

斐伊川の降雨流出・洪水流・土砂移動の一体解析法の開発と流域治水に向けた活用

DEVELOPMENT OF AN INTEGRATED ANALYSIS METHOD FOR RAINFALL RUNOFF, FLOOD FLOW AND SEDIMENT TRANSPORT IN THE HII RIVER AND ITS APPLICATION FOR BASIN-WIDE FLOOD CONTROL

小谷哲也¹・後藤岳久²・福岡捷二³

Tetsuya KOTANI, Takahisa GOTOH and Shoji FUKUOKA

¹正会員 国土交通省 河川環境課 河川保全企画室 企画専門官 (前 出雲河川事務所 所長)
(〒100-8918 東京都千代田区霞が関2-1-3)

²正会員 博士(工) 中央大学研究開発機構 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

³フェロー, Ph.D., 工博, 中央大学研究開発機構 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

本研究が対象とする斐伊川は、土砂移動が活発なため下流域に天井川区間を有し、かつ、水はけの悪い宍道湖を有する等の治水上の課題を抱えている。本研究では斐伊川の流域治水を具体的に検討する手法として、実洪水(令和3年7月洪水)時の観測水面形時系列に基づき降雨-流出、河道での洪水の流れ方、それに応じた土砂移動を流域一体で解析する洪水流・河床変動予測モデルを構築した。計画降雨分布を外力条件として計算した場合、洪水ピーク時には各流域で表面流が多く発生することを推定し、計画降雨時に対する本川・各支川の流量分担や、計画高水位を超過しないために必要な上流域での貯留量を明らかにした。土砂については、計画降雨時に斐伊川放水路へ約20万m³以上の土砂が流入することが推定され、斐伊川から流入する土砂が、放水路が合流する神戸川に影響を及ぼす可能性が高いことを明らかにした。今後、中海・宍道湖や神戸川も含めた斐伊川水系全体の水・土砂収支を把握することが必要であることを示した。

Key Words: the Hii River, flood flow and sediment transport analysis, rainfall-runoff analysis, Basin water balance map

1. 序論

流域治水を具体的に検討するためには、豪雨時に流域に降った雨が、本川・各支川流域にどの程度の量、どのような状態で存在し、そして、いつ、どの程度、どのように河道に流出し、流下するのかを定量的に把握することが重要である。このことから、福岡は降雨-流出、洪水の流下過程を観測水面形時系列データに基づく洪水流解析により洪水時の水の状態・挙動を推算し、その洪水ボリュームの時・空間分布を分かりやすい形で見える化した「流域水収支分布図」を提案し、流域治水への活用を示している¹⁾²⁾³⁾。

本研究が対象とする斐伊川は、土砂移動が活発なため下流域に天井川区間を有し、かつ、水はけの悪い宍道湖を有する等の治水上の課題を抱え、過去から大橋川の改修、尾原ダム・志津見ダムの建設、斐伊川放水路の建設などが行われてきた。このため、斐伊川本川及び各支川において流域水収支図を作成し、既存の治水施設の効果及び今後必

要な治水対策を流域一体として定量的に検討する必要がある。また、斐伊川は伊萱床止め(23km)から放水路分流点付近まで河床低下が進行している一方、宍道湖河口で土砂堆積が生じ、途中の斐伊川放水路に土砂が分流する等、斐伊川の河床安定策を検討するためには、今後、流域水収支図と併せて土砂収支図を作成する必要がある。

これらのためには、計画規模を含む様々な降雨イベントに対し、降雨流出から河道内での洪水の流れ方に加え、流れに応じた土砂移動を流域一体として解析可能な洪水流・河床変動予測モデルが必要である。しかし、従来より広く用いられている洪水予測モデル⁴⁾では、降雨流出過程については分布型モデルが用いられているが、河道の洪水計算には1次元解析が用いられることが多く、この影響が粗度係数等のパラメータに集約されるため、実測の水位を再現するために、これらを変化させる等の課題がある⁵⁾。

これに対して福岡は、洪水の流れ方や河床変動の影響が現れている観測水面形時系列を再現するように、力学現象に出来るだけ忠実な解析モデルを用いて洪水流・河床変

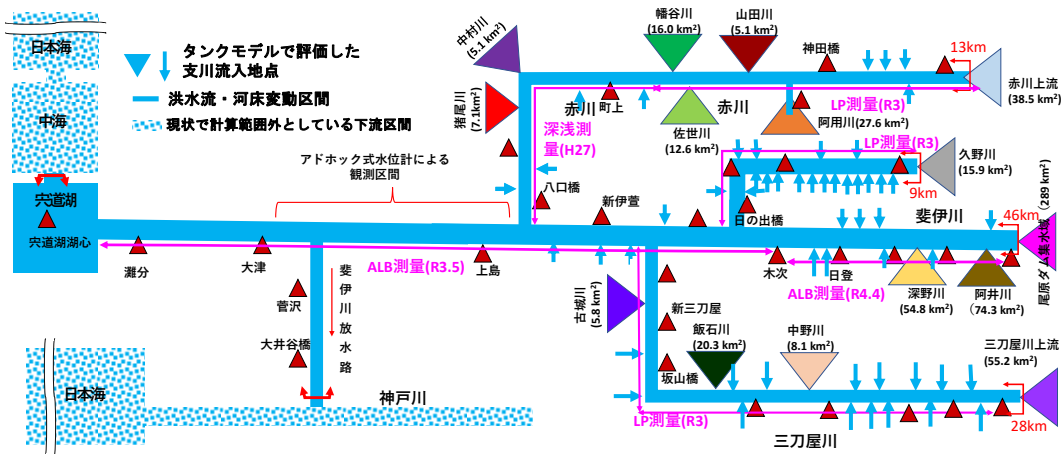
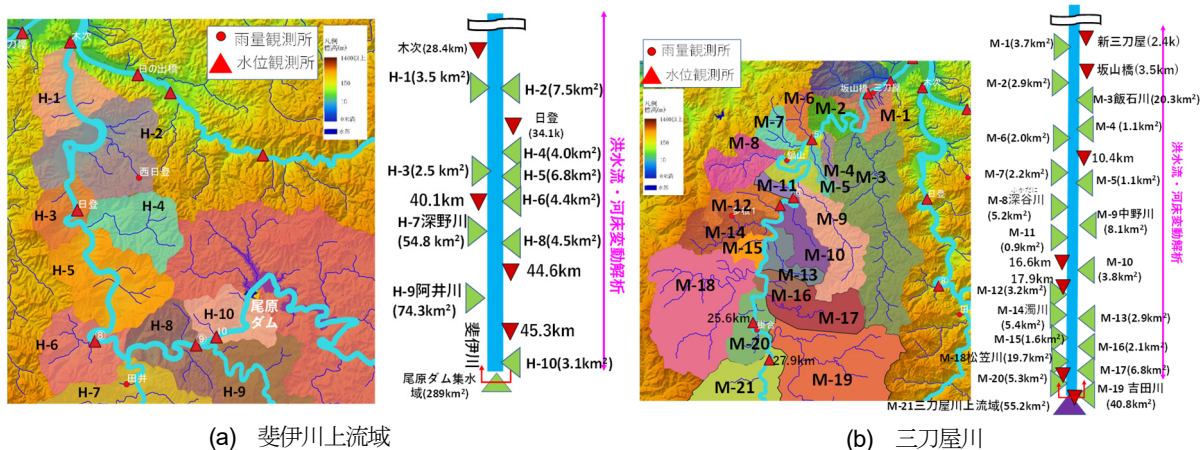


図-1 洪水流・河床変動解析区間およびタンクモデルの流域分割



(a) 斐伊川上流域

(b) 三刀屋川

図-2 洪水流・河床変動解析区間及びタンクモデルの流域分割の詳細図（斐伊川上流域・三刀屋川）

動計算を行うことにより、任意地点の流量ハイドログラフや河床変動を評価可能とし、粗度係数等も物理的な値に収斂されることを示してきた⁹⁾。この考えに基づき、著者らは斐伊川流域を対象とし、観測水面形時系列を再現する洪水流・河床変動解析によりタンクモデル⁷⁾の係数を同定することで、降雨-流出から河道の洪水流計算を一体的に評価可能な洪水予測モデルを構築した⁸⁾。さらに、この考え方を出来るだけ上流域まで延長することにより、各小流域での流出状況を把握出来るものと考え、著者らは斐伊川上流域まで洪水位を観測する体制を整備し検討を進めてきた。この考え方は、利根川上流域⁹⁾や石狩川¹⁰⁾に応用され、流域水収支分布図の考え方と組み合わせることで、流域治水に対して有効なツールとなり得ることが示されて来ている。

本研究では、斐伊川流域において、観測水面形時系列を再現するように、降雨流出から河道での洪水流下、土砂移動を一体的に評価する洪水予測モデルを構築し、これにより、計画降雨時における斐伊川流域の洪水流下能力、土砂動態、流域水収支分布を明らかにする。

2. 流域全体の降雨-流出，洪水流，河床変動の一体解析の考え方

観測水面形時系列に基づく降雨-流出，洪水流，河床変動の一体解析とその結果を用いて流域水収支図を作成するためには、まず、本川・支川において出来るだけ上流域まで水位観測・河道地形測量を実施し、観測された水面形の時間変化を再現するように洪水流・河床変動解析を行い、任意地点での流量ハイドログラフやそれを時間積分した累積通過流量、河道貯留量を精度良く算定出来るようにすることが重要である。本研究では、図-1、図-2に示すように、斐伊川本川は宍道湖河口から尾原ダム直下流(約46km)まで、三刀屋川は合流点から約28km上流まで、赤川は合流点から約13km上流まで水位観測および河道地形測量を実施し、その区間では洪水流・河床変動解析を行った。そして、それより上流域及び水位観測区間に流入する支川流域・残流域の降雨-流出過程をタンクモデルで表現し(図-1、図-2)、これらの係数は各流入地点の上下流の観測水面形の再現に重点を置きつつ、最終的に全体の観測水面形を再現するように決定した。ここで、タンクモデルの流域分割は、地形・集水特性に加えて最上流の水位観測地点の位置も踏まえて決定し、その際、対象流域全体の降雨量との収支関係を満たすように設定している(計70分割)。

洪水流解析については非静水圧準三次元解析法(Q3D-FEBS法¹¹⁾)を用い、河床変動解析については掃流砂と浮遊

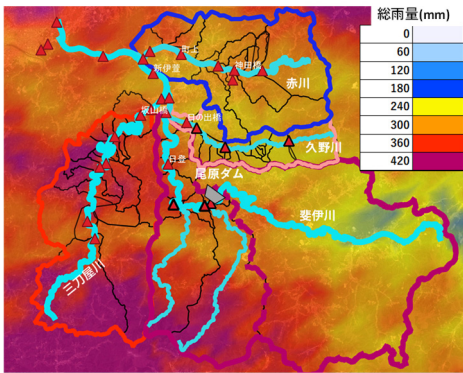
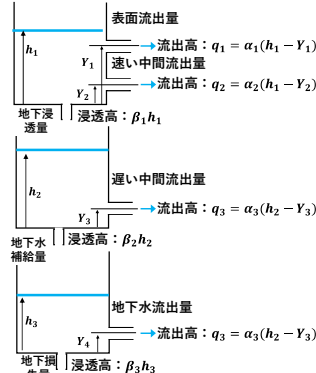


図-3 令和3年7月出水における降雨分布(総降雨量)(7/7 0:00~7/14 0:00)



(a) タンクモデルの構造

係数 (単位)	斐伊川		三刀屋川	赤川	久野川
	H-1~H-8, H-9流域	H-7,8,10 流域	M-1~ M-21流 域	A-1~A- 10流域	K-1~K- 18流域
α_1 (1/hour)	0.035	0.28	0.14	0.155	0.14
α_2 (1/hour)	0.085	0.085	0.13	0.092	0.046
α_3 (1/hour)	0.049	0.049	0.071	0.071	0.035
α_4 (1/hour)	0.049	0.049	0.071	0.071	0.035
β_1 (1/hour)	0.035	0.035	0.035	0.028	0.035
β_2 (1/hour)	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
β_3 (1/hour)	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
Y_1 (mm)	65	65	50	45	55
Y_2 (mm)	22	22	22	22	22
Y_3 (mm)	2	2	8	2	2
Y_4 (mm)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5

(b) タンクモデルの係数

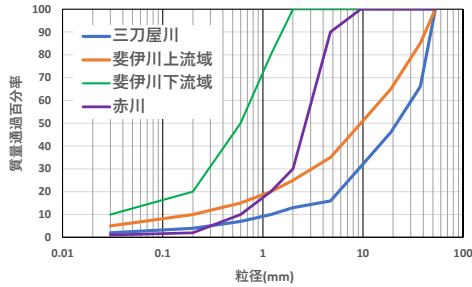


図-4 解析に用いた河床材料粒度分布

砂を一体的に評価可能な非平衡流砂モデル¹²⁾¹³⁾を用いた。

3. 令和3年7月豪雨を対象とした降雨-流出, 洪水流, 河床変動の一体解析法の検証

本検討では、尾原ダム竣工後において、戦後最大規模の洪水とほぼ同規模の洪水であった令和3年7月豪雨(ピーク流量:約2,100m³/s, 上島地点(18.6km))を検証対象とする。

(1) 解析条件

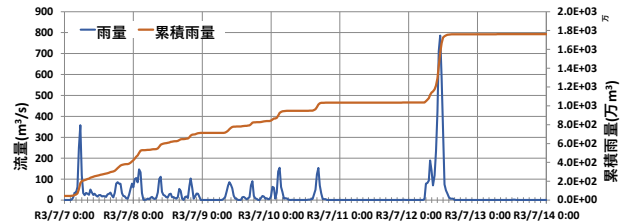
タンクモデルの外力条件には、気象庁によるレーダー解析雨量を用いた。図-3は、令和3年7月豪雨におけるレーダー解析雨量による対象領域の総降雨量分布を示す。本出水は梅雨前線に伴う豪雨であり、三刀屋川流域での総降雨量が他の流域よりも多い出水であった。

初期の河道地形については、斐伊川本川の直轄区間では洪水前のR3年5月測量のALB測量結果を用いた。それ以外の区間については、洪水直近の測量データとして、洪水後のLP測量(R3年12月測量)およびALB測量(R4年4月測量)を用いた。このため、初期地形に洪水後の地形データを用いた区間では、河床変動解析の検証は行えていない。

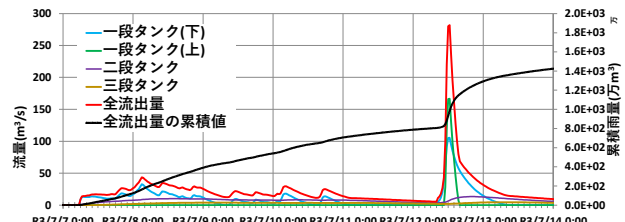
図-4は、解析で与えた河床材料粒度分布を示す。直轄区間の河床材料は主に砂で構成されており、河床材料調査結果に基づき与えている。上流区間および支川の河床材料は主に礫で構成されており、本解析では道上らの調査検討結果¹⁴⁾に基づき設定している。

斐伊川本川の洪水流解析の上流端境界条件には尾原ダ

図-5 決定したタンクモデルの係数



(a) 流域内の降雨量の時間変化



(b) タンクモデルの各流出孔からの流出流量

図-6 降雨量とタンクからの流出量ハイドログラフ(深野川)

ムの実績放流量を与え、下流端境界条件には宍道湖湖心の実績水位時系列を与えた。放水路分流域間にある分流域のゲート操作については、実績のゲート開度を与えた。

(2) 決定したタンクモデルの構造と水面形時系列, 河床変動の解析結果

図-5は決定したタンクモデルの係数を示し、図-6は各タンクからの流出量の成分の例として、1次支川の深野川流域における各流出孔からの流出流量ハイドログラフを示す。計算された洪水波形は、表面流に対応する1段目のタンクの上孔と、速い中間流に対応する1段目のタンクの下孔でほぼ形成されていることが分かる。流出流量の各成分について、今後、流域の土壌・地質状況を踏まえて検証する必要がある。

図-7は各河川における水面形時系列の観測結果と解析結果の比較を示し、図-8は流量ハイドログラフの浮子観測結果と水面形時系列を再現するように計算した本解析結果との比較を示す。解析結果は、斐伊川本川および三刀屋川、赤川の観測水面形時系列および洪水前後の実測の河床変動高の縦断分布をほぼ説明し、流量についても実測値と整合性のつく結果が得られており、構築した洪水予測モデルの妥当性が確認された。23km付近の伊萱床止め下流では解析結果が実測値よりも土砂堆積量が多く計算されている。これについては、斐伊川は平水時にも土砂移動が生じるこ

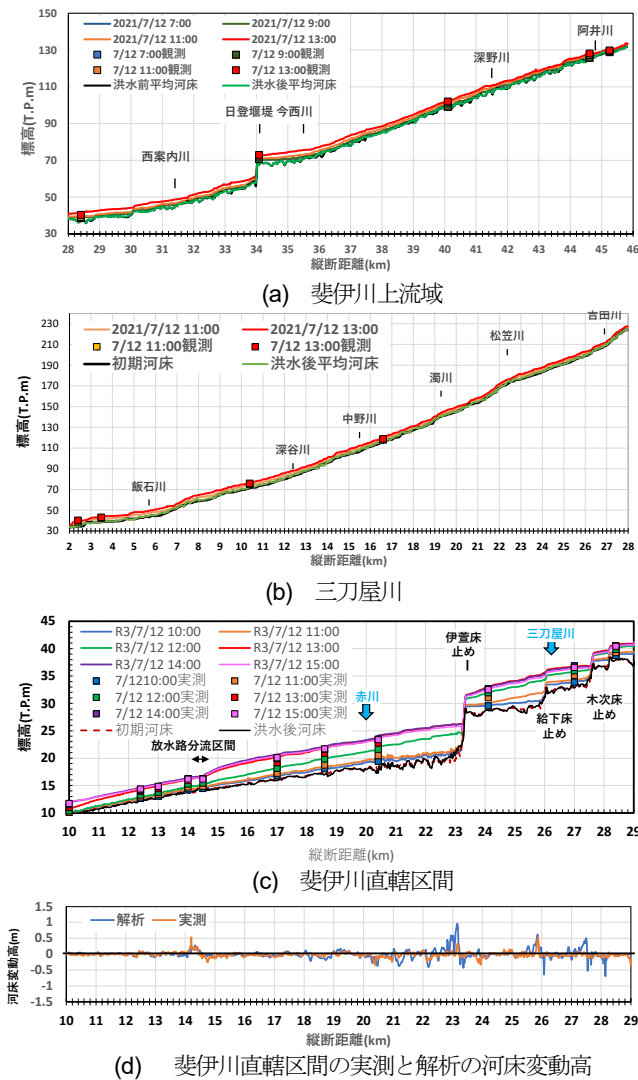


図-7 令和3年7月洪水における水位縦断分布・河床変動高(斐伊川直轄区間)の観測結果と解析結果の比較

とから、今後、平水時も含めた計算を行うことで再現性が向上するものと考えている。一方、上記の様に、洪水波形は1段目のタンクでほぼ形成されていることから、長期流出の役割を有する2段目・3段目のタンクの係数の妥当性の検証については、今後の課題とする。

(3) 流域分割の細分化の影響

(2)で構築した洪水予測モデルでは、洪水流・河床変動解析区間とタンクモデルによる流域分割の仕方が、各河川の最上流の水位観測地点の位置関係の制約を受けているため、阿井川流域(約70km²)など、一部流域で比較的広い流域面積となっている。そのため、阿井川流域について、水位の検証地点は無いものの、河道領域を上流域まで延伸し、図-9に示すようにタンクモデル流域を細分化し、流域を1つのタンクモデルで評価した場合と比較検証した。ここで、阿井川の河道地形にはLP測量データを用い、LP測量データが未整備な②③の右支川流域については1つの流域(約15km²)とした。雨量分布については、(2)と同様にR3年7月洪水時のレーダー解析雨量を用いた。

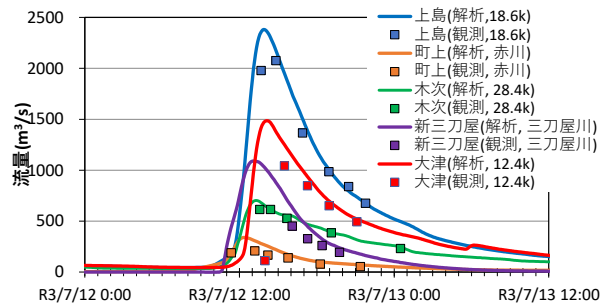


図-8 令和3年7月洪水における浮子観測流量と解析流量の比較

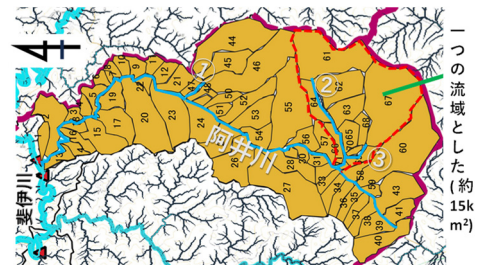


図-9 阿井川流域を細分化した場合の流域分割

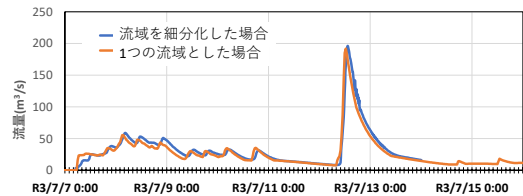


図-10 流域を細分化した場合と1つの流域とした場合における流末での流量ハイドログラフの比較

図-10は、1つの流域で評価した場合と流域を細分化した場合における流末での流量ハイドログラフの解析結果を示す。図より、流域を細分化した場合の方がやや遅れ時間が生じているものの、両ハイドログラフには大きな差が無いことが分かる。これらの結果は、流域面積約200km²以下で降雨分布がほぼ一樣な場合には、流域内のパラメータ分布や支川群での洪水波形の変形等の影響が小さいことを示した立川ら¹⁵⁾、呉ら¹⁶⁾と同様の結果であり、これらの結果を踏まえ、本論文では阿井川流域は1つの流域として評価した。

4. 計画規模の降雨分布を対象とした場合の斐伊

川本川の水面形・河床変動と流域水収支分布

本章では、3章で構築・検証した洪水予測モデルを用い、計画規模の降雨時における斐伊川本川の水位縦断分布、河床変動、流域水収支分布を明らかにする。

(1) 解析条件

図-11は、計画降雨時の各流域の雨量強度および累加雨量の時間変化を示す。本検討では、昭和20年9月の枕崎台風による出水時の降雨分布を1.5倍引き延ばした降雨分布を用いた。図より、計画の降雨分布においても、三刀屋川流域の総降雨量が多くなっている。

解析に用いる初期の河道地形データについては、斐伊

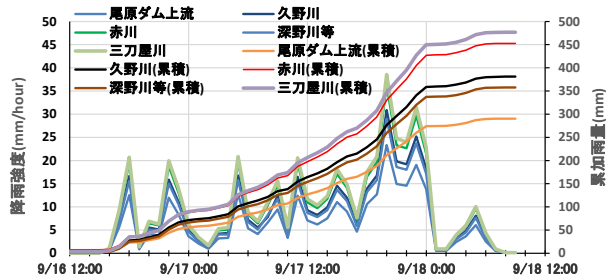


図-11 計画の降雨分布

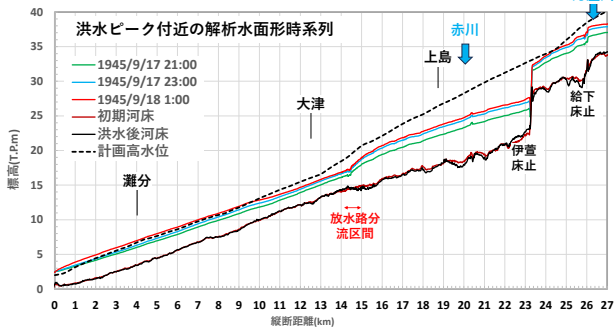
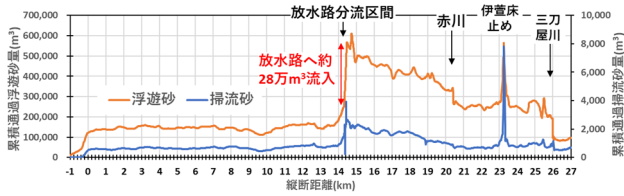
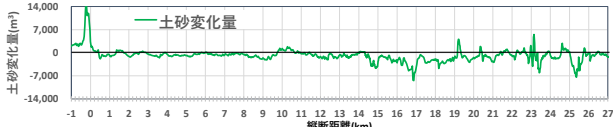


図-12 計画降雨時における斐伊川本川の水面形時系列



(a) 累積通過流砂量



(b) 洪水前後の河道内の土砂変化量

図-13 計画降雨時における累積通過流砂量, 土砂変化量

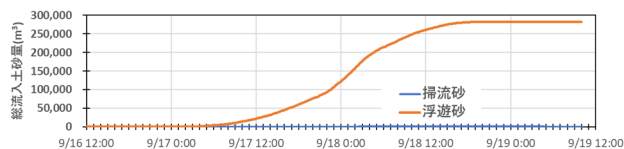


図-14 斐伊川放水路の沈砂池への流入土砂量の時間変化

川本川の直轄区間では、現況河道として最新のR5年6月測量のALB測量データを用いた。その他の区間については、3章と同様の初期地形・河床材料を用いている。洪水流解析の斐伊川本川の上流端境界条件には、尾原ダムの計画降雨時の放流量時系列を与え、下流端境界条件には計画の宍道湖水位を一定で与えた。斐伊川放水路の分流堰は、現行の操作規則通りに制御するようとした。

(2) 解析結果

図-12は計画降雨時の斐伊川本川直轄区間の水位縦断分布の解析結果を示し、紙面の制約上、本川上流域・支川の解析結果は省略する。放水路分流区間より上流区間では、これまでに経年的な河床低下が進行していたため、洪水ピーク水位は計画高水位より十分低くなっている。一方、河口~7.0km付近では、洪水ピーク水位が計画高水位よりも高

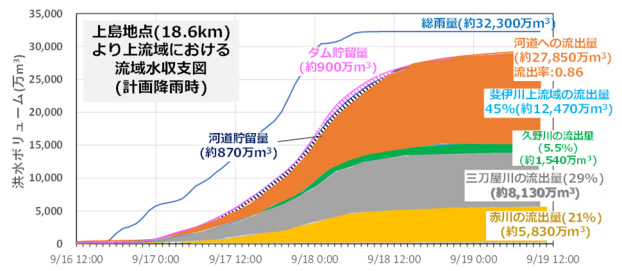
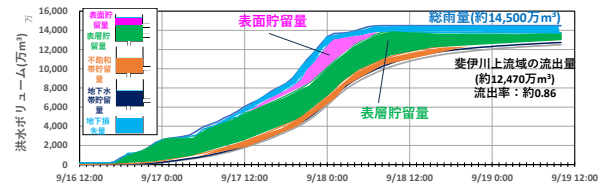
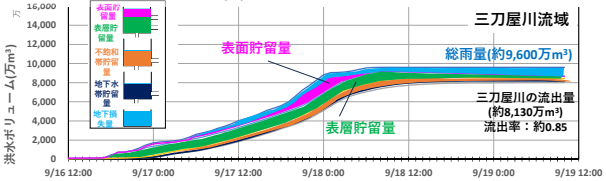


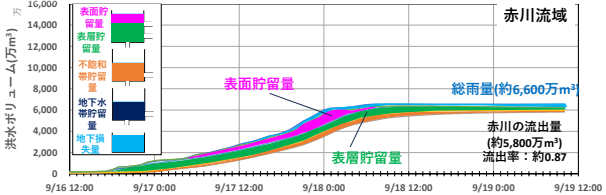
図-15 上島地点より上流域における流域水収支図(計画降雨)



(a) 斐伊川上流域



(b) 三刀屋川流域



(c) 赤川流域

図-16 計画降雨時の各流域での貯留状態を示した水収支図

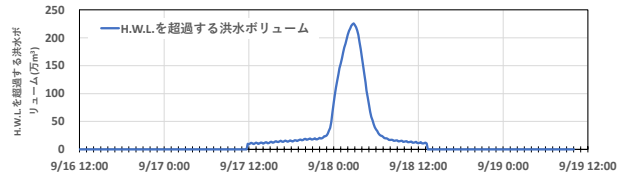


図-17 7km付近より下流でH.W.L.を超過する洪水ボリューム

くなっており、流下能力に課題があることが分かる。ここで、解析結果より、上島地点の洪水ピーク流量は約4,000m³/s、放水路分流区間下流の大津地点では約2,200m³/s、放水路では約1,800m³/sとなっており、本川と放水路の分流比が5:4である計画の流量配分と同程度となっている。

図-13は計画降雨時における累積通過流砂量、河道内の土砂変化量を示す。累積通過流砂量の多くは浮遊砂である。本川直轄区間の上流端から20km付近の区間では、斐伊川上流域、三刀屋川、赤川から土砂が流入しており、床止めも設置されているため河床低下量は小さい。20km付近より下流から放水路分流区間では、本川上流・支川からの土砂供給量に対して通過流砂量が流下距離とともに大きくなっており、この区間で河床低下が進行している。図-14は斐伊川放水路への流入土砂量を示す。放水路分流区間では約28万m³の流砂が放水路へ分流しているが、分流区間下流の本川河床は比較的安定している。一方、放水路の上流端に設置されている沈砂池の容量は約12万m³であるため、計画降雨時には本川から分流した流砂により沈砂池が満砂にな

り、斐伊川放水路が合流する神戸川へ土砂流入が生じるものと考えられる。このため、今後、神戸川も含めた斐伊川流域全体の水・土砂収支を把握し、斐伊川・神戸川の河床安定策について議論することが重要である。

図-15は計画降雨時の上島地点より上流域の流域水収支分布図を示しており、上島地点に到達する流量のうち、本川・各支川からの流量が受け持つ割合を示している。図より、上島地点に到達する流量のうち約45%が斐伊川本川上流域、約20%が赤川、約30%が三刀屋川であり、斐伊川本川に次いで三刀屋川の流量分担割合が高いことが分かる。

図-16は、計画降雨時の各流域内での貯留状態を示した水収支図を示す。各流域とも洪水ピーク付近で表面流が発生し、その状態が約7,8時間程度継続していると推定される。各流域の流出率は0.85前後であり、各流域の間での流出率の差は明確には見られない。三刀屋川流域及び斐伊川流域の土壌は褐色森林土に黒ボク土が点在し、赤川流域の土壌は褐色森林土に未熟土が点在している。今後、これら流域の土壌特性と降雨流出特性の関係を調べる必要がある。

図-17は、7.0km付近より下流において、水位が計画高水位を超過している洪水ボリュームの時間変化を示す。解析では、9/18 0:00頃よりH.W.L.を超過し洪水ピーク付近で約250万 m^3 となっている。従って、超過する洪水ボリュームをゼロとするように、図-15に示すダム貯留量や、図-16に示す各流域での貯留量を増加させる対策の検討が重要になる。ここで、本解析の下流端には、宍道湖の計画水位を一定で与えていることから、河口付近では早い時間帯でH.W.L.を超過する結果となっている。このため、中海・宍道湖に直接流入する支川群も考慮して中海・宍道湖の水位を予測し、斐伊川流域全体の流域水収支図を作成する必要がある。

5. まとめ

本研究では、降雨流出から河道での洪水流下、土砂移動を一体的に評価する洪水予測モデルを構築し、計画規模の降雨時における斐伊川流域の降雨流出、洪水流・河床変動を明らかにし、各流域の流域水収支分布を作成した。これにより、各流域では表面流が多く発生していることを推定し、また、計画降雨時の本川・各支川の流量分担や計画高水位を超過する、すなわち、上流域での貯留させる必要のある洪水ボリュームの時間変化を示した。土砂については、伊萱床止め下流では、上流及び支川からの土砂供給量よりも通過土砂量が多いため河床低下が進行すること、斐伊川放水路には約20万 m^3 以上の土砂が流入し得ることを示した。今後、中海・宍道湖や斐伊川放水路が合流する神戸川も含めた斐伊川水系全体の水・土砂収支を把握することが必要であることを示した。

参考文献

- 1) 福岡捷二：洪水水面形観測情報の広域的・統合的活用による流域治水の考え方の構築に向けて、河川技術論文集，第23巻，pp.251-256，2017。
- 2) 石井優太郎，吉村俊彦，福岡捷二：石狩川下流域における支川群の洪水流出特性と本川洪水への影響，河川技術論文集，第28巻，pp.121-126，2022。
- 3) 福岡捷二：近年の洪水災害を踏まえた流域治水を考える，河川技術論文集，第28巻，pp.457-462，2022。
- 4) Sayama, T. : Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) Technical Manual, Technical Note of PWRI, No. 4277, 2014.
- 5) 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B2(水工学)，Vol.67, No.4, I_511-I_516, 2011。
- 6) 福岡捷二：河道設計のための基本は何か-水面形時系列観測値と洪水流-土砂流の解析を組み合わせた河道水理システムとその見える化，河川技術論文集，第17巻，pp.83-88，2011。
- 7) 菅原正巳：流出解析法，共立出版，1972。
- 8) 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定数同定と洪水予測計算，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.75, No.2，pp.I_1291-I_1296，2019。
- 9) 見上哲章，水草浩一，西澤洋行，安達孝実，福岡捷二：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-，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.77, No.2，pp.I_427-I_432，2021。
- 10) 福岡捷二：流域管理と地域計画の連携に向けて-流域水収支図と流域土砂収支図の作成と活用，第11回流域管理と地域計画の連携に関するワークショップ，2024。
- 11) 竹村吉晴，福岡捷二：波状跳水・完全跳水及びその減勢区間における境界面（水面・底面）上の流れの方程式を用いた非静水圧準三次元解析（Q3D-FEBS），土木学会論文集B1(水工学)，Vol.75, No.1，pp.61-80，2019。
- 12) 長田健吾，福岡捷二：石礫河川の河床変動機構と表層石礫の凹凸分布に着目した二次元河床変動解析法，土木学会論文集B1，Vol.68, No.1，pp.1-20，2012。
- 13) 長谷部夏希，後藤岳久，福岡捷二，榎井正将：掃流砂と浮遊砂を一体的に扱う準三次元洪水流・河床変動解析法の開発と昭和56年8月石狩川洪水への適用，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.78, No.2，pp.I_967-I_972，2022。
- 14) 道上正規，鈴木幸一，定道成美：斐伊川の土砂収支と将来予測，京都大学防災研究所年報，第23巻，B-2，pp.1-22，1980。
- 15) 立川康人，永谷言，寶馨：分布型洪水流出モデルにおける空間分布入力情報の有効性の評価，京都大学防災研究所年報，第46号，B-2，2003。
- 16) 呉修一，下坂将史，山田正：降雨流出における流域スケールに応じた斜面と河道の効果に関する研究，水工学論文集，第51巻，2007。

(2024. 4. 3受付)