「河道弯曲と堰湛水の影響を受ける河川合流部の河床変動とその制御に関する研究」

明石工業高等専門学校　　神田　佳一

1　研究の背景と目的

近年, 流域の開発に伴う洪水流量の増加によって, 都市近傍の低平地河川における洪水災害が頻発している. 特に, 計画規模の異なる支川が合流する河川合流部では, 急激な水位の上昇や合流直後の死水域の形成などによって, 複雑な河川地形が発達している. 兵庫県の加古川は, 粟鹿山(962m)を水源として南流し, 河口より 17.5km 地点で右に約 90 度大きく弯曲した後, 15.8km 地点で流域内最大支川である美嚢川が左から合流している. さらにその 4km 下流には, 治水安全度の向上と水需要への対応を目的とした加古川大堰が建設され, 1987 年から湛水が開始されており, 美嚢川合流点は, 平水時の大堰湛水区間の上流端となっている. このため, 洪水時に形成される合流点近傍の河川地形は, 美嚢川合流の影響のみならず, 上流部の弯曲と大堰による背水の影響を受け, 合流部右岸下流での砂州の肥大化, 澪筋の左岸への偏向・固定化が進行し, それに伴う水面利用域の浅水化, アユ産卵床の消失, 樹林化などの治水・河川環境上の諸課題が浮上している.

本研究では, このような加古川・美嚢川合流部周辺の河川地形の変遷とその要因を明らかにするとともに, 合流部における砂州の肥大化・安定化を抑制するための方策として, 合流部直上流の右岸側に水制工を設置した場合の洪水時の流れと砂州形状の変化について考察し, その水理機能と砂州抑制効果について検証することを目的とする.

2　研究方法・研究内容

本研究では, 加古川と美濃川合流部周辺の河川地形とその要因を明らかにすることを目的として, 現地観測と堰の湛水及び上流河道の弯曲の影響を考慮した支川合流水路を用いた模型実験を行い, 河川地形に影響を及ぼす合流部の流れ特性について考察するとともに, 砂州の制御法としての水制工の水理機能とその効果について模型実験及び数値解析手法を用いて検証し, 実河川への適用性の検討を行った.

(1)現地観測

加古川大堰建設後の水文諸量, 河床材料資料等を収集・整理するとともに, 図1に示す研究対象領域において現地の河川測量を行い, 模型実験を行うための合流部の地形条件, 上・下流端条件, 流量条件等を設定した. また, 平水時及び洪水時の合流部の河川流況を明らかにするとともに, これらの成果を模型実験及び数値解析結果の検証に用いた.

図1　加古川・美濃川合流部

(2)模型実験

合流模型実験水路を用いて合流部地形を再現し, 移動床実験を行う. 実験水路は, 図2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, 水位の調節を行う. 河床材

料については，現地の河床材料（平均粒径d=40mm）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と予測されるため，密度1.47g/cm^3，平均粒径1.3mmの一様な石炭粉を用い，10cmの厚さで本川水路及び支川水路に敷き詰め移動床とする．本・支川の流量，下流端水位及び上流部の境界条件等の実験条件については，現地観測の結果に基づいて設定する．模型実験の結果から，上流河道の弯曲や大堰の開閉操作に伴う下流水位の変化の影響を受ける合流部の流れ及び河床変動特性を明らかにし，合流部の砂州形成の支配要因を抽出した．

次に，合流部における砂州の肥大化・安定化を抑制するための方策として，合流部直上流の右岸側に水制工を設置した場合の模型実験を行い，洪水時の流れと砂州形状の変化について考察し，その水理機能と砂州抑制効果について検証した．水制模型は，図3に示すような厚さ5mmのアクリル板を重ねた台形状のもの（長さ0.2m，幅0.06m，高さ0.025m）を基本形状とし，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．

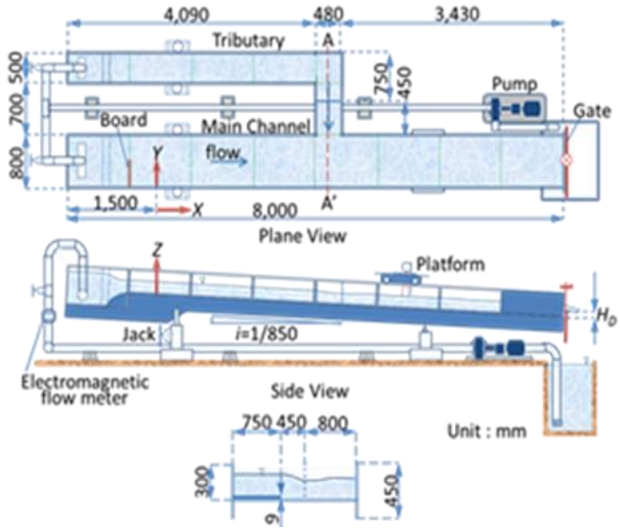

図2　合流部模型実験水路

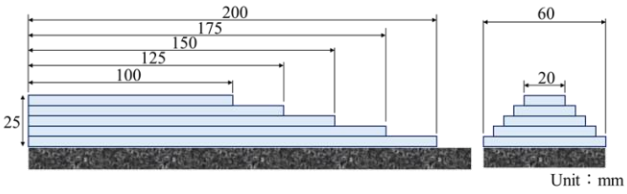

図3　水制模型

表1　実験条件

Run	本川流量 Q_M (l/s)	支川流量 Q_T (l/s)	堰高 H_D (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		
A-5L		2.5			
A-6L	3.0	1.0	0.0		
B-1L	5.0	1.0	0.0		有
B-2L	3.0				

実験条件を表1に示す通りで，洪水時を想定した本川流量Q_M=3.0，5.0l/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2.5l/sとした．下流端堰高HD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のアクリル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．

(3)数値解析

公開汎用解析ツールのiRIC-Nays-2Dを用いて移動床実験の再現計算を行い，その有用性を検討するとともに．地形形成の支配的要因と考えられる大堰による湛水や支川合流等の個

別の影響について感度分析を行った．これまでに，固定床条件下における流れの解析を行い，模型実験結果との比較から合流部の水位変動及び流速の空間分布について，その再現性の検証が行われており，これを移動床条件に拡張した．また，2次流の卓越する水制近傍については，3次元の解析ソルバーNays-Cubeを用いた解析を行い，水制近傍の詳細な河床形状の予測と実験結果との比較から，実河川への適用性を評価した．

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．

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

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

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

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

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/s^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-ε 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を用いた．

3　研究成果

(1)実験結果

(a)下流水位の影響

図-4は，流量比Q_M/Q_T=5（Q_M=5.0l/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．H_D＝0cm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．

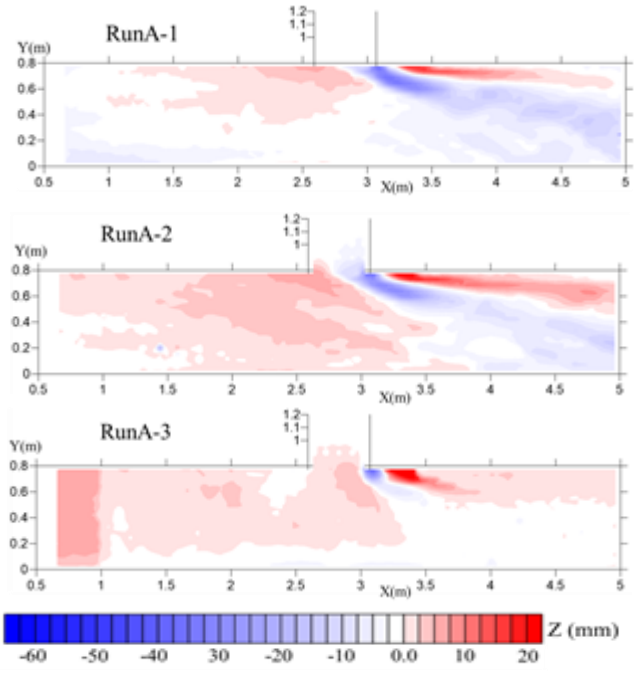

図4　下流水位による河床変動量の変化

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＝2cm）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ている．また，Run-A3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-5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，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.

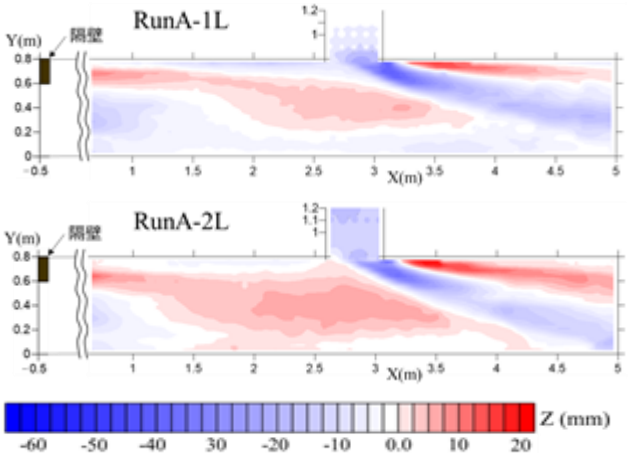

図5　上流端に板を設置した場合の河床変動量

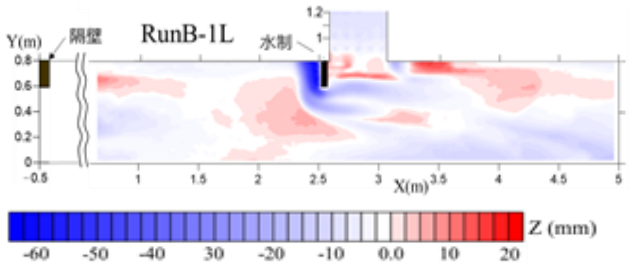

図6　水制を設置した場合の河床変動量

(c)水制を設置した場合の河床形状

図6は，RunA-1Lと同様の水理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．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，その水刎ね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. 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.

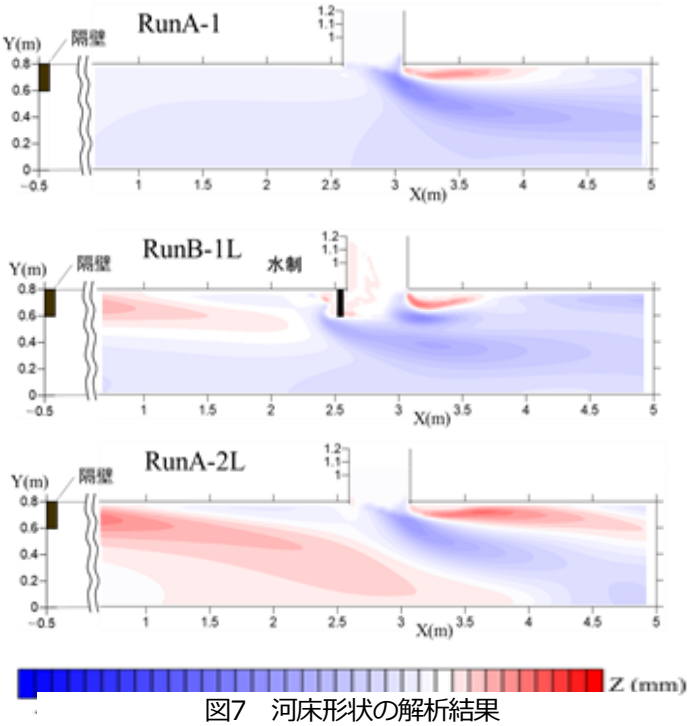

図7　河床形状の解析結果

(2)解析結果及び実験結果との比較

図7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4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8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も推察できる．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．

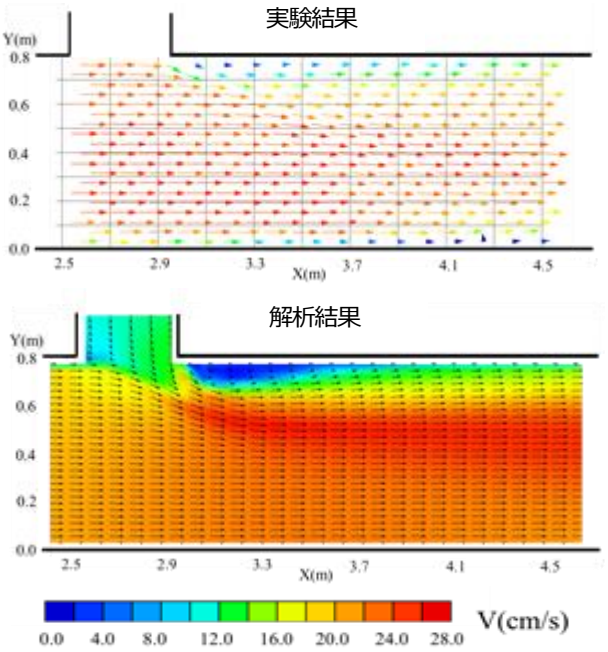

図8　流速ベクトルの比較（RunA-1）

(3)研究成果のまとめ

以下に本研究で得られた知見をまとめる．

(1) 下流端堰高が0cm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．

(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．

４　生活や産業への貢献および波及効果

本研究は、当該区間における良好な河川環境を再生するために、河川に与えられたインパクトと流れ及び地形のレスポンスとの関係を定量的に評価するものであり、河川合流部の合理的な管理手法を確立する上で工学的な知見を与えることができる．ここで用いる実験的・解析的手法の有用性が示されれば、捨石水制工、堆锁土砂の撤去及び再配置，大堰操作方法などの様々な維持管理シナリオに対する河川地形の経年変化を予測し、維持管理の枠組みの中で河川環境の再生戦略を提示することが可能となる．