

多点水位観測に基づく山地河川の洪水 流量算定法に関する研究

大野 純暉¹・福岡 捷二²・時岡 真治³・田辺 裕和⁴

¹ 学生会員 中央大学大学院 理工学研究科都市環境学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

E-mail: a12.fd7b@g.chuo-u.ac.jp

² フェロー 中央大学研究開発機構教授 (同上)

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

³ 正会員 国土交通省北海道開発局 建設部 河川計画課 河川調整推進官 (〒060-8511 北海道札幌市中央区北 8 条西 2 丁目)

E-mail: tokioka-s2dg@milt.go.jp

⁴ 非会員 国土交通省中国地方整備局 温井ダム管理所 所長(〒731-3501 広島県山県郡安芸太田町大字加計 1956-2)

河道は山地から海まで連続していることから、山地河川の流量ハイドログラフを把握することは、下流河道へどのように洪水が伝播していくかを知り、また適切な河川管理を行うために重要である。しかし、山地河川の洪水観測や、洪水流量の算定はほとんど行われていない。本研究では、流域規模や河道特性の異なる 2 つの山地河川を対象に、観測水面形を用いた洪水解析による洪水流量ハイドログラフの算定法が有効であることを示している。さらに解析結果から得られた流量ハイドログラフの解釈と算定精度について考察し、山地河川における洪水観測上の留意点についてまとめている。

Key Words: *mountain stream, observed water surface profile, discharge hydrograph, unsteady flood flow analysis*

1. 研究背景・目的

洪水時の河川やその流域における安全性を確保するために、上流の山地河川における河道の水位、流量ハイドログラフを把握し、中・下流への洪水伝播機構を理解することは重要である。福岡ら¹⁾は、河道内で生じる洪水現象を解明するために、洪水観測水面形を与条件とした解析法を提案し、この方法が現地河川の管理に広く用いられている。観測水面形には河道形状や底面粗度の影響、河床変動による影響がすべて含まれた形で現れることから、観測水面形の時間変化を用いることによって、河道で起こっている水理現象が明らかになる。このように、洪水観測水面形の時系列データを再現する洪水解析を行うことによって、洪水時の水理現象を総合的に検討する手段が出来つつある²⁾。しかし山地河川では、人の立ち入りに危険を伴う場所が多く、観測できる場所が限られている。さらに山地河川は、水深が浅く流速が大きい上に、河道内に巨石が存在し水面が著しく変動するため、山地河川での洪水時における水面形時系列の観測はほとんど行われていないのが実状である。このような背景の

中で浅野³⁾は、山地河川で堰を用いて水量観測を行い、小規模洪水時の H-Q 関係式の算定を行っている。しかし、規模の大きい出水時の欠測や土砂によって堰が埋まってしまう等、山地河川では観測上の課題が多いことが示されている。また Bathurst⁴⁾らは、山地河川で河道横断面形と 2 断面の水位を観測し、その観測水位差と山地河川の抵抗則として Hey 式や Bathurst による Hey 修正式を用いて、山地河川の流量を評価している。この方法は簡便であるが、抵抗則が流量の算定精度に大きく影響すること、洪水が非定常な水理現象であること等、未解決な課題が残されている。一方、塚本ら⁵⁾は、ダム貯水池への流入量や貯水池からの放流量の精度に問題がないかを調べるため、草木ダム貯水池とその上・下流河川に水位計を縦断的に多点で設置し、ダム流入量や放流量ハイドログラフを見積もり、ダム貯水池内の流動機構を福岡らの考え方¹⁾に基づいて分析した。検討の結果、草木ダムでは貯水池への流入量や放流量が実用上有効であることを示し、ダム上流河川や下流河川のような山地河川においても観測水面形に基づいた洪水解析は、洪水流量ハイドログ



(a) 留萌ダム



(b) 温井ダム

図-1 留萌ダムと温井ダムの堤体付近の写真

表-1 ダムとその流域の諸元.

	留萌ダム	温井ダム
形式	ロックフィルダム	アーチ式コンクリート
堤高(m)	41.2	156.0
集水面積(km ²)	42	253
湛水面積(km ²)	2.2	1.6
総貯水容量(m ³)	23,300,000	82,000,000
有効貯水容量(m ³)	21,800,000	79,000,000

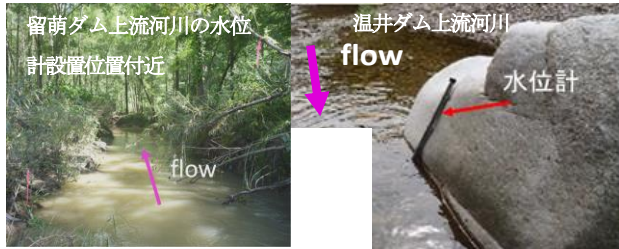
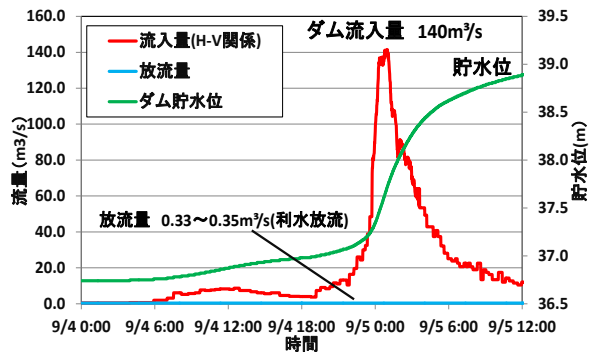


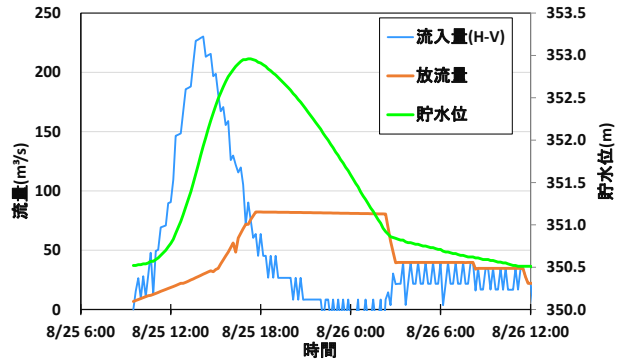
図-2 山地河川の異なる水位計設置位置状況

ラフの算定に有効な方法であることを示した。しかし、観測技術の実用化を図るためには、他の異なる規模のダム貯水池と山地河道に対して、観測された水面形を用いた洪水流解析の有効性を確認し、さらに研究者が山地河川での水位、流量観測を行うにあたっての留意点を明らかにすることが必要である。

本研究では、草木ダムとは貯水池の規模と上下流河川の河道特性が異なる留萌ダムと温井ダムを対象に、塚本らと同様な検討を行い、塚本らの流量算定法が有効な方法であることを示す。さらに、検討結果より山地河道の各時間の観測水面形を高い精度で再現するための考え方で、観測、解析上の留意点を示す。



(a) 平成 25 年 9 月留萌川洪水



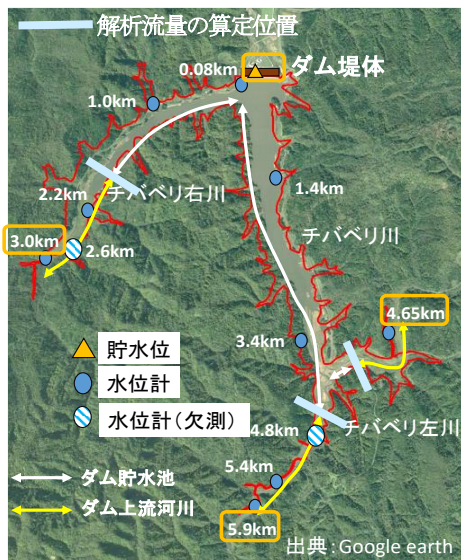
(b) 平成 27 年 9 月太田川洪水

図-3 洪水ハイドログラフ

2. 山地河川で観測水面形を用いた検討の概要

(1) 対象とする山地河川、ダム貯水池と洪水の概要

本研究では、北海道留萌川流域の留萌ダム貯水池に流入するチバベリ川、チバベリ右川、チバベリ左川と、広島県太田川水系滝山川に位置する温井ダム貯水池の上・下流河川を対象に検討を行う。図-1に留萌ダムと温井ダムの堤体外観と、表-1にダム貯水池とその流域の諸元を示す。対象とする河川の河床勾配はいずれも 1/60~1/130 と急流河川である。同じ山地河川にあっても、図-2の写真で示すように留萌ダム上流域では 1m程の植生が多く繁茂している一方で、温井ダム上・下流河川では河道内に巨石が散在しており、河道状況が大きく異なっている。本研究で対象とする洪水は、図-3に示す平成 25 年 9 月留萌川洪水、平成 27 年 9 月太田川洪水である。対象とする洪水は共に、比較的小規模である。留萌ダムは自然調節方式のダムであり、平成 25 年 9 月洪水時は、洪水吐からの放流はなかった。また、留萌ダムは温井ダムに比べて集水面積が小さいことから、温井ダム流入量ハイドログラフと比べて、留萌ダム流入量ハイドログラフは先鋭である。温井ダム放流量は、定められた放流量算定式から、ダム堤体付近で計測された貯水位とゲート開度に応じ算定した。またダム貯水池への流入量は、貯水池の水面が水平に上昇・下降するものと仮定した H-V 関係を用いて算出されるダム貯留率と放流量の和から算出した。



(a) 留萌ダム上流河川群
(距離標はダム堤体からの距離を示す)

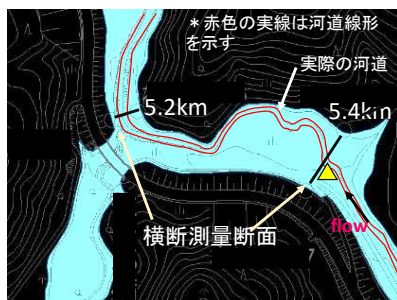


(b) 温井ダム上流河川
(距離標はダム堤体からの距離を示す)



(c) 温井ダム下流河川
(距離標は太田川の合流点からの距離を示す)

図-4 留萌ダムと温井ダム流域の航空写真と水位観測体制



縮尺: 1/10000 (等高線間隔: 5m)
△: 水位計設置位置
図-5 チバベリ川の平面図 (チバベリ川 5.4km 周辺)

(2) 洪水観測体制

図-4 はそれぞれの河川流域の航空写真と水位計設置状況を示す。留萌ダムとその上流河川では、平均的に 1 km 間隔で、温井ダムでは、0.5~1km 間隔で、時空間的に密な水位観測が行われた。チバベリ川の 4.8km、チバベリ右川の 2.6km の水位計は、洪水中に流失し、欠測となった。留萌ダムでは本川と支川の集水面積が匹敵するため、支川からの流量も精度よく算定する必要があり、チバベリ右川、チバベリ左川においてもチバベリ川と同様に水位観測が行われた。

3. 検討方法

洪水流解析法は、多くの緩流河川を対象に実施されてきた観測水面形の時間変化に基づいた非常標準三次元洪水流解析法⁶⁾であり、塚本ら⁵⁾が急流河川に用いたもの

である。境界条件は、ダム上流河川では、上流端に図-4(a), (b) の橙色で示す地点の水位ハイドログラフ、下流端にダム堤体で計測された貯水位ハイドログラフを与えた。ダム下流区間は、図-4(c) の緑枠で示す地点の観測水位ハイドログラフを上下流端に与えて計算した。解析地形は、原則 200m 間隔で計測された横断測量データを用いた。これに加えて、山地河川では横断測量断面間においても、河道線形や地形が大きく変化するため、図-5 で示すような等高線や平面図、また航空写真を用いて、河道地形データの精度を上げるよう努めた。また粗度係数は後述するように、河道全体の各時間の観測水面形を平均的に説明するように設定した。

4. 山地河川における洪水流観測結果と解析結果の比較

図-6 は留萌ダム上流河川における洪水水面形時系列の観測結果と解析値の比較を示す。プロットで観測値、実線で解析値を示す。チバベリ川の 5.4km 周辺の観測水面形は、図-5 に示す河道の湾曲によって水位がせき上がっている。5.4km の水位観測値と解析値には若干差があるが、横断測量断面間の河道地形を地形図や航空写真で精査し、確認することで、チバベリ川全体の解析水面形は観測水面形の特徴を再現している。チバベリ右川の解析水面形も、2.4km 地点の痕跡水位を除きよく再現できている。尚、チバベリ左川の観測水面形と解析水面形の比較は省略しているが、同様に再現できている。図-7 は、温井ダム上・下流河川における水面形時系列の観測結果

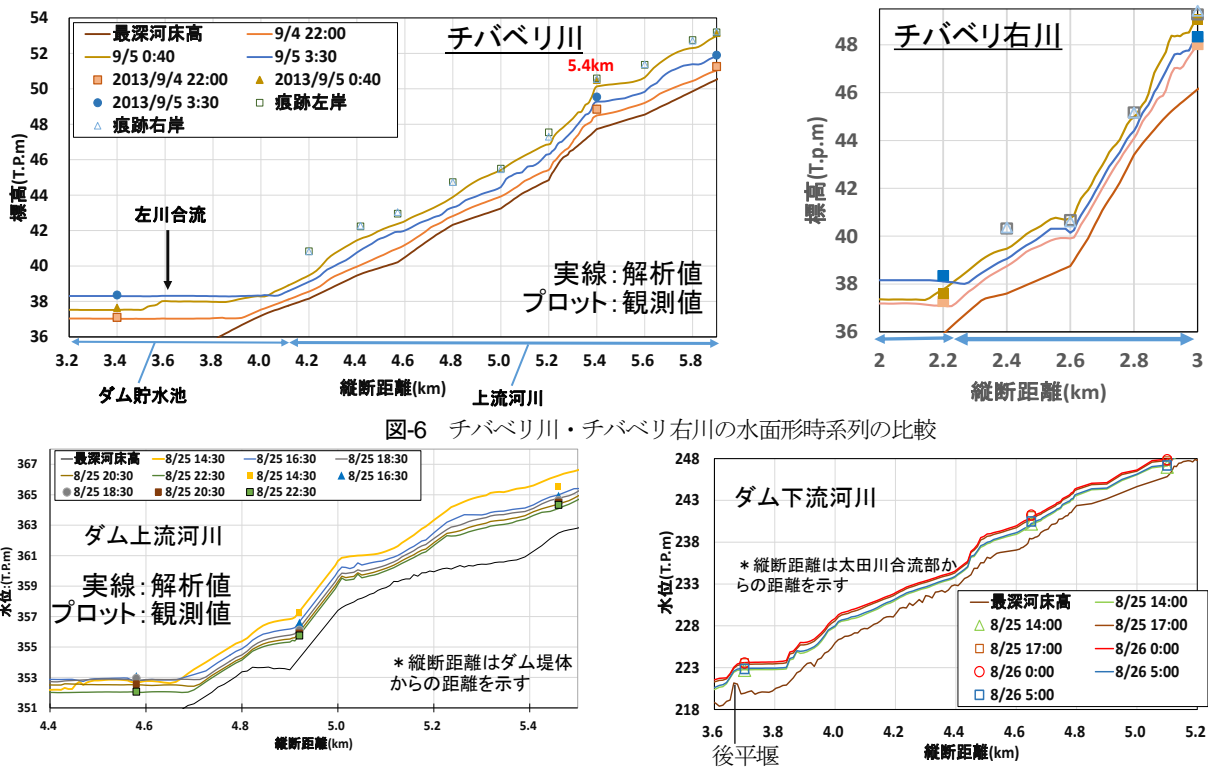


図-6 チバベリ川・チバベリ右川の水面形時系列の比較

図-7 温井ダム上下流河川の水面形時系列の比較

と解析結果の比較を示す。ダム下流河道において、3.7kmの水位観測地点の直下流に後平堰が設置されている。観測値はこの堰の背水の影響を受け水位がせき上がっている。解析では、堰の天端高を別途計測し、地形データとして与えることで、3.7km周辺の水面形の特徴を再現した。温井ダム上流区間では、5.46kmの水位観測点において、水位が高い時間帯の解析水位が観測水位よりも高めに計算されているが、その上下流における各時間の解析水面形は観測水面形をほぼ再現している。

本研究では、山地河川における河床勾配は急なため、解析と観測の局所的な水位の差が河道全体の水面形に影響しないと考え、図-6、図-7に示したチバベリ川の5.4kmや温井ダム上流河川の5.46km等の観測値の再現性が悪い箇所について、空間的に粗度係数を変化させ、局所的水位観測値と合致させることはしていない。粗度係数は、図-6、図-7に示した河道全体の各時間の観測水面形を平均的に再現するように設定した。植生や巨石を有する山地河川において、水位が低い時間帯と高い時間帯では巨石等から受ける抵抗は大きく異なるが、各時間における河道全体の観測水面形を説明するように、水深に応じた河道の平均的な粗度係数を見積もった。粗度係数は、留萌ダム上流河川群では水深が1m以下の時間帯は $n=0.06(m^{1/3} \cdot s)$ とし、水深が大きくなるにつれて粗度係数を時間的に線形で小さくなるよう設定し、水位ピーク時に $n=0.04(m^{1/3} \cdot s)$ とした。温井ダム上・下流河川では、水深が1.5mより低い時間帯は $n=0.07 \sim 0.085(m^{1/3} \cdot s)$ 、水位ピーク時は $n=0.04(m^{1/3} \cdot s)$ とした。

次に、留萌ダムと温井ダムの検討で得られた解析水面形の時系列から算出した流量ハイドログラフと貯水池のH-V関係により求まるダム流入量、ダムの放流量算定式から算出される放流量ハイドログラフを比較する。図-8は、留萌ダムへ流入する流量ハイドログラフを示している。青、茶、黄色の実線は、貯水池上流端における各河川の水面形の時系列から求まる流量ハイドログラフを示す。各河川の解析流量の算定位置は図-4(a)の水色の太い実線で示す位置である。赤線で示す解析総流入量は各河川の解析流量の合計値であり、緑色の実線で示すH-V関係より求めたダム流入量よりも、ピークで1割弱大きい。ハイドログラフの形はほぼ一致し、再現性は高いと言える。一方、温井ダム流入量・放流量と山地河川の解析流量ハイドログラフの比較を図-9に示す。図-9(a)の実線で示す温井ダム下流河川における水面形時系列から得られる解析流量ハイドログラフは、ピーク付近でダム放流量ハイドログラフよりやや大きく、低減部でやや小さいが波形はほぼ説明出来ている。また、図-9(b)に示す留萌ダムと同様な方法で求めた温井ダム流入量のハイドログラフは、洪水減水期においてダム流入量のハイドログラフの波形の特徴が異なっているが、流量ピーク付近の解析流量ハイドログラフの波形はほぼ一致している。

5. 得られた検討結果の解釈・課題と山地河道における洪水流量の算定を行う上での留意点

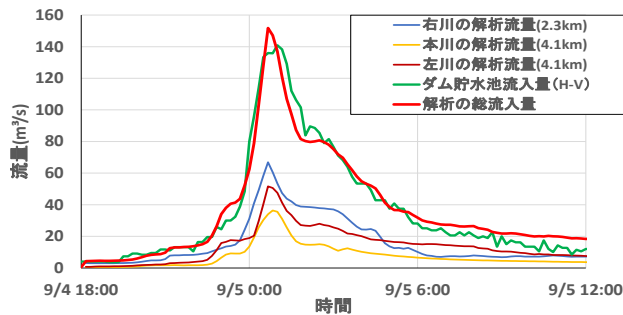
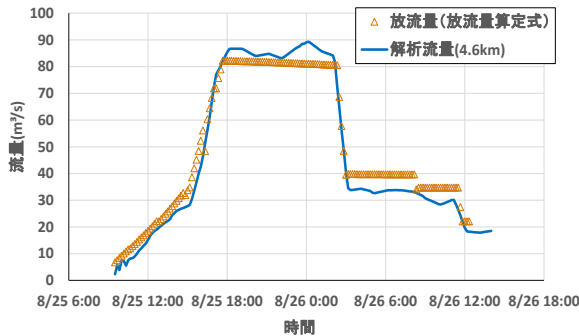
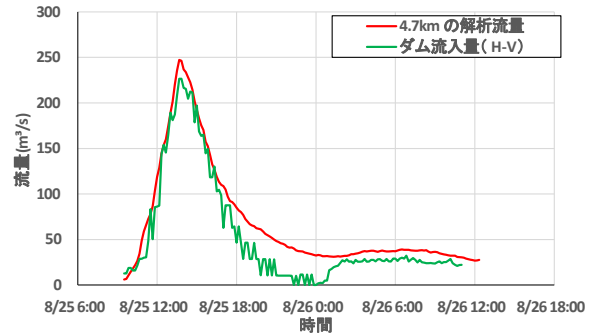


図-8 山地河道における解析流量と留萌ダム流入量の比較

*解析で算出した流量は図-3の水色の実線で示す箇所では算定したものである。



(a) 温井ダム下流河川の解析流量とダム放流量の比較



(b) 温井ダム上流河川の解析流量とダム流入量の比較

図-9 山地河道における解析流量と温井ダム流入量・放流量の比較

(1) 得られた検討結果の解釈と課題

対象とした留萌川洪水は、規模が小さく、ダムからの放流がほぼなかった。従って貯水面が水平であると仮定した H-V 関係から算出される流入量ハイドログラフの算定精度は高いと考えられる。検討の結果、山地河道の水面形時系列から算出した流量ハイドログラフが H-V 関係から算定したハイドログラフとはほぼ一致したことから、観測水面形を用いた洪水流量の算定は、山地河川でも可能であることを示している。図-9(b)の温井ダムの検討結果は、流量ピーク付近では両者の波形はほぼ対応した。しかし、ダム下流の解析流量ハイドログラフと放流量ハイドログラフの波形は若干差があるものの、ほぼ対応したにもかかわらず、洪水減水期におけるダム流入量と解析流量に差が生じている。この差の原因については観測された貯水位、上下流河川の観測水面形、ダムからの放流量の式のそれぞれの精度について種々検討を行ったが明確な原因が分からず、今後の検討課題である。

本検討で対象とした2つの洪水は、比較的規模の小さな洪水であったため、大規模洪水に対し同様な検討を行うことも必要である。その際、ダム貯水池内の水面が水平になるとは限らない為、今後、ダム貯水池においても縦横断的に多点で水位観測を行い、貯水池への流入量に及ぼす貯水池内の水面形の水平からの偏差量の影響について検討する必要がある。また、山地河川では短い縦断距離においても、河道の縦横断面形状の変化が大きく、観測水面形に及ぼす影響は無視出来ない場合も考えられ、より密に水位観測できる観測技術や観測体制が必要である。本方法とは異なるが、近年柏田ら⁷⁾によって画像解

析から水位と水表面流速データを得て、力学的内外挿法により流量ハイドログラフを得る方法が検討されている。この手法は観測が困難である山地河川において、特に有効性を発揮する可能性があり、その適用性の検討が望まれる。ダム貯水池を含む山地河道の流量ハイドログラフの算定は、水文学と河川工学の境界問題であり、今後必要となる流域全体の収支の検討上、一層重要になると考えられ、水文・水理の両面からの検討が望まれる。

(2) 山地河道における観測や観測データ分析における留意点

一般に、山地河川では河道に近づくことが困難であるため、流量や水位を観測する体制が整っていない。しかし、今後適切なダムの洪水管理や流域で一貫した河道管理のためには、山地流域においても河道地形、水位、流量データを備えていくことが必要となる。本節では、データが十分に備わっていない山地河川での洪水流解析上必要な留意点をまとめる。

留萌ダム上流河川の検討結果より、山地流域からの洪水流量を算定する際、本川の流域に匹敵する大きな支川が流入する場合、本川、支川の水位観測システムを十分検討し、水位計等を適切な場所に設置することが重要である。また、地形が急峻な山地河川で水位観測を行う際は、アクセスが可能な観測点周辺の地形情報を把握しておく必要がある。堰のような古い横断構造物があることに気づかず、解析によって始めて堰の存在に気付くこともある。しかし、構造物の諸元を示す資料がなく、現地で調べなければならない場合もある。河道の線形や断面

形は水面形に影響するため、地形図や航空写真は横断測量間の河道地形を補間する上で重要な情報源となる。また、多点で観測された水位データを用いた解析は、観測されたデータが適切に測られたものかどうかを判断することを可能とする。このように山地河川では観測と解析は車の両輪であり、山地河川の水面形を用いた解析は山地河川の水理現象の理解を増すとともに、不十分な資料の補完に有効なものとなる。

6. 結論と今後の展望

本研究では、塚本らによって行われた草木ダム上下流河川の観測水面形に基づいた洪水流量ハイドログラフ算定法が、他の山地河川においても有効かどうかを立証するために、水面形時系列から流量の算定を行い、その適用性と精度について調べ、さらに今後同様な検討を行う際の留意事項について考察した。以下に得られた主な結論を示す。

- 1) 山地河川で、1km 以内の縦断間隔で設置された観測水位の縦断分布には、局所的な微地形や底面粗度による影響があるものの、長い区間で見ると複雑な河道特性が十分に現れている。これにより、河道区間の平均的な観測水面形を再現した解析によって適切な流量ハイドログラフの算定が可能であることを示した。
- 2) 水面形の時系列から求めたダム上流河川の解析流量ハイドログラフは、現行の手法で算定されるダム流入量ハイドログラフとほぼ一致し、山地河川における精度の高い洪水流量ハイドログラフを把握する手法として、洪水観測水面形時系列に基づいた洪水流解析は有効であることを示した。ただし洪水減水期においてダム流入量と解析流入量の間乖離が見ら

れこの点については、今後の検討課題である。

- 3) 2つの山地河川を対象にした検討を行った結果から、水位観測法やデータの扱い方の留意点、今後の課題について本論文の5章でまとめた。
- 4) 山地河川からの流入によるダム貯水池の流動について塚本ら⁵⁾の解析法の妥当性の確認を行ったことにより、本手法を用いて大洪水時のダム貯水池内の流動機構の検討及びダム管理の高度化につながる可能性を示した。

参考文献

- 1) 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, No761/II-67, pp.45-56, 2004.
- 2) 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.
- 3) 浅野友子: 日本の山地流域の降雨流出データ収集データの概要と観測の課題一, 水文・水資源学会誌, vol. 27, No. 1, 2014
- 4) Bathurst, J.C. : Slope-area discharge gaging in mountain rivers, Jour. of Hy.Div., Proc. of ASCE, Vol.112 No.HY5 (1986) , pp.376-391
- 5) 塚本洋祐, 福岡捷二, 大山修: 草木ダム貯水池の洪水流動を考慮した洪水流入量, 放流量の評価方法に関する研究, 河川技術論文集, 第22巻, 2006.
- 6) 内田龍彦, 福岡捷二: 非平衡粗面抵抗則を用いた一般底面流速解析法の導出と局所三次元流れへの適用, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.71, No.2, pp.43-62, 2015.
- 7) 柏田仁, 二瓶泰雄, 中西徹真, 鈴木佑弥, 平謙二, 上田 英滋, 梶純也, 藤田一郎: 非接触計測と水理解析による河川水位・流量観測の確立に向けた検討, 河川技術論文集, 第23巻, 2007.

(2017. 9. 29 受付)

ON THE DISCHARGE ESTIMATION METHOD OF FLOOD FLOWS IN MOUNTAIN STREAMS BASED ON MULTIPLE-WATER LEVELS OBSERVATION DATA

Jyunki OHNO, Shoji FUKUOKA, Shinji TOKIOKA and Hirokazu TANABE

Estimating discharge hydrograph in mountain streams is important for analyzing propagation mechanism of flood flow to the downstream rivers. We observed water levels at many points in mountain streams. In addition, we performed estimation of the accurate discharge hydrographs by using flood flow analysis based on time series of water surface profiles. River morphology data used by flood flow analysis was carefully determined by survey date, aero photographs and topographic maps. As a result, we confirmed that flood flow analysis based on observed water surface profiles was valid for estimating discharge hydrograph in mountain streams. Finally, we considered appropriate flood observation systems and discussed points of attention for the observation systems in mountain streams.