

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

ANALYSIS OF OPEN-CHANNEL CONFLUENCE FLOW
HAVING DIFFERENT STEEP SLOPES IN FIXED BED AND MOVABLE BED

出口 恭¹・藤田一郎²・椿 涼太³・大藪政志⁴
Takashi DEGUCHI, Ichiro FUJITA, Ryota TSUBAKI, Masashi OZONO

¹学生会員 工修 神戸大学大学院博士後期課程 自然科学研究科
(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

²正会員 学博 神戸大学教授 工学部建設学科 (同上)

³正会員 工博 神戸大学大学院COE研究員 自然科学研究科 (同上)

⁴学生会員 神戸大学大学院博士前期課程 自然科学研究科 (同上)

In Recent years, flood disasters are frequently taking place where relatively steep slope rivers meet in the mountainous area. The cause of the disasters is mainly due to the sudden rise of water level at a confluence, which sometimes accompanies a hydraulic jump in the upstream region. In this research, a numerical simulation based on the shallow water equations and the unstructured grid system is performed to investigate the effect of the discharge ratio to the flow patterns and the riverbed change at a confluence. In order to simulate a river confluence in the mountains, the main channel slope is set at 1/80 with a tributary channel slope of 1/40. Laboratory experiments are also conducted to provide data with respect to water surface profiles and bed variation. Water surface velocity distributions are obtained by an imaging technique, LSPIV, using a high vision video camera. It is made clear that general flow features calculated by the simulation model agree fairly well with the experiments including the locations of hydraulic jumps and local scour.

Key Words : Confluence, steep slope, shallow water equation, LSPIV, unstructured grid system, local scour

1. はじめに

我が国では、国土の約七割が山地であるため、急峻な河川が多く、降雨が集中する梅雨や台風時には洪水氾濫のポテンシャルが増大する。このような状態でありながら我が国の人口と資産は沿川に集中するため、築堤やダム建設、河川改修等により洪水対策を実施して被害低減を図ってきた。しかしながら、近年の地球温暖化の影響と思われる局所的な集中豪雨や2004年10月の23号台風の豪雨等、計画を上回る降雨によって大規模な氾濫が発生しており、今後の洪水氾濫対策が急務とされている。通常、合流点では氾濫(越水)の可能性が高いといわれており、2002年9月、12月の洛東江(韓国)や2003年8月の厚別川(北海道)等のいくつかの災害事例の報告^{1),2)}もある。合流点付近では剥離や死水域の発生に伴い、複雑な流れが発生する³⁾。そのため、流れの停滞、もしくはそれに伴う土砂堆積により水位が上昇し、氾濫に至る場

合が考えられる⁴⁾。

このような合流点付近の水位上昇を精度よく予測することは、今後の河道計画にとって意義が大きいと考えられる。本研究では、水理模型実験により、本川支川の流量配分の違いによる合流点付近の流況変化および河床変動について検討し、実験結果をもとに数値解析の再現性を検討した。対象とした河川は、合流による影響が大きいと考えられる山間部の河川(射流)である。模型は、勾配の異なる開水路が60°の角度で合流するように作成し、河床高、水位および表面流速を測定した。射流の合流点では跳水を伴った複雑な流れ場が発生するが、その状況は流量比によって全く異なったものとなる。そのため、本研究では複雑な流向・流速の計測が可能なLSPIV法を用いて計測を行った。流れの可視化に際しては水深平均的な流速分布が得られるように工夫し、高解像度のビデオカメラを用いて撮影を行った。数値解析モデルには常射流の混在した流れの解析も可能なFDS法を組み込んだ非構造格子有限体積法⁵⁾を用いた。

2. 水理模型実験の概要

合流点付近の流況変化と河床変動を把握するため、水理模型実験（固定床および移動床実験）を行った。なお、移動床実験は(財)建設技術研究所が実施しており、本稿記載の移動床実験結果はすべて(財)建設技術研究所から提供して頂いたものである⁶⁾。

実験では、本川水路（水路長6.0m、水路幅0.3m、河床勾配1/80、合流点は水路中央）に支川水路（水路長3.0m、水路幅0.2m、河床勾配1/40）を60°の角度で合流させた循環式の合流水路を用いた（図-1）。

移動床実験に用いた砂は平均粒径が1.1mmであり、水路床上に0.1mの厚さで敷きつめている（図-2）。給砂量は河床が維持できる量を芦田・高橋・水山の式⁷⁾により算定し、予備実験により調整した値としている。水路の下流端は、固定床実験では自由流出で流れるようにし、移動床実験では河床を維持させるための堰を初期河床高と同じ0.1mの高さで設置している。

実験流量は、固定床実験では本川支川の流量配分を変化させた5ケース（一定流量、表-1）を与え、移動床実験では流量ハイドログラフ（最大4.0ℓ/s）を与えている。流量ハイドログラフは、本川と支川の区別無く同じ波形であり、本川と支川のピークが同じ時刻となるケース（case6）と支川のピークが先行するケース（case7、図-3）の2ケースを与えている。case7は波形のずれが合流点付近の河床変動にどのような影響を及ぼすかの検討を目的としたものである⁸⁾。

流速分布の測定には画像解析手法であるLSPIV（Large-Scale Particle Image Velocimetry）法⁹⁾を用いている。LSPIV法は、河川表面をCCDカメラ等で撮影し、その録画面像の輝度の濃淡（ボイルによって生じる表面の凸凹、ごみ・泡のような表面浮遊物など様々な河川表面の流況）分布を追跡して表面流速を算定する実河川を対象とした計測方法であるが、本実験ではトレーサを投入することで可視化した平面的な流れ場の計測に用いた。実験においては合流点付近の本川左岸に高さ4m程度の架台を組み立て、その架台上部にハイビジョンビデオカメラが合流点のほぼ直上に位置するように設置して流況を斜め撮影し（写真-1）、幾何補正を施した画像を用いて流速分布を算定した。流れの可視化においてはまず直径が約4mmの発泡スチロール球をトレーサとして用いたが、跳水部分の渦にトラップされて流下しなかったり壁面等に付着したりするなど本来の流れ場とは異なる移流状況がみられた。そこで、ここでは、大型のスポットを用いて白色染料をスポット（直径数センチのスポット）的に注入し、その移流状況をLSPIV法で追跡した。染料のスポット的注入は合流部を含めた水路の平面全体をカバーするように注入場所を変えて繰り返し行った。なお本実験における水深は高々数センチのオーダーであり、注入

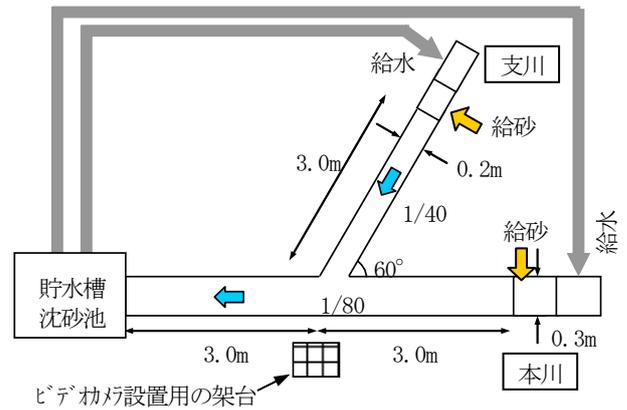


図-1 実験水路平面図

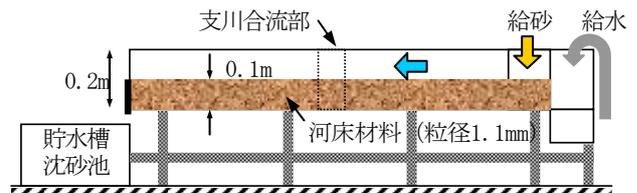


図-2 実験水路側面図（移動床）

表-1 固定床実験の流量

実験ケース名	本川流量 (ℓ/s)	支川流量 (ℓ/s)
case1	4.0	1.0
case2	4.0	2.0
case3	4.0	4.0
case4	1.0	4.0
case5	2.0	4.0

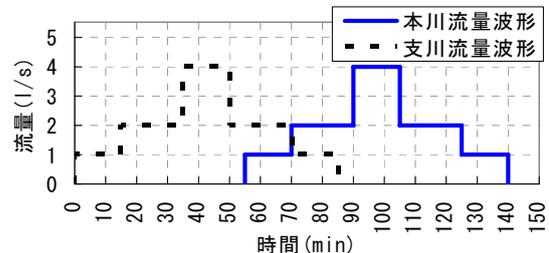


図-3 移動床実験の流量ハイドログラフ (case7)



写真-1 架台からの撮影した水路（固定床）

時の勢いにより染料が水深全体に拡散していたことから、ここで得られる流速分布は近似的に水深平均の値を示すものと見なせる。水平方向への拡散は流速が早いため小さく、解析に与える影響は少なかった。ちなみに、直線部分においてスチロール球と染料の移流速度を比較したところ、染料の流速はスチロール球の85%程度であった。また、スポット的に注入した染料は跳水部分や合流

部においても連続的に流下しており、スチロール球と比べると空間的な解像度は低いものの、全体的には良好な流速分布を得ることができた。実験結果については、後述する数値計算結果の検証にて述べる。

3. 数値解析

(1) 流れの基礎式^{5),9)}

平面二次元流れの連続式と運動方程式を基礎式としてベクトル表記で表すと以下の式(1), (2)になる。

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

$$\left. \begin{aligned} U &= \begin{pmatrix} h \\ uh \\ vh \end{pmatrix}, \quad E = \begin{pmatrix} uh \\ u^2 h + \frac{1}{2} gh^2 \\ uvh \end{pmatrix}, \\ F &= \begin{pmatrix} vh \\ uvh \\ v^2 h + \frac{1}{2} gh^2 \end{pmatrix}, \quad S = \begin{pmatrix} 0 \\ -gh(S_{0x} - S_{fx}) \\ -gh(S_{0y} - S_{fy}) \end{pmatrix}, \\ H &= h \begin{pmatrix} 0 \\ -\overline{u'^2} \\ -\overline{u'v'} \end{pmatrix}, \quad I = h \begin{pmatrix} 0 \\ -\overline{u'v'} \\ -\overline{v'^2} \end{pmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここに、 h : 水深、 u, v : x, y 方向の平均流速、 g : 重力加速度、 S_{0x}, S_{0y} : x, y 方向の河床勾配、 S_{fx}, S_{fy} : x, y 方向の底面摩擦勾配である。ここで、基準水平面からの河床高を z_b とすると、 S_{0x}, S_{0y} は式(3)で与えられる。

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

また、底面摩擦勾配 S_{fx}, S_{fy} には Manning の抵抗則を利用した。

水深平均レイノルズ応力 $\overline{u'^2}, \overline{u'v'}, \overline{v'^2}$ は式(4)で表せる。

$$\begin{aligned} -\overline{u'^2} &= 2D_h \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{2}{3} k, & -\overline{u'v'} &= D_h \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \\ -\overline{v'^2} &= 2D_h \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{2}{3} k \end{aligned} \quad (4)$$

$$D_h = \alpha hu_* \quad (5)$$

ここに、 D_h : 渦動粘性係数、 k : 水深平均乱れエネルギー、 α : 定数 (= $\kappa/6$)、 u_* : 摩擦速度である。

式(1)を任意の検査体積 Ω で積分すると、式(6)のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} U d\Omega + \int_{\Omega} \left(\frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} \right) d\Omega + \\ \int_{\Omega} S d\Omega + \int_{\Omega} \left(\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial I}{\partial y} \right) d\Omega = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

流束、拡散項についてはグリーン・ガウスの発散定理により面積積分を境界での線積分に置き換える。

(2) 離散化

各セルの中心上に h, u, v を定義し、流束、発生・消滅項の離散化に FDS (Flux Difference Splitting) 法^{5),9)} を用いて解の安定化を図った。

(3) 流砂の連続式

流砂の連続式は次式で表される。

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_{bu}}{\partial x} + \frac{\partial q_{bv}}{\partial y} \right) = 0 \quad (7)$$

ここに、 z_b : 河床高、 t : 時間、 λ : 砂の間隙率、 q_{bu}, q_{bv} : 境界における x, y 方向の掃流砂量である。

(4) 掃流砂量

掃流砂量 q_b には、芦田・高橋・水山の式⁷⁾を用いた。流砂方向は底面流速から求めた。底面流速ベクトルを (u_b, v_b) とすると式(9)で表せる。

$$u_b = u_{bs} \cos \phi - v_{bs} \sin \phi \quad (8a)$$

$$v_b = u_{bs} \sin \phi + v_{bs} \cos \phi \quad (8b)$$

$$u_{bs} = 8.5 u_* \quad (9a)$$

$$v_{bs} = -N_* \frac{h}{r} u_{bs} \quad (9b)$$

ここに、 u_{bs}, v_{bs} : 主流方向および二次流の底面流速、 $\phi = \tan^{-1}(v/u)$ 、 N_* : らせん流の強度を表す係数 (ここでは一定値7とする¹⁰⁾)、 r : 流線の曲率半径である。流れの曲率は式(10)で計算される¹¹⁾。

$$\frac{1}{r} = \frac{u \left(u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial x} \right) + v \left(u \frac{\partial v}{\partial y} - v \frac{\partial u}{\partial y} \right)}{(u^2 + v^2)^{3/2}} \quad (10)$$

また、 q_{bu}, q_{bv} は次式より求める。

$$q_{bu} = q_b \cos \sigma \quad (11a)$$

$$q_{bv} = q_b \sin \sigma \quad (11b)$$

ここに、 $\sigma = \tan^{-1}(v_b/u_b)$ である。

(5) 解析条件

解析では実験水路全体をメッシュ化した。メッシュは節点数2305、要素数3784からなる。図-4に解析メッシュのうち合流部付近の図を示す。複雑な流れとなる合流部付近のメッシュは小さなメッシュとしている。上流端での境界条件として実験と同じ流量パターンと境界上の流速分布の算出のための実験水深を与え、下流端は自由流出とした。壁面は滑り無し条件とした。河床の粗度係数 n は、実験結果から算定した平均値を用いた。固定床では $n = 0.009$ 、移動床では $n = 0.017$ であった。給砂量は水理模型実験と同量を与えた。

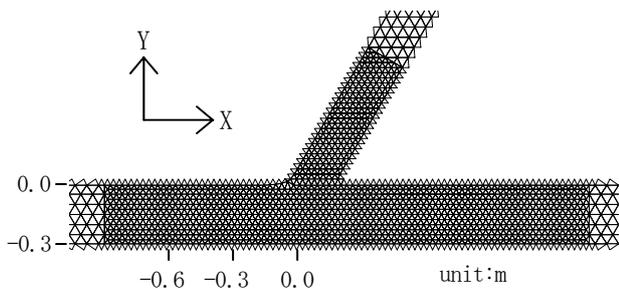


図-4 メッシュ図 (合流点付近を拡大)

4. 解析結果および考察

(1) 固定床実験の再現結果

a) 縦断水位分布

図-5から図-7にcase1, case3, case4の縦断水位の実験結果と計算結果の比較図を示す。本川での比較では合流による乱れによってできた遷移領域部の水位は実験値よりも若干低いものの、その差は1mm以下と小さく、再現性はよい。また、跳水と支配断面の位置やcase3～case5に見られる常流から射流への遷移後に出ている水

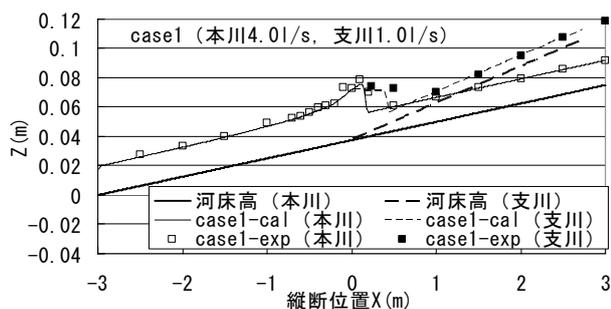


図-5 case1の縦断水位分布

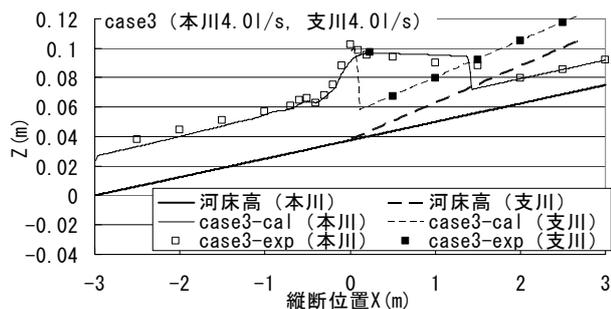


図-6 case3の縦断水位分布

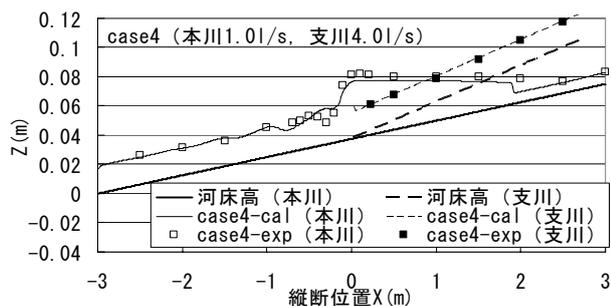


図-7 case4の縦断水位分布

面の揺れについても良好な結果を得ており、本川の水位については全ケースにおいて再現性は良好であるといえる。一方、支川では、全体的には良好に再現していると考えられるが、跳水の位置については計算値が実験値よりも下流側に位置する。特にcase3において、その傾向が顕著である。このような結果となった要因の一つとして実験での計測が定点での計測のみで跳水の位置を正確に計測できなかった点が考えられる。

b) 横断水位分布

case1, case3, case4の合流点 $X=0.0\text{m}$ とその下流の $X=-0.3\text{m}$, $X=-0.6\text{m}$ 地点の横断水位 (実験および計算結果) を図-8から図-10に示す。実験結果を見ると、流入する支川の影響により、横断方向の水面勾配が $X=0.0\text{m}$: 右肩上がりもしくは水平, $X=-0.3\text{m}$: 左肩上がり, $X=-0.6\text{m}$: 右肩下がりと変化していることが確認できる。 $X=0.0\text{m}$ 地点の計算結果は全ケースで右岸に向かって水位が低くなる傾向が見取れ、特にcase3の勾配は実験結果と逆の傾向を示している。この断面では全体的に計算水位が実験水位よりも若干低くなっている。 $X=0.0\text{m}$ 地点は合流直後に位置するため、合流の影響が非常に大きい地点であ

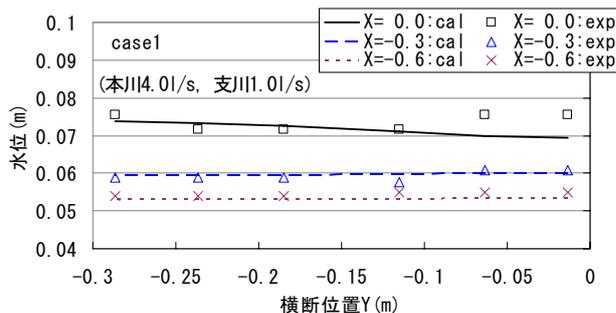


図-8 case1の横断水位分布

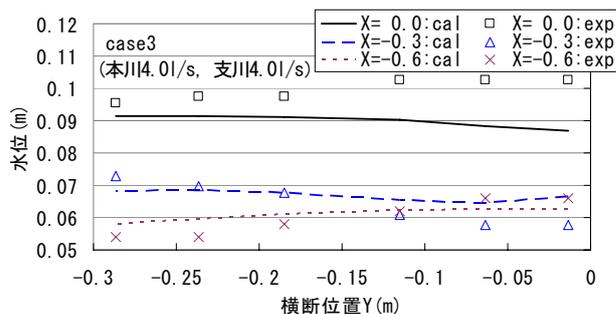


図-9 case3の横断水位分布

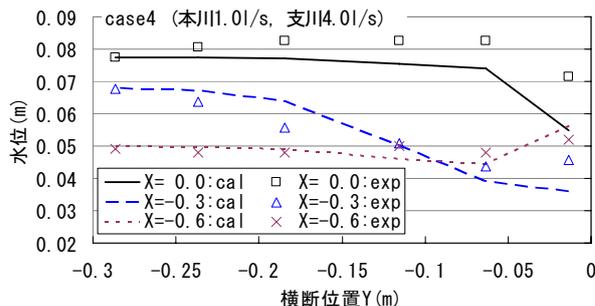


図-10 case4の横断水位分布

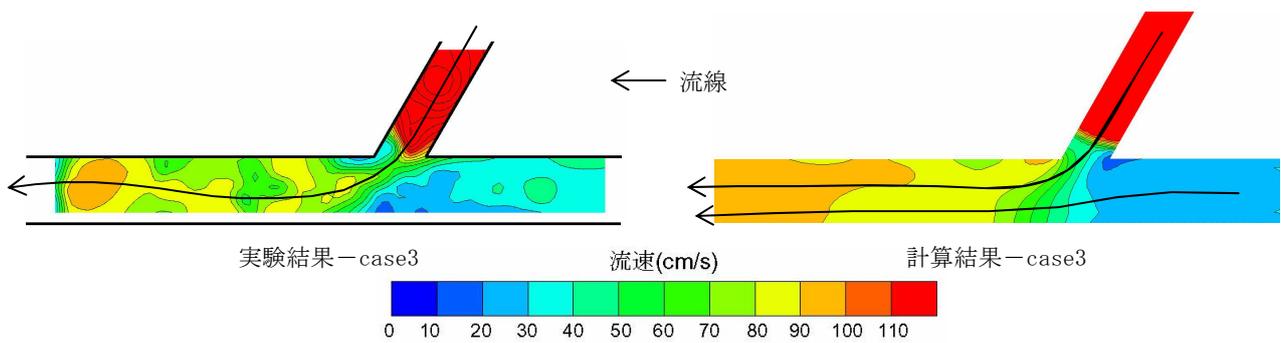


図-11 水深平均流速コンターの比較 (case3: 本川 $4.0\frac{m^3}{s}$, 支川 $4.0\frac{m^3}{s}$)

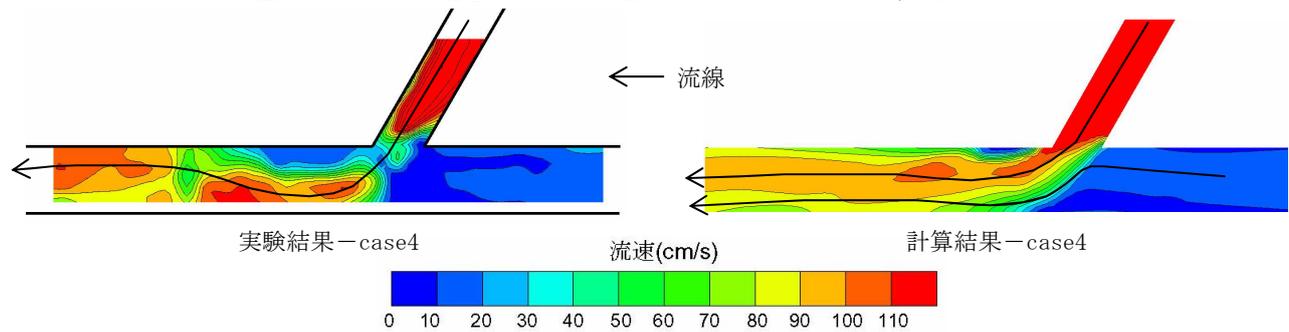


図-12 水深平均流速コンターの比較 (case4: 本川 $1.0\frac{m^3}{s}$, 支川 $4.0\frac{m^3}{s}$)

る。X=-0.3mではcase2の右岸側での水位上昇が再現できていないが、他のケースについては、良好な結果が得られている。X=-0.3m地点は常流から射流に完全に遷移した地点である。X=0.6m地点の再現性は全ケースにおいて良好である。X=-0.6m地点は合流の影響が小さいと考えられる地点での計測である。横断水位の再現性は、乱流を伴う合流部付近では変動の傾向を捉えるにとどまるが、他の地点では良好に再現できている。

c) 流速分布

実験および計算で得られた流速を流速コンターとして図-11、図-12に示す。前述したようにLSPIV法での計測は通常表面流速の計測であるが、トレーサである染料が水深全体に拡散したことおよび水深が浅いことから水深平均流速として取り扱っている。

流速を比較すると、本川合流点下流側の流速値はいずれのケースを見ても、同程度の流速値を示しており、再現性は良好である。ただし、case4のように支川の流れが卓越するようなケースでは支川から流入した水が本川と合流した後に左岸側壁に衝突して反射し、右岸側に流れが実験結果から確認できるが、計算結果では、合流点での支川の卓越した流れを再現できず、本川の流れの影響を受けて中心を流れるような状態となる。なお、図-12の流線はベクトル場に沿って取っている。

(2) 移動床実験の再現結果

図-13に河床変動の実験結果と計算結果を示す。case6の本川 $4\frac{m^3}{s}$ 、支川 $4\frac{m^3}{s}$ 時では、侵食・堆積の発生位置の再現性はほぼ良いが、侵食深、堆積厚についてはそれぞれ実験結果より2cm程度浅く、1cm程度薄い結果となっ

た。通水後では、減水期での埋め戻しが再現できている。case7の本川 $0\frac{m^3}{s}$ 、支川 $4\frac{m^3}{s}$ 時では、侵食深が実験10cmに対して計算1cmと非常に浅い結果となった。両ケースとも侵食深が浅い結果となったのは、実験で発生した合流点左岸側壁部での強い鉛直流による洗掘を2次元解析では再現できないために掃流力が小さく評価されたためだと考えられる。特にcase7は流量が少ないことも起因して侵食深が極端に浅くなったと考えられる。

5. まとめ

本研究では、合流点の流れについて、水理模型実験（固定床、移動床）およびFDS法を用いた平面二次元数値解析により検討を行った。実験では、本川支川の流量配分を変化させて、合流点の流況変化を捉え、この結果をもとに数値解析による再現計算を実施し、以下のことが明らかとなった。

【固定床実験の再現】

合流部の水位上昇、跳水の発生位置、水深平均流速など再現性は比較的良かったが、水位上昇量に関しては実験結果より1mm以下ではあるが全ケースにおいて小さく評価された。また、支川の跳水発生地点が計算では若干下流側となった。支川流入後の流況については、実験結果では流線の蛇行が顕著であったが、計算では小さく評価された。

【移動床実験の再現】

合流点付近の河床変動形状についてはおおむね再現できたが、侵食深は全ケースにおいて実験結果よりも浅く

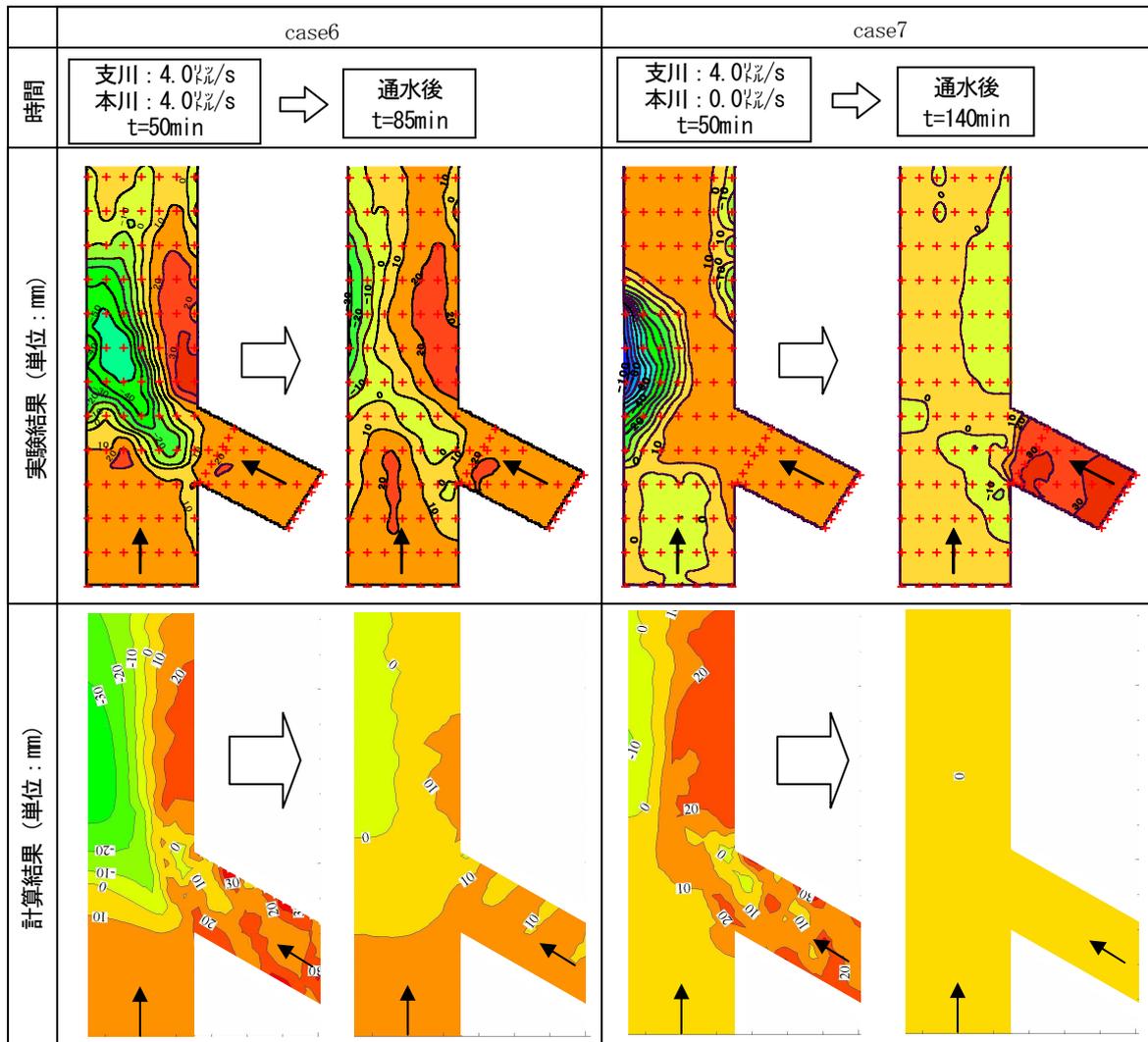


図-13 河床変動高分布 (初期河床との比較値)

評価された。これは、実験で確認された合流部の左岸側壁の強い鉛直流を再現できないことが要因である。

今後は、鉛直流の新たな評価を検討する、浮遊砂およびウォッシュロードを考慮するなどさらなる改良を図る予定である。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、財団法人建設技術研究所および株式会社ニュージェックの水理模型実験施設および移動床実験結果を使用させていただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 寶馨：2002年挑戦半島における豪雨洪水土砂被害に関する研究調査，京都大学防災研究所，2003。
- 2) 土木学会水工委員会：平成15年度台風10号北海道豪雨災害調査団報告書，土木学会水工委員会，2004。
- 3) 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，34巻，pp.301-306，1990。
- 4) 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，Vol.49，pp.529-534，2005。

- 5) 重枝未玲，秋山寿一郎，浦勝，有田由高：非構造格子を用いた有限体積法に基づく平面二次元洪水流数値モデル，水工学論文集，Vol.45，pp.895-900，2001。
- 6) 増田覚，大槻英樹，小田晃，長谷川祐治，水山高久，宮本邦明：本支川の出水のずれによる合流点の河床変動に関する実験，平成17年度砂防学会研究発表会概要集，pp.108-109，2005。
- 7) 芦田和男，高橋保，水山高久：山地河川の掃流砂量に関する研究，砂防学会誌(新砂防)，Vol.30，No.4，p.9-17，1978。
- 8) 藤田一郎，中島丈晴：実河川流計測におけるLSPIVの汎用化と水制間流れへの適用，水工学論文集，第44巻，pp.443-448，2000。
- 9) 藤田一郎，椿涼太：中小都市河川に設置された側岸凹部構造物の非構造格子有限体積法による影響評価，水工学論文集，Vol.47，pp.549-556，2003。
- 10) Engelund, F.: Flow and bed topography in channel bends, Jour. of Hy. Div. ASCE, Vol. 100, No.HY11, 1974.
- 11) Shimizu, Y. and Itakura, T.: Calculation of flow and bed deformation with a general non-orthogonal coordinate system, Proc. of XXIV IAHR Congress, Madrid, Spain, C-2, pp.41-48, 1991.

(2006. 9. 30受付)