

水制工によって射流域の生じる流れの数値計算

岐阜大学工学部 正会員 田中 裕一郎, 正会員 中谷 剛, ○ 学生会員 増田 尚弥

【1. 緒言】

本来、河川の流れは大変複雑となっており数値シミュレーションを行なう場合、様々な水理条件を含んだ流れを計算することが必要とされる。その中の条件の一つとして死水域を伴う流れが上げられるが、死水域を伴う流れの数値計算は常流を対象にしたものが多いが、本研究では水制工による縮流のために射流域が局所的に生じる場合の数値計算法を提案し、死水域の再現精度が、どのように射流域の再現性に影響を与えるかを中心に議論したものである。

【2. 計算方法】

支配方程式には、連続式及び二次元水深平均方程式を用いた。支配方程式の差分には、常・射流混在した流れにおいても差分スキームを変えことなく計算を行なうことが可能なMacCormack法を用いた。そしてMacCormack法において弱解付近で生じる物理的に無意味な数値振動を制御するために、高解像度スキームの一つであるTVDを導入した。死水域を伴う流れの計算において重要なパラメーターである渦動粘性係数の計算には、LauferとRodiによって提案された水深平均 $\kappa-\epsilon$ モデルを用いた。そして、死水域の長さを短く評価するという標準 $\kappa-\epsilon$ モデルの問題点を考慮して、低Reynolds数モデルの一つであるNaganoの式¹⁾を用いた場合についても計算を行なった。以下に本研究用いた低Reynolds数モデル(Nagano model)の式を示す(式(1)~(2))。

$$\frac{\partial \kappa}{\partial t} + \frac{\partial U \kappa}{\partial x} + \frac{\partial V \kappa}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\nu_t}{\sigma_\kappa} \frac{\partial \kappa}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\nu_t}{\sigma_\kappa} \frac{\partial \kappa}{\partial y} \right] + G + P_{\kappa v} - \epsilon + D \quad (1)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial U \epsilon}{\partial x} + \frac{\partial V \epsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right] + c_1 f_1 \frac{\epsilon}{\kappa} G + P_{\epsilon v} - c_2 f_2 \frac{\epsilon^2}{\kappa} + E \quad (2)$$

$$G = \nu_t \left[2 \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 \right], \quad \nu_t = C_\mu f_\mu \frac{\kappa^2}{\epsilon}, \quad f_\mu = [1 - \exp(-y^+/26.5)]^2$$

$$f_1 = 1.0, \quad f_2 = 1 - 0.3 \exp(-R_T^2), \quad D = -2\nu \left(\frac{\partial \sqrt{\kappa}}{\partial y} \right)^2, \quad E = 2\nu \nu_t \left(\frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right)^2, \quad R_T = \kappa/\epsilon$$

$$P_{\kappa v} = c_\kappa \frac{U_*^3}{h}, \quad P_{\epsilon v} = c_\epsilon \frac{U_*^4}{h^2} c_\kappa = \frac{1}{\sqrt{c_f}}, \quad c_\epsilon = 3.6 \frac{c_2}{c_f^{\frac{3}{4}}} \sqrt{c_\mu}, \quad U_* = [c_f (U^2 + v^2)]^{\frac{1}{2}}$$

h :水深, U : x 方向平均流速, V : y 方向平均流速, g :重力加速度, n :Manningの粗度係数, ν_t :渦動粘性係数, κ :乱流エネルギー, ϵ :散逸率

経験定数は、標準 $\kappa-\epsilon$ モデルの場合 $c_\mu = 0.09, c_1 = 1.43, c_2 = 1.92, \sigma_\kappa = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$ を与え、低Reynolds数 $\kappa-\epsilon$ モデル(Nagano model)の場合 $c_\mu = 0.09, c_1 = 1.45, c_2 = 1.9, \sigma_\kappa = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$ を与える。計算は表1に示す計算条件で行なう。水制工は河道法線に対して平行かつ水路右側壁側に設置した。

【3. TVDの影響について】

TVDは、数値振動が生じる場所で流れの状況に応じて補正量を与えることで、数値振動を制御しているため、TVDを導入することによる跳水部及び計算領域における質量又は流量の保存性を確認する必要がある。そこで、最大Froude数1.3程度の跳水が生じるケースについて一次元の数値実験を行なって、その結果を図1に示す。図1-1は計算された水面形の概要であり、図1-2は全計算領域について流量比(TVDに水深をかけたものを流入流量(q_{in})で正規化したもの)の変動を示したものである。図1-2から分かるようにTVDによって跳水部に付加される量は、最大で流入流量の約0.0030%といったわずかな量となっていることが分かった。TVD導入による流量の保存性に対する影響は十分無視できることが分かった。

【4. 結果と考察】

本研究では、死水域の長さを流下方向流速0以下の領域と定義して考察を行なった。各等高線図の x 軸、 y 軸は水路幅(B)で無次元化を行なった。実験結果と計算によって得られた死水域の長さを表2に示す。標準 $\kappa-\epsilon$ モデルは死水域の長さが、実験値と比較して40%とかなり短くなって再現されている。低Reynolds $\kappa-\epsilon$ モデルで計算を行うことで、死水域の長さが実験値の60%と長くなるという結果が得られた。図2-1, 2に実験結果²⁾、低Reynolds数 $\kappa-\epsilon$ モデルによって得られた流線を示す。0で示された流線を死水域の形状と考えると、計算では死水域の長さが実験値よりも短く再現されていたが、死水域の形状としては実験結果と似た形状となっていることが分かった。標準 $\kappa-\epsilon$ モデルでは、低Reynolds数 $\kappa-\epsilon$ モデルが短くなった様な形状が得られた。図3-1, 2は計算結果と実験結果の1.0以上のFroude数分布を示す。図中の破線は実験結果を示す。実線は計算結果を示す。標準 $\kappa-\epsilon$ モデル(図3-1)は、死水域の長さが短かったために実験結果と比べて射流域が小さく再現されている。射流域は実験値の1/4程度の面積となっている。低Reynolds数 $\kappa-\epsilon$ モデル(図3-2)は死水域の長さが延びたため、射流域が図3-1と比較して更に下流側に広がっており、射流域が実験値の1/3の

面積となっていることが分かる。そして、射流域の上流側の形状（x軸において、0.0から1.0の区間の射流域の形状）は良好に再現されていることが分かった。

【5. 結語】

本研究で次のことが分かった。(1) TVD付加による流量の保存性に対する影響は無視できる。(2) 提案した数値計算法は、死水域の長さを良好に再現することが可能ならば、射流域は良好に再現できると思われる。

参考文献

1) Y.Nagano and M.Hishida(1987): "Improved Form of the $\kappa - \epsilon$ Model for Wall Turbulent Shear Flows", Transactions of the ASME, Vol.109, JUNE. (pp156-160)

2) 長屋琢次 (1994): "傾斜した水制工の水理特性について", 平成6年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, (pp139-140)

表1 計算条件

水路長	12(m)
水路幅(B)	0.4(m)
水制工長	0.08(m)
Manningの粗度係数	0.01
河床勾配	1/1000
流入流量	3.1(ℓ /s)

表2 死水域の長さ

実験結果	4.0
標準 $\kappa - \epsilon$ モデル	1.69
低Reynolds数 $\kappa - \epsilon$ モデル	2.35

○ 死水域の長さは水路幅(B)において無次元化を行なっている。

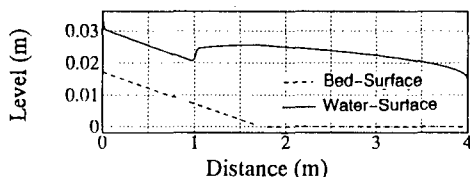


図1-1 1次元解析の概要図

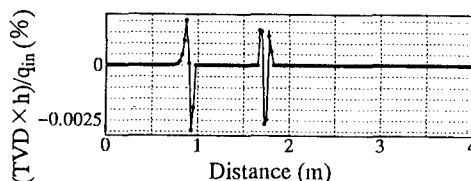


図1-2 流量比の変動

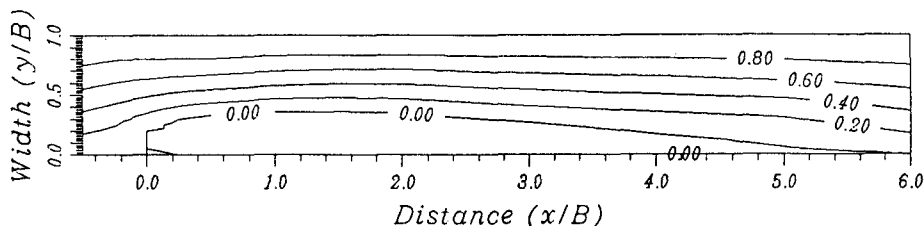


図2-1 流線図 (実験結果)

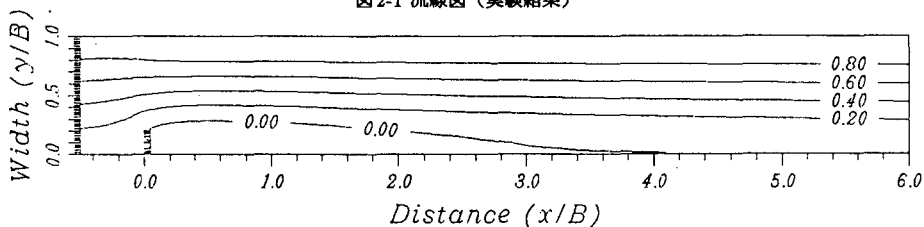


図2-2 流線図 (低Reynolds $\kappa - \epsilon$ モデル)

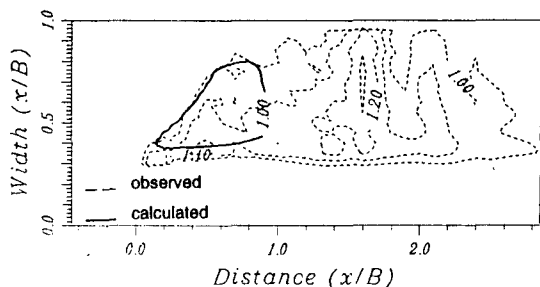


図3-1 Frouds 数分布 (標準 $\kappa - \epsilon$ モデル)

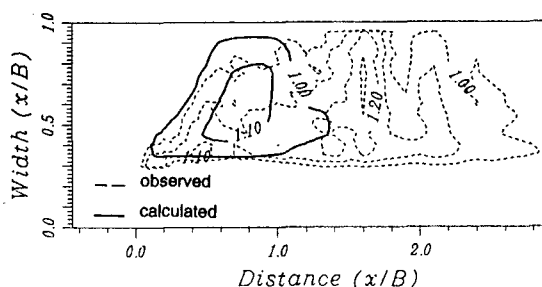


図3-2 Frouds 数分布 (低Reynolds $\kappa - \epsilon$ モデル)