

江の川三川合流部における詳細な水位観測に基づく洪水流・河床変動予測モデルの検証と解析精度向上に向けて必要な局所的な河床状況調査

VALIDATION AND IMPROVEMENT OF THE PREDICTION MODEL FOR FLOOD FLOWS AND BED VARIATIONS IN THE GO RIVER CONFLUENCES BASED ON DETAILED OBSERVATIONS OF FLOOD WATER LEVELS AND BED CONDITIONS

竹村吉晴¹・福岡捷二²・濱本賢太郎³

Yoshiharu TAKEMURA, Shoji FUKUOKA and Kentaro HAMAMOTO

¹正会員 工博 中央大学研究開発機構 助教 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27-31214)

²フェロー 工博 Ph.D. 中央大学研究開発機構教授 (同上)

³非会員 国土交通省三次河川国道事務所 (〒728-0011 広島県三次市十日市西6丁目2番1号)

The Go River confluences are composed of three rivers having a comparable drainage area. The prediction model for flood flows and bed variations in the confluences is needed for investigating the flow and bed variation characteristics and estimating flood water storages by the river confluences. This paper validates the prediction model based on the BVC method against water levels observed at 200-400m intervals in the confluence during two large floods of different rainfall patterns. Moreover, the cause of the excessive bed scouring around the flow attacking point of the confluence is explored from observations about local bed profiles and conditions around the flow attacking point by using a radio control boat and unmanned submarine. The changes in local bed conditions around complicated flow areas are considered in order to refine the prediction model for flood flows and bed variations.

Key Words : *flood flows, bed variations, prediction model, river confluence, water level*

1. 序論

江の川は、三次盆地において同程度の流域面積を持つ江の川、馬洗川、西城川が複雑な河道線形で合流する(図-1参照)。戦後最大の洪水であった昭和47年7月洪水では、三川合流部で堤防の決壊や河岸・護岸の崩壊などの甚大な被害が生じた¹⁾。このため、三川合流部での洪水時の流れや河床変動特性について、流域での雨の降り方との関係から十分検討しておく必要がある。また、河川合流部では、合流点での水位のせき上げにより、本・支川河道を流れる洪水の一部が河道内に貯留され、合流点下流を流れる流量を低減する効果がある^{2,3)}。同規模の三川が複雑な河道線形で合流する江の川三川合流部は河積が大きく、合流部での河道貯留効果の定量評価は、河道改修や上流ダム群のゲート操作と関係し、重要な課題となっている。このような背景から、江の川三川合流

部では、精度の高い洪水流・河床変動予測モデルが求められている。

河川合流部では、本・支川洪水流の三次元的な運動量交換により、流れの抵抗特性が変化する。著者らは、水深の浅い河川合流部での流れの三次元構造は、水深スケールの渦運動に規定されると考え、浅水流方程式と渦度方程式を連立し解析する底面流速解析法⁴⁾をベースに江の川三川合流部における洪水流・河床変動予測モデル(以下、本予測モデルと呼ぶ)を構築してきた⁵⁾が、観測データの不足が原因で十分な検討に至っていなかった。

江の川三川合流部では、平成22年度より、図-2に示す位置で水位観測が実施されており、本・支川からの洪水流出特性が大きく異なる平成25年9月洪水と平成26年8月洪水時に水位観測データが得られた。本予測モデルは、合流部における三次元的な運動量交換を考慮できることから、観測水面形の時間変化に基づき、粗度係数などの流れの抵抗を定めることで、各河川からの洪水流出特性



図-1 江の川流域と三川合流部

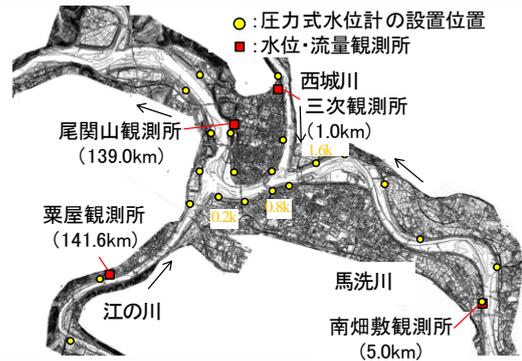
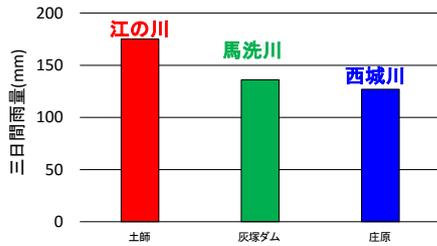
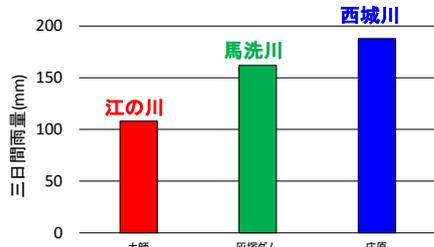


図-2 江の川三川合流部の観測体制



(a)平成25年9月洪水



(b)平成26年8月洪水

図-3 平成25年9月洪水と平成26年8月洪水時の各流域の三日間雨量の比較

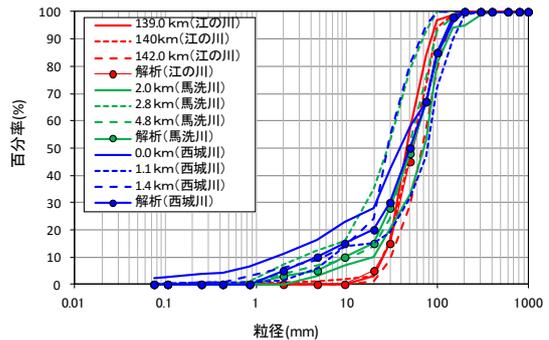


図-4 対象区間における河床粒度分布

によって複雑に変化する三川合流部の流れと河床変動を精度よく予測可能と考えられる⁶⁾。一方で、複雑な洪水流の挙動を示す江の川三川合流部では、古くから水衝部対策、河床対策が実施されてきており、また、河岸に岩が露出する区間も見られることから、河床変動解析においては、河床の状態について留意が必要である。

本研究では、平成25年9月洪水と平成26年8月洪水前後で大きな河床変動が生じていないことから、両洪水の観測水面形の時系列データに基づき、本予測モデルによる水位予測精度を固定床解析から検証する。さらに、観測水面形の時間変化に基づき、洪水流と河床変動を一体的に解析した結果、実測と異なる局所的な水面変化と河床変動が生じた区間において、河床の詳細調査を実施し、その原因を解明することで、局所的に河床状態が変化する江の川三川合流部における洪水流と河床変動の予測精度向上の道筋を示す。

2. 江の川三川合流部の洪水流・河床変動予測モデルの検証と精度向上に向けての現地河床調査

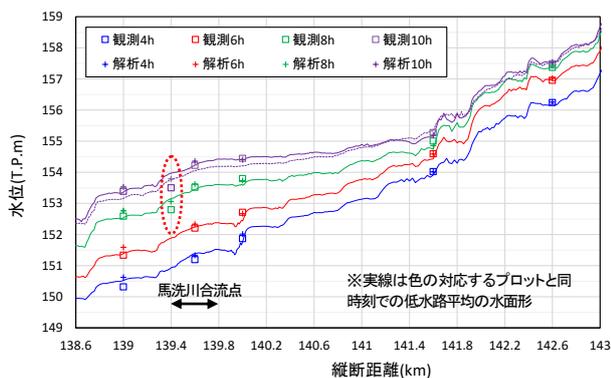
(1) 対象区間・洪水

対象区間は、江の川の142.6km地点から江の川の江の川頭首工(133.0km)、馬洗川の南畑敷観測所(5.0km)から江の川合流点、西城川の三次観測所(1.0km)から馬洗川合流点までの区間である。図-2に江の川三川合流部の水位観測体制を示す。合流部付近では、200~400mの間隔で圧力式水位計が設置されている。図-3は対象とした平成25年9月洪水と平成26年8月洪水時の本・支流域の三日間雨量の比較である。平成25年9月洪水は江の川流域の降雨量が多いのに対し、平成26年8月洪水は西城川流域の降雨量が大きくなっている。

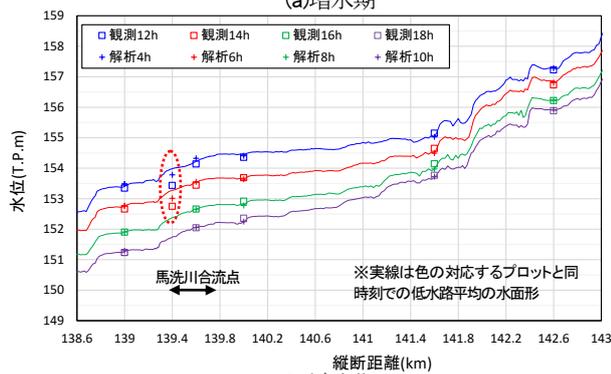
(2) 洪水流・河床変動予測モデルの概要

底面流速解析法⁴⁾では、水深積分の連続式と運動方程式、水深積分渦度方程式、水表面の運動方程式が連立して計算される。水平方向流速の鉛直分布は、三次関数で与えられ、水深積分渦度の輸送と変形に伴う三次元的な運動量の輸送が運動方程式の中で考慮される。著者らは、水深積分渦度の輸送と変形には、水深平均流速の解析精度が重要な点に着目し、図-2に示した江の川三川合流部のような複雑な河道形状を有する場においても、運動方程式の移流項の計算を精度良く行うために、CIP_CSL法を応用した格子非直交成分の運動量フラックスの計算法を底面流速解析法に導入している⁵⁾。

河床変動解析は混合粒径で行い、図-4のプロットで示す粒度分布を各河川において与えている。各粒径の流砂量は、芦田・道上⁷⁾による粒径別の平衡流砂量式から計

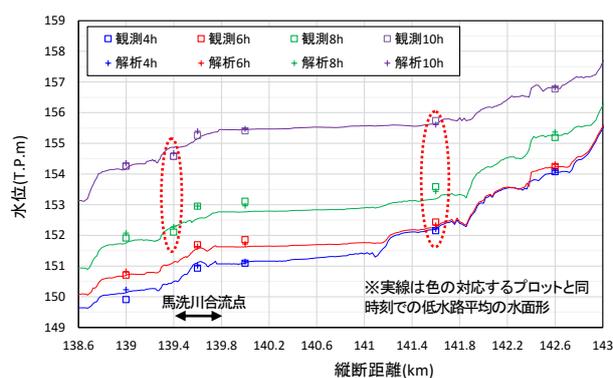


(a)増水期

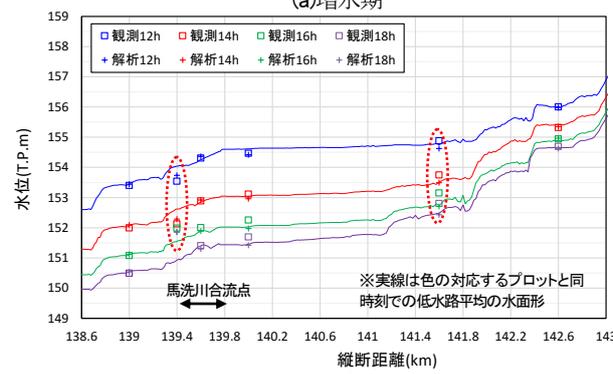


(b)減水期

図-5 江の川の観測水面形と解析水面形の比較
(平成25年9月洪水)



(a)増水期



(b)減水期

図-6 江の川の観測水面形と解析水面形の比較
(平成26年8月洪水)

算し、各粒径の限界掃流力は修正Egiazaroff式⁷⁾よりそれぞれ与える。また、各粒径の存在割合の計算には平野の交換層⁸⁾モデルを採用し、交換層厚は最大粒径の2倍程度として15cmとした。解析に用いる初期河床高は、平成23年の200m間隔の定期横断測量結果を基に作成した。

(3) 解析条件・検証方法

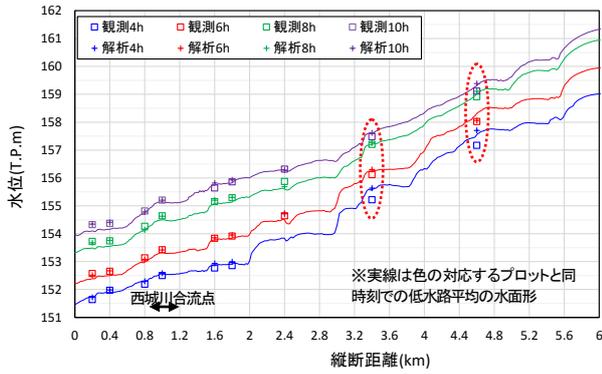
本研究では、任意の洪水外力に対する三川合流部における洪水流と河床変動の予測モデルの構築を目的としている。そのため、下流端の境界条件には観測水位を用いず、図-2に示した尾関山観測所から6km下流に位置する江の川頭首工の天端上で限界水深を与える。上流端の境界条件には、対象区間上流端で観測された水位ハイドログラフを各河川で与え、流れの抵抗は粗度係数と樹木群透過係数で評価する。本研究では、まず平成25年9月洪水の観測水面形の時間変化を再現するように対象区間の粗度係数および樹木群透過係数を決定する。そして、同様の粗度係数と樹木群透過係数を用いて、各河川からの洪水流出特性が平成25年9月洪水と大きく異なる平成26年8月洪水の観測水面形がどの程度再現可能か検討することで、本予測モデルの検証を行う。

(4) 検証結果と考察

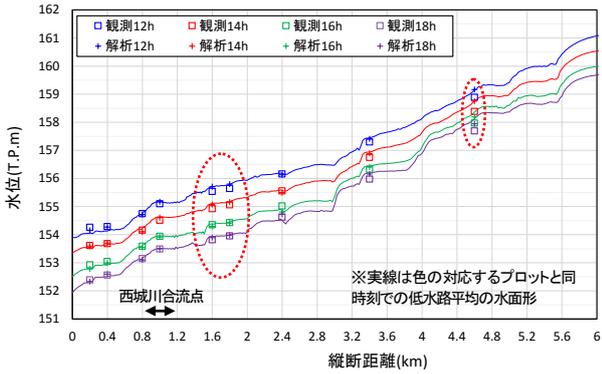
図-5～図-10は、固定床条件での、平成25年9月洪水と平成26年8月洪水時の観測水面形と解析水面形の比較である。図-5～図-10の実線は低水路平均

の解析水面形、□のプロットは観測水位を示す。三川合流部では、複雑な河道線形から横断面内で大きな水位差が生じるため、観測水位の再現性について検証するために、水位計設置地点での解析水位を+のプロットで示している。図-5～図-10において、□と+のプロットで示す水位計設置地点における観測水位と解析水位の差は、各時間で大きさが異なるが、増水期と減水期のそれぞれで両者に平均的に±10cm以上の差がある地点のプロットを赤の点線で囲んでいる。

江の川では、図-5に示す平成25年9月洪水において、139.4km地点を除き観測水位を平均的に±10cm以内で説明できている。これに対し、図-6に示す平成26年8月洪水では、平成25年9月洪水と同じ139.4km地点に加え、減水期の140.0km地点と141.6km地点(栗屋観測所)で、□の観測水位に比べて+の解析水位が低く計算される傾向にある。次に、図-7、図-8に示す馬洗川では、平成25年9月洪水、平成26年8月洪水ともに西城川合流点から江の川合流点(0km地点)までの区間で、+の解析水位は□の観測水位を平均的に±10cm以内でほぼ説明できている。一方、1.6kmより上流区間では、両洪水ともに解析水位と観測水位の差が大きくなっている。1.6kmより上流区間は、図-2に示すように高水敷幅が広く、高水敷には樹木群が多く繁茂している。本研究では、合流点付近に着目してきたことから、この区

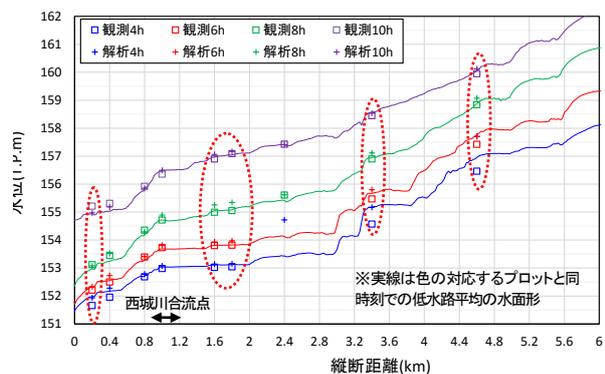


(a)増水期

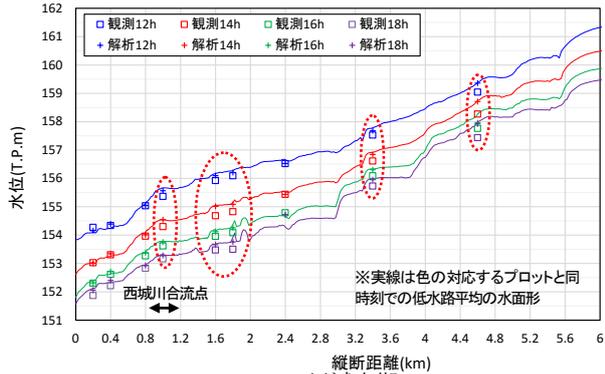


(b)減水期

図-7 馬洗川の観測水面形と解析水面形の比較 (平成25年9月洪水)

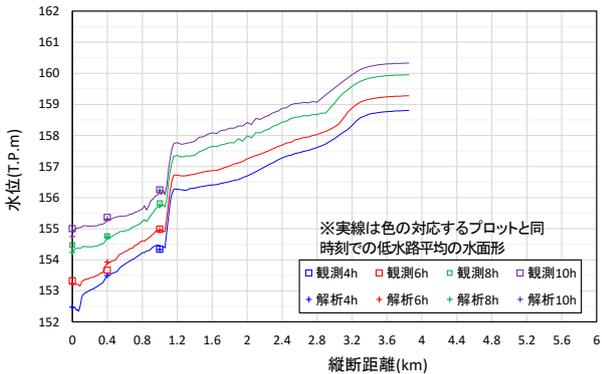


(a)増水期

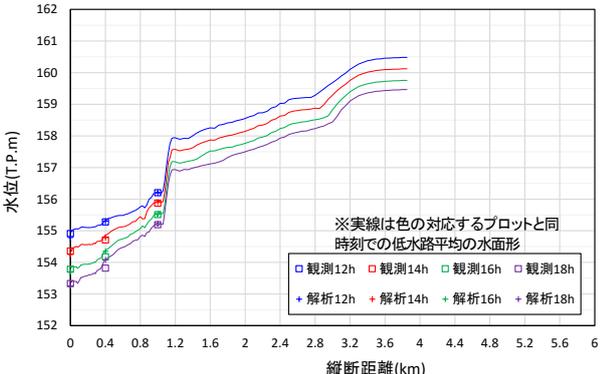


(b)減水期

図-8 馬洗川の観測水面形と解析水面形の比較 (平成26年8月洪水)

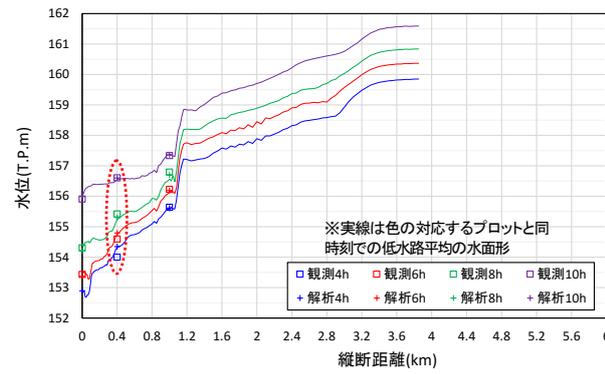


(a)増水期

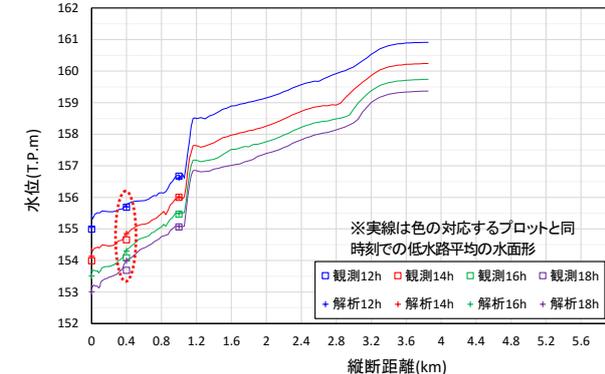


(b)減水期

図-9 西城川の観測水面形と解析水面形の比較 (平成25年9月洪水)



(a)増水期



(b)減水期

図-10 西城川の観測水面形と解析水面形の比較 (平成26年8月洪水)

間の粗度係数や樹木群透過係数については、さらなる検討が必要である。西城川では、図-9のように、平成25年9月洪水では0.4km地点の観測水位を平均的に±10cm以内で説明できているが、図-10に

示すように平成26年8月洪水では観測水位との差が大きくなっている。このように、幾つかの水位観測点では、観測水位の再現性に課題は残るものの、特に合流点付近では、平成25年9月洪水で観測水位

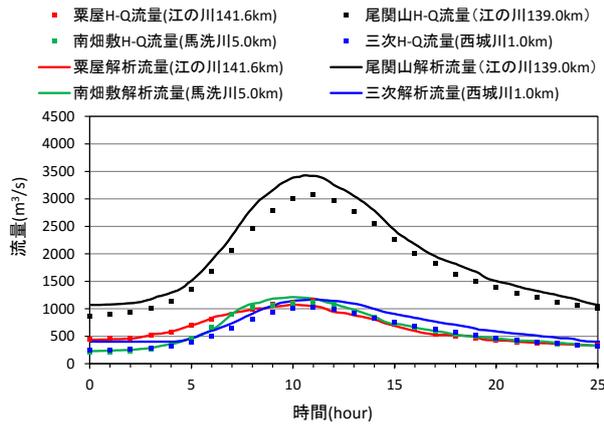


図-11 観測流量ハイドログラフ(H-Q換算値)と解析流量ハイドログラフの比較(平成25年9月洪水)

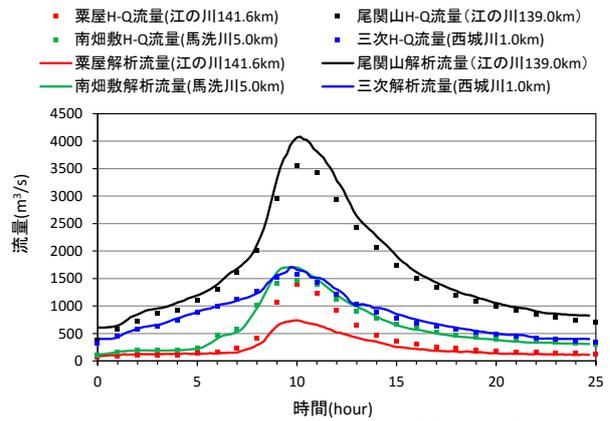


図-12 観測流量ハイドログラフ(H-Q換算値)と解析流量ハイドログラフの比較(平成26年8月洪水)

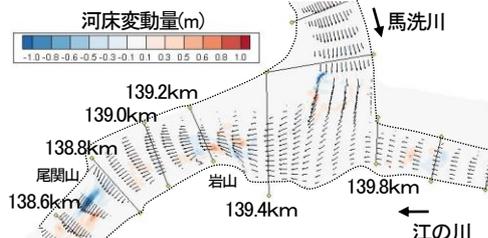


図-13 平成25年9月洪水ピーク後の河床変動コンター図(図-10の15時間に対応)

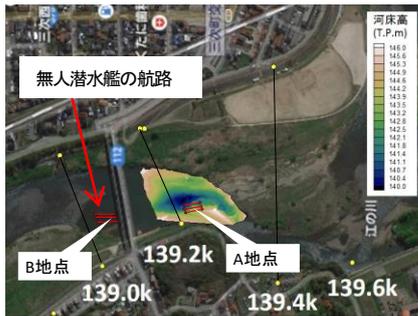


図-14 RCボートによる河床高調査結果と無次元潜水艦の調査測線

を平均的に±10cm以内で再現できた観測点の大部分において、平成26年8月洪水でも平均的に±10cm以内で観測水位を再現できている。

図-11、図-12は、図-2に示した水位・流量観測所における平成25年9月洪水と平成26年8月洪水での観測流量ハイドログラフ(H-Q換算値)と解析流量ハイドログラフの比較である。解析結果は、平成26年8月洪水での粟屋観測所を除けば、観測流量を概ね説明できている。図-5と図-6に示す平成25年9月洪水と平成26年8月洪水での江の川の馬洗川合流点より上流区間の水面形を比較すると、図-6に示す平成26年8月洪水では、図-5の平成25年9月洪水に比べて馬洗川合流点から141.6km地点(粟屋観測所)までの水面形が平らになっている。このため、平成26年8月洪水での粟屋観測所の水位は、馬洗川合流点の背水の影響を受けており、H-Q換算流量は実際よりも流量を過大評価している可能性が高い。

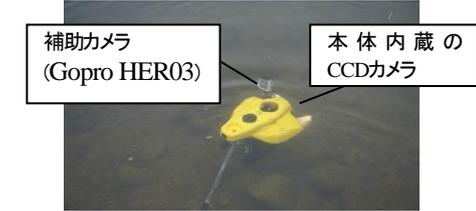


写真-1 無人潜水艦による河床状況撮影の様子



写真-2 A, B地点の河床状況

(5) 予測モデルの精度向上のための現地河床調査

図-5(a)の紫色の点線は、観測水面形の時間変化に基づき、洪水流と河床変動を一体的に解析したときの、平成25年9月洪水におけるピーク付近での低水路平均の解析水面形を示している。特に、馬洗川合流点から下流で観測に比べて水位が低く計算される傾向にある。図-13は、平成25年9月洪水ピーク後の河床変動コンター図(図-11の15時に対応)である。江の川三川合流部では、岩山と尾関山が水衝部となっており、これら両地点において、実測で見られない大きな河床洗堀が生じたことが、解析水位低下の原因と考えられる。この原因を明らかにするために、三次河川国道事務所と共同で水衝部付近の河床高分布や河床状況について調査した。現地調査は平成26年度に実施し、岩山周辺を調査対象とした。河床高分布の調査には高精度GPS・ソナー搭載自律走行無人ボート(RC-S2)を使用した。図-14にRC-S2で得られた岩山周辺の河床高分布を示す。水衝部付近では、200mの横断測線間隔よりも小さい空間スケールで河床高が大きく変化しており、最深部では水深が7mに達する。

河床状況調査には、写真-1に示す無人潜水艦を使用した。本体前面にはCCDカメラが内蔵されている。また、予備として補助カメラ(Gopro HERO3)を本体に取り付け、水中の動画撮影を行った。無人潜水艦は有線(約100m)で

あり、専用のパソコンで水中映像を確認しながら操作する。今回は陸上から調査を行ったため、**図-14**の赤の実線で示す河岸から5~30m程度離れた3つの測線に沿って上流から下流に向かい無人潜水艦を走らせて水中動画を撮影した。水衝部は水深が深く光が届きにくいことから、河床の状況を水中動画から直接判別するのは難しい。そのため、水衝部に加えて河床が砂礫で構成される砂州の上流面付近でも調査を実施し、両地点の水中動画の比較から水衝部の河床状況を調べた。**写真-2(a)**、**(b)**は、**図-14**のA地点とB地点での代表的な河床状況を水中動画からスクリーンショットで切り出したものである。砂州の上流面のB地点では**写真-2(b)**に示すように礫床であるのに対し、水衝部のA地点では**写真-2(a)**に示すようにテトラポットが河床に点在しており、河床洗掘を抑制していることが分かった。今後は、河床洗掘の大きかった他の地点、尾関山周辺の河床高・河床状況について詳細調査を実施し、これらの調査結果を考慮して江の川三川合流部の洪水流・河床変動予測モデルの精度向上を進める。

近年、底面流速解析法⁴⁾をはじめとして、流れの三次元性を考慮した実河川の洪水流解析が可能となり、流れの解析精度は向上してきている。このため、適切な解析モデルを用いて観測水面形の時間変化から流れの抵抗を定めることで、洪水時の流れをかなりの精度で予測可能となり、結果的に、砂礫河川であれば工学的に意味のある精度で河床変動を説明できることが、福岡⁶⁾により具体の検討事例で示されている。これらの事実を踏まえると、本報告で示したように、観測水面形の時系列データを用いて洪水流・河床変動を一体的に解析した結果、解析結果と異なる局所的な水面変化や河床変動を示す区間が生じたときには、その場所の河床は粘土や岩で構成されているか、水面下に何か構造物など河床洗掘を抑制する原因がある可能性が高く、RCボートや無人潜水艦などを積極的に活用し河床高・河床状況の調査を実施し、調査結果をモデルに反映させることで洪水流・河床変動予測モデルの高精度化を行うことが可能となることが示された。

3. 結論

本研究では、江の川三川合流部において、時空間的に密な水位データが得られた平成25年9月洪水と平成26年8月洪水を対象として、本予測モデルの検証と解析精度向上のための現地河床調査を行った。以下に主な結論を示す。

- (1) 平成25年9月洪水と平成26年8月洪水前後では、大きな河床変動が生じていないことから、本予測モデルの水位予測精度について、固定床解析から検証した。この結果、本予測モデルは、合流部での

三次元的な運動量交換を適切に考慮可能なことから、観測水面形の時間変化に基づき粗度係数などの流れの抵抗を設定することで、各河川からの洪水流出特性の異なる洪水についても、三川合流部の水位分布を高精度に予測可能なことを示した。

- (2) 観測水面形の時間変化に基づいて洪水流と河床変動の一体解析を行った結果、大きな河床洗掘が生じ、局所的に観測水面形と解析水面形に差異の生じた江の川の岩山周辺(水衝部箇所)について、RCボートと無人潜水艦による河床高と河床状況の詳細調査を実施した。その結果、河床にテトラポットが存在し、河床洗掘が抑制されていることを明らかにした。
- (3) 複雑な洪水流の挙動を示す江の川三川合流部では、古くから水衝部対策、河床対策が実施されてきた。そのため、(2)に示したように解析と実測で差異の見られる箇所では、河床の詳細調査を実施し、その原因を解明することで、水面形の時間変化を用いた洪水流・河床変動予測法の一層の精度向上を図ることが可能である。

謝辞：本研究は、国土交通省河川砂防技術研究開発制度地域課題分野(河川)の助成を受けた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 昭和47年7月豪雨災害誌、広島県、1977。
- 2) 高橋 保：河川合流部における洪水流の特性に関する研究、防災研究所年報、15B、371-383、1972。
- 3) 松本敬司、中井隆亮、福岡捷二、須見徹太郎：渡良瀬遊水地の洪水調節機能とその課題の考察、土木学会論文集B1(水工学)、Vol.70、No.4、I_1477-I_1482、2014。
- 4) 内田龍彦、福岡捷二：底面流速解法による連続する水没水群を有する流れと河床変動の解析、土木学会論文集B1、Vol.67、No.1、pp.16-29、2011。
- 5) 竹村吉晴、福岡捷二、杉村貴志：三川合流部における洪水流と河床変動解析—格子非直交成分の運動量フラックスの導入、土木学会論文集B1(水工学)、Vol.69、No.4、I_805-810、2013。
- 6) 福岡捷二：実務面からみた洪水流・河床変動解析法の最前線と今後の調査研究の方向性、河川技術論文集、第20巻、pp.253-258、2014。
- 7) 芦田和男・道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究、土木学会論文報告集、第206号、pp.59-69、1972。
- 8) 平野宗夫：Armoringをともなう河床低下について、土木学会論文報告集、第195号、pp.55-65、1971。

(2016.4.4受付)