

上流の河道形状と堰湛水の影響を受ける合流部の河床変動とその制御に関する研究

高田 翔也¹・神田 佳一²・道奥 康治³・久保 裕基¹・岡本 吉弘¹

¹学生会員 明石高専 建築・都市システム工学専攻 (〒674-8501 兵庫県明石市魚住町西岡 679-3)

²正会員 博士(工学) 明石高専 都市システム工学科 (〒674-8501 兵庫県明石市魚住町西岡 679-3)

E-mail:kanda@akashi.ac.jp

³フェロー会員 工博 法政大学デザイン工学部 (〒162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-33)

E-mail: kohji.michioku.47@hosei.ac.jp

兵庫県を流れる加古川では、加古川大堰の上流区間において、堰の湛水と左支川美囊川の合流、及び上流河道の弯曲の影響により、合流部での右岸砂州の肥大化や滞筋の左岸への偏向・固定化、水面利用域の浅水化が進行している。本研究では、美囊川合流部周辺の河川地形とその形成要因に関して、現地河道を模した合流模型実験水路を用いて移動床実験を行い、合流部での流れと河床形状を支配する要因を明らかにするとともに、砂州の制御の為に設置された水制工の水理機能とその効果について、移動床模型実験により考察した。また、2次元流れの公開数値解析ソフト Nays2DH を用いて実験の再現計算を行い、実験結果の検証とその適用性の検討を行った。

Key Words: river geomorphology, bed deformation, tributary, hydraulic experiment, numerical simulation

1. はじめに

河川合流部では、その治水史において多くの洪水災害が報告されており、これまでに流れ及び河床変動特性の解明を目的とした研究が数多く行われている^{1,2,3}。例えば、藤田らは直角合流部における流れの3次元構造や、微小角合流を対象とした断面内の2次元構造を実験的に解明している^{4,5}。また、重枝らは、河川改修が下流から行われることを考慮し、合流後の流れの変化が河川合流部周辺の流れ及び河床変動に及ぼす影響について実験的に考察し、数値解析モデルの有用性についても検討している⁶。このような複雑な流れ場を有する合流部に対し、実河川では水衡部の護岸や導流堤による合流角度の緩和、古くは聖牛等の不透過水制による河床変動の制御など、現地河道の特性に基づいた合流点処理が行われている⁷。しかし、このような河道改修等は、砂州波長や滞筋の変化を生み、河川環境に大きな影響を及ぼすことが考えられ、河川における生態環境と物理環境のつながりを考える上でも、現地の河道条件を考慮した河床変動特性を明らかにする必要がある。

兵庫県の一級河川の加古川では、平成元年の加古川大堰の建設とそれに伴う河道改修以降、その上流区間である左支川的美囊川の合流部において、それまで左岸に形

成されていた砂州が、右岸に移動して大きく肥大化し、疎通能の低下等の課題が生じていた。一般に合流部では、合流角の増大に伴って合流直下での剥離域の増大と堆砂が生じ、砂州が形成されるが、合流部対岸に砂州が形成されるケースはまれであり、河川管理上その形成メカニズムの解明が求められている。河川地形の形成に影響を及ぼす主な支配要因としては、美囊川合流点の上流部のほぼ直角に弯曲した河道形状や支川合流、さらに加古川大堰の堰操作による下流水位の変動が挙げられる⁸。

一方、現在的美囊川合流部には、右岸砂州の発達抑制を目的とした単独水制が合流部直上の左岸側に設置されており、より複雑な流れ場を呈している。このような合流部への水制の適用例は少なく、その流れと河床変動特性を解明することは、水制による河川地形の制御効果を検証する上でも、工学的に重要であると考えられる。

本研究では、加古川と美囊川の合流部を対象とし、上流河道の形状と下流水位、本支川流量比を支配要因として模型実験を行い、それらが合流部の河床変動特性に及ぼす影響について評価するとともに、水制を設置した場合の合流部の流れ場の変化と、合流部対岸の砂州のフラッシュ効果について考察する。さらに、公開の汎用ソルバーであるiRIC- Nays2DH⁹を用いて実験の再現計算を行い、実験結果との比較からその有用性について検討する。

2. 加古川の概要と合流部の河道形状

加古川は、流路延長96km、流域面積1730km²の兵庫県南部を流れる河川である。河口から15.8km地点で加古川にはほぼ直角に合流する美囊川は、流路延長39km、流域面積304km²を有する加古川水系最大の支川である(図-1)。合流部近傍での本川幅は約200m、支川幅は120m、河床勾配は本川約1/850、支川約1/500であるが、合流部の美囊川直上流には高さ2.0mの落差工が設置されている。加古川大堰は、下流域における治水安全度の向上や急増する水需要に対応するため、河口から12.0kmの地点に1989年に建設された多目的可動堰であり、堰堤から支川美囊川との合流点上流までが平水時の大堰の湛水区間となっている。大堰建設以降の出水時の加古川と美囊川の流量比は、概ね $Q_M/Q_T=3\sim 8$ 程度であって、美囊川では灌漑用の井堰が連続的に設置されており、土砂の供給量は、加古川に比べて極めて小さいものと考えられる⁸⁾。

図-2は、大堰建設前後の合流部地形の経年変化を示したものである。大堰の建設に伴う河道整備により、合流点下流の左岸部に砂州が発達し、建設前(1981年)に右岸寄りであった主流部は、砂州の左岸側に移動している。また、合流部上流の本川河道は、18km地点から大きく右に90°弯曲しており、その直下流(16.7km)では低水路左岸の岩盤が突出し狭窄部が形成されるなど、複雑な河道形状を呈している。図-3は当該区間における洪水時(流量3,500m³/s)の流況について、4章で述べる解析手法によって奥山ら⁸⁾が計算した結果である。左岸突出部から右岸方向に向けて高速域が生じており、合流点直上流(16km)では滞筋は右岸付近にあって横断方向の流速分布は一様ではない。このように、美囊川合流部では、加古川本川上流部の弯曲、加古川大堰による湛水、支川美囊川の合流といった支配要因が合流部の砂州の形成・発達に大きな影響を及ぼしているものと考えられる。

一方、防災上砂州の肥大化を抑制するため、2015年に水制が設置された。これは、合流部直上流(16km)左岸側に河岸に直角に配置された長さ50m、幅15m及び高さ6mのブロック積み不透水水制であり、洪水時の流れを右岸方向へ向けることにより、砂州の制御を図るものであるが、その効果については検証されていない。

3. 合流部の河床変動特性に関する模型実験

(1) 実験の概要

実験水路は、図-4に示すような、長さ8m、幅0.8mの本川水路に幅0.48mの左支川が直角に合流するもので、本川・支川いずれも両面ポリカーボネート張りの鋼製桁長方形断面水路である。現地の本川幅が約200mであることから、模型縮尺は1/250とし、河床勾配も現地河道

のそれに合わせて1/850とした。支川には合流点から0.45m上流に現地の落差工を模した厚さ8mmの段差を設けている。水路座標は、本川の上流端から1.5m下流の右



(a) 1981年



(b) 1990年



(c) 2000年

図-1 加古川流域と対象区間

図-2 合流部地形の経年変化

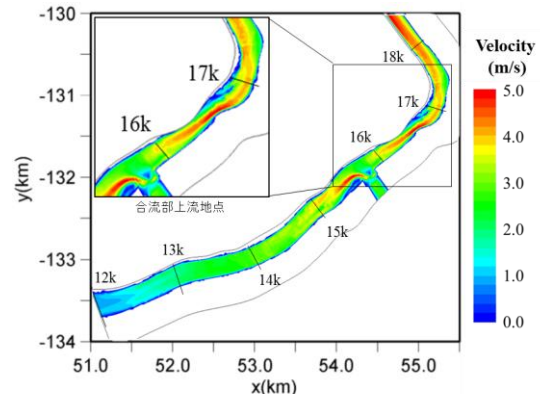


図-3 対象区間における洪水時の流れの解析結果

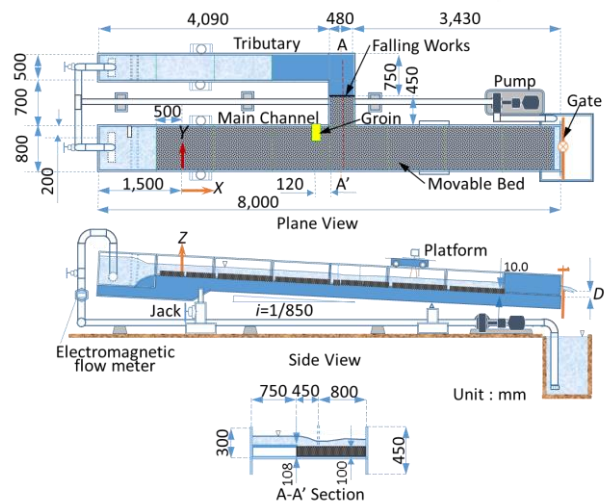


図-4 模型実験水路

岸河床面を原点として、流下方向にX軸、幅方向にY軸、鉛直上方にZ軸をとっており、支川の中心線はX=2.83mの測線上にある。本川水路の下流端には昇降式の可動堰を設置し、水位の調節を行った。河床材料については、現地の河床材料（平均粒径 $d=40\text{mm}$ ）を縮尺1/250で縮小すると、0.2mm以下となり、河床波の影響が卓越するため、粒径の大きい材料を用いた歪模型とした。そのため、流砂の相似則に関しては、外力としての摩擦速度 u_* と抵抗力としての限界摩擦速度 u_{*c} の相似性を考慮し、その比を現地と模型において一致させた。河床材料として密度 $\rho=1.47\text{g/cm}^3$ 、平均粒径 $d=1.3\text{mm}$ の様な石炭粉（ $u_{*c}=1.44\text{cm/s}$ ）を用い、10cmの厚さで本川水路及び落差工より下流の支川水路に敷き詰め、移動床としている。

実験条件は表-1に示す通りで、洪水時を想定した本川流量 $Q_M=3.0, 5.0\text{l/s}$ に対して、現地の流量比を考慮して支川流量 Q_T を0.5, 1.0及び2.5 l/s とした。下流端堰高 H_D は、0, 1及び2cmの3通りに変化させた（RunA）。通水時間は、RunA-1と同条件で120min通水した予備実験の結果より、合流部の河床形状がほぼ平衡状態となる60minとした。また、上流端河道条件として、現地の合流部上流河道の平面形状と流れ特性を模擬するため、X=-0.5mの断面の左岸側に水路の1/4幅（0.2m）の板を設置したもの（Run番号の末尾をLとする）を加えた。板の幅及び位置については、合流部直上流の横断流速分布が現地河道のそれ（図-3の解析結果）と相似になるよう、試行錯誤的に決定している。さらに、RunBでは、現地の水制を厚さ5mmの亚克力板を用いてモデル化した図-5に示す縮小模型（長さ0.2m、幅0.06m、高さ0.025m）を合流点直上流左岸（X=2.35m）に流下方向に対して直角に配置した。

水路上流端での給砂条件については、本支川の流砂量比が不明なため、本川・支川ともに給砂は行っていない。

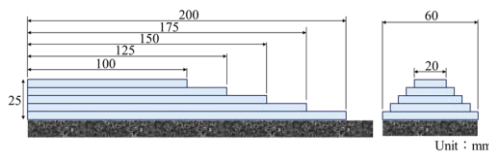


図-5 水制模型
表-1 実験条件

Run	本川流量 $Q_M(\text{l/s})$	支川流量 $Q_T(\text{l/s})$	堰高 $H_D(\text{cm})$	水路上流端 の境界条件	水制
A-1	5.0	1.0	0.0	無	無
A-2			1.0		
A-3			2.0		
A-1L			0.0	水路上流端（X=-0.5m） 左岸に本川幅Bの1/4幅の 板を設置	
A-2L			1.0		
A-3L			2.0		
A-4L	0.5	0.0	有		
A-5L	2.5	0.0			
A-6L	3.0	1.0		0.0	
B-1L	5.0	1.0		0.0	
B-2L	3.0				



このため、水路上流端では非平衡状態となり、60minの通水により最大3cm程度の河床低下が生じるが、その範囲は本川で0.6m、支川で0.1m程度であって、計測区間の上流端（X=0.7m）では、いずれの実験ケースにおいても河床低下は生じていないことを確認している。

実験では、通水時の水面形を超音波変位計で計測するとともに、表面流況をビデオ撮影し、藤田によるLSPIV解析法¹⁰を用いて表面流速ベクトルを評価した。通水後は、レーザー距離計を用いて河床位を計測している。

(2)実験結果及び考察

(a)下流水位の影響

図-6は、流量比 $Q_M/Q_T=5$ （ $Q_M=5.0\text{l/s}$ ）で下流端堰高 H_D を変化させたRunA-1～A-3の場合の、60min通水後の初期河床位からの河床変動量のコンター図である。また、水路中央縦断面（Y=0.4m）における水面形と河床の縦断分布、及び表面流速の横断分布を比較したものを図-7及び図-8に示す。 $H_D=0\text{cm}$ のとき、合流部の下流は低下背水であり、合流部左岸から斜めに横断するように河床低下が生じている、これは本川と支川の流れの混合域に対応しており、その左岸側には流れの剥離域が発達し、流砂がトラップされて河床が上昇している。合流による流体混合によって、その上流域では水位上昇と流速の低下が生じており、合流部上流左岸では、2～3mm程度の薄い堆積域が見られた。

堰により下流水位が増大した場合（RunA-2, A-3）には、水路全域に亘る水位の上昇とともに、混合域での河床低下は減少する一方、その上流域の堆積域は拡大している。特にRunA-3（ $H_D=2\text{cm}$ ）では、下流部の湛水効果が大きく、混合域における河床低下も生じなくなっ

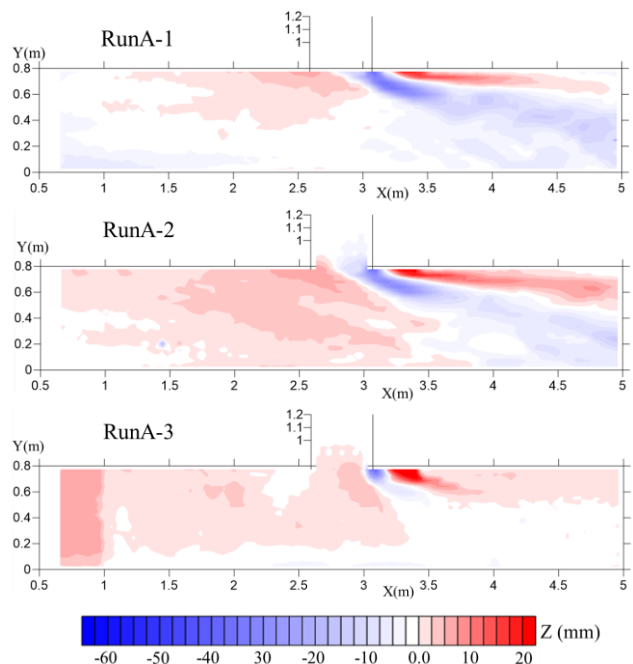


図-6 下流水位による河床変動量の変化

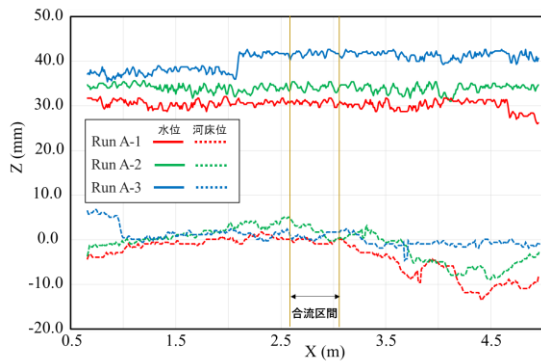


図-7 水位及び河床位の縦断分布

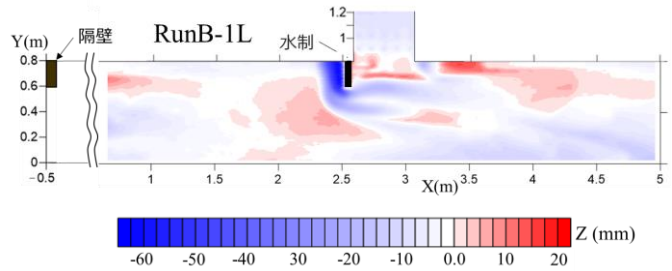


図-11 河床変化量 (RunB-1L)

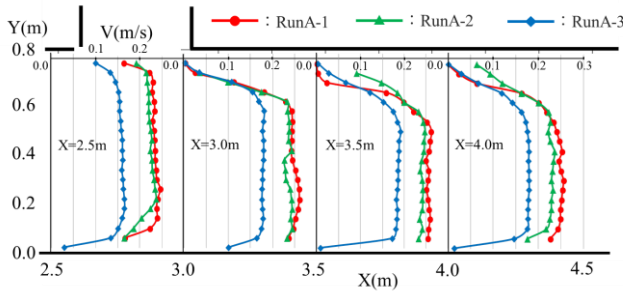


図-8 下流水位による横断流速分布の変化

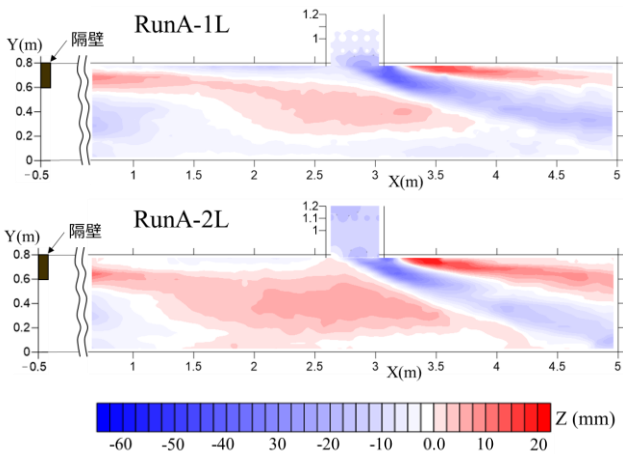


図-9 上流端に板を設置した場合の河床変動量

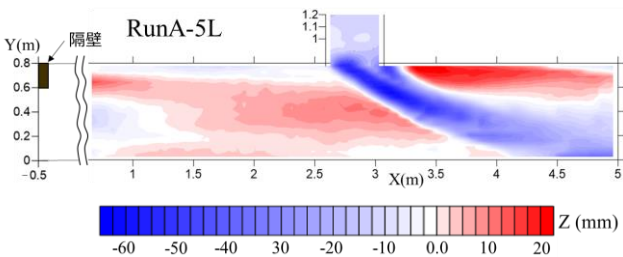


図-10 河床変動量 (RunA-5L)

いる。また、RunA-3の上流部 ($X < 1m$) では一様に河床が上昇しているが、これは水路上流端の非平衡領域 ($-0.5m < X < 0.2m$) で生じた流砂が堰上げによる掃流力の低下によって堆積したことによるものである。

(b)上流の弯曲(河道形状)による影響

RunA-1及びA-2と同様の条件で、水路上流端左岸に板を設置した場合 (RunA-1L及びA-2L) の河床変動量の実

験結果を図-9に示す。RunA-1Lでは、水路上流部では板の遮蔽効果によって流れが右岸側に偏寄し、河床位は右岸側では低下、左岸側では上昇している。一方、合流部では、支川の流入によって大きなエネルギー損失が生じ、混合域上流の水路中心線に沿って主流部の流れが減速されることから、上流からの流砂が堆積して舌状の河床上昇域が生じている。これらの河床変動特性は、下流水位の大きいRunA-2L ($H_D = 1cm$) でより顕著であって、大堰建設後の現地河道でみられたような、大きな砂州状の堆積地形が発達している。また、支川流量が大きくなると、図-10のRunA-5L ($Q_T = 2.5l/s$) の結果にみるように、混合域の河床低下量は増大するが、その上流域の堆砂量はほとんど変化していない。これらのことから、合流部水路中央から対岸にかけての砂州の形成要因としては、本川上流部の弯曲等の河道形状による影響が最も支配的であって、かつ下流水位の大きい程 (堰による湛水効果が大きい程)、砂州の形成領域は拡大するものと考えられる。

(c)水制を設置した場合の河床形状

図-11は、RunA-1Lと同様の水利条件で水制を設置したRunB-1Lの場合の通水後の河床形状を示したものである。また、両実験での水路中央 ($Y=0.4m$) における水面形 ($t=60min$) と河床の縦断分布を比較すれば図-12のようである。このときの本川流量 $Q_M = 5.0l/s$ は、現地では計画規模に相当するもので、水位は水制天端より高く、越流条件となっている。水制を設置した場合 (RunB-1L) の河床変動量をみると、その水冲刷効果によって水制の先端から下流の右岸方向に発達していた砂州はほぼ完全に消失し、水制の延長線上では水路中央部で最大2.5cmの洗掘が生じている (図-12)。支川流入による混合域も右岸側にシフトし、合流部下流の右岸側壁に沿って河床が低下している。流失した河床砂は水路下流付近で堆積しており、その影響でRunA-1Lよりも水位が高くなっているものと考えられる。また、水制の上流側面及び先端では、既往の研究にみられるような馬蹄形の局所洗掘穴が発達しており、その安定性を確保するには転倒防止等の対策が必要である。

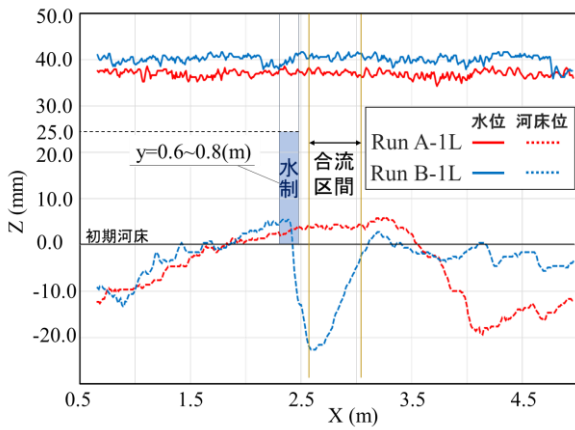


図-12 水路中央 (Y=0.4m) における水面形状及び河床形状

4. 合流部の河床変動特性に関する数値解析

(1)基礎式および解析方法

合流部の流れ及び河床変動に関する実験結果を検証するため、平面二次元流の数値解析を行った。解析には、iRIC 研究会 (International River Interface Corporative) によって開発され、インターネット上で公開されている汎用ソルバーの Nays2DH⁹⁾ を用いた。基礎式は、以下に示す平面 2 次元の連続式と運動方程式及び流砂の連続式である。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -hg \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho} + D_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -hg \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho} + D_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} \right) = 0 \quad (4)$$

ここで、 x, y : 平面直交座標、 u, v : x, y 方向の水深平均流速(m/s)、 t : 時間(sec)、 h : 水深、 H : 水位、 g : 重力加速度 (m/s^2)、 ρ : 水の密度、 τ_x, τ_y : x, y 方向のせん断力 (kg/m^2)、 D_x, D_y : 拡散項、 z : 河床高、 λ : 空隙率、 q_{bx}, q_{by} : x, y 方向の掃流砂量(m^2/s)である。

以上の基礎式を一般座標系に変換してプログラムが構築されている。移流項の離散化にはCIP法、乱流場では $k-\epsilon$ モデルが適用され、掃流砂量式として芦田・道上式に長谷川による斜面勾配の補正を考慮した式が用いられている。本解析モデルを用いて、実験水路と同様のスケールで、横断方向233分割、縦断方向54分割として格子を生成した。境界条件としては、本川及び支川の上流端で流量を与え、給砂量はともに0とした。本川下流端の水位は、堰高と限界水深の和で与えている。また、粗度係数は $n=0.018m^{-1/3}$ とし、河床材料は、実験と同じ石炭粉としている。

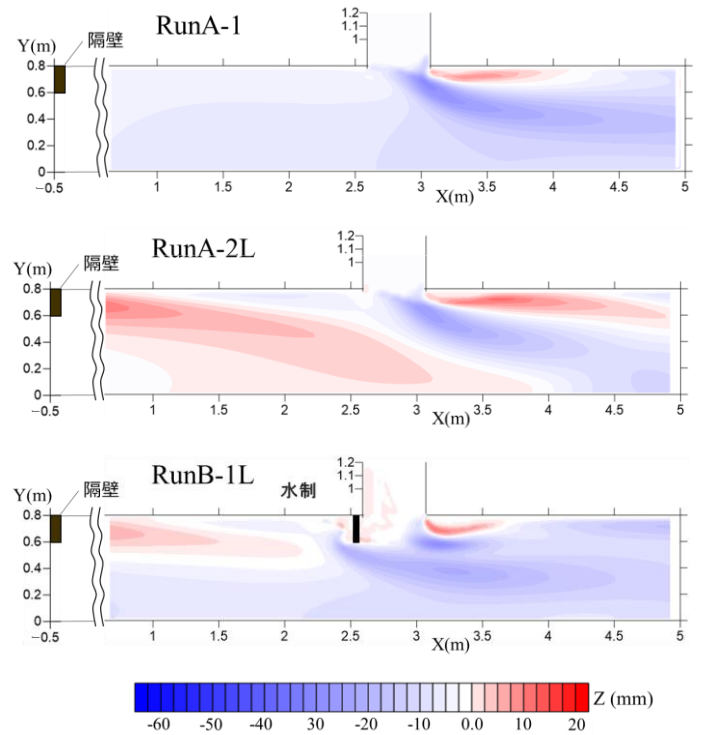


図-13 河床形状の解析結果

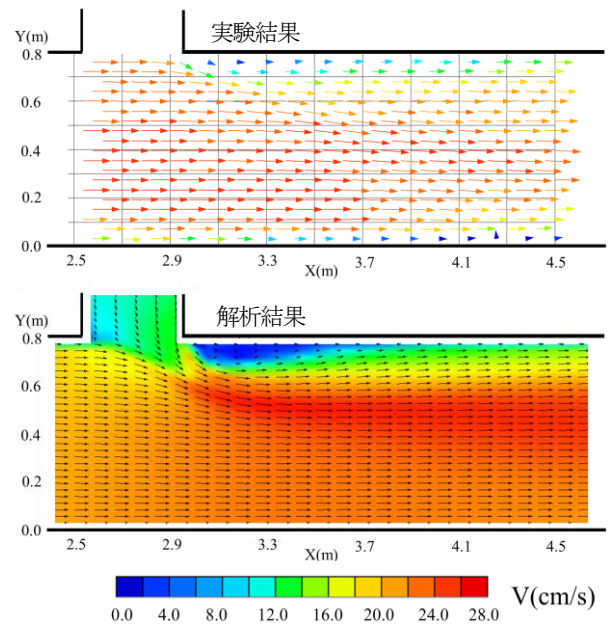


図-14 流速ベクトルの比較 (RunA-1)

(2) 解析結果及び実験結果との比較

図-13は、RunA-1、A-2L及びB-1Lについて、河床変動量の解析結果を示したものである。RunA-1では、図-6(a)の実験結果と比較すると、合流点上流部では一様に河床が低下しており、実験結果とは異なっているが、合流点下流部の河床形状は、実験結果を再現できている。特に混合域での河床低下量及びその位置については、良好に一致している。これは、合流部の流速ベクトル分布を比較した図-14において、流速値及び流向ともに実験結果によく対応していることから推察できる。上流端に板

を設置した場合のRunA-2Lについても、水路上流部左岸から合流部にいたる砂州の形成状況や剥離域の河床変動をよく再現できているものと考えられる。一方、水制を配したRunB-1Lでは、合流点下流部の河床低下についてはある程度表現できているが、最深部の位置が実験より水路中央部にあることや、水制周辺の洗掘がみられないなど、再現度は低い。従来から指摘されているように、水制を越流する流れ場では、流れの3次元性がより卓越するため、水制周辺の河床変動を詳細に検討するには、3次元的な取り扱いが必要である。

5. おわりに

以下に本研究で得られた知見をまとめる。

(1) $H_b=0\text{cm}$ の場合、支川の流入によって合流部左岸から斜めに横断するように河床低下が生じるが、合流部上流の左岸域では河床が上昇する。下流の堰湛水を考慮すると、水位の上昇とともに、混合域での河床低下は減少する一方、その上流側の堆積域は拡大する。

(2) 水路上流端左岸に板を設置した場合には、混合域上流の水路中心線に沿って上流からの流砂が堆積し、合流部水路中央から対岸（右岸）域において現地で見られた舌状の砂州地形が発達することから、その形成要因として、本川上流部の河道形状による影響が最も支配的であると考えられる。また、堰湛水による下流水位の大きい程、砂州の形成領域は拡大する。

(3) 合流部直上流に水制を設置した場合、その水刎ね効果によって、合流部中央から右岸にかけての砂州はフラッシュされており、砂州の制御効果が認められるが、水制周辺の局所洗掘に対する対策が必要である。

(4) 平面2次元の河床変動解析の結果は、流れの3次元性が卓越する水制周辺部の河床変動を除いて実験結果と概

ね良好に一致しており、その有用性が示された。

謝辞: 本研究では国交省姫路河川国道事務所のご協力を頂くとともに、平成26-28年度科研費基盤研究(B) (代表: 道奥康治, 課題番号: 26289164) の助成を受けた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会水工学委員会: 平成15年台風10号北海道豪雨災害調査団報告書, 2004.
- 2) 升屋繁和・清水康行・升甚甲介: 河川合流点における非定常乱流モデルを用いた河床変動計算, 応用力学論文集, Vol.9, pp.1007-1014, 2006.
- 3) 重枝未玲・秋山壽一郎・森山拓士: 準3次元河床変動モデルの構築と河川合流点の河床変動への適用, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.69, No.4, I_991-I_996, 2013.
- 4) 藤田一郎・河村三郎: 開水路合流部流れの三次元構造, 水工学論文集, 第34巻, pp.301-306, 1990.
- 5) 藤田一郎・戸田敦士・田中俊史: 平行合流および10度合流の開水路流れにおける三次元構造の違い, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.68, No.4, I_811-I_816, 2012.
- 6) 重枝未玲・秋山壽一郎・森山拓士・池田寛: 合流後の流況が河川合流部周辺の流れと河床変動に及ぼす影響, 水工学論文集, 第54巻, pp.799-804, 2010.
- 7) 諸田恵士・土屋十園: 牛栓工の抵抗特性と乱流に関する実験的研究, 河川技術論文集, 第9巻, pp.191-196, 2014.
- 8) 奥山貴也・道奥康治・神田佳一・米谷駿一: 支川合流の影響を受ける大堰湛水区間における河川地形の経年変化解析, 平成26年度河川技術論文集, 第20巻, pp.307-311, 2014.
- 9) iRIC研究会: iRIC講習会テキスト in KANSAI, 2013.
- 10) 藤田一郎: PIV技術の実河川表面流速への応用, 河川技術論文集第4巻, pp.41-46, 1998.

(2016. 9. 30 受付)

BED VARIATION AND ITS CONTROL AT A RIVER CONFLUENCE ASSOCIATED WITH THE UPSTREAM RIVER TOPOGRAPHY AND RELEASE OF THE BARRAGE

Shoya TAKATA, Keiichi KANDA, Kouji MICHIOKU, Hiroki KUBO
and Yoshihiro OKAMOTO

The Kako River flows through Hyogo Prefecture. The influence of runoff due to barrage water and the Mino River tributary, combined with a meander in the river upstream from the large barrage on the Kako River (Kakogawa Barrage), has promoted the development of a sand bar on the river bank opposite the confluence. The sand bar, which has hardened, currently deflects the passage of water back to the left bank and has decreased the usable water surface area of the river. The objective of this study was to survey the river topography in the vicinity of the Mino River confluence and identify the factors responsible for sand bar development. In addition, movable-bed modeling of the channels at the tributary junction was performed to assess the influence of the barrage water and the river meander upstream on river flow, and to consider the effect of the spur dike installed for control of a sandbar. The numerical calculations were analyzed using the two-dimensional flow analysis software, Nays2DH, to verify the experimental results and to investigate how they can be applied.