同規模河川合流点流れの準3次元解析

九州工業大学工学部　学生会員　○新谷　恭平　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，土砂の堆積，河床の洗掘，流下能力の低下，流向の偏りに伴う水衝部の変動などの治水面上の問題が生じるため，防災・減災の観点から重要な地点である．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，そこでの流れや河床変動の予測を行うためには，3次元的な流れを再現する必要がある．本研究は，以上のような背景を踏まえ，有限体積法に基づく近似リーマン解法に基づき，非静圧力分布と鉛直方向流速を考慮した新たな準3次元モデルを構築するとともに，同規模河川の合流点流れへの適用性について検討したものである．

２．数値モデルの概要

基礎方程式は，水深平均の連続の式と運動方程式，半水深高さ$\bar{z}$を用いた関数$\Psi(=2(z-\bar{z})/h)$を重み関数として水深積分することで導かれるモーメント方程式，底面・水面での境界条件である．これらの方程式は，**図-1**に示すような x，y軸方向の流速u，vの流速分布を式(1)のように線形近似，z軸方向の流速wの分布を式(2)のように放物近似，圧力pの鉛直分布を式(3)のように放物線近似し水深積分することで導かれる[1)]．

$$u = U + u'(2\eta - 1),\quad v = V + v'(2\eta - 1) \quad (1) \qquad w = w_b(1-\eta) + w_2 4\eta(1-\eta) + w_s\eta \quad (2)$$

$$p = \rho g(h + h_b)(1-\eta) + \rho g h_2 4\eta(1-\eta) \quad (3)$$

ここに，U，V = x，y軸方向の水深平均流速，u'，v'=流速の偏差成分，w_b=底面での流速w，w_s＝水面での流速w，w_2=半水深での流速w，p=圧力，ρ＝水の密度，h=水深，h_b=底面での圧力水頭の偏差成分，h_2=半水深での圧力水頭の偏差成分，g=重力加速度，$\eta=(z-z_b)/h$，z=基準面からの高さ(鉛直上向きを正)，z_b=水路床高である．

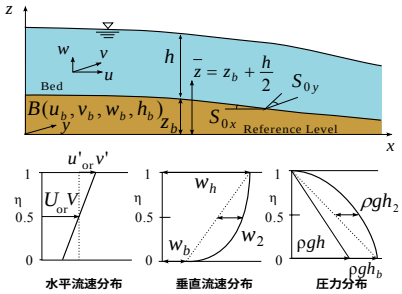


図-1 定義図

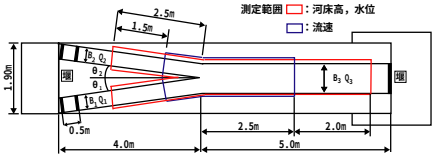


図-2　実験装置の概要

上記の基礎方程式は①水深平均の諸量に関する方程式と②鉛直方向および非静水圧項に関する方程式に分けられる．これらの方程式の離散化については，空間積分に有限体積法(FVM)を，時間積分にEulerの陽解法を用いて行った．なお，①には近似リーマン解法の一つであるHLL(Harten, Lax and van Leer)の数値流束[2)]を，②には中心差分に対応する数値流束を用いた．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た．

３．実験の概要

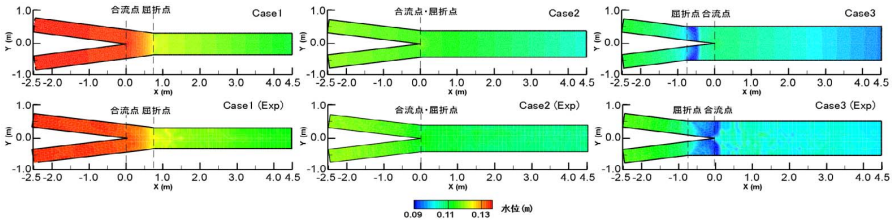
実験装置は，**図-2**に示す本支川をY型に合流させた水路である．水路平面形状は，合流角度θ=15°，合流点上流の本支川の水路幅B_1=B_2=0.4m，合流後の水路幅をCase1でB_3=0.60m，Case2でB_3=0.8m，Case3でB_3=1.0mとし，合流前の本川と支川の水路幅比B_2/B_1=1，合流点下流の水路幅B_3を$(B_2+B_1)/B_3$=0.80~1.33の範囲に設定した．水路床勾配I=1/800とした．本支川の上流端では流量比Q_2/Q_1=1となるようにQ_1=Q_2=8(l/s)の流量を供給し，本川下流端では合流点下流で堰上げ背水となるように堰高を設定した．なお，流入フルード数Frは，Case1で0.42，Case2で0.58，Case3で0.69であった．

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．水位についてはポイントゲージで，底面の流線については直径約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解析を行うことで測定した．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．測定は**図-2**に示す範囲で横断方向に5cm，縦断方向に10cm間隔で行い，各Caseの測定点数はCase1で720，Case2で960，Case3で1200であった．解析の概要は各Case5800～7220個の三角セルで解析領域を分割した．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．

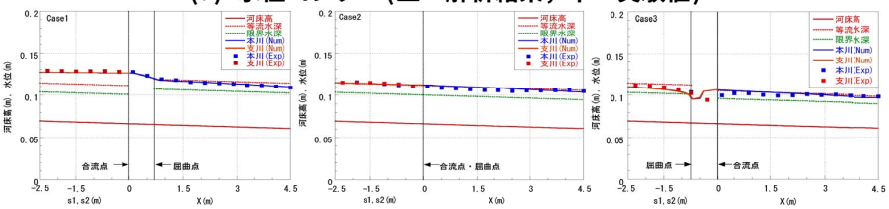
４．結果と考察

図-3は水位コンターと本川・支川の水路中心軸での水面形について，解析結果と実験値との比較を行ったものである．なお，**図-3**中には下流の水路幅によって変化する等流水深と限界水深を示している．水位コンターの実

験結果に着目すると，(1) Case1では合流点上流で水位が上昇していること，(2) Case2では合流点上流，合流点周辺，合流点下流で水位に大きな変化がないこと，(3) Case3では合流点周辺で水位が低下すること，などが確認できる．また，水面形に着目すると，(4) Case1では合流点上流の等流水深は下流に比べ小さく，合流点上下流の水面形は堰上げ背水で接続されるため，他のCaseに比べ水位が上昇していること，(5) Case2では，合流点上下流の水面形はほぼ等流状態で接続されるため，Case1に比べ合流点での堰上げの影響が小さいこと，(6) Case3では合流点上流の等流水深は下流に比べ大きく，合流点上下流の水路平面形状によっては水位低下が生じること，などが確認できる．これらと解析結果とを比較すると，本モデルは上記の(1)~(6)を再現しており，Case3の合流点周辺で水位に若干の誤差があることなど差があるものの，すべてのCaseで水面形状を概ね再現していることがわかる．

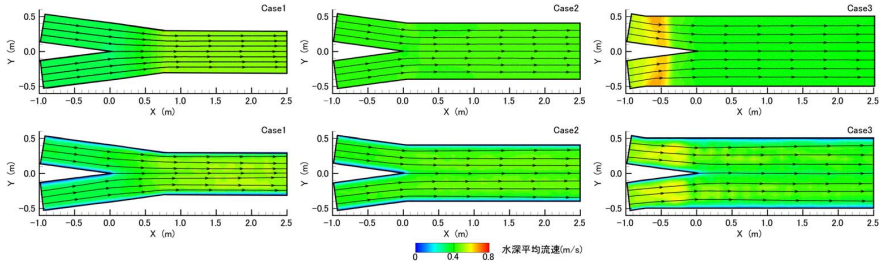


(a) 水位コンター(上：解析結果，下：実験値)

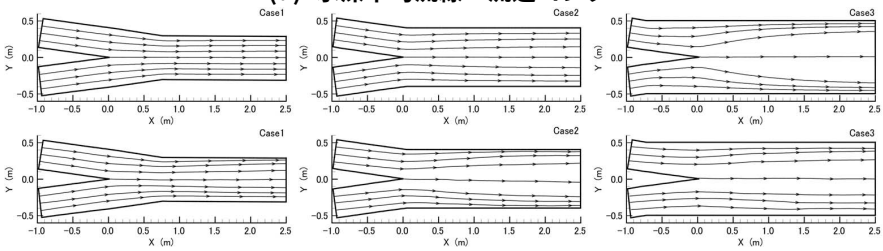


(b) 水面形

図-3 水位コンターと本川・支川の水路中心軸の水面形の比較



(a) 水深平均流線・流速コンター



(b) 底面流線

図-4 水深平均流線と底面流線の比較(上：解析結果，下：実験値)

図-4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)~(4)のいずれも概ね再現しているが，Case3の(2)，(4)については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．この理由としては，この区間では実験では波状跳水が生じており，本モデルで近似した流速分布では現象を再現できないためと考えられる．

５．おわりに

本研究では，有限体積法に基づく近似リーマン解法に基づき，非静圧力分布と鉛直方向の流速を考慮した新たな準3次元モデルを構築し，同規模河川合流点での流れの実験結果に基づき，その予測精度の検証を行った．その結果，波状跳水が生じる場合に若干の誤差が生じるが，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，流れと河床変動の準3次元モデルを開発したいと考えている．

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：重枝未玲)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．

参考文献：1) Ghamary, H.K. and Steffler, P.M: Two dimensional verticall averaged and moment equations for rapidly varied flows, *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol.40, No.5, pp.579-587, 2002.　2) Hatern, A., Lax, P.D. and van Leer, B.: On upstream differencing and Godunov-type schemes for hyperbolic conservation laws, *SIAM Review*, Vol.25, No.1, pp.35-61, 1983.