

# 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

DEVELOPMENT OF QUASI-3D NUMERICAL MODEL FOR ESTIMATING BED  
VARIATION AND ITS APPLICATION TO FLOWS IN A CONFLUENCE

坂本 洋<sup>1</sup>・重枝未玲<sup>2</sup>・秋山壽一郎<sup>3</sup>・新谷恭平<sup>4</sup>

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

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>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)

<sup>3</sup>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)

<sup>4</sup>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 symmetrical river confluence 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 HLL(Harten, Lax and van Leer(1983)) and 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 symmetrical river confluence. It shows that the model can reproduce the complex behavior of the flows and bed variation with reasonable accuracy.

**Key Words** : Numerical model, quasi-3D, bed variation, approximate Riemann solver, secondary flows, river confluence

## 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<sup>1)</sup>。適切な維持管理を行うためには、河道掘削、洗掘対策等を、どの区間で、どのタイミングで、どの程度行うかを明らかにする必要がある。そのためには、出水時に洪水や河床変動などの状況を把握することが不可欠である。

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<sup>2)</sup>が生じることから、維持管理上注意を要する地点である。そのため、合流点での流れ<sup>3),4)</sup>や河床変動特性<sup>5),6),7)</sup>の把握を目的とした実験や流れの予測を目的とした数値モデルの開発<sup>8),9)</sup>が活発に行われている。これらの研究から、河川合流点周辺では、合流点のらせん流の影響によって底面流速が分離する特徴的な3次元性の強い流れ<sup>4)</sup>が生じること、3次元性の強さは、本川と支川との水路幅、勾配、粗度係数つまり河道特性と流量によ

て決まる水面形の関係によって変化すること<sup>7),9)</sup>、らせん流が合流点の河床形状に大きな影響を及ぼすこと<sup>6)</sup>、などがわかっており、そのため、そこでの流れの予測を目的とした数値モデルは、いずれも河川合流点での3次元性の強い流れを取り扱うことが可能な準3次元モデル<sup>8),9)</sup>となっている。

近年では、準3次元モデルをベースに、河床変動モデルを組み込んだ新たな準3次元河床変動モデルの開発も行われており、水制周辺の河床変動予測等<sup>10)</sup>もなされている。このようなモデルを用いることで、合流点での河床変動予測もより高い精度で予測できると考えられるが、そのようなモデルが合流点周辺に適用された例は、著者らの知る限り存在しない。

本研究は、以上のような背景を踏まえ、流れと河床変動の準3次元モデルの開発を最終的な目的としている。ここでは、著者らの開発した非構造格子を用いた有限体積法と近似リーマン解法に基づく準3次元モデル<sup>9)</sup>を改良するとともに、河床変動モデルを組み込んだ新たな準3次元河床変動モデルを構築し、河川合流点周辺の流れと

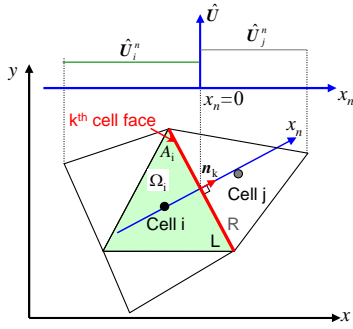


図-1 検査体積

河床変動の実験結果に基づき、同モデルの予測精度を検証した。

## 2. モデルの概要

ここでは、著者らの開発した有限体積法と近似リーマン解法に基づく準3次元モデル<sup>9)</sup>について、圧力分布に静水圧分布を仮定したモデルとするとともに、水深平均の諸量を求める数値解法に、これまで用いたHLL法<sup>11)</sup>に比べ数値拡散を抑えることが可能なHLLC法<sup>12)</sup>を適用し、かつ、数値拡散を含め静水時に圧力と河床勾配項とがバランスする河床高の取り扱い<sup>13)</sup>を組み込むなどの改良を加えた。さらに、同モデルに河床変動モデルを組み込んだ準3次元河床変動モデルを新たに構築した。

### (1) 基礎方程式

#### a) 流れの基礎方程式

準3次元河床変動モデルの流れの基礎方程式は、圧力 $p$ の鉛直分布に静水圧分布を仮定し、 $x, y$ 軸方向の流速 $u, v$ の流速分布を式(1)のように線形近似した式(2)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。

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

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + M_1 + M_2 + S_1 + S_2 = 0 \quad (2)$$

$$U = (h, Uh, Vh, u'h, v'h)^T;$$

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

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

$$M_1 = \left( 0, 0, 0, u'h \frac{\partial U}{\partial x}, u'h \frac{\partial V}{\partial x} \right)^T; \quad M_2 = \left( 0, 0, 0, v'h \frac{\partial U}{\partial y}, v'h \frac{\partial V}{\partial y} \right)^T;$$

$$S_1 = (0, -ghS_{ox}, -ghS_{oy}, 0, 0)^T;$$

$$S_2 = (0, ghS_{fx}, ghS_{fy}, -3ghS_{fx}, -3ghS_{fy})^T$$

ここに、 $U$ =保存量ベクトル、 $E, F$ = $x, y$ 方向の流束ベクトル、 $M_{1,2}$ =非保存項ベクトル、 $S_1$ =河床勾配ベクトル、 $S_2$ =摩擦勾配ベクトル、 $U, V$ = $x, y$ 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、河床と摩擦勾配はそれぞれ式(3)と式(4)で表される。

$$S_{0x} = -\partial z_b / \partial x; \quad S_{0y} = -\partial z_b / \partial y \quad (3)$$

$S_{fx} = n^2 U \sqrt{U^2 + V^2} / h^{4/3}; \quad S_{fy} = n^2 V \sqrt{U^2 + V^2} / h^{4/3}$  (4)  
ここに、 $n$ =粗度係数であり、平坦床での岸・黒木の式から、 $n=D^{1/6}$  ( $6.9 \cdot g^{0.5}$ )とした。ここに、 $D$ =河床材料の粒径である。

式(2)の方程式は、図-1に示すセル境界線の法線方向 $x_n$ に回転させることで $x_n$ に対する1次元浅水方程式として式(5)のように表される。

$$\frac{\partial \hat{U}}{\partial t} + \frac{\partial \hat{E}}{\partial x_n} + \hat{S}_1 + \hat{S}_2 = 0 \quad (5)$$

$$\hat{U} = T \cdot U = (h, U_n, h, U_t, h, u'_n, u'_t, h)^T;$$

$$\hat{E} = \left( U_n h, U_n^2 h + \frac{1}{3}u_n'^2 h + \frac{1}{2}gh^2, U_n U_t h + \frac{1}{3}v_n'^2 h, U_n u_n' h, U_n v_n' h \right)^T;$$

$$= \hat{E}(\hat{U}) = T \cdot (E \cdot n_x + F \cdot n_y)$$

$$\hat{M} = (0, 0, 0, u'_n h \partial U_n / \partial x_n, u'_t h \partial U_t / \partial x_n);$$

$$\hat{S}_1 = (0, gh \partial z_b / \partial x_n, 0, 0, 0) = T \cdot S_1;$$

$$\hat{S}_2 = (0, gh S_{fn}, 0, -3gh S_{fn}, 0) = T \cdot S_2$$

ここに、 $u_n = x_n$ 方向の流速(= $u_n + v_n$ )、 $u_t = x_n$ に垂直な方向の流速(= $-u_n + v_n$ )、 $T$ =式(6)の回転行列である。

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & n_x & n_y & 0 & 0 \\ 0 & -n_y & n_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & n_x & n_y \\ 0 & 0 & 0 & -n_y & n_x \end{pmatrix} \quad (6)$$

また、 $\hat{E}$ のヤコビアン $\hat{A}$ とその固有値はそれぞれ式(7)と式(8)で表される。

$$\hat{A} = \frac{\partial \hat{E}}{\partial \hat{U}} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -U_n^2 - \frac{1}{3}u_n'^2 + gh & 2U_n & 0 & \frac{2}{3}u_n' & 0 \\ -U_n U_t - \frac{1}{3}u_n' u_t' & U_t & U_n & \frac{1}{3}u_t' & \frac{1}{3}u_n' \\ -U_n u_n' & u_n' & 0 & U_n & 0 \\ -U_n u_t' & u_t' & 0 & 0 & U_n \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\lambda_1 = U_n - \sqrt{u_n'^2/3 + gh}; \lambda_3 = U_n + \sqrt{u_n'^2/3 + gh}; \lambda_{2,5} = U_n \quad (8)$$

#### b) 河床変動の基礎方程式

準3次元河床変動モデルの河床変動の基礎方程式は、式(9)の流砂の連続の式である。

$$(1 - \lambda_b) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial (q_{Bx})}{\partial x} + \frac{\partial (q_{By})}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

ここに、 $\lambda_b$ =河床材料の空隙率、 $q_{Bx}, q_{By}$ = $x, y$ 方向の流砂量である。

$x, y$ 方向の流砂量 $q_{Bx}, q_{By}$ については、芦田・道上<sup>14)</sup>の式より得られる流砂量 $q_B$ を、式(10)のように底面流速に沿って $x, y$ 方向に分配した。

$$q_{Bx} = q_B \cos \theta; \quad q_{By} = q_B \sin \theta \quad (10)$$

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

ここに、 $u_b(=U-u')$ =底面での $x$ 方向流速、 $v_b(=V-v')$ =底面での $y$ 方向流速である。

### (2) 数値解法

#### a) 有限体積法

図-1に示す任意の検査体積 $\Omega$ で、式(2)を積分した後、

ガウスの発散定理を適用すると、式(11)の積分型の浅水方程式が得られる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} U d\Omega + \oint_{\partial\Omega} (\mathbf{E} \cdot \mathbf{n}_x + \mathbf{F} \cdot \mathbf{n}_y) dL + \int_{\Omega} (\mathbf{M}_1 + \mathbf{M}_2 + \mathbf{S}_1 + \mathbf{S}_2) d\Omega = \mathbf{0} \quad (11)$$

ここに、 $\partial\Omega$ =検査体積の境界線、 $L=\partial\Omega$ の長さ、 $\mathbf{n}=(n_x, n_y)$ =外向き単位法線ベクトルである。

計算領域を分割した微小領域セル*i*の検査体積 $\Omega_i$ とし、式(2)を有限体積法に基づき離散化すると式(12)が得られる。なお、時間積分にはEulerの陽解法を用いた。

$$U_i^{t+1} = U_i^t - \frac{\Delta t}{A_i} \sum_{k=1}^{N_i} (\mathbf{T}^{-1} \cdot \hat{\mathbf{E}}^*)_k dL_k \quad (12)$$

$$- \frac{\Delta t}{A_i} \int_V \{ (\mathbf{T}^{-1} \cdot \hat{\mathbf{M}}) + (\mathbf{T}^{-1} \cdot \hat{\mathbf{S}}_i) \} dV - \Delta t S_{2i}$$

$$z_{bi}^{t+1} = z_{bi}^t - \frac{1}{1-\lambda_b} \frac{\Delta t}{A_i} \sum_{k=1}^{N_i} (q_B^* \cdot \mathbf{n})_k dL_k$$

ここに、 $U_i$  = セル *i* での  $U$  の平均値、 $V_i$  = セル *i* の面積、 $t$  = 時間に対する添字、 $k$  = セル *i* を構成するセル境界線に対する添字、 $N_i$  = セル *i* を構成するセル境界線の総数、 $\Delta t$  = 時間の刻み幅、 $L_k$  =  $k$  番目のセル境界線の長さ、 $(\mathbf{T}^{-1} \cdot \hat{\mathbf{E}}^*)_k$  =  $k$  番目のセル境界線を流入出する数値流束、 $S_{2i}$  = セル *i* での  $S_2$  の平均値、 $z_{bi}$  = セル *i* での河床高の平均値、 $(q_B^* \cdot \mathbf{n})_k$  = 流砂量の数値流束である。

非保存項と発生項の離散化は式(13)のように行う。

$$- \frac{\Delta t}{A_i} \int_V \{ (\mathbf{T}^{-1} \cdot \hat{\mathbf{M}}) + (\mathbf{T}^{-1} \cdot \hat{\mathbf{S}}_i) \} dV = - \frac{\Delta t}{A_i} \sum_{k=1}^{N_i} \left( \mathbf{T}_k^{-1} \cdot \hat{\mathbf{M}}_{Lk} + \mathbf{T}_k^{-1} \cdot \hat{\mathbf{S}}_{iLk} \right) dL_k \quad (13)$$

ここに、下添字LとR=それぞれセル境界線のL, R側の諸量を表す添字、 $\hat{\mathbf{M}}_L^*$ ,  $\hat{\mathbf{S}}_{iL}^*$ =それぞれ、L, R側の非保存項ベクトル、発生項ベクトルに対応する数値流束である。  
b) 数値流束

連続の式と運動量保存式の数値流束には、HLLC法<sup>12)</sup>に河床勾配の取り扱いを組み込んだものを、モーメントの保存式にはHLL法<sup>11)</sup>の数値流束を用いた。HLL法、HLLC法のいずれも近似リーマン解法の一つである。式(5)に基づき  $x_n$  方向の数値流束を求め、 $T$  の逆行行列  $T^{-1}$  で変換することで式(12)の数値流束とした。流砂量の連続の式については、風上型の数値流束を用いた。それぞれ数値流束は以下に示す通りである。

連続の式と運動量保存式の数値流束に用いたHLLC法<sup>12),13)</sup>の数値流束は式(14)で表される。

$$S_L \text{ 0の場合: } \hat{\mathbf{E}}^*_k = \hat{\mathbf{E}}_L, \quad S_R \text{ 0の場合: } \hat{\mathbf{E}}^*_k = \hat{\mathbf{E}}_R$$

$S_L < 0 < S_R$  の場合:

$$S_M^+ > 0 \text{ の場合: } \hat{\mathbf{E}}^*_k = \hat{\mathbf{E}}_L + S_L (\hat{\mathbf{U}}_L^- - \hat{\mathbf{U}}_L) \quad (14)$$

$$S_M^- \text{ 0の場合: } \hat{\mathbf{E}}^*_k = \hat{\mathbf{E}}_R + S_R (\hat{\mathbf{U}}_R^+ - \hat{\mathbf{U}}_R)$$

$$\hat{\mathbf{U}}_L^- = \hat{\mathbf{U}}_R^+ - \bar{\mathbf{H}}^+; \quad \hat{\mathbf{U}}_R^+ = h_R^+ (1, S_M^+, U_{iR})^T;$$

$$S_M^+ = \frac{S_L h_R (U_{nR} - S_R) - S_R h_L (U_{nL} - S_L) + S_R S_L \bar{\mathbf{G}}_1^+}{h_R (U_{nR} - S_R) - h_L (U_{nL} - S_L) + S_L \bar{\mathbf{G}}_1^+};$$

$$h_R^+ = \frac{h_L (U_{nL} - S_L) - S_L \bar{\mathbf{G}}_1^+}{S_M^+ - S_L}; \quad \bar{\mathbf{G}}_1^+ = \frac{g \tilde{h} (z_{bR} - z_{bL})}{\tilde{\lambda}_L \tilde{\lambda}_R} (1, 0, u_{iR})^T$$

$$\hat{\mathbf{U}}_R^+ = \hat{\mathbf{U}}_L^- + \bar{\mathbf{H}}^-; \quad \hat{\mathbf{U}}_L^- = h_L^- (1, S_M^-, U_{iR})^T;$$

$$S_M^- = \frac{S_L h_R (U_{nR} - S_R) - S_R h_L (U_{nL} - S_L) + S_R S_L \bar{\mathbf{G}}_1^-}{h_R (U_{nR} - S_R) - h_L (U_{nL} - S_L) + S_R \bar{\mathbf{G}}_1^-};$$

$$h_L^- = \frac{h_R (U_{nR} - S_R) + S_R \bar{\mathbf{G}}_1^-}{S_M^- - S_R}; \quad \bar{\mathbf{G}}_1^- = \frac{g \tilde{h} (z_{bR} - z_{bL})}{\tilde{\lambda}_L \tilde{\lambda}_R} (1, 0, u_{iR})^T$$

ここに、 $S_L, S_R=L, R$ 側の特性速度であり、それぞれ式(15)で求めた。

$$S_L = \begin{cases} \tilde{\lambda}_L & \text{if } |\tilde{\lambda}_L| \geq \delta_L/2 \\ \min(\tilde{\lambda}_L, \tilde{\lambda}_L^-, \tilde{\lambda}_R^-) & \text{if } |\tilde{\lambda}_L| < \delta_L/2 \end{cases};$$

$$S_R = \begin{cases} \tilde{\lambda}_R & \text{if } |\tilde{\lambda}_R| \geq \delta_R/2 \\ \max(\tilde{\lambda}_R, \tilde{\lambda}_L^+, \tilde{\lambda}_R^+) & \text{if } |\tilde{\lambda}_R| < \delta_R/2 \end{cases}$$

$$\delta_L = \max(0, 4(\lambda_R^- - \lambda_L^-)); \quad \delta_R = \max(0, 4(\lambda_R^+ - \lambda_L^+)) \quad (15)$$

また、非保存項ベクトルと空間微分を含む発生項ベクトル  $S_1$  については、数値流束と同様に特性速度に基づき風上化を行い、式(16)のように離散化を行った。

$$S_L \text{ 0の場合: } \hat{\mathbf{M}}_{Lk}^* + \hat{\mathbf{S}}_{iLk}^* = \mathbf{0}; \quad \hat{\mathbf{M}}_{Rk}^* + \hat{\mathbf{S}}_{iRk}^* = \hat{\mathbf{M}} + \hat{\mathbf{S}}_1$$

$$S_R \text{ 0の場合: } \hat{\mathbf{M}}_{Lk}^* + \hat{\mathbf{S}}_{iLk}^* = \hat{\mathbf{M}} + \hat{\mathbf{S}}_1; \quad \hat{\mathbf{M}}_{Rk}^* + \hat{\mathbf{S}}_{iRk}^* = \mathbf{0}$$

$$S_L < 0 < S_R \text{ の場合: } \quad (16)$$

$$S_M^+ > 0 \text{ の場合: } \hat{\mathbf{M}}_{Lk}^* + \hat{\mathbf{S}}_{iLk}^* = \mathbf{0}; \quad \hat{\mathbf{M}}_{Rk}^* + \hat{\mathbf{S}}_{iRk}^* = \hat{\mathbf{M}} + \hat{\mathbf{S}}_1$$

$$S_M^- < 0 \text{ の場合: } \hat{\mathbf{M}}_{Lk}^* + \hat{\mathbf{S}}_{iLk}^* = \hat{\mathbf{M}} + \hat{\mathbf{S}}_1; \quad \hat{\mathbf{M}}_{Rk}^* + \hat{\mathbf{S}}_{iRk}^* = \mathbf{0}$$

モーメントの保存式に用いたHLL法の数値流束<sup>11)</sup>は式(17)で表される。

$$S_L \text{ 0の場合: } \hat{\mathbf{E}}^* = \hat{\mathbf{E}}_L, \quad S_R \text{ 0の場合: } \hat{\mathbf{E}}^* = \hat{\mathbf{E}}_R$$

$$S_L < 0 < S_R \text{ の場合: } \quad (17)$$

$$\hat{\mathbf{E}}^* = \frac{S_R \cdot \hat{\mathbf{E}}_L - S_L \cdot \hat{\mathbf{E}}_R + S_R S_L (\hat{\mathbf{U}}_R - \hat{\mathbf{U}}_L)}{S_R - S_L}$$

また、非保存項ベクトルと発生項ベクトルに対応する数値流束は、式(18)で表される。

$$S_L \text{ 0の場合: } \hat{\mathbf{M}}_{Lk}^* + \hat{\mathbf{S}}_{iLk}^* = \mathbf{0}; \quad \hat{\mathbf{M}}_{Rk}^* + \hat{\mathbf{S}}_{iRk}^* = \hat{\mathbf{M}} + \hat{\mathbf{S}}_1$$

$$S_R \text{ 0の場合: } \hat{\mathbf{M}}_{Lk}^* + \hat{\mathbf{S}}_{iLk}^* = \mathbf{0}; \quad \hat{\mathbf{M}}_{Rk}^* + \hat{\mathbf{S}}_{iRk}^* = \hat{\mathbf{M}} + \hat{\mathbf{S}}_1$$

$$S_L < 0 < S_R \text{ の場合: } \quad (18)$$

$$\hat{\mathbf{S}}_{iL}^* = - \frac{S_L (\hat{\mathbf{M}} + \hat{\mathbf{S}}_1 - S_R \cdot \hat{\mathbf{G}})}{S_R - S_L}; \quad \hat{\mathbf{S}}_{iR}^* = \frac{S_R (\hat{\mathbf{M}} + \hat{\mathbf{S}}_1 - S_L \cdot \hat{\mathbf{G}})}{S_R - S_L}$$

ここに、 $\bar{\mathbf{G}} = \tilde{J}^{-1} \cdot \bar{\mathbf{S}}_1 = g \tilde{h} (z_{bR} - z_{bL}) / (\tilde{\lambda}_L \tilde{\lambda}_R) (1, 0, u_i)^T$  である。

流砂の連続の式に用いた数値流束は式(19)で表される。

$$q_B^* \cdot \mathbf{n} = 0.5 \left\{ (q_{BL} + q_{BR}) - 0.5 \left[ \frac{q_{BR} - q_{BL}}{z_{bR} - z_{bL}} (z_{bR} - z_{bL}) \right] \right\} \quad (19)$$

### 3. 実験の概要

実験は、流況と河床変動特性の把握を目的に、それぞれ固定床(CaseA)と移動床(CaseB)で行った。

実験装置は、図-2に示すように、長さ9m×幅1.9mの可変勾配水路中に、本川に支川を合流させたアクリル製の水路を設置したものである。本川の諸量については合

流点上流と下流でそれぞれ下付けの添字1と3を，支川の諸量については下付けの添字2を付している．

実験条件は表-1に示す通りである．水路形状については，上記の調査結果で実際に存在した組み合わせを用い，合流点上流の本支川の水路幅 $B_1=B_2=0.4\text{m}$ ，合流角度 $\theta=15^\circ$ とし，CaseA(固定床)で上下流での等流水深および限界水深の位置関係が変化するように合流点下流の水路幅 $B_3$ を $(B_2+B_1)/B_3=0.80\sim 1.33$ の範囲で設定した．流量比 $Q_2/Q_1$ については，合流点上流の本支川の水路幅比 $B_2/B_1$ と等しくなるように $Q_2/Q_1=1$ とし，下流端水位についてはCaseA(固定床)で合流点下流での水面形が堰上げ背水，低下背水となるように設定した．表-1のCase名はCaseA-

×は，は水路平面形状を，×はそれぞれ合流点下流，合流点周辺，合流点上流の水面形を表している．が1の場合は下流の等流水深は上流の等流水深よりも高く，2の場合は等しく，3の場合は低くなる．また，×中の数字は，0の場合は水面形が等流であること，1の場合は堰上げ背水であること，2の場合は低下背水であることを表している．CaseB中の番号は，CaseAと同様にしている．河床勾配は，本支川共に1/800に設定し，移動床の実験では，粒径 $D=0.00089\text{m}$ ，水中比重1.65の一樣砂を0.06mで敷き詰めて行った．

測定項目は，CaseAでは水位と水表面・水深平均流速および底面流速，CaseBでは水位，河床高である．固定床実験では定常状態であることを確認した後，移動床実験では上流端においては河床が低下しないように給砂を行い，平衡状態であることを確認した後，測定を開始した．水位についてはポイントゲージで，河床高についてはレーザー変位計で，水表面流速の測定については直径約5mmの発砲スチロール球を，底面流速の測定については直径約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解析を行うことで求めた．なお，プラスチック球は流れに追従するわけではないので流速値は正確な値ではない．そこで，以下では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．測定点は図-3に示す通りであり，いずれの測定も，縦断方向に10cm，横断方向に5cm間隔で行った．

#### 4．河川合流点の流れと河床変動への適用

まず，固定床での合流点周辺の流れの実験結果に基づき，次に移動床での合流点周辺の河床変動の実験結果に基づき，本モデルの流れと河床変動の再現性について検証する．

固定床での流れの実験結果については，CaseA-1-201，CaseA-2-200，CaseA-3-202は，参考文献9)のCase1~3と同様であり，本モデルでも参考文献9)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

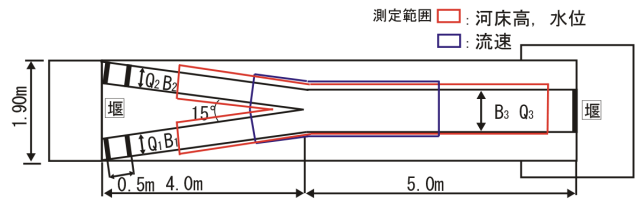


図-2 実験装置の概要

表-1 実験条件

Case	☆河床	○平面形状			$Q_1/Q_2$	$Q_2/Q_3$	$Q_3(\text{m}^3/\text{s})$	水面形	
		$B_2/B_1$	$(B_1+B_2)/B_3$	$B_3(\text{m})$				□下流-△周辺-×上流	
CaseA-1-101	固定床	1	1.33	0.6	0.5	0.5	0.016	M1-等流-M1	
CaseA-1-201								M2-等流-M1	
CaseA-2-100								M1-等流-等流	
CaseA-2-200	移動床	1	1.00	0.8	0.5	0.5	0.016	M2-等流-等流	
CaseA-3-102								M1-等流-M2	
CaseA-3-202								M2-等流-M2	
CaseB-1-101			1.33	0.6				-	
CaseB-1-201			1.00	0.8				-	
CaseB-2-100			1.00	0.8				-	
CaseB-2-200			0.80	1.0				-	
CaseB-3-102			0.80	1.0				-	
CaseB-3-202			0.80	1.0				-	

※ Case名は次のように設定  
Case ☆ - ○ - □ △ ×

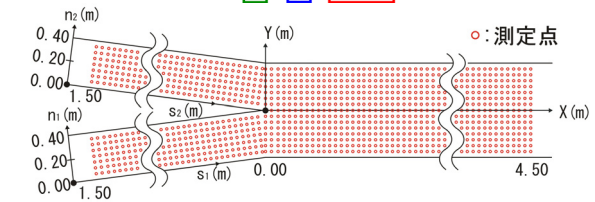


図-3 測定点

たので，ここではCaseA-1-101，CaseA-2-100，CaseA-3-102の検証結果のみを示す．なお，参考文献9)のモデルでは初期条件等の解析条件によっては，計算が不安定となり計算が継続できない場合があったが，本モデルではそのような状況は生じず，モデルの安定性は向上した．

河床変動の実験結果については，本モデルは，いずれのCaseについても同様な精度で再現できることが確認されたので，ここではCaseB-1-101，CaseB-2-100，CaseB-3-102の検証結果のみ示している．

#### (1) 解析の概要

解析では各Caseの解析対象領域を3225~7668個の三角セルで解析領域を分割した．固定床のCaseAについてのみ水路の粗度係数 $n$ は0.01とした．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下流端に河床高を与えた．なお，河床材料の空隙率 $\lambda_0=0.4$ を与えた．

#### (2) CaseAの実験結果に基づく流れの再現性の検討

図-4は，CaseA-1-101，CaseA-2-100，CaseA-3-102の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，図-5は，水深平均・底面流線について，解析結果と実験値との比較を行ったものである．なお，図-4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，図-5中には水深平均流線には流速コンターを併せて示している．これらより，本モデルは，河道平面形状の違いにより，(1) 水面形状が，CaseA-1-101のように堰上げを受けるものから，CaseA-3-102のように合流点周辺で水位が低下するものへと変化する様子や，(2) 底面流線が，合流点下流でCaseA-1-101のように水深平均流線とあま



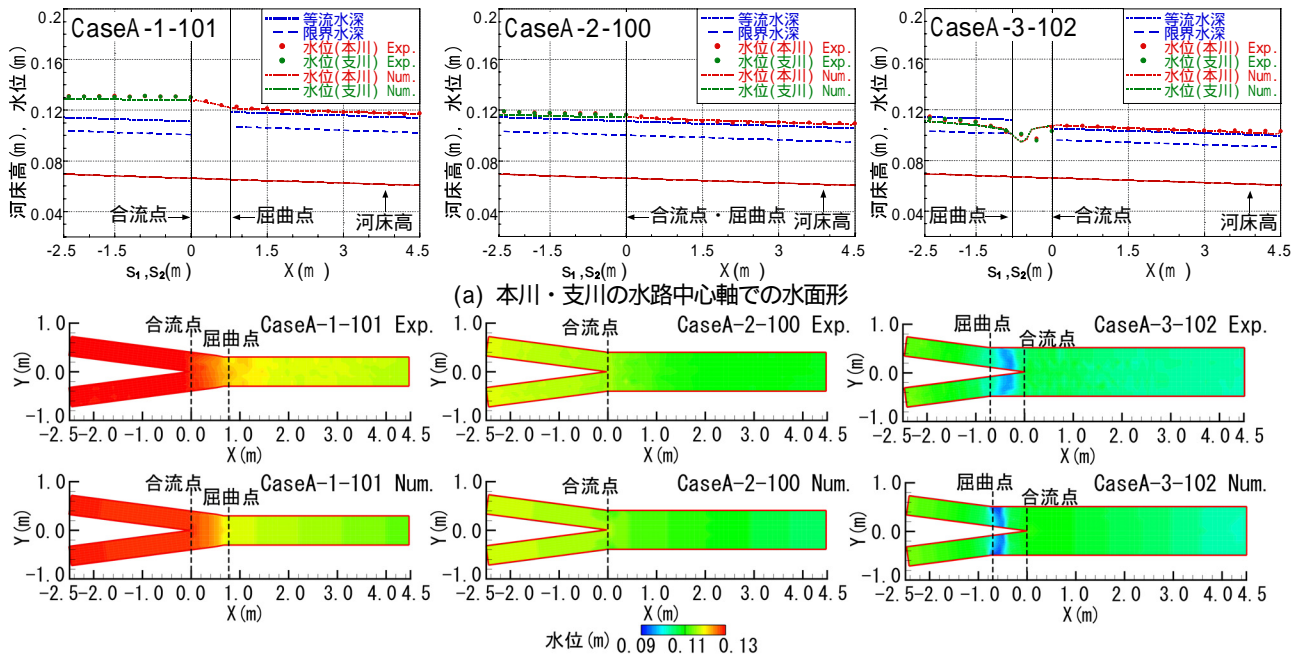


図-4 本川・支川の水路中心軸での水面形と水位コンターの比較

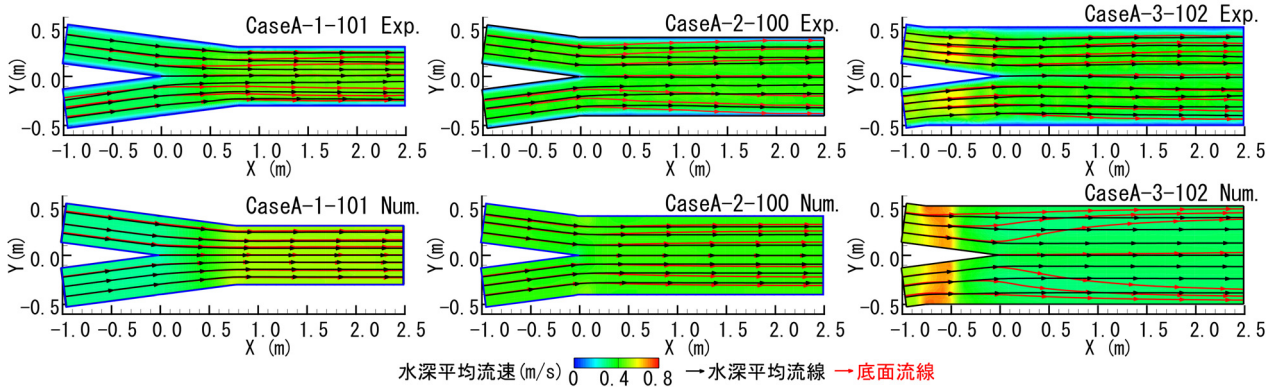


図-5 水深平均・底面流線の比較(上:実験値,下:解析結果)

り変化しないものから, CaseA-3-102では合流点周辺で側壁方向へ大きく曲げられるものへと変化する様子, などの実験結果を概ね再現していること, また, (3) CaseA-3-102の合流点周辺では跳水が発生しており, その区間では若干の違いはあるものの水位・流速コンターも再現できること, などが確認できる. このように, 本モデルは, 河道平面形状(今回の実験では水路幅)と流量による合流点上下流の等流・限界水深の相対的な関係で変化する河川合流点周辺の流れを概ね予測できるが, 底面流線の曲がり等を過大に評価するなど, モデルに更なる改善が必要であることも確認された.

### (3) CaseBの実験結果に基づく河床変動の再現性の検討

図-6は, CaseB-1-101, CaseB-2-100, CaseB-3-102の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, 図-7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. 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. これらより, 本モデルは, (1) いずれのCaseについても水面形状は概ね再現できるが, 合流

点下流で生じる洗掘深を過小に評価すること, かししながら, (2) CaseB-1-101では合流点上流では初期河床高からの変化はほとんどなく, 合流部下流で水路中央に洗掘が生じること, また, 屈曲点周辺の洗掘形状はY型となること, (3) CaseB-2-100では合流点上流でCaseB-1-101と同様に初期河床高からの変化はほとんどなく, 合流・屈曲点下流で水路中央に洗掘が生じるとともに, 側壁側に土砂が堆積すること, (4) CaseB-3-102では屈曲点から合流点下流で側壁側に土砂が堆積すること, などの実験結果の特徴を的確に捉えていることが確認できる. このように, 本モデルは, 河道平面形状(今回の実験では水路幅)と流量による合流点上下流の等流・限界水深の相対的な関係で変化する河川合流点周辺の河床変動特性を概ね予測できるが, 洗掘深を過小に評価するなど, モデルにさらなる改善が必要であることも確認された.

## 5. おわりに

本研究では, 有限体積法と近似リーマン解法に基づく

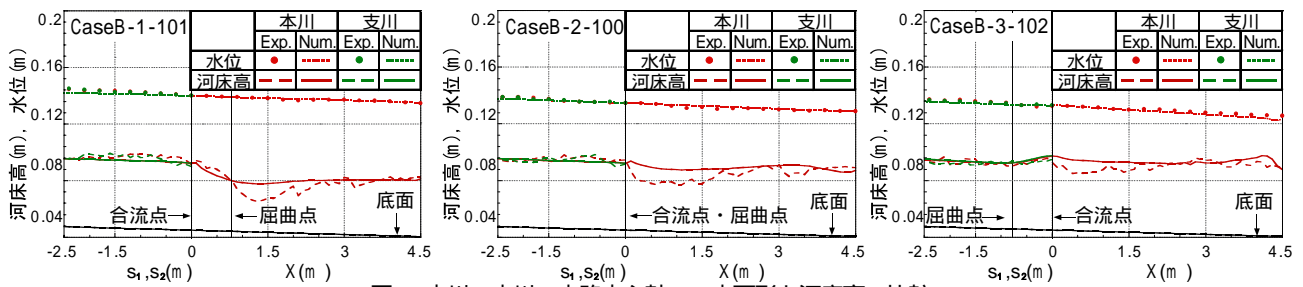


図-6 本川・支川の水路中心軸での水面形と河床高の比較

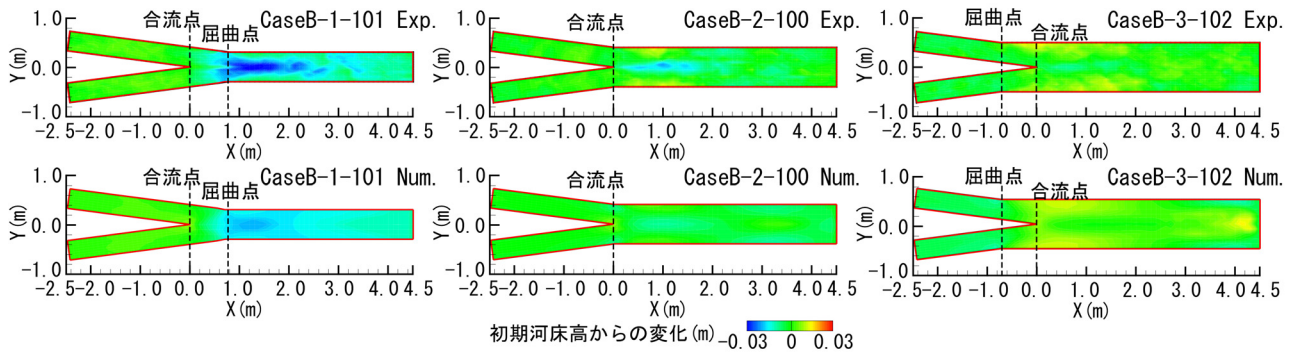


図-7 河床高コンターの比較(上:実験値,下:解析結果)

準3次元モデル<sup>9)</sup>の改良と河床変動モデルを組み込んだ新たな準3次元河床変動モデルを構築し、同モデルの予測精度について、河川合流点周辺の流れと河床変動の実験結果に基づき検証した。その結果、本モデルは、河道平面形状(今回の実験では水路幅)と流量による合流点上下流の等流・限界水深の相対的な関係で変化する河川合流点周辺の流れと河床変動特性を概ね予測することができることがわかった。今後は、流速分布式の高次化や非平衡流砂量式の導入など、底面流線の曲がりの過大評価や洗掘深を過小に評価する点を改善したいと考えている。

謝辞：本研究を遂行するに当たり、本学大学院生の上田達郎君、本学学部4年生の川上貴士君、中園優馬君には、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/gijutsukijunn/ijikanri/kasen/pdf/gijutsukijun.pdf](http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/gijutsu/gijutsukijunn/ijikanri/kasen/pdf/gijutsukijun.pdf)，2011。
- 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) Weber, J. L. Schumate, E. and Mawer, N.: Experiments of flow at a 90° open-channel junction, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.127, No.5, pp.340-350, 2001.
- 4) 藤田一郎，戸田敦士，田中俊文：平行合流および10度合流の開水路流れにおける三次元構造の違い，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.68, No.4, I\_811-I\_816, 2012。
- 5) Weerakoon, S. B. Tamai, N. and Kwahara, Y.: Bed topography, bed shear stress distribution and velocity field in a confluence, *Proceedings of hydraulic engineering*, JSCE, No.34, pp.307-312,

- 1990.
- 6) 門谷健，田中俊史，藤田一郎：固定床および移動床における小角度合流部の流れと局所洗掘の特性，水工学論文集，第54巻，pp.823-828，2010。
- 7) 重枝未玲，秋山壽一郎，森山拓士，池田寛：合流後の流況が河川合流部周辺の流れと河床変動に及ぼす影響，水工学論文集，第54巻，pp.799-804，2010。
- 8) 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。
- 9) 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。
- 10) 内田龍彦，福岡捷二：底面流速解法による連続する水没水制群を有する流れと河床変動の解析，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.67, No.1, pp.16-29, 2011。
- 11) Hater, 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.
- 12) 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.
- 13) Murillo J. and Garcia-Navarro, P.: Augmented versions of the HLL and HLLC Riemann solvers including source terms in one and two dimensions for shallow flow applications, *Journal of Computational Physics*, Vol.231, pp.6861-6906, 2012.
- 14) 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。

(2012.9.30受付)