接沖へ向かうものと、比較的岸近くを沿って流れるものとの二つに分岐する現象が観察されるが^{3), 4)}、今回の計算では、そのような現象は再現されなかった。これは、モデルが地形および渦動拡散係数の分布の効果を考慮していないためと考えられる。

図6に、沿岸流がない場合の流れの中心軸に沿っての流速の減衰を示す。図にはHarleman²⁾らの温排水に関する曲線も併せて示してある。両者は、河口からの距離を表わす横軸の値をずらすとはば一致する。この差は本モデルが慣性項を無視しているため、その分流速の減衰が早く始まっていることに起因している。図中、RUN 1と3は河川流量を、RUN3と4は密度差を



平面流速ベクトル(表層)



沿岸方向断面流速ベクトル

図-5 計算例

$U_0 = 1 \text{ m/s}$

$H_0 = 2 \text{ m}$

$f = 0.0$

$A_h = 20.0 \text{ m}^2/\text{s}$

$A_v = 0.01 \text{ m}^2/\text{s}$

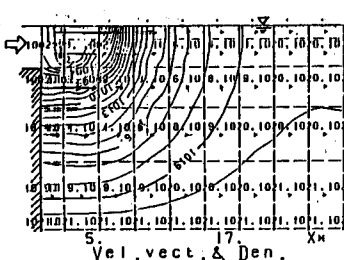
$K_h = 100 \text{ m}^2/\text{s}$

$K_v = 0.01 \text{ m}^2/\text{s}$

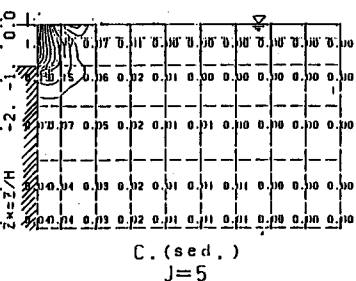
$\rho_s/\rho_0 = 1.021$

$\alpha/\alpha_0 = 1.002$

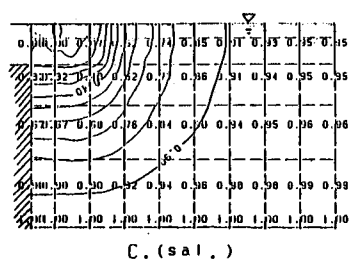
$w_0 = 0.05 \text{ cm/s}$



岸沖方向断面流速ベクトル



濁度分布



塩分分布

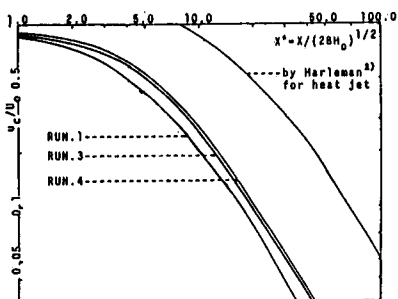


図-6 流速の減衰

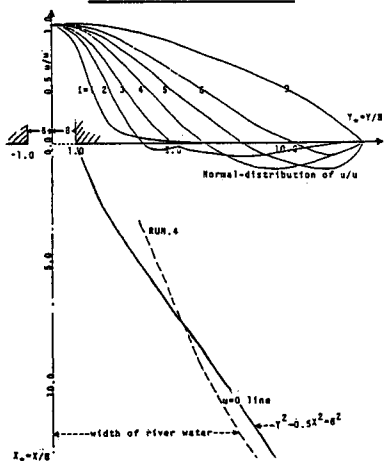


図-7 流れの拡がり幅

変えたものである。流量を小さくし、密度を大きくすると曲線は右へずれることになる。

図7の上半には、流出流の表面横断流速分布を示す。この分布で $u=0$ となる点を河口流の幅と定義し、その流下方向の変化を下半の図に示す。幅の拡がりは従来言われているように、ほぼ双曲線で表現される。しかし、その係数はTakano¹⁾のものと多少異なっている。

図8には流れの中心軸に沿った濁度の減衰を示す。比較のために併せて示したものは、LANDSATにより観察された1979年10月の大井川、富士川の流出である⁴⁾。LANDSATのデータは輝度データから計算した主成分値であるが、ほぼ濁度を表わしているものと推測される。計算例は、拡散係数を $K_h=100\text{m}^2/\text{s}$ 、沈

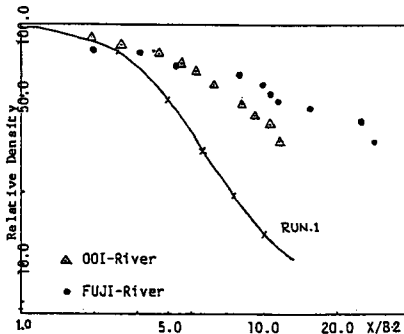


図-8 濁度の減衰

降速度を $w_0 = 0.05\text{cm/s}$ (比重2.65, 粒径 0.02mm 相当)としたものである。計算と観察とを比較すると本モデルは多少早めの減衰を計算したことになることがわかる。コロンビア川河口における河川水濃度の分布⁸⁾は、ここで用いた

LANDSATデータとよく一致しており³⁾、本モデルが沈降速度を大きめに評価しているか、あるいは、より微細な粒度成分を無視していることによるものと思われる。

5. おわりに

比較的簡単なモデルで河口流出の定性的な特徴を再現することができた。しかし、今回のモデルの中で見ても、過動粘性係数、拡散係数、沈降速度の値をどのようにとればよいかといった問題がある。また、モデル自体にも、定常化、慣性項無視、地形の効果の考慮の必要性など多くの問題がある。これらは厳密な計算モデルを用いて順次検討を加えていく予定である。

参 考 文 献

- 1) Takano, K. (1954): On the salinity and velocity distribution off the mouth of a river, J. Oceanogr. Soc. Japan, 10-3, 92-98.
- 2) Stolezenbach, K. D. and D. R. F. Harleman (1973): Three dimensional heated surface jet, Water Resources Research, 9-1, 129-137.
- 3) 沢本正樹, 李立亜, 村越潤 (1985): 駿河湾および天竜川の河口流出の解析, 第32回海岸工学講演会論文集, 125-129.
- 4) 沢本正樹, 村越潤 (1985): LANDSAT-MSS data を用いた河口流出の解析, 東京工大土木研究報告, 34.
- 5) 都司嘉宣 (1984): 流出水の分布形状の理論的解析, 沿岸海洋研究ノート, 21-2, 98-109.
- 6) Bryan, K. (1969): A numerical method for the study of ocean circulation, J. Comput. Phys., 4, 347-376.
- 7) 土木学会海岸工学委員会編 (1985): スライドライブラリー「日本の海岸と港湾」(海岸編), No. 106.
- 8) 玉井信行 (1980): 「密度流の水理 (新体系土木工学)」, 103-105.