

洪水中の河床変動を考慮した流量の推定

工藤俊¹・萬矢敦啓¹・小関博司²・笛田俊治¹・中津川誠³

¹正会員 土木研究所 水工研究グループ水文チーム (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

E-mail: s-kudou@pwri.go.jp

²正会員 土木研究所 ICHARM (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

³正会員 室蘭工業大学大学院 工学研究科 (〒050-8585 北海道室蘭市水元町27-1)

本研究は急流河川で土砂移動が活発な姫川を対象とし、洪水中の流水抵抗変化を予測して河床高を推定し、それを用いて流量を推定する手法を検討する。姫川の基準点では過去に、観測水位から変換する流量と水文モデルで計算する流量が乖離する例がある。このうち、観測水位から流量に変換する上で誤差が生じる要因は洪水中の流水抵抗の変化や河床変動が挙げられ、土砂移動が活発な姫川ではこれらを考慮することが特に重要である。本研究では、ADCP等を用いた観測結果から洪水中の流水抵抗を分析した上で、表面流速や水位等の水表面から得られる情報から流水抵抗変化を予測しながら河床高及び流量を推定した。その結果、推定河床高からの流量はADCP観測の河床高からの流量を良好に再現し、横断観測結果から固定床を仮定し算出される流量よりも大きくなった。

Key Words : river bed fluctuation, hydraulic resistance, roughness change, discharge observation

1. はじめに

水位から流量を得るためには一般的にH-Q式が広く用いられる。H-Q式は水位と流量の近似曲線を作成する簡便な方法であり、水位の連続データから容易に流量の連続データを得ることが可能であるため、流量データの蓄積を通して河川管理、ひいては安全・安心な社会の形成に大きく貢献してきた。しかしながら、簡便な手法である故に、H-Q式から換算する流量と観測流量に乖離が生じる場合にその物理的な説明が困難であることや、特に既往最大クラスの出水でH-Q式を外挿して流量を推定する場合はその値の妥当性の精査に大きな労力を伴う。大規模出水時に換算流量と観測流量に乖離が生じる要因としては、掃流力やフルード数といった水理量に関わる流水抵抗変化や河床変動などが挙げられる。

洪水中に流水抵抗が変化する要因の一つとしては小規模河床波の発達及び消失が挙げられる。小規模河床波と流水抵抗の関係についてはこれまで主に以下の研究が進められてきた。Simons et al.¹⁾は計測データから各河床形態とフルード数、摩擦損失係数などの水理量の関係を議論している。Engelund²⁾は無次元掃流力(以下、 τ_*)と無次元有効掃流力(以下、 τ_*')の間には一義的な関係があるとして $\tau_* - \tau_*'$ 関係を定式化した。岸・黒木³⁾はEngelundの研究を踏まえた上で、 $\tau_* - \tau_*'$ 関係の説明

変数として相対水深(R/d)を導入して各河床形態における $\tau_* - \tau_*'$ 関係式を提案した。また、山本⁴⁾は流速係数と無次元掃流力と相対水深の関係図を示しており、実験資料のない領域についても河床形態ごとに関係を推定していることが特徴的である。一方、河床波の変化を理論的に解析した研究としては、例えば、山口ら⁵⁾、泉ら⁶⁾は線形及び弱非線形安定解析を行い、 $\tau_* - \tau_*'$ 関係の二価性の理論的説明を行っている。また、実河川を対象とした研究としては、昭和56年8月に石狩川で発生した洪水において河床波を観測・分析した研究があり^{7,8,9)}、他にも、工藤らによる、洪水中の浮子観測結果と岸・黒木が提案した $\tau_* - \tau_*'$ 関係を用いて水位-流量関係を検討した例¹⁰⁾、メコン川を対象として $\tau_* - \tau_*'$ 関係の分析を踏まえて流水抵抗変化を考慮しながら流量を推定した例¹¹⁾がある。さらに、柿沼ら¹²⁾、Koseki et al.¹³⁾などによる十勝川の千代田実験水路における実験的研究も実施されている。

本研究で対象とする姫川は下流部でも河床勾配が約1/110¹⁴⁾であり日本屈指の急流河川である。また、流域のいたるところに崩壊地や地すべり地が分布¹⁴⁾しており土砂生産・移動が活発である。このような条件の河川では土砂移動に起因する小規模河床波の形状変化及び河床高変化も活発と考えられるため、土砂水理学の知見を踏まえてこれらを分析することは特に重要である。実際に姫川では、観測水位から換算した流量と流出モデルで算出した流量の間に乖離が存在する。主要洪水の一つである

平成7年7月の洪水では基準点の山本地点で、水位標の目視による観測水位から換算したピーク流量は $2,840 \text{ m}^3/\text{s}$ であるのに対し、貯留関数法を用いて算出したピーク流量は約 $4,400 \text{ m}^3/\text{s}$ となっている¹⁴⁾。一般的に換算流量と計算流量が乖離する場合は、水文モデルの特に設定パラメータを入念に精査することが多いが、上述した姫川の特徴を鑑みると換算流量に含まれる誤差も無視できないと推察される。これについて、河川整備基本方針¹⁴⁾では、姫川の他の地点における推定流量との比較から、ピーク付近で流量が不自然に低下することと、ピーク観測水位と痕跡水位に乖離が見られることから、 $2,840 \text{ m}^3/\text{s}$ よりも大きな流量値の可能性があると及言されている。上記は水位観測の誤差も含んだ例と考えられるものの、後述するように洪水前後では河床高が大きく変化し、洪水中はその前後よりもさらに河床高が低下する観測例が存在する。よって、洪水ピーク時に正確な流量値を得るためには、時々刻々と変化する河床高を把握しながら流量を推定することが重要と考えられる。

また、近年はacoustic Doppler current profiler (ADCP)を始めとする観測機器の発達¹⁵⁾により水中の様々な情報を計測できるようになり、高流速、高濁度条件及び大きな河床変動を伴う洪水での観測の成功事例も増えている¹⁶⁾。しかしながら今回の観測では、後述するように流況が激しく、ADCP観測を実施できない期間も存在した。このような条件において、水位計や非接触型流速計などから得られる水位や表面流速など、水表面の情報を用いて流量値を算定することは河川管理上極めて重要な課題であり、姫川のような河床変動が活発な河川でもこれを予測しながら流量を推定することが求められる。そこで本研究では、最初にADCPなどから得られた洪水中の河床高変化も含めたデータを用いて $\tau_* - \tau_*'$ 関係の分析を行う。その上で、分析結果と、表面流速などの水表面の情報を用いてADCP観測が実施できなかった期間も含めた河床高・流量推定を行う。

2. 山本地点における観測データ

姫川の基準点である山本地点は新潟県糸魚川市に位置する。図-1は山本地点周辺を表す。図に示す通り、水管橋から下流に向けて観測測線を設けた。当該地点で平成25年8月23日、9月16日、10月16日に実施された洪水観測結果を用いる。また、8月9日、9月20日、11月22日に計3回の横断測量を実施し、各洪水前後の断面形を得ている。図-2は観測測線の横断測量結果を示すものであり、8月～11月に最大2m程度の河床変動が発生したことがわかる。また、8月9日に比べて9月20日と11月22日は右岸側が大きく洗掘していることが特徴的である。なお、図中に三角形で示される点 (Sec1～Sec8) は観測で使用した電波式流速計の横断方向の設置位置を意味し、鉛直の直線は各流速計の測線区分を分割するものである。洪水中に観測測線上でADCPを曳航させて水深を計測するとともに、測線上のSec1～Sec8で電波式流速計を用いた表面流速の計測及び巻尺を用いた水面高の計測を実施した。いずれの計測も水管橋の欄干の内側から手を伸ばし実施できるものであり、観測のための足場等は設置していな

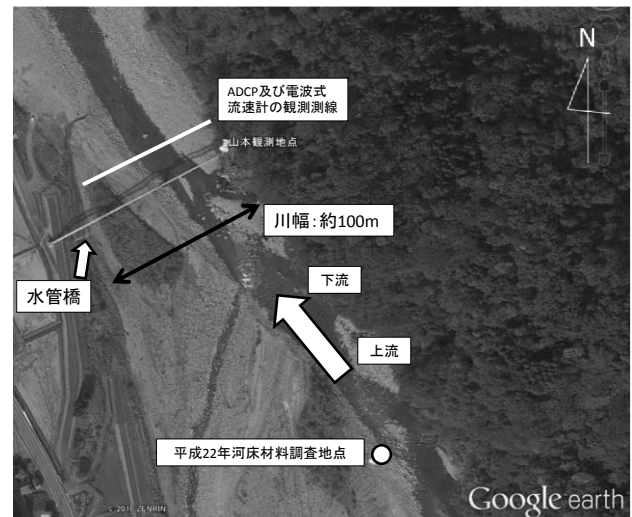


図-1 山本地点周辺

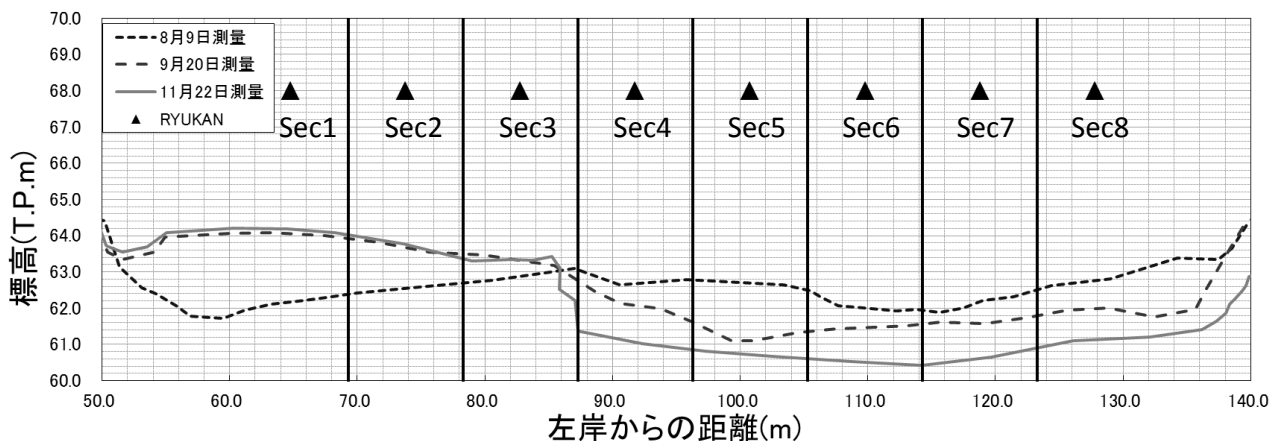


図-2 観測測線の横断測量結果

い。なお、ADCPはWorkhorse ADCP (1200 kHz)を用い、電波式流速計はRYUKANを用いた。また、左岸側にビデオカメラを設置して画面内に標定点を設置した上で、観測中に撮影を実施した。測線上の横断観測は一時間ごとに実施することを基本としているが、現場での安全性を最優先として観測のタイミングを判断するため、必ずしも等しい時間間隔ではない。ADCP、電波式流速計、巻尺それぞれから得られたデータについて、詳細とデータ処理を以下に示す。

- 1) ADCP観測について、観測中に高濁度や気泡に起因すると見られる河床高計測の困難が生じた。具体的には、データ処理ソフトのアルゴリズムでは河床高を認識できない区間が多く存在した。また、高流速による水面の振動によるGPSの不具合などの課題が生じた。後者について、ADCPはそれ自身と流水の相対速度を計測するため、ADCPの座標を取得してその移動を把握することが流速計測において重要である。GPSが使用できない場合は、ADCPには河床面との相対位置を計測するボトムトラック機能があるため、河床面が移動しない条件では流速計測を良好に実施できる。しかしながら、洪水中の姫川のように河床面が移動する場合は流速計測に対する影響が大きい。なお、前者に対してYorozuya et al.¹⁶⁾は後方散乱の鉛直プロファイルから河床高を推定した。そのため、本研究ではADCP観測による流速は用いず、Yorozuya et al.¹⁶⁾の手法で推定された河床高をADCP観測河床高として用いる。
- 2) 電波式流速計の観測について、各セクションにおいて、1秒毎に得られるデータを1分程度取得し、明らかな異常値を取り除いた上で算術平均して表面流速を得る。また、気象庁が公開するアメダスのデータから、糸魚川地点の風向・風速データを用いて、本永ら¹⁷⁾の手法を適用して風が表面流に及ぼす影響を除去する。なお、糸魚川地点は姫川下流部の糸魚川市の市街地に位置し、山本地点と糸魚川地点の距離は約6 kmである。さらに、流速補正係数を乗じることで平均流速を得る。流速補正係数について、Yorozuya et al.¹⁸⁾は洪水中の河床波を観測したデータを用いて検討し、河床波が発達する場合は流速補正係数が0.7から1.1程度で変動することを示した。今回のADCP観測で得られたデータから流速補正係数を算出した結果も、上記とほぼ同様の変動幅であった。この変動による平均流速への影響も存在すると考えられるが、本研究の目的を鑑みると、水表面の情報からこれを予測する必要がある。今後これを実現するための検討を進める必要があるが、今回は一般的に用いられる0.85を使用して平均流速を得た。
- 3) 巻尺を用いた水面高観測について、基本的にはこれで計測された水面高を当該セクションの水位としている。山本地点では、洪水中は水位が横断的にも大きく変化するため、セクション毎の水位を計測することが重要となるが、流況が激しく危険を伴う場合は巻尺を用いた計測は実施できない。この場合は山本水位観測所の観測水位を代用した。

次章以降で記述する流水抵抗の分析及び河床高の推定には、上記データの他に勾配及び河床材料の粒径が必要となる。水面勾配の計測を目的に、観測測線の上下流それぞれに複数の簡易水位計を設置したものの、洪水中に流出して下流側の水位計のデータしか得られなかった。測線から離れた局所的な水面勾配となるため、今回はこのデータは使用せず、一般的に姫川下流域の河床勾配とされる1/110¹⁹⁾を用いることとした。また、粒径については、観測測線よりも約300 m上流で平成22年に実施された河床材料調査結果を用いて設定する。具体的には、当該地点で3層に分けて河床材料収集及び通過質量百分率の分析が行われたが、これを統合し全層の d_{50} 求め、 $d_{50} = 60$ mmを用いる。

3. 流水抵抗の分析

前章で説明した観測データを用いて洪水中の流水抵抗の分析を行う。本研究では $\tau_* - \tau_*'$ 関係に着目した分析を行うが、 τ_* と τ_*' の間には以下の関係がある。

$$\tau_* = \tau_*' + \tau_*'' \quad (1)$$

ここで、 τ_*'' は無次元掃流力のうち形状抵抗分である。

(1)式は、 τ_* は τ_*' と τ_*'' の重ね合せであることを仮定しており、小規模河床波が発達して形状抵抗が増加すると、 τ_*'' が増加して τ_* における τ_*' が占める割合が減少する関係にある。 τ_*'' を直接算出するためには小規模河床波の波高及び波長を得る必要がある一方で、 $\tau_* - \tau_*'$ 関係を分析することで小規模河床波を直接計測せずに流水抵抗を調べることができる。ここで、 τ_* と τ_*' は以下の通りである。

$$\tau_* = \frac{RI}{sd} \quad (2)$$

$$\tau_*' = \frac{R'I}{sd} \quad (3)$$

ここで、 R は径深のことであり、本研究では近似的に水深として扱う。 I は勾配であり本研究では1/110を用いる。 d は粒径であり本研究では60 mmを用いる。 s は河床材料の水中比重のことで1.65を用いる。 R' は平坦河床見合いの径深のことで、以下の式に示す通り流速に關係する水理量である。

$$\frac{U}{\sqrt{gR'I}} = 6.0 + 2.5 \ln \frac{R'}{k_s} \quad (4)$$

ここで、 U は平均流速、 k_s は相当粗度高さである。 k_s は粒径の数倍(md)とされ、 m は様々な値が報告されているが、今回は後述する $\tau_* - \tau_*'$ 関係で観測データと岸・黒木が提案した関係が良く適合する値である4.0を用いる。

図-3は $\tau_* - \tau_*'$ 関係の分析結果を示すものである。菱形のプロットはADCP観測データから得られた水深と電波式流速計から得られた流速を用いて算出されたものであり、8月23日、9月16日、10月16日の中でADCP観測が

可能であった時の観測データを用いた。 τ_* は(2)式から求め、 τ_*' は(4)式からニュートン法により算出した R' を(3)式に代入して求めた。3出水で、今回使用したデータを得た全観測回数のうち、ADCP観測が実施できた回数としては、8月23日は9回中5回、9月16日は10回中3回、10月16日は12回中6回である。ピークの流況が特に激しくなった9月16日は比較的割合が少なく、他の2出水においては全体の約半数でADCP観測も実施できた状況である。また、図中の実線は岸・黒木が提案した $\tau_* - \tau_*'$ 関係であるが、同関係は相対水深(R/d)によって変化する。ここでは、今回使用した観測水深を算術平均したものを粒径60 mmで除した値(R/d=43)を用いた時の関係を示している。なお、白抜き丸は、各時刻の水深及び τ_*' を岸・黒木の提案式に代入し算出した τ_* を用いてプロットしたものである。これと実線と比較することで、平均水深で描いた実線と各時刻の水深を採用する場合でどれほど乖離があるか確認できる。また、図中には各実線に対応する河床形態を記す。Dune II及びAntiduneにおいて実線と破線の直線が特に離れる。破線の直線は $\tau_* = \tau_*'$ を表し、これは $\tau_*'' = 0$ 、すなわち形状抵抗が無いことを示す。従って、これから離れるDune II及び

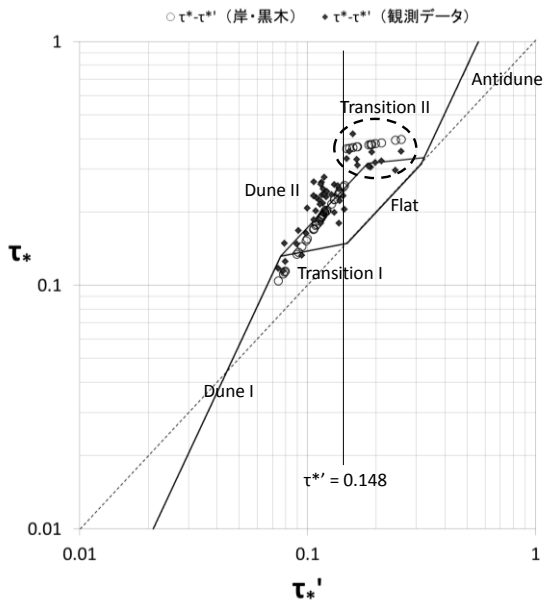


図-3 $\tau_* - \tau_*'$ 関係の分析結果
(図中の実線は岸・黒木が提案した $\tau_* - \tau_*'$ 関係であり、使用した全データの平均のR/dを用いて描いたものである。)

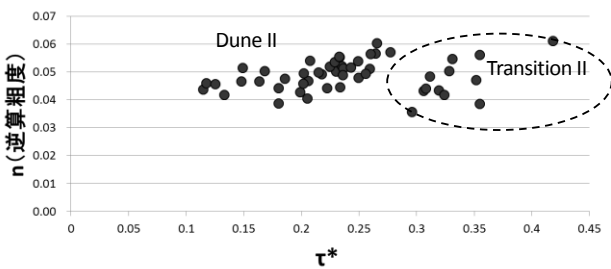


図-4 τ_* と逆算粗度の関係

Antiduneでは、形状抵抗の全抵抗への寄与が特に大きいことを意味する。

菱形のプロットと、実線及び白抜き丸の比較により、観測データはDune II及びTransition IIに沿って分布することがわかる。 τ_* が0.3から0.4の間では、観測データが水平に並んでおり、これは遷移河床の特徴である。そのため、Transition IIに相当すると判断し、この集団を丸い破線で示した。一方、Dune II付近に分布する観測データは τ_* と τ_*' が比例関係にある。観測データがDune II及びTransition IIに沿って分布することから、今回の観測データの中で τ_* が比較的小さい範囲では砂堆が安定的に発達するものの、さらに τ_* が大きくなることで遷移領域に入り砂堆が消失し始めることが推察される。

図-4は τ_* と逆算粗度の関係を示したものである。逆算粗度はマンニングの平均流速公式に、流速、水深及び勾配を入力して逆算したものである。丸い破線で囲われたプロットが、図-3において同様に破線で囲われたプロットに対応する。粗度の値に着目すると、破線で囲われていないDune IIに対応する集団は τ_* の上昇とともに、逆算粗度も最大0.06程度まで上昇する。これは図-3において、観測データが τ_* の上昇とともに、破線の直線から離れること、すなわち形状抵抗の全抵抗への寄与が増大することに対応する。その一方で、破線で囲われたTransition IIに対応する集団では逆算粗度が最小で0.035程度まで低下し、これは図-3において観測データが水平に並び、破線の直線に近づくことに対応する。以上より、今回の観測結果では、洪水中には流水抵抗が大きく変化し、その変化は岸・黒木が提案した $\tau_* - \tau_*'$ 関係に従うことが示された。

4. 河床高変化を考慮した流量推定

(1) 河床高推定手法の検証

前章での分析を踏まえて、岸・黒木が提案した $\tau_* - \tau_*'$ 関係を用いて流水抵抗を考慮しながら河床高及び流量を予測する。岸・黒木はDune IIの $\tau_* - \tau_*'$ 関係式を以下のように定式化した。

$$\tau_*' = 1.49 \left(\frac{R}{d} \right)^{-1/4} \tau_* \quad (5)$$

また、Transition IIについては関係式が提案されていないが、反砂堆が発生し始める τ_* の値は以下の式のように提案されている。

$$\tau_* = 0.07 \left(\frac{R}{d} \right)^{2/5} \quad (6)$$

これはDune IIからAntiduneへ遷移する時の τ_* を意味するため、本研究ではTransition IIの時の τ_* として使用する。上式を用いて河床高を推定する手順を図-5に示す(以下、本手法)。ここで、Dune IIの場合は(5)式と

(2)式から R を算出し、Transition II の場合は(6)式と(2)式から R を算出するため、どちらの河床形態を適用するか判別する必要がある。今回は、入力する変数は τ_*' に関わる流速、出力は τ_* に関わる R であるため、 τ_*' の値に閾値を設けて判別する。今回の観測データは、図-3 に示される通り、 $\tau_*' = 0.148$ を境にして両集団が分布する。よって、今回は岸・黒木が提案した式を用いるものの、河床形態を判別する閾値は観測データに基づいた方が妥当と判断し、 $\tau_*' < 0.148$ であれば Dune II、 $\tau_*' \geq 0.148$ であれば Transition II とした。なお、 τ_*' がおよそ 0.3 を超えるような範囲になる場合には Antidune の領域に入ることが推察されるが、今回使用したデータに関しては、ADCP 観測を実施できなかった期間のデータも含めて $\tau_*' > 0.3$ となるものはなかった。図-6 は、本手法により推定された河床高と、ADCP により観測された河床高を比較するものである。推定河床高は観測河床高を良好に再現することが確認できる。なお、両者の相関係数は 0.88 である。このことから、本手法は適切に河床高を推定できると言える。

(2) 河床高及び流量の推定

図-7は9月16日の水位・推定河床高・流速・粗度係数を時系列で示すものである。ここで、粗度係数は流速、推定水深、勾配からマンニングの平均流速公式を用いて逆算したものである。また、9月16日は流れがSec5,6,7に偏っていたことから、この3つのセクションの平均値を示す。水位と流速の関係に着目すると、14:00以降流速が逡減する期間は水位と流速が比例関係にある。その一方で、14:00以前は水位がピークを過ぎて逡減しているのに対して流速は上昇していることが特徴的である。なお、

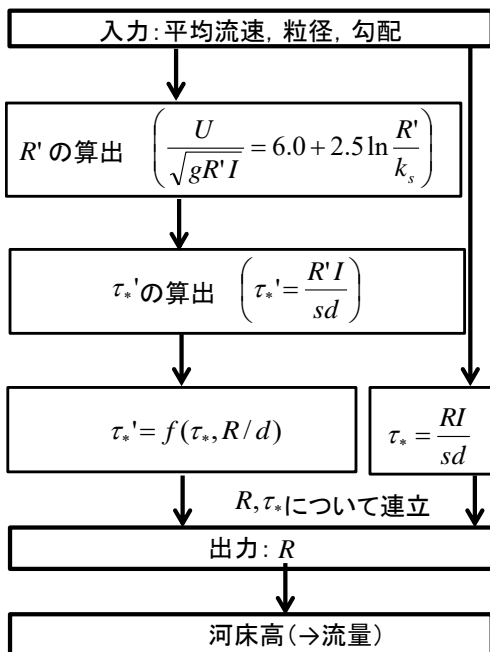


図-5 河床高推定の手順

この間推定河床高も水位と同様に低下しており、水深はほぼ一定である。このように、流水抵抗を予測しながら水深・河床高を推定することで、流速と水深が単純に比例しない場合も考慮した推定を行うのが本手法の特徴である。なお、3つのセクションのうち、流速が最も遅いSec5では、15:00以前のみTransition IIと判定して推定した結果であり、流速が最も早いSec7では、18:50のデータ以外全てTransition IIと判定して推定した結果である。粗度係数に着目すると、14:00以前は時間とともに減少することが特徴的である。これは、Sec5,6,7全てにおいて河床形態をTransition IIと判定して計算した結果、すなわち、流速の増加を流水抵抗の減少に起因すると予測した結果である。粗度係数の値に着目すると、最小で0.04程度まで低下する。

図-8は河床高の推定結果を時系列で示すものである。図-7と同様に、9月16日のSec5,6,7の平均値を表す。推定河床高が存在するがADCP観測河床高が存在しない時間は、電波式流速計を用いた流速計測は実施したものの、流況が激しくADCP観測による水深の計測が実施できなかった時間である。また、洪水前(8月9日)と洪水後(9月20日)の横断測量から得られる河床高をそれぞれ破線で示す。まず、ADCP観測河床高と推定河床高を比較すると、両者は良好に一致することが確認できる。その上で洪水前後の横断測量結果と比較すると、観測河床高、推定河床高ともに横断測量結果の河床高よりも低い値で推移することがわかる。これは洪水時の河床洗掘を表しており、洪水時は河積が大きくなることを意味する。また、今回の観測でADCP観測により河床高を得ることができたのは20:00頃~21:00頃にかけての3回のみで、水位がかなり逡減してからである。今回用いる既往の $\tau_* - \tau_*'$ 関係はADCP観測水深を用いて検証されているが、水位が高く流況が激しい場合はADCP観測水深で検証されていない範囲の $\tau_* - \tau_*'$ 関係を適用することになる。すなわち、 $\tau_* - \tau_*'$ 関係を外挿することになる。そ

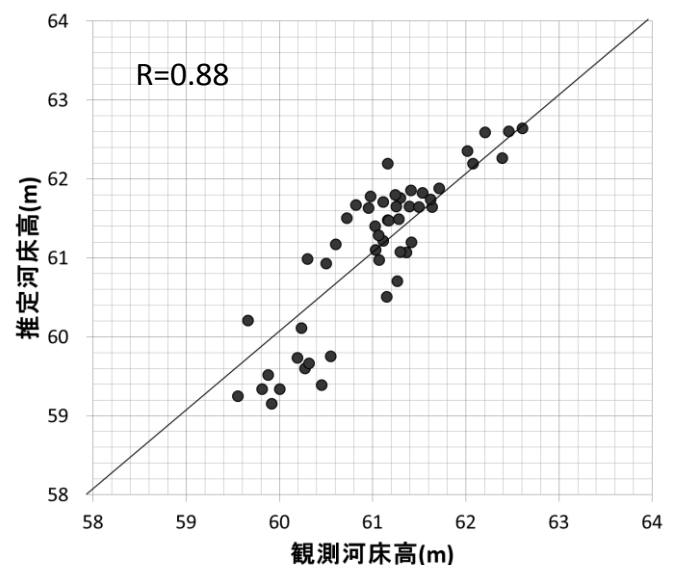


図-6 観測河床高と推定河床高の比較

のため、水表面情報を活用した別の手法で水深を推定し、本手法の妥当性を検証することが望ましい。水表面の情報から水深を推定する方法として、定在波が発生した場合には、山田ら¹⁹⁾が示した以下の式を適用できる。

$$Fr^2 = \frac{1}{k_0 h} \tanh(k_0 h) \quad (7)$$

ここで、 Fr はフルード数(U/\sqrt{gh})、 k_0 は $2\pi/L_0$ で、 L_0 は定在波の波長を表す。

上式における変数は平均流速、水深、定在波の波長の3つであるため、平均流速と定在波の波長を得ることで水深を推定できる。今回の観測中に実施したビデオ撮影の中で、定在波の発生が確認された画像を用いて定在波

の波長を得た。なお、画像から定在波の波長を得るためには標定点の座標を用いた。定在波の波長と、その時間に観測された表面流速から得た平均流速を用いて水深を算出し、水位との関係から河床高を推定した結果を図-8に菱形で示した。これと推定河床高と比較すると、洗掘、堆積傾向が良好に一致することが確認できる。この手法を用いることで、ADCP観測を実施できない期間でも、定在波が発生するセクションの水深を算出して河床高を推定し、本手法を検証できる。なお、設置型河床高計測器を設置しておくことも考えられるが、コストを勘案すると当然ながら全てのセクションに設置することは現実的ではない。そのため、ある一つのセクションに設置しておき、 $\tau_* - \tau_*'$ 関係を用いた手法の検証のみに用いる

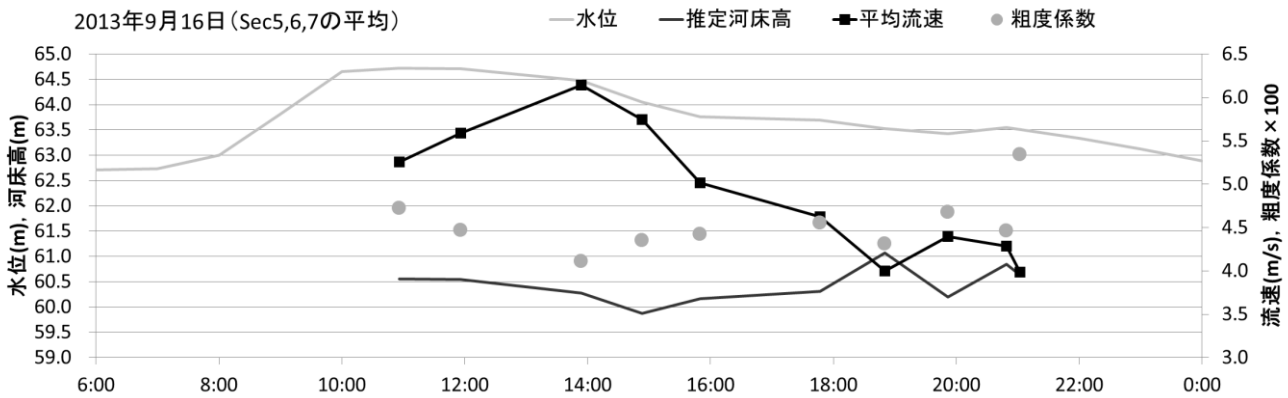


図-7 水位・推定河床高・流速・粗度係数の時系列変化

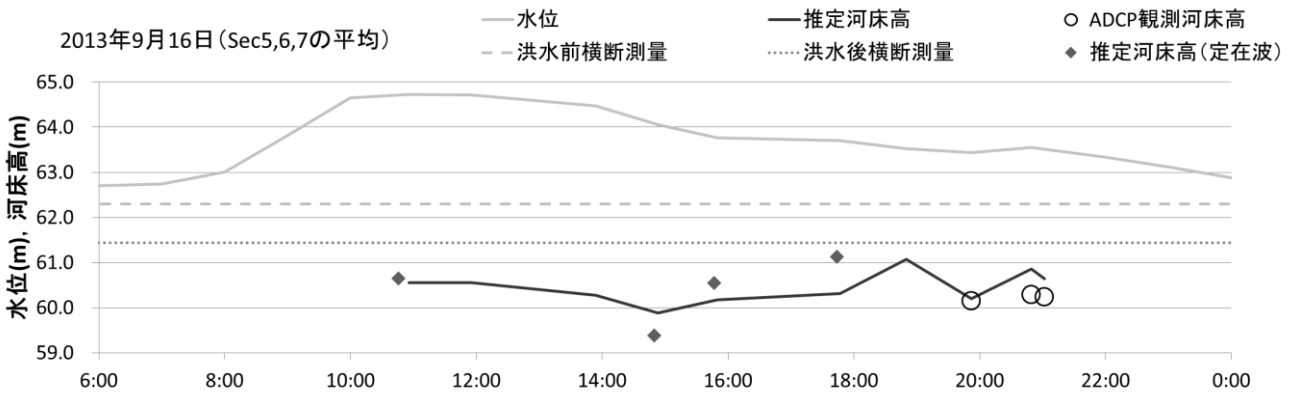


図-8 河床高の時系列変化

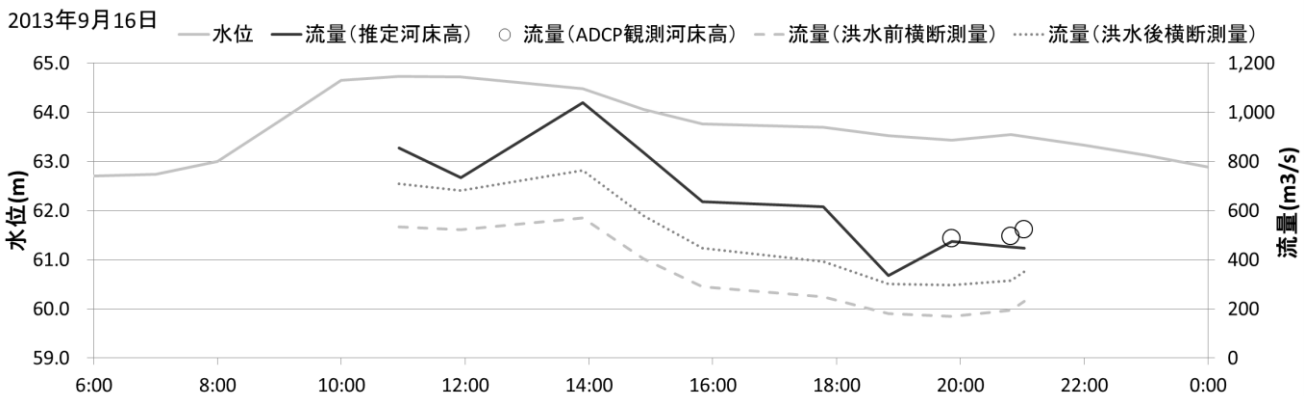


図-9 流量の時系列変化

ことが考えられる。このように、ADCP観測が実施できない状況下でも本手法の妥当性が検証できれば、それを全断面に適用し、断面の流量を得ることができる。

図-9は流量の時系列変化を表す。流量の算出方法は、セクション毎に電波式流速計で計測した表面流速から得た平均流速に、推定水深及び区分幅を乗じた上でそれらを合計して断面全体の流量としたものである。また、図中の4種類の流量は、括弧内に記されるそれぞれの河床高から算出されたものである。ADCP観測河床高からの流量と推定河床高からの流量を比較すると、両者は良好に一致し、それは横断観測結果からの流量よりも大きいことが分かる。このことは、図-8で示した各河床高の比較から想定される通りの結果であり、洪水時の河床洗掘を考慮することで流量が大きくなる結果となった。特に、いずれの流量も14:00頃にピークが出現するが、推定河床高からのピーク流量(=約1,000 m³/s)は、洪水後横断測量からのピーク流量(=約800 m³/s)の約1.3倍、洪水前横断測量からのピーク流量(=約600 m³/s)の約1.7倍となる。このことは、河床変動が流量推定に与える影響は極めて大きいことを示し、流況が激しくADCP観測が実施できない状況においても、本研究で提案したように水表面から得られる情報に基づき河床高を推定して上で流量を推定することが望ましいことを強く示唆する。

5. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 日本屈指の急流河川である姫川の山本地点で洪水中に実施された観測結果を用いて流水抵抗の分析を行った結果、今回の観測データは岸・黒木が提案した $\tau_* - \tau_*'$ 関係と整合した。その上で同関係を用いて河床高を推定した結果、ADCP観測による河床高を良く再現した。
- 2) 流況が激しくADCP観測ができなかった期間も含めて、電波式流速計で計測した表面流速から得た平均流速を用いて河床高を推定した結果、洪水時に河床が洗掘し、洪水前後の横断測量結果と比較して流積が大きくなる結果を得た。また、本手法のみならず、定在波の理論を用いて水深を推定した結果、両者の洗掘、堆積傾向が良好に一致した。
- 3) 推定河床高を反映させて流量を推定した結果、固定床を仮定した場合よりも流量が大きくなり、洪水時の河床変動が流量推定に与える影響の大きさが定量的に示された。

本研究では洪水中に安全かつ、より正確な流量を観測することを主眼として水表面情報から河床高を推定しながら流量を推定する手法を検討した。今回は姫川を対象とした検討を行ったが、より汎用的な手法とするため、他の河川における検討も推進し、より安全でより正確な洪水流量観測の実現に貢献したい。

謝辞：本研究を実施するにあたり、国土交通省北陸地方整備局高田河川国道事務所から貴重なデータを提供して

頂いた。また、本研究は科学研究費補助金基盤研究A(課題名：可能最大洪水に対応できる数理科学的な河川計画手法の確立、課題番号：26249072、研究代表者：山田 正)の助成を受け実施したものである。なお、日本でも有数の急流河川である姫川において困難な観測状況にも関わらずADCP観測を実施できたのは、(株)水文環境の井上氏及び小野氏の努力と情熱の賜物である。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Simons, D. B. and Richardson, E.V.: Forms of bed roughness in alluvial channels, Journal of the Hydraulics Division, Proc. ASCE, Vol. 87, No.3, pp. 87-105, 1961.
- 2) Engelund, F.: Closure to "Hydraulic Resistance of Alluvial Streams," Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 93, No. HY-4, pp. 287-296, 1967.
- 3) 岸力, 黒木幹男: 移動床流れにおける河床形状と流体抵抗 (I), 北海道大学工学部研究報告, pp.1-23, 1972.
- 4) 山本晃一: 構造沖積河川学-その構造特性と動態-, 山海堂, 2004.
- 5) 山口里実, 泉典洋: デューン-平坦床遷移過程にみられる亜臨界分岐現象, 土木学会論文集, No.740/II-64, pp.75-94, 2003.
- 6) 泉典洋, 山口里実: デューン-平坦床遷移再考, 土木学会論文集B, Vol.62 No.4, pp.360-375, 2006.
- 7) 高木譲治, 牧野成雄, 竹本成行, 森田康志: 石狩川下流部における洪水流と河床変動の観測, 第26回水理講演会論文集, pp.57-62, 1982.
- 8) 板倉忠興, 山口甲, 清水康行, 岸力, 黒木幹男: 昭和56年8月洪水における石狩川下流部での河床波観測について, 第30回水理講演会論文集, pp.481-486, 1986.
- 9) 平井康幸, 泉典洋, 伊藤丹: 昭和56年8月石狩川洪水における同時水位観測による河床抵抗の挙動特性の検討, 河川技術論文集, 第20巻, pp.235-240, 2014.
- 10) 工藤俊, 萬矢敦啓, 小関博司, 岩見洋一: 現場のための新しい水位-流量関係の構築に向けた基礎的研究, 河川流量観測の新時代, 第5巻, pp.14-21, 2015.
- 11) S. Kudo, A. Yorozuya, H. Koseki, Y. Iwami and M. Makatsugawa.: Construction of depth-discharge relation for inundation simulation. 21st International Congress on Modeling and Simulation, Gold Coast, Australia: 2137-2143, 2015.
- 12) 柿沼孝治, 井上卓也, 赤堀良介, 武田淳史: 千代田実験水路の移動床抵抗に関する研究, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.69, No.4, I_1087-I_1092, 2013.
- 13) H. Koseki, A. Yorozuya, S. Kudo, Y. Iwami and T. Kitsuda.: Development of a system to measure bed forms and vertical velocity profiles in a river channel, River Flow 2016, Taylor & Francis Group, London, 2016 (in press).

- 14) 国土交通省河川局, 姫川水系河川整備基本方針, 2008
- 15) 萬矢敦啓, 岡田将治, 橋田隆史, 深見和彦: 日本における ADCP を用いた高水流量観測手法, 河川流量観測の新时代, 第2巻, pp.34-41, 2011.
- 16) A. Yorozuya, Y. Motonaga, Y. Iwami, T. Furuyama, and K. Ogiwara: Water Discharge Measurement with aDcp in High Speed Flow with High Sediment Concentration, 9th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering, pp. 21-24, 2014.
- 17) 本永良樹, 萬矢敦啓, 深見和彦: 河床変動及び強風を伴う河川表面流速の特性と風による影響の補正に関する検討, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.69, No.4, I_745-I_750, 2013.
- 18) Yorozuya, A., Fukami, K.: Study about Velocity Index in Actual River during Flooding, Proceeding of Third International Symposium on Shallow Flows, Iowa City, Iowa USA, 2012.
- 19) 山田正, 池内正幸, 堀江良徳: 不規則底面をもつ開水路流れに関する研究, 第28回水理講演会論文集, pp.149-155, 1984.
- 17) 本永良樹, 萬矢敦啓, 深見和彦: 河床変動及び強風を伴 (2016.4.7受付)

ESTIMATION OF DISCHARGE CONSIDERING RIVER BED EVOLUTION DURING FLOODING

Shun KUDO, Atsuhiko YOROZUYA, Hiroshi KOSEKI, Toshiharu FUETA and Makoto NAKATSUGAWA

This study aims to estimate discharge considering river bed evolution during flooding with calculation of hydraulic resistance in the Hime river. The river is a flashy river and has active sediment movement. An observation site of the river has a problem that discharges converted from water level and calculated by hydrological model differ. It is considered that the both have error, and the error of the former is caused by changes of hydraulic resistance and river bed elevation. Hence these changes need to be taken into account to estimate discharge accurately in the river. First, analysis of hydraulic resistance with observed data by equipment such as ADCP is conducted, then river bed elevation and discharge are estimated using the analysis result of hydraulic resistance and hydrological quantities over water surface such as water level and water surface velocity. As a result, discharge calculated with estimated river bed elevation reproduces the one calculated with river bed elevation observed by ADCP, and shows higher values than discharge assuming fixed river bed elevation.