

II-36

河口流出水の拡がりに関する数値計算

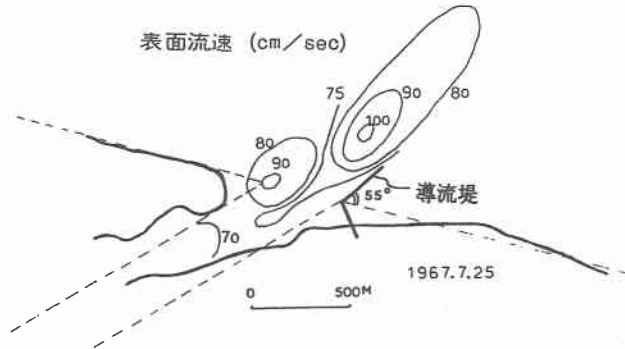
(株)アルファ水工コンサルタンツ 正会員 西村雅樹
 窪田 忍
 北海道大学工学部 正会員 吉田静男

1. はじめに

温排水の密度流に関する3次元のプログラム開発を行ったので、これを石狩川河口の流出水に適用しその有効性を調べた。

石狩川河口では流出水は直進性が強く、海表面上に薄く拡がって行く。また、河口から数100mの範囲で流速が再加速される現象が観測されることでも知られている⁽¹⁾。図1に流速分布を示す。

図1 石狩川河口での流速



2. 方程式系

ここで用いた数値計算プログラムでは、流体は非圧縮性で、鉛直方向には静水圧近似が成り立つと仮定されている。方程式は以下の通りである。

$$\text{div } \vec{v} = 0$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \text{div}(\epsilon \cdot \text{grad} \vec{v}) = 0$$

但しZ方向には以下の式を適用する。

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + g$$

$$\frac{\partial \Delta \rho}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \Delta \rho = -\text{div}(K \cdot \text{grad} \Delta \rho)$$

ここで

速度 $\vec{v} = (u, v, w)$ 密度差 $\Delta \rho = \rho_s - \rho$ (ρ_s は周囲海水密度)

P: 圧力 ϵ : 渦動粘性係数 K: 渦拡散係数

Numerical Experiments of River Plume Spreading Near River Mouth
 by Masaki NISHIMURA, Shinobu KUBOTA and Shizuo YOSHIDA.

水面は自由表面として扱われる。これらの式の取り扱いの中辻等⁽²⁾に準ずる。但し彼等との相違点は全てをimplicitで扱うこと、X-Y両方向に風上微分を適用している点等である。
 計算は静止している海水へ $t=0$ で河口から流出が始まったものとして時間を追って行い、ほぼ定常となる時間(約10,000秒)で止めた。

3. 計算の諸条件

河口の形状は複雑なので以下の様に近似した。

河口出口：幅389.5m、深さ1.7m

流出方向：導流堤と同じく 55° の方向

流出速度：最大0.93m/sで、河口の流出面については観測と一致するように分布させた。

流出密度：流出する淡水密度は $\rho_0 = 1.0015 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ($T=26.5^\circ\text{C}$ 、 $C\ell = 1.2\%$)

周囲海水密度は $\rho_s = 1.028 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ($T=18.3^\circ\text{C}$)

河口での密度差 $\equiv \Delta\rho_0 = \rho_s - \rho_0 = 26.5 \text{ kg/m}^3$

河口密度の鉛直分布：ケース1 全面で $\Delta\rho = 26.5$

ケース2, 3, 4 上端(水面)で $\Delta\rho = 26.5$

下端(水深2.25m)で $\Delta\rho = 0.0$

となるように分布させた(図2)。

渦動粘性係数と渦拡散係数⁽²⁾

$$\epsilon_x = \epsilon_y = K_x = K_y = 0.0256 \cdot u_0 \cdot h_0 \sim 1.01$$

$$\epsilon_{zN} = 0.0256 \cdot 2B_0 \cdot u_0 \sim 0.0202$$

$$\epsilon_z = (1 + 5.2Ri)^{-1} \cdot \epsilon_{zN}$$

$$K_z = (1 + 10/3Ri)^{-3/2} / (1 + 10Ri)^{-1/2} \cdot \epsilon_z$$

ここでRiは勾配型リチャードソン数で次式で与えられる。

$$Ri = -\frac{g\partial\rho/\partial z}{P(\partial U/\partial z)^2}, \quad U = \sqrt{u^2 + v^2}$$

計算領域：X方向(沖へ) 2,120m (24メッシュ)

Y方向(陸に平行) 2,472m (49メッシュ)

Z方向(深さ) 21.85m (15メッシュ)

導流堤の影となる部分は計算領域から除外した。

4. 計算結果と検証

ケース1, 2, 3, 4の結果を図示する($t=10,000$ 秒、図3.1~図3.4)。これから先はこの形状は殆ど変化しないので定常状態とみてよい。

拡がりの様子はほぼ似ているが、河口での密度の鉛直分布を上へ絞る程直進性の増すことがわかる。

観測ではこれらのケースよりも直進的である。

また、再加速の領域はこれらの図では出てこないが、0.6m/sの等速度線の形状には、再加速への移行の前兆が見られる。ケース1の8,000秒での様子はわずかに再加速を示す(図4)。

図2 流出口での密度偏差

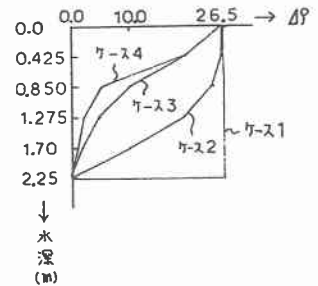


図3 表面流速分布

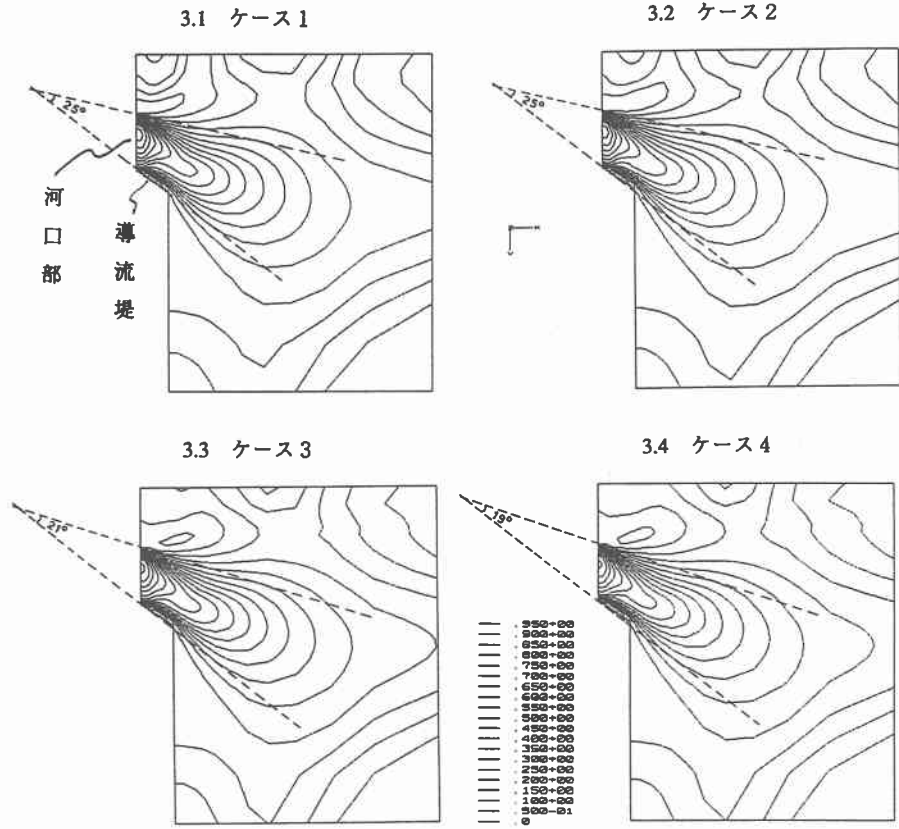
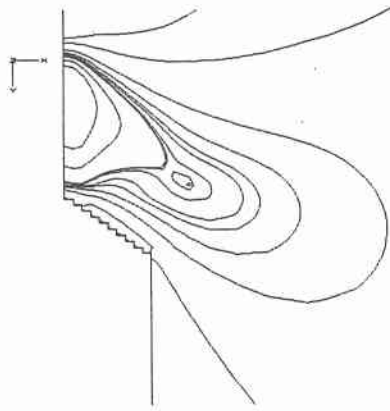


図4 再加速

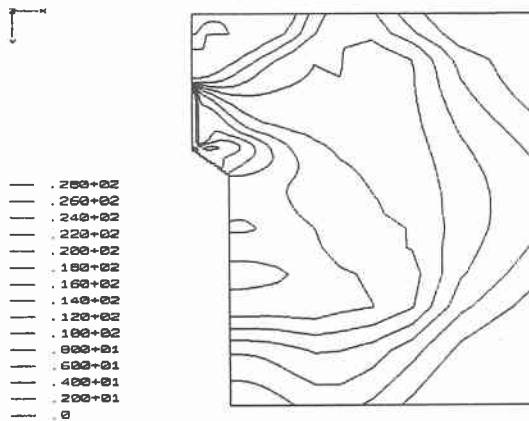


再加速の物理機構についてはいくつかの研究がある。海への流出の際に河川水に働く浮力により急速な流束の上昇とその後のゆるやかな下降によってできるスロート部分で加速されるようである。このとき、水平方向への拡がり小さければ流速の減少割合が小さく、この効果がよりはっきりと現われるようである。

表面密度の分布を図5に示す。図5はケース4のものであるが、ケース1, 2, 3, 4で殆ど変わらない。流入した河川水は導流堤によって一部が跳ね返されている様である。流入の角度は導流堤と同じ角度(55°)にとったが、河川水が両側へ拡がる時に導流堤の反対側へ拡がり切れずに偏った結果と見られる。

前掲した等速度図で、導流堤を過ぎた後に角度が変わるが、これはこの反跳の結果と解釈出来る。

図5 密度偏差の表面分布



ケース4の水面的変化量を図6に示す。

これも表面密度と同様に導流堤でわずかに盛り上がっている。上の解釈を裏付けるものと思われる。観測ではこの様子は見られない。人為的に与えた流出条件が招いた欠陥である。これを避けるには、計算領域を河口で切らずに河道部を付け、計算を河道の上流から行って、自然な流入条件を与える必要がある。また、こうすることにより、海への流入後の直進性がよくなり、再加速も自然に出てくるものと期待できる。

密度の鉛直分布を図7.1, 7.2に示す。これはケース1とケース3のものである。

この図は河口の中心から垂直に沖へ向かう方向でのものであり、流れの中心を追ったものではないが、導流堤による反跳の影響は現われない部分である。

4つのケースとも河川水は流入後の強力な浮力効果で河川から2メッシュ(45m)行った所で鉛直方向の2メッシュ(0.85m)の間に収まった流束となる。その後徐々に水平方向へ拡がるとともに海水との混合により密度差が小さくなっていく。

観測によれば河川水の厚さは10cm～数10cmとのことであり、計算結果は大略合っていると見えよう。これ以上の精密化はメッシュをもっと細かくする必要があるが、我々の計算（17,640メッシュ点）はimplicit法の為、各時間ステップで行列式を解かねばならず、メモリ、計算時間とも、かなり限界に近い（北大のスパコンS820-80で36MB、120分）ため何らかの工夫が必要である。

河川水の流入後の急激な上昇は、もしこれが河道内で起こるなら、所謂塩水楔の形をとるものと思われる。河道を付けた計算については中辻etal⁽³⁾が既に行っているが、各河川の実状に合わせたものが要求される。

図6 水面変位分布

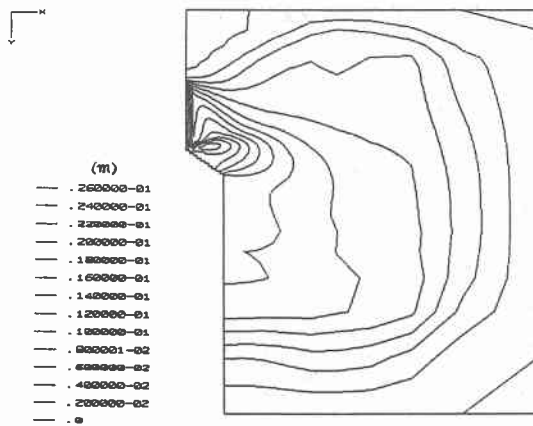
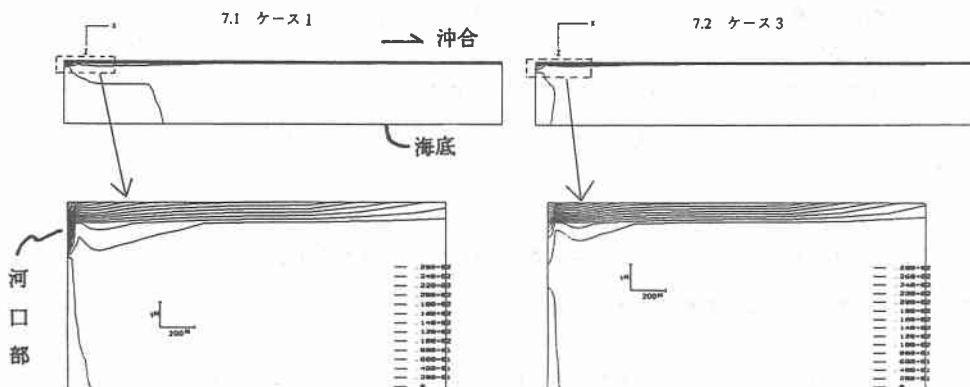


図7 密度偏差の鉛直分布



5. 結論

ここで述べた計算結果は石狩川河口の河川水の拡がりに関して、完全な結果ではない。

- ・導流堤の反跳
- ・流束の拡がり大きい
- ・流速の減少割合大きい
- ・再加速領域の現出が不充分

等が問題点として挙げられるが、河道を付け、河道上流から計算を行うことにより解決の方向へ向かうことが示唆される。

それにより

- ・河道内での塩水楔の形成
- ・流束の直進性の増加
- ・再加速領域の出現

等が期待される。

参考文献

- (1) 吉田静男、柏村正和：Proc. 16th Coastal Engineering Conference, 1978
- (2) 中辻啓二、許 再寧、室田 明：三次元表層密度流の数値実験、土木学会論文集 No.434/II-16, 1991
- (3) 中辻啓二、湯浅補勝、村岡浩爾：河口周辺部における河川流出流の流動構造、土木学会論文集 No.461/II-22, 1993