

利根川上流域の本・支川を一体とした洪水流解析 — 流域治水への活用に向けて —

見上 哲章¹・水草 浩一²・西澤 洋行³・安達 孝実⁴・福岡 捷二⁵

¹正会員 中央大学研究開発機構 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

E-mail: a19.trp8@g.chuo-u.ac.jp (Corresponding Author)

² 埼玉県県土整備部河川砂防課長 (〒330-9301 埼玉県さいたま市浦和区高砂 3-15-1)

³ 群馬県県土整備部河川課長 (〒371-8570 群馬県前橋市大手町 1-1-1)

⁴正会員 国土交通省関東地方整備局利根川上流河川事務所所長 (〒349-1198 埼玉県久喜市栗橋北 2-19-1)

⁵フェロー 中央大学研究開発機構 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

E-mail: sfuku@tamacc.chuo-u.ac.jp

流域治水の取り組みが全国の河川で進められている。河川管理者には、本・支川において適切に評価された降雨流出量、河道流下能力、氾濫リスク等を関係者へ提示することが求められる。このためには、観測精度の高い水位データを基にした小流域の流出解析と本・支川一体の洪水流解析による縦断水面形と流量の評価が必要である。本研究では、利根川本川、烏川、群馬県及び埼玉県管理の支川群を一体に扱い、令和元年台風 19 号の観測水面形の時間変化と洪水流解析法を用いて、観測水面形に解析水面形が合致するように 2 次支川からの流入量を降雨流出解析により推定した。また、本・支川一体の水面形解析により高精度な 1 次支川流入量を評価し、本川の流量ハイドログラフの形成特性を説明した。提示した本・支川の流出・洪水流解析の評価法は、一般性が高く、他河川の流域治水の検討に活用可能な情報を与える。

Key Words: Tone River 2019 flood, tributaries of Tone River, temporary change of water surface profiles, tank model, discharge hydrograph

1. 序論

近年の激甚化する豪雨災害に対して、集水域、河川区域、氾濫域の関係者が協働してハード・ソフトを一体化した流域治水の取り組みを進めている。河川管理者には、流域を構成する本・支川の降雨流出量、河道流下能力、氾濫リスク等を適切に評価し、関係者へ提示することが求められる。現状の検討では、国・都道府県管理の境界で区切られた評価が多く、流域治水の観点から見れば十分ではない。例えば、国直轄河川に合流する都道府県管理河川の流入量は、一般に、降雨流出解析により与えられている。しかし、支川流入量は本川水位と支川水位との関係で定まる。このため、山間部等の勾配の大きい河川を除き、上記の支川流入量の評価は十分とは言えない。

このため、流域を一体とした洪水解析を実施し、洪水現象を理解する必要がある。そのためには、流域内で空間的に変動する降雨による流出量、本・支川の水面形時間変化、それより定まる支川流入量、さらには本川上流と支川群から形成される流量の時間変化を一体的に評

価する高精度な流出解析法と洪水流解析法が求められる。

降雨流出解析法には、流域を小流域分割し流出機構を概念的に表現した貯留関数法やタンクモデル¹⁾等の集中型モデルと、降雨分布や地形の作用を適切に考慮した分布型モデル²⁾が用いられている。流量観測値は堰やダム等での観測値を除けば水位に比べて精度が低いいため、流量ベースの評価には信頼性に課題が残されている。近年では、降雨流出氾濫解析 RRI モデル³⁾を用いて、降雨データから水位予測や氾濫流予測⁴⁾を行う取り組みがみられる。RRI モデルは、降雨を入力条件とする流域への応用が期待される。一方で、RRI モデルの洪水流解析法は、一次元の diffusion wave 法であるため、時間・縦断的に変化する洪水流の非線形性は十分に評価できない。これは、RRI モデルを利根川に適用した研究からも、支川流入量の精度が低下した要因の 1 つに、洪水流解析に不定流効果を取り込まれていない点を挙げている⁵⁾。

これに対して、直接的に流量を与えない観測水面形の時間変化を基にした洪水流の研究が進められている。福岡⁷⁾は、洪水時の観測水面形の時間変化を洪水流解析

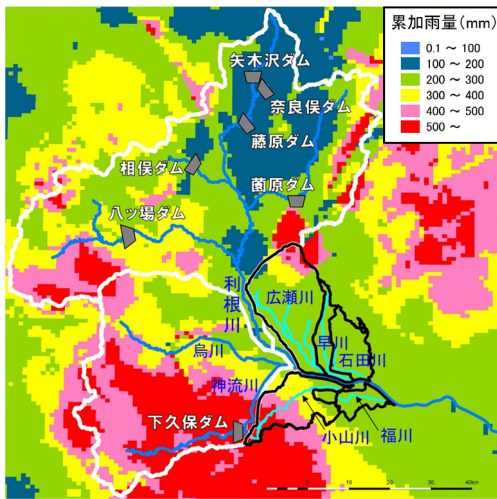


図-1 利根川上流域の河川と令和元年台風19号の3日間雨量図(10/11 1時~10/14 0時)

表-1 利根川本・支川の諸元

河川	流域面積	合流点	洪水解析区間
利根川	3,661 km ²	—	192.0 km ~133.0 km
鳥川	1,800 km ²	184.0 km	6.2 km~合流点
広瀬川	345 km ²	175.5 km	2.4 km~合流点
早川	79 km ²	168.7 km	3.6 km~合流点
石田川	125 km ²	164.8 km	9.4 km~合流点
小山川	200 km ²	168.5 km	14.0 km~合流点
福川	77 km ²	156.7 km	16.0 km~合流点

水位の解として用い、水理現象を的確に説明すると共に、解析結果を河川管理に活かす具体的な方策を提示している。後藤ら⁹⁾は、観測水面形から求めた本支川の流量ハイドログラフを基に流出解析モデルの定数同定を行い、他洪水へ適用し解析法の妥当性を示している。立川ら¹⁰⁾は、観測水位を基にした粒子フィルター法による水位予測を検討している。筆者らは、本・支川さらには2次支川で整備が進む観測精度の高い観測水面形の時間変化を基にした本・支川一体の洪水解析と、観測水面形に解析水面形が合致するように小流域単位の降雨流出量をフィードバックする降雨流出・洪水解析の高精度化が必要と考えている。これらにより、本・支川の水面形の時間変化、支川流入量、本川流量が高精度に求まることで流域で生じる洪水現象の理解と、国・都道府県等の関係者による今後の流域治水の対策につながることを期待される。

本研究では、利根川上流区間とそれに流入する群馬県管理の3支川、及び埼玉県管理の2支川を対象とする。令和元年台風19号出水について、本・支川流域の降雨分布と観測水面形の時間変化から洪水の特徴を分析する。本・支川の洪水解析モデルを構築し、1次支川の小山川と石田川を例に、観測水面形の時間変化からタンクモデル群のパラメータを同定することで2次支川からの流入量を降雨流出解析により評価する。そして、得られた流入量を用いて本・支川の水面形時間変化、支川流入量、本川の流量ハイドログラフの形成について示す。

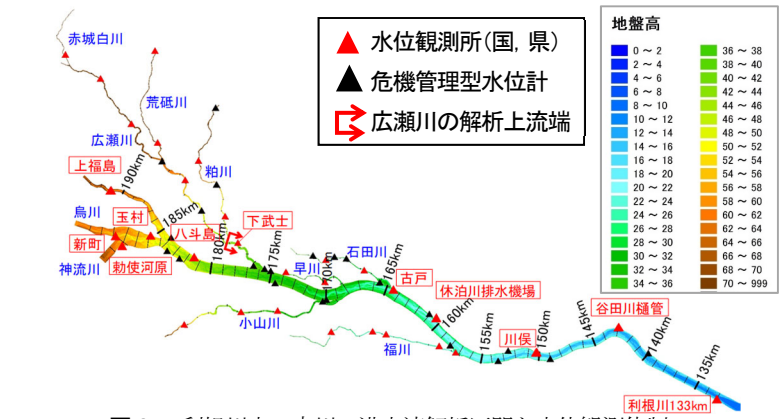


図-2 利根川本・支川の洪水解析区間と水位観測体制

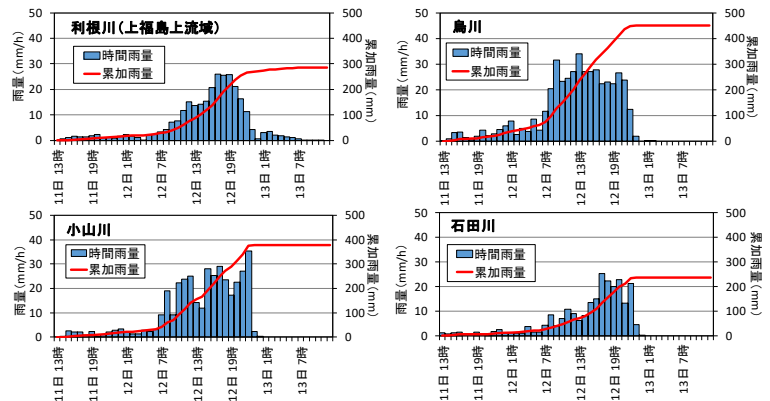


図-3 利根川本川と支川の流域平均時間雨量

2. 対象流域と河川、水位観測体制

利根川の上流域と支川群の位置関係を図-1に示す。解析対象とする利根川の支川は、鳥川とその2次支川の神流川、利根川の左岸に流入する群馬県管理の広瀬川、早川、石田川、及び右岸に流入する埼玉県管理の小山川、福川である。各河川の諸元を表-1に示す。上記の国・県管理の本・支川を一体とする平面二次元洪水解析区間は図-2に示すとおりである。なお、本論文では、広瀬川の解析区間は下武士水位観測所を上流端とする2.4kmから下流を対象とした。図-2には、対象洪水である令和元年台風19号の水位観測体制を示している。各支川には2箇所以上の観測所水位データが取得され、整備が進む危機管理型水位計のデータも洪水水位の高い期間で取得されたため、これらの観測水位データを解析に反映した。

3. 台風19号の降雨分布と利根川本川・支川の観測水面形の時間変化

図-3に国土交通省オンライン合成レーダ雨量より算出した利根川本川と支川の流域平均時間雨量を示す。図-1に示した3日間雨量分布より、本川上流では、八ッ場ダム上流で総雨量400mmを超える降雨が生じた。当時の八ッ場ダムでは、本運用前の試験湛水を実施しており約7,500万m³の洪水が貯留された。図-1に示した利根川上流ダム群の洪水調節操作により、計約14,500万m³の洪

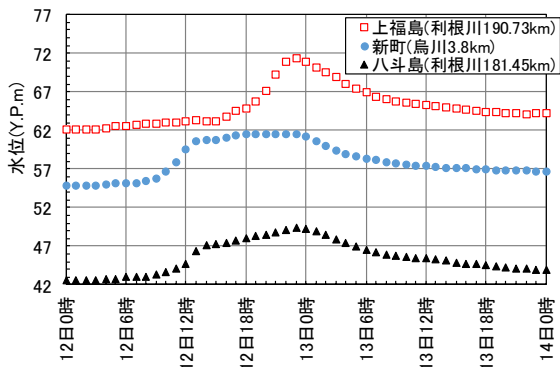


図4 利根川と烏川の水位ハイドログラフ

水が貯留され、本川下流水位が低減されている¹⁾。

支川の烏川では、図-3の流域平均雨量より12日8時から21時まで時間雨量20mm以上の降雨が続き、総雨量は約450mmに達した。埼玉県管理河川では、神流川に隣接する小山川の上流域で同程度の総雨量が生じ(図-1)、降雨のピークは12日22時、時間雨量35mmであった(図-3)。群馬県管理の3支川の降雨特性は概ね同じであり、石田川でみると12日17時~22時に時間雨量20mm前後のまとまった降雨が確認される。

上記の降雨分布による支川群の洪水が利根川本川の洪水に与える影響を観測水面形に基づき説明する。図-4は、烏川合流点上流の本川上福島と烏川の新町、及び合流後の本川八斗島の水位ハイドログラフを比較し示している。図-4より、図-1と図-3に示した多量の降雨に伴い、烏川は本川の上福島に対して早い出水がみられる。八斗島水位ハイドログラフは最大支川である烏川の流入量の影響を強く受けていることがわかる。利根川本川の観測水面形時間変化を図-5に△のプロットで示す。図-5の八斗島ピーク水位時刻である13日0時の縦断水面形をみると、群馬県と埼玉県の河川が流入する支川群の下流、特に小山川合流後の古戸(164.5km)~川俣(150.2km)の間で、観測水位がH.W.L付近まであるいはH.W.Lを超過していることが確認される。これは、この時点で本川下流の水面形形成に対して県管理河川の流入量の影響が大きかったことを意味している。これを説明するために、図-6に小山川の観測水面形時間変化を△のプロットで示す。同図の13日0時の観測水面形をみると、5km上流の自己流区間とそれより下流の本川水位の背水の影響を受ける区間でH.W.L付近まで水位が上昇している。したがって、台風19号による小山川の洪水は、上流に降った大雨により多量の流量が流れ、本川水位の影響を受けながら利根川に合流したと言える。図-5、図-6には本・支川を一体とした平面二次元洪水解析による水面形を比較して示しており、この結果については5章で述べる。

4. 本・支川の洪水解析法と2次支川の降雨流出量

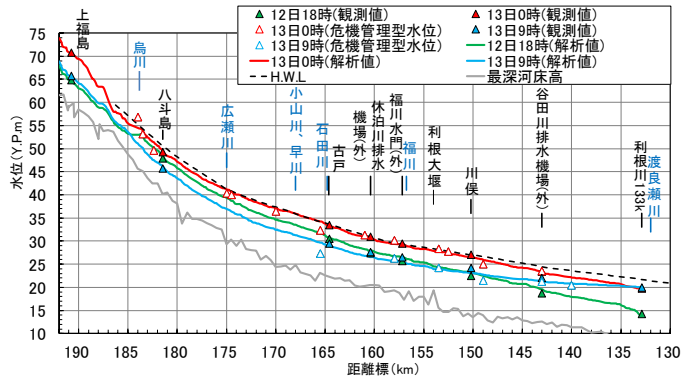


図5 利根川における観測水面形と解析水面形の時間変化

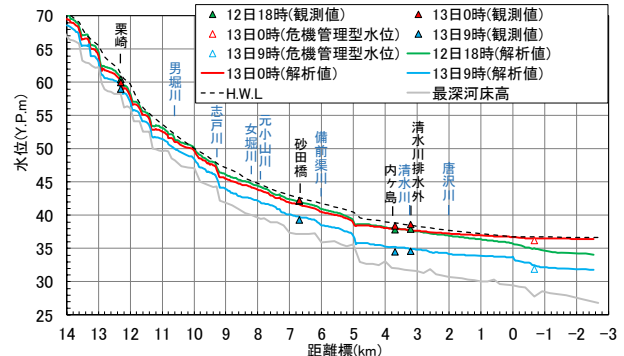


図6 小山川における観測水面形と解析水面形の時間変化

(1) 本・支川の洪水解析法

本研究では、本・支川を一体化し、観測流量や水位流量関係式に依存しない特徴を持つ観測水面形時系列に基づいた一般座標系平面二次元洪水解析法⁷⁾が採用されている。解析メッシュは、堤防や低水路河岸の線形、合流点形状を可能な限り再現している。地形形状の作成にはH23~H30の測量データを用いた。洪水解析区間は表-1、図-2に示す。本・支川の上下流端の境界条件は、解析区間内の最上流に位置する観測所水位ハイドログラフに解析水位が合致するように、上流端で水位を与えた。利根川の下流端には、133.0kmの観測水位ハイドログラフを与えた。小山川と石田川については、(2)で詳述する2次支川からの流入量を与えた。

河道の粗度係数は、国・県管理河川の河道計画で設定されている値を基本とし、低水路で0.022~0.034、高水敷で0.025~0.050を与えた。本解析では水位の変化による粗度係数の時間変化は考えていない。利根川本川では、低水路と高水敷の境界で樹木が密に繁茂している箇所があるため、樹木群透過係数40m/s¹²⁾を与え、樹木群が流れに及ぼす抵抗を考慮した。橋脚の抵抗は、局所的であり縦断水面形に対して影響が小さいため考慮していない。

(2) 2次支川の降雨流出量の評価法

図-7と図-9に小山川と石田川の流域図を示す。これより、2次支川の集水特性を見ることができる。このような河川に施設能力以上の外力が生じると、流下能力の低い2次支川から越水や氾濫が生じやすい。したがって、本・支川への適切な流入量や氾濫リスクを評価するため

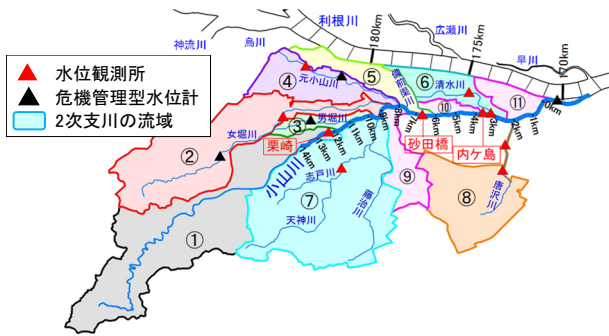


図-7 小山川に流入する2次支川と小流域分割



図-8 小山川の流出・洪水解析モデル

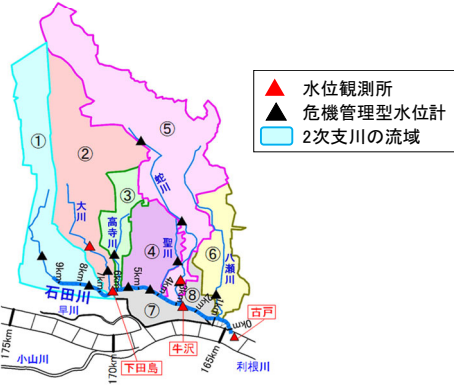


図-9 石田川に流入する2次支川と小流域分割

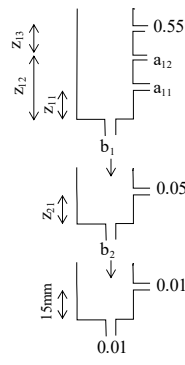


図-10 3段タンクモデルの説明

表-2 同定されたタンクモデルの定数

流域名	流域番号	a_{11} (1/h)	a_{12} (1/h)	Z_{11} (mm)	Z_{12} (mm)	Z_{13} (mm)	b_1 (1/h)	Z_{21} (mm)	b_2 (1/h)	t_l (hr)
小山川	①	0.10	0.15	40.0	57.5	55.0	0.12	5.0	0.04	0.5
	②									0.5
	③									0.0
	④									0.0
	⑤									0.0
	⑥	0.10	0.15	40.0	57.5	55.0	0.12	15.0	0.08	0.5
	⑦									0.25
	⑧									0.0
	⑨									0.0
	⑩									0.0
	⑪									0.0
石田川	①	0.10	0.15	15.0	75.0	55.0	0.12	15.0	0.08	1.5
	②	0.04	0.06	15.0	75.0	55.0	0.15	15.0	0.08	2.0
	③									0.0
	④									0.0
	⑤	0.10	0.15	27.5	57.5	55.0	0.12	10.0	0.06	1.5
	⑥									0.0
	⑦									0.0
	⑧									0.0

には、2次支川までを解析対象とすることが望ましい。今後の流域治水を検討する上で、2次支川まで設置された観測水位データと測量データを基に本川・1次支川・2次支川の洪水流を一体的に解き、それらの観測水面形の時間変化を説明できる流出解析結果から洪水現象を評価する。本検討では、上記の考えに従い、小山川と石田川の2次支川の流入量を算定することを試みたが、河道の測量精度が十分でなかったため、2次支川からの流入量を降雨流出解析により推定することにした。

a) 小山川

台風19号出水による小山川の水位は、小山川上流域とその支川の女堀川の上流域及び志戸川の上流域で降った大雨により上昇した。図-8は、小山川の洪水解析区間と2次支川を小流域として扱い流入量を算定する模式図を示している。平面二次元流解析では、栗崎の水位を上流端境界条件とし、内ヶ島水位を下流端境界条件とした。2次支川から小山川への流入量は、図-10に示す3段タンクモデル¹⁾を構築し、降雨流出解析により算出した。タンクモデルの定数は、上記の洪水解析による水位が砂田橋の観測水位ハイドログラフに合致するように、水理公式集に示された定数の範囲¹⁾に概ね収まるように、主に直接流出成分である1段タンクのもを調整し同定した。この際、流域番号②～⑩の2次支川のタンク定数は、解析区間に水位計が1箇所しかないため同じ値とした。表-2は、上記の方法より同定したタンクモデル定数である。観測水面形と解析水面形の時間変化の比較を図-11に、砂田橋の観測水位と解析水位ハイドログラフの比較及び通過流量を図-12に示す。図-11と図-12より、

解析水面形の時系列結果は観測水面に概ね一致していることが確認される。図-12の2次支川が小山川に流入する上下流の観測所で通過流量を比較すると、栗崎のピーク流量は386m³/s、砂田橋は1,048m³/sであり、2次支川流域からの流入量が多いことが確認される。

b) 石田川

次に、群馬県管理の石田川に流入する2次支川の流量の解析法を示す。図-13は、洪水解析区間と2次支川を小流域とする分割図を示している。石田川下流区間は利根川の背水の影響を受ける。このため、解析では、本川の洪水解析区間を石田川合流点直下流の古戸観測所までとし、それに合流する石田川の洪水流を一体的に扱い、2次支川からの流入量をタンクモデルにより与える降雨流出・洪水解析モデルで表現した。石田川の上流端境界条件は下田島の観測水位に合うように与え、本川下流端条件は古戸の観測水位を与えた。タンクモデルによる流入量は、図-13に示す観測所水位計と危機管理型水位計による観測水面形の時間変化に解析水面形が合致するように上記と同様の方法で算出した。同定されたタンクモデルの定数は表-2に示す。石田川の観測水面形の時間変化と上記の解析による水面形を比較を図-14に、牛沢の観測水位と解析水位ハイドログラフの比較及び通過流量を図-15に示す。これより、解析水面形の時間変化は観測水面に概ね一致していることが確認される。図-15より、大川や蛇川等の2次支川合流後の牛沢地点のピーク流量(268m³/s)は、2次支川合流前の下田島地点の流量(50m³/s)に比べて約220m³/s増大している。

以上の小山川と石田川の降雨・流出・洪水解析は、

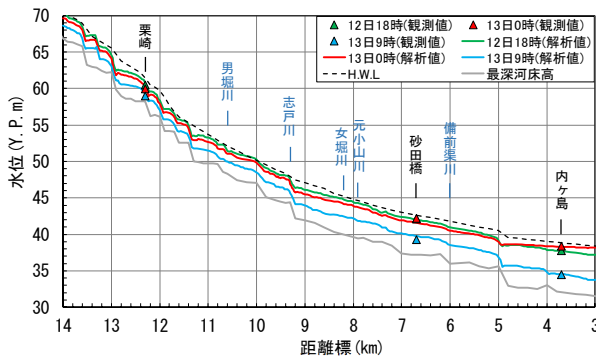


図-11 小山川における観測水面形と解析水面形の時間変化の比較

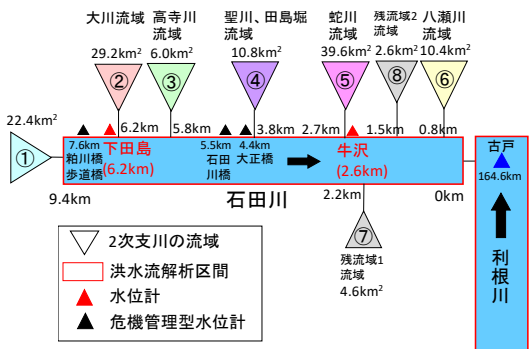


図-13 石田川の流出・洪水解析モデル

水位流量関係式を用いず、観測水面形の時間変化に基づき算定している。このように、1次支川の河道測量データと観測水面形の時間変化が得られれば、1次支川への流入量と水面形、及び本川への流入量が高精度に評価可能である。

5. 利根川の水面形解析結果と本川流量の形成

4に示した2次支川からの流入量とそれを反映した本・支川の洪水流一体解析より得られた利根川の水面形時間変化と流量ハイドログラフの形成について示す。図-5に示された利根川の観測水面形の時間変化は、184.0kmに合流する烏川の流入量や175.5km~156.7kmに合流する群馬県と埼玉県管理の支川流入量の影響を受けており、解析水面形はそれらを概ね説明している。ただし、洪水低減期である13日9時の解析水面形は、164.6kmの古戸観測所から下流で観測水面形より低めに見積もられている。この原因は定かではなく、今後の検討課題である。また、図-6には全川を一体で解析した同手法の小山川の解析水面形を観測水面形と比較している。図-6より、解析結果は2次支川からの流入による上流区間の水位上昇及び下流区間の利根川本川の背水の影響を説明できている。

図-16に利根川本川と烏川からの流量ハイドログラフを示す。図-17に群馬県と埼玉県管理の支川群から本川に流入した流量ハイドログラフを示す。利根川上流ダム群の洪水調節効果を受けた本川の上福島地点の流量は、ピークで約5,200m³/sと推定され、その下流では出水の早

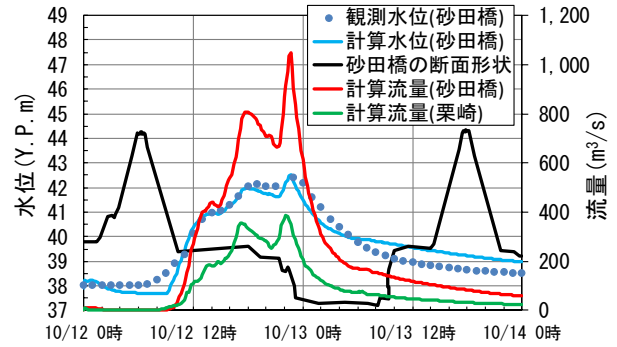


図-12 小山川の水位・流量ハイドログラフ

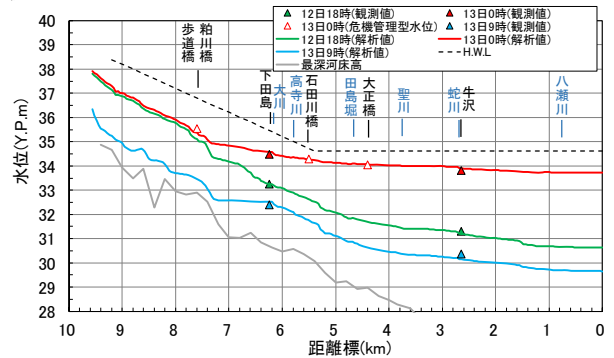


図-14 石田川における観測水面形と解析水面形の時間変化の比較

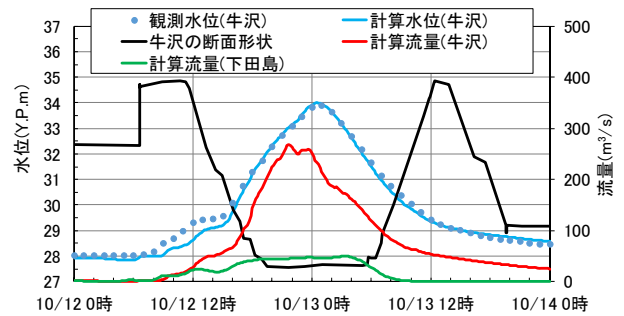


図-15 石田川の水位・流量ハイドログラフ

い烏川から約7,800m³/sの流量が合流し、八斗島地点でそれらの合成流量ハイドログラフを形成している。その後、図-17に示した群馬県と埼玉県管理の支川群からの流入のタイミングが本川と大体重なり、約2,200m³/sの流量が合流して古戸地点での洪水流量ハイドログラフを形成している。川俣地点のピーク流量は、古戸地点に比べて約540 m³/sの減少がみられる。これは、利根大堰(154km)による堰上げや2地点間の約14.4kmで生じる河道貯留効果、及び福川等への逆流による貯留が考えられる。

6. 結論

本研究では、利根川本川、烏川、群馬県と埼玉県管理の支川群を一体として捉え、令和元年台風19号による2次支川流域レベルの降雨の時間変化と観測水面形の時間変化を基に、本・支川の縦断水面形の時間変化、1次・2次支川の流入量、及び本川の流量ハイドログラフの形成特性を示した。本研究の特徴は、観測精度の高い1次支川の観測水面形の時間変化に解析水面形を合致する方

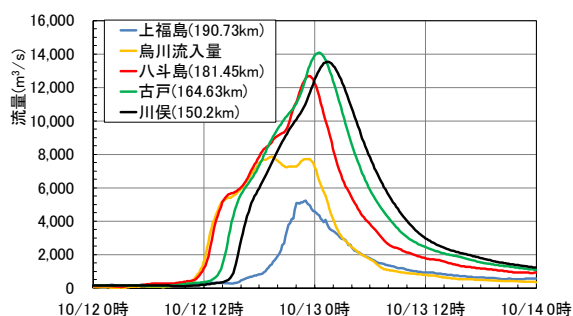


図-16 利根川と烏川の流量ハイドログラフ

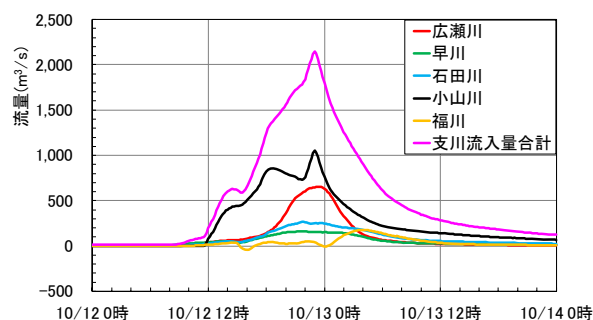


図-17 群馬県と埼玉県支川群の流入量ハイドログラフ

法によりタンクモデルによる 2 次支川の流入流量を推定できること、本川と支川の一体的な水面形解析により高精度に支川流入量を評価した点にある。上記の本・支川の降雨流出・洪水流の評価法は一般性が高く、他河川の流域治水の検討に活用可能な情報を与えている。

本検討では 2 次支川の測量精度が十分でなかったため、支川の洪水流解析区間は 1 次支川にとどまっている。十分な測量結果があれば、本研究で示した解析法により、2 次支川の水面形やその上流域の降雨流出量の時間変化も評価が可能である。今後、中小河川の測量データの整備が期待される。本検討では、支川の広瀬川は下流区間しか対象としていない。今後、広瀬川流域と測量データの整備がなされた 2 次支川を含め利根川上流域の洪水解析を実施し、流域全体の本・支川群の洪水現象の解明に向けた検討を行う。

参考文献

- 1) 土木学会水理公式集：2018 年度版
- 2) 立川康人, 永谷言, 寶馨：飽和・不飽和流れの機構を導入した流量流積関係式の開発, 水工学論文集, 第 48 巻, pp.7-12, 2004.
- 3) 佐山敬洋, 岩見洋一：降雨流出氾濫(RRI)モデルの開発と応用, 土木技術資料 56-6, pp1-4, 2014.
- 4) Sayama, T., Ozawa, G., Kawakami, T., Nabesaka, S., Fukami, K. : Rainfall-Runoff-Inundation analysis of the 2010 Pakistan flood in the Kabul River basin, Hydrological

Science Journal, 57(2), pp.298-312, 2012.

- 5) 近者敦彦, 関本大成, 橋本舜也ら：兵庫県全域リアルタイム氾濫予測システムの構築, 河川技術論文集, 第 27 巻, pp.69-74, 2021.
- 6) 阿部紫織, 清水義彦, 浅沼順, 佐山敬洋：令和元年台風 19 号による利根川上流域の洪水外力の推定と治水課題の考察, 河川技術論文集, 第 26 巻, pp.71-76, 2020.
- 7) 福岡捷二：洪水流の水面形観測の意義と水面形に基づく河川の維持管理技術(招待論文), 河川技術論文集, 第 12 巻, pp.1-6, 2006.
- 8) 福岡捷二：洪水流の水位と流量の今日的考え方—多点で観測された洪水水位と水面形から河道の水理システムを見える化する—, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.73, No.4, I_355-I_360, 2017.
- 9) 後藤岳久, 福岡捷二, 大作和弘：観測水面形時系列から求めた本・支川の流量ハイドログラフを用いたタンクモデルの同定定数と洪水予測計算, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.75, No.2, I_1291-I_1296, 2019.
- 10) 立川康人・須藤純一・椎葉充晴・萬和明・キムスンミン：粒子フィルタを用いた河川水位の実時間予測手法の開発, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.67, No.4, I_511-I_516, 2011.
- 11) 国土交通省関東地方整備局：台風第 19 号における利根川上流ダム群の治水効果(速報), 2019.11.
- 12) 見上哲章, 福岡捷二, 渡邊明英：観測水面形の同化解析データを利用した洪水流伝播とタンクモデルの流出量修正に基づく水面形予測, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.76, No.2, I_775-I_780, 2020.

(Received June 30, 2021)

(Accepted September 3, 2021)

THE INTEGRATED FLOOD FLOW ANALYSIS FOR THE TONE RIVER AND ITS TRIBUTARIES USING OBSERVED WATER SURFACE PROFILES

Tetsuaki MIKAMI, Koichi MIZUKUSA, Youko NISHIZAWA,
Takami ADACHI and Shoji FUKUOKA

To implement the integrated river plan, it is required to estimate with high accuracy the amount of rainfall-runoff, the discharge capacity of the main river and tributaries, and the risk of inundation. In this study, the flood flow analysis model and the tank model for the upper Tone River system consisting of main river and tributaries were developed to the 2019 flood. The inflows and the discharges of each tributary were estimated from assimilation analysis on the temporal changes in the observed water surface profiles. The water surface profiles and discharge hydrographs in the upper Tone River with discharges from tributaries were explained. The evaluation method for runoff analysis and flood flow analysis based on water level presented in this study is generalizable. Therefore, this method can be applied to other river systems.