合流を有する河道における流れと河床変動の数値解析

九州工業大学工学部　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　学生会員　森山拓士

１．はじめに

河川合流部は，計画規模の異なる河川が合流するため，防災・減災において重要な地点である．本研究は，分流・合流部を有する河道での河床変動が予測可能な数値モデルの構築を目的とし，合流部を有する河道での流量比が流れと河床変動に及ぼす影響を実験的に検討するとともに，2次流が河床変動に及ぼす影響を著者らの平面2次元河床変動モデル[1)]に組み込み，同モデルを実験結果に適用し，その適用性を検討したものである．

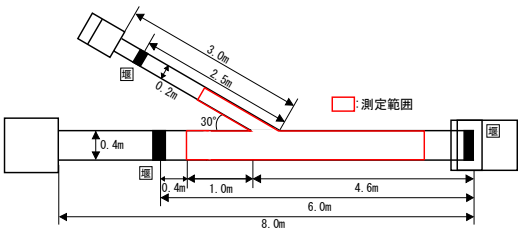


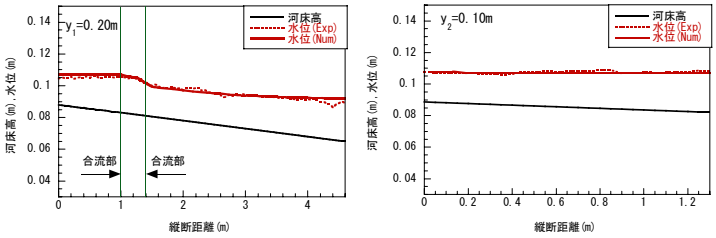
図-1　実験装置

２．実験の概要

実験は固定床(CaseA)と移動床(CaseB)で行った．実験装置は，図-1に示すような水路である．本川と支川の水路床勾配はいずれも1/200に設定している．CaseBでは粒径d=0.00075m，水中比重s=1.65の一様流砂を用い，0.06mの厚さで敷き詰めた．測定については砂面測定器を用い，測定点は，横断・縦断方向のいずれも0.05m間隔で測定を行った．ただし，支川の合流部付近では詳細にデータを得るために横断方向の間隔を0.03mとした．実験条件については本実験条件では流れが常流であるので，表-1のように，合流後の流量を一致させ，本川と支川の流量比を変化させた．

表-1　実験条件

Case		合流後流量 (l/s)	流量比 (本川：支川)
A (固定床) B (移動床)	1	3.5	2:1
	2	3.5	3:1
	3	4	2:1
	4	4	3:1
	5	6	3:1



a)　本川　　b)　支川

図-2　水位の縦断変化比較(CaseA-2)

３．解析の概要

本平面2次元河床変動モデルは，著者らがフラッシング排砂の数値解析に用いたモデル[2)]に，抵抗則が考慮できるKrishnappan[3)]の摩擦勾配，有効掃流力[4)]，2次流が河床変動に及ぼす影響を組み込んだモデルである．流れの基礎方程式は2次元浅水流方程式，河床変動の基礎方程式は流砂の連続式を用いた[1)]．全流砂量式q_Bには芦田・道上[5)]の式，有効掃流力には岸・黒木[4)]の小規模河床形態に応じた有効掃流力を用い，有効掃流力，限界掃流力については斜面の影響を考慮した[6)]．流れの局所的な湾曲により生じる2次流が河床変動に及ぼす影響は，土砂の流送方向を底面流速u_{bs}, u_{bn}で求めることで考慮した．抵抗則については，岸・黒木[4)]の河床形態の領域区分に基づき，流れと河床の状況に応じて自動的に摩擦勾配と有効掃流力が選択される．

基礎方程式の離散化は有限体積法(FVM)に基づき行い，時間積分にはEulerの陽解法を，空間積分には流束差分離法(FDS)を用いた．また，曲率半径の計算には中心差分を用いた．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．なお，解析手法の詳細については参考文献[2)]に示す通りである．

初期条件には，極めて小さな水深(1mm)と流速0を与えた．また，CaseBの河床は，0.06mの高さに粒径程度の微小擾乱を与えた河床高とした．上下流端の境界条件には，実験条件と同様な流量・水位・河床高を与えた．なお，実験では河床波が形成される場合もあったので，上流端の流入流量には±1%の擾乱を与えた．

４．結果と考察

(1) 固定床実験に基づく検証

抵抗則にFlat bedのものを用い，本モデルの流れの再現性について検証した．図-2は，CaseA-2の本川と支川の中心軸上の水位について，実験値と解析結果との比較を行ったものである．これより，本川と支川のいずれも概ね水位の縦断変化を再現していることなどがわかる．

(2) 移動床実験に基づく検証

図-3は，河床高について解析結果と実験値との比較の一例を示したものである．解析結果と実験値とを比較すると，解析結果は，合流部上下流の砂州の形成や砂州間に生じる主流路，主流路の変化など定性的には再現している．しかし，主流路の右岸への到達位置が実験結果に比べより上流側へあること，CaseB-4の合流部上流での河床波を再現できていないなど，定量的には再現性に若干の問題がある．

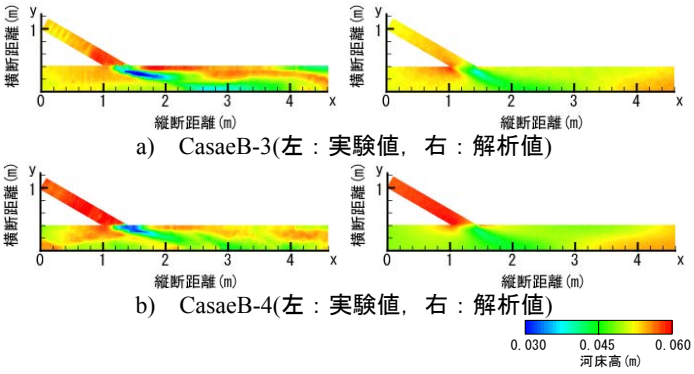


図-3 河床コンターの比較(CaseB)

図-4は，本川と支川の中心軸上の水位と河床高の縦断変化の一例を示したものである．これより，解析結果は，支川については概ね水位・河床高ともに，その縦断変化を再現していることが確認できる．本川については，水位は概ね再現しているが，河床高については，平均的な河床は再現されているものの，洗掘位置やその最大洗掘深が再現されていないことがわかる．以下では，この理由について考察する．

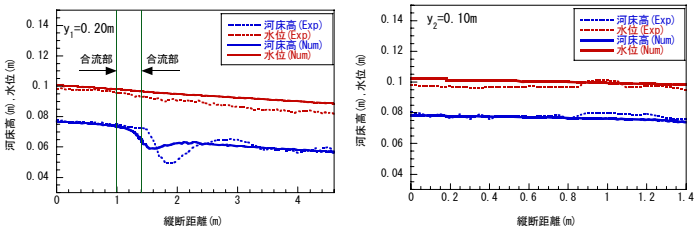


図-4 水位と河床高の縦断変化の比較(CaseB-3)

図-5は，2次流を考慮していない場合のCaseB-3の河床高の解析結果を示したものである．**図-5**と**図-3**を比較すると，2次流を考慮していない解析結果に比べ，2次流を考慮した方が，合流部下流の砂州の形成，砂州間の主流路形状が下流側に移動していることなど，予測精度が改善されていることがわかる．このように，2次流は適切に考慮されていると考えられる．

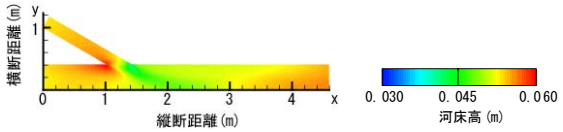


図-5 河床コンター(CaseB-3)

図-6は，CaseB-3，4について主流速コンター図の解析結果を示したものである．**図-6**と**図-3**の解析結果を比較すると，当然ながら主流速が生じている箇所で主流路が形成されており，主流速が生じる位置により洗掘位置やその最大洗掘深が決定することがわかる．つまり，主流速分布を再現できないため，河床の洗掘位置やその最大洗掘深が再現できないと考えられる．本モデルは，1次精度のスキームを空間積分に用いているので，数値拡散に大きな可能性がある．また，乱流モデルを導入していないので，支川からの流れが側壁へ衝突する位置等を正確には再現することはできない．そのため，最大流速の発生位置や流速差を予測しきれず，それが河床高に反映されたと考えられる．

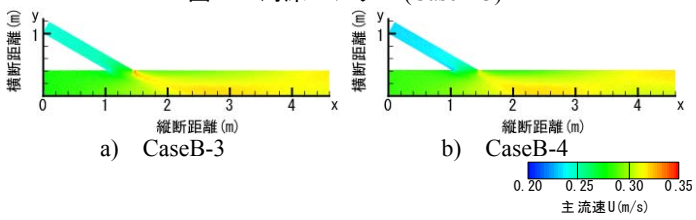


図-6 主流速コンター(CaseB)

5．おわりに

本研究では，合流部を有する河道での流量比が流れと河床変動に及ぼす影響を検討するとともに，2次流を考慮した平面2次元河床変動モデルを合流部を有する河道での河床変動に関する実験に適用し，その適用性について検討した．その結果，(1)本平面2次元河床変動モデルは水位や平均的な河床高を再現可能であること，(2)本川で生じる河床波が支川の河床変動に影響を及ぼすことが確認された．しかし，洗掘位置などについては改善の余地が認められ，特に空間積分の高次精度化や乱流モデルの導入が必要であると考えられる．今後は，本川で生じる河床波が支川の河床変動に及ぼす影響をより詳しく調べるとともに，モデルの改良について検討したいと考えている．

参考文献

1) 重枝未玲，秋山壽一郎，才木康裕，西藤安隆：水工学論文集，第52巻，pp.619-624，2008．，2) 重枝未玲，秋山壽一郎，高須賀真哉：水工学論文集，第50巻，pp.931-936，2006．，3) Krishnappan, B.：ASCE, Vol.111, No.2, pp. 257-266, 1985.，4) 岸力，黒木幹男：北海道大学工学部研究報告，No.67，pp.1-23，1973．，5) 芦田和男，道上正規：土木学会論文報告集，No.206，pp.59-69，1972．，6) 福岡捷二：森北出版社，2005.