

大きな流量を有する支川が直角合流する 河道区間の三次元流れと河床変動の解析

ANALYSIS OF 3D FLOW AND BED VARIATION AROUND A RIVER CONFLUENCE DURING A LARGE FLOOD

田端 幸輔¹・福岡 捷二²・内藤 和久³
Kosuke TABATA, Shoji FUKUOKA and Kazuhisa NAITO

¹正会員 中央大学大学院理工学研究科土木工学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

²フェロー Ph.D 工博 中央大学研究開発機構教授 (同上)

³正会員 国土交通省北陸地方整備局信濃川下流河川事務所 (〒951-8153 新潟県新潟市中央区文京町14-13)

In the 2011 flood, due to the large flood from the Ikarashi River, flow attacking zone and separation zone were formed at the confluence of the Shinano River and Ikarashi River, and large-scale bed scouring and sediment deposition occurred. Therefore, it is important to understand characteristics of the flood flows and bed variations around the river confluence and to establish the numerical model capable of estimating them.

In this paper, we develop the numerical model to estimate the three-dimensional flow and bed variation around the confluence of the Shinano River and Ikarashi River by using the general bottom velocity computation (BVC) method. The BVC model shows that the depth of the erosion and deposition in separation area are not sufficiently reproduced, but structures of unsteady three-dimensional flow and bed variations are described on the whole.

Key Words: river confluence, flood flow, 3D flow, bed variation, bottom velocity computation method

1. 序論

信濃川下流区間では、洪水時に洗堰が全閉となることから、五十嵐川と刈谷田川が実質本川となり、これらの流入流量規模やタイミングによって信濃川本川の洪水流量が決定付けられるという特徴を有している。また、主要支川の五十嵐川は、信濃川に対してほぼ直角に合流しており、流量規模が既往最大となった平成23年7月洪水時には、合流点水衝部の河岸侵食と、剥離域の土砂堆積が大規模に生じた。信濃川・五十嵐川合流部の適切な河道管理のためには、本支川の流量規模の違いによって変化する合流部付近の複雑な流れ場と、これに起因する大規模な河床変動機構を、適切かつ合理的に評価・予測できる解析手法を確立していくことが重要な課題である。

信濃川・五十嵐川合流部では、五十嵐川からの速い流れが信濃川左岸に衝突し、流線が曲げられること、低水路と高水敷間の流れの混合が生じること等から、複雑な三次元流れが形成される。このため、信濃川・五十嵐川合流部のような区間では、流れの水平スケールに対して水深スケールが小さい浅水流の仮定による洪水流・河床

変動解析手法を適用することに限界があり^{1),2)}、大規模な河床変動現象を説明するためには、水衝部付近の流れの三次元性と非静水圧分布を考慮し、底面流速場を適切に評価する必要がある。

これまで、内田らは、水深積分モデルにより流れの三次元性と非静水圧分布を考慮できる一般底面流速解法²⁾を開発している。この手法により、非静水圧分布に起因する底面圧力の増減が底面流速場に及ぼす影響を合理的に評価し、実験水路で計測された橋脚や水制等の構造物周辺の底面流速場と局所洗掘を精度よく説明できることを示している³⁾。現地河川への適用例については、岡村ら⁴⁾によって、石狩川河口部における河道湾曲部の二次流の構造と洪水期間中の河床変動を高精度で評価できることが示されている。また、興石ら⁵⁾によって、常願寺川現地実験水路においてADCPにより観測された流れの三次元構造の特徴を説明できることが示されている。しかし、信濃川・五十嵐川合流点のように、激しい三次元流れを生じさせ、大規模な河床変動を引き起こすような河道区間での一般底面流速解法の検討例はこれまでにない。

本研究では、信濃川・五十嵐川合流部を対象に、一般

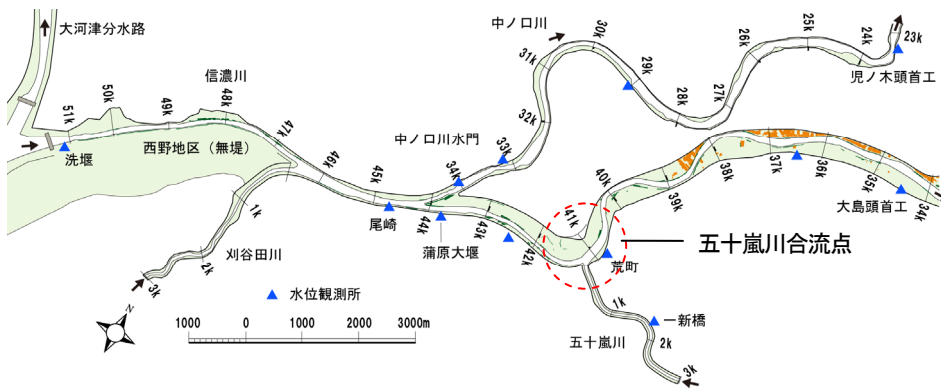


図-1 検討対象範囲



写真-1 洪水後の状況

底面流速解法を適用し、平成23年7月洪水時の実測データとの比較から、洪水流と河床変動の再現性について検証を行い、計算手法の適用性と問題点を明らかにする。また、信濃川と五十嵐川の流量規模の変化が、合流点の三次元流れと河床変動機構に及ぼす影響について検討することを目的とする。

表-1 平成23年7月洪水の流量規模^⑥

	信濃川 (蒲原大堰)	五十嵐川 (一新橋)
平成23年7月洪水	第一波形目	439
	第二波形目	1,035
計画高水流量	800 [※]	2,400

※荒町と五十嵐川の計画高水流量の差より算出 (単位 m^3/s)

2. 平成23年7月出水時における信濃川・五十嵐川合流点の流量規模と河床変動の実態

はじめに、信濃川下流部で既往最大規模となった平成23年7月洪水における信濃川・五十嵐川合流点の流量規模と河床変動の実態について示す。

表-1に、平成23年7月洪水における本支川の流量規模^⑥を示す。平成23年7月洪水は二山波形であり、それぞれの波形における五十嵐川のピーク流量は、ともに $2,000\text{m}^3/\text{s}$ を超過しており、計画高水流量に匹敵する大規模なものであった。一方、信濃川の蒲原大堰地点の流量は、一波形目で $400\text{m}^3/\text{s}$ 程度、二波形目で $1,000\text{m}^3/\text{s}$ 程度であり、五十嵐川に比べて流量規模が小さい。

この洪水により、写真-1に示すように、五十嵐川の水衝部となる信濃川41.2kの左岸河岸において河岸侵食が、また、五十嵐川の合流により形成される流れの剥離域となる40.8k付近～合流点の低水路右岸側において大規模な土砂堆積が生じた。信濃川下流区間では、洪水前後で定期横断測量が実施されている。これらを用いて侵食・堆積量を定量的に検討した。その結果、水衝部の侵食幅は60m、侵食土量は約 $26,000\text{m}^3$ 、剥離域の土砂堆積量は約 $53,000\text{m}^3$ といずれも大規模なものであった。

以上より、平成23年7月洪水により信濃川・五十嵐川合流部で生じた大規模な河床変動を説明するためには、本支川の流量規模の時間変化や、水衝部周辺の三次元流れを適切に評価できる河床変動解析を実施する必要がある。これらを踏まえ、信濃川・五十嵐川合流点における洪水流と河床変動の解析手法及び解析条件について示す。

3. 五十嵐川合流点における洪水流と河床変動の解析法及び解析条件

全体計算

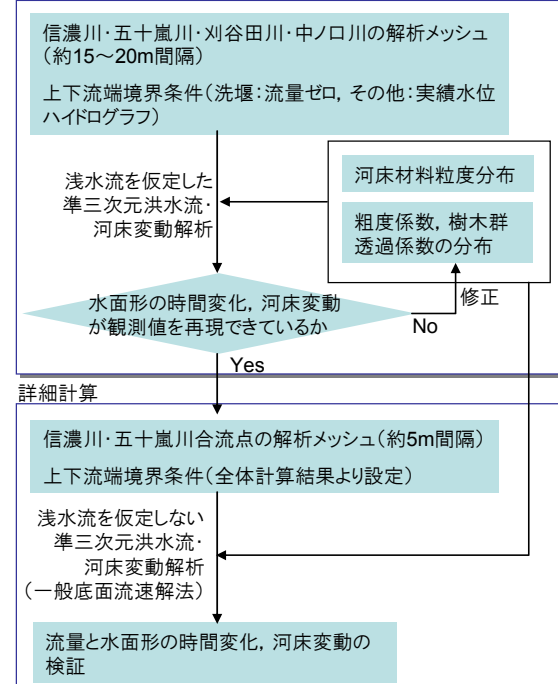


図-2 本検討における解析フロー

(1) 解析手順

本検討では、信濃川・五十嵐川合流点の三次元流れと大規模な河床変動に着目した解析を行う。しかし、信濃川・五十嵐川合流点の上流には、刈谷田川合流点及び中ノロ川分派点が近接しているため、これらが、五十嵐川合流点付近の洪水流・河床変動に及ぼす影響を考慮する必要がある。このため、本検討では、図-2に示す解析フローに従い、まず、五十嵐川・刈谷田川の合流と中ノロ川分派を含む区間の河床変動解析（以下、全体計算）により、信濃川・五十嵐川合流点への流入量及び流入土砂

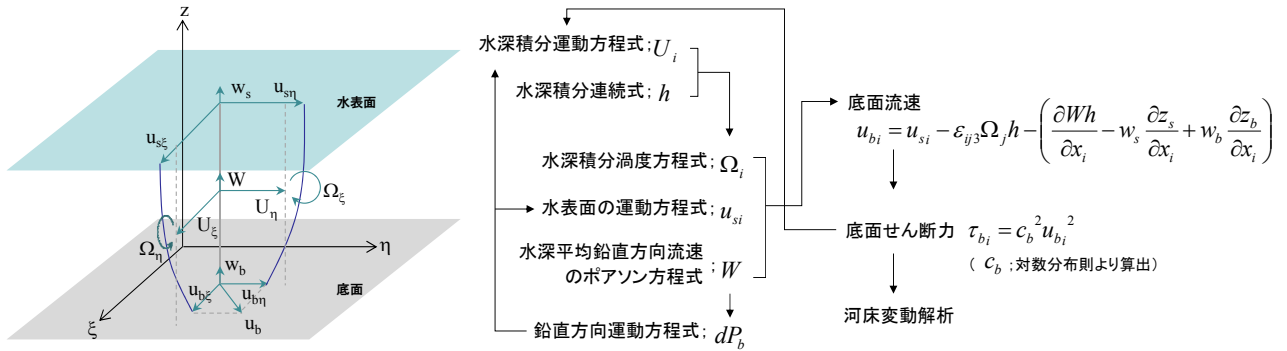


図-3 一般底面流速解法による解析の流れ

量境界条件の設定を行う。次に、設定した境界条件を与えて、信濃川・五十嵐川合流点の三次元流れと河床変動の解析（以下、詳細計算）を行う。

(2) 解析手法の概要

一般底面流速解析法²⁾は、浅水流の仮定を用いない水深積分モデルであり、河床の抵抗評価や河床変動解析に必要な底面圧力と底面流速を、圧力や流速鉛直分布を解かず求めることに特徴がある。

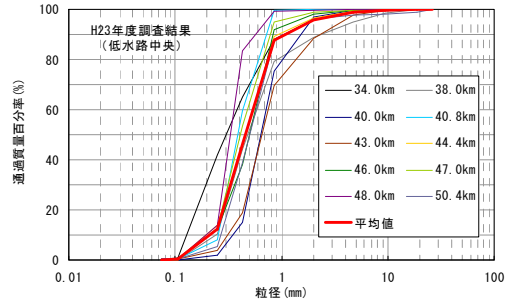
一般底面流速解法で扱う未知量は、 h (水深), U_i (水深平均流速), Ω_i (水深平均渦度), u_{si} (水表面流速), W (水深平均鉛直方向流速), dp_b (底面圧力偏差)及び u_{bi} (底面流速)で、それぞれ図-3に示す基礎式より解かれる。底面流速 u_{bi} は、渦度の定義式を水深積分した式(1)を用いて評価する。

$$u_{bi} = u_{si} - \epsilon_{ij3} \Omega_j h - \left(\frac{\partial W h}{\partial x_i} - w_s \frac{\partial z_s}{\partial x_i} + w_b \frac{\partial z_b}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

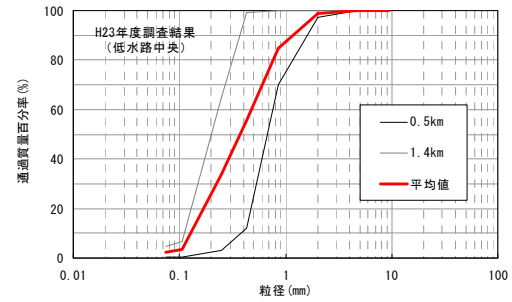
ここに、 ϵ_{ij3} : エディトンのイプシロン, z_s : 水位, z_b : 河床高, w_s, w_b : 水面, 底面の鉛直方向流速である。なお、流速鉛直分布は、 u_{si}, u_{bi} 及び水深平均流速 U_i を用いた三次多項式により近似している。本検討では、底面から生成される三次元的な乱れエネルギーと粘性消散が局所平衡状態にあると仮定したゼロ方程式⁷⁾により渦動粘性係数を算出し、水深積分運動方程式、水深積分渦度方程式、水表面流速運動方程式、浮遊砂輸送方程式に用いている²⁾。また、移流項の離散化に関しては、水深平均流速には三次精度の風上差分法⁷⁾を、水深積分渦度フラックス、水表面流速、鉛直流速、浮遊砂濃度フラックスには一次精度の風上差分法⁷⁾をそれぞれ用いている。

次に、河床変動解析の概要を示す。掃流力は、底面せん断力に重力の斜面方向成分を付加した福岡・山坂の式⁸⁾を用いて評価し、限界掃流力は、芦田・道上による修正Egiazaroff式⁸⁾、掃流砂量は芦田・道上⁸⁾による平衡流砂量式で計算する。浮遊砂については、浮上量を板倉・岸式⁹⁾、鉛直浮遊砂濃度分布を三次元移流拡散方程式⁴⁾より解く。河床変動量は、流砂の連続式⁸⁾より求める。

本検討の全体計算では、対象区間の水面形の時間変化と河床変動を再現し、詳細計算のための境界条件を作成



(a) 信濃川



(b) 五十嵐川

図-4 解析で与えた初期の河床材料粒度分布

することを目的とすることから、式(1)の右辺第三項を無視し、静水圧分布を仮定した準三次元解析手法⁴⁾を適用した。一方、詳細計算では、流れの三次元性と非静水圧分布を考慮した一般底面流速解法を適用した。

(3) 解析条件

a) 計算対象範囲

全体計算と詳細計算の計算対象範囲について説明する。全体計算の計算対象範囲は、図-1に示した信濃川本川の34.0kから洗堰、中ノ口川の23.0kから流頭部とし、五十嵐川、刈谷田川はそれぞれ合流点から3kmまでとした。メッシュサイズは、約15~20m間隔でモデル化を行った。一方、詳細計算では、五十嵐川による水衝部の河岸侵食箇所と合流点下流の土砂堆積域を含むように、信濃川39.0~43.2k及び五十嵐川0.0~1.9kの範囲を対象とした。五十嵐川による水衝部付近では、低水路河岸の斜面上を乗り上げる流れや、底面に潜り込む流れを表現することが重要と考え、低水路河岸の法肩と法尻の位置と形状が考慮できるように、詳細計算区間のメッシュサイズを約5m間隔とした。

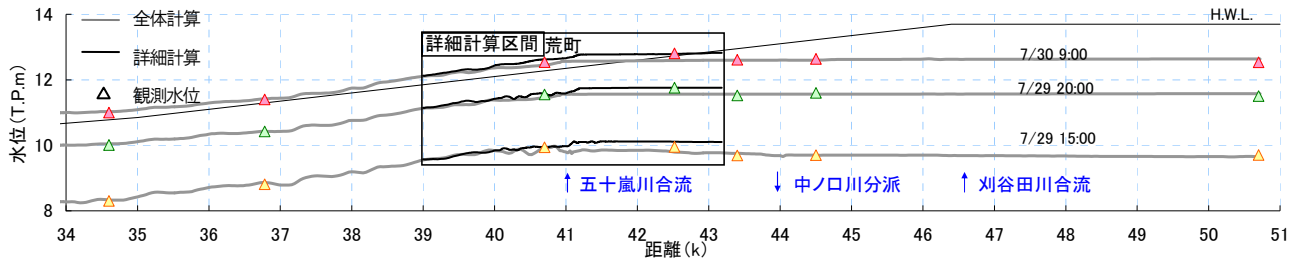


図-5 信濃川の水面形の時間変化の解析値と観測値の比較

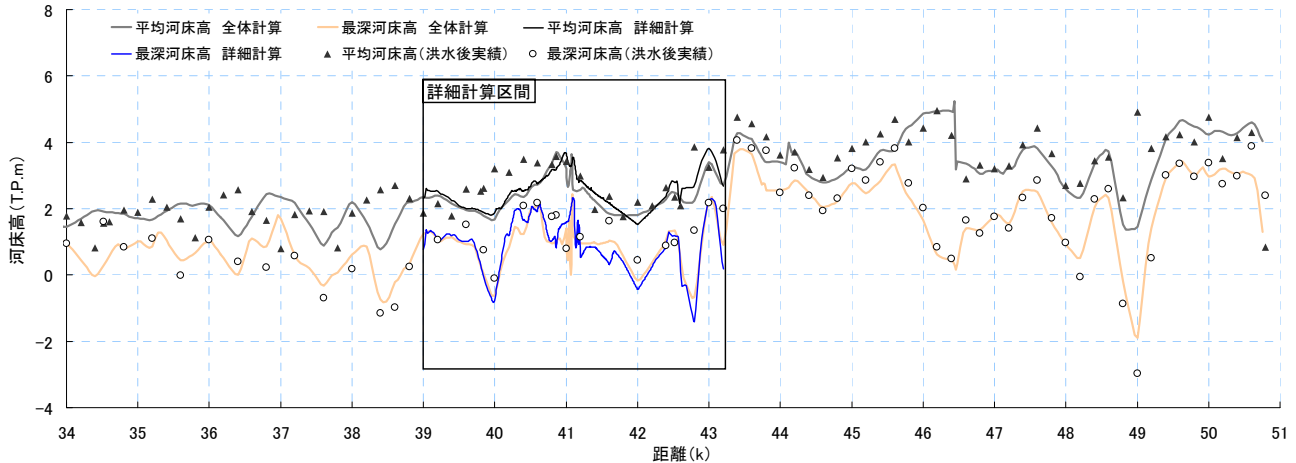


図-6 信濃川における洪水後の平均・最深河床高の縦断分布の解析値と実績値の比較

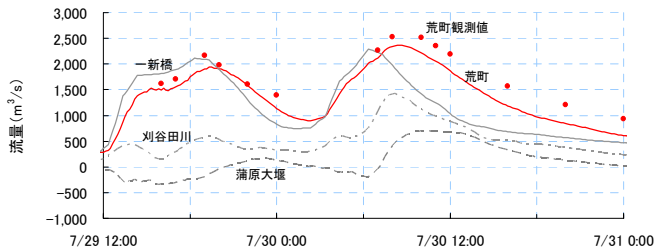


図-7 流量ハイドログラフの解析値と実測値の比較

b) 上下流端の境界条件

全体計算と詳細計算で設定した上下流端の境界条件について説明する。信濃川では洪水時において洗堰が全閉となることから、全体計算における信濃川上流端の洗堰地点には流入量ゼロの条件を与えた。また、五十嵐川、刈谷田川の上流端境界条件及び信濃川、中ノ口川の下流端境界条件はそれぞれ、一新橋、尾崎、大島頭首工、児ノ木頭首工の解析水位と観測水位が一致するように与えた⁶⁾。なお、五十嵐川・刈谷田川の上流端の掃流砂量と浮遊砂量の供給量については、実績の河床高を概ね説明できる値を試行錯誤的に検証し、最終的に平衡給砂条件を与えるものとした。

詳細計算の上流端境界条件には、全体計算で得られる信濃川43.6k及び五十嵐川1.9kにおける流量ハイドログラフと浮遊砂濃度フラックスを、また下流端には39.0kにおける水位ハイドログラフをそれぞれ与えた。

c) 粗度係数・樹木群透過係数

粗度係数・樹木群透過係数は、水面形の時間変化と河床変動高を概ね表現できるように、既往検討値⁹⁾を参考

に若干の修正を施し、低水路粗度係数を0.025~0.030、高水敷粗度係数を0.030~0.060、樹木群透過係数を15~90m/sとし、全体計算、詳細計算ともに同じ値を与えた。

d) 初期の河床材料粒度構成

図-4に、初期に与えた信濃川と五十嵐川の河床材料粒度分布を示す。初期の河床材料粒度分布は、平成23年度に実施された信濃川、五十嵐川、刈谷田川及び中ノ口川の河床材料調査結果を基に、粒度分布を代表できる5つの粒径区分を設定し、それぞれの代表粒径と構成比率を各河川で与えた。検討対象範囲の河床材料はシルト・粘土分~細礫分で構成され、平均粒径は0.5mm程度である。また、低水路河床材料の土粒子密度には2.65g/cm³を、空隙率には0.4を与えた。

e) 侵食箇所の取り扱い

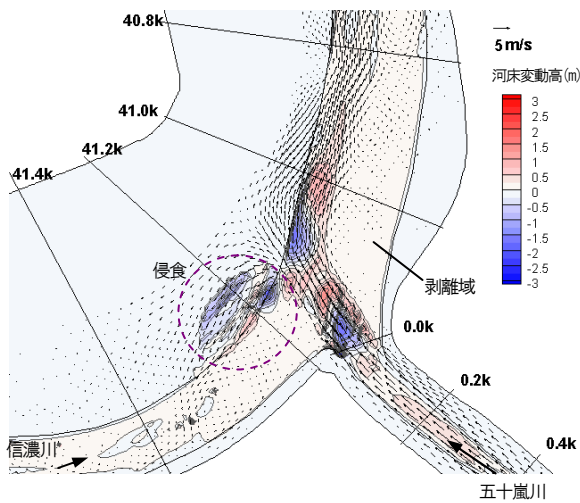
侵食を受けた信濃川41.1~41.2kの低水路左岸河岸及び高水敷は、洪水の初期に護岸ブロックが流失すると仮定して移動床条件とした。侵食箇所は水田利用地であったため、本検討では、現場の状況と、水田土壌の構成に関する文献⁹⁾を基に、侵食箇所の初期粒径を0.075mm、土粒子密度を2.55g/cm³、空隙率を0.6と設定した。

4. 信濃川・五十嵐川合流部の洪水流及び河床変動の解析結果

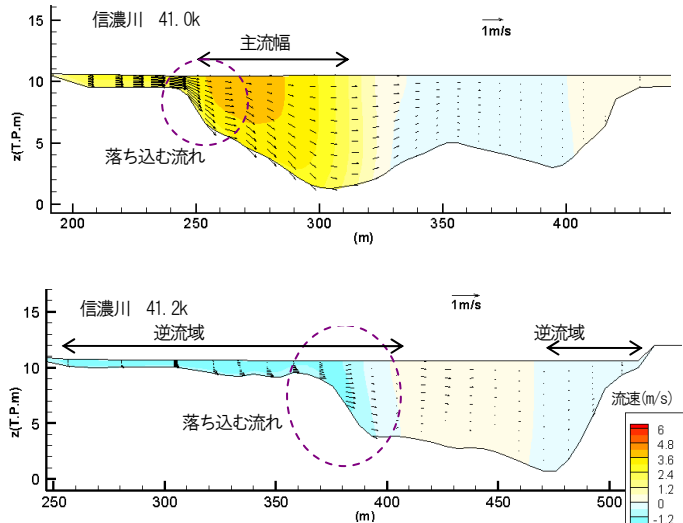
(1) 平成23年7月洪水の再現性の検証

a) 全体計算

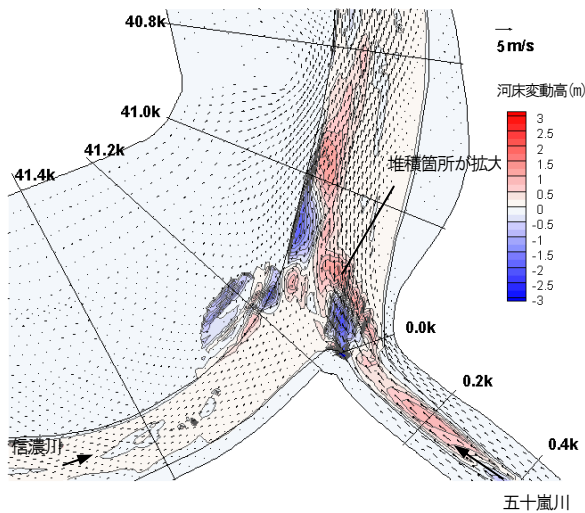
図-5に信濃川の水面形の時間変化を、図-6に洪水前後の平均・最深河床高の縦断図をそれぞれ示す。なお、全



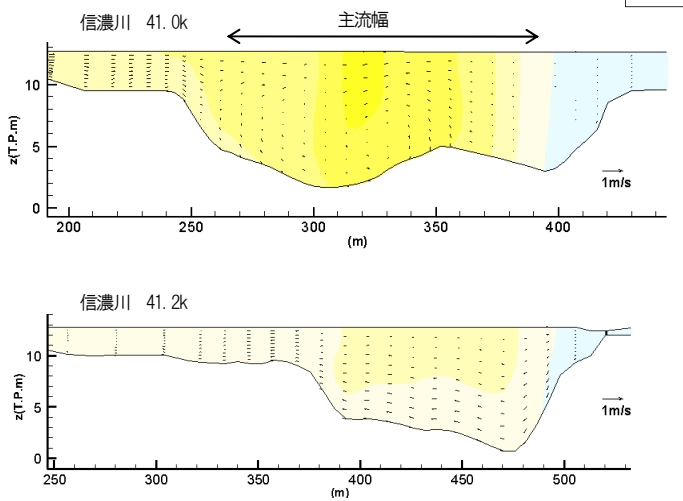
(a) 第一波形目 (7/29 16:30)



(a) 第一波形目 (7/29 16:30)



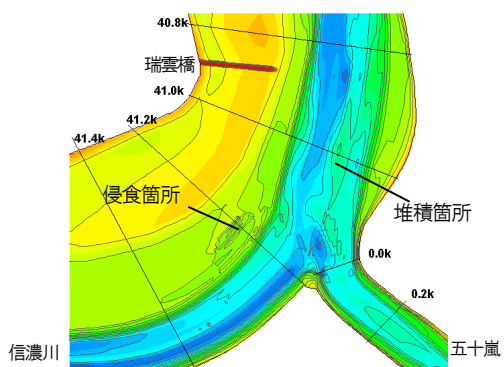
(b) 第二波形目 (7/30 9:00)



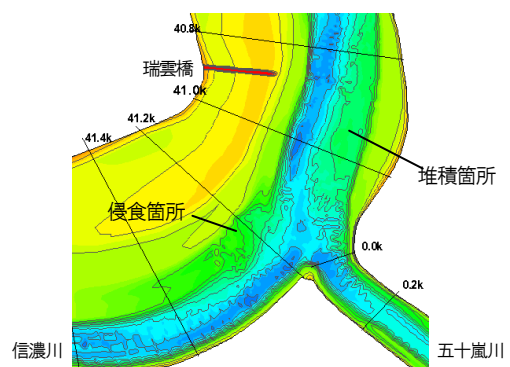
(b) 第二波形目 (7/30 9:00)

図-8 地盤高と主流速のコンター図

図-9 流下方向流速コンターと断面内の流速ベクトル図



(a) 詳細計算による解析結果



(b) 洪水後の実測データ

図-10 洪水後の河床高コンター図の解析結果と実測データの比較

体計算による解析結果は、図中の灰色線で示している。信濃川の水面形の時間変化によると、解析水位は観測水位を概ね説明できている。また、平均河床高・最深河床高については、信濃川40.0~41.0k付近の堆積が十分再現できていないが、全体的に概ね実測値を表現できている。図-7に、流量ヒドログラフの解析値と実績値の比較を

示す。実績の水面形の時間変化と河床変動を概ね表現した結果、得られた流量ヒドログラフは、荒町地点の観測値を概ね表現できている。

以上より、全体計算モデルによって、洪水流・河床変動を概ね説明できたと判断し、この結果を踏まえ、詳細計算を行った。

b) 詳細計算

詳細計算では、信濃川・五十嵐川合流点を対象に、全体計算により得られた流量・土砂量ハイドログラフ及び水位ハイドログラフを境界条件として、浅水流の仮定をしない一般底面流速解法により解析を行った。

詳細計算による信濃川の水面形の時間変化及び洪水前後の平均・最深河床高の縦断面図を、**図-5**、**図-6**中の黒線で示す。**図-5**に示した詳細計算による水面形の時間変化は、全体計算結果及び観測水位と概ね一致していることが確認できる。また、**図-6**に示した平均・最深河床高の縦断面分布は、全体計算結果と概ね同様の結果となる。

(2) 合流部における三次元流況と河床変動機構

次に、詳細計算の結果から、信濃川・五十嵐川合流部で形成される三次元流況と、河床変動機構について解析を行った。**図-8**に、河床変動高コンターと水深平均流速ベクトル図を、**図-9**に流下方向流速コンターと断面内流速ベクトル図をそれぞれ示す。なお、**図-9**のコンターは、主流方向流速を示しており、黄色～赤色が順流、水色～青色が逆流となる箇所を示している。五十嵐川の流量が信濃川本川に比べて卓越する第一波形では、信濃川の41.1k左岸河岸付近が水衝部となり、流れが高水敷に乗り上げ、その上下流の41.0k、41.2k付近で高水敷から低水路へ落ち込む流れが形成される。これにより、実績と同様、41.2kの左岸河岸付近で河岸侵食が生じる。また、合流部の主流幅は、五十嵐川の低水路幅と同程度となり、41.8kの低水路左岸側付近に集中している。底面付近では、低水路中央に向かう流れが形成され、洗掘が生じることが確認できる。また、40.6～41.0kの低水路右岸側では、五十嵐川合流による剥離域が形成され、外縁部分に土砂が堆積する。刈谷田川からの流入により信濃川の流量規模が増大する第二波形では、合流点下流部の低水路内の流速は、横断方向に概ね一様となって流れ、剥離域は小さくなる。このとき、土砂は低水路全体を流れ、合流点直下の剥離域外縁に堆積していた土砂が若干であるが下流側に広がっていく様子が確認できる。

次に、洪水後の河床形状の再現性について検証する。**図-10**に、洪水後の河床高コンターの解析結果と実績の比較を示す。実績の河床高コンター図によると、合流点～41.1k左岸河岸の水衝部～40.8k低水路左岸側にかけて滞筋が形成され、41.2k左岸河岸で約60m幅の侵食が生じている。本解析では、実績で見られる水衝部と滞筋位置及び侵食幅を概ね再現できている。しかし、侵食箇所の地盤高は、実績でT.P.5～6m程度であることに対して、本解析ではT.P.8.5～9m程度となり、侵食深が過小に評価される結果となった。また、40.6k～五十嵐川合流点の低水路右岸側の剥離域では、土砂堆積範囲が実績に比べて全体的に狭く評価されている。剥離域の土砂堆積が過小評価された原因として、本解析では乱流モデルにゼロ方程式⁷⁾を用いており、渦や乱れによる浮遊砂の輸送

が十分表現できず、剥離域に十分な量の浮遊砂が供給されなかったこと等が考えられる。侵食・堆積量の予測精度の向上は今後の課題である。

以上より、一般底面流速解法の適用により、水衝部の河岸侵食深と、合流点下流の剥離域における土砂堆積範囲について、実績値を十分に再現できなかった。しかし、五十嵐川からの大規模な運動量流入に起因する水衝部付近の三次元流れの構造をかなりの程度表現でき、これに伴う水衝部の河岸侵食と剥離域の土砂堆積が、本支川の流量バランスによって時系列的に変化していくプロセスについて説明することが可能である。今後は、引き続き水面形や流量等の洪水観測データと洪水前後の地形データ等の充実を図り、信濃川・五十嵐川合流点の三次元流れと河床変動の予測精度を向上させ、河道計画や河道管理に活かしていくことが重要である。

5. 結論

信濃川・五十嵐川合流部を対象に、一般底面流速解法を適用し、平成23年7月洪水時の実測データとの比較から、洪水流と河床変動の再現性について検証を行った。

一般底面流速解法により、信濃川の実測の侵食深と堆積範囲を十分には再現できなかったものの、五十嵐川からの大規模な流れの運動量流入に起因する水衝部付近の三次元流れ構造をかなりの程度表現でき、これに伴う河岸侵食及び剥離域の土砂堆積現象の傾向について捉えることが可能であることを示した。

参考文献

- 1) 福岡捷二：洪水流の水利と河道の設計法，森北出版，2005。
- 2) 内田龍彦，福岡捷二：浅水流の仮定を用いない水深積分モデルによる底面流速の解析法，水工学論文集，第56巻，I_1225-I_1230，2012。
- 3) Fukuoka, S. and Uchida, T. : Toward Integrated Multi-Scale Simulations Of Flow And Sediment Transport In Rivers, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), Vol. 69, No. 4, II_1-II_10, 2013.
- 4) 岡村誠司，岡部和憲，福岡捷二：川幅及び断面形状を考慮した掃流砂量式を用いた河床変動解析—石狩川河口部昭和56年8月洪水を例として—，河川技術論文集，第17巻，2011年6月。
- 5) 興石 大，内田龍彦，福岡捷二：護岸水衝部における三次元流れと河床形状の観測法と解析法の開発，土木学会論文集B1(水工学) Vol.69, No.4, I_1171-I_1176, 2013.
- 6) 田端幸輔，福岡捷二，内藤和久：平成23年7月豪雨による信濃川下流域の洪水流下特性とその解析法—五十嵐川・刈谷田川の合流と中ノロ川の分派を含む河道区間を対象として—，土木学会論文集B1(水工学) Vol.69, No.4, I_787-I_792, 2013.
- 7) 例えば，荒川忠一：数値流体工学，東京大学出版会，1994
- 8) 水理公式集[平成11年度版]：土木学会水理委員会，丸善，1999。
- 9) 新潟県における土づくりのすすめ方，農林水産省，2005年2月