

急勾配蛇行水路における高速流の数値解析

鳥取大学大学院 学生員 ○梶川 勇樹  
 鳥取大学 フェロー 道上 正規  
 鳥取大学工学部 正会員 檜谷 治

1.はじめに

射流状態下における河川蛇行部の流れは、水路屈曲部から発生する擾乱が下流方向へ一種の不連続面となって伝播し、次々に発生する衝撃波が互いに干渉しあつて、水面は縞模様を呈することが知られている。このような流れ場では、水衝部における鉛直流の卓越により 3 次元性の強い流れが発生し、さらに常射流が混在した非常に複雑な流れ場となることが予想される。従来、このような流れ場を対象とした数値解析が行われてはいるものの、屈曲部付近でその再現性の悪さが指摘されている。そこで、本研究ではこのような射流状態下における河川蛇行部の流れ場を精度良く解くことができる数値解析法の構築を目的とし、細田<sup>1)</sup>により行われた急勾配蛇行水路における高速流実験を対象とした数値解析を行う。

2.基礎方程式および計算方法

本計算では、レイノルズ応力の評価に渦動粘性係数の概念を取り入れた 0-方程式モデルを採用している。また、座標系には計算アルゴリズムが比較的容易に考えられるデカルト座標系を適用し、複雑境界形状でも滑らかに境界条件を課すことのできる FAVOR 法<sup>2)</sup>を基礎的に導入している。FAVOR 法では複雑境界上の流れにおいて、格子中に流体部分と境界部分とが混在すると考え、任意の格子で流体の占める体積率を  $V$ 、 $i$  方向に垂直な断面で占める面積率を  $A_{(i)}$  と定義する。図-1(a)に面積率の定義方向を示す。また、基礎方程式として(1)に連続式、(2)に運動方程式、(3)に 2 次元連続式を示す。ここに、 $u_i$  は  $i$  方向の速度成分、 $\epsilon_{(i)}$  は渦動粘性係数、 $p$  は圧力である。さらに、 $h$  は水深、上付横線は断面平均量を示しており、 $S$ 、 $L_x$  および  $L_y$  は、図-1(b)に示すように水面における格子を平面的にみた場合、その格子中の流体の占める面積率を  $S$ 、各軸に対して垂直なメッシュ幅の流体の占める線分率を  $L_x$  および  $L_y$  としている。また、鉛直方向流速  $w$  に関しては、連続式(1)を水路床より積分することにより求め、水深  $h$  に関しては 2 次元連続式(3)より求める。これら(2)、(3)式を常射流が混在した流れでも適用可能である Mac-Cormack 法により差分化し流れ場を計算するわけであるが、圧力  $p$  については道上<sup>3)</sup>と同様、圧力の鉛直方向分布を考慮に入れ、静水圧  $p_0$  とこれからの偏差  $p$  に分割し計算を行う方法を適用する。

3.実験条件および計算条件

実験の概要として、表-1 に細田<sup>1)</sup>によって行われた実験の水理諸量を、図-2 に実験水路の概略図を示す。実験では、図のように水路中央線を 0 とし、それと垂直に水路左岸方向に  $n$  軸を取っている。また、図-3 に解析メッシュを示す。離散間隔は  $\Delta x = \Delta y = 1.0\text{cm}$ 、 $\Delta z = 0.2\text{cm}$  とし、計算時間間隔は CFL 条件を満たすように  $\Delta t = 0.002\text{s}$  としている。境界条件として下流端で実験での平均水深を与え、上流端で流量を与えた。

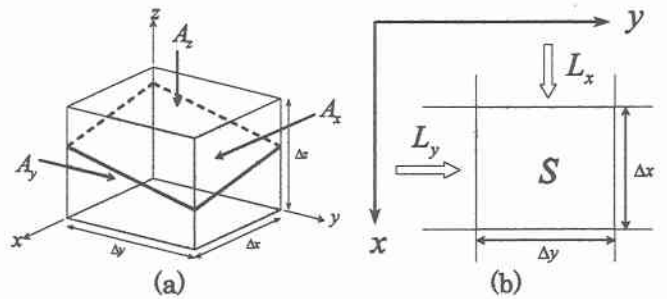


図-1 面積率および線分率の定義方向

【連続式】 …(1)

$$\frac{\partial}{\partial x_i} A_{(i)} u_i = 0$$

【運動方程式】 …(2)

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V} \left\{ A_{(j)} u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right\} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{V} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_j} \left( A_{(j)} \epsilon_{(j)} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right\}$$

【2次元連続式】 …(3)

$$\frac{\partial}{\partial t} (Sh) + \frac{\partial}{\partial x} (L_x \bar{u}h) + \frac{\partial}{\partial y} (L_y \bar{v}h) = 0$$

表-1 実験の水理諸量(細田)

流量 (cm <sup>3</sup> /s)	平均水深 (cm)	蛇行波長 (cm)	最小曲率半径 (cm)	水路幅 (cm)	水路勾配	フルード数
593.4	1.01	24.0	43.77	8	1/25	2.33

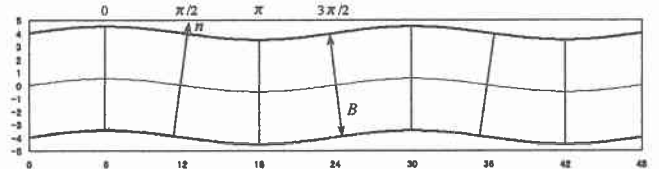


図-2 実験水路概略図

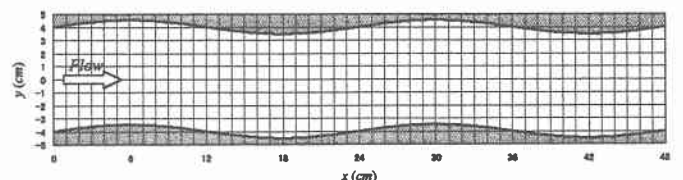
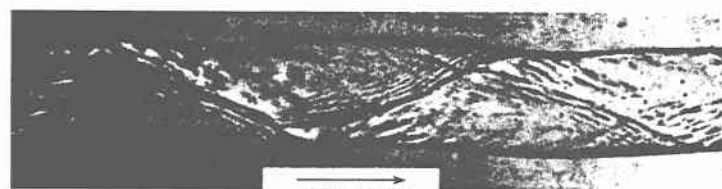
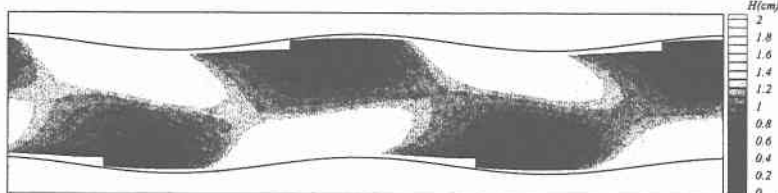


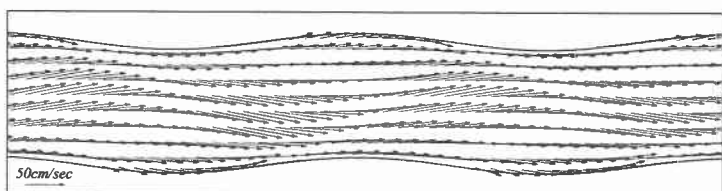
図-3 解析メッシュ



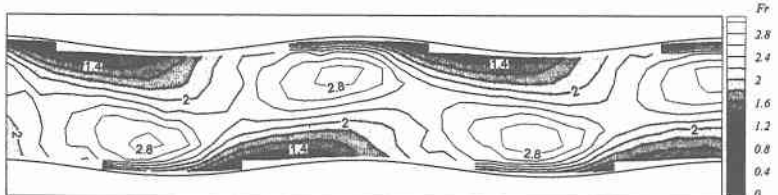
(a) 流況写真(実験値)



(b) 水深コンター図(計算値)

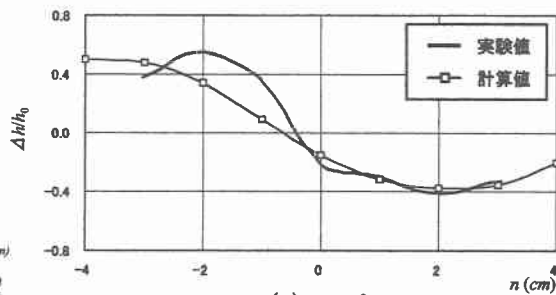


(c) 流速ベクトル図(計算値)

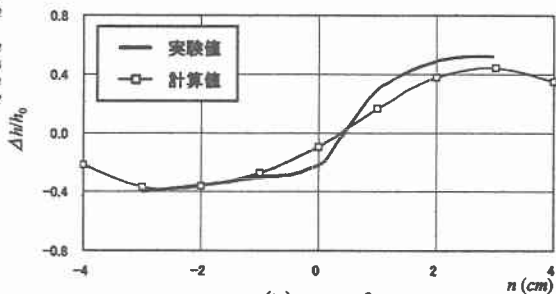


(d) フルード数コンター図(計算値)

図-4 実験値と計算値との比較



(a)  $\theta=0^\circ$



(b)  $\theta=\pi^\circ$

図-5 水深横断分布の比較

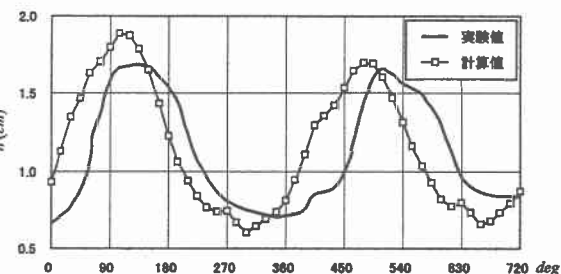


図-6 水深縦断分布の比較(左岸から 5mm)

#### 4.解析結果および考察

図-4 は実験との流況比較として(a)流況写真(実験値)、(b)水深コンター図(計算値)、(c) 平均流速ベクトル図(計算値)、(d) フルード数コンター図(計算値)を示している。まず、図-4(a), (b)を比較しても分かるように、計算値は実験同様、蛇行部内岸で水深が大きく表れており、それらが干渉しあって下流方向に明確な縞模様を呈している。また、図-4(c)の流速ベクトル図に着目すると、流向は水路形状に沿わず、それと逆位相となっており、計算値は実験値を良好に再現しているものと考えられる。特に、側壁付近での流向は基礎式に FAVOR 法を適用することによって滑らかに表現されていることが分かる。さらに、図-4(d)のフルード数コンター図から、水路全体にわたって射流状態にあり、その値も 2.0 前後とほぼ実験値と同様であることが分かる。

次に、水面形について実験値との比較・考察を述べるが、本計算モデルではデカルト座標系を採用しているため、全測点について計算点を一致できない。そのため、計算値については実験測定点近傍の値の平均値として求めている。まず、図-5 は(a)  $\theta=0$ 、(b)  $\theta=\pi$ における実験値と計算値との横断方向水深の比較図を示している。図中の横軸  $n$  は、図-2 に示す水路横断方向の座標軸を表しており、縦軸は平均水深  $h_0$  からの差  $\Delta h$  を  $h_0$  により無次元化したものである。これらの図からも分かるように、計算値は実験値同様に蛇行部内岸側での水深の増加傾向を良く再現できており、さらに平均水深からの差についても良好に実験値を再現できている。図-6 に左岸から 5mm の位置における縦断方向の水深比較図を示す。この図より、計算値は実験値に比べ若干位相がずれてはいるものの、比較的良好に再現できていることが分かる。

#### 4.おわりに

本 3 次元流計算モデルにより、急勾配蛇行水路における流況を常・射流が混在した流れ場を含めある程度の精度で再現できることが確認された。今後、さらに改良を進め排砂バイパス内の流況の再現、あるいは河床変動計算への適用を考えている。

【参考文献】(1)細田尚：連続蛇行水路の高速流の基本的特性，水工学論文集第 43 巻，pp.311-316，1999。(2) C.W. Hirt：Volume-fraction techniques：Powerful tools for wind engineering，Journal of Wind Engineering No.52，pp.333-344，1992。(3) 道上ら：射流部を含む段落ち流れの数値解析，第 55 回年講，II-334，2000。