

## 開水路急縮部の流れ構造とその数値計算

名古屋工業大学 学生会員○藤長 賢二

名古屋工業大学 学生会員 藤田 享良

名古屋工業大学 正会員 富永 晃宏

1. まえがき 開水路急縮部の流れは、支配断面が現れ、射流・常流が混在する複雑な流れとなる。このような流れにおいて最大流速や跳水発生位置等を予測することがしばしば要求される。本研究では、水深平均の平面流方程式を有限体積法とSIMPLE法を用いた数値計算を、水深が急変し射流が発生する流れ場に適用したものである。実験として、対称及び非対称な急縮部とその下流の水面形と流速分布を計測し、計算結果と比較検討した。

## 2. 水深平均2次元数値計算

2次流の横断方向運動量輸送効果を考慮した2次元非定常流の基礎式は次のようである。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(UU) + \frac{\partial}{\partial y}(VU) = -g \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(\tau_{xy})}{\partial y} - \frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial y} \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(UV) + \frac{\partial}{\partial y}(VV) = -g \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{by}}{\rho h} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(\tau_{yy})}{\partial y} - \frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hU}{\partial x} + \frac{\partial hV}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

ここに、 $U$ は流下方向水深平均流速、 $V$ は横断方向水深平均流速、 $z$ は河床高、 $h$ は水深、 $\rho$ は流体の密度である。 $\tau_{bx}$ 、 $\tau_{by}$ は $x$ 、 $y$ 方向の底面せん断応力であり、次のように与えられる。

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho} = \frac{bn^2}{\sqrt[3]{h}} U \sqrt{U^2 + V^2}, \quad \frac{\tau_{by}}{\rho} = \frac{bn^2}{\sqrt[3]{h}} V \sqrt{U^2 + V^2} \quad (n: \text{マンニングの粗度係数}) \quad (4)$$

$\tau_{xx}$ 、 $\tau_{xy}$ 、 $\tau_{yy}$ は水深平均されたレイノルズ応力であり、水深平均の渦動粘性係数 $\nu_t$ を用いて与えた。

$$\tau_{xx} = \rho \nu_t \left( \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial x} \right), \quad \tau_{xy} = \rho \nu_t \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right), \quad \tau_{yy} = \rho \nu_t \left( \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) \quad (5)$$

式(1)、(2)の右辺最後の項は2次流による運動量輸送効果を表現しているが、流線の曲がりによる2次流と主流速の鉛直分布を仮定して経験的に与えるものとする。常・射流が混在する流れの計算においては、TVDマコーマック法等がよく用いられるが<sup>1),2)</sup>、ここではSIMPLE法に基づく水位補正式を用いて水位計算を行う方法を急変流へ適用することを試みた。その際、圧力補正式に対して不足緩和を行うことにより発散を防ぐことができる。ただし、これにより流量一定の条件が満足されなくなるので、流入端において流量が一定となるように主流速を補正することとした。また、式はスタッガード格子で有限体積法によって離散化され、移流項にはハイブリッドスキームを用いた<sup>3)</sup>。

3. 実験方法 実験には幅30cm、長さ8mの勾配可変型水路を用い、対称および非対称の急縮部を設けた2ケースの実験を行った。ケース1は、幅7.6cm、長さ60cmの急縮部をその中心位置が上流から5mになるように両岸に設置した。ケース2は、水路左岸に幅14.9cm長さ60cmの急縮部を1と同じ流下方向位置に設置した。下流端は若干堰上げて水深を調節した。以上の2ケースについて流量0.005m<sup>3</sup>/s、勾配1/500で実験をおこなった。計測としては水面形をデジタルポイントゲージで計測した。水面形は衝撃波の発生により複雑な形状を示す場所では間隔を小さくとり、変化の少ない水面では間隔を大きくして計測した。

4. 数値計算と実験結果との比較 実験条件と同じ水理量と下流端水深を与え、急縮部は遮蔽ブロックとして設定し数値計算を行い、実験で得られた水面形と比較した。計算メッシュは手始めとして54×13~17という非常に粗いメッシュで計算を行った。図-1は、実験で得られた水面形の立体表面図であり、図-2は計算された水面形立体表面図である。また、横断方向に平均した水深の縦断分布の比較図を図-3に示す。

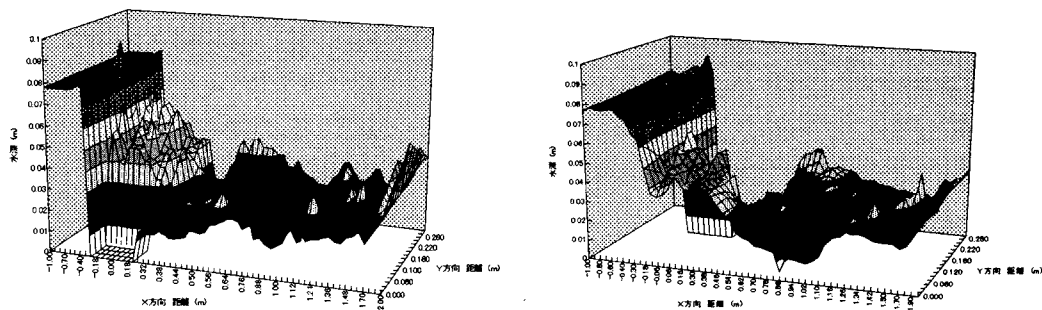


図-1 計測された水面形立体表面図

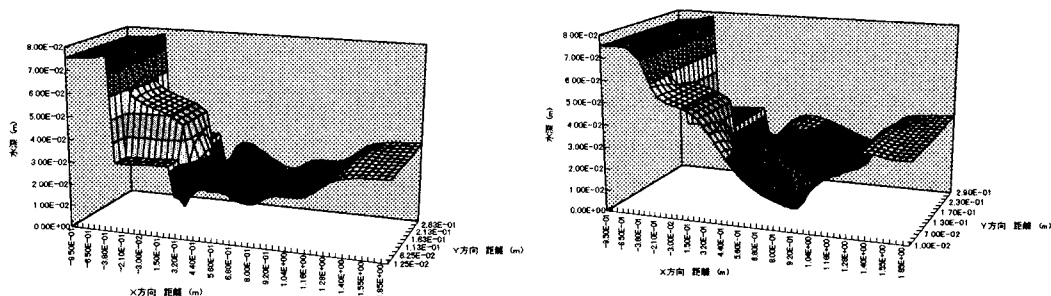


図-2 計算された水面形立体表面図

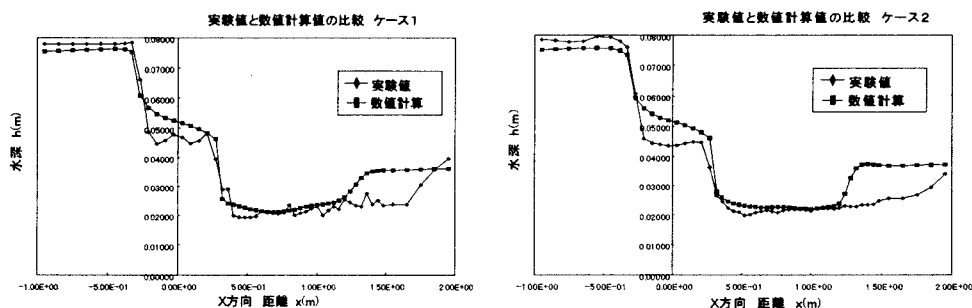


図-3 横断方向平均水深の実験値と計算値の比較

実験結果は急縮部から下流でばらつきが大きいですが、ケース 1、ケース 2 ともに数値計算値は実験値をかなり良く再現していると言える。急縮部下流の跳水の発生する位置が一致しないのは下流端の条件設定に起因すると考えられる。また、解は完全に定常ではなく繰り返し回数の増大によって移動する可能性もある。急縮部の水深は実験では急縮直後に急低下する特徴があるが計算でこれが再現できなかった。これについては、急縮部後の水流には流線の曲がりによる 2 次流の影響も関係していると思われる、今後検討していきたい。

**5. あとがき** この数値計算法により支配断面および跳水を含む開水路急変流れがかなり再現できることが示された。1 次の風上差分であるためかなり滑らかにはなるものの衝撃波についても再現されている。跳水発生位置を合わせるには、実験においても下流端の設定を正確に取ることが要求される。また、急縮部の不一致については、2 次流も含めさらに原因を究明する必要がある。

<参考文献> 1) 岡部・山下・天野：常・射流が混在する 2 次元浅水流の数値計算法，水工学論文集，第 39 巻，403-410，1995，2) 増田・田中・中谷：水制工周辺に射流域を生じる流れの数値計算に関する研究，水工学論文集，第 39 巻，551-556，1995，3) 香月正司，中山顕共著：熱流動の数値シミュレーション，森北出版。