

信濃川下流域河道網における 河川の相互作用に着目した水理特性の把握

STUDY ON THE HYDRAULIC INTERACTION IN THE CHANNEL NETWORK ON LOW-LYING AREA OF SHINANO RIVER BASIN

星野 剛¹・小関 博司²・岡部 裕馬²・安田 浩保³

Tsuyoshi HOSHINO, Hiroshi KOSEKI, Yuma OKABE and Hiroyasu YASUDA

¹ 学生会員 修 (工学) 新潟大学大学院 自然科学研究科 (〒 950-2181 新潟市西区五十嵐 2 の町 8050)

² 学生会員 新潟大学大学院 自然科学研究科 (〒 950-2181 新潟市西区五十嵐 2 の町 8050)

³ 正会員 博 (工学) 新潟大学准教授 災害・復興科学研究所 (〒 950-2181 新潟市西区五十嵐 2 の町 8050)

The lower reaches of the Shinano River have many branches, a bifurcation point and two confluence points within 5km. In Niigata Fukushima heavy rain in 2011, a backward flow was observed at Shinano river. It means channel network flow like the Shinano River has strong interaction of each river flow. This characteristic makes controlling flood by River Management Facilities and calculating discharge by H-Q curve using measured water level extremely difficult. For these reasons, it is important to understand characteristics of channel network flow. This study investigate interaction of channel network flow in lower reaches of the Shinano River with measured value and 2D-computation model. The results indicate that backward flow is functioning as retarding basin.

Key Words: *channel networks, bifurcation, confluence, shinano river, shallow water equation, 2D computation*

1. はじめに

我が国には、利根川、信濃川、太田川に代表されるような人口や資産の集中地においてさえ分岐や合流を繰り返す複雑な河道網が存在する。これらの河道網は、河床勾配が小さいうえ、本川と同程度の流量規模で分岐・合流する支川を有する共通の特徴がある。このような条件の河道網では洪水時に本川と支川の水理的な相互作用が大きくなる。

本研究で対象とする信濃川下流域は、低平地に位置するとともにわずか 5km ほどの短区間に 4 河川の分合流が連続する複雑な河道網を形成するため、水害に対して構造的に脆弱である。近年、この流域は 2004 年の 7.13 水害と 2011 年 7 月の新潟・福島豪雨の二つの大規模洪水に見舞われた。後者の 2011 年洪水において信濃川本川は計画高水位を超える水位に達し、大規模な被害は免れたものの、長時間にわたり非常に危険な状態が継続した。これに加え、信濃川本川では支川の五十嵐川の合流に誘発されたと考えられる逆流が観測された。低平地における河道網では河川間の相互作用の影響が極めて大きいことが浮き彫りになり、洪水時の河道網の安全確保には課題が残されていることが顕在化した。

逆流をはじめとする河川間の水理的な相互作用は、それが強ければ強いほど現状の技術水準では河川管理の根幹的な指標である水位と流量の推定が難しくなる。従っ

て、河道設計時では流下能力の適切な把握、洪水時では $H-Q$ 曲線による簡便な流量推定、さらに河道網に設置される堰や水門などの河川構造物の制御は困難を極める。また、弾力的な河川管理のためには、本川と支川の接続点は合流点か分流点のいずれかに固定的に識別されるべきではないことが挙げられる。

時空間的に連続した水量に基づくことで河川間の相互作用の把握は容易になる。現状では、実河川における水位などの水量は設置された観測点から離散的に得られるだけで、これらの観測値は河川間の相互作用の把握に十分なだけの空間解像度を有していない。また、流量の直接計測は事実上不可能である。この現実に対し、数値解析は有効な手法の一つとなろう。河道網や河川の分合流の数値解析はこれまでにさまざまな手法が提案され、一次元解析を分合流のために高度化した事例 (例えば 1)2)3) や二次元以上の解析事例 (例えば 4)5)6) があるものの、河道網の相互作用に深く踏み込んだ研究は多くない。

本研究では、まず、観測値や流出解析の結果に基づき 2011 年 7 月の新潟・福島豪雨における信濃川下流域の洪水流の挙動について考察する。次に洪水時の同流域の河道網の水理的な相互作用の把握を目的とした再現計算を行い、観測結果のみからでは把握が困難となる流量の時間変化や水位と流量の関係性について考察する。

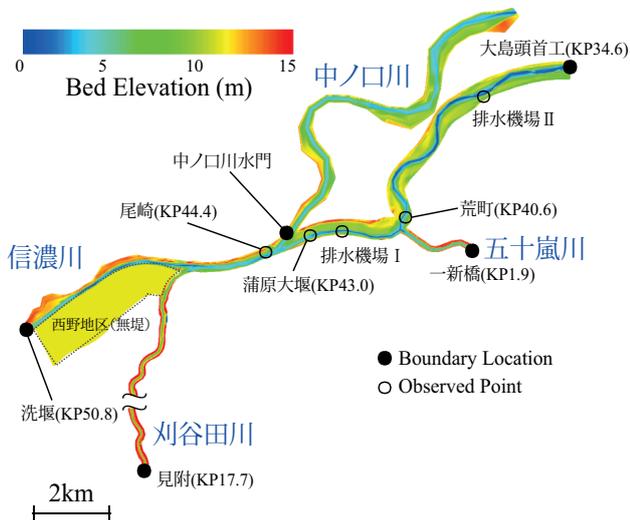


図-1 信濃川下流域の河道地形および水位観測点（紙面の都合上，刈谷田川は分割して掲載）

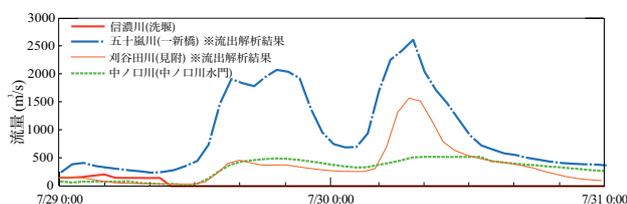


図-2 2011年新潟・福島豪雨時の流量（観測値，推定値）

2. 2011年新潟・福島豪雨における信濃川下流域の概要

(1) 信濃川下流域の概要

図-1に示すように信濃川下流域は河口から41.1km地点に五十嵐川合流点，44km地点に中ノ口川分派点，46km地点に刈谷田川合流点を有する複雑な河道形状となっている。

この河道網には洪水時の安全性を向上させるための水理構造物が複数存在している。代表的なものとして，中ノ口川分派点と五十嵐川合流点の間の42.8km地点の蒲原大堰，中ノ口川分派点に設置されている中ノ口川水門，信濃川上流50.8km地点の大河津分水洗堰がある。洪水時にはこれらの施設が流況に応じて稼働し，大河津分水洗堰が閉鎖されて信濃川上流からの供給流量を $0\text{m}^3/\text{s}$ とする。これにより，信濃川下流域の流量の供給源は刈谷田川と五十嵐川となる。中ノ口川水門は洪水時の分派量を調整し，蒲原大堰は全開となることで刈谷田川由来の流量の信濃川への流下を促す。また，堤内地に広大な低平地を有することから排水機場が多数存在することも特徴の一つである。

(2) 2011年新潟・福島豪雨時の水理

a) 流量に着目した考察

2011年の新潟・福島豪雨における信濃川下流域の各河川の流量を図-2に示す。五十嵐川と刈谷田川の流量は流出解析の結果を示している⁷⁾。

河道網の上流端における流量の供給は洗堰の閉鎖に

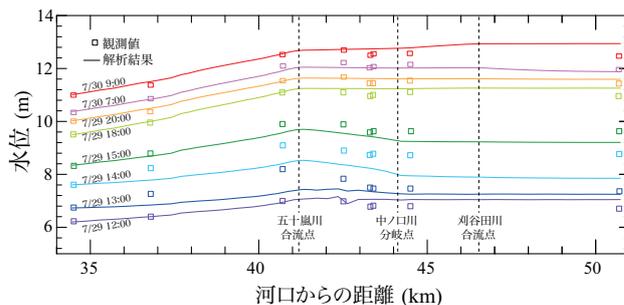


図-3 縦断水位の時間変化

より洪水開始時には $0\text{m}^3/\text{s}$ となるため，洪水時には五十嵐川と刈谷田川の流量が河道網全体の流入量のほとんどを占める。中ノ口川への分派量は，中ノ口川水門が機能して洪水期間中は一定に保たれ， $500\text{m}^3/\text{s}$ 程度の流量が水門を通過している。

2011年豪雨時の流量ハイドログラフの特徴は五十嵐川のそれが二峰性を示すことである。洪水の第一波では刈谷田川の流量の増加が小さかったことから，最大で五十嵐川は刈谷田川の5倍程度の流量差が生じていた。7月30日2:00前後には五十嵐川の流量が一時的に低下する洪水の休息期が存在する。その後の洪水の第二波では刈谷田川と五十嵐川のハイドロのピークがほぼ同時刻に出現しており，その流量差は2倍程度となっている。このような低平地河道網におけるハイドログラフのピークの出現時刻のずれが複雑な水理を誘起することが容易に想像できる。

b) 水位に着目した考察

図-1に丸で示した各水位観測点の結果を時間ごとの縦断水位として図-3に示す。この図から水位の上昇期においては五十嵐川合流点より上流部において水面が逆勾配となっていることがわかる。また，このことを裏付けるように，実際にこの区間においては五十嵐川からの出水が蒲原大堰を通り信濃川を遡る逆流現象が数時間に渡り観測されている⁸⁾。このような逆勾配や逆流の発生は勾配の緩い低平地河道網ならではの河川の相互作用の結果といえる。

3. 2011年新潟・福島豪雨の再現計算

(1) 矩形格子による河道網解析手法

a) 解法の概説

本研究では，洪水時の水理をより詳しく調べるため，矩形格子に基づく解析手法を導入⁶⁾し，河道網を各河川ごとに分割することなく一体的な水理計算を行った。図-4は河川接続部の計算格子例である。

矩形格子を用いる利点は，幾何形状の表現が柔軟で，細密な格子を用いることでいかなる形状表現をも可能となることや歪曲の大きい一般座標の格子がもたらす打ち切り誤差⁹⁾と無縁である点が挙げられる。著者らは

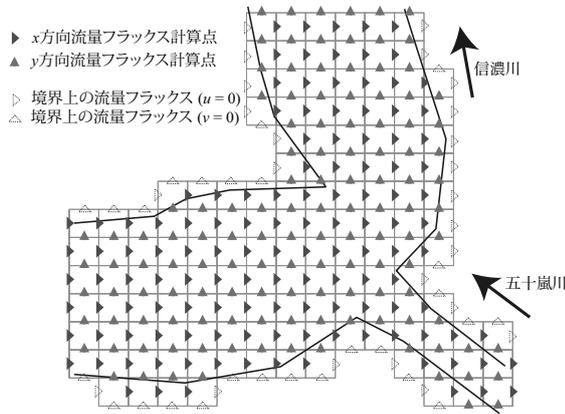


図-4 合流部の格子構成および計算点配置例 (塗りつぶし三角は流量フラックスの計算点, 白抜き三角は差分計算のための流量フラックスを表しており, ここでは0とした. なお水位計算点はすべての格子の中心に位置する.)

この方法と類似の方法により, 分合流部の水理の把握が可能であることを示している⁶⁾. また, この手法では河道内と氾濫原を一体的に解析可能な手法であることから, 河道と氾濫原の水理量の授受が可能となり, 河道と氾濫原も一体的に扱える¹⁰⁾. 一方で, 欠点として, 境界適合のための細分化による計算格子の増加が挙げられる.

b) 支配方程式と数値計算法

流れの支配方程式は以下に示す浅水流方程式である.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{h} \right) + gh \frac{\partial H}{\partial x} = \\ - \frac{\tau_{xb}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t \frac{\partial M}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{h} \right) + gh \frac{\partial H}{\partial y} = \\ - \frac{\tau_{yb}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t \frac{\partial N}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t \frac{\partial N}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\tau_{xb} = \frac{\rho g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (4)$$

$$\tau_{yb} = \frac{\rho g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (5)$$

式(1)はデカルト座標系における流れの連続の式を表しており, また式(2), (3)はデカルト座標系(x, y)における2次元浅水流方程式を表している. ここで, Mはx方向流量フラックス, Nはy方向流量フラックス, hは水深, Hは水位, gは重力加速度, ρは流体密度, τ_{xb}はx方向底面剪断力, τ_{yb}はy方向底面剪断力, ν_tは動粘性係数を表す.

これらの式の数値計算は, 連続の式, 運動の式とも

にスタガード格子に基づく2次精度のLeap-Frog法を適用した. また, 移流項の差分には風上差分法を用いた.

c) 解析の効率化

通常, 矩形格子の格子構成では, 矩形の計算領域が定義され, その内部が基盤目状に分割される. このような格子構成では, 本研究のような河道内のみが解析対象となる場合, 計算に用いる格子より用いない格子の数が増えることがほとんどで, 記憶容量と記憶域の走査距離の増大のために演算速度が低下する. この問題を回避するため, まず2次元配列から計算に用いる格子のみを抽出し, 次に格子の隣接関係が付与された1次元配列に抽出された2次元配列を置換し, 記憶容量と記憶域の走査距離の軽減により演算時間の大幅な削減を図った.

(2) 計算条件

a) 解析対象領域と期間

再現計算の対象は図-1に示す領域とし, 信濃川は水位観測値のある大島頭首工からKP50.8の大河津分水洗堰までとした. 刈谷田川は見附, 五十嵐川は一新橋, 中ノ口川は分岐点より100m下流の中ノ口川水門までを対象とした. また, 刈谷田川合流点上流の西野地区は無堤箇所であり, 溢水氾濫が生じたことから解析対象領域に加えた. 解析対象期間は7月29日6:00から31日の2日間とした. この期間は蒲原大堰は常に全開となっていたため堰高は無視した.

b) 境界条件および計算条件

境界条件は図-1に黒丸で示した五十嵐川, 刈谷田川, 洗堰それぞれに図-2に示す流量を与え, 信濃川の下流端には大島頭首工の観測水位を与えた. 中ノ口川水門からの放流量は, 解析対象期間の実測値を用い水門の上流の水位のみから水門通過流量が決定されるH-Q式を図-5のように新たに作成した. 本解析においては水門の上流側での水位から水門放流量が決定されるようにした.

Manningの粗度係数は田端らの研究⁵⁾を参考に低水路で0.023から0.028, 高水敷で0.025から0.060となるように設定した. 排水機場からの流入は図-1に示す排水機場1と排水機場2で実績排水量をそれぞれ横流入として与えた. 排水量の最大値はそれぞれ27m³/s, 87m³/sである. また, 本研究では水理特性の把握が目的であるため固定床条件として計算する.

初期条件は7月29日6:00の水理量を境界条件とした定常計算により求めた水理量とした.

c) 計算格子

計算格子は図-4に示す格子図の1/8の大きさである一辺10mの正方格子を用いた. この大きさの格子を用いることで最も川幅が狭い箇所においても河道形状を最低でも5つの格子で表現でき, 解析領域全体の河道形状を忠実に表現可能となる. 計算格子数は151,500個

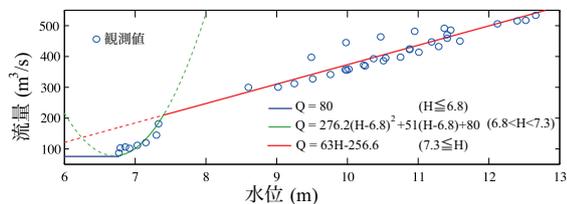


図-5 著者が実測値より算定した中ノ口水門のH-Q式

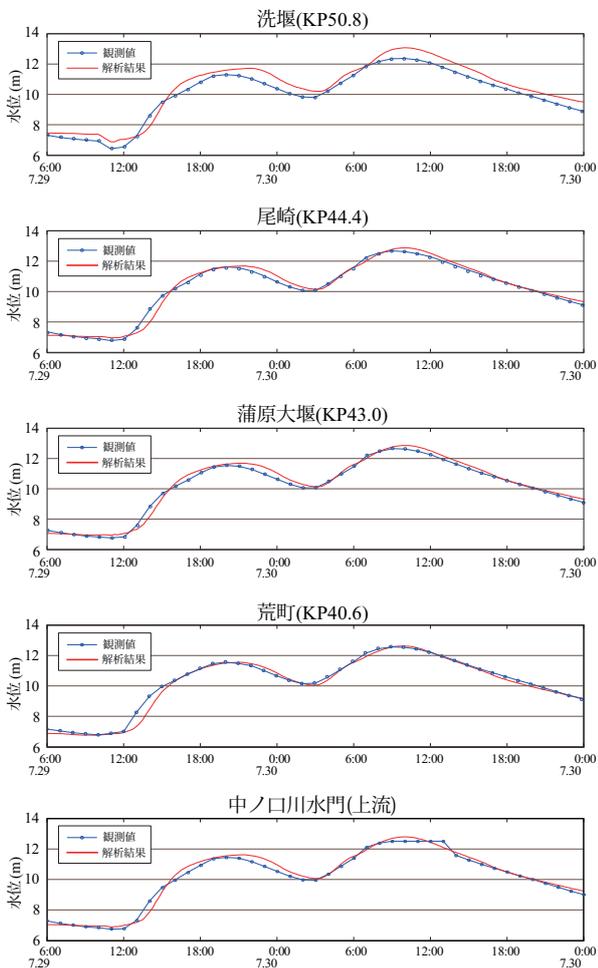


図-6 定点水位 (観測値, 解析結果)

で、格子の1次元配列化が施される以前の7,200,000個と比べると、計算負荷が大幅に軽減されている。

(3) 計算結果の妥当性検証

a) 水位の時間変化による検証

水位観測点における水位の解析結果と観測値を図-6に示した。洗堰の水位は最大で1m程度の相違があるものの、それ以外の水位観測点では水位の最大値とその出現時間は概ね一致しており、本解析手法は妥当であると判断できる。

b) 縦断水位による検証

図-3に各時間の縦断的な水位の解析結果と観測結果を示している。7月29日13:00前後での水位上昇期においては五十嵐川合流付近の水面形の凸型が再現され、河川の相互作用が解析されていることがわかる。また、水位上昇期には時間的なずれが見られるものの、洪水期間で一貫して水位は良好に一致している。

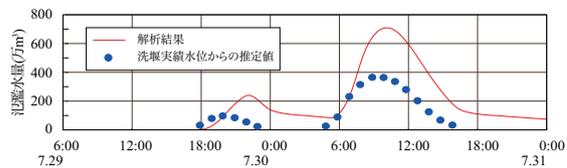


図-7 西野地区氾濫水量⁵⁾

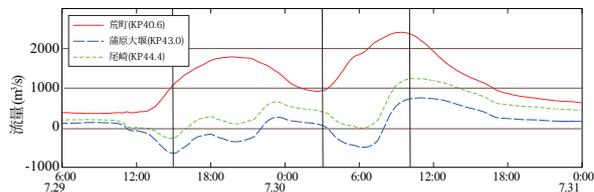


図-8 解析結果から得られた通過流量 (図-9の流線を描いた時刻を图中に縦線で示した。)

c) 西野地区の氾濫水量

図-7に西野地区の氾濫水量を示した。氾濫水量の上昇傾向は両者とも二山になっており同様の傾向を示したものの、解析結果は実績水位からの推定値の2倍程度の氾濫水量を示した。これは洗堰における水位が観測値よりも高いことと同様の原因であると考えられ、その原因としては粗度係数や土砂移動の有無などが挙げられる。

4. 水理特性の考察

前章の再現計算の結果から実測値との多少の相違はみられるものの、流況の特徴は的確に把握されていたと判断し、本章では数値解析により得られた水理量に基づき信濃川下流域河道網の水理特性を考察する。

(1) 流量による考察

図-8には各水位観測点における解析結果から求めた流量を示した。この結果はいずれも通常時の流下方向を正とした値である。数値解析からも逆流の存在が確認され、尾崎と蒲原大堰における解析結果はいずれも逆流が生じる時間帯が存在した。特に蒲原大堰においては順流と逆流が4回交互に入れ替わり、非常に複雑な流況であったことがわかった。

(2) 流線と流速による考察

洪水時の流況を理解するため図-8に示す蒲原大堰での通過流量が特徴的である3つの時刻における流線および合成流速を図-9に示した。なお、非常現象を扱っているため厳密には流線は使用できないが、流向を連続的に把握する目的で用いた。

図-9左に示した7月29日15:00は最も蒲原大堰において逆流が顕著となる時間である。この時間は図-2からわかるように五十嵐川の最初の出水ピークを迎える時間であり、図-3に示すように五十嵐川合流部において水面勾配は1/3000の逆勾配となる。図-9をみると、この時刻では流速5m/s程度の大きな流速で信濃川に合流し、合流後は慣性力の影響で対岸側に膨らみもち

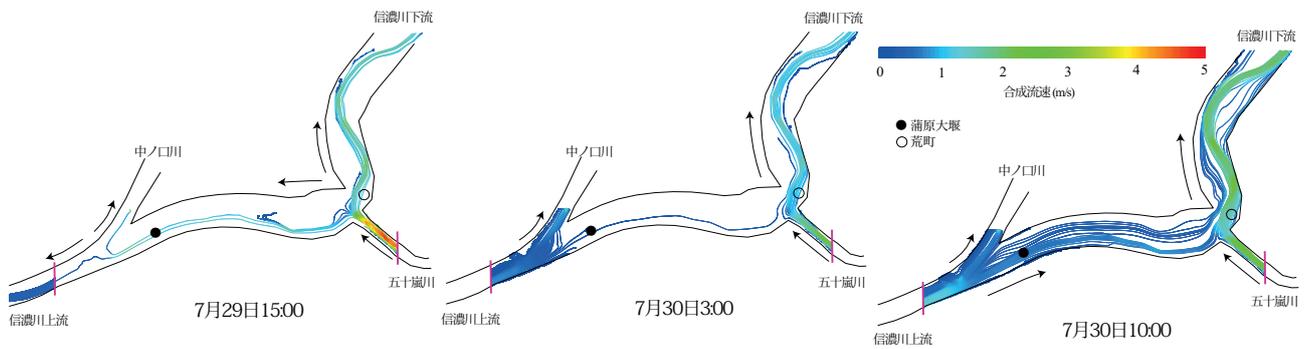


図-9 尾崎から五十嵐川合流点下流までの流線および流速（流線の供給箇所は図中の紫線。流速が0.01m/s以下で描画を打ち切っているため、流線が途切れている箇所が存在する。）

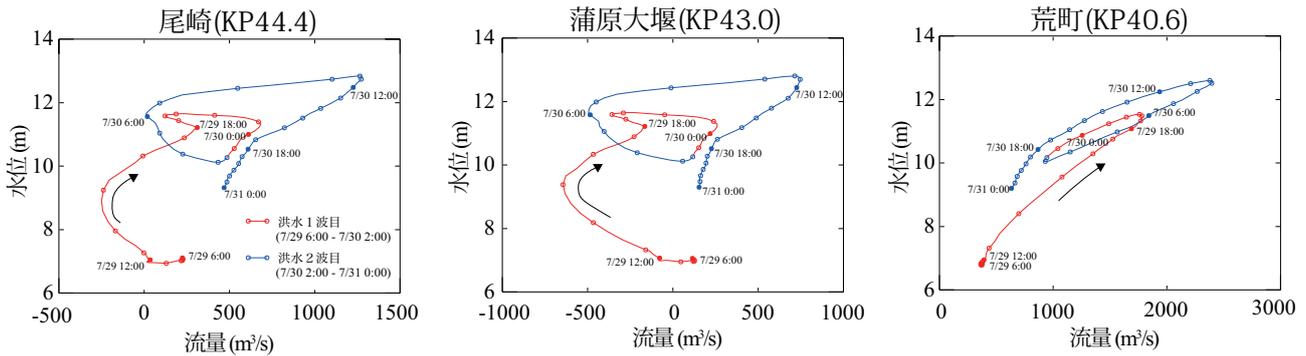


図-10 水位と流量の対応関係

ながらTの字型に分岐している。この流れはさらに、中ノ口川水門や尾崎へと遡上することがわかった。この時刻においては信濃川の水位が上昇途中であったため、信濃川に向かう五十嵐川の水面勾配が大きく、五十嵐川は流勢を維持したまま合流したものと考えられる。

続いて、洪水の一時休息期である7月30日3:00の流線に着目する。この時間は尾崎を通過する流量は中ノ口川に流入し、五十嵐川は信濃川下流域へと流下し、流れの分岐・合流がほとんど見られない時間帯の存在が確認された。

最後に洪水のピーク時である7月30日10:00の流線に着目する。この時刻ではいずれの流れも平常時の流下方向へと流れる。五十嵐川からの流入量は7月29日15:00と同程度であるものの信濃川本川の水位が高いため流速は流量ピークにも関わらず、洪水休息期と同程度の2.5m/s程度となることが確認された。

以上のことから流向のみならず流速も河川間の相互作用に鋭敏に反応することがわかった。

(3) 水位と流量の対応関係

このような複雑な流れに対して、河川の流量推定に広く用いられる $H-Q$ 曲線がどのような応答を示すのか調べた。解析結果から作成した水位観測点3箇所の水位と流量の関係を図-10に示した。

一般的に $H-Q$ 曲線は荒町に見られるような反時計

回りで $H-Q$ ループを描くものの、逆流が生ずる尾崎と蒲原大堰では時計回りのループが生じる。また、同一の水位に対して、流量の取り得る幅が広いことも明らかとなった。

この性質は複数の河川の相互作用によりもたらされるもので、低平地河道網の特徴であるといえる。また、等流状態からの乖離が大きくなりやすいため1価関数型の一般的な $H-Q$ 曲線式が有効に機能しないことは明らかである。

(4) 逆流量が担う洪水調節機能

このような河道網の特徴が洪水の流下特性に与える影響について考察する。図-11に信濃川河道網への総流入量 Q_{IN} を実線、中ノ口川水門と荒町を通過して河道網外へと流出する総流出量 Q_{OUT} を点線で示した。 Q_{IN} 、 Q_{OUT} は以下の式で算出した。

$$Q_{IN} = Q_O + Q_K + Q_I + Q_P \quad (6)$$

$$Q_{OUT} = Q_N + Q_A \quad (7)$$

ここで、 Q_O 、 Q_K 、 Q_I 、 Q_P はそれぞれ河道網への流入量である大河津分水洗堰、刈谷田川、五十嵐川、ポンプ排水の流量を意味している。 Q_N 、 Q_A はそれぞれ河道網外への流出量である中ノ口川水門、信濃川の荒町観測所の通過流量を意味している。

図-11に示す総流出量 Q_{OUT} の時間変化率は、総流入

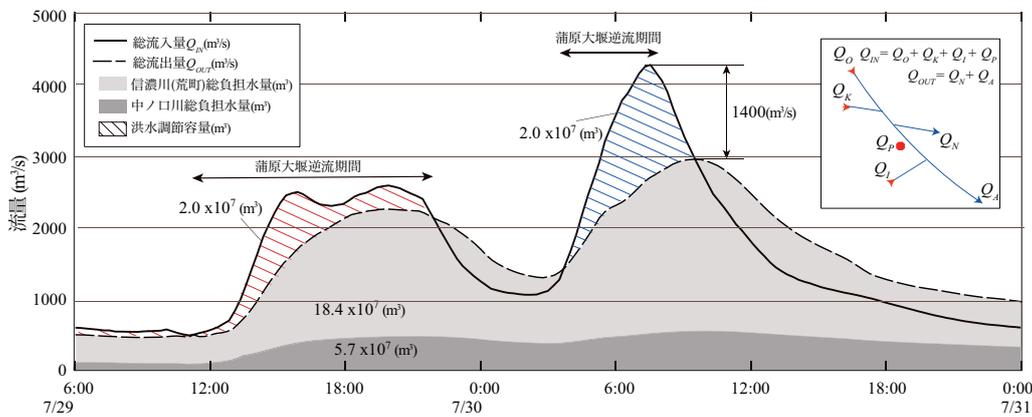


図-11 信濃川河道網の洪水調節機能

量 Q_{IN} のそれと比べ、洪水の第一波、第二波のいずれも鈍化するとともに時間的な遅れを生じていることが見て取れる。また、図-8、図-11 から、この鈍化期間は蒲原大堰で観測された逆流期間と概ね一致していることがわかる。つまり、このような Q_{IN} と Q_{OUT} の波形の差異は、主に逆流をはじめとする水理的な相互作用を受けた河道網よりもたらされた洪水緩和機能と換言できよう。なお、今回の洪水では部分的に西野地区の氾濫もこの洪水緩和機能を担っている。

図-11 中に赤色と青色の斜線で示した Q_{IN} と Q_{OUT} の差分は、洪水の第一波と第二波のそれぞれの貯水量と解釈できる。それらの総量はいずれも $2.0 \times 10^7 \text{ m}^3$ にも及び、刈谷田川見附地点の上流に整備されている刈谷田川遊水地の容量と比べて10倍にも及ぶ。仮に、このような洪水緩和機能が作用せずに総流入量 Q_{IN} がそのまま河道網外へ流出した場合、信濃川の荒町地点や中ノ口川では第二波の流量ピーク時においてはさらに約 $1400 \text{ m}^3/\text{s}$ の流量の負担を強いられ、特に、五十嵐川合流点より下流側において大幅に負担が増加したことが推測される。また、今回の洪水では洪水の一時休息期において河道網内の貯水量が流下して大幅に減少したことにより、洪水の第二波においてもその洪水緩和機能が十分に発揮されたと考えられる。

洪水時の信濃川下流域の河道網では、本川が支川に水理的な影響を一方的に及ぼすだけに留まらず、本川と支川が相互に強い影響を及ぼし合っていることがうかがえる。このため、河川管理においては、流量の時間変動の把握を主体とした河川間の相互作用の把握が極めて重要となる。

5. まとめ

信濃川下流域の河道網の有する水理特性について、新潟・福島豪雨を対象に実測値と数値解析に基づき考察した。

洪水時の各河川の相互作用は大きく、流向や流速が著しく変化することや、その影響により等流からの乖離が顕著となって $H-Q$ 曲線による簡便な流量推定が困難であることが示された。また、信濃川河道網の有

する洪水調節機能の規模について定量的に示し、低平地の河道網管理においては流量の時間変動の把握が重要であることを明らかとした。

謝辞：本研究は、科研費基盤研究(B)(代表者 木村一郎)からの支援を受けて実施されている。国土交通省北陸地方整備局および新潟県には河道測量および洪水時の水文データを提供していただいた。また、解析結果の整理には新潟大学大学院 水口大輔君に多大なる協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 岩佐義朗, 綾史郎, 山本正幸: ネットワーク状水路の水理解析, 京大防災研究所年報, 第19巻B, 201-219, 1978.
- 2) 伊藤秀夫: 低平地開水路網の定常流に関する研究, 土木学会論文報告集, 第181号, 41-53, 1970.
- 3) 金本満, 常松芳昭: グラフ理論による河川網不定流の水理解析, 土木学会論文集, No.429, II-15, pp.67-75, 1991.7
- 4) DINH, Thanh Mung, KIMURA, I. SHIMIZU, Y.: Computation of bed deformation at a river confluence using depth-averaged 2D models, RCEM2011
- 5) 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口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, 787-792, 2013.
- 6) 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, 土木学会水工学論文集, 第56巻, 2012
- 7) 洪水の検証及び被害実態の把握、分析, 新潟県土木部 <http://www.pref.niigata.lg.jp/HTMLArticle/350/759/siryou2-1.pdf>
- 8) 平成23年7月新潟・福島豪雨の検証を踏まえた治水方策に関する懇談会資料, 国土交通省北陸地方整備局河川部 <http://www.hrr.mlit.go.jp/river/gouusuigai/kondankai/hyousi.html>
- 9) 星野剛, 安田浩保: 自然河川の水理解析における一般座標格子が有する打ち切り誤差の理論的評価とその緩和手法, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.69, 投稿中.
- 10) 星野剛, 西家健宏, 小関博司, 安田浩保: 解析コストの効率化を目的とした河道・氾濫原一体型解析法の提案, 河川技術論文集, 第19巻, 投稿中

(2013.4.4 受付)