水工学論文集,第57巻,2013年2月

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口川の分派を含む河道区間を対象として—

ANALYSIS OF THE 2011 FLOOD FLOW IN THE LOWER SHINANO RIVER WITH THE BRANCHED SECTIONS

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　工博　Ph.D.　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）

Lower Shinano River is known as a typical low-lying river in Japan. This area was suffered from serious damages by inundation by the 2011 flood. Therefore it is important to clarify the hydraulic phenomena and the characteristics in the flood in order to establish the flood control plan.

This study aims to analysis the flood flow in the river branches in lower Shinano River by the quasi-three dimensional numerical method using observed water surface profiles during 2011 flood. We could evaluate the flood discharge hydrograph and floodwater storage and elucidate the complicated mechanism of flood flow in the river branch in lower Shinano River.

Key Words : *flood flow, confluence and diversion, water surface profile, unsteady-quasi-three-dimensional numerical analysis, boundary condition*

１．序論

日本海側最大の都市域を形成している信濃川下流域では，平成16年の水害以降，本川堤防の嵩上げや支川の洪水調節施設の整備等，実効性の高い河川整備が着実に実施されたとともに，水害の経験を踏まえた水防・避難活動の改善等の取り組みがなされ，地域住民の防災意識の醸成が図られた[1)]．これらの対策の効果は，平成23年7月に発生した新潟・福島豪雨時に発揮され，被害軽減に対して大きな役割を果たしたことが確認されている[1), 2)]．しかし，今次水害は，現状の治水安全度を大きく上回る既往最大規模の洪水であったことから，支川の外水氾濫をはじめ，本川無堤部の溢水氾濫，流域各地における内水氾濫等の被害を受けることとなった[1)]．これらの水害を教訓とし，今後の治水整備に関する基本的方向性を示していくことが求められているが，そのためにはまず，複雑な河道システムを有する信濃川下流における大規模洪水流の流下機構とその特性を明らかにする必要がある．

図-1に，信濃川下流域の流域図を示す．信濃川下流域には，本川と分流・合流する中ノ口川があること，洪水時には洗堰が全閉操作されるため，信濃川上流域からの流入はゼロとなり，主要支川である五十嵐川と刈谷田川が実質本川となることといった，他の河川とは異なる特性を持つ．更に，五十嵐川及び刈谷田川の合流点と中ノ口川の分派点はいずれも近接していることから，それぞれの流れが相互に影響を及ぼし合う．このような複雑な河道システムを有する河川の水理現象を解明するためには，十分な洪水観測データに基づく検討とそれを用いた非定常洪水流解析が有効となる．

これまで福岡らによって，洪水時の水面形時系列データを用いた非定常流解析手法が提案されている[3)]．本手法は，河川分合流点を含む区間においても適用されており[4), 5), 6)]，その有効性について確認されてきた．既往検討では，利根川・渡良瀬川合流点[4)]のように本支川ともに水面形の時間変化が観測されているケースや，六角川[6)]のように多点からポンプ排水量が流入するケースが主である．前者の場合，本支川の流れの影響が現れている観

図-1　信濃川下流の流域図と水位観測点位置図

	帝石橋	荒町	中ノ口川
平成23年7月洪水(実績)	3,402	2,528	520
計画高水流量	4,000	3,200	400

（単位　m^3/s）

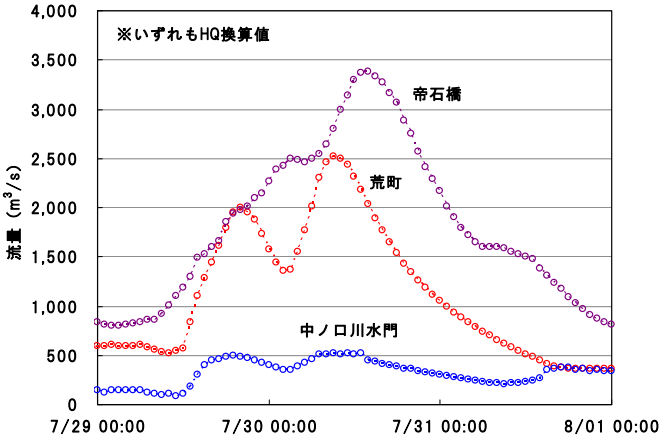


図-2　平成23年7月洪水における実績流量ハイドログラフ

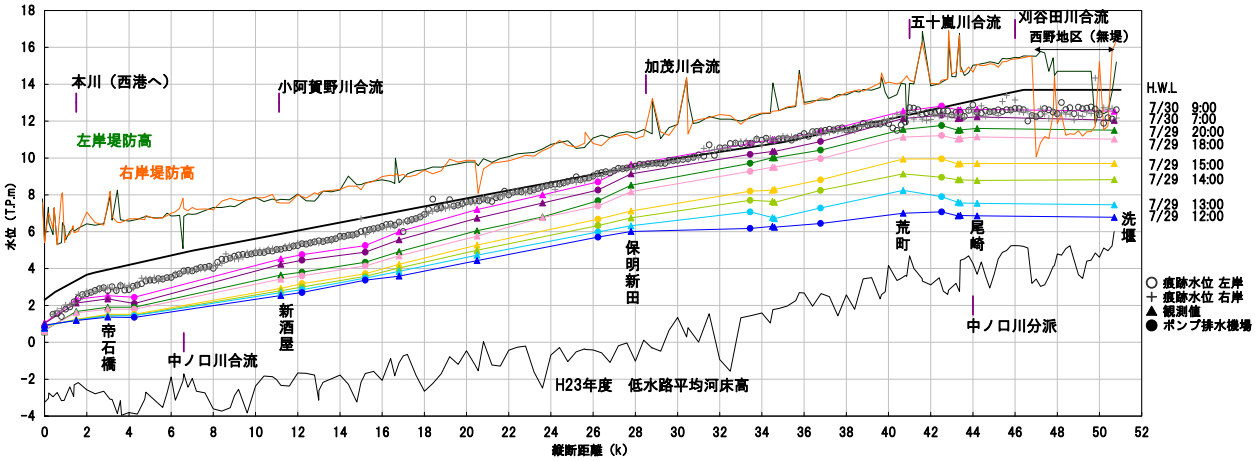


図-3　平成23年7月洪水における観測水面形の時間変化

測水面形を解とすればよく，後者の場合は，ポンプ排水の影響が流入点付近の水面形の観測結果に現れると考え，これを参照しながら横流入量を与えることで，合流を含む区間の洪水流を精度よく解析できることが確認されている．

一方，本研究で対象とする信濃川下流区間は，支川からの流入が本川の洪水流量を決定付けるとともに，合流部付近の流れの方向が時間的に変化する複雑な流れ場が形成される．このような複雑な河道区間における検討はこれまでなされていない．

そこで本研究では，まず，平成23年7月洪水において観測された水位・流量データから，信濃川下流区間の洪水流下の実態について把握する．次に，五十嵐川，刈谷田川の合流と中ノ口川の分派を含む区間を対象とし洪水流解析モデルを構築し，観測水面形と流量ハイドログラフに加えて，降雨流出量も含めた全体的な視点からモデルの妥当性検証を行う．そして，検証したモデルを用いて，平成23年7月洪水における支川分合流量ハイドログラフを定量的に評価することで，信濃川下流のうち，特に複雑な河道システムを有する区間について洪水流下特性を明らかにすることを目的とする．また，本検討結果を交え，今後の治水計画策定に向けた課題を示すものとする．

2．洪水観測データから見た平成23年7月洪水時における信濃川下流区間の洪水流下の実態把握

(1)　平成23年7月洪水時の洪水観測体制

図-1に示すように，低平地河川である信濃川及び中ノ口川には多くの内水排水機場と頭首工が設置されており，施設管理のため水位が連続的に観測されている．水位観測所とポンプ排水機場及び頭首工を含めると，概ね1～5kmピッチの密な間隔で水位が計測されていることから，洪水時における水面形の時間変化を詳細に把握すること

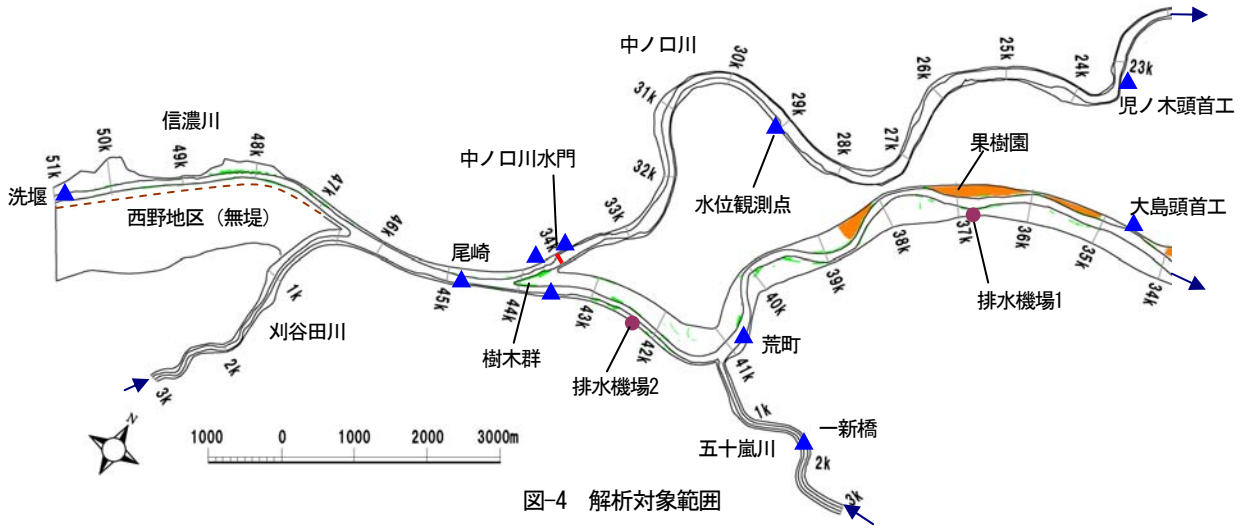


図-4　解析対象範囲

が可能であり，洪水流下特性を検討する上で有益な情報を得ることができる．一方，五十嵐川には合流点付近に一新橋水位観測所があるものの，刈谷田川では合流点から9km地点の猫興野地点まで水位が観測されていない．

(2)　観測データから見た洪水流下の実態把握

平成23年7月洪水における流量観測結果と，信濃川の水位観測所とポンプ排水機場の水位時系列データから得られる水面形の時間変化から，洪水流下の実態について検討する．

図-2に，五十嵐川合流点直下の荒町，中ノ口川合流点下流の帝石橋，中ノ口川水門における実績の流量ハイドログラフを示す．荒町と中ノ口川水門では二山波形の特徴を有しており，洪水継続時間は3日間の長期に渡った．ピーク流量を見ると，帝石橋と荒町では計画高水流量に迫る規模となっており，中ノ口川では計画高水流量を超過した．

次に，信濃川下流の観測水面形の時間変化を**図-3**に示す．ピーク時の水位は堤防天端高から約2m付近の高さまで上昇しており，26.0～42.0k区間においてH.W.L.を超過している．五十嵐川流入地点付近に着目すると，水面形が上に凸となっており，五十嵐川からの流入が上下流に広がったと推察される．このことから，平成23年7月洪水では，五十嵐川からの流入が信濃川の洪水流下に大きな影響を及ぼしたことは明らかである．また，洗堰からの流入はゼロであったため，刈谷田川から流入した洪水の一部は，46.4kより上流側に引き込まれ，無堤区間である47.0～50.7k右岸において溢水氾濫が生じた．

次に，観測データから見られた特徴を踏まえ，信濃川下流区間に応じた解析方法について示す．

３．信濃川下流区間の特徴に応じた解析方法

(1)　解析手法

本研究で対象とする信濃川下流区間では，河道が大きく蛇行しており，また，大規模な支川合流を伴う．よって本研究では，蛇行部や合流部の複雑な運動量交換を伴う流れ場を扱うため，内田らによる水表面流速方程式を付加した一般座標系準三次元非定常流解析法[7]を用いて洪水流解析を行うものとした．

表-1　設定した粗度係数・樹木群透過係数

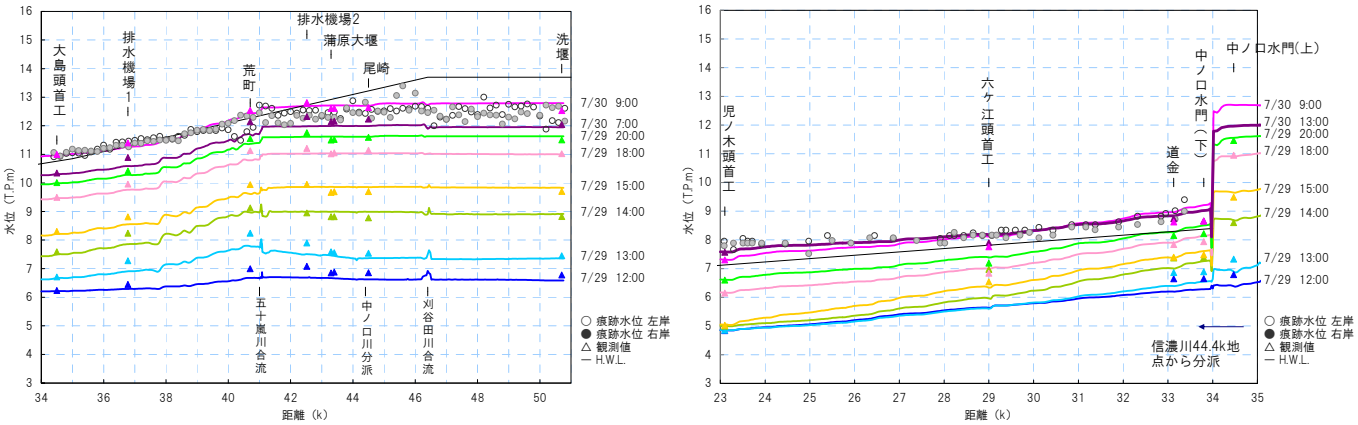
区間	粗度係数 ($m^{-1/3}\cdot s$) 低水路	粗度係数 ($m^{-1/3}\cdot s$) 高水敷	樹木群透過係数 (m/s)
信濃川（34～44k）	0.028	0.025～0.060	40～90
信濃川（44～50.7k）	0.025	0.030～0.050	40
五十嵐川	0.023	0.030～0.050	－
刈谷田川	0.023	0.030～0.050	－
中ノ口川	0.025	0.030～0.050	40

(2)　計算対象範囲及び対象期間

図-4に解析対象範囲を示す．本研究では，五十嵐川と刈谷田川の合流量及び中ノ口川への分派量が，信濃川下流区間の洪水流量を決定付けることに着目し，計算対象範囲は，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．

信濃川47.0～50.7k右岸の無堤区間である西野地区では，溢水氾濫が生じたため，実績の浸水エリアを解析対象範囲に含むことで氾濫を表現できるようにした．なお，氾濫域の地盤高は航空レーザー測量結果より与えた．また，中ノ口川流頭部に位置する中ノ口川水門では，洪水時の分派量を調整するため，一定開度による操作が実施されていることから，水門から受ける流体力を水門上下流面に働く圧力（静水圧＋動圧）の差より求め，流下方向の運動方程式に考慮することで，水門上流側の水位の堰上げを表現した[8]．

解析対象期間は7月29日10時20分に信濃川上流域の洪水を全量大河津分水路に流すために洗堰が全閉となったことから，洗堰全閉後の7月29日12時から7月31日0時までの36時間を対象とした．



(a) 信濃川　　(b) 中ノ口川

図-5　水面形の時間変化の解析値と観測値の比較

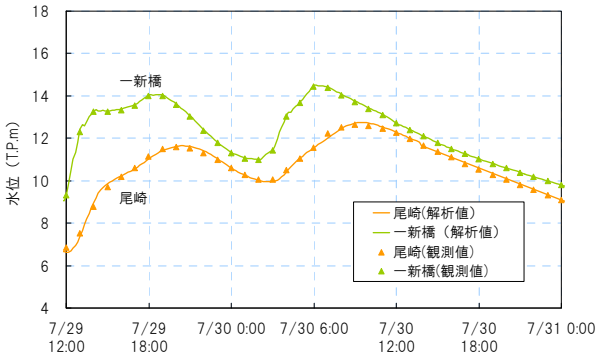


図-6　流入境界条件設定に用いた観測点の水位ハイドログラフ

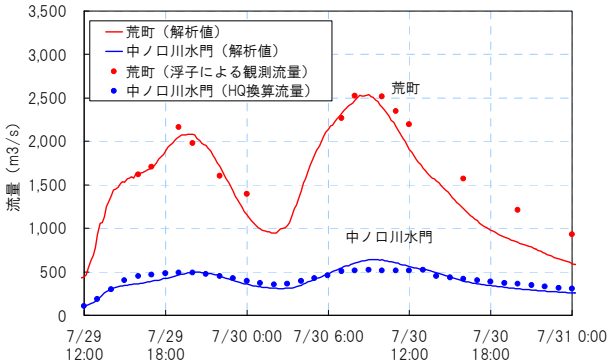


図-7　流量ハイドログラフの解析値と観測値の比較

(3)　上下流端及び支川流入境界条件の設定

a)　上下流端及び五十嵐川の流入境界条件

信濃川では洪水時において洗堰が全閉となることから，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，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[3]．

b)　刈谷田川の流入境界条件

刈谷田川には観測水面形の時間変化が存在しないため水位境界条件を設定し流入量を推定することが困難である．よって，ここでは，信濃川の観測水面形の時間変化を参照し，刈谷田川の流入量を推定するものとした．

以下に，その推定方法について説明する．刈谷田川からの流入の影響は，計算対象範囲全体に及ぶと考えられるが，ここでは，合流点下流で水位が観測されている尾崎地点を代表し，この地点における解析水位が観測水位と一致するように，刈谷田川の上流端水位変動量を逐次調整した．上流端水位変動量は，刈谷田川上流端から尾崎地点までの洪水到達時間 T を考慮し，T 時間後の観測水位と現時刻の解析水位の差を修正するように，以下の式により算出した．

$$\frac{dh_0}{dt} = \frac{h_{obs}^{t+T} - h_{cal}^{t}}{T} \qquad (1)$$

ここに，h_0: 刈谷田川上流端の水位，h_{obs} : 尾崎地点の観測水位，h_{cal} : 尾崎地点の解析水位である．なお，洪水到達時間 T は，解析で求まる洪水伝播速度[9]を用いて算出した．

c)　排水機場からの流入条件

計算対象範囲には，信濃川において2箇所のポンプ排水地点があり，洪水期間中にポンプ排水が実施されている．このため，排水機場からの流入地点では，実績の排水量ハイドログラフを横流入条件として直接与えた．排水量のピーク値は，排水機場1で27m^3/s，排水機場2で87m^3/s程度と本川流量に比べて小さい．

(4)　粗度係数及び樹木群透過係数の設定

平成23年7月洪水では，五十嵐川の流入がきっかけとなり，その影響が合流点上下流の水面形に及んでいることに着目し，五十嵐川及び信濃川34.0～44.0k区間，中ノ口川，刈谷田川及び信濃川44.0～50.7k区間の順に，観測水面形の時間変化を表現するように，粗度係数と樹木群透過係数の調整を行った．最終的に設定した粗度係数及び樹木群透過係数を表-1に示す．

4．　平成23年7月洪水の解析結果と洪水流下特性

(1)　平成23年7月洪水の検証計算

図-5に，信濃川と中ノ口川における水面形の時間変化

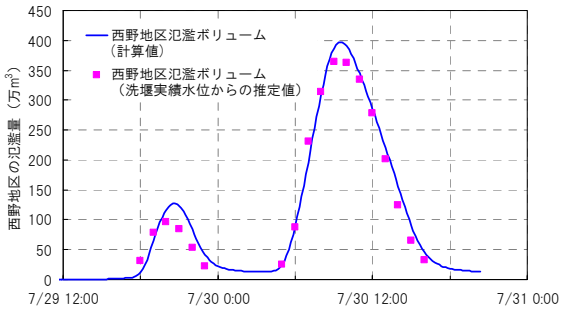


図-8　西野地区の氾濫ボリュームの時間変化

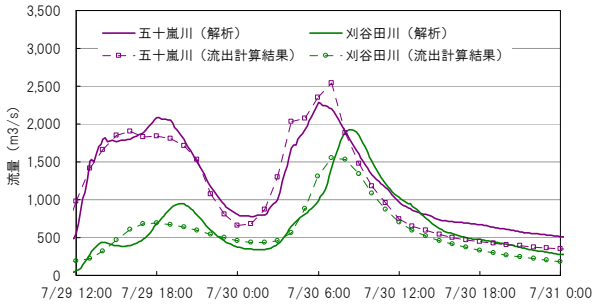
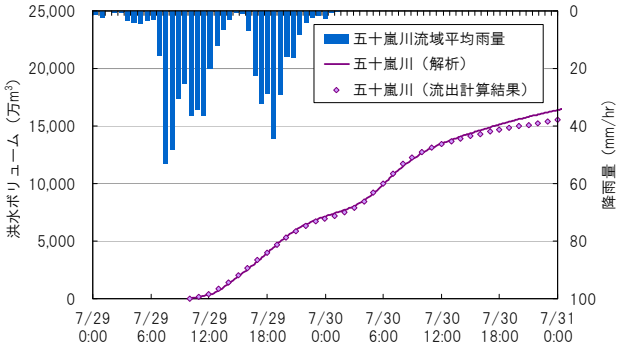
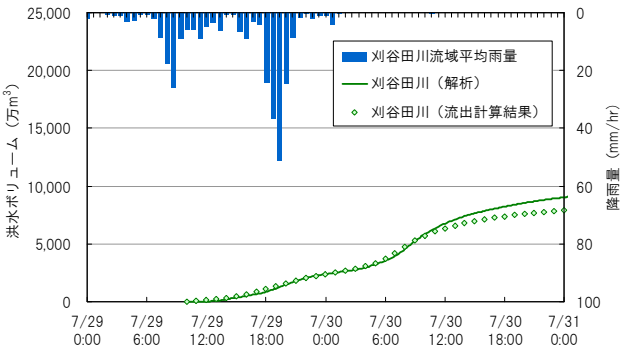


図-9　五十嵐川と刈谷田川の流入量ハイドログラフの解析地と流出計算結果との比較



(a) 五十嵐川



(b) 刈谷田川

図-10　五十嵐川と刈谷田川における洪水ボリュームの時間変化の解析値と流出計算結果との比較

の解析結果と観測値の比較図を，図-6に，一新橋地点と尾崎地点における水位ハイドログラフの解析値と観測値の比較図をそれぞれ示す．五十嵐川と刈谷田川の流入境界条件の設定に用いた一新橋地点と尾崎地点の解析水位は，観測値とほぼ一致する結果が得られている．また，水面形の時間変化によると，信濃川の荒町地点において解析水位が観測水位より若干低く算定されているが，全体的に見て信濃川，中ノ口川共に解析水位は観測水位を説明できており，ピーク時の水位は洪水痕跡水位と概ね一致している．

次に，流量ハイドログラフ及び西野地区の氾濫ボリュームの妥当性について検証を行う．図-7に，流量ハイドログラフの解析値と実績値の比較を示す．これによると，五十嵐川合流点の直下流の荒町地点及び刈谷田川合流点より下流に位置する中ノ口川分派点の中ノ口川水門において，解析値は観測値を概ね表現できている．図-8に，無堤区間の西野地区の氾濫ボリュームの時間変化を示す．西野地区では，2.8km^{2}に渡って最大360万m^{3}の氾濫が発生したと推定される．これに対して，計算では氾濫量のピーク値が約400万m^{3}と実績に比べて大きめの結果となっているが，氾濫量の波形とボリュームは実績値を概ね説明できている．

解析対象範囲内には，五十嵐川と刈谷田川の流量観測データが存在しないため，ここでは，別途検討された降雨流出計算結果を参考とし，推定した洪水ボリューム及び流入量ハイドログラフが妥当であるかどうかについて検証を行う．図-9に五十嵐川と刈谷田川の流量ハイドログラフを，図-10に洪水ボリュームの時間変化の比較をそれぞれ示す．ここに示す五十嵐川と刈谷田川の流出計算結果は，平成23年7月洪水発生時の実績降雨を与えた貯留関数法によって試算されたものであり，上流域のダムによる洪水調節や刈谷田川遊水地の効果，外水氾濫の影響がモデル上考慮されている[2)]．本解析結果を流出計算結果と比較すると，五十嵐川では第二ピーク付近で流量が小さくなり，刈谷田川ではピークが若干早く現れているものの，両河川共に洪水波形と流量の絶対値は流出計算結果と概ね同様の結果を示している．

以上より，本解析手法により，信濃川下流において支川分合流が近接する区間の洪水流下特性を工学上十分な精度で説明できるものと判断できる．

(2)　信濃川下流区間における洪水流下特性の分析

次に，検証したモデルを用いて，平成23年7月洪水における五十嵐川・刈谷田川の合流と中ノ口川分派を含む区間の洪水流下状況及びその特性について分析を行う．

図-11に，解析で得られた支川分合流点区間における流量ハイドログラフを，西野地区の氾濫ボリュームの時間変化とともに示す．一波形目では，立ち上がり時において五十嵐川合流点上流で最大580m^3/sの逆流が発生する．また，中ノ口川水門では開度調節がなされていることから，五十嵐川合流点及び中ノ口川水門より上流側の水位が上昇する．この結果，刈谷田川からの流入量は，全量が下流に流れることができず，刈谷田川合流点から洗堰までの区間に貯留し，刈谷田川流入量が700m^3/s程

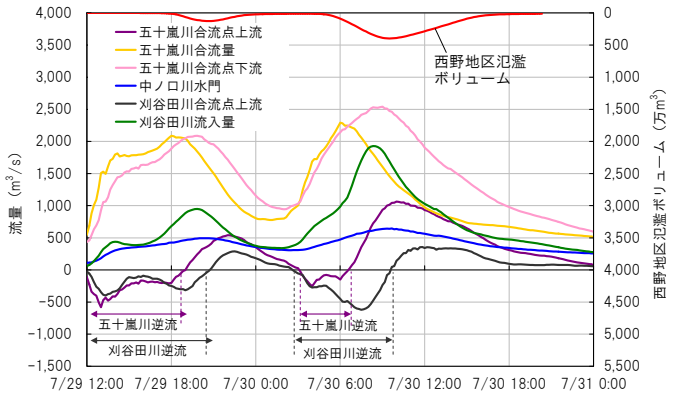


図-11　支川分合流区間の流量ハイドログラフ

度となる7/29 18:00頃から西野地区で溢水氾濫が生じ始める．二波形目においても一波形目と同様の傾向となるが，五十嵐川では下流方向の流れが卓越し，一波形目に比べて逆流量は少なくなる．また，刈谷田川のピーク流入量が一波形目の約2倍となるため，刈谷田川の逆流が顕著となり，結果として西野地区の氾濫量が増大することが確認できる．

5．信濃川下流区間における今後の治水計画策定に向けた課題

平成23年7月洪水を受け，五十嵐川・刈谷田川合流後の本川区間における流下能力不足や，無堤区間である西野地区の溢水氾濫等，河道計画上の問題が明確となった．以下に，本研究の検討結果を交え，信濃川下流区間における今後の治水計画策定に向けた課題を述べる．

本検討により，信濃川下流区間では大規模洪水時において支川合流と中ノ口川水門の堰上げの影響により大規模な貯留が生じ，H.W.L.を超過させるほどの水位上昇を引き起こすことが明らかとなった．これより，河道計画を検討する際には，流量配分を仮定した不等流解析では不十分で，支川流入付近の逆流機構や河道貯留の時間変化を考慮した解析法による計画としなければならない．

また，河道計画策定に向けて，刈谷田川の流入機構とそれに伴う貯留特性の解明が重要な課題となるが，現在，刈谷田川合流点付近には水位観測点が少なく，詳細な水面形時間変化を把握することができない．このため，刈谷田川合流点付近において新たに水位計を設置し，五十嵐川と同等の精度で洪水流解析が実施できるような洪水観測体制を整える必要がある．

6．結論

本研究では，支川からの流入量が卓越し，かつ複雑な流れ場を形成する信濃川下流区間を対象に，洪水流下を把握するための解析モデルを構築し，平成23年7月洪水の検証計算と洪水流下特性の分析を行った．以下に，得られた主要な結論と今後の課題を示す．

1) 信濃川下流の水面形に大きな影響を及ぼす五十嵐川と刈谷田川を本川として扱い，刈谷田川の流入量は信濃川の観測水位を参照して推定し，信濃川と中ノ口川の観測水面形の時間変化に基づいた非定常流解析を行うことで，支川分合流を含む信濃川下流区間の観測流量ハイドログラフと西野地区の氾濫量を工学上十分な精度で説明できるモデルを構築した．
2) 構築したモデルにより，五十嵐川・刈谷田川の合流及び中ノ口川への分派を含む区間の非定常現象を明らかにし，五十嵐川からの逆流と中ノ口川水門による堰上げが刈谷田川の逆流を引き起こし，刈谷田川合流点から洗堰までの区間における大規模な貯留を生じさせたことを定量的に示した．
3) 信濃川下流区間では，支川流入付近の逆流機構や河道貯留の時間変化を考慮した解析法を用いた河道計画としなければならない．そのためには，現在水位が観測されていない刈谷田川合流点付近で新たに水位計を設置する必要がある．
4) 今後は，中ノ口川の合流や関屋分水路の分派も含め，信濃川下流区間全体の洪水流下特性を明らかにし，信濃川及び中ノ口川の治水計画立案における課題と方向性を示していく．

参考文献

1) 平成23年7月新潟･福島豪雨水害の検証を踏まえた治水方策に関する懇談会：新潟･福島豪雨水害を教訓とする今後の治水方策について，国土交通省北陸地方整備局，2011
2) 平成23年7月新潟・福島豪雨対策検討委員会：第2回平成23年7月新潟・福島豪雨対策検討委員会資料，新潟県，2011
3) 福岡捷二，渡邊明英，原 俊彦，秋山正人：水面形の時間変化と非定常二次元解析を用いた洪水流量ハイドログラフと貯留量の高精度推算，土木学会論文集，第761号/Ⅱ-67，pp.45-56, 2004.
4) 福岡捷二，永井慎也，佐藤宏明：河川合流部を含む本・支川の流量ハイドログラフ，貯留量の評価－利根川・渡良瀬川の平成13年9月洪水を例として―，水工学論文集，第49巻(1)，pp. 625-630，2005.
5) 福岡捷二，渡邊明英，田端幸輔，風間 聡，牛膓 宏：利根川・江戸川分派点を含む区間における流量ハイドログラフと粗度係数・樹木群透過係数の評価，水工学論文集，第50巻，pp. 1165-1171，2006.
6) 内田龍彦，濱邉竜一，福岡捷二：低平地河川におけるポンプ排水が洪水流に与える影響評価：水面形時系列観測データを用いた非定常二次元流解析の活用，水文・水資源学会誌，Vol. 25 (2012) No. 4，2012.
7) 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，水工学論文集，第56巻，I_835-840，2012.
8) 岡村誠司：河口区間および本・支川分流区間を含む河道の河床変動予測技術に関する研究，中央大学博士論文，2011
9) 例えば，日野幹雄：明解水理学，丸善，1983

(2012. 9. 30受付)