

準3次元モデルを用いた河川合流点流れの数値解析

九州工業大学大学院 学生会員 ○池田 寛 九州工業大学大学院 正会員 重枝未玲
九州工業大学大学院 フェロー会員 秋山壽一郎 九州工業大学大学院 正会員 坂本 洋

1. はじめに

河川合流点は、洪水時に河床の洗堀や土砂の堆積、それに伴う水位の上昇などが生じるため、氾濫の危険性が高く、防災・減災のいずれの観点からも重要な地点である。そのため、これらを予測するモデルが必要となる。河川合流点では、3次元性の強い流れが生じる場合があり、その影響によって生じる底面付近の流速は河床変動と密接に関係しているため、3次元的な流れを再現できなければならない。本研究は、以上のような背景を踏まえ、流れと河床変動の準3次元モデルの開発を最終的な目的とし、ここでは、2次流の影響を考慮した基礎方程式を有限体積法に基づく近似リーマン解法を用いて離散化した流れの準3次元モデルを構築し、河川合流点の流れの予測精度を検証した。

2. 実験の概要

実験装置は、図-1に示す本支川をY型に合流させた水路である。合流前の本川と支川の水路幅比 $B_2/B_1=1$ 、合流角度 $\theta=15^\circ$ 、流量比 $Q_2/Q_1=1$ 、水路床勾配 $I=1/800$ とし、合流後の水路幅をCase1では0.60m、Case2では0.8m、Case3では1.0mに設定した。

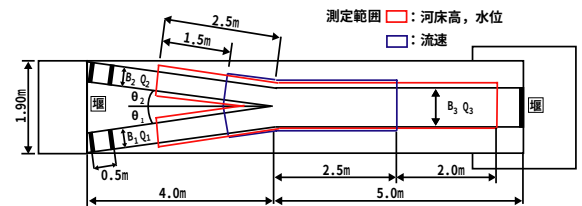


図-1 実験装置

測定項目は、水位と水深平均流速および底面での流線であり、定常状態であることを確認した後に測定を開始した。水位はポイントゲージで、砂の移動方向の測定については、直径約3mmのプラスチック球を流し、その動きをビデオカメラで撮影しPTV解析を行い求めた。なお、プラスチック球は流れに追従するわけではないため、底面流速については流向についてのみ議論する。水深平均流速については、電磁流速計を用いて一点法で測定した。測定点は、縦断横断方向のいずれも10cmずつ測定した。

3. モデルの概要

主流および主流に垂直な方向を s, n 軸とし、それらの流速を u_s, u_n とする。 x, y 軸方向の流速 u, v を分解することで、式(1)が得られる。ここに、 $\cos\theta=u/(u^2+v^2)^{0.5}$ 、 $\sin\theta=v/(u^2+v^2)^{0.5}$ 、 U_s =水深平均流速、 $\psi(\zeta)$ =主流方向流速分布、 $f(\zeta)$ =2次流の流速分布、 $\zeta=(z-z_b)/h$ 、 z =基準面からの高さ、 z_b =水路床高である。また、式(2)中の A_n は2次流強度であり、式(3)で表される。ここに、 h =水深、 R_s =流線の曲率半径、 $U, V=x, y$ 軸方向の水深平均流速、 $\theta'=\tan^{-1}(V/U)$ である。主流方向流速分布 $\psi(\zeta)$ 、2次流の流速分布 $f(\zeta)$ には、 ζ の基準面を底面に変換したEngelundの流速分布を用いた。

基礎方程式は、上記の流速分布を用いて、連続の式と運動方程式を、運動学的境界条件とライプニッツルールを適用して水深積分した浅水方程式であり、式(4)で表される。ここに、 S_{fx}, S_{fy} は摩擦勾配であり、摩擦勾配にはManningの式を用いている。式(4)を任意の検査体積 Ω (本研究の場合は、検査面積となる)で積分し、ガウスの発散定理を用いると、式(5)に示す積分形の浅水方程式が得られる。

ここに、 $\partial\Omega$ =検査体積の境界線、 $L=\partial\Omega$ の長さである。 $F_n \cdot n$ =境界線 $\partial\Omega$ の法線方向を通過する流束ベクトルであり、式(6)で表される。ここに、 $n=(n_x, n_y)$ =検査体積の境界線 $\partial\Omega$ の外向き単位法線ベクトルである。

基礎方程式の離散化は有限体積法に基づき行い、時間積分にはEulerの陽解法を、数値流束にはHLLの数値流束を用いた。また、計算格子には、任意の河道形状が再現可能な非構造格子を用い、時間の刻み幅には、クーラン型の安定条件と消滅項を考慮した安定条件を用いた。解析領域は計5800~7220個の三角セルで分割した。水路の粗度係数は0.01とし、上下流端の境界条件には、それぞれ流量と水位を与えた。

$$\begin{aligned}
 u &= u_s \cos \theta - u_n \sin \theta, \quad v = u_s \sin \theta + u_n \cos \theta & (1) \\
 u_s &= U_s(s, n) \psi(\zeta), \quad u_n = A_n(s, n) f(\zeta) & (2) \\
 A_n &= \frac{U_s h}{R_s}, \quad \frac{1}{R_s} = -\frac{1}{U_s} \left\{ U \frac{\partial \theta'}{\partial x} + V \frac{\partial \theta'}{\partial y} \right\} & (3) \\
 \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + M + S_1 + S_2 &= 0 & (4) \\
 U &= (h \quad Uh \quad Vh)^T, \quad E = \left(Uh \quad U^2 h + \frac{1}{2} gh^2 \quad UVh \right)^T, \\
 F &= \left(Vh \quad UVh \quad V^2 h + \frac{1}{2} gh^2 \right)^T, \\
 M &= \left(0 \quad \frac{\partial M_1}{\partial x} + \frac{\partial M_2}{\partial y} \quad \frac{\partial M_2}{\partial x} + \frac{\partial M_3}{\partial y} \right)^T, \\
 S_1 &= \left(0 \quad gh \frac{\partial z_b}{\partial x} \quad gh \frac{\partial z_b}{\partial y} \right)^T, \quad S_2 = \left(0 \quad gh S_{fx} \quad gh S_{fy} \right)^T \\
 \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} U dV + \oint_{\partial\Omega} (F_n \cdot n) dL + \int_{\Omega} (M + S_1 + S_2) dV &= 0 & (5) \\
 F_n \cdot n &= E n_x + F n_y & (6)
 \end{aligned}$$

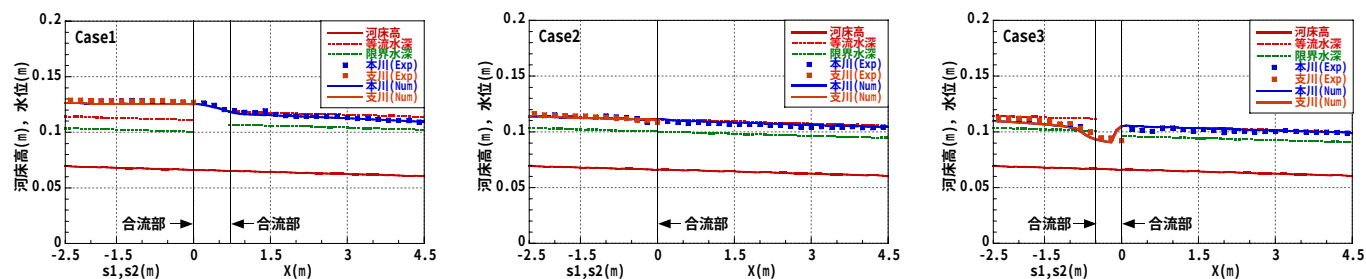


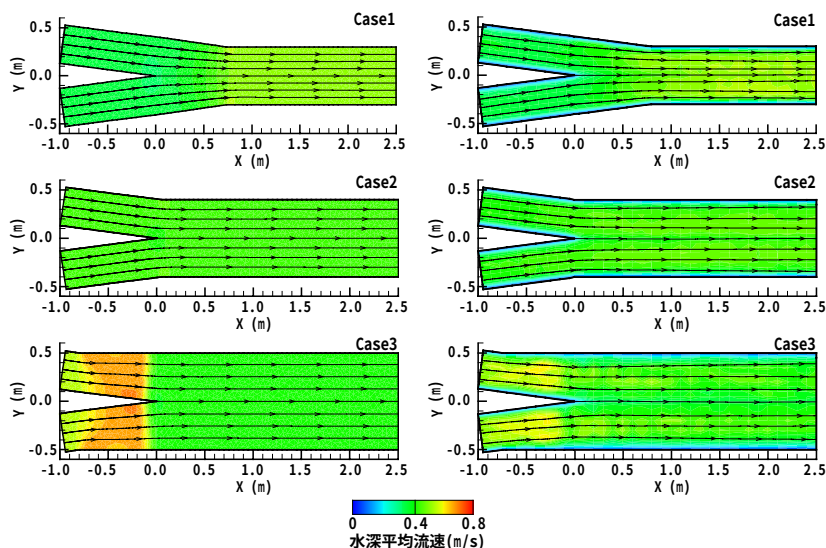
図-2 水路中心軸水位縦断面図

4. 河川合流点への適用

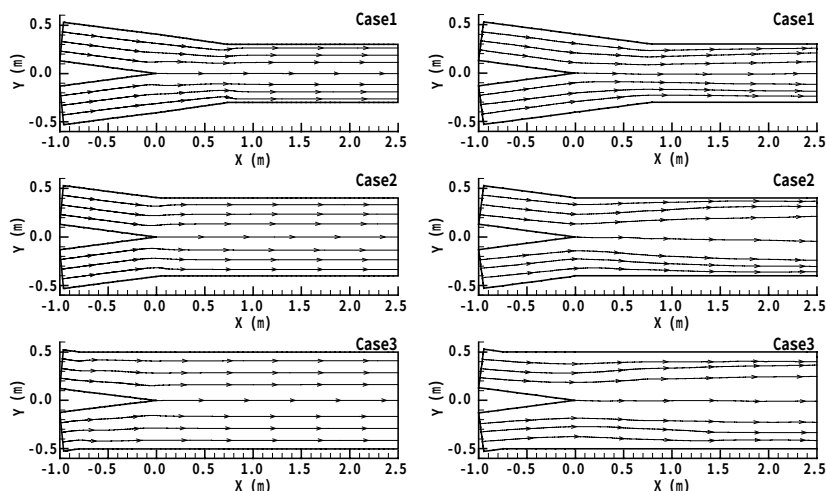
本モデルを河川合流点流れの実験結果に適用し、本モデルの予測精度を検証した。

図-2は、本川と支川の中心軸上の水面形について、解析結果と実験値との比較を行ったものである。これより、本モデルは、(1) Case1の合流点上流で水位が上昇すること、(2) Case3の合流点周辺で若干の差があるものの、すべてのCaseで水面形状を概ね再現していることなどがわかる。

図-3は、水深平均・底面流線について、解析結果と実験値を示したものである。なお、水深平均流線には流速コンターを併せて示している。流線の実験結果から、(1) Case1では水深平均流線と底面流線に大きな差は無く、合流点下流で水深平均流線は水路に沿った流れとなり、底面流線は若干側壁方向へ曲げられていること、(2) Case2, Case3では、合流点下流で水深平均流線は水路に沿った流れとなるが、底面流線は合流点周辺で側壁方向へ大きく曲げられていることなどがわかる。流速コンターの実験結果から、(3) Case1では合流点下流で流れが加速されること、(4) Case3では合流点上流で流れが加速され、合流点周辺で減速していることなどがわかる。これらと解析結果を比較すると、本モデルは(1)と(3)



(a)水深平均流線・流速コンター



(b)底面流線

図-3 流線と流速コンター (左:解析結果, 右:実験値)

については概ね再現しているが、(2)、(4)については (a) Case2, Case3の底面流線の曲がりの大きさや(b) Case3の合流点上流での水深平均流速の大きさを定量的に再現できていない。(a)については、合流点周辺で生じた2次流の発達・減衰、側壁付近の2次流の減衰を考慮していないため、(b)については、実験では波状跳水が生じており、本モデルでは鉛直方向の流速を再現できないためと考えられる。以上より、本モデルは、合流点での流れを概ね再現できるが、2次流の発達・減衰、側壁付近の2次流の減衰等の取り扱いについて改善の必要があることがわかった。

5. おわりに

本研究は、有限体積法に基づく近似リーマン解法を用いた準3次元モデルを構築し、河川合流点の流れの予測精度を検証した。その結果、同モデルが河川合流点の流れを概ね良好な精度で再現できることがわかった。今後は2次流の発達・減衰、側壁での2次流の減衰の取り扱いを組み込み、同モデルを発展させたいと考えている。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金若手研究B(課題番号：21760388、研究代表者：重枝末玲)の助成を受け実施したものである。ここに記して感謝の意を表します。