

準3次元数値モデルによる河川分流点周辺の 河床変動シミュレーション

QUASI-3D NUMERICAL SIMULATIONS OF FLOW AND BED VARIATION IN DIVERSION OF A RIVER

坂本 洋¹・重枝未玲²・秋山壽一郎³・新谷恭平⁴

Hiroshi SAKAMOTO, Mirei SHIGE-EDA, Juichiro AKIYAMA and Kyouhei SHINTANI

¹正会員 (株) 建設技術研究所 九州支社河川部 (〒810-0041 福岡市中央区大名2-4-12 CTI福岡ビル)
九州工業大学大学院 工学研究科建設社会工学専攻博士後期課程

²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)

³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)

⁴学生会員 九州工業大学大学院 工学府建設社会工学専攻博士前期課程 (同上)

Numerical simulations for flood flows and bed variation in a diversion of a river were performed using a quasi-three dimensional numerical model. The vertically averaged and moment equations was used as governing equations to allow for the incorporation of pre-assumed linear distribution of horizontal velocity distributions. The model is based on finite volume method using HLLC(Harten, Lax and van Leer and Contact(2004)) numerical flux, which is one of a Riemann solver. The model is verified against two experimental data of flows and bed variation in a diversion of a river. It shows that the model has ability to reproduce the flow and bed variation in a diversion of a river, but the more improvement is needed to predict reasonable accuracy.

Key Words : *diversion of a river, experiments, characteristics of flow and bed variation, streamline, water surface profile, quasi-3D numerical model*

1. はじめに

近年、河川の維持管理は、本格的な計画管理へと移行している¹⁾。計画的な維持管理を行うためには、出水や河川改修が河床や河道に及ぼすインパクト、すなわち出水や河川改修によって生じる中長期的な①河床や河道の変動²⁾³⁾、②河床材料の質の変化⁴⁾、③①と②によって形成される安定河床・河道形状を把握すること⁵⁾⁶⁾が不可欠であり、これらの予測を目的とした様々な研究がなされている。

河川分流点は、分流角度、分流点上下流の川幅などの河道の平面形状、各河川の下流端の水位、分流堰等の構造物によって、流況、分派流量、分派流砂量が変化するため、中長期的な河床位とその質の縦横断変化に大きな影響を及ぼす。そのため、河川分流点は、河川の維持管理上、極めて重要な地点である。

河川分流点での流れや河床変動に関する研究では、①流れや河床変動に大きな影響を及ぼす流量配分比や流砂量配分比の予測法の開発⁷⁾⁸⁾⁹⁾、②分流点周辺の流れやそれによって生じる河床変動の予測を目的とした数値モデ

ルの開発¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾などが行われている。特に、近年では、分流点周辺のように水深平均の流れと底面との流れの間に差が生じるような平面2次元モデルでは予測が困難な流れを、水深平均モデルで取り扱う準3次元モデルの開発¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾が積極的に行われている。著者らは、準3次元洪水流モデル¹⁵⁾を開発し、分流点周辺の流れへの適用性について検討した結果、同モデルが河床変動を予測する上で重要な底面での流向を十分な精度で再現できることを示した。このようなモデルが的確に中長期の河床変動を予測することが可能となれば、維持管理計画を策定するツールとして有用なものになると考えられるが、準3次元モデルの分流点周辺の河床変動への適用性について十分にわかっていないのが現状である。

本研究は、以上のような背景を踏まえ、分流点周辺の維持管理計画を検討が可能な準3次元洪水流・河床変動モデルの開発を最終的な目的としている。ここでは、著者らの開発した準3次元河床変動モデル¹⁵⁾に改良を加えるとともに、混合砂礫河床変動モデルを組み込むことで、新たな準3次元混合砂礫河床変動モデルを構築した。さらに、同モデルを分流点周辺の一様砂および混合砂礫河床での移動床実験結果に適用し、同モデルの河床変動お

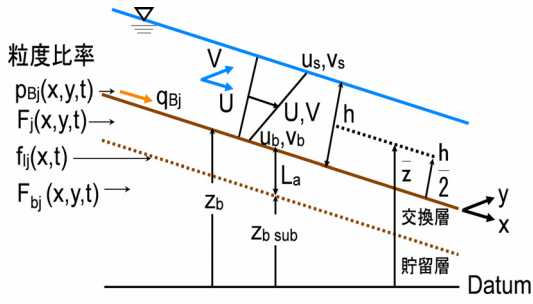


図-1 流れと河床変動の定義図

よび河床の質の変化の予測精度を検証するとともに、維持管理計画検討ツールとしての今後の課題について検討した。

2. 準3次元混合砂礫河床変動モデルの概要

準3次元混合砂礫河床変動モデルは、著者らが開発した有限体積法と近似リーマン解法に基づく準3次元河床変動モデル¹⁵⁾をベースとして、以下の①～③の改良と④混合砂礫河床変動モデルを組み込んだ新たなモデルである。流れのモデルには、①モーメント方程式に鉛直方向の流速分布に応じたせん断応力と②底面せん断力に底面流速の影響を組み込むとともに、③モーメント方程式の離散化には、これまで用いていたHLL法¹⁶⁾よりも数値拡散が小さいHLLC法¹⁷⁾を適用するなどの改良を加えた。河床変動モデルには、新たに④混合砂礫河床変動モデル¹⁸⁾を導入した。

(1) 基礎方程式

a) 流れの基礎方程式

流れの基礎方程式は、式(1)の連続の式と運動方程式およびモーメント方程式である。これらの式は、圧力 p の鉛直分布を静水圧分布で、 x 、 y 軸方向の流速 u 、 v の流速分布を式(2)のように線形で近似し、重み関数を1及び $2(z-\bar{z})/h$ とし、連続の式及びReynoldsの運動方程式を水深積分することで求められる。

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y} + \mathbf{M}_1 + \mathbf{M}_2 + \mathbf{S}_1 + \mathbf{S}_2 = 0 \quad (1)$$

$$\mathbf{U} = (h, Uh, Vh, u'h, v'h)^T;$$

$$\mathbf{E} = \left(Uh, U^2h + \frac{1}{3}u'^2h + \frac{1}{2}gh^2, UVh + \frac{1}{3}u'v'h, Uu'h, Uv'h \right)^T;$$

$$\mathbf{F} = \left(Vh, UVh + \frac{1}{3}u'v'h, V^2h + \frac{1}{3}v'^2h + \frac{1}{2}gh^2, Vu'h, Vv'h \right)^T;$$

$$\mathbf{M}_1 = \left(0, 0, 0, u'h \frac{\partial U}{\partial x}, u'h \frac{\partial V}{\partial x} \right)^T; \mathbf{M}_2 = \left(0, 0, 0, v'h \frac{\partial U}{\partial y}, v'h \frac{\partial V}{\partial y} \right)^T;$$

$$\mathbf{S}_1 = (0, gh \partial z_b / \partial x, h \partial z_b / \partial y, 0, 0)^T;$$

$$\mathbf{S}_2 = (0, \tau_{bx} / \rho, \tau_{by} / \rho, -3\tau_{bx} / \rho + 6\bar{\tau}_{zx} / \rho, -3\tau_{by} / \rho + 6\bar{\tau}_{zy} / \rho)^T$$

$$u = U + u'(2\eta - 1), \quad v = V + v'(2\eta - 1) \quad (2)$$

ここに、 \mathbf{U} =保存量ベクトル、 \mathbf{E} 、 \mathbf{F} = x 、 y 方向の流束ベクトル、 \mathbf{M}_1 、 \mathbf{M}_2 =非保存項ベクトル、 \mathbf{S}_1 =河床勾配ベクトル、 \mathbf{S}_2 =せん断応力ベクトル、 U 、 V = x 、 y 方向の水深平均流速、 u' 、 v' =流速の偏差成分、 h =水深、 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 =河床高、 $\bar{z}=z_b+h/2$ 、 z =鉛直方向である。図-1に定義図を示す。これらの方程式では、水深規模の渦による運動量交換は、モーメント方程式から求める u' 、 v' で評価され、これらを介して、水深平均の運動量保存に影響を及ぼす。

せん断応力ベクトル \mathbf{S}_2 中の $\tau_{bx,y}$ 、 $\bar{\tau}_{zx,y}$ は、底面せん断応力と鉛直方向の流速差によるせん断応力であり、それぞれ式(3)と式(4)で表される。式(3)では、流れが等流状態にない場合、流速の偏差成分 u' 、 v' によって、つまり、底面流速によって底面せん断力の大きさと方向を変化させることで、底面での流れが河床変動に及ぼす影響を考慮している。なお、流速の偏差成分 u' 、 v' が等流状態の値($u'=1/(4\alpha\phi)U$ 、 $v'=1/(4\alpha\phi)V$)となった場合には、式(3)は等流時の底面せん断力と一致することになる。

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho} = \frac{1}{\phi^2} \left[\left\{ U \left(1 + \frac{1}{4\alpha\phi} \right) - u' \right\}^2 + \left\{ V \left(1 + \frac{1}{4\alpha\phi} \right) - v' \right\}^2 \right] \frac{u_b}{\sqrt{u_b^2 + v_b^2}}$$

$$\frac{\tau_{by}}{\rho} = \frac{1}{\phi^2} \left[\left\{ U \left(1 + \frac{1}{4\alpha\phi} \right) - u' \right\}^2 + \left\{ V \left(1 + \frac{1}{4\alpha\phi} \right) - v' \right\}^2 \right] \frac{v_b}{\sqrt{u_b^2 + v_b^2}} \quad (3)$$

$$\frac{\bar{\tau}_{zx}}{\rho} = \bar{v}_t \frac{\partial u}{\partial x} = \bar{v}_t \frac{2u'}{h}, \quad \frac{\bar{\tau}_{zy}}{\rho} = \bar{v}_t \frac{\partial v}{\partial y} = \bar{v}_t \frac{2v'}{h} \quad (4)$$

ここに、 u_b 、 v_b = x 、 y 方向の底面流速($u_b=U-u'$ 、 $v_b=V-v'$)、 ϕ =流速係数であり、マニング・ストリックラー型の式 $\phi=\alpha_T(h/k_s)^{1/6}$ を用いた。式中の係数 α_T は、平坦床での岸・黒木の抵抗則¹⁹⁾と整合するように $\alpha_T=6.9$ 与えた。ここで、 k_s =粗度高さであり、河床表層の累加分率90%粒径 D_{s90} を用いた。また、 \bar{v}_t =水深平均の渦動粘性係数であり、式(2)の流速分布についても $\bar{v}_t = \alpha u_s h$ で近似できるとした。

ここに、 u_s =摩擦速度、 α =係数(= $\kappa/6$)、 κ =カルマン定数(= 0.41)である。

b) 河床変動の基礎方程式

準3次元混合砂礫河床変動モデルの基礎方程式は、全粒径の流砂の連続の式と、同式と交換層の概念に基づく粒径別の流砂の連続の式²⁰⁾から導かれる交換層での粒度比率 F_j の時間変化の方程式であり、それぞれ式(5)と式(6)で表される。

$$(1-\lambda_b) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial (q_{BTx})}{\partial x} + \frac{\partial (q_{BTy})}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

$$(1-\lambda_b) \left[L_a \frac{\partial F_j}{\partial t} + (F_j - f_{lj}) \frac{\partial L_a}{\partial t} \right] =$$

$$- \left[\frac{\partial (q_{Bxj})}{\partial x} + \frac{\partial (q_{Byj})}{\partial y} - f_{lj} \left(\frac{\partial (q_{BTx})}{\partial x} + \frac{\partial (q_{BTy})}{\partial y} \right) \right]$$

ここに、 λ_b =河床材料の空隙率、 q_{BTx} 、 q_{BTy} = x 、 y 方向の流

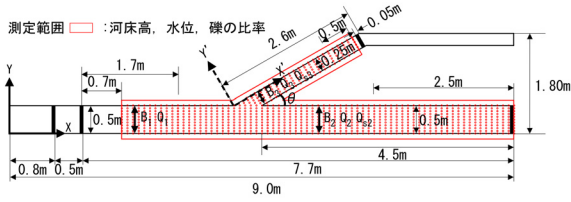


図-2 実験装置の概要

表-1 実験条件

Case名	河床	I	Dg(mm)	s	粒度比率	B ₁ (m)	B ₂ (m)	B ₃ (m)	Q ₁ (m ³ /s)	本川水面形 分流前 分流後
CaseA-a-1	固定床	1/1000	0.89	1.65	0.7	0.5	0.25	0.015		M1 M1
CaseA-a-2										M2 M1
CaseA-a-3										M2 M2
CaseA-b-1	一様砂	1/1000	0.89	1.65	0.7	0.5	0.25	0.015		M1 M1
CaseA-b-2										M1 M1
CaseA-b-3										M1 M2
CaseA-c-1	混合砂	1/1000	0.89	1.65	0.3	0.5	0.25	0.015		M1 M1
CaseA-c-2										M1 M1
CaseA-c-3										M1 M2
CaseB-a-1	固定床	1/1000	0.89	1.65	0.7	0.3	0.25	0.015		M1 M1
CaseB-a-2										M1 M1
CaseB-a-3										M1 M2
CaseB-b-1	一様砂	1/1000	0.89	1.65	0.7	0.3	0.25	0.015		M1 M1
CaseB-b-2										M1 M1
CaseB-b-3										M1 M2
CaseB-c-1	混合砂	1/1000	0.89	1.65	0.3	0.3	0.25	0.015		M1 M1
CaseB-c-2										M1 M1
CaseB-c-3										M1 M2

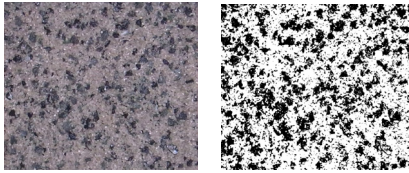


図-3 河床表層の粒度分布(左:撮影写真,右:2値化画像)

砂量, $j=j$ 番目の土砂の粒径を表す添字, f_j =交換層と貯留層との境界での粒度比率, L_a =交換層の厚さ, F_j =交換層での粒度比率, q_{BTx} , q_{BTy} = x , y 方向の全流砂量である。図-1に定義図を示す。

x , y 方向の流砂量は, 全流砂量 q_{BT} と粒径別流砂量 q_{Bj} を, 式(7)のように底面流速に沿って x , y 方向に分配した。なお, 本モデルのように三角形非構造格子を用いた場合に, 最急勾配方向の求め方が確立されているわけではないので, ここでは河床勾配が流砂量方向へ及ぼす影響は考慮していない。この点については, 今後検討したいと考えている。

$$q_{Bxj} = q_{Bj} \cos \theta, \quad q_{Byj} = q_{Bj} \sin \theta$$

$$q_{BTx} = q_{BT} \cos \theta, \quad q_{BTy} = q_{BT} \sin \theta \quad (7)$$

$$\cos \theta = u_b / \sqrt{u_b^2 + v_b^2}; \quad \sin \theta = v_b / \sqrt{u_b^2 + v_b^2}$$

ここに, u_b =底面での x 方向流速(= $U-u'$), v_b =底面での y 方向流速(= $V-v'$)である。また, 全流砂量 q_{BT} と粒径別流砂量 q_{Bj} には式(8)の関係がある。

$$q_{BT} = \sum_{j=1}^N q_{Bj} \quad (8)$$

ここに, N =粒径の分割数である。粒径別流砂量 q_{Bj} の算定には, 遮蔽効果に修正エギアザロフ式を適用した式(9)の芦田・道上²¹⁾の流砂量式を用いた。なお, 無次元有効掃流力は, 抵抗則と整合するように無次元掃流力とした。

$$q_{Bj} = F_j \cdot 17 \cdot \sqrt{sgD_j^3} \tau_{*j}^{3/2} (1 - \tau_{*cj} / \tau_{*j}) (1 - u_{*cj} / u_{*j}) \quad (9)$$

$$\frac{\tau_{*cj}}{\tau_{*scg}} = \begin{cases} 0.843(D_j/D_{sg})^{-1} & D_j/D_{sg} \leq 0.4 \\ \left[\log_{10} 19 / \log_{10} (19 D_j/D_{sg}) \right]^2 & D_j/D_{sg} > 0.4 \end{cases}$$

ここに, D_j =交換層での j 番目の土砂の粒径, D_{sg} =交換層での平均粒径, τ_{*j} = D_j に対応する無次元掃流力, u_{*j} =摩擦速度, τ_{*scg} = D_{sg} に対応する無次元限界掃流力である。

交換層厚 L_a は式(10)より算定した。

$$L_a = n_a D_{90} \quad (10)$$

ここに n_a は係数(ここでは $n_a=1.0$)である。交換層と貯留層との境界での粒度比率 f_j は, 掃流砂の粒度が河床上昇時に堆積層へ取り残される砂礫に及ぼす影響を考慮した Hoey and Ferguson²²⁾の式を用いた。

$$f_j = \begin{cases} F_{bj}(z)_{z=z_b-L_a} & \partial z_b / \partial t < 0 \\ aF_j + (1-a)p_{Bj} & \partial z_b / \partial t \geq 0 \end{cases} \quad (11)$$

ここに $F_b(z)$ =貯留層, p_{Bj} (= q_{Bj}/q_{BT})=流砂量の粒度比率, a =重み係数であり, $a=0-1$ (ここでは $a=0.5$)の値となる。

(2) 数値解法

式(1), 式(5), 式(6)の離散化は, 有限体積法に基づき行った。なお, 時間積分にはEulerの陽解法を用いた。連続の式と運動量・モーメントの保存式の数値流束には, HLLC法¹⁷⁾に河床勾配の取り扱いを組み込んだ数値流束を用いた。同数値流束の詳細については, 参考文献¹⁵⁾を参照されたい。河床変動の数値流束と粒度比率の数値流束には, 新しい時間ステップの粒度比率 F_j が $\sum F_j=1$ や $0 \leq F_j \leq 1$ が満たされないなどの問題を避ける目的で, それぞれ風上型の数値流束を用いた。同数値流束の詳細については, 参考文献¹⁸⁾を参照されたい。

3. 実験の概要

実験は, 分流点上下流の本川の川幅が等しい場合(CaseA), 狭い場合(CaseB)の2通りを想定し, 流れの把握を目的とした固定床(CaseA-a, CaseB-a), 河床変動特性の把握を目的とした一様砂床(CaseA-b, CaseB-b), 混合砂礫床(CaseA-c, CaseB-c)で行った。

実験装置は, 図-2に示すような長さ9.0m×幅1.8mの可変勾配水路中にアクリル製の本川(長さ9.0m, 高さ0.25m, 勾配 $I=1/1,000$)と, 角度 $\theta=30^\circ$ で分流させた支川(長さ2.6m, 幅 $B_3=0.25$ m, 高さ0.25m, 勾配 $I=1/1,000$)を設置したものである。分流点下流の本川の幅を, CaseAでは $B_2=0.5$ m, CaseBでは $B_2=0.3$ mと変化させた。本・支川下流端には四角堰が設置されており, 本川については堰幅によって水位を調節できるようになっている。図中の本川の諸量には分流点上流と下流でそれぞれ下付けの添字1と2を, 支川の諸量には下付けの添字3を付している。

表-1に各Caseの実験条件を示す。CaseA-aとCaseB-aで流況を把握した後, CaseA-aおよびCaseB-aと同一な流入条件や下流端の堰幅等の条件下で一様砂床, 混合砂礫床実験(CaseA-b・c, CaseB-b・c)を行った。CaseA・B-bで

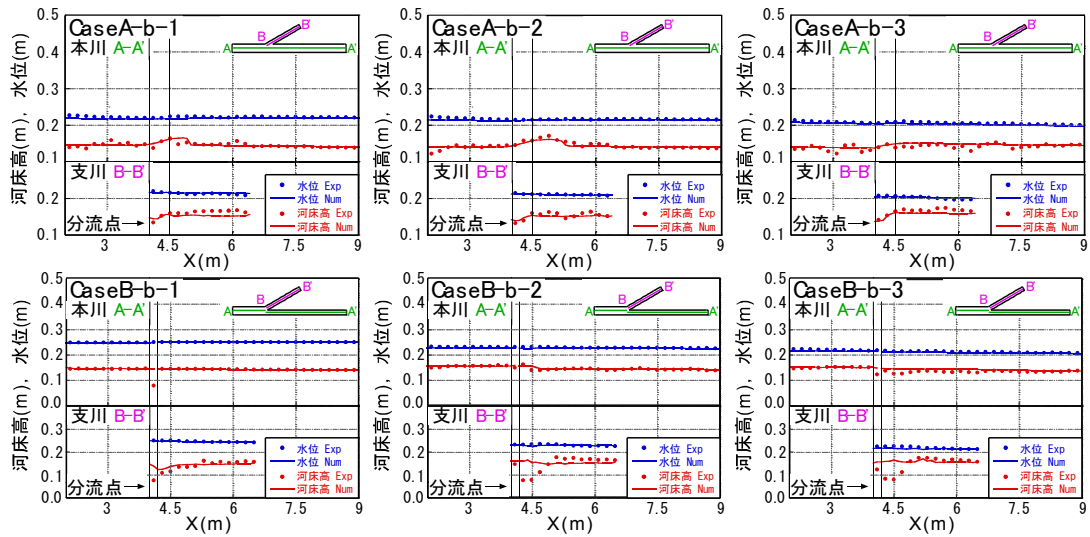


図-4 水路中心軸での水面・河床形状の比較

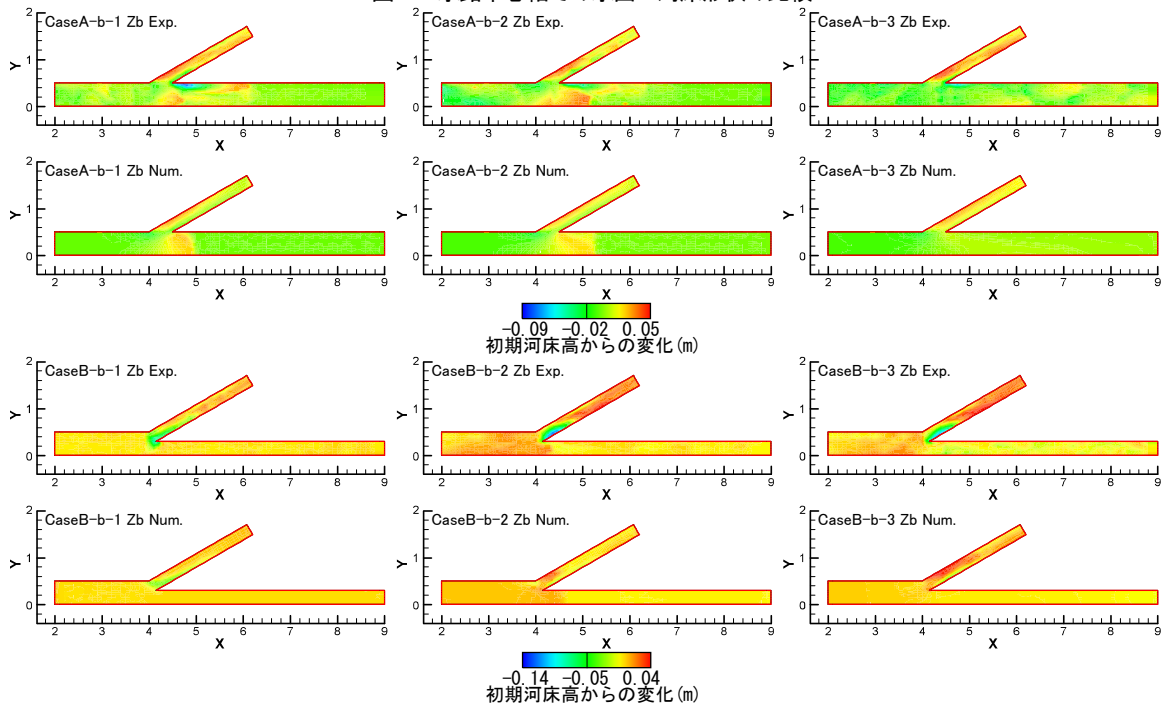


図-5 初期河床を基準面とした河床高コンターの比較

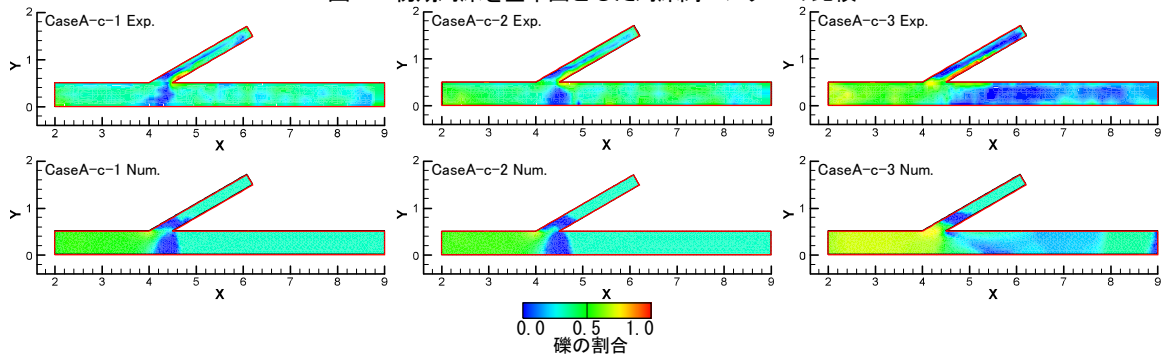


図-6 河床表層材料中の礫の割合

は粒径 $D=0.89\text{mm}$ 、水中比重 $s=1.65$ の一樣砂を、Case A・B-cでは粒径 3.75mm の礫と粒径 0.89mm の砂を3:7の割合で混合し、平均粒径 1.75mm 、水中比重 1.67 の混合砂礫を高さ 0.14m で敷き詰めた。測定項目は、水位 $H(\text{m})$ 、河床高 $Z_b(\text{m})$ 、分派流量 $Q_3(\text{m}^3/\text{s})$ および分派流砂量 Q_2 、 $Q_3(\text{m}^3/\text{s})$ および河床表層と分派流砂量の粒度分布である。

移動床実験では上流から一定流量 $Q_1=0.015(\text{m}^3/\text{s})$ を供給し、下流端から流出した土砂と同量の給砂を行い、本・支川の流量および流砂量が一定であり、目視で河床高に大きな変化がなくなったことを確認した後、測定を開始した。水位はポイントゲージで、河床高はレーザー変位計で測定した。分派流量はバケツで水を回収し、分派流

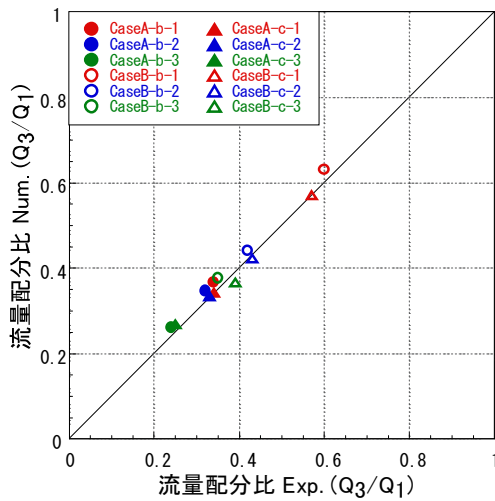


図-7 分派流量の比較

表-2 分派流砂量比の比較

	流砂量比 ($Q_{s3}/(Q_{s2}+Q_{s3})$)	
	Exp.	Num.
CaseA-b-1	0.98	1.00
CaseA-b-2	0.97	1.00
CaseA-b-3	0.68	0.30
CaseA-c-1	0.65	-
CaseA-c-2	0.79	-
CaseA-c-3	0.04	0.00
CaseB-b-1	1.00	1.00
CaseB-b-2	0.93	1.00
CaseB-b-3	0.16	0.26
CaseB-c-1	0.93	1.00
CaseB-c-2	0.56	0.00
CaseB-c-3	0.01	0.00

砂量はふるいで砂を回収し、それぞれ水の体積および砂の重量と時間を計測することで算定した。河床表層での砂礫の割合は、図-3のように、デジタルカメラを用いて河床表層の写真を撮影し、2値化した画像を、画像解析ソフトを用いて面積比を算出することで求めた。なお、同手法の妥当性は、あらかじめ設定した表層での砂礫の割合を±5%の誤差で再現できたことから確認されている。水位と河床表層の砂礫の割合の測定範囲および測定点は図-2に示す通りである。

4. モデルの検証

以下では、一様砂床と混合砂礫床での実験結果 (CaseA-b・c, CaseB-b・c) に基づき本モデルの河床変動の再現性について検討する。なお、本モデルの分流点周辺での流れの再現性については、参考文献¹⁵⁾と同程度の精度で水位・底面流線等の実験結果の再現できることが確認されている。

解析では各Caseの解析対象領域を1537~2102個の三角セルで解析領域を分割した。流れの境界条件には上下流端にそれぞれ流量と水位を、河床変動の境界条件には上流端には流下方向の流砂量(横断方向は0)を、下流端には計算過程で射流が生じた場合に備え河床高を与えた。な

お、河床材料の空隙率 $\lambda_b=0.4$ を与えた。

図-4はCaseA-b-1~3, CaseB-b-1~3の本川・支川の水路中心軸での水面と河床形状について、図-5は初期河床を基準面とした河床高コンターについて、解析結果と実験値との比較を行ったものである。河床コンター図では初期河床から土砂が堆積した場合は正の値、洗掘した場合は負の値となる。本モデルは、図-4の本・支川の水路中心軸については(1) CaseB-2, 3の局所洗掘を除き、水面および河床形状を再現できること、図-5の(2) CaseA-bの支川左岸側で堆積が生じること、(3) CaseA-b-1と2の分流点下流の本川右岸側で堆積が生じること、一方CaseA-b-3では分流点下流の本川右岸側で堆積が生じないこと、(4) 本川右岸堆積の程度はCaseA-b-2で最大となること、(5) CaseB-bでは支川右岸側で洗掘が生じること、(6) CaseB-b-2や3では本川上流で堆積が生じること、などを再現できることが確認できる。一方、(1) CaseA-b, B-bの支川右岸側の局所洗掘、(2) CaseA-b-1, 2の本川左岸側での局所洗掘、(3) CaseB-b-1では分流点周辺での局所洗掘、などを再現できないことが確認できる。

次に、混合砂礫河床の移動床実験に基づき本モデルを検証した。なお、水面・河床形状や河床コンターの再現性については、上記のよう砂床と同様な予測精度であったので、ここでは、紙面の都合上、CaseA-c-1~3の河床表層材料中の礫の割合についてのみ述べる。図-6はCaseA-c-1~3の本川・支川の河床表層材料中の礫の割合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) 分流点上流では主に砂が流送されるため、礫の割合が高くなる様子、(2) 分流点周辺では砂が礫上で堆積するため、そこでの礫の割合が小さくなる様子、などを再現できることが確認できる。一方、(3) 分流点周辺の局所洗掘を再現できないために、そこでの礫の割合などを再現できないことが確認できる。

最後に、分流点での分派流量と分派流砂量の実験結果に基づき、本モデルを検証した。図-7は分派流量の比較を、表-2は、分派流砂量比の比較を行ったものである。なお、表-2中のCaseA-c-1と2で値を示していないのは、いずれも分派流砂量 Q_{s2} , Q_{s3} が0であったためである。これより、(1) 分派流量は1割程度の誤差の範囲で再現できるが、(2)分派流砂量は、再現できないことが確認できる。これは、分派流量は、積分値であり下流端条件で決まるため、定常であれば、分派地点での流速分布等が少々異なっても再現できるのに対し、分派流砂量は分派地点での流速分布等に大きく影響するため、局所洗掘などを再現できない本モデルでは誤差が生じたと考えられる。

以上、本モデルは、分流点周辺の流れをある程度再現できることが確認された。一方で、局所洗掘等、分流点の分派流砂量等を決定する要因となる現象を再現できないことがわかった。これは、本モデルが、静水圧分布を仮定した準3次元モデルであり、鉛直方向の流れを考慮できないためである。これらを踏まえると、本モデルを

中長期の河床変動を予測可能にするためには、まず、非静水圧分布を考慮できるモデルとする必要がある。その場合、当然計算負荷が大きくなるため、本モデルのような静水圧モデルと非静水圧モデルのハイブリッドモデルを構築し、計算効率の向上を図る必要がある。

5. おわりに

本研究では、著者らの開発した準3次元河床変動モデル¹⁵⁾に、モーメント方程式に鉛直方向の流速分布に応じたせん断応力と底面せん断力に底面流速の影響を組み込むとともに、モーメント方程式の離散化に、HLL法¹⁶⁾よりも数値拡散が小さいHLLC法¹⁷⁾を適用するなどの改良を加え、混合砂礫河床変動モデル¹⁸⁾を導入することで、新たな準3次元混合砂礫河床変動モデルを構築した。同モデルを分流点周辺の一様砂および混合砂礫河床での移動床実験結果に適用し検証した結果、同モデルが分流点周辺の河床変動や河床の質を概ね再現可能であるが、局所洗掘等を再現できないために、分派流砂量等の再現に問題が残った。今後は、本モデルを、非静水圧を取り扱うことが可能なモデルとするとともに、本モデルと非静水圧モデルのハイブリッドモデルを構築することで計算効率の向上を図り、維持管理計画を策定するツールとしたい。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金若手研究B(課題番号：25820225、研究代表者：重枝未玲)の助成を受け実施したものである。本研究を遂行するに当たり、本学学部4年生の平松裕樹君、田尻富岳君には、データ整理等で協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省：河川砂防技術基準維持管理編，
http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/gijutsu/gijutsukijun/n/ijikanri/kasen/pdf/gijutsukijun.pdf, 2011.
- 2) 清水康行：河道平面形状の形成における河床・河岸の変動特性の相互関係について，水工学論文集，第47巻，pp.643-648，2003.
- 3) 関根正人：斜面崩落モデルを用いた網状流路の形成過程シミュレーション，水工学論文集，第47巻，pp.637-642，2003.
- 4) 坊野聡子，清水康行，黒木幹男，藤田睦博，吉田義一：ダムを含む河川の流砂と河床変動に関する研究，土木学会論文集，No.565/II-52，pp.61-72，2000.
- 5) 池田駿介，Gary Parker，千代田将明，木村善孝：直線礫床河川の動的安定横断形状とそのスケール，土木学会論文集，第375巻/II-6，pp.117-126，1986.
- 6) 浅野文典，福岡捷二：沖積地河川における安定な川幅・水深—治水と環境の調和を目指した河道断面形の決め方，水

工学論文集，第54巻，pp.1021-1026，2010.

- 7) 室田 明：開水路分水路の研究，土木学会論文集，第70号別冊1-1，pp.1-33，1960.
- 8) 芦田和男，川合茂：分岐部周辺における流れの水理特性について，京都大学防災研究所年報，第22号 B-2，pp.491-506，1979.
- 9) 川合 茂，芦田和男：固定床開水路分流における流量・流量配分比に関する実験的研究，土木学会論文集，第405号/II-1，pp.139-146，1989.
- 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) 星野 剛，安田浩保，永多朋紀：四分木構造格子を導入した自然河川における分岐点と合流点の数値解法，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.68，No.4，I_853-I_858，2012.
- 12) 重枝未玲，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) 輿石 大，内田龍彦，福岡捷二：水表面流速方程式を付加した底面流速解析法の開発と河川合流部への適用，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.68，No.4，I_835-I_840，2012.
- 14) 坂本 洋，重枝未玲，秋山壽一郎：準3次元洪水流モデルを用いた同規模河川合流点流れの数値解析，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.68，No.4，I_841-I_846，2012.
- 15) 坂本 洋，重枝未玲，秋山壽一郎，新谷恭平：準3次元河床変動モデルの構築と河川合流点の河床変動への適用，土木学会論文集B1(水工学) Vol.69，No.4，I_991-I_996，2013.
- 16) Hatem, 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.
- 17) Toro, E. F., Spruce, M. and Speares, W.: Restoration of the contact surface in the HLL Riemann solver, *Shock Waves*, Vol.4, pp.25-34, 2004.
- 18) 重枝未玲，秋山壽一郎，坂本 洋：混合砂礫河床変動モデルの構築と粗粒化・細粒化を伴う河床変動への適用，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.68，No.4，I_1189-I_1194，2012.
- 19) 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.
- 20) 平野宗夫：Armoringsを伴う河床低下について，土木学会論文報告集，第195号，pp.55-65，1971.
- 21) 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，第206号，pp.59-69，1972.
- 22) Hoey, T. B. and Ferguson, R. I.: Numerical simulation of downstream fining by selective transport in gravel bed rivers: Model development and illustration, *Water Resources and Research*, Vol.30, pp.2251-2260, 1994.

(2013. 9. 30受付)