

巨岩・巨石で覆われた河川の観測水面形に基づく洪水流量の算定法に関する研究

ESTIMATION ON FLOOD DISCHARGE HYDROGRAPH BASED ON OBSERVED WATER SURFACE PROFILES IN RIVERS WITH BOULDERS

大野 純暉¹・佐々木 博文²・竹村 吉晴³・福岡 捷二⁴
Yunki OHNO, Hirofumi SASAKI, Yoshiharu TAKEMURA and Shoji FUKUOKA

¹学生会員 中央大学大学院 理工学研究科 都市人間環境学専攻 博士課程後期課程
(〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

²国土交通省北海道開発局 旭川開発建設部 治水課 流域計画官
(〒078-8513 北海道旭川市宮前1条3丁目3番15号)

³正会員 博士(工学) 中央大学研究開発機構 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

⁴フェロー 工博 Ph.D. 中央大学研究開発機構 (同上)

Estimation of the flood flow discharge hydrograph in mountain rivers with boulders is important for river planning such as appropriate dam operation. However, flood flow analysis that can appropriately evaluate the resistance of boulders has not been developed. In this paper, we developed Q3D-FEBS model which can be calculated the three-dimensional flow velocities and non-hydrostatic pressure distributions around the boulders by using observed water surface profiles and detailed riverbed observation data. And, we applied the 2016 flood to the lower reaches of Taisetsu Dam on the Ishikari River. As result, we confirmed that this method is valid to estimate flood discharge hydrograph accuracy in river with boulders. Finally, we discussed appropriate observation system to estimate discharge hydrograph accuracy in mountain basins.

Key Words : boulders, flood flow analysis, observed water surface profiles, discharge hydrograph, Q3D-FEBS, detailed elevation data

1. 研究背景

近年大規模な洪水, 土砂災害が頻発しており, 洪水流と土砂移動を山地から河口まで一体的に評価できる洪水流・河床変動解析法に基づく流域全体でバランスのとれた治水計画が求められている¹⁾。ダム下流部の巨岩・巨石で覆われた山地河川では, 上述の目的に加えて, 適切なダム運用等に資する河道計画も重要である。これまでに, 中・下流域の緩流河川では, 約200m間隔で計測された横断測量結果を地形データとして, 約2~3km間隔で設置した水位計に基づく観測水面形の時間変化を用いた洪水流解析を行えば, 平面二次元解析ではほぼ河床材料見合いの粗度係数を用いて, 河道の水位や流量ハイドログラフを説明できることが示されている^{2,3)}。観測水面形を用い

たこの手法を, 巨岩・巨石で覆われた山地河川に適用した場合, 解析で観測水面形の時間変化を説明しようとする, 粗度係数の値を時空間的に大きく変化させる必要があり, 設定された粗度係数の値の物理的意味を説明できない課題があった⁴⁾。即ち, 巨岩・巨石で覆われた山地河川では摩擦抵抗よりも巨岩・巨石の形状抵抗の影響が大きくなり, これらは巨岩・巨石の形状や配置によって異なる。また水深の変化によっても形状抵抗が大きく変化する等の問題から, 巨岩・巨石で覆われた河川に適用可能な新たな解析法の開発が必要とされている。中・下流域と同様に時空間的にほぼ一定の粗度係数を用いて, 観測水面形に基づく洪水流解析法により山地河川の流量ハイドログラフを算定するには, 巨岩・巨石の適切な形状抵抗の評価とその形状を含む地形データの観測値を用いた解析が必要となる。近年測量技術の進展によって,

中・下流域を中心に河川定期横断測量に代わり、航空レーザー測量が実施されてきているが、巨岩・巨石で覆われた山地河川へのレーザー測量の適用性については十分明らかとなっていない⁹⁾。

著者らはこれらの課題を解決するため、観測水面形に基づき、巨岩・巨石周辺の非静水圧分布や三次元的な流速分布を解析可能な非定常準三次元解析法(Q3D-FEBS)を開発した。さらに、太田川支川滝山川では、巨岩・巨石の形状を把握するために、0.3m間隔で測量を実施した。これらの詳細な地形測量データと観測水面形に基づくQ3D-FEBSを用いることにより、巨岩・巨石の形状抵抗を適切に計算可能となり、洪水中に設定される粗度係数を一定値($n=0.032$)として、信頼度の高い解析が可能となった⁹⁾。しかし、本手法が河道特性の異なる他の山地河川に適用可能であるか検討しておらず、巨岩・巨石で覆われた河川の流量ハイドログラフの算定に必要な観測データ等については十分明らかとなっていない。

研究対象とした石狩川大雪ダム下流部は、写真-1で示すように1~3mの巨岩・巨石で覆われており、川幅は30~50m程度、平均河床勾配は1/33~1/50であり、滝山川と同程度である。河道線形は、滝山川は短い縦断間隔で屈曲部が存在しているのに対して、大雪ダム下流部は比較的直線的である。

本研究では大雪ダム下流部の巨岩・巨石で覆われた山地河川を対象として、観測水面形に基づくQ3D-FEBSによる洪水流量ハイドログラフの算定法をH28年8月洪水に適用し、その精度を検証する。また得られた結果から、本手法を巨岩・巨石で覆われた河川に適用する際に必要な観測データや計算条件、今後山地流域の洪水解析に必要な観測体制について考察する。

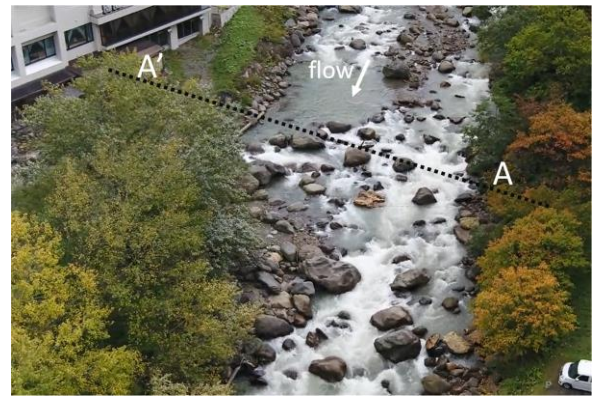


写真-1 石狩川の層雲峡温泉街 (221.68km付近) 周辺における河道の地状況

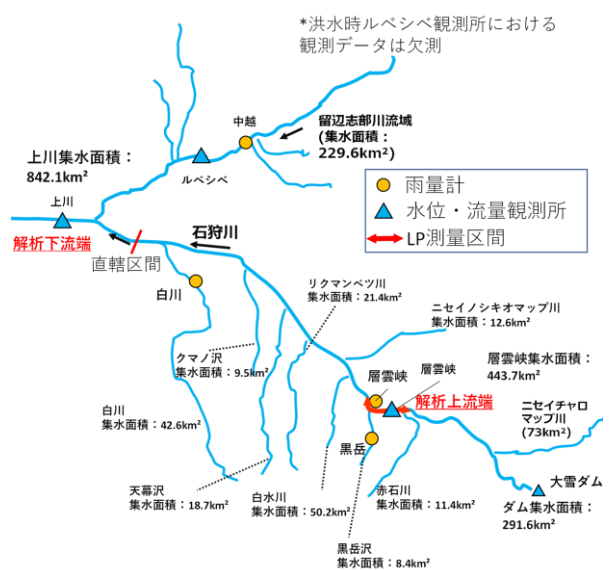


図-1 石狩川上流部の流域図と洪水観測体制

2. 石狩川大雪ダム下流部の概要と対象洪水

(1) 石狩川大雪ダム下流部の流域特性

検討区間は図-1に示す層雲峡観測所(222.6km)~上川観測所(200.4km)である。検討区間内には、層雲峡温泉街があり、本・支川からの洪水流出特性及び河道の流下能力の解明が求められている。更に大雪ダム~上川地点までの間で多くの支川が石狩川本川に流入しており、特に上川地点の集水面積に占める留辺志郎川の流域面積の割合が大きい。下流域への洪水伝搬の把握や適切な大雪ダム操作を検討するためには、上流域における本・支川の流量ハイドログラフの算定が重要となる。

(2) 対象洪水

対象とする洪水は、平成28年8月23日に発生した洪水である。平成28年8月~9月に、北海道に連続して上陸、接近した台風(7号、9号、10号、11号)等に伴う洪水に対し、大雪ダムでは計3回の防災操作が実施されている。図

-2の赤色と紫色の点線はそれぞれ層雲峡観測所(222.6km)と上川観測所(200.4km)におけるH-Q換算流量ハイドログラフを示している。平成28年8月洪水は、上川・層雲峡観測所の両地点で、既往最大流量が観測された。

(3) 洪水観測体制、詳細地形測量の概要

対象洪水では、上川、層雲峡の両観測所において、図-3(a), (b)のプロットで示す水位ハイドログラフが観測されている。また、洪水後には、石狩川本川において痕跡水位が計測されている(図-6,7)。

検討区間では、洪水前のH13年に約200mの縦断間隔で横断測量が実施され、洪水後のR1年11月には層雲峡温泉街を含む220.4~223.4kmの範囲でLP測量が実施されている。LP測量は滝山川と同様に0.3m間隔で行っており、巨岩・巨石の形状、周辺の道路や建物の高さ分かる範囲で測量が実施された。図-4は、石狩川のLP測量が実施された範囲における0.3m間隔で計測した詳細測量と横断測量結果に基づく平均河床高の縦断図の比較を示している。

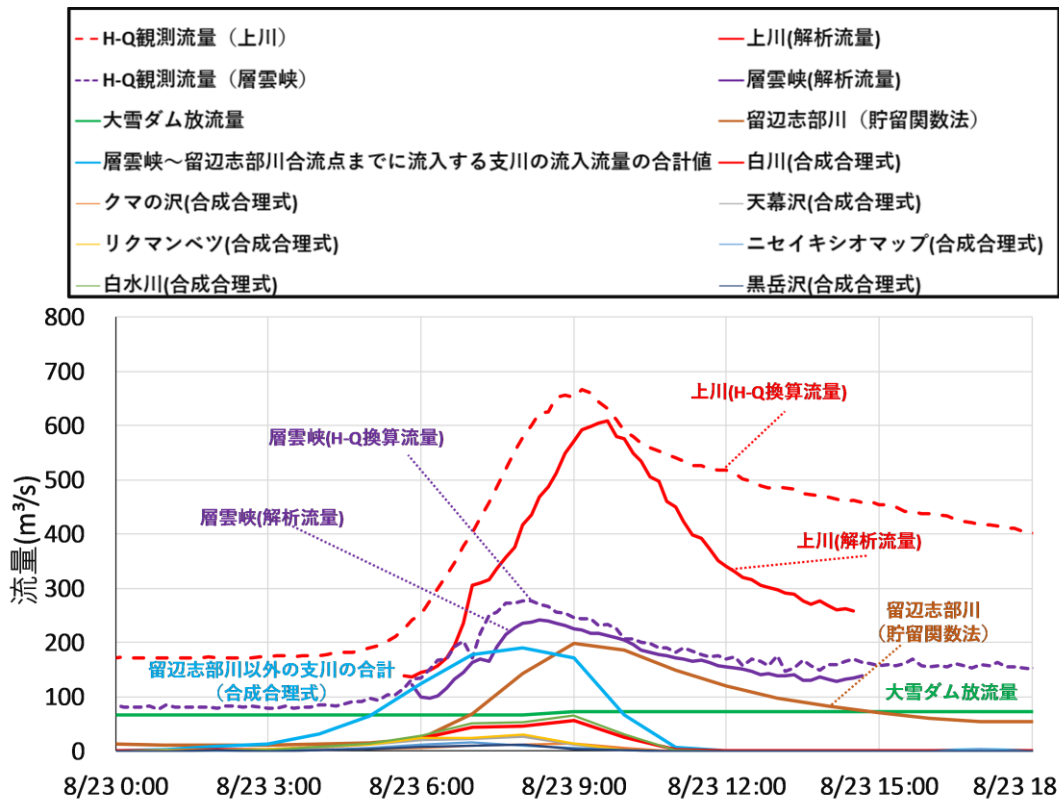
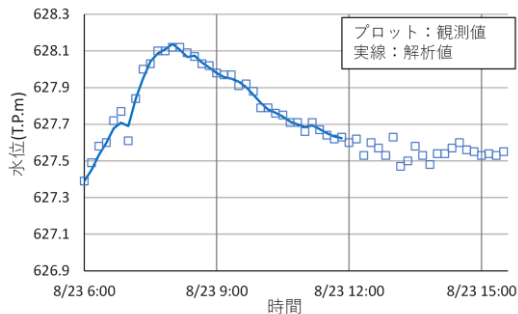
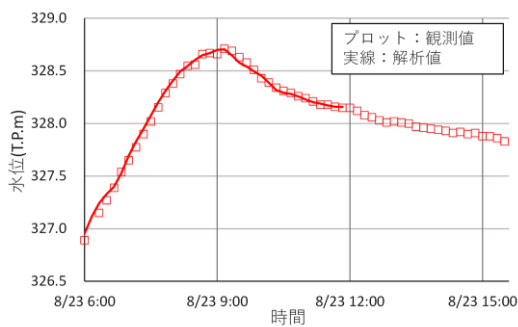


図-2 H28年8月洪水時における層雲峡、上川観測所における流量ハイドログラフ及び各支川からの流入流量ハイドログラフ



(a) 層雲峡観測所 (上流端)



(b) 上川観測所 (下流端)

図-3 H28年8月洪水における観測、解析水位ハイドログラフ

LP測量結果は横断測量間隔よりも短い地形の凹凸が現れており、横断測量結果よりも地盤高が高めに計測される傾向がある。

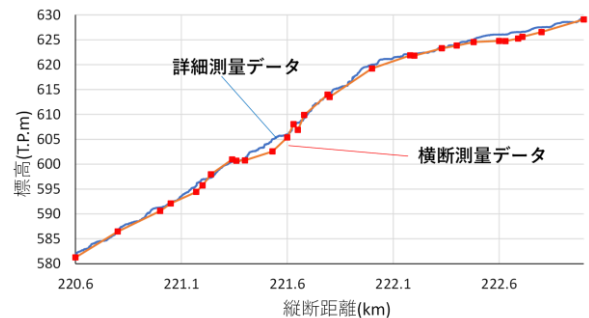


図-4 石狩川上流部の平均河床高の縦断分布 LP測量結果

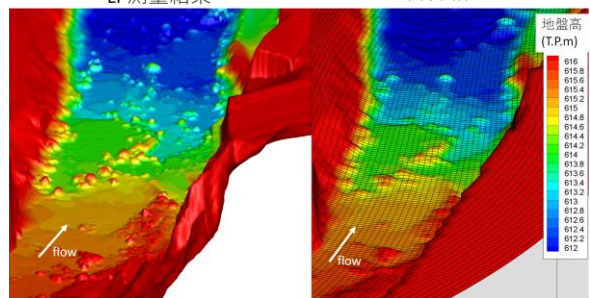


図-5 LP測量、計算格子データに基づく三次元地盤高コンター図の比較

3. 平成28年8月石狩川洪水の再現計算

(1) 解析方法と解析条件

検討に用いた洪水流解析法は、観測水面形に基づき巨

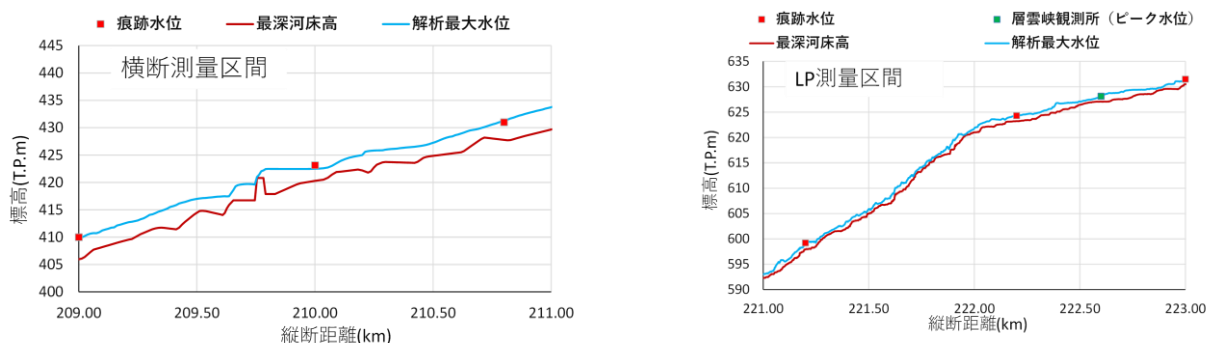


図-6 LP測量区間、横断測量区間における解析水面形と痕跡水位の縦断分布の比較

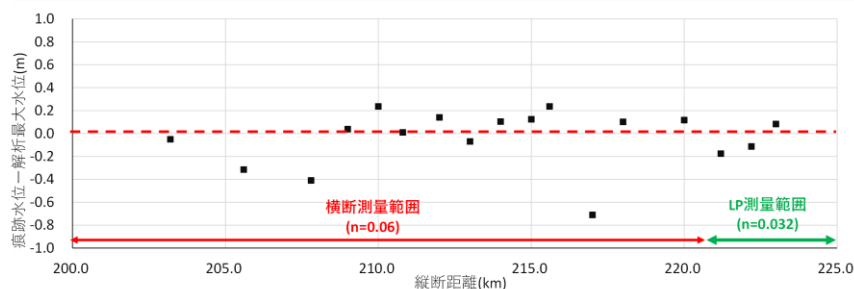


図-7 洪水痕跡水位と各地点における解析最大水位との差の縦断分布

岩・巨石周辺の圧力分布、流速分布が解析可能な非静水圧準三次元解析法(Q3D-FEBS)である。基礎方程式の詳細は前報⁹⁾を確認されたい。尚、本研究では巨石を含む土砂移動は考慮せず、固定床の条件で計算を行った。上下流端の境界条件には、図-3に示す層雲峡観測所、上川観測所における観測水位ハイドログラフをそれぞれ与えた。

支川からの流入流量は、1時間毎の観測雨量データに基づく流出解析から与えた。流域面積が大きい留辺志部川からの流入流量ハイドログラフは貯留関数法を用いて算出し、その他の約50km²以下の流域面積を有する支川からの流入流量ハイドログラフは合成合理式を用いて算出した。得られた流量ハイドログラフは石狩川本川への横流入量として考慮した。

解析に用いた格子サイズは、LP測量が実施された区間では前報⁹⁾と同様に1m、LP測量が実施されていない区間は、横断測量データに基づき、格子サイズは約10mとした。図-5は、LP測量による30cm間隔の地盤高と計算格子データに基づく地盤高から作成した層雲峡温泉街周辺の三次元地形コンター図の比較を示しており、1mを超える巨岩・巨石の形状を計算格子データで再現していることが分かる。

(2) 解析水面形と痕跡水位の縦断分布の比較

図-6はLP測量区間(221.0km~223.0km)と横断測量区間(209.0km~211.0km)における痕跡水位と洪水ピーク時の解析水面形の比較である。また、図-7には痕跡水位と解析最大水位の差を縦断的に示している。解析では痕跡水位の縦断分布を最も再現するように粗度係数を設定しており、その値はLP測量区間で0.032、横断測量区間で

0.06となった。著者らが、滝山川温井ダム上流部の山地河川において、詳細測量結果を用いてQ3D-FEBSによる洪水解析を行った場合も、粗度係数の値を0.032とすることで、観測水面形を説明することができた。このことから、巨岩・巨石の形状や配置を計算に取り込み、Q3D-FEBSによる洪水解析を行えば、山地河川の粗度係数はほぼ一定値になると考えられる。一方、横断測量区間では、巨岩・巨石の形状抵抗、支川からの流量ハイドログラフの評価に不確かさがあり、洪水規模によって観測水面形を再現する粗度係数が変わる可能性がある。

(3) 観測流量ハイドログラフと解析流量ハイドログラフの比較

図-2に示す紫色と赤色の実線は観測水面形に基づくQ3D-FEBSにより得られた層雲峡と上川観測所地点における解析流量ハイドログラフ、紫色と赤色の点線は各観測所におけるH-Q換算流量ハイドログラフを示している。また茶色の実線は貯留関数法に基づく留辺志部川からの流入流量ハイドログラフ、水色の実線は層雲峡観測所~留辺志部川合流点の区間に流入する合成合理式に基づく各支川の流入流量ハイドログラフの合計値を示す。層雲峡観測所における解析流量と観測流量ハイドログラフは洪水ピークで約20m³/sほど差はあるが、概ね波形は一致している。これは、巨岩・巨石で覆われた河川においても、巨岩・巨石の圧力・流速分布が評価可能な観測水面形に基づく洪水解析を行うことで、高精度に流量ハイドログラフが算定可能であることを示している。一方、上川観測所におけるH-Q換算流量ハイドログラフと水面形

に基づく解析流量ハイドログラフは大きく異なっている。次章ではこの考察と上川観測所地点の流量ハイドログラフを高精度に算出するために、今後必要となる検討、洪水観測体制について議論する。

(4) 平成28年8月洪水時の層雲峡温泉街周辺の流況

図-8は層雲峡温泉街周辺(221.68km付近)の航空写真に水深平均流速のコンターとベクトルを重ねた図を示す。洪水時、層雲峡温泉街周辺では、水深平均流速が5~7m/sとなり、激しい流れとなっている。図-9(a)は221.68km周辺の3次元表示した地盤高コンター図、図-9(b)は解析水位の平面コンター図をそれぞれ示している。図-9(a)、写真-1から分かるように、A-A'断面付近の右岸側には巨岩・巨石が密集して存在しており、図-9(b)に示すようにその前面では解析水位が大きく上昇している。この結果、図-10に示すようにA-A'断面では、洪水ピーク時に右岸側の解析水位が河道沿いにある宿泊・温泉施設の高さに迫っている。このように、巨岩・巨石で覆われた山地河川では、局部的に水位が上昇する必要があるため、本手法のように、周辺の道路、堤防高や建物の位置が分かる地形データと、巨岩・巨石による抵抗を適切に計算可能な解析法を用いてダム下流の洪水流下能力を評価する必要がある。

4. 巨岩・巨石で覆われた河川の洪水流量ハイドロ

グラフの算定結果の解釈と今後の検討課題

(1) 河道特性の異なる石狩川大雪ダム下流部と滝山川温井ダム上流部での検討結果の解釈

本研究と前報の研究成果⁹⁾を基に、今後山地河川の洪水流量ハイドログラフの算定を行う上で必要となる観測データおよび観測体制についてまとめる。河床に巨岩・巨石が多い山地河川では、1m以上の巨岩・巨石の形状抵抗が山地河川の洪水水面形や流速分布に大きく影響することから、0.3m程度の間隔で測られた詳細な河道地形データを得る必要がある。この地形データに基づき1.0m程度の計算格子を用いることで、巨岩・巨石周りの圧力・流速分布がQ3D-FEBSでかなりの精度で解析可能となる。計算格子スケールよりも小さい地形の凹凸等による抵抗は、粗度係数0.032程度を用いた底面せん断力で近似し、流量ハイドログラフ等を高精度に算定可能であることが分かった。巨岩・巨石で覆われた河川における流量観測は著しく困難であることから、本手法は有効な方法を与えると考えられる。

一方、横断測量区間で設定された粗度係数が大きくなった原因は、巨岩・巨石の形状抵抗が考慮出来ていない点と、支川からの流入流量ハイドログラフの算定精度にある。特に本川の集水面積に対して流域面積の割合が大

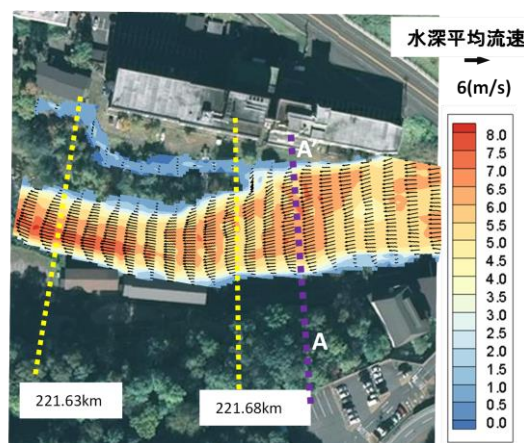
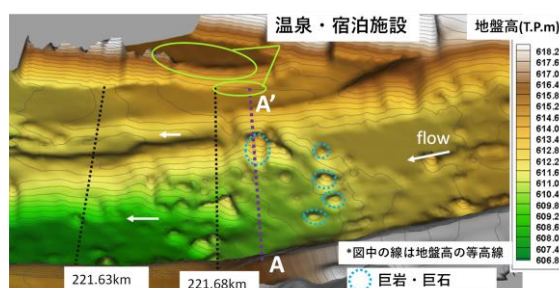
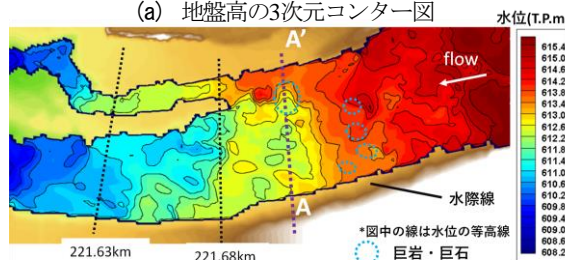


図-8 洪水ピーク時における層雲峡温泉街周辺における水深平均流速のコンター、ベクトル図



(a) 地盤高の3次元コンター図



(b) 解析水位の平面コンター図

図-9 221.68km付近の地盤高、解析水位のコンター図

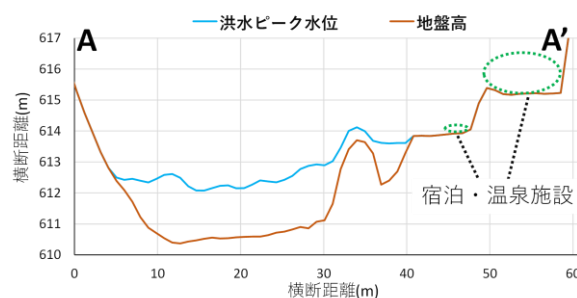


図-10 A-A'断面における地盤高、解析水位の横断分布

きい支川や、合成合理式の適用範囲外となる50km²を超える流域面積を持つ支川については、本手法に基づき高精度に流量ハイドログラフを算出することで、流出解析結果の精度の評価に役立つと思われる。これによって、河川上流部における流出解析や洪水流解析の精度が向上し、上川観測所のような支川合流後の本川の流量ハイドログラフも適切に算定可能となると考えられる。

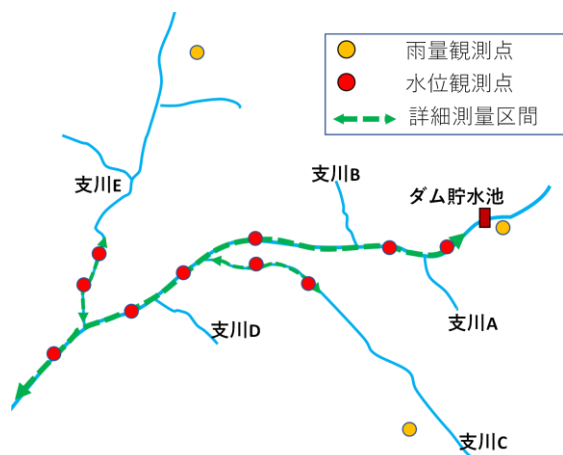


図-11 河川上流域における洪水流量ハイドログラフの算定に必要な観測体制

(2) 巨岩・巨石で覆われた河川における洪水流量ハイドログラフの算定に必要な洪水観測体制の考察

上記を踏まえ、今後山地流域で洪水流量ハイドログラフ算定に必要なと考えられる観測体制の例を図-11に示す。巨岩・巨石で覆われた本川では、巨岩・巨石の形状把握のために0.3m間隔程度で測量されることが望ましい。また、周辺の道路、堤防高や建物の高さが分かる範囲で測量を行うことも必要となる。本川と流域面積が大きい支川では縦断的な水位観測、詳細な地形測量(0.3m間隔程度)が必要である。流域面積が大きい支川は、2次支川が集水された地点～本川の合流点までの地形データと水面形時系列の観測データがあれば、それぞれの小流域からの流量ハイドログラフが高精度に算定可能となり、流域全体の流量評価の精度を高めることが可能となる。

(3) 巨岩・巨石で覆われた河川における巨石の移動を含む土砂移動を考慮した洪水流量ハイドログラフの算定に向けて

本検討では巨岩・巨石は動かないものとして固定床の条件で計算を行ったが、山地河川のような巨岩・巨石で覆われた河川の流下能力を厳密に評価するためには、巨石の移動とそれに伴う流れ場と土砂移動についても検討する必要がある。今後は本研究で示した洪水流量ハイドログラフの算定法をベースとして、洪水前後における河床地形測量、巨石の移動状況や土砂移動状況の把握を行い、巨岩・巨石で覆われた河川の洪水流・河床変動解析法の一層の精度向上を目指すことになる。

5. 結論

本研究では、前報⁶⁾によって示された滝山川温井ダム上流部における観測水面形に基づいたQ3D-FEBSによる洪水流量ハイドログラフの算定法が、他の河道特性が異なる巨岩・巨石で覆われた河川においても有効かどうかを調べた。また、多くの支川が流入する巨岩・巨石で覆われた山地河道で高精度に洪水流量ハイドログラフを算定するために必要となる洪水観測体制と今後の研究の方向について考察した。以下に得られた主な結論を示す。

1. 滝山川と河道特性が異なる山地河川石狩川大雪ダム下流部においても、巨岩・巨石の形状を含む詳細な地形測量データに基づき、観測水面形と0.3m間隔の詳細地形測量データを用いたQ3D-FEBSにより、洪水流量ハイドログラフを高精度に算定可能であることを示した。また観測水面形を説明する粗度係数は両河川ともに、詳細測量実施区間では0.032に収束した。
2. 以上の結果から、山地流域で今後必要と考えられる洪水観測体制について考察した。本手法は流量観測が困難な巨岩・巨石で覆われた河川に有効であり、河川上流部における流出解析や洪水流・河床変動計算の精度向上と、ダム下流部の洪水流下能力の評価を可能にする有効な方法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) 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。
- 3) 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、第761号/II-67、pp.45-56、2004。
- 4) 大野純暉、福岡捷二、時岡真治、田辺裕和：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、土木学会論文集B1(水工学)、Vol.74, No.4, pp.I_799-I_804、2018。
- 5) 国土交通省 水管理・国土保全局：河川管理用三次元データ活用マニュアル(案)、令和2年2月
- 6) 竹村吉晴、兒子真也、大野純暉、福岡捷二：巨岩・巨石が点在する山地河川に対する平面二次元解析法の課題と新しい解析法の提案、河川技術論文集、第25巻、pp.267-272、2019。

(2021. 4. 2受付)