

斐伊川放水路への洪水分派に伴う分派点付近の本川河床変動に関する研究

STUDY ON FLOOD FLOWS AND BED VARIATION IN THE UPSTREAM AND DOWNSTREAM OF THE DIVERSION CHANNEL IN THE HII RIVER

岡田裕之介¹・大吉雄人²・福岡捷二³

Yunosuke OKADA, Taketo OHYOSHI and Shoji FUKUOKA

¹正会員 工修 清水建設株式会社 (〒104-8370 東京都中央区京橋2-16-1)

²正会員 工修 国土交通省中国地方整備局出雲河川事務所 (〒693-0023 島根県出雲市塩冶有原町5-1)

³フェロー 工博 Ph.D 中央大学研究開発機構 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

The Hii river diversion channel was constructed in 2013 to decrease the flood discharge flowing to the lower Hii River. The Hii River has almost uniform sand particles whose diameter is 2mm. It is important for the river management to understand effects of the Hii River's bed variation near the diversion channel on the discharge diverted. The Hii River is known as a representative river having large sand waves formed on braided bars. The flow resistance of the Hii River changes in the peculiar manner with the variation in bed elevation during a flood. In this paper, we conducted two-step analyses (quasi-steady and unsteady flow) to evaluate flow resistances due to the sand waves during 2013 flood by using the general BVC method. The analysis results could reproduce the observed discharge hydrographs and bed variations. We found that mechanism of sand wave deformations could be explained by the proper estimation of temporal variations in Manning's roughness coefficient by the general BVC method.

Key Words : *Hii River, flood flow diversion channel, sand waves, bed variation, Manning's roughness coefficient, bottom velocity computation method*

1. 序論

島根県を流れる斐伊川河口には、洪水時に水位の上昇をもたらす宍道湖を有している。このため、大洪水が発生すると、宍道湖周辺では長期間にわたり水位上昇が生じ甚大な浸水被害が起こる。このような背景から、斐伊川と神戸川上流部でのダム建設、両河川を繋ぐ斐伊川放水路の建設、宍道湖流出部である大橋川の改修からなる3点セットと呼ばれる流域全体での洪水対策が講じられている。その一角をなす斐伊川放水路は斐伊川洪水流量の一部を分流させ、斐伊川下流部への水位・流量を低減させる役割を有する。しかし、斐伊川は河床構成材料が2mmと小さく、粒径がほぼ均一な砂からなるため常時河床材料は動いており、放水路への分流に伴う本川流量の減少は、分派点付近の河床変動をもたらす、それらが放水路への分派流量及び土砂流入量に影響を与えると推定され、これらの影響を明らかにする必要がある。

斐伊川河床は低水路内に網状砂州が発達し、その上に

縦横断的に大きな河床波が重なっている。また、洪水時のピーク水深は河床波の波高の3~6倍であり、我が国の他の沖積地河川に比して、河床波の変形・発達による抵抗変化が流れと土砂移動に大きな影響を与え、河川管理に際して河床波の取り扱いが難しい河川であることが知られている。福岡¹⁾は洪水時の河床波の変形による抵抗変化と河床変動、樹木群等による水位変化の影響は水面形の時間変化に現れるという考えに基づき、観測水面形の時間変化を用いる洪水流・河床変動解析により、洪水時の河床変動、流量ハイドログラフ等を工学的に必要な精度で解析可能であることを多くの河川で示している。著者ら²⁾は、これまで放水路竣工前に生じた斐伊川での2洪水を対象とし、福岡の手法を適用し洪水流・河床変動解析を行っている。この検討では、最初に、洪水時の河床波の抵抗変化を準定常流・河床変動解析より算出された各時間のマニングの粗度係数で評価した。次に、準定常流解析より得られた各時間の粗度係数値を用い非定常流・河床変動解析を行うことで、斐伊川本川の洪水流と河床変動を検討し、多くの興味ある結果を得ている。し



図-1 対象区間平面図



写真-2 分派点付近の航空写真

かし、この解析では静水圧分布の仮定を用いた底面流速解析法を用いたため、水深の小さい状況で大きな河床波に起因する河床面での静水圧分布からの圧力偏差や流れの三次元性の評価が不十分であり、河床変動解析に課題が残されていた。最近、内田・福岡³⁾は、河道の底面圧力や底面流速を高精度に計算することの出来る浅水流の仮定を用いない底面流速解析法(一般底面流速解析法)を開発し、直角合流部での河岸侵食⁴⁾や河口砂州の崩壊過程⁵⁾の解明に用い、その有効性を確認している。

本研究では、斐伊川放水路へ初めて分流した平成25年9月洪水を対象として一般底面流速解析法を適用し、斐伊川放水路の洪水流分派機構と分派点付近の本川河床変動、河床波の抵抗変化について検討する。

2. 検討対象区間及び対象洪水概要

図-1は検討対象区間の平面図を示す。対象区間内では、上島(18.6 km)、大津(12.4 km)、灘分(4.0 km)の計3地点で洪水水位及び浮子による流量観測が行われている。また、丸で示す位置に簡易圧力式水位計が設置されており、これらを用いて縦断的な洪水時の水位観測が行われている。斐伊川河道内では、写真-1に示すように大きな網状砂州上に0.5 m~1.0 m程度の波高を有する河床波が平常時確認されている。それに対して、本洪水時のピーク水深は分



写真-1 斐伊川の網状砂州とその上の河床波

派点上流部で3.0 m程度、分派点下流部で1.5 m程度と浅く、洪水時の河床波の変形・発達による抵抗変化が流れと土砂移動に大きく影響を与えることが考えられる。斐伊川放水路は、湾曲部出口付近の14.4 kmに建設され、斐伊川洪水流量の一部は神戸川へと流入する。河川整備基本方針⁶⁾では、基準地点上島で計画高水流量4500m³/sであり、計画高水流量時には斐伊川本川と放水路の流量割合が5:4となるように計画されている。写真-2は放水路分派点付近の航空写真を示す。斐伊川放水路分流堰には、起伏ゲートが5門、制水ゲートが2門それぞれ設けられており、洪水中はこれらのゲート操作により放水路への流入流量の調節が行われる。本研究で対象とする平成25年9月洪水では、5門の起伏ゲート操作が行われた。放水路分流堰直下流には、水叩き工や本川からの土砂を捕捉するための沈砂池が設けられている。沈砂池は神戸川への土砂流入を減ずる役割を担っている。

平成25年9月洪水では、分派点上流の上島地点で1250 m³/sのピーク流量が観測されており、斐伊川での中規模洪水にあたる。分派点下流の本川大津地点では600 m³/s、放水路の菅沢橋地点では550 m³/sのピーク流量が観測されており、両者のピーク流量の和が上島地点のピーク流量と異なる確定的な理由は現在のところ不明である。また、放水路への分流に伴い斐伊川の土砂が放水路へと大量に流入し、27,000 m³の土砂が水叩き部及び沈砂池内に堆積した。

3. 検討方法

(1) 浅水流の仮定を用いない底面流速解析法

斐伊川では、大きな河床波の存在による底面付近の静水圧からの偏差圧力や流れの三次元性が洪水時の河床変動に大きく影響を与える。そこで、流れ場の解析にはそれらを適切に考慮することが出来る一般底面流速解析法(一般BVC法)³⁾を適用する。一般BVC法では、河床からわずかに上の面を底面と仮定し、渦度の定義式を水深積分することで得られる式(1)より底面流速 u_b を算出する。

$$u_{bi} = u_{si} - \varepsilon_{ij3} \Omega_j h - \left(\frac{\partial W h}{\partial x} - w_s \frac{\partial z_s}{\partial x_i} + w_b \frac{\partial z_b}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

ここに、 $i, j=1, 2$ (x, y 方向)、 ε_{ij3} : エディトンのイプシロン、 u_{si} : 水表面流速、 Ω_j : 水深平均渦度、 h : 水深、 W : 水深平均鉛直方向流速、 z_s : 水位、 z_b : 河床高、 w_s 、 w_b : 水面、底面の鉛直方向流速である。なお、流速鉛直分布は式(2)に示す三次多項式より近似している。

$$u'_i = u_i - U_i = \Delta u_i (12\eta^3 - 12\eta^2 + 1) - \delta u_i (4\eta^3 - 3\eta^2) \quad (2)$$

ここに、 u_i : i 方向流速、 U_i : i 方向水深平均流速、 $\Delta u_i = u_{si} - U_i$ 、 $\delta u_i = u_{si} - u_{bi}$ 、 $\eta = (z_s - z)/h$ である。

底面の静水圧からの偏差圧力は鉛直方向運動方程式を水深積分することで得られる。本解析では簡略化と計算の安定化のため、非定常項と水平せん断応力項は省略し、一般座標系に変換された式(3)を用いる。

$$\frac{dp_b}{\rho} = U_\xi h \frac{\partial W}{\partial \xi} + U_\eta h \frac{\partial W}{\partial \eta} + \frac{\tau_{b\xi}}{\rho} \frac{\partial z_b}{\partial \xi} + \frac{\tau_{b\eta}}{\rho} \frac{\partial z_b}{\partial \eta} \quad (3)$$

ここに、 dp_b : 底面の静水圧からの偏差圧力、 ρ : 水の密度、 $\tau_{b\xi}$ 、 $\tau_{b\eta}$: 底面せん断応力の ξ 、 η 方向成分、 z_b : 河床高である。式(1)の底面流速は、水深積分連続式、水深積分運動方程式、水深積分渦度方程式、水表面流速の運動方程式、底面の静水圧からの偏差圧力の方程式、水深積分鉛直方向流速の方程式から計算する。基礎方程式の詳細は文献³⁾を参照されたい。河床変動解析は、式(1)より得られた底面流速を用いて、掃流砂は芦田・道上の式、浮遊砂の浮上量は板倉・岸の式より算出する。また、浮遊砂濃度の計算には、鉛直方向の流速分布と底面近傍の移流拡散を適切に評価するために、三次元移流拡散方程式を用いる。河床変動量は流砂の連続式より計算される。

(2) 河床波の抵抗変化と分派点付近の河床変動の

検討方法

本研究では、河床波付近の流れと河床の三次元的構造の変化を高精度に計算可能な方程式系一般BVC法で計算し、その式系中に含まれる抵抗パラメータであるマニングの粗度係数を観測水面形の時間変化を用いて推定し、これらより複雑な網状流路の流れと土砂移動機構を明らかにする。解析手順として、初めに準定常一般BVC・河床変動解析を用いて各時間の粗度係数を算定する。準定常流解析を用いる理由は、非定常流解析では、流量変化、河床変動、粗度係数の変化等が相互に影響し合うことにより、粗度係数値の推定が容易でないためである。上下流端境界条件には上島(18.6 km)、宍道湖(-1.0 km)、大井谷橋(10.9 km)の水位観測データを用いる。図-2に示すようにA~Gの時間帯の実線で示す各時間の水位を与え、下流端境界条件も同様に水位を与え、準定常流解析を行っている。各時間の粗度係数は、各時間の観測水面形及び上島地点の観測流量を概ね説明出来た時の値を採用している。次に準定常流解析より得られた各時間の粗度係数値を非定常一般BVC・河床変動解析法に用い、観測水面形

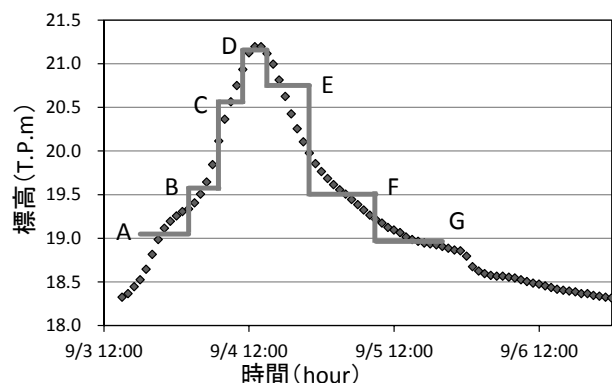


図-2 上流端境界条件に用いた水位ハイドログラフ

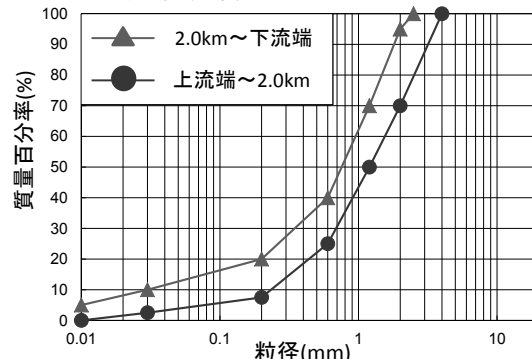


図-3 解析に用いた粒度分布

表-1 ゲート操作記録

9月4日 6:50	1号ゲート倒伏開始
9月4日 7:50	2・3号ゲート倒伏開始、1号ゲート倒伏完了
9月4日 8:50	4・5号ゲート倒伏開始、2・3号ゲート倒伏完了
9月4日 9:50	4・5号ゲート倒伏完了
9月5日 3:20	全ゲート起伏開始
9月5日 4:07	全ゲート起伏完了

の時間変化を適切に説明出来ることを確認した上で、斐伊川放水路の洪水流分派機能と分派点付近の本川河床変動について検討を行う。上下流端境界条件は、上島、宍道湖、大井谷橋の水位時系列データをそれぞれ与える。

(3) 解析条件

河床の初期地形は平成24年12月に行われた定期横断測量データに基づき作成した。放水路分派点区間である14.0 km~16.0 kmの区間では、平成25年6月に10 m~50 m間隔で横断測量が行われている。本検討では、それらの詳細な地形データを用い、河床の凹凸を精度良く表現した上で解析を行っている。図-3は解析に用いた粒度分布を示す。これは平成14年に対象区間内で実施された河床材料調査を参照している。表-1は本洪水での起伏ゲートの操作記録である。本洪水に対しては、全ての起伏ゲートの操作が行われ、水位上昇期には上島地点(18.6 km)でのH.Q.換算洪水流量が500 m³/sとなる時間から各ゲートを1時間毎に倒伏させている。また、水位下降期でも同様な条件となった時間より全ゲートを同時に起伏させている。本解析では、ゲート操作による倒伏・起伏条件を考慮し、ゲート前面の水位がゲート高よりも低い時間帯は、ゲート断面を通過する運動量フラックスをゼロとしている。放水路分流堰直下流には、水叩き工や沈砂池からなる断落ち部が存在している。このような場では、剥

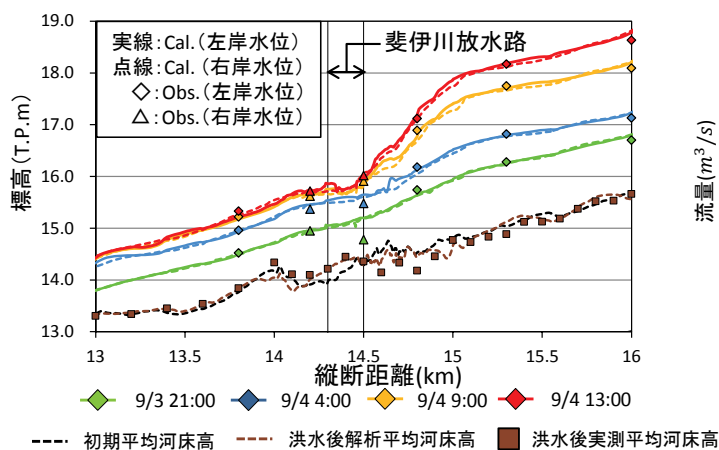


図-4 水面形の時間変化

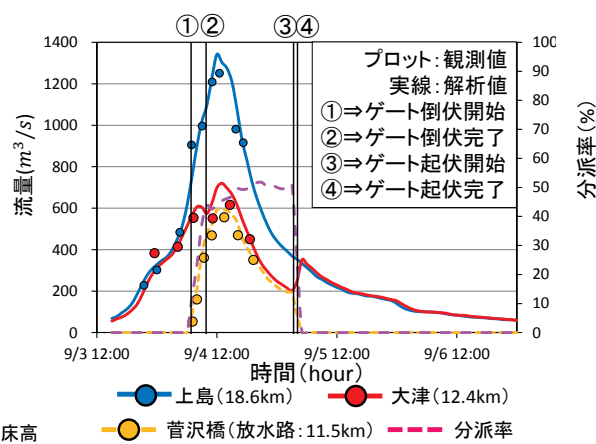


図-5 流量ハイドログラフと分派率

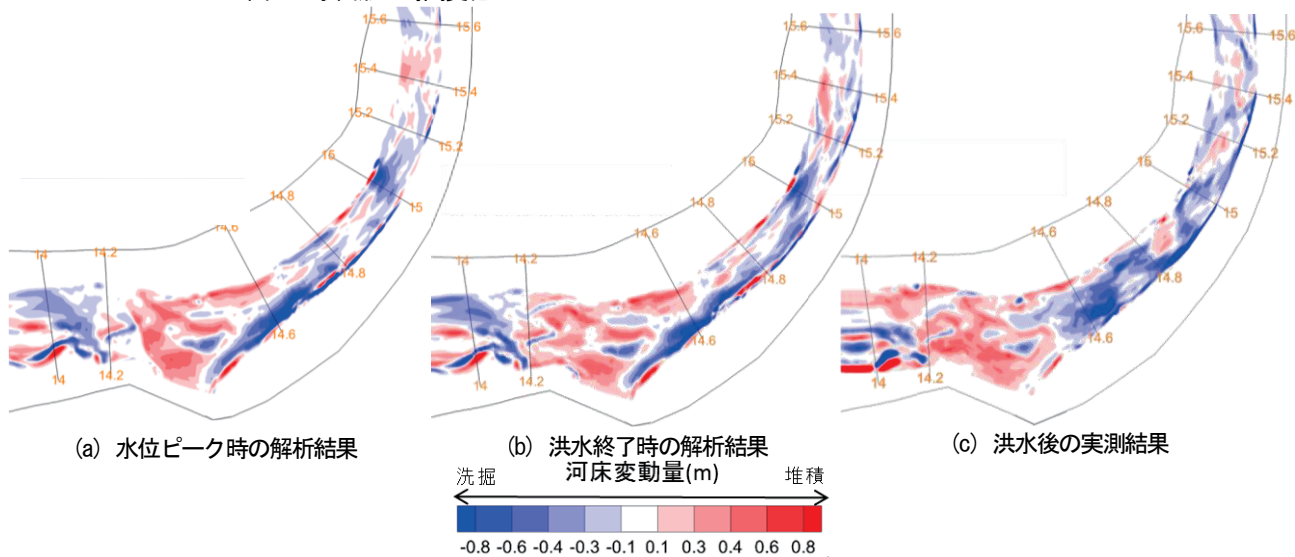


図-6 河床変動量コンター図

離が生じることで、底面近傍で逆流を伴う三次元性の強い流れ場となる。このため本解析では、剥離による底面極近傍からの渦度供給を渦度方程式の生産項に付加することにより計算を行っている⁷⁾。

4. 解析結果

(1) 斐伊川放水路への洪水流分派機構と分派点付近の斐伊川本川河床変動

図-4は非定常流解析より得られた解析水面形と観測水位の比較を示す。解析水面形は観測水面形の時間変化を概ね再現している。15.0 km付近より放水路への分流による影響が現れ、分派点下流部の水位上昇量は分派点上流部に比べて著しく減じていることが分かる。平均河床高は、分派点直上流の14.6 km~15.0 km付近では、洪水後に0.5 m程度低下する。一方、放水路分派前面部となる14.3 km~14.5 kmでは、0.3 m程度上昇している。茶色の点線で示す本解析での洪水後平均河床高はその変化の傾向を再現出来ている。図-5は本川、放水路の各観測所における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及び放水路への分派率を示す。ここで分派率は、

本川の上島地点(18.6 km)の解析流量に対する放水路の菅沢橋地点(11.5 km)の解析流量の比を表している。本川及び放水路の解析流量ハイドログラフは観測流量ハイドログラフを説明している。分派点下流の天津地点(12.4 km)の流量ハイドログラフには分流堰のゲート操作による影響が現れており、①~②のゲート倒伏時は約100 m³/sの流量減少、③~④のゲート起伏時は約200 m³/sの流量増大が生じている。また、放水路への解析流量分派率は水位ピーク時において45 %であり、この値は計画上の本川と放水路の流量割合と対応している。図-6は(a)水位ピーク時の解析、(b)洪水終了時の解析、(c)洪水後実測の分派点付近の河床変動量コンター図を示す。放水路への分流により分派点上流で水面勾配が大きく変化したことで、水位ピーク時では0.8 m程度の河床洗掘が生じている。また、分派点前面では放水路への分流により土砂の流送能力が低下したことで0.8 m程度の土砂堆積が生じている。洪水終了時にはそれらの変動量がさらに増大し、分派点前面での堆積範囲が拡大している。解析と実測の比較より、本解析では実測の河床変動の傾向を良好に再現することが出来ており、河床変動量も概ね一致している。これは、10 m~50 m間隔で行われた詳細な地形データを基に放水路分派点区間の初期地形を作成したことで洪水

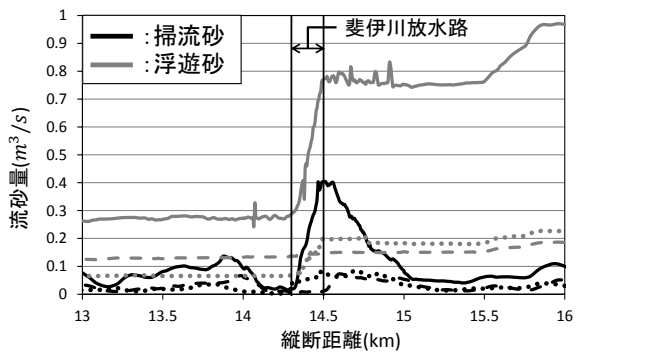


図-7 流砂量縦断面図

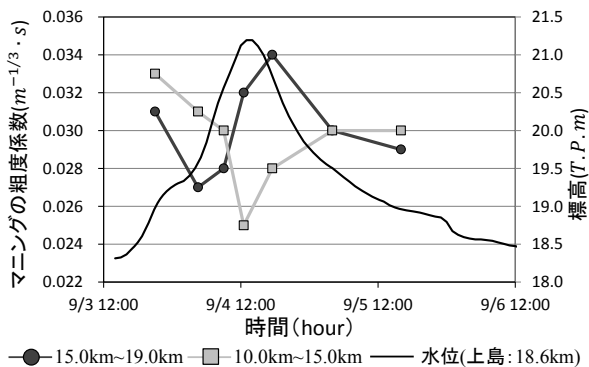


図-9 解析に用いた各時間の粗度係数

流と河床変動を高精度な解析法を用いて計算したことから、河床の凹凸を的確に表現することが出来たためと考えている。図-7は本解析より得られた流砂量縦断面図を示す。水位ピーク時では、太線で示す掃流砂量は14.6 km~15.0 kmの区間で急増しており、斐伊川放水路へと多くの土砂が流出することで本川流砂量が急激に減少している。これは放水路への分流により15.0 km付近から水面勾配の急激な変化が生じたため、掃流土砂の移動が活発になったと考えられる。一方、細線で示す浮遊砂量は掃流砂量に比べて大きな値を示しており、掃流砂と同様に14.5 kmより急激に減少しているが、分派点上下流部の区間では縦断的な変化が小さい。このことから、斐伊川では浮遊砂量が多いものの、縦断的な河床変動を起こす要因は掃流砂量が支配的であると考えられる。低流量時(500 m³/s)では、掃流砂量、浮遊砂量ともに縦断的な変化量は大きくない。図-8は本解析より得られた洪水時の放水路への累積土砂流入量を示す。浮遊砂・掃流砂による累積土砂流入量はそれぞれ20,000 m³、6,000 m³となっており、解析では浮遊砂による流入が非常に多いことがわかる。また、総累積土砂流入量は約26,000 m³であり、放水路内の実測土砂堆積量と概ね一致している。しかし、沈砂池内での土砂の捕捉機構は、拘束された三次元的な流れ場での土砂堆積を調べることが必要であり、これに関しては、今後の課題である。

(2) 河床波の抵抗変化と発達・減衰過程

図-9は本解析に用いた各時間の粗度係数の時間変化を示しており、参考として上島地点の水位ハイドログラフを合わせて示している。ここで、プロットで示す粗度係

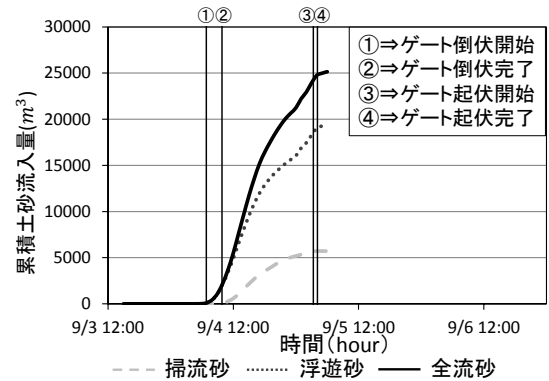


図-8 放水路への累積土砂流入量

数は準定常流解析より得られた値である。放水路分派点上流部(15.0 km~19.0 km)では、水位の上昇・下降に伴い粗度係数も増大・減少しているが、分派点下流部では水位の上昇・下降により粗度係数はそれぞれ減少・増大の傾向を示している。図-10は図-9の値を用いた非定常流解析より得られた分派点上流部(16.0 km付近)の河床高コンター図であり、(a)初期河床高、(b)水位ピーク時の解析河床高、(c)洪水終了時の解析河床高をそれぞれ立体的に示している。図-10(a)、(b)の比較より河床波の波高の増大や滞筋と河床波の比高差の増大が確認出来、水位上昇期では河床波が発達し、抵抗は増大する。しかし、洪水終了時の図-10(c)では、水位ピーク時よりも河床波が発達しているように見え、この区間での粗度係数の増減関係との対応が十分取れていない。分派点上流部における水位下降期での河床波の発達・減衰過程についてはさらなる検討が必要である。図-11は非定常流解析より得られた分派点付近(14.4 km)の河床高コンター図である。初期河床高と水位ピーク時の解析河床高の比較より、河床波の縦横断波長が大きくなっているものの、河床波の波高は減少しており、水位上昇期では河床波の減衰により抵抗は小さくなる。水位ピーク時と洪水終了時の河床高の比較では、河床波の波高及び河床波と滞筋との比高差が増大し、水位下降期では河床波の発達により抵抗が増大する。これはこの区間での粗度係数の増減とよく対応している。これらのことから、一般BVC法と二次元河床変動計算をカップリングさせることにより、定量的な説明が困難であった洪水時の河床変動、河床波の抵抗変化及び発達・減衰過程をかなりの精度で表現出来ることがわかる。その結果として、砂河川斐伊川では、洪水の各段階でとる河床高の変化に伴う粗度係数の値にも十分な意味を持たせることが可能となった。

5. 結論

本研究では、複雑な河床構造と土砂移動を伴う斐伊川本川と放水路の洪水流分派機構及び分派点付近の本川河床変動、河床波の抵抗変化について検討を行った。以下に主な結論を示す。

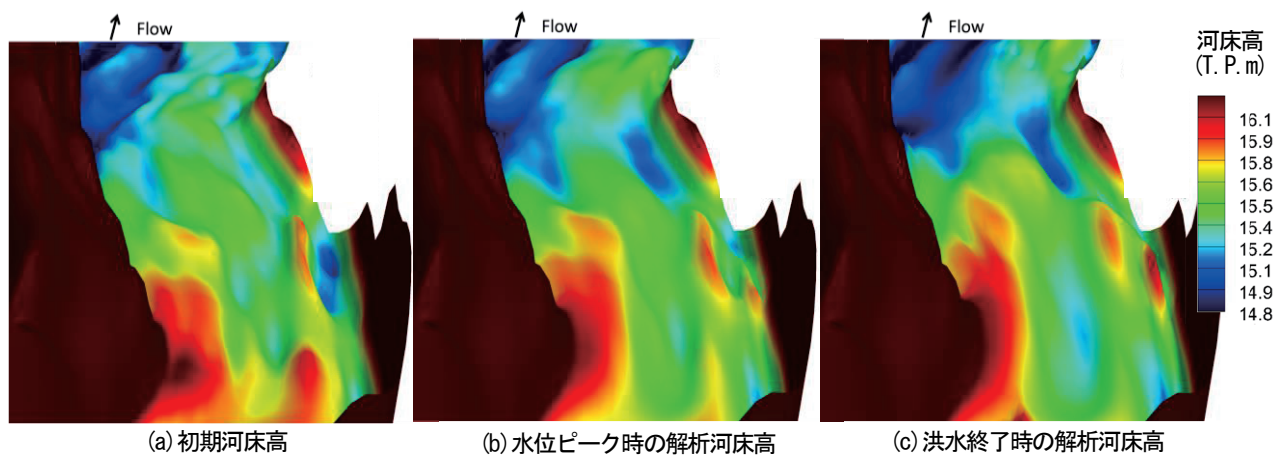


図-10 非定常流解析より得られた分派点上流(16.0 km付近)の河床高コンター図

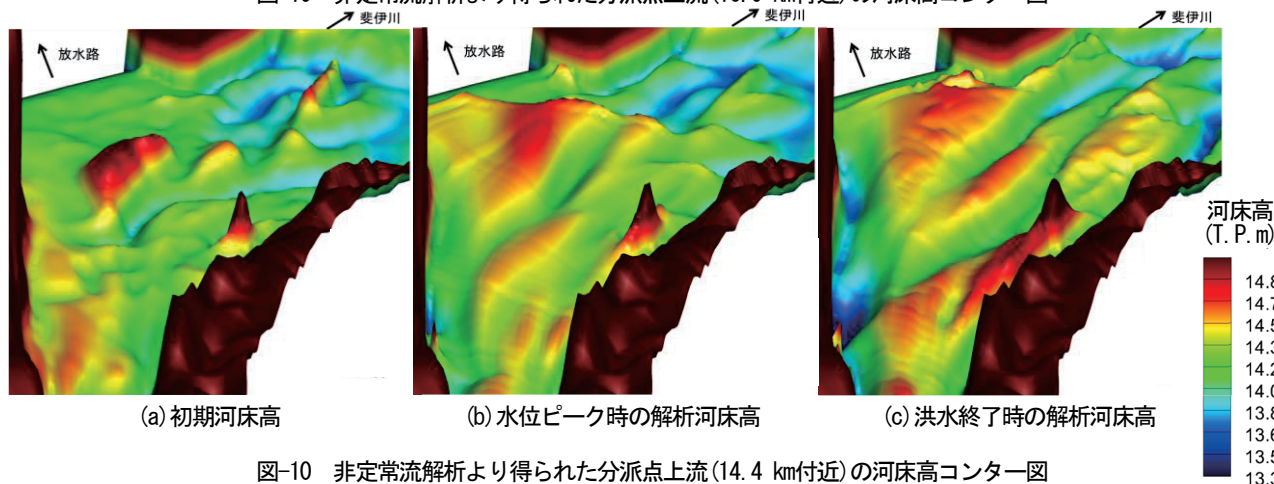


図-10 非定常流解析より得られた分派点上流(14.4 km付近)の河床高コンター図

- 1) 斐伊川洪水流の観測水面形の時間変化を用い、一般底面流速解析法と河床変動計算をカップリングさせ、準定常流及び非定常流解析の2段階解析を行うことで、高精度に流れと河床変動を解き、本川・放水路の流量ハイドログラフ、河床洗掘・土砂堆積及び河床変動量の実測を良好に再現出来た。このことから、本手法が砂河川斐伊川の洪水流・河床変動の検討に有効であることが示された。
- 2) 本解析より得られた放水路への流量分派率は水位ピーク時において45%であり、計画上の流量割合と対応している。洪水中は分派点上流で0.8m程度の河床洗掘、分派点前面で0.8m程度の土砂堆積が生じ、放水路への総累積土砂流入量は約26,000 m³と多くの土砂が流入した。分流堰の沈砂池内への土砂の捕捉機構、捕捉量に関しては今後の課題である。
- 3) 一般底面流速解析法と河床変動解析法を用い、網状流路の河床波上に作用する静水圧からの圧力偏差や底面流速を評価することで、洪水中の河床波の抵抗変化及び発達・減衰過程を適切に表現することが出来た。
- 4) 本解析より得られた洪水中の河床波の発達・減衰過程と本解析法で導いた粗度係数値の増減関係はよく対応する。このことは、確かな枠組みでの洪水流・河床変動解析を行えば、洪水時の粗度係数値の増減関係という理解しやすい形で河床波の発

達・減衰過程を説明することが可能となる。

参考文献

- 1) 福岡捷二：河道設計のための基本は何かー水面形時系列観測値と洪水流ー土砂流の解析を組み合わせた河道水理システムとその見える化，河川技術論文集，第17巻，pp83-88，2011。
- 2) 岡田裕之介，大吉雄人，福岡捷二：網状砂州河道における大規模洪水時の河床変動，河川技術論文集，第19巻，pp.153-158，2013。
- 3) 内田龍彦，福岡捷二：浅水流の仮定を用いない水深積分モデルによる底面流速の解析法，水工学論文集，第56巻，I_1225-I_1230，2012。
- 4) 田端幸輔，福岡捷二，内藤和久：大きな流量を有する支川が直角合流する河道区間の三次元流れと河床変動の解析，河川技術論文集，第19巻，pp.189-194，2013。
- 5) 立山政樹，山崎友子，田部成幸，内田龍彦，福岡捷二：洪水流による河口砂州フラッシュの新しい解析法に関する研究，河川技術論文集，第19巻，pp.183-188，2013。
- 6) 国土交通省中国地方整備局出雲河川事務所：河川整備基本方針，2009。
- 7) 内田龍彦，福岡捷二：底面流速解法による連続する水没水制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，pp16-29，2011。

(2014. 4. 3受付)