

# 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

## NUMERICAL SIMULATIONS OF FLOWS AND BED VARIATIONS IN CHANNELS WITH DIVERSION AND CONFLUENCE

重枝 未玲<sup>1</sup>・秋山 壽一郎<sup>2</sup>・才木 康裕<sup>3</sup>・西藤 安隆<sup>4</sup>  
Mirei SHIGE-EDA, Juichiro AKIYAMA, Yasuhiro SAIKI and Yasutaka SAITO

<sup>1</sup>正会員 博(工) 九州工業大学准教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

<sup>2</sup>フェロー会員 Ph.D. 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (同上)

<sup>3</sup>学生会員 九州工業大学大学院 工学研究科建設社会工学専攻 (同上)

<sup>4</sup>学生会員 九州工業大学 工学部建設社会工学科 (同上)

The flow and bed variation in channels with diversion and confluence was investigated experimentally and numerically. The experiments were conducted to obtain the bed variation data of a flow and bed variation in channel with diversion and confluence for verification of the numerical models. The effects of channel width on the bed variation and diversion discharge as well as sediment discharge were also examined from the experimental results. A numerical simulation were also performed by two-dimensional bed variation model and verified against the obtained data. It shows that the model has ability to reproduce the bed variation in the channel with diversion and confluence with reasonable accuracy.

**Key Words :** *diversion and confluence, bed variation, numerical simulation, sediment transport experiment*

### 1. はじめに

近年、治水と環境とが調和した川づくりが求められている。河川環境への関心は高まり続けており、最近では改修を行った河川を本来の自然の河川へ復元しようとする試みもなされている<sup>1), 2), 3)</sup>。

河道内の中島は、河川生物の良好な生息環境の提供などの環境機能を有していることから保全される方向にある。一方で、死水域の発生や土砂の堆積などによる流下能力の低下を引き起こす場合もある。そのため、流下能力を確保するために、河道掘削などの河川改修が行われることがある。このように中島は環境面および治水面のいずれの面からも重要な箇所である。

中島周辺では当然のことながら、流れの分合流が生じる。分合流部は、上述したように治水上重要な箇所であることから、そこで生じる流れと土砂流送を把握する目的で、数々の研究がなされている<sup>1), 2), 3), 4), 5)</sup>。佐藤<sup>1)</sup>らは、北海道東部を流れる標津川を対象に、実験に基づき蛇行復元時の洪水流の挙動と河床変動特性を、長谷川<sup>2)</sup>は

分流部に堰を設置した際の分流量についての検討を、横山<sup>3)</sup>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。長谷川<sup>4)</sup>は、山地河川を対象に、分岐部で生じる片側が土砂で閉塞する現象について実験および理論的に研究を行っている。また、出口<sup>5)</sup>は勾配の異なる急勾配河川での河川合流部に關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。いずれも、合流あるいは分流部での砂州の動きや土砂堆積が、水位や分流量に対してどのようなインパクトを与えるかを把握することに着目した研究であり、治水面上、分合流部での土砂動態を把握することが極めて重要であることがわかる。従って、分合流部での流れと河床変動を予測するための何らかのツールが必要となるが、分流部での分流量や流砂量などについて検証が行われたモデルは著者らの知る限り存在しておらず、その予測手法について十分な検証がなされていないのが実状である。

本研究では、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目的としている。ここでは、まず、分流部お

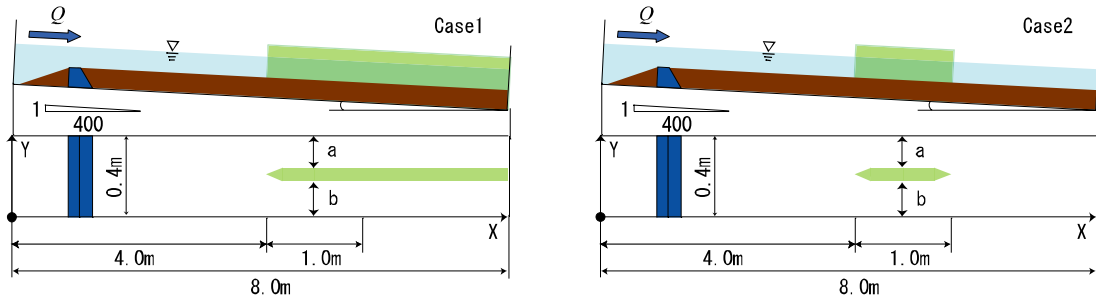


図-1 実験装置

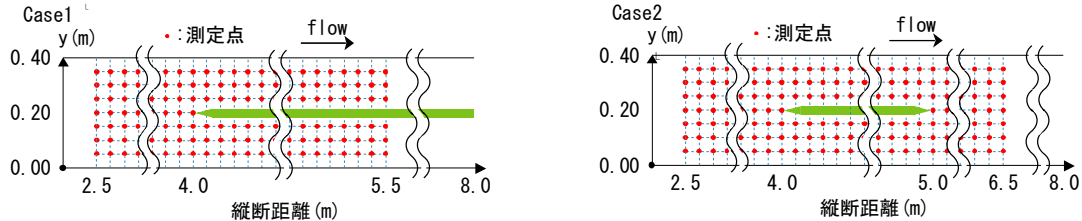


図-2 測定点

よび分合流部を有する河道での河床変動に関する実験を行い、流路幅の変化が流れと河床変動に及ぼす影響を実験的に検討した。次に、著者らが構築した河床変動モデルを同実験結果に適用し、その適用性について検討した。

## 2. 実験の概要

実験装置は、図-1に示すような幅0.4m、長さ8.0mの可変勾配水路である。水路内には幅0.06m、先端角度が30°の亚克力製の隔壁により、分流部あるいは合流部が設けられている。なお、隔壁は常時存在する島をモデル化したものであるが、ここでは分合流部における河床変動に関する数値モデルの検証を目的としているので、その形状は単純な形状とした。また、上流には堰が設けられている。

実験は、分流部を設けたCase1、分合流部を設けたCase2の二通りを行った。隔壁の設置位置により、流路幅比(左岸側の流路幅 $a$ /右岸側の流路幅 $b$ )を $a/b=1, 2, 3$ の3通りに変化させた。実験条件は、表-1に示す通りである。

水路に水中比重 $s=1.65$ 、粒径 $d=0.00075\text{m}$ の砂を一様な高さ $0.056\text{m}$ 、河床勾配 $1/400$ で敷き詰め、一定流量 $Q=0.006\text{m}^3/\text{s}$ を通水し、動的平衡状態となった後、測定を行った。なお、給砂は堰下流の河床が一定であることを確認しながら、堰の上流側から行った。

測定項目は、水位と河床高である。なお、Case1では分流河道の流路幅比が河床変動に及ぼす影響を調べる目的で、配分流量と流砂量を測定した。水位と河床高の測定点は、図-2に示す通りである。測定間隔は、縦断・横断方向にいずれも $0.05\text{m}$ とした。ただし、Case1-Cおよび2-Cにおいては測定点が十分にとれないため、横断方向

表-1 実験条件

Case	水路内状況	左岸流路幅(m)	右岸流路幅(m)
1	A	0.170	0.170
	B	0.227	0.113
	C	0.255	0.085
2	A	0.170	0.170
	B	0.227	0.113
	C	0.255	0.085

に $0.025\text{m}$ 間隔の測定点を加えた。測定には砂面測定器を用いた。また、Case1の分流後の左右岸水路の流量、流砂量は、それぞれ下流端から排出される流量および流砂量をバケツで回収し、流量は一定量のバケツが満杯になるまでの時間を測定することで、流砂量は回収した砂を体積に換算することで算出した。

## 3. 数値解析の概要

### (1) モデルの概要

本研究で用いたモデルは、著者らがフラッシング排砂の数値解析に用いたモデル<sup>6)</sup>と概ね一緒であるが、摩擦勾配については小規模河床形態による抵抗則の違いが考慮できるKrishnappan<sup>7)</sup>のものを導入した。

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。

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y} + \mathbf{S} = \mathbf{0} \quad (1)$$

$$\mathbf{U} = (h, uh, vh)^T; \mathbf{E} = (uh, u^2h + 1/2gh^2, uvh)^T;$$

$$\mathbf{F} = (vh, uvh, v^2h + 1/2gh^2)^T;$$

$$\mathbf{S} = (0, -gh(S_{ox} - S_{fx}), -gh(S_{oy} - S_{fy}))^T$$

表-2 抵抗則

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	1.0	3.0
	Dune II ; $Y = 0.02Z^{1/2}$	0.013	0	1.0
	Transition I ; $0.02Z^{1/2} < Y \leq 0.07Z^{2/5}$	$0.018(\rho_s/\rho)^{6/7}$	-3/7	1/7
	Flat bed ; $0.02Z^{5/9} < Y \leq 0.07Z^{2/5}$	0.021	-1/3	1.0
	Antidunes ; $Y > 0.07Z^{2/5}$	$0.021(\rho_s/\rho)^2$	1/5	3.0
$0.375 < d_{50}(\text{mm}) \leq 0.93$				

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

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、 $\lambda_b$ =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、Krishnappan<sup>7)</sup>に従い、摩擦勾配と地盤高勾配はそれぞれ次式で表される。

$$S_{ox} = -\frac{\partial Z_b}{\partial x}, \quad S_{oy} = -\frac{\partial Z_b}{\partial y} \quad (3); \quad S_{fx} = a_1 \left( \frac{R}{d_*} \right)^{a_2} \left( \frac{u|u|}{gR} \right)^{a_3} \quad (4)$$

ここに、 $d_*$ =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<sup>8)</sup>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 $Y=hS/sd$ 、 $Z=h/d$ 、 $s$ =砂の水中比重、 $d$ =平均粒径である。

流砂量式には、河床勾配が流砂量に及ぼす影響を考慮した次式を用いた。

$$q_{Bs} = q_B \left( \frac{\tau_{*s}}{\tau_*} - \frac{1}{\sqrt{\mu_s \mu_d}} \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}} \frac{\partial z_b}{\partial s} \right) \quad (5)$$

$$q_{Bn} = q_B \left( \frac{\tau_{*n}}{\tau_*} - \frac{1}{\sqrt{\mu_s \mu_d}} \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}} \frac{\partial z_b}{\partial n} \right)$$

なお、流砂量式 $q_B$ には芦田・道上<sup>9)</sup>の式を適用し、掃流力、限界掃流力については斜面の影響を考慮した掃流力と限界掃流力<sup>10)</sup>を用いた。ここに、 $q_{Bs}$ 、 $q_{Bn}$ =主流方向、主流直角方向の流砂量、 $\tau_*$ =無次元掃流力、 $\tau_{*c}$ =無次元限界掃流力、 $\tau_{*s}$ 、 $\tau_{*n}$ =斜面の影響を考慮した $s$ 、 $n$ 方向の掃流力、 $\tau_*=(\tau_{*s}^2+\tau_{*n}^2)^{1/2}$ 、 $\mu_s$ =静止摩擦係数、 $\mu_d$ =動摩擦係数である。

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。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<sup>11)</sup>に示す通りである。

## (2) 解析条件の概要

解析の初期条件については、実験の初期条件と同様な

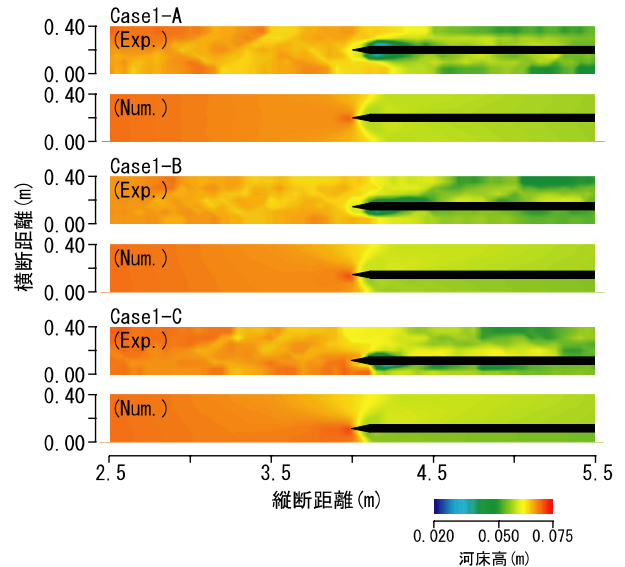


図-3 河床コンターの実験値と解析結果との比較(Case1)

河床高、水深と流速は一定値を与えた。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。水路壁面については流れおよび河床変動のいずれも閉境界条件を与えた。なお、今回の解析では、砂州の再現計算に必要な河床の微小擾乱や周期境界条件あるいは上流端で流入流量に周期的な擾乱を与える境界条件<sup>12)</sup>などは用いていない。これは、今回は本モデルが平均的な河床高をどこまで再現可能かを検討することを目的としているためである。

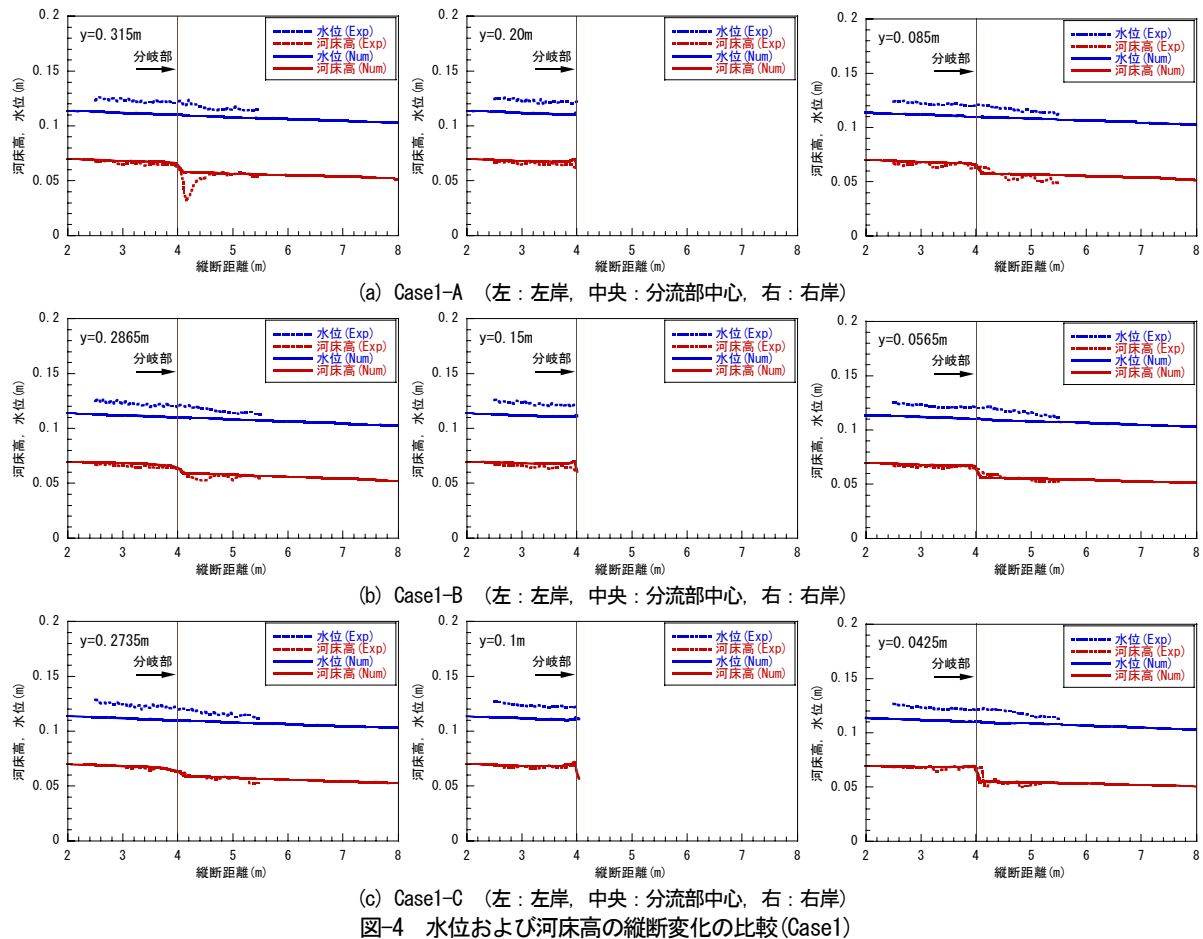
摩擦勾配の係数については、本実験条件では適用範囲はDuneIに対応していたので、ここでは $a_1=0.0052$ 、 $a_2=1.0$ 、 $a_3=3.0$ とした。

## 4. 結果と考察

以下では、まず、Case1の分流部に関する実験結果に基づき、次に、分合流部の実験結果に基づきモデルの検証を行う。

### (1) 分流部を有する河道での河床変動(Case1)

図-3は、河床高コンター図の実験値の一例と解析結果を示したものである。これより、実験値(Exp.)については、いずれのCaseにおいても、分岐部上流側でコンター図の濃淡が生じており明確ではないものの砂州の発生していること、分流部付近の側壁で周辺よりも河床高が低



く洗掘が生じ、その下流では側壁付近で周辺よりも河床高が高く土砂が堆積すること、などが確認できる。また、流路幅の違いに着目すると、右岸側の流路幅が狭いほど、分流部周辺で洗掘される範囲が小さくなること、分流部右岸側では土砂が堆積し、河床高が大きくなること、などがわかる。一方、解析結果(Num.)については、分流部先端付近で若干ではあるが河床が低いことを表す緑が濃くなっており洗掘が生じること、その下流では河床が上昇することを表す黄色が濃くなっていることから側壁付近に土砂が堆積すること、などについては再現できるものの洗掘については過小に評価していることが確認できる。また、流路幅の違いについても右岸側の流路幅が狭いほど、分流部右岸側では土砂が堆積し、河床が上昇することなどを再現できることが確認できる。しかしながら、分流部周辺の洗掘と砂州の発生を再現できていない。この理由としては、分岐部周辺では3次元性の強い流れが生じるため、そこでの局所洗掘については平面2次元モデルでは取り扱えないこと、上述したように砂州の発生を再現するためには、初期条件や境界条件に微小擾乱を生じさせる必要があるが、これらを考慮していないことが考えられる。砂州の形成については、河道閉塞とも関係<sup>4)</sup>があることから、今後検討したいと考えている。

図-4は、Case1-A~Cについて、分流中心軸と分流後の両水路の中心軸における水位および河床高の縦断変化を示したものである。これらより、実験結果については、

Case1-Aでは、左右岸の水路の河床の変化は概ね一致していること、分流後、河床勾配が急になった後、緩やかになること、などが、Case1-Bについては、分流部上流近傍では幅の小さな右岸水路で左側水路よりも河床が上昇していること、Case1-Cでは分流前の右岸側の水路前面に土砂が堆積し河床が上昇した後、堆積土砂により鉛直下向きの流れが生じるため河床が洗掘されること、などがわかる。水位については、Case1-Cで分流後の左右岸水路で水位に差が生じているものの、他のCaseでは同程度である。

解析結果と実験値を比較すると、いずれの断面についても局所洗掘等は再現できていないものの、平均的な河床高は概ね再現できていることがわかる。また、水位を比較すると、実験値の水位は、解析結果の水位に比べて平均的に2割程度、測定区間の最下流では1.5割程度上回っていることが確認できる。この結果を、「河道計画検討の手引き」<sup>13)</sup>のp.94に示されている水面幅と平均水深の比と水位上昇量との関係に照らし合わせると、今回の水面幅と水深の比は10程度でデータが存在しないものの、その周辺では平均で10%程度、最大で20%程度の水位上昇率を示していることから、このような誤差は砂州による水位上昇によって生じたと考えられる。

図-5は、分流後の流量、流砂量と流路幅水路幅比(流路幅/水路幅)との関係を示したものである。分流部下流では、当然のことながら、分流後の流量や流砂量が流



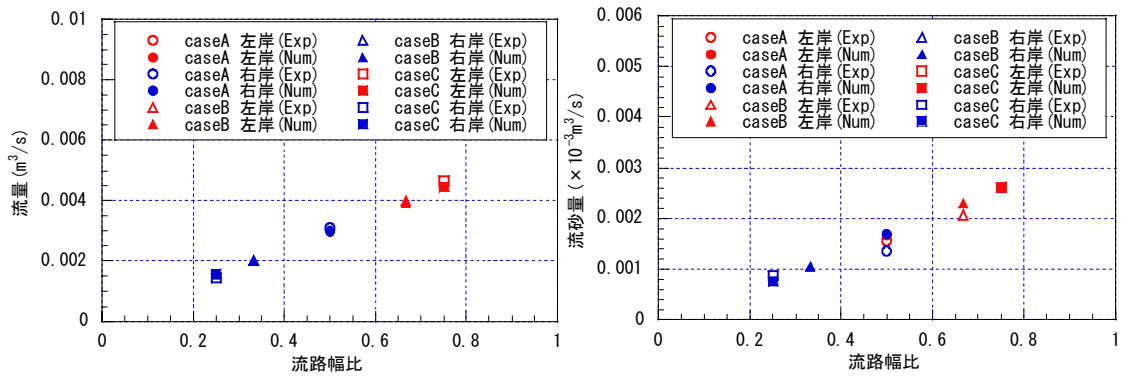


図-5 分流後の流量と流砂量と流路幅水路幅比との関係

れや河床変動に大きく影響を及ぼす。従って、これらを適切に予測することが、分流後の流れや河床変動を適切に予測するためには必要となる。これより、実験値、解析結果のいずれも流量および流砂量ともに、流路幅水路幅比が大きくなると増加すること、その関係はおおよそ線形であることも確認できる。また、解析結果は実験値を概ね再現していることも確認できる。このように、本モデルは分流流量や流砂量を予測することができることがわかる。

以上から、本モデルは、砂州の発生やそれに伴う水位上昇については再現できないものの、分流部での平均河床を十分な精度再現できることが確認された。

## (2) 分合流部を有する河道での河床変動 (Case2)

図-6は、河床高コンター図の実験値の一例と解析結果とを比較したものである。これより、いずれも分流部先端の両岸付近では洗掘が生じていること、Case2-Aでは合流部下端で土砂が堆積していること、分流部の上流では砂州が発生していること、また、合流部下流ではCase2-Aについては砂州が発生しているものの、Case2-B, Cについてはさほど明確な砂州が発生していないこと、などがわかる。解析結果については、先ほどの分流部と同様に砂州の発生は再現できていないものの、合流部先端付近の洗掘、合流部下端の土砂の堆積などを再現していることがわかる。

図-7は、分流中心軸と、隔壁両岸の水路中心軸での河床高と水位を示すものである。これより、Case2-C, Case2-A, Case2-Bの順で、Case2-Cの分流部直下流における局所洗掘が最も大きいことがわかる。また、実験値と解析結果を比較すると、河床については、局所洗掘等を再現はできていないものの、いずれのCaseについても平均的な河床を再現していることがわかる。また、水位については、先述したように、明確な砂州が生じるCase2-Aでは解析結果は実験値を下回っている。一方、明確な砂州が発生しないCase2-B, Cについては、合流部下流の水位の解析結果と実験値と差は、Case2-Aに比べて、小さくなっていることが確認できる。

以上のように、本モデルは、砂州の発生やそれに伴う水位上昇については再現できないものの、分合流部を含

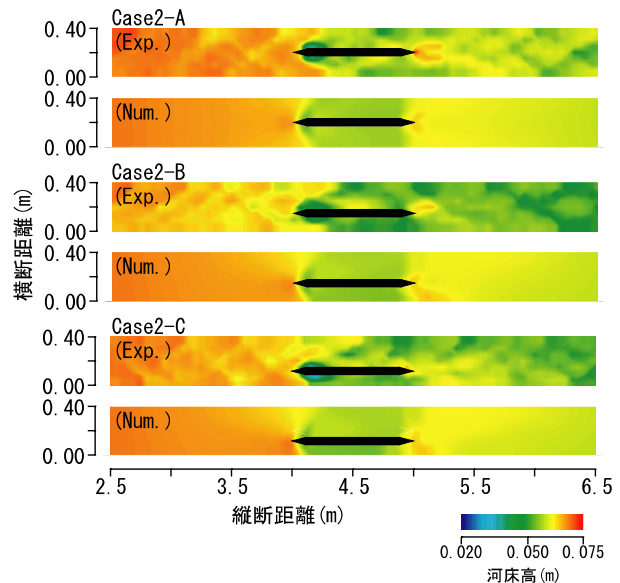


図-6 河床コンターの実験値と解析結果との比較 (Case2)

む河道での平均河床を十分な精度再現できることが確認された。

今回の実験結果からも明らかのように、分合流部の河道の幅によっては砂州の形成を促進することになり、そのため流下能力が下がることを示唆している。従って、分合流の河道掘削等の河川改修を行う上で、この点に注意する必要がある。今回の解析では、砂州の発生が再現できないため、このような砂州による流下能力の低減を考慮することができていない。この点については、境界条件について検討するとともに、流線の曲がりによる2次流についても考慮し、モデルをより精度の高いものにしたと考えている。

## 5. おわりに

本研究では、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目的に、分流部および分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、著者らが開発した河床変動モデルの検証を行った。その結果、同モデルが、砂州の発生やそれに伴う水位の上昇等を再現できないものの、平均的な河床につい

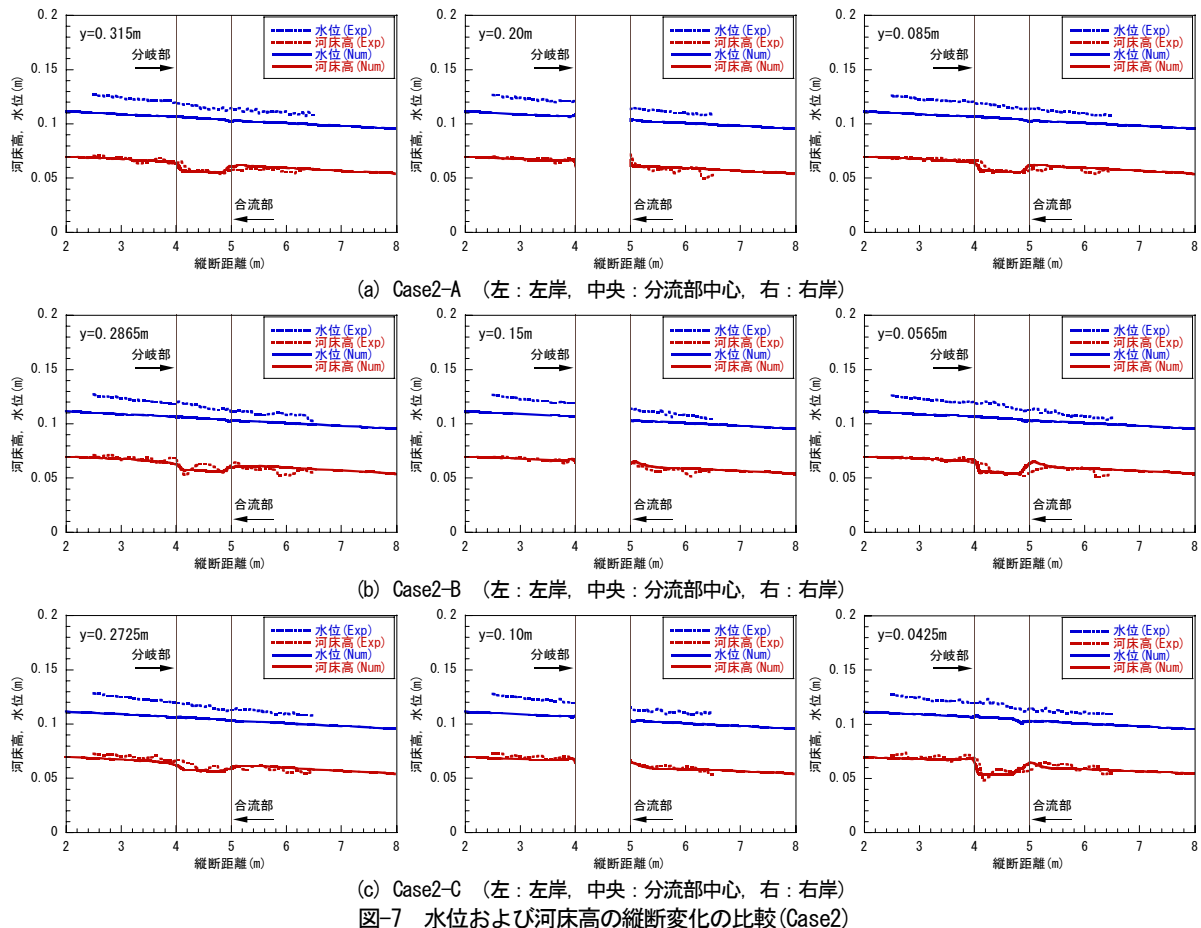


図-7 水位および河床高の縦断変化の比較 (Case2)

ては予測可能であることが確認された。今後は、境界条件等について検討し、砂州が発生する条件での解析を行い、砂州が分流量等に及ぼす影響について検討したいと考えている。

謝辞：本研究を遂行するに当たり、本学大学院1年生の丸野泰宏君と本学学部4年生の山下剛史君には、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) 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.
- 2) 長谷川和義, 藤田将輝, 渡邊康玄, 桑村貴志: 標津川通水時の堰をとまう分岐流量配分比に関する研究, 水工学論文集, 第47巻, pp.222-226, 2003.
- 3) 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.
- 4) 長谷川和義, 広瀬健治, 目黒嗣樹: 山地河川における分岐流路交番現象に関する抽出実験とその解析, 水工学論文集, 第47巻, pp.679-684, 2003.
- 5) 出口恭, 藤田一郎, 椿涼太, 大菌政志: 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.

- 6) 重枝未玲, 秋山壽一郎, 小牧貴大, 才木康裕: 平面2次元河床変動モデルによるフラッシング排砂時の水みち形成プロセスの数値解析, 水工学論文集, 第51巻, pp.949-954, 2007.
- 7) Krishnappan, B.: Modeling of unsteady flows in alluvial streams, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.111, No. 2, pp.257-266, 1985.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 重枝未玲・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.
- 12) 寺本敦子, 辻本哲郎: 砂州を伴う河道の低水路河岸侵食に関する数値解析による研究, 水工学論文集, 第47巻, pp.649-654, 2003.
- 13) 財団法人 国土技術研究センター (編): 河道計画検討の手引き, 山海堂, 2002.

(2007. 9. 30受付)