

陽的一体型解法による信濃川下流域河道網の 水理特性の把握

新潟大学工学部 学生員○岡部 裕馬
新潟大学大学院自然科学研究科 学生員 星野 剛
新潟大学大学院自然科学研究科 学生員 小関 博司
新潟大学災害・復興科学研究所 正員 安田 浩保

1. はじめに

我が国では利根川、信濃川、太田川に代表されるように人口や資産の集中地に複数の分岐や合流を有する河道網が広がっている。その内の一つの信濃川下流域は水害に対して脆弱な低平地であるとともに、短区間で4河川の分合流を有する複雑な流路網を形成している。近年、この流域では2004年の7.13水害や2011年7月の新潟・福島豪雨といった大規模洪水が発生した。この洪水では支川からの流出が信濃川を逆流する水理現象が観測され、低平地における河道網では各河川の相互作用が極めて大きいことが露見した。河道管理においては、逆流に代表される河川の相互作用は河道内の河川構造物による洪水の制御を困難とさせるばかりか、H-Q曲線の信頼性の低下を招くなど河道管理を難しくする要因となるため、複数の河川の相互作用の理解に対しては極めて高い工学的需要が存在する。

河道網を対象とした数値解析においては分岐部と合流部の扱いが不可避であり、実河川の分合流点の流況を踏まえると、少なくとも2次元以上の解析が望ましい。

実河川の合流部と分流部の解析法の既往研究は境界適合に一般座標系を導入し、解析対象の河道ごとに独立した計算格子を、陰的解法を介することで結合して解析を行なっているものがほとんどである¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。これらは陰的分離型解法と総称してよからう。

分流部の研究例は、陰的分離型解法を用いた合流部の解析に限らず非常に少ない。分流部の理論的な解析法が完全に決着されていないことが理由のひとつとして考えられる。この問題の解決手法の一つとして著者らは複雑な幾何形状の柔軟な表現が可能な矩形格子を適用した分岐合流部の解析を行い、平常時から洪水時までの一連の流量配分比の良好な推算が可能なことを示した⁵⁾。著者らの方法は解析領域を一体的な格子構成とし、計算法には陽的解法のみを用いる陽的一体型解法である。この解法では、分流点と合流点を識別する必要がないため、計算方向や求算手順は同一で良く、河道の接続点に対して個別の境界条件を与える必要もない。

本研究ではまず著者らの解析手法により2011年7月の新潟・福島豪雨における信濃川下流域の流況の再現計算を行い、河道網の一体的な扱いが可能な解析手法であることを示す。次に、再現計算や数値実験から信濃川下流域の基本的な水理特性を明らかにした。

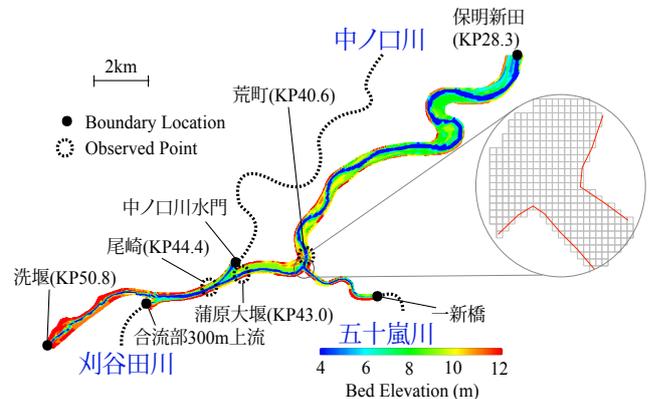


図-1 信濃川下流域の河道網および標高図

2. 2011年新潟・福島豪雨

(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KP41.1地点に五十嵐川合流点、KP44.4地点に中ノ口川分派点、KP46.4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。また、低平地であり、水害常襲地帯であったため治水施設が複数存在する。代表的なものには信濃川上流KP50.8地点の大河津分水洗堰、中ノ口川分派点に設置されている中ノ口川水門、中ノ口川分派点と五十嵐川合流点の間のKP43.0地点の蒲原大堰がある。洪水時には大河津分水洗堰により信濃川上流からの供給流量が $0\text{m}^3/\text{s}$ となり、信濃川下流域の流量の供給源は刈谷田川と五十嵐川のみとなる。中ノ口川水門は洪水時の分派量を調整し、蒲原大堰を全開とすることで信濃川への流下を促す。

(2) 2011年新潟・福島豪雨時の特徴

a) 水位に着目した考察

信濃川下流部の分岐合流部が複数存在するKP40.6からKP50.8区間における水位観測点は図-1の丸点で示した箇所である。図-2に2011年新潟・福島豪雨時の観測水位を示す。この図より五十嵐川合流点付近の荒町より上流では洪水時に水位差がほとんどないことがわかる。同時間帯の水面勾配を図-3に示す。この図は下流へ向かう水面勾配を正としており、五十嵐川の合流部である荒町から大河津分水洗堰までの10.2km区間において逆勾配となる時間が存在する。特に緑破線で示した荒町から蒲原大堰間では、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観測されている⁶⁾。

b) 流量に着目した考察

洪水時の信濃川下流域における各河川の流量を図-4に示す⁷⁾。ただし、図中の刈谷田川河口部の流量につい

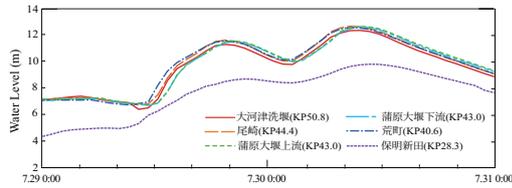


図-2 2011年新潟・福島豪雨時の観測水位

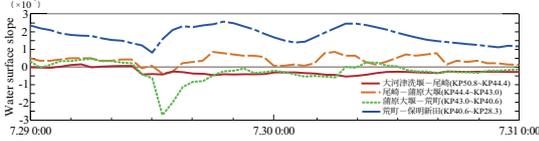


図-3 観測水位から算出した水面勾配

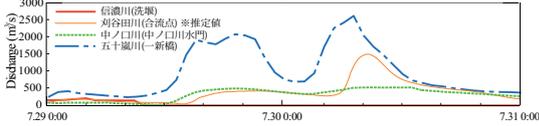


図-4 2011年新潟・福島豪雨時の流量（観測値，推定値）

ては一次元の不定流解析により推定した。この解析は合流点から17.7km上流の見附水位観測所までを対象区間とし、境界条件は下流端には尾崎水位観測所の観測水位、上流端には観測流量を与えた。尾崎水位観測所は刈谷田川合流点から2km下流であるが洪水時には水位差はほとんどないことが判明しているため大きな問題は生じないと考えられる。

刈谷田川と五十嵐川の計画流量は各々1550 m³/s、1800 m³/sであるのに対し、この洪水の最大流量は刈谷田川は計画規模と同程度であり、五十嵐川の最大流量は計画より約700 m³/s超過していた。流量ハイドログラフは五十嵐川は2峰性が強く、刈谷田川では五十嵐川より出水ピークが遅れていた。図-3に示した水面の逆勾配が顕著であった7月29日の13:00においては五十嵐川の流量が約1000 m³/s、刈谷田川では100 m³/s未満であり、流量差が大きくなりはじめた初期の時間であった。また、両河川の流量差が大きくなる2波目の流量ピーク時にも逆勾配との対応関係が見られ、それらの時間には刈谷田川からの流入量よりも中ノ口川への分派流量のほうが大きくなり、流量の収支を考えると五十嵐川の流量が逆流して中ノ口川へと分派されたことが推測される。これらのことから五十嵐川、刈谷田川の流量差が逆勾配を誘発したものと推定でき、この河道網における水理特性は五十嵐川と刈谷田川の流量ハイドログラフの形状に大きく依存することが示唆される。

3. 陽的一体型解法による水理特性の把握

信濃川下流域の水理特性をより明確にするために洪水時の再現計算を行い、観測結果からだけでは推定が困難な水理特性について明らかにした。

(1) 解法の概説

著者らが提案する陽的一体型解法は計算格子に矩形格子を導入し、河道網を一体的な計算領域とする。河川接続部の計算格子の例を図-1に示した。矩形格子は幾何形状の表現が柔軟でいかなる形状表現も可能であり、格子形状が一意に決まる。さらに、著者らは矩形格子を応

用した方法により、河道内と氾濫原を一体的に解析可能な手法も提案しており⁸⁾、氾濫現象をも扱い可能である。

この手法では本解析対象のように堤外地のみを解析対象とした場合では計算に用いない格子も2次元配列上に存在し、演算速度の低下を招く。このため、著者らは、まず2次元配列から計算に用いる格子を抽出し、次に格子の隣接関係と共に1次元配列に置換することで演算時間を大幅に削減するための効率化を施している。

(2) 洪水再現計算

a) 計算条件

再現計算は図-1に示す領域を対象とし、信濃川は水位観測所のあるKP28.3からKP50.8の大河津分水洗堰までとした。刈谷田川は合流点より300m上流、五十嵐川は1.9km上流、中ノ口川は分岐点より100m下流の中ノ口水門までを対象とした。解析対象期間は7月29日0:00から31日0:00の2日間であり、この期間は蒲原大堰は常に全開となっていたため、堰による信濃川の流況への影響はないものと考えた。

境界条件は図-1に点で示した5箇所に図-2、4に示す水位と流量を与えた。Manningの粗度係数は低水路で0.015、高水敷で0.045とした。初期条件は7月29日0:00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。支配方程式には2次元の浅水流方程式を用い、堤外地のみを対象に全て20mの矩形格子を用い、4河川を一体的に扱った。また、信濃川下流端の近傍では加茂川が合流するが、境界条件として下流端水位を縛っているため流入を無視した。同様に、五十嵐川合流点と信濃川下流端との間には複数の排水機場と下条川の流入があるが、各流入量を足し合わせても五十嵐川の流入量の10%程度であるため考慮していない。

b) 計算結果

図-1に示す尾崎(KP44.4)、蒲原大堰(KP43.0)、荒町(KP40.6)での水位の解析結果と観測値を図-5に示した。図中に示す赤破線は解析結果を黒い実線は観測値を示している。これらを比較すると多少の水位の相違は見られるものの水位最大値と最大値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。

図-6には蒲原大堰の流量の解析結果を示した。この結果は通常時の流下方向を正とした値である。この図より本解析の手法により逆流現象の扱いが可能であり、河道網を一体的に扱う手法として妥当であると判断できる。

蒲原大堰における総逆流量は2049x10³m³にまで及ぶことがわかった。また、逆流量は五十嵐川の流量ハイドログラフと同様の2峰性を示した。図-3の観測水位から求めた水面勾配と五十嵐川の流量の変動との相関関係がこの解析結果によっても明らかにされた。

図-7には図-6の紫線で示した蒲原大堰の流量が特徴的な3つの時刻における流線を示した。左から逆流量が最大となる7月29日14:00、逆流量が一時的に0 m³/sとなる7月30日0:00、その後下流への流量が最大となる7月30日10:00での流線をそれぞれ示しており、赤線は五十嵐川、青線は刈谷田川からの出水に由来する流線を示した。同図左から五十嵐川の逆流量の最大時には五十嵐川は信濃川との接続点で分派を示し、逆流した流れは中ノ口水門に分派するだけでなく、刈谷田川合流

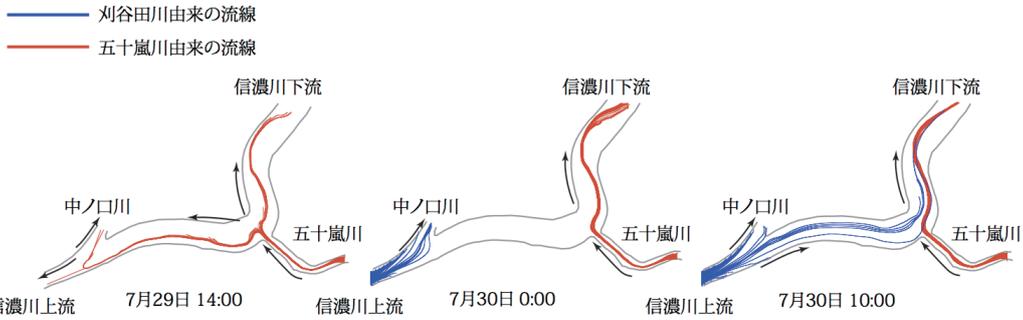


図-7 解析結果（中ノ口川分流点から五十嵐川合流点までの流線）

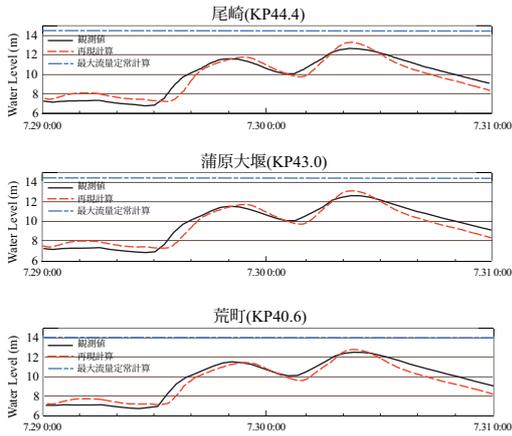


図-5 水位（観測値，解析結果）

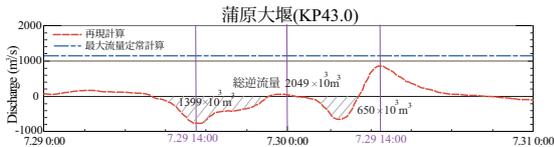


図-6 解析結果（流量）

点まで向かうことがわかった。また、同図中から蒲原大堰の逆流が $0\text{m}^3/\text{s}$ となる時間帯には五十嵐川と信濃川との接続部は分岐から合流に切り替わり、中ノ口川分派点と五十嵐川合流点の間で流れがほとんど生じないことがわかった。さらに同図右からは流出ピーク時には刈谷田川からの流出が中ノ口川と信濃川の接続点で分派することがわかる。このように洪水時には信濃川下流域は分岐、合流の切り替わる極めて複雑な水理現象が生じたことが推測できる。また、本解析手法ではこれらの合流と分流の切り替わりも計算によって扱い可能であることも明らかとなった。

(3) 最大流量の定常計算

本節では流量の非定常性の影響を調べるために五十嵐川、刈谷田川の両河川の最大流量を定常的に境界条件として与えた解析を実施した。なお、この際の中ノ口川の分派流量や下流の保明新田の水位も全て新潟・福島豪雨における観測最大値とした。水位、流量の各解析結果を図-5、6に青色の一点破線で示した。

これらの図より、基本的な計画で用いられるような流量の足し合わせによるだけの不等流としての扱いでは観測値や再現計算からさらに水位が1.5m程度高い値となることがわかった。これは計画流量以内の流量に対しては計画で用いる不等流による考え方は水位を安全側で評

価することを裏付ける結果である。ただし、超過洪水を考えた場合にはその危険性はこのような足し合わせだけでは把握できず、河道間の相互作用と流量の非定常性を把握することが極めて重要である。図-6に着目すると、定常条件では逆流は発生せず、水理特性は非定常的な性質が強く、不等流としての扱いでは非定常性に由来する現象が把握できないことが確認できる。

4. 刈谷田川の流量ハイドログラフの位相変化による影響

これまでに得られた知見から複雑な河道網における水理特性の把握には非定常性の考慮が極めて重要であることが確認された。ここでは刈谷田川の流量ハイドログラフの位相を1.5から9時間前後させた数値実験を行い、流量ハイドログラフの位相差による水位と逆流への影響の度合いを調べた。

(1) 水位に着目した考察

図-8(a)に位相差3時間ごとの尾崎 (KP44.4)、蒲原大堰 (KP43.0)、荒町 (KP40.6)における水位の解析結果を示し図-8(b)には縦断的な最大水位を示した。それぞれ左が刈谷田川の流量ハイドログラフの位相を早めたもの、右が位相を遅らせたものである。

図-8(a)に着目すると各地点での最大水位は3時間位相を早めた条件においては10cm程度の水位の上昇をもたらし、より危険性が高かったといえる。一方でその他の位相変化の場合、いずれも最大水位は低下している。また、同図から位相を遅らせた場合の水位の時間変化に着目すると刈谷田川からの出水時間と対応するように水位ピークが新たに出現することから、それらは刈谷田川由来の水位上昇であるといえ、3時間位相を早めた場合に水位の上昇が見られるのは刈谷田川由来の水位ピークと五十嵐川由来の水位ピークとの一致度が高かったためであると推測できる。

図-8(b)に着目すると唯一水位の増大が見られた3時間位相を早めた場合においては、五十嵐川合流点付近で水位の増大が顕著であった。

(2) 総合的な考察

図-9は横軸に刈谷田川の流量ハイドログラフの位相を変動させた量を示し、縦軸に最大水位を示している。この図は今回対象とした2011年新潟・福島豪雨の流量ハイドログラフの位相差と最大水位の関係性を表しており、今回の洪水は危険性の高い位相差であったといえる。図-10は横軸に刈谷田川の流量ハイドログラフの位相差を変動させた量、縦軸に位相差0を基準とした総逆流量の変化率を示している。総逆流量は五十嵐川の出水が蒲

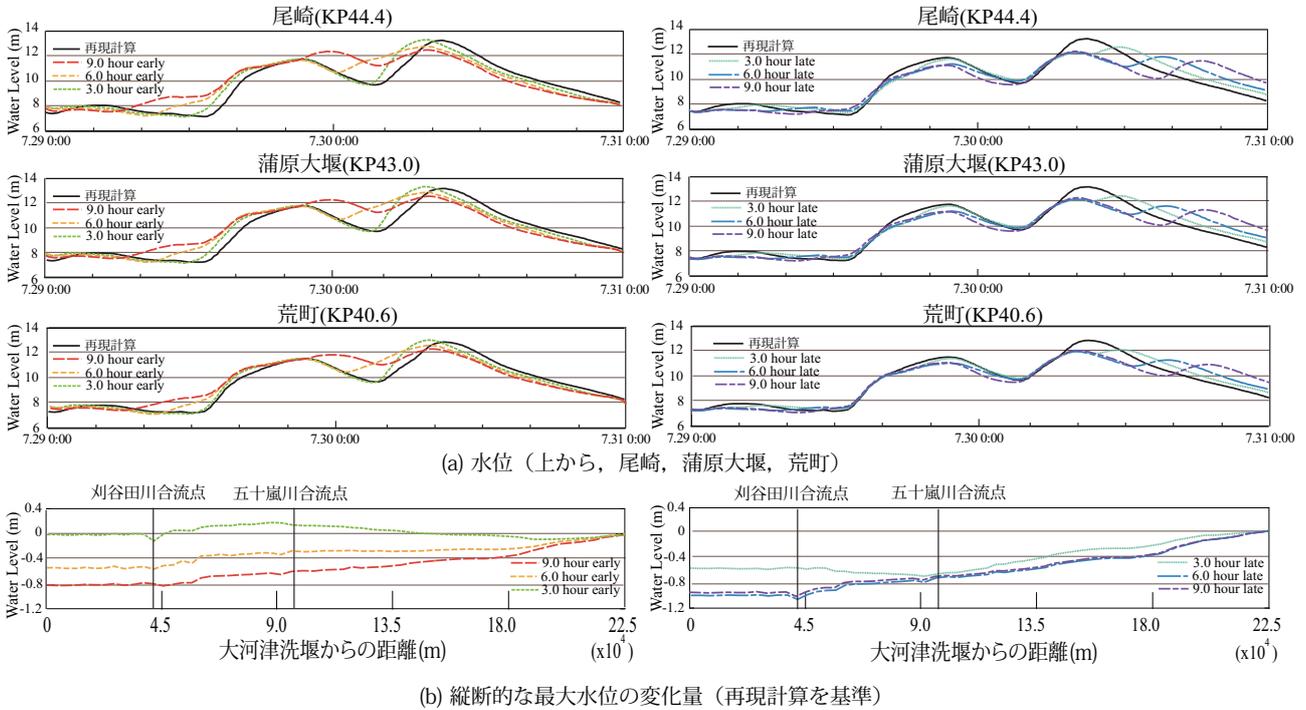


図-8 刈谷田川の流量ハイドログラフの位相差による水位変化

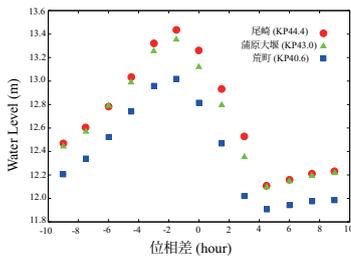


図-9 刈谷田川の流量ハイドログラフの位相差による最大水位の変動図

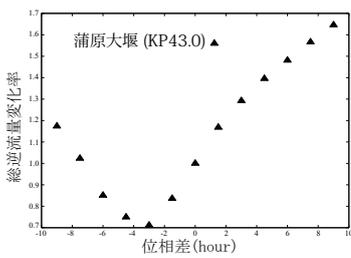


図-10 刈谷田川の流量ハイドログラフの位相差による五十嵐川からの出水の総逆流量の変化率

原大堰を刈谷田川方向に向かう流量を時間積分することで算出した。この図を図-9と比較すると総逆流量が多い位相差と最大水位が低い位相差が高い一致度を示すことができる。この関係性は逆流現象が信濃川における水位の上昇を抑制させることを意味する。

5. まとめ

信濃川下流河道網における2011年新潟・福島豪雨時の再現計算により、本研究で提案する陽的一体型解法の複数の河川への適用性を明らかとした。この解析手法を用いることにより実測値からのみでは推定が困難な複数の河川網の相互作用による影響度の把握が可能となる。

再現計算や数値実験により信濃川下流域における水理特性を明らかにし、五十嵐川と刈谷田川の流量の到達時間の考慮が治水極めて重要であるという知見を示した。この知見から河川管理においてダムや調整池を用いた洪水到達時間の調整の重要性が示唆される。このような考え方は単一の河川のみでなく複数の河道の相互作用を踏まえた治水といえ、今後発生しうる超過洪水に対して効果的な対策と成り得る。

参考文献

- 1) 北条紘次, 畑敏夫, 清水康行: 合流部における2次元流況計算法について, 北海道開発局技術研究発表概要集, 第33巻, pp.209-214, 1989
- 2) DINH, Thanh Mung, KIMURA, I., SHIMIZU, Y.: Computation of bed deformation at a river confluence using depth-averaged 2D models, RCEM2011
- 3) 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—, 土木学会水工学論文集, 第49巻, 2005
- 4) 福岡捷二, 渡邊明英, 田端幸輔, 風間聡, 牛腸宏: 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・樹木透過係数の評価, 土木学会水工学論文集, 第50巻, 2006
- 5) 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
- 6) 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/gousuigai/kondankai/hyousi.html>
- 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/siryu2-1.pdf>
- 8) 西家健宏, 星野剛, 安田浩保: 四分木構造格子を導入した河道と氾濫原の一体型解法の適用性に関する検討, 土木学会関東支部新潟会論文集