

河川合流部周辺での流れと河床変動の 平面2次元解析

NUMERICAL SIMULATIONS OF FLOW AND BED TOPOGRAPHY IN A
VICINITY OF A RIVER CONFLUENCE BY TWO-DIMENSIONAL MODEL

重枝未玲¹・秋山壽一郎²・森山拓士³

Mirei SHIGE-EDA, Juichiro AKIYAMA and Takuji MORIYAMA

¹正会員 博士(工) 九州工業大学大学院准教授 工学研究院建設社会工学研究系
(〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

²フェロー会員 Ph.D. 九州工業大学大学院教授 工学研究院建設社会工学研究系 (同上)

³学生会員 九州工業大学大学院 工学府建設社会工学専攻 (同上)

The flow and bed topography in a vicinity of a river confluence were simulated by two-dimensional model. The model was based on flux-difference splitting scheme and unstructured finite-volume method combined with treatment of the effects of secondary flow on the bed variation. In the experiments, the effect of the ratio of the flow discharge of main stream and tributary on the bed variation was investigated. Through the experiments, it is found that the sand wave on the main stream is affected the bed variation of the tributary. The experimental data and numerical results were also compared. It shows that the model can reproduce the flows and bed variation in a vicinity of a river confluence reasonably.

Key Words : river confluence, main stream, tributary, bed topography, experiments, numerical model, secondary flow

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・減災のいずれの観点からも重要な地点である。幾つかの災害事例の報告もあり、例えば、2002年9月の韓国では洛東江と支川の新盤川との合流部¹⁾、北海道では厚別川と支川の比宇川との合流部での氾濫被害報告²⁾がある。これらの事例はいずれも、合流部付近での土砂の堆積あるいは川幅や合流角度などの河道特性による急激な水位の上昇によって引き起こされたことが報告されている³⁾。

合流部で生じる流れについては、実験や数値解析に基づく流れのメカニズムの解明^{4),5),6)}、死水域の予測法⁷⁾、数値解析法^{3),8),9)}に関する研究などが存在する。さらに、近年では、合流部の流れだけではなく、河床変動に関する実験あるいは数値解析に基づく研究^{10),11),12)}もなされており、さらに、本川で生じる砂州により支川での流れと河床変動がどのような影響を受けるかを検討した研究も存在する¹³⁾。

このように、合流部での治水面の検討を行うためには、

本川・支川の河床変動に加え、河床変動が水位に対してどのようなインパクトを与えるかを適切に取り扱うことのできるツールが必要となる。このようなツールとして、横山ら¹⁰⁾は分合流部の複雑な流れと河床変動を予測可能な数値モデルの構築を行っている。また、出口ら¹¹⁾は勾配の異なる急勾配河川での河川合流部に関する河床変動とそれに伴う水位上昇について、実験および数値解析により検討している。さらに、著者ら¹²⁾は、分流および合流部を有する河道を対象に河床変動モデルの開発に取り組んでいる。しかしながら、いずれのモデルについても、流れの剥離や2次流の発生など、合流部での非常に複雑な流れとそれに伴う河床変動を十分な精度で予測することはできない。

本研究は、以上のような背景を踏まえ、分流および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最終的な目的としている。ここでは、合流部を有する河道での河床変動に関する実験に基づき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、著者らの平面2次元河床変動モデル¹²⁾に2次流が河床変動に及ぼす影響を新たに組み込み、同モデルを実験結果に適用することで、その適用性について検討した。

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に示すような本川(長さ8.0m×幅0.4m×高さ0.4m)と、支川(長さ3.0m×幅0.2m×高さ0.3m)とで構成される水路である。本川と支川は30°で合流させ、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 $d=0.00075\text{m}$ 、水中比重 $s=1.65$ の様な砂を河床材料として用い、実験水路にあらかじめ0.06mの厚さで敷き詰めた。CaseAでは粗度がCaseBの平坦河床時と同様になるように、CaseBの河床材料をスプレーのりで水路床に固定した。

測定は、測定区間で平衡状態であることを確認した後、開始した。上流端において給砂は行っていないが、測定点より上流側に十分砂を敷いており、実験中は下流側に常時砂が供給されている。測定項目はCaseAでは水位、CaseBでは水位と河床高である。測定についてはいずれも砂面測定器を用いた。測定点は図-2に示す通りであり、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。なお、いずれの実験についても、実験結果の信頼性を高めるために、同一条件下で3回行った。実験結果の再現性を確認したところ顕著な差は認められなかったため、3回の実験結果の平均値を測定値とした。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。

3. 解析の概要

(1) モデルの概要

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¹⁴⁾に、小規模河床形態に応じた抵抗則が考慮できるKrishnappan¹⁵⁾の摩擦勾配、小規模河床形態に応じた有効掃流力¹⁶⁾、流線の曲がり起因する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。抵抗則については、岸・黒木¹⁶⁾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ようになっている。

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の式であり、次式で表される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y} + \mathbf{S} &= \mathbf{0} \\ \mathbf{U} &= (h, u_h, v_h)^T; \quad \mathbf{E} = (uh, u^2h + 1/2gh^2, uvh)^T; \\ \mathbf{F} &= (vh, uvh, v^2h + 1/2gh^2)^T; \\ \mathbf{S} &= (0, -gh(S_{ox} - S_{fx}), -gh(S_{oy} - S_{fy}))^T \end{aligned} \quad (1)$$

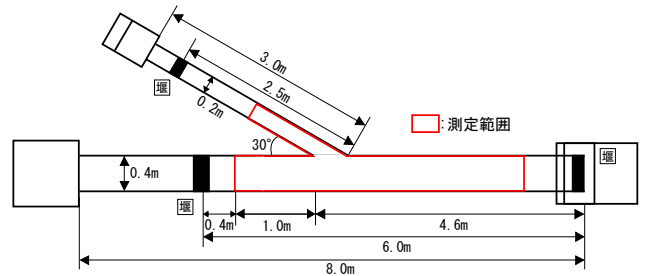


図-1 実験装置

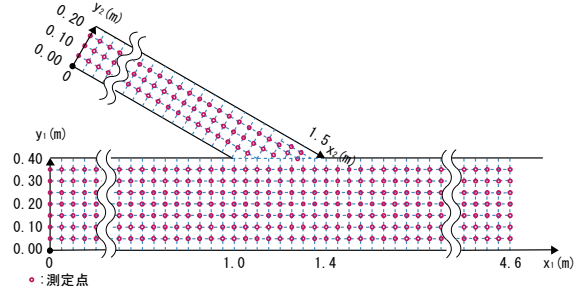


図-2 測定点

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	3.5
	3	4
	4	4
	5	6
		2:1
		3:1
		2:1
		3:1
		3:1

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda_b} \left(\frac{\partial q_{Bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{By}}{\partial y} \right) = 0 \quad (2)$$

ここに、 $\mathbf{U}$ =保存量ベクトル、 $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{F}$ = x 、 y 方向の流速ベクトル、 $\mathbf{S}$ =発生項・消滅項ベクトル、 h = 水深、 u 、 v = x 、 y 方向の流速、 g =重力加速度、 S_{ox} 、 S_{oy} = x 、 y 方向の地盤高勾配、 S_{fx} 、 S_{fy} = x 、 y 方向の摩擦勾配、 λ_b =河床材料の空隙率、 q_{Bx} 、 q_{By} = x 、 y 方向の流砂量である。摩擦勾配は、Krishnappan¹⁵⁾に従い次式で表される。

$$S_{fx} = S_f \frac{u}{U_s}, S_{fy} = S_f \frac{v}{U_s} \quad (3); \quad S_f = a_1 \left(\frac{R}{d_*} \right)^{a_2} \left(\frac{U_s^2}{gR} \right)^{a_3} \quad (4)$$

ここに、 $U_s = (u^2 + v^2)^{1/2}$ 、 d_* =平均粒径、 R =径深、また a_1 、 a_2 、 a_3 は河床形態に応じた係数であり、岸・黒木¹⁶⁾の抵抗則を用いると、表-2のようになる。ここに、表-2中の Y 、 Z はそれぞれ $Y = hS_f/sd$ 、 $Z = h/d$ 、 s =砂の水中比重、 d =平均粒径である。なお、これらの関係は、 $50 \leq Z \leq 1000$ の範囲の実験結果¹⁶⁾に基づき求められているが、ここではこの範囲以外でもこれらの関係が成立することとした。

流砂量の算定では、河床勾配が流砂量に及ぼす影響を考慮した式¹⁷⁾を用いた。全流砂量式 q_B には芦田・道上¹⁸⁾の式を、有効掃流力には岸・黒木¹⁶⁾の小規模河床形態に応じた有効掃流力¹⁶⁾を用いた。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¹⁷⁾。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。

表-2 抵抗則¹⁵⁾

抵抗則	適用範囲	a_1	a_2	a_3
Kishi and Kuroki	Dune I ; $Y < 0.02Z^{1/2}$	$0.0052/s^2$	1.0	3.0
	Dune II ; $Y = 0.02Z^{1/2}$	0.013	0	1.0
	Transition I ; $0.02Z^{1/2} < Y \leq 0.02Z^{5/9}$	$0.019s^{6/7}$	-3/7	1/7
	Flat bed ; $0.02Z^{5/9} < Y \leq 0.07Z^{2/5}$	0.021	-1/3	1.0
	Antidunes ; $Y > 0.07Z^{2/5}$	$0.0021/s^2$	1/5	3.0
$0.375 < d_{50}(\text{mm}) \leq 3.6$				

ここに、 u_{bs} =主流方向の底面流速、 u_{bn} =主流直角方向の底面流速、 $U_b = (u_{bs}^2 + u_{bn}^2)^{0.5}$ であり、それぞれ次式より求める。

$$u_{bs} = \beta U_s ; \beta = 3(1 - \sigma)/(3 - \sigma) ; \sigma = 3/(\phi\kappa + 1) \quad (5)$$

$$u_{bn} = -u_{bs} N_* \frac{h}{R_s} ; \frac{1}{R_s} = -\frac{1}{U_s} \left\{ u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} \right\} \quad (6)$$

ここに、 ϕ =流速係数(U_s/u^*)、 κ =カルマン定数($=0.41$)、 $\theta = \tan^{-1}(v/u)$ 、 R^* =水深平均流の曲がりの曲率半径である。 N^* は、Engelund¹⁹⁾に従い7とした。

基礎方程式の離散化は有限体積法(FVM)に基づき行った。時間積分にはEulerの陽解法を、空間積分には常・射混在流が安定して計算できる流束差分法(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¹⁴⁾に示す通りである。また、摩擦勾配については、まず、一つ前の時間ステップでの小規模河床形態で表-2中の Y を算定し、これに基づき河床形態を判断した後、 S_f を算定した。

(2) 解析条件の概要

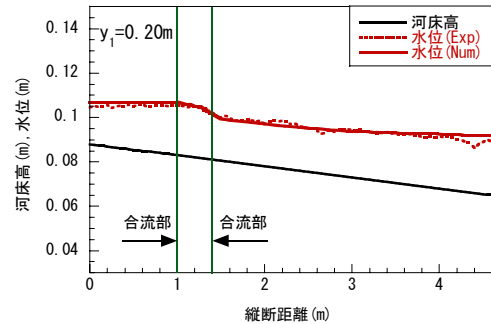
流れの初期条件については、CaseAとBのいずれも極めて小さな水深(1mm)と流速0を与えた。CaseBの河床の初期条件については、実験と同様に高さ0.06mで敷き詰めた砂に粒径程度の微小擾乱を与えた河床高とした。上下流端の境界条件には、流れについては実験条件と同様な流量・水位を河床については河床高を与えた。なお、実験では河床波が形成される場合もあったので、上流端の流入流量には $\pm 1\%$ の擾乱を与えた。

4. 結果と考察

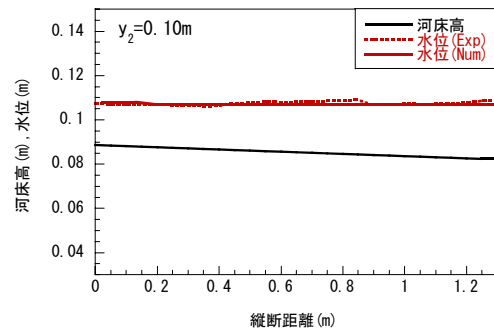
(1) 固定床実験に基づく検証

まず、固定床の実験CaseAに基づき、本モデルの流れの再現性について検証した。なお、固定床の場合の抵抗則にはFlat bedのものをを用いた。

図-3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、実験値と解析結果のいずれも合流部上流で水

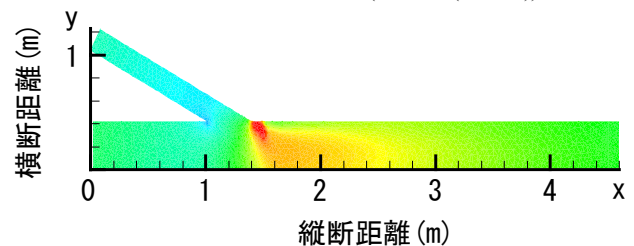


a) 本川

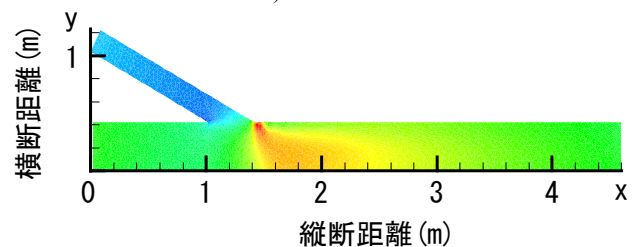


b) 支川

図-3 水位の縦断変化比較(CaseA-2(固定床))



a) CaseA-3



b) CaseA-4

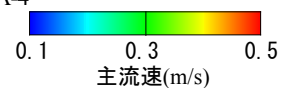


図-4 主流速コンター (CaseA(固定床))

位が上昇することなどがわかる。また、解析結果と実験値とを比較すると、合流部付近から上流に若干の差が認

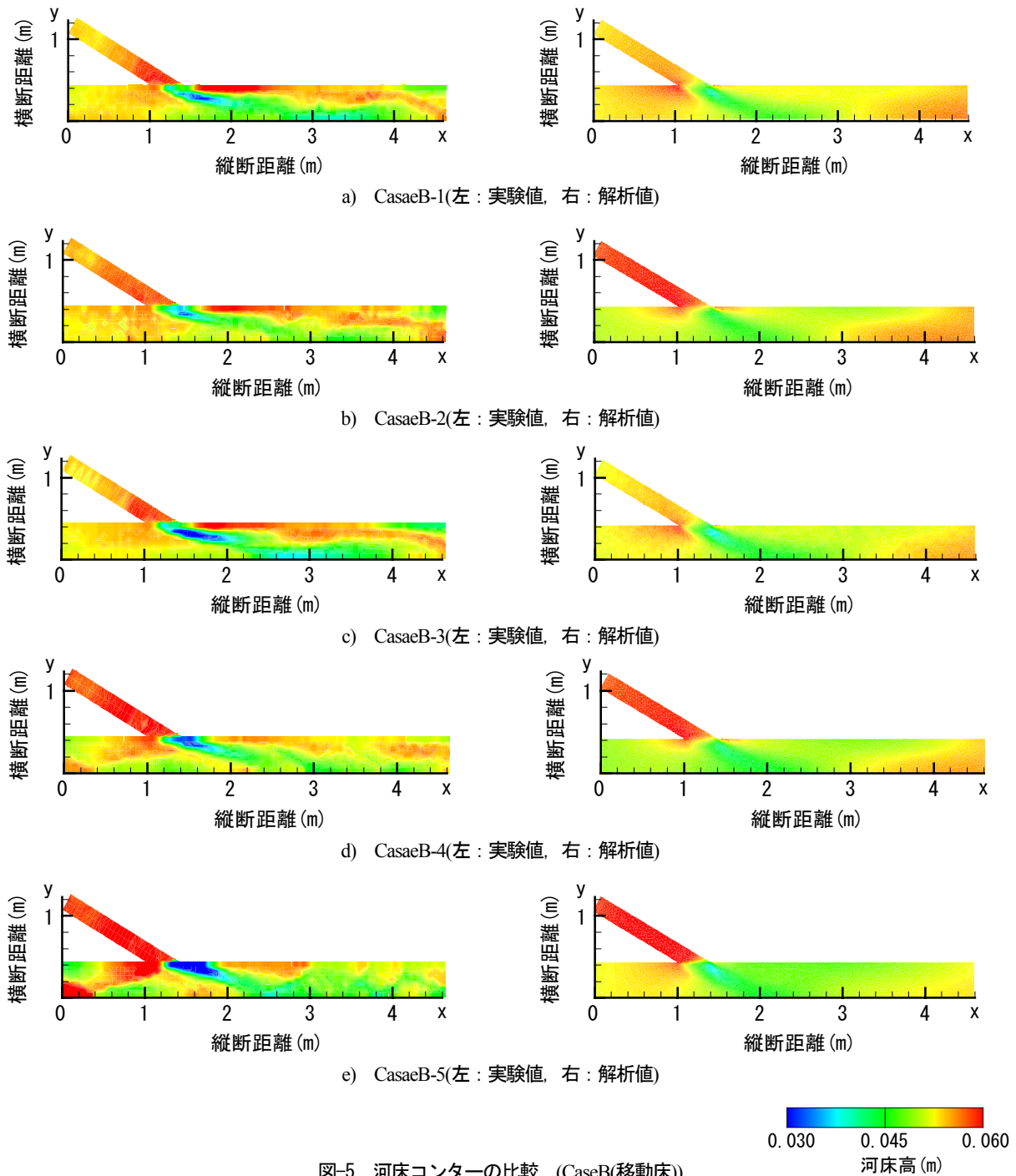


図-5 河床コンターの比較 (CaseB(移動床))

められるが、その差は数ミリ程度でさほど大きくない。これは、本モデルは空間精度が1次精度であり、そのため数値粘性が生じ、支川と本川の流速差によるせん断応力のある程度評価したためではないかと考えられる。

図-4は、CaseA-3と4の水深平均主流速コンターの解析結果を示したものである。このような主流速分布は、乱流モデルを用いたモデルの解析結果³⁾と類似しており、本モデルの結果の妥当性が窺える。また、この図より、いずれのCaseについても支川からの流入の影響により、(1) 合流部の下流近傍で最大流速が生じること、(2) 比較的大きな流速が生じる区間が右岸側壁に偏ること、(3) 側壁の影響により左岸側へ流線が曲げられること、(4)

CaseA-3に比べて流量比が大きいCaseA-4では、比較的大きな流速が生じる区間が上流側へ移動していることもわかる。

このように、本モデルは合流部での流れを十分な精度で再現できることが確認できる。

(2) 移動床実験に基づく検証

次に、移動床の実験CaseBに基づき、本モデルの流れの再現性について検証した。

図-5は、河床高について解析結果と実験値との比較を示したものである。なお、河床高は水路床からの高さとしている。

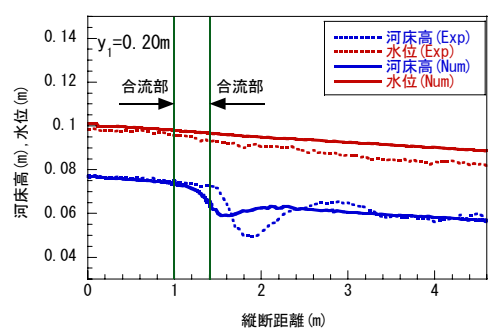
実験値に着目すると、合流部の上下流は河床高が高くなっており、合流部での砂州が生じていること、その砂州間では河床が低くなっており、そこが支川からの流れの主流路となること、その主流路は右岸へ到達すると水路線形に沿って向きが変化すること、などがわかる。また、合流後の流量が等しいCaseB-1と2、CaseB-3と4とを比較すると、本川の流量が大きいCaseB-2と4の流路は、より上流側で右岸に到達すること、本川の流量が大きいほど洗掘位置は左岸側へ寄ること、また、左岸側の合流部下流の砂州の面積が小さくなること、さらに、CaseB-4、5では上流側で河床波が生じており、CaseB-5では、それが合流部下流へ伝播することなどがわかる。CaseB-4、5と他のCaseの河床高を比較すると、CaseB-4、5の支川の河床高は高くなっている。これは、本川に河床波が発生したため流れに対する抵抗が増加し、本川の流下能力が低下することで、支川からの土砂を流送することができず、他のCaseに比べて河床高が高くなったのではないかと考えられる。このように、河床波の形成と支川の河床変動との間には何らかの関係があると考えられる。その詳細については今後検討したいと考えている。

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、など定性的にはこのような現象を再現している。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、また合流部下流の砂州が実験結果に比べ発達していないこと、CaseB-4、5の合流部上流で発生している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。

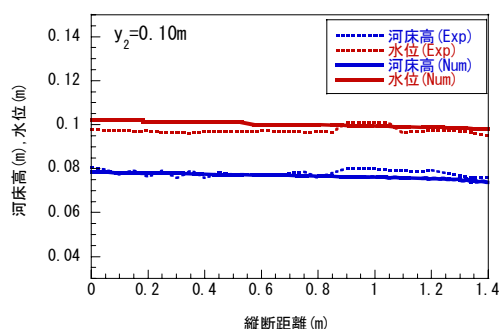
図-6は、本川と支川の中心軸上の水位と河床高の縦断変化を示したものである。いずれも同じような傾向を示したので、ここではCaseB-3についてのみ示している。これより、解析結果は、支川については概ね水位・河床高ともに、その縦断変化を再現していることが確認できる。本川については、水位は概ね再現しているが、河床高については、平均的な河床は再現されているものの、洗掘位置やその最大洗掘深が再現されていないことがわかる。ただし、支川の上流側と本川の合流部下流では、解析結果と実験値の水位に若干の差が認められる。この区間での河床形態は、解析結果および実験値のいずれもTransitionIであることが確認された。TransitionIでは、参考文献¹⁶⁾からも明らかのように、 $Z(=h/d)$ が500より小さくなるとデータのばらつきが大きくなり、ここでの抵抗則の適合性は低下する。このため、この区間では解析結果は、河床抵抗を若干大きく評価し、水位に差が生じたと考えられる。

このように、本モデルは、水位についてはある程度再現可能であるが、河床については改善の余地がある。この理由を考察する。

図-7は2次流が河床変動に及ぼす影響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



a) 本川



b) 支川

図-6 水位と河床高の縦断変化の比較(CaseB-3)

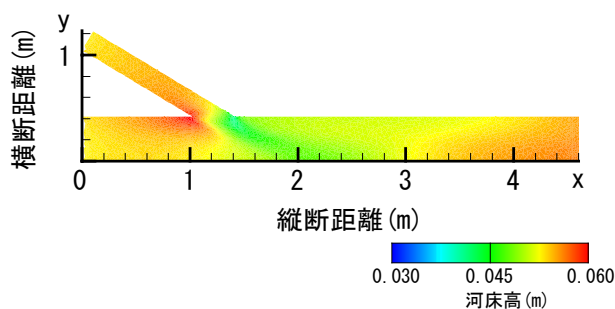
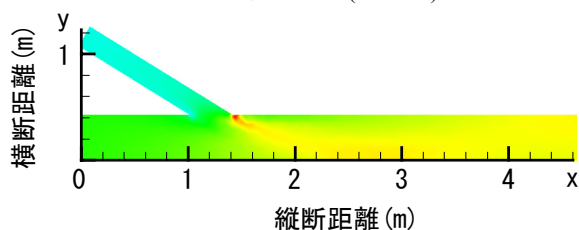
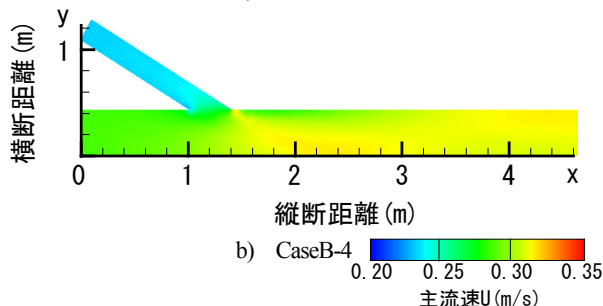


図-7 河床コンター(CaseB-3)



a) CaseB-3



b) CaseB-4

図-8 主流速コンター(CaseB(移動床))

る。図-5と比較すると、2次流の影響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次流の影響は適切に考慮されていると考えられる。

図-8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。この図と図-5の河床コンター図を比較すると、当然ながら主流速が生じている箇所では主流路が形成されている。また、図-4の固定床での主流速コンター図を比較すると、主流速分布はかなり変化しており、いずれも移動床の方が主流速の分布は合流点よりも下流側へ移動していることがわかる。このように、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大きく変化する。また、合流部下流側では流速差が生じ、流れが減速されるために土砂が堆積するが、図-5に示すように、本モデルではそれを再現できていない。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、数値拡散が大きな可能性がある。実際、河床高などについては実験結果に比べ拡散している傾向がある。また、乱流モデルを導入しているわけではないので、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。

今後は、この点を踏まえ、本モデルの空間微分について高次精度化を図るとともに、乱流モデルを導入することで、予測精度を高めたいと考えている。

5. おわりに

本研究では、合流部を有する河道での河床変動に関する実験に基づき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次流が河床変動に及ぼす影響を組み込んだ平面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、(2) 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が確認された。しかしながら、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。

謝辞：本研究を実施するに当たり当時本学学部4年生の西藤安隆君、本学学部4年生の池田寛君にはデータ整理等で多大な協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 牛山素行，寶 馨，立川康人，近森秀高：2002年8月31日～9月1日の台風15号による韓国の豪雨災害，自然災害科学，

Vol.21-3，pp.299-309，2002。

- 2) 土木学会水工学委員会：平成15年台風10号北海道豪雨災害調査団報告書，土木学会水工学委員会，2004。
- 3) 舩甚甲介，清水康行：河川合流点を含む流れに関する研究，水工学論文集，第49巻，pp.529-534，2005。
- 4) 板倉忠興：河川合流点における流れの機構，第16回水理講演会論文集，pp.7-12，1972。
- 5) 藤田一郎，河村三郎：開水路合流部流れの三次元構造，水工学論文集，第34巻，pp.301-306，1990。
- 6) Bradbrook, K.F., Lane, S.N., Richards, K. S., Biron, P.M, Roy, A.G: Role of bed discordance at asymmetrical river confluences, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.127, No.5, pp.351-368, 2001.
- 7) Best, J. L. and Reid, I.: Separation zone at open-channel junctions, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.110, No.11, pp.1588-1594, 1984.
- 8) 室田 明，多田博登：開水路合流部の水面形計算接続法に関する研究，第25回水理講演会論文集，pp.327-332，1981。
- 9) 木村一郎，細田 尚，村本嘉雄，櫻井寿之：開水路横流入部における渦運動の数値シミュレーション，水工学論文集，第41巻，pp.717-722，1997。
- 10) 横山洋，渡邊康玄，鈴木優一：分岐・合流流れを有する河川における河床変動計算に関する研究，北海道開発土木研究所月報，No.615号，pp.2-9，2004。
- 11) 出口 恭，藤田一郎，椿 涼太，大藁政志：勾配の異なる急勾配河川合流部における固定床および移動床の解析，水工学論文集，第51巻，pp.823-828，2007。
- 12) 重枝末玲，秋山壽一郎，才木康裕，西藤安隆：分流・合流部を有する河道での流れと河床変動の数値シミュレーション，水工学論文集，第52巻，pp.619-624，2008。
- 13) 佐藤耕治，渡邊康玄，横山 洋，中津川 誠：分岐合流部を含む河道における砂州の影響，水工学論文集，第46巻，pp.719-724，2002。
- 14) 重枝末玲，秋山壽一郎，高須賀真哉：フラッシング排砂のプロセスとその数値シミュレーション，水工学論文集，第50巻，pp.931-936，2006。
- 15) Krishnappan, B. : Modeling of unsteady flows in alluvial streams, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.111, No.2, pp. 257-266, 1985.
- 16) 岸力，黒木幹男：移動床における河床形状と流体抵抗(I)，北海道大学工学部研究報告，No. 67，pp.1-23，1973。
- 17) 福岡捷二：洪水の水理と河道の設計法-治水と環境の調和した川づくり，森北出版社，2005。
- 18) 芦田和男，道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，No.206，pp.59-69，1972。
- 19) Engelund, F. : Flow and bed topography in channel bends, *Journal of Hydraulic Division*, ASCE, Vol.100, No.HY11, pp.1631-1648，1974。

(2008. 9. 30受付)