

II-210

自由水面を有する噴流の数値計算

東北大学大学院 学生員 ○林雄一郎
東北大学工学部 正 員 田中 仁

1. 研究目的

一般に噴流に代表されるような自由せん断流は、外乱に対して極めて不安定で、比較的小さなレイノルズ数で乱流遷移する。また噴流が卓越するような実現象として河口部前面での流況を考えると、底面摩擦、水深変化等の影響でより複雑な挙動を示す。本研究では、実地形を単純化した幾何地形を設定し、 $k-\epsilon$ 乱流モデルを用いた数値計算を行い、実験値との比較および理論との差異について考察を行う。

2. 計算条件

2.1 計算領域

図1に示す計算領域を仮定し、正方向格子間隔 $\Delta x = 5$ (cm)、時間格子間隔 $\Delta t = 0.005$ (sec)のもとに計算を行った。Özsoy¹⁾の行った実験値との比較を行うために表1のような計算条件を設定し実験と諸条件を整合した。

2.2 支配方程式

流れ場の計算にはレイノルズ方程式を水深平均し、さらに浅水近似を施した式を用いた。式中に表れるレイノルズ応力項は渦動粘性係数を用いて勾配拡散型線形モデルによって表現する。水深平均した乱流エネルギー k と逸散率 ϵ の輸送方程式はそれぞれ次式のようになる。

$$\frac{Dk}{Dt} = D_k + P_k + P_w - \epsilon \quad (1)$$

$$\frac{D\epsilon}{Dt} = D_\epsilon + P_\epsilon + P_{\epsilon v} - C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2)$$

$$v_i = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3)$$

ここで拡散項 D および生成項 P について標準型 $k-\epsilon$ モデルに準じて計算を行うと、時間発展的に k が増幅し、収束解を求めるのが困難であったため、次に示すような修正を行っている。まず(4)式のように ϵ の生成項を修正した²⁾。

$$P_\epsilon = \frac{\epsilon}{k} \left[C_1' P_k - C_1' v_i \left(\frac{\partial U}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (4)$$

ただし $C_1' = 2.1$ 、 $C_1'' = 0.8$ 。

第2に(5)式のようにモデル係数 C_μ について曲率補正を施した²⁾。なお U_s 、 R_c は図2に示すようにそれぞれ接線方向流速、曲率半径である。

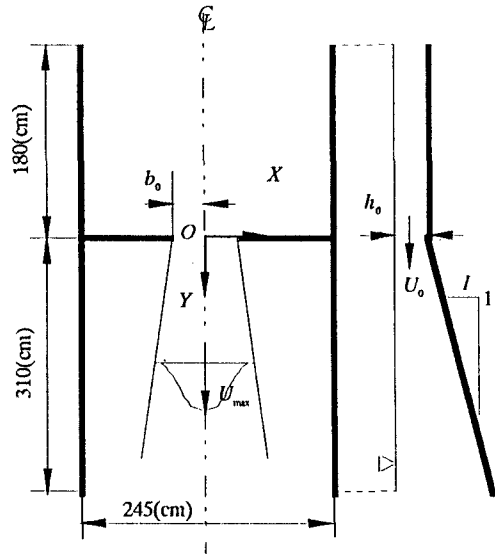


図1 計算領域

表1 計算条件

I	h_0 (cm)	U_0 (cm/sec)
0.015	4.5	9.0

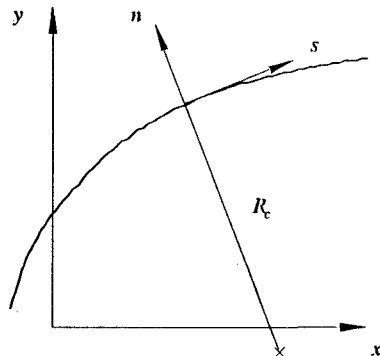


図2 流線座標系

$$C_\mu = \frac{-K_1 K_2}{\left[1 + 8K_1^2 \frac{k^2}{\varepsilon^2} \left(\frac{\partial U_x}{\partial n} + \frac{U_x}{R_c} \right) \frac{U_x}{R_c} \right]} \quad (5)$$

ただし $\alpha = 1.5$ 、 $\beta = 0.6$ 、

$$K_1 = \frac{1-\alpha}{\beta}, \quad K_2 = \frac{2}{3} \frac{1-\alpha-\beta}{\alpha}.$$

第3に(6)式のように k の拡散項修正を行うことによって k を抑制した³⁾。

$$D_k = C_\mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{k^2}{\varepsilon} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - C_k \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{k^3}{\varepsilon^2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) \quad (6)$$

ただし $C_\mu = 0.12$ 、 $C_k = 0.06$ 。

係数 C_μ 、 C_k はバックステップ流れを対象に最適化がなされている。なお乱流モデル係数については一般的に使われている数値を採用し、Leap-frog法により差分化した。

3. 計算結果

中心軸流速分布、半値幅の広がり、横断方向流速分布について実験値および理論式¹⁾と比較した。まず図3の中心軸流速分布だが、coreが発達している領域でも流速を十分な精度で再現できている。噴出源近傍で過大評価されているが、図4に示す水位分布から噴出源前後での水位勾配の影響と思われる。次に図5に示す半値幅の広がりを理論式と比較すると、やや勾配が大きい。用いた理論は底面勾配および底面摩擦は考慮してあるが、水位変動は省略してある。図6は横断方向流速分布を表している。噴流の内部に十分な計算点を取っていないが、主流との境界付近で計算値と理論曲線との違いが目立ってくる。これは主流領域と周辺領域の速度勾配による拡散が計算された結果と思われる。

4. 考察

乱流エネルギー等の乱流量を計測データと詳細に比較できなかったが、速度分布の予測は定性的には良好で、流れ場の基本的な性質を修正 $k-\varepsilon$ モデルを用いることによって再現できた。さらに、乱流計算を他の運動量水平拡散が卓越する現象に適用し、水理実験データとの比較を行い、計算モデルを改良していきたい。

参考文献

- 1) Özsoy, E. (1977): Flow and Mass Transport in the Vicinity of Tidal Inlets, Technical Report UFL/COEL, TR-036, 206p.
- 2) Leschziner, M.A. and Rodi, W. (1981): Calculation of annular and twin parallel jets using various discretization schemes and turbulence model variations, J. Fluids. Eng., Transactions, ASME, Vol. 103, pp.352-360.
- 3) Yoshizawa, A. (1984): Statistical modeling of a transport equation for the kinetic energy, Phys. Fluids, Vol.30, pp.628-631.

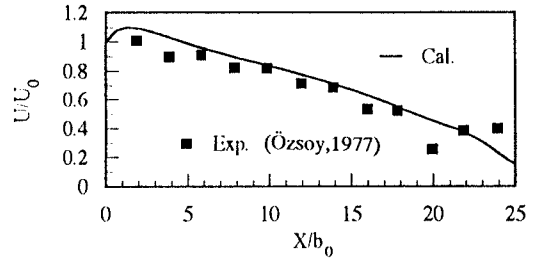


図2 中心軸流速

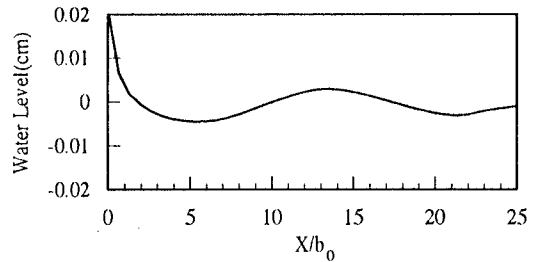


図3 中心軸水位分布

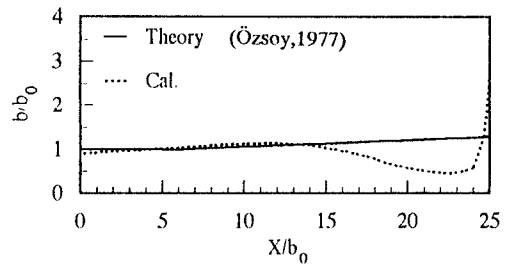


図4 半値幅の広がり

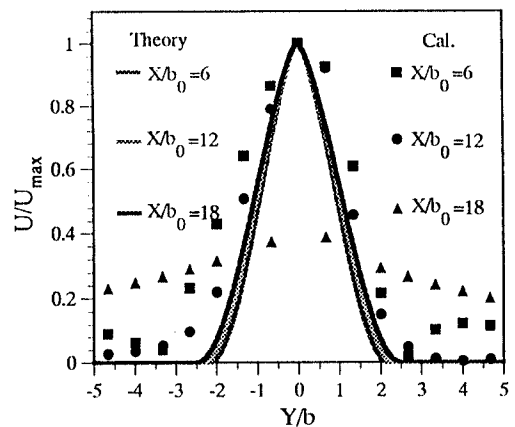


図5 横断方向流速分布