

# 急流河川姫川における 流量観測の精度向上について

山賀 千穂<sup>1</sup>・大道 一步<sup>1</sup>・山崎 義彦<sup>1</sup>

<sup>1</sup>高田河川国道事務所 調査第一課 (〒943-0847 新潟県上越市南新町3番56号) .

姫川は急流河川であり、洪水時には河床変動が発生するためH-Q式による換算では、正確な流量の測定が困難である。洪水時の流量観測結果は水防活動及び河道計画等に用いるため、精度が高い成果が求められている。そのため、姫川では、基準点山本観測所を対象に観測精度向上のための検討を行っている。本稿では、急流河川での流量観測の精度向上検討のために実施している新たな手法と機器の観測について述べる。

キーワード 流量観測, 河床変動, 電波式流速計, Li-DAR

## 1. はじめに

姫川は、その源を長野県北安曇郡白馬村の佐野坂丘陵(標高約800m)に発し、白馬盆地で平川、松川等を合わせた後、山間部を北流しながら、中谷川、浦川等を合わせ新潟県に入る。その後、大所川や小滝川、根知川等を合わせ平野部に入り、糸魚川市において日本海に注ぐ、幹川流路延長60km、流域面積722km<sup>2</sup>の一級河川である。直轄区間は河口部から延長11kmの区間である。沿川及び氾濫域には、JR北陸本線、JR大糸線、北陸自動車道、国道8号、国道148号等の基幹交通施設、北陸新幹線等が存在し、交通の要衝となっている。

流域の大半を急峻な山地が占め、河川勾配は1/60~1/130程度と国内屈指の急流河川であり、下流部の浸水想定区域は糸魚川市中心部となっており、洪水が一度氾濫すると甚大な被害が発生する。また、大規模な断層帯である糸魚川-静岡構造線沿いの脆弱な地質地盤を流域としているため、洪水時には上中流部から大量の土砂が本支川に流出し、土砂災害が発生しやすいという特徴がある。

## 2. 山本観測所における高水流量観測について

洪水時における流量観測結果は洪水時の水防活動に資する情報提供、河川管理施設の保全、河道計画等に活用するため、重要であり、かつ精度が高いものでなければならない。特に水防活動においてはリアルタイムの情報が求められる。しかし、H-Q式換算では急流河川の特性上、一定の精度を保つことが難しく、リアルタイムに情

報を所得する事も困難である。基準点である山本観測所で(図-1)、過去に甚大な被害をもたらした1995年7月出水(平成7年)においても、浮子観測を実施したが、後に算定される流出計算結果の流量と比較すると、大きく乖離する結果となり精度に課題があることが判明している。



図-1 山本観測所 位置

一般的に急流河川では、出水中に河床低下が起こり、その後土砂が蓄積するため、超音波を用いて河床と流量分布の計測が可能なADCP観測(Acoustic Doppler current profiler ドップラー流速分布計)の運用を2017年(平成29年度)から検討をしている。

しかし、ADCP観測には、姫川では土の粒子や気泡が多く河床をうまく計測出来ないことがある。(図-2)一定の観測数値の計測が難しいため2011年(平成23年度)から観測を断念している。

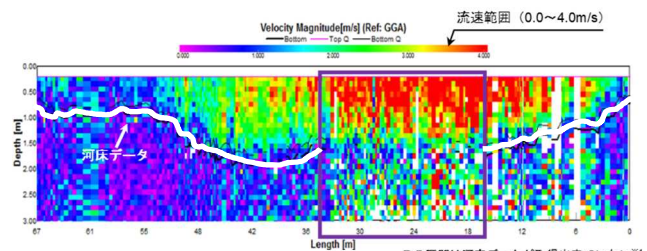


図-2 2021年(令和3年度)ADCP観測 生データ

河床変動を想定できる河床位方程式を利用した検証を2018年(平成30年度)から行ってきた、河床位方程式の精度検証では、河床変動が起きている出水を対象とするため、出水時中河床変動が起きているか確認する必要があるが、目視又はレーザ等では確認出来ないためペイント法を実施し、ペイントされた河床材の流出をもって、河床変動が発生していると確認した。河床位方程式による精度検証を実施した。

### 3. 2022年8月出水の観測について

2022年(令和4年度)8月20日の出水では、姫川の山本観測所で水防団待機水位(流量 $500\text{m}^3/\text{s}$ 相当)を一時超えた。そのため今回は、8月の小規模出水を対象に以下の観測・検討を実施した。

山本観測所での出水時の流量観測の現状と周辺状況を把握するため、2022年(令和4年)8月小規模出水時の観測において、気象観測データの計測(風向風速計)、水面勾配観測(トレイルカメラ、フィールドビューア)、非接触型計器(電波式流速計)による観測、ペイント法を実施した。それぞれの観測実施状況位置図を図-3に示す。

出水時の水面勾配を把握する為に、フィールドビューアを用いて観測及び解析を行った。

山本観測所局舎の屋上に設置してある、フィールドビューアは、2019年(平成31年度)から毎年設置・観測を行っている。フィールドビューアは三菱電機(株)が開発した、3次元レーザスキャナーと監視カメラが一体となった計測機器であり、計測エリアの映像を撮影するとともに、3次元レーザにより撮影エリア内の対象物の3次元点群と座標を計測する機器である計測間隔は30分毎と設定している。(図-4)

8月20日小規模出水を対象にフィールドビューアから取得した点群データ(水面形の計測値)を基に、非接触型計器(固定式電波式流速計)の2測線(ch5とch6: 図-5)に

おける水面勾配と、8月20日出水時の水面幅を5分割した各区分中央の5測線(図-6)における水面勾配を算出した。

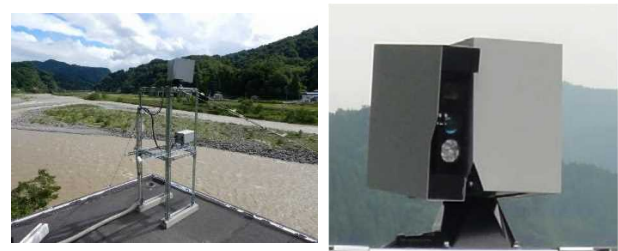


図-4 フィールドビューア設置状況

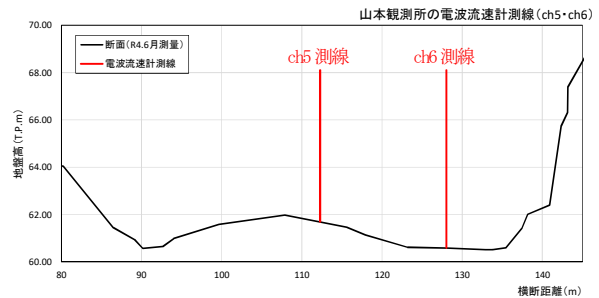


図-5 水面勾配の算出対象測線(固定式電波流速計測線)

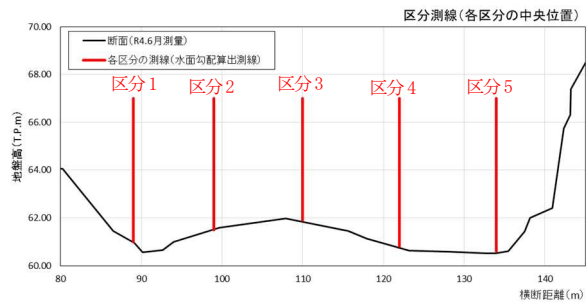


図-6 水面勾配の算出対象測線(水面幅を5分割での区分測線)

姫川山本地点は滞筋が複数に分離しており、河床材料の粒形が大きい為、大規模洪水時には横断方向の水面形にも凹凸が生じることが想定される。そこで、フィールドビューアによる3次元点群データを用いて、山本観測

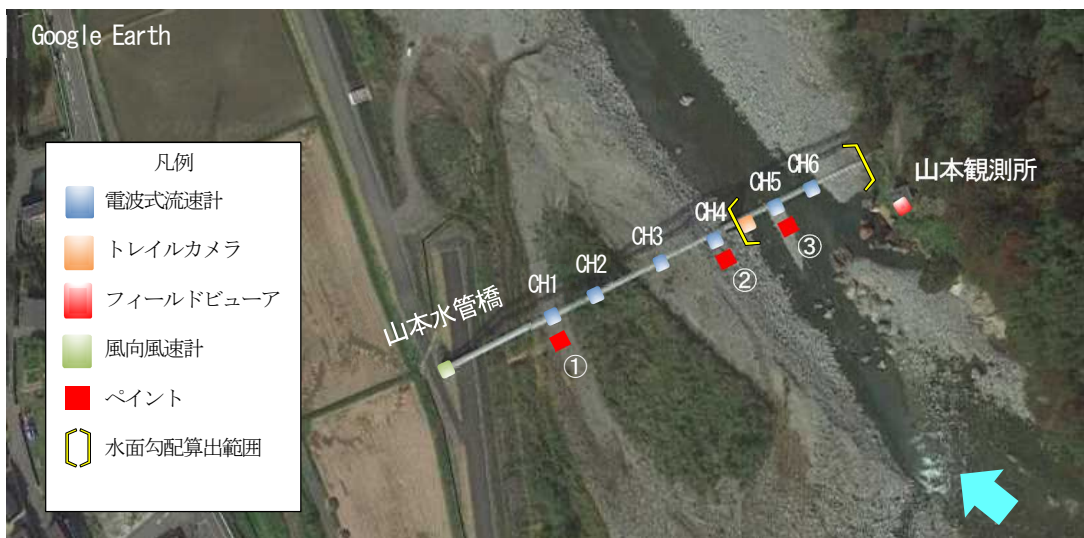


図-3 山本観測所 観測機器設置位置図

電波観測断面の横断水面形について確認した。3次元点群データによると、横断方向の水面形にも波状のバラつきが確認された。また、流量規模が大きくなるに連れて、左岸側の水位よりも右岸側の水位が低くなる傾向が見られた。山本観測所の電波流速計断面（山本水路橋の上流10m 断面）では、姫川の出水時、基準水位計付近の護岸への反射波の影響により、右岸側の水位が低くなることが想定される。（図-7）

トレイルカメラは山本水管橋上に1台設置・観測を実施しており、計測間隔は30分に1回の静止画としてある。観測状況を図に示す。

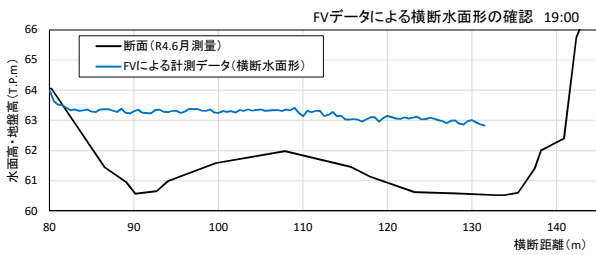


図-7 FV 点群データによる横断水面形

トレイルカメラの撮影範囲内における構造物を標定点とし、撮影画像から水面勾配算出を行うための、標定測量を実施した。RD09 からRD06 間を結んだ延長線と水面が接する点を水面① (P1) , RD10 からRD07 間を結んだ延長線と水面が接する点を水面② (P2) , RD11 からRD08 間を結んだ延長線と水面が接する点を水面③ (P3) , RD22 からRD23 を結んだ延長線と水面が接する点を水面④ (P4) とした (図-8) 。トレイルカメラの画像から水位・水面勾配の算出を行った。算出した水面勾配は表-1 に示す。トレイルカメラとフィールドビューアから算出した水面勾配の値を相関図に表し比較した結果、フィールドビューアとトレイルカメラの相関性は見られなかった。（図-9）

この要因は、小規模出水時におけるトレイルカメラでの水位計算点の点選択が適切ではなかったことが考えられる。今回の8月20日出水では、コンクリート擁壁付近での波状水面が発生し、P2 付近で顕著に低下する傾向となった。また、P4 付近では顕著な堰上げ傾向も見られた。今後は、コンクリート擁壁よりも上流部の巨石（岩）にマーキングを施し、水位算出点を増やして、水面勾配算出の精度向上を図る必要がある。水面勾配はP1～P4間、P1～P2間、P2～P3間、P3～P4間のそれぞれの水位差から、算出している。

表-1 トレイルカメラによる水位・水面勾配算出

観測日	時刻	水面勾配
令和4年8月20日	11:00 付近	0.0139 (1/72)
	15:00 付近	0.0124 (1/81)
	16:00 付近	0.0130 (1/77)
	17:00 付近	0.0268 (1/37)
	18:00 付近	0.0235 (1/43)
	19:00 付近	0.0208 (1/48)



図-8 右岸トレイルカメラ用標定点の測点配置

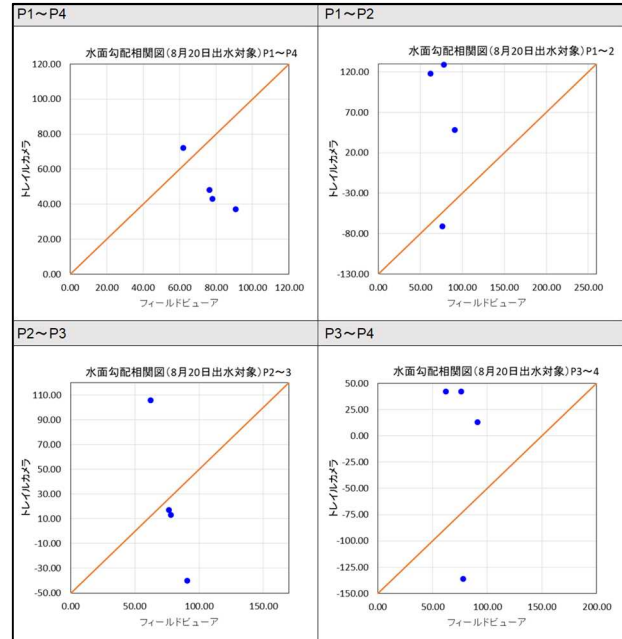


図-9 8月20日出水対象水面勾配相関図

#### 4. DIEX 法による横断流速分布の算出

8月20日の小規模出水時の山本観測所における横断方向の流速分布を把握する為に、非接触型計器（固定式電波式流速計）データとDIEX法を用いて横断面内の流速分布を算出した。

DIEX法 (Dynamic Interpolation and EXtrapolation method, 力学的内外挿法) とは、現地観測で得られた離散的な「点」・「線」流速データを、運動方程式に基づいて「面」流速データに変換し、河川流量を算出する手法である。（図-10）

また、DIEX法の計算には『DIEX-FLOW（パシフィックコンサルタンツ（株）製）』を用いている。

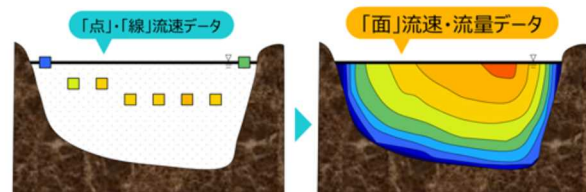


図-10 DIEX 法について

8月20日出水時の山本観測所における横断方向の流速分布を把握するため、固定式電波流速計データ(ch5とch6)について、DIEX法により横断流速分布を算出した。ここで算出した横断流速分布は、水深平均流速(鉛直方向の平均値)である。また、8月20日出水時の山本観測所における水面幅を5区間に分割し、各区間での平均流速値も算出した。

この5区間の平均流速値と、電波流速計による更正流速値(ch5とch6の2測線の風速補正後流速データに更正係数0.85を乗じた)を河床位方程式の入力値とした。DIEX法による流速分布図を図-11に示す。

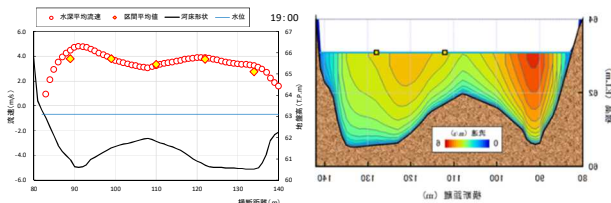


図-11 DIEX法による流速分布の算出結果

山本観測所の非接触型計器(固定式電波式流速計)による表面流速値(風の影響補正済み)を用いて、8月20日出水の18:00~20:00間について、DIEX法により求めた流量と従来通りの区分求積法により算出した流量を比較した。なお、区分求積法では、表面流速の更正係数を0.85に設定した。算出・比較結果を表-2に示す。

DIEX法による流量値と区分求積法による流量値の相関図によると、DIEX法による流量値の方が若干大きい値が算出される傾向となった。これは、8月20日出水時の主滞筋において、電波流速計で計測している測線が右岸側に偏っており、主滞筋の左岸側はDIEX法による計算値の割合が大きくなり、水理的には、同じ粗度係数断面内では水深が大きいほど流速値も増加することが影響していると考えられる。

しかし、両者の流量差は最大でも10%以内に収まっており、流量規模が大きくなるに連れて、流量差は小さくなる傾向となることが分かる(流量 $300\text{m}^3/\text{s}$ 以上では5%以内の差に収まっている)。このことから、山本観測所での8月20日出水では、当該電波流速計配置による区分求積法でも十分な流量算出精度が確保されていると考えられる。

表-2 算出・比較結果

時刻	DIEX法	区分求積法
	流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
18:00	206.27	187.42
18:10	228.12	213.68
18:20	280.51	296.21
18:30	302.37	289.60
18:40	341.18	330.69
18:50	359.37	344.89
19:00	388.10	381.24
19:10	367.34	361.98
19:20	398.67	392.17
19:30	435.06	429.27
19:40	448.24	445.50
19:50	500.50	495.20
20:00	475.84	473.43

## 5. Li-DARセンサーの活用検討

姫川における洪水時の電波流速計測線での局所的な水面勾配計測に関して、コストが高いフィールドビューアの代替案としてより民生品として普及している安価なLi-DARセンサー(図-12)の活用検討を行った。

Li-DARセンサーは、離れた場所にある物体の形状や距離をレーザー光を使って測定するセンサー技術である。

姫川は平常時は透視度が高いため、レーザーが透過し水面が観測できず、洪水時の検証としては適切ではないと考えられる。そのため、比較的洪水時の濁度と近い保倉川の佐内橋で、国内で実績のあるUGM-50LXP(北陽電機製)を用いて試験観測を行った。結果図-13に示すように、佐内橋から水面の点群データの取得が出来た。また、姫川の洪水時は、今回検証した保倉川よりも更に濁度が高く、水面波も顕著であるため、保倉川試験結果よりもデータ取得率は向上することが想定される。

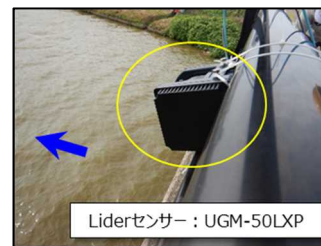


図-12 Li-DARセンサー

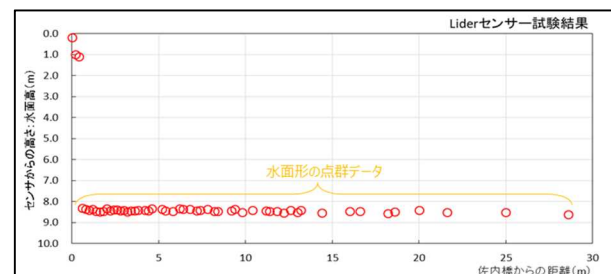


図-13 Li-DARセンサーによる点群データ

## 6. 河床位方程式を適応した流量観測について

### (1) ペイント法による河床変動の把握

出水時の河床変動を把握する為に洪水生起前の河床にマーキングを施し、洪水後のマークを確認することで、河床低下が発生したかどうかを把握できるペイント法を8月2日から9月上旬まで実施した。

山本水管橋付近に3地点ペイントを施した。(図-4)

9月に現地確認をした時は、山本水管橋上流の右岸側砂州に着色した土砂が流出しており(地点③)、2箇所わずかに砂の蓄積と礫の流入があった。(地点①②)6月、12月に実施した横断測量と比較をすると、大きく流出をしていた地点③の砂州が出水前後で53cmの比高差が生じていることが分かった。(図-14)

これにより、8月2日のペイント法実施から9月上旬までの期間に少なくとも砂州頂部では、最大53cm以上の河床低下が生じていることが考えられる。

ペイント法にて8月中に河床変動が起きている事が分かったため、河床位方程式の比較検証を行った。

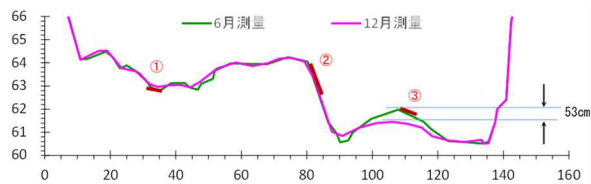


図-14 山本水管橋位置 ペイント箇所横断重ね合わせ

### (2) 河床位方程式の概要

河床位方程式は、洪水時に観測された諸量から、有効せん断力 $\tau^*$ (有効無次元掃流力=河床に作用するせん断力のうち表明抵抗)及び、これに形状抵抗 $\tau^{\wedge}$ を加えた河床せん断力(無次元掃流力) $\tau^*$ の関係を満たす径深 $R$ を推定するものである。

ここで推定された $R$ は、理論上の $\tau^*$ が生じる際の径深であるため、これが洪水時に変動した河床によってもたらされた真値であると考え、流量算定にこの $R$ を用いることで流量観測精度の向上が期待される。河床位方程式を用いた洪水時の水深及び流量の推定手順は(図-15)のとおりである。

### (3) 比較検証

比較対象は、通常のH-Q式での換算と河床変動が起らない固定床である上流3箇所の画像解析(STIV解析)による流量観測の合算を実施した。

2022年(令和4年度)に他業務で観測作成したH-Q式 $Q=99.08(H+1.98)^2$ を用いた。8月20日の19:00水位は $H=0.13$ で、流量を算出した結果、 $Q=339.1013\text{m}^3/\text{s}$ と出た。

上流3箇所は、姫川出水堰堤地点、小滝川導水暗渠地点、ワラダブチ頭首工地点の3地点で堰堤であるため河

床変動が無い。(図-16)

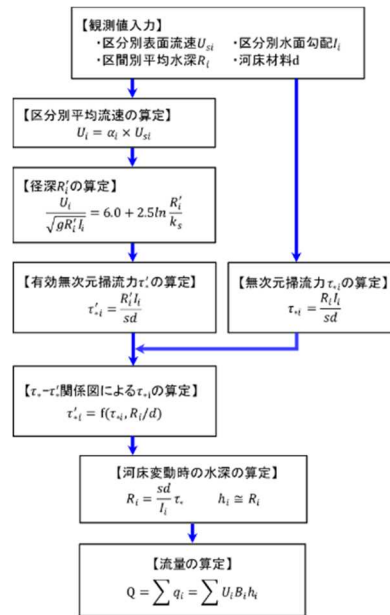


図-15 河床位方程式の流量算出の流れ

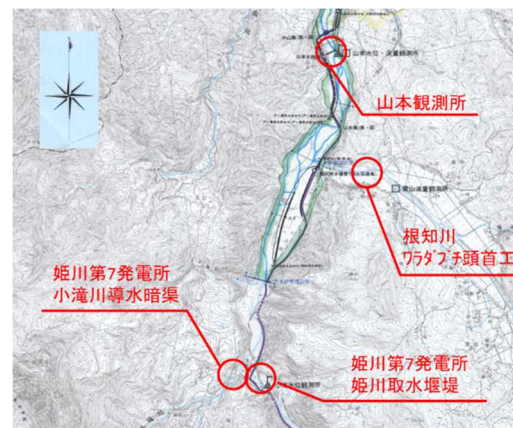


図-16 上流3箇所の位置図

山本観測所上流3箇所の各観測地点で撮影したビデオ映像(トレイルカメラで撮影)に対して、STIV法により河川の表面流速を計測した結果、表-3と算出された。

また、山本観測所地点での河床位方程式の流量と比較するため、3地点の流量を合算する。

上流3箇所から山本観測地点まで30分~90分で到達することが既往検討で確認されている。

表-3 上流3箇所の合算流量

観測地点	観測時刻	水位 (T.P.m)	STIV 流量 (m <sup>3</sup> /s)
姫川取水堰堤	18:25	124.53	213.38
小滝川導水暗渠	18:25	119.30	133.26
ワラダブチ頭首工	18:25	104.50	66.68
上流3箇所の合算流量			413.32

出水は、水深補正後の流速が平均約 3.2m/s で、小滝堰堤及び姫川取水堰堤～山本観測所間は約 5.6km の距離であるため、到達には 30 分程度を要する。

また、上流観測所で日没前に撮影された最終の画像は 18:25 であるため、山本観測所ではおおむね 19:00 時の流量に相当する。これを踏まえて山本観測所における 19:00 時点の河床高を河床式により推定し、流量算出をした結果、417m<sup>3</sup>/s と算出され、上流 3 箇所の合算流量と 3m<sup>3</sup>/s の誤差で推定流量と実測流量が算定された。(表-4)

また、推定水位の低下を考慮しない流量だと、381m<sup>3</sup>/s と近い数値となった。

しかし、これは今回の出水に対する一例であり、今後も規模の異なる洪水で同等の検討を積み重ね、その上で河床位方程式の妥当性を評価する必要がある。

表-4 河床位方程式と上流 3 箇所の比較

電波流速計	CH5	CH6
水位(水管橋上流)	T.P.63.326m	T.P.63.326m
表面流速 $U_i$	4.0m/s	4.0m/s
水面勾配 $l_i$	1/98	1/87
平均水深 $R_i$	1.791m	2.124m
代表粒径 $d$	78.3 mm	78.3 mm
推定水深	1.999m(平均 21 cm低下)	2.292m(平均 17cm低下)
流量	低下なし=381m <sup>3</sup> /s ⇒ 417m <sup>3</sup> /s (+36m <sup>3</sup> /s=9.6%)	
	上流 3 地点での観測流量=414m <sup>3</sup> /s (誤差 3m <sup>3</sup> /s)	

### (3) 課題

以上の観測結果より、以下の課題を有していると考えられる。

本観測では、ペイント法を用いて河床変動が起きているか把握しているが、河床低下分を考慮した通水断面に流速を乗じて流量を算出する必要がある。

河床低下量は実測が困難であるため、現状では洪水前後の断面比較、地中レーダー探査、砂面計による計測等が行われているが、粒径の条件横断方向の区分、小規模河床波の形成時間等問題点や留意事項を踏まえた上で河床位方程式を適用できれば、流量算定が容易となる。但し、それには河床位方程式で算出された河床低下量の妥当性確認が必要であり、妥当性確認には、1)河床高の時間変化を確認する、2)河床低下の生じない地点で観測した流量と比較する、の 2 つが考えられる。

1) は水位計付きリング法、GPS 付き洗掘マーカーを用いた手法により確認できると考えられる。2)は姫川上

流3箇所を対象に比較検討を行っているが、規模の異なる洪水で同等の検討を積み重ね、その上で河床位方程式の妥当性を評価する必要がある他に、流量の精度を高めるために他の河床変動を考慮する必要が無い観測地点を今後、検討・検証を行う必要がある。

## 7. まとめ

急流河川姫川は出水時河床変動が起きるため、一定の精度で流量を把握することが難しいため、出水時においては、一定の精度を保てる観測手法が求められている。

水面勾配を求めるフィールドビューアの代替案として Li-DAR センサーの活用検討を行った。その結果より姫川よりも濁度が高い保倉川でも水面の点群データを取得出来たため山本観測所でも適応出来ると考えられる。

河床位方程式を用いて、フィールドビューアとトレイルカメラ、非接触型計器(電波式流速計)、ペイント法を用いて、求めた水面勾配により、流量を算出し、得られた結果を比較解析した。上記の観測値により、算出した。結果、河床変動が起こらない上流 3 箇所の流量と 3m<sup>3</sup>/s の誤差で流量を算出することが出来た。

本稿では、出水時に河床低下が発生するため、高精度な観測に課題がある姫川で流量観測の精度向上のため複数の手法を用いて比較検証を行い、精度向上に資する方向性を示したものである。

今後は、河床位方程式の妥当性確認のために河床高の時間変化を確認と河床低下の生じない地点で観測した流量と比較検証が必要である。また、今回と違う出水時の観測データによる河床位方程式の河床高の算出データ比較が必要であると考えられる。姫川の流量観測の精度向上のため、今後も検証・検討を進める。

### 参考文献

- 1) 国土交通省北陸地方整備局：姫川水系河川整備計画
- 2) 工藤俊，萬矢敦啓，小関博司，苗田俊治，中津川誠：洪水時の河床変動を考慮した流量の推定，土木学会論文集 G (環境)，Vol. 72, No. 5, I\_305-I\_311, 2016