

堰湛水の影響を受ける支川合流部の流れ特性に関する研究

高田 翔也¹・神田 佳一²

¹ 学生会員 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)

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

E-mail:kanda@akashi.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、加古川と美囊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、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固定床実験を行い、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した。また、2次元流れの公開数値解析ソフト Nays2D 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, barrage, tributry, hydraulic experiment, numerical simulation

1. 結論

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^{1),2)}。合流部で生じる流れと河床変動特性の解明は、防災・減災の観点から河川管理上の重要な課題であり、これまで多くの実験や数値解析に基づいた研究がなされている^{3),4),5)}。

兵庫県の加古川は、図-1に示すように粟鹿山(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囊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、美囊川合流点は、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、美囊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、滞筋の左岸への偏向・固定化が進行し(図-2)、それに伴う水面利用域の

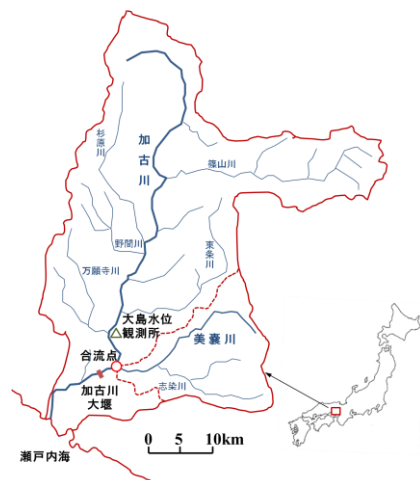


図-1 加古川流域の概要



図-2 美囊川合流部 (2014)

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，このような美囊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，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固定床実験を行い，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した。また，合流部の流れを再現できる2次元流解析モデルiRIC-Nays2D⁶⁾を用いた数値解析により，実験結果の検証とその適用性の検討を行った。

2. 加古川の概要と合流部の河川地形

加古川は，流路延長96km，流域面積1730km²の兵庫県南部を流れる一級河川である。加古川は，上流部に多くの隣接水系や谷中分水界を持ち，中流部では，河床勾配が1/600～1/800，川幅は100～200mであり，蛇行流路が発達している。また，鬮竜灘に代表されるような岩河床区間も存在する。国の直轄区間である下流部は，河床勾配が1/800～1/1000，川幅は約200～300mである。

一方，河口から15.8km地点で加古川にほぼ直角合流する美囊川は，神戸市北区を水源とし，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。合流部近傍での川幅は約120m，河床勾配は1/500であり，合流部の直上流には落差高2.0mの落差工が設置されている。

加古川大堰は，加古川総合開発事業の一環として，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，1987年に建設された多目的可動堰である。設置位置は，河口から12.0kmの地点で，有効貯水容量は1,640,000m³である。上述のように，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。近年では，大堰の設置に伴う湛水区間において，漕艇競技コースが設置され，レガッタ競技の開催など，河川水面の有効活用が図られている。一方，大堰の建設に伴う河道整備により，**図-3**に示すように，その直上流区間および合流部では，滞筋が左岸側に変移し，合流直下流の右岸に大きな砂州が形成される（**図-4**）など，加古川本川上流部の弯曲，支川の流勢，堰の湛水の影響と併せて，河川地形が変動している。

3. 合流部の流れに関する模型実験

(1) 実験の概要

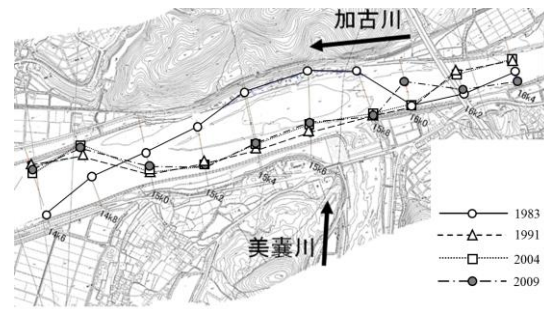


図-3 合流部の滞筋の変遷



図-4 合流部の砂州形状 (2014)

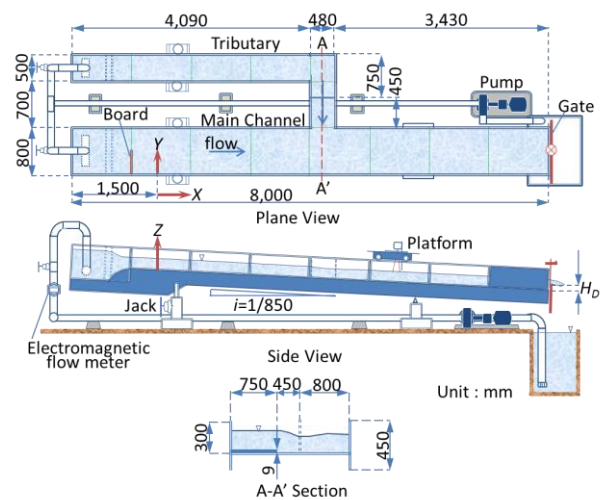


図-5 実験水路

堰による湛水効果と上流部の弯曲による滞筋の偏奇の影響を考慮した合流部の流れ特性を解明するため，現地河道を模した合流部模型実験水路を用いて，固定床実験を行った。

実験水路は，**図-5**に示すような，長さ8m，幅0.8mの本川に幅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，本川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9mmの段差を設けている。低水槽からポンプアップされた流水は，水路を流下し，

水路下流端に設置された帰還水路を通して低水槽に戻る。結果の整理上、本川上流端から1.5m下流の右岸河床面を原点として、流下方向にX軸、左岸方向にY軸、鉛直上方にZ軸をとっており、支川の中心線は $X=2.83\text{m}$ の測線上にある。本川水路の下流端には、現地の加古川大堰を模した昇降式の可動堰を設置し、水位調節を行った。

実験条件は、表-1に示すように、本川の流量 Q_M を一定(=5.0l/s)とし、支川と本川の流量比 $\lambda=Q_T/Q_M$ (=0.5, 0.2, 0.1)と下流端堰高 H_D (=0, 1, 2cm)をパラメータとして変化させた。本川流量は、フルード相似により現地の流量に換算すると $4,940\text{m}^3/\text{s}$ となり、大島観測所での既往最大流量($5,300\text{m}^3/\text{s}$)にはほぼ対応している。表中のRun番号の左側の数値は λ の逆数、右側の数値は H_D の値をそれぞれ示している。また、本川合流部の右彎曲による流れの左岸側(外岸川)への偏奇を模擬するため、 $X=-0.5\text{m}$ の断面の右側に幅0.4mの板を設置した上流端条件の基で、 $\lambda=0.2$ の場合について実験を行い(RunB5-0, B5-1)、上流の彎曲が合流部の流れに及ぼす影響について検討した。

実験では、通水時の本川の水面形を超音波変位計が搭載された台車をX, Y方向に走行させることにより、いずれも1cm間隔で自動計測するとともに、支川についてはポイントゲージを用いて10cm間隔で水位を測定した。表面流況については、粒径 $50\mu\text{m}$ のポリスチレン粒子をトレーサーとして流し、その流動を斜め上方から撮影したビデオ画像を藤田が開発したLSPIV解析法⁷⁾を用いて表面流速ベクトルを評価した。

表-1 実験条件

| 番号 | 本川流量 Q_M (l/s) | 支川流量 Q_T (l/s) | 流量比 $\lambda=Q_T/Q_M$ | 合流後の 限界水深 h_c (cm) | 堰高 H_D (cm) |
|---------|---------------------|---------------------|--------------------------|----------------------------|------------------|
| Run2-0 | 5.0 | 2.5 | 0.5 | 2.1 | 0.0 |
| Run2-1 | | | | | 1.0 |
| Run2-2 | | | | | 2.0 |
| Run5-0 | | 1.0 | 0.2 | 1.8 | 0.0 |
| Run5-1 | | | | | 1.0 |
| Run5-2 | | | | | 2.0 |
| Run10-0 | 0.5 | 0.1 | 1.7 | 0.0 | |
| Run10-1 | | | | 1.0 | |
| Run10-2 | | | | 2.0 | |
| RunB5-0 | 5.0 | 1.0 | 0.2 | 1.8 | 0.0 |
| RunB5-1 | | | | | 1.0 |

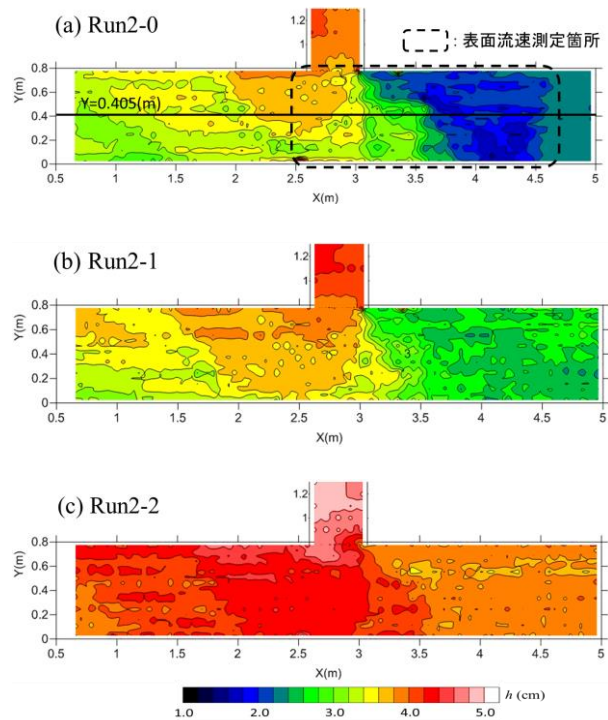


図-6 水深コンター図 (Run2)

(2) 実験結果及び考察

a) 合流部の流れ特性に及ぼす下流水位の影響

図-6は、 $\lambda=0.5$ の場合について、合流部近傍における水深分布を示したものである。また、本川水路中央部($Y=0.405\text{m}$)での水面形の縦断分布を示せば、図-7のようである。流量比 $\lambda=0.5$ 、下流端堰高 $H_D=0\text{cm}$ の場合(Run2-0)、合流部上流域の水面形は、合流に伴うエネルギー損失と貯留効果によって上昇し、堰上げ背水となっている。合流部直下流($X=3.0\sim 3.5\text{m}$)では水深は急激に低下し、その値が限界水深($h_c=2.1\text{cm}$)を下回る射流状態となるが、 $X=4.0\text{m}$ 付近で弱い跳水を伴って常流に遷移している(図-7)。合流部上・下流での水位の変化量は約2cmで、合流後の水深の1.2倍に達しており、エネルギー損失が顕著であることを示している。一方、支川の水深は本川よりも大きく、支川の中心線上では本川の横断方向にも大きな水面勾配が

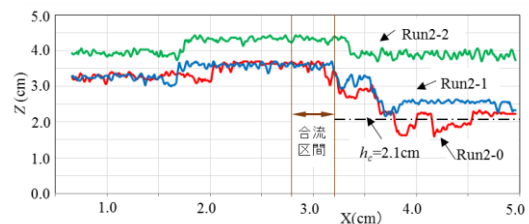


図-7 縦断水面形状 ($Y=0.405\text{m}$)

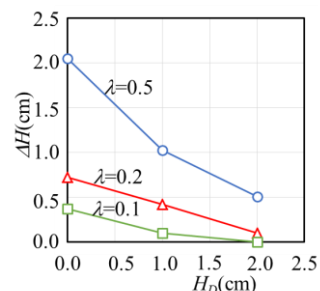


図-8 合流による水位上昇量

生じている。堰高を $H_D=1\text{cm}$ とした場合 (Run2-1), その堰上げ効果によって, 合流部下流での射流域は消滅しているが, 合流点から上流 ($X<3\text{m}$) の水面形状は変化していない。さらに下流端堰高を大きくすると ($H_D=2\text{cm}$, Run2-2), その影響が水路全体に及び, 合流点から上流部や支川においても 1.5cm 程度の水位上昇がみられる。

$X=2\sim 4\text{m}$ の範囲で合流による水位変動が顕著であったことから, 合流点の上流 ($X=2\text{m}$) 及び下流 ($X=4\text{m}$) 地点の水位差を合流による水位上昇量 ΔH として, 下流端堰高 H_D に対して整理すると, 図-8のようである。 ΔH は流量比 λ に比例して増大するが, 堰高 H_D の増加による ΔH の減少割合は λ が大きい程大きい。

図-9は, 図-6(a)に破線で示した領域において, LSPIV解析によって得られた表面流速ベクトルを示したものである。また, 本川横断方向流速 V_y のコンター図を示せば図-10のようである。両図より, 以下のことが伺える。

Run2-0(図-9(a), 図-10(a))において, 支川流入部の流れは, 右岸側に流線を大きく曲げながら加速しているが, $X=3.4\text{m}$ 付近からは逆に左岸方向の流速が卓越するようになる。本川右岸側では, 直進性の強い流れとなっている。最大流速は, 合流点

から水路幅程度下流の $X=3.7\sim 4.0\text{m}$ の水路中央部において, 水位が急激に低下している所に対応している。一方, 合流点直下流の左岸近傍では流線が剥離して平面渦が発生していることが分かる。

下流水位が上昇すると (Run2-1, 2-2), 合流後の流速値は小さくなる。合流直下流部の流線の形状はほとんど変化していないが, $X>3.4\text{m}$ での左岸方向への流速成分は小さくなり, 直進性が強くなる。このため, 左岸近傍の渦を伴う剥離域は下流水位が大きい程拡大する傾向にあり, 最大流速の発生位置も右岸側にシフトしている。

b)合流部の流れ特性に及ぼす河道弯曲の影響

図-11及び図-12は, それぞれ水面形と表面流速について, Run5-1とRunB5-1の結果を比較したものである。水路上流端の流出口を左岸側半幅に制限することによって上流部の弯曲流れを模擬したRunB5-1では, Run5-1に比べて合流部上流区間では水深が小さく, 主流部が左岸側に偏奇しており, 右岸近傍では流線の剥離により平面渦が生じている ($X<2.5\text{m}$ の領域については, 目視により剥離域の存在を確認している)。その主流部の流れは, 支川の合流によって右岸側に流向を変えながら蛇行するが, 流線の曲りが顕著であって, 合流の影響がより大きく現れている。

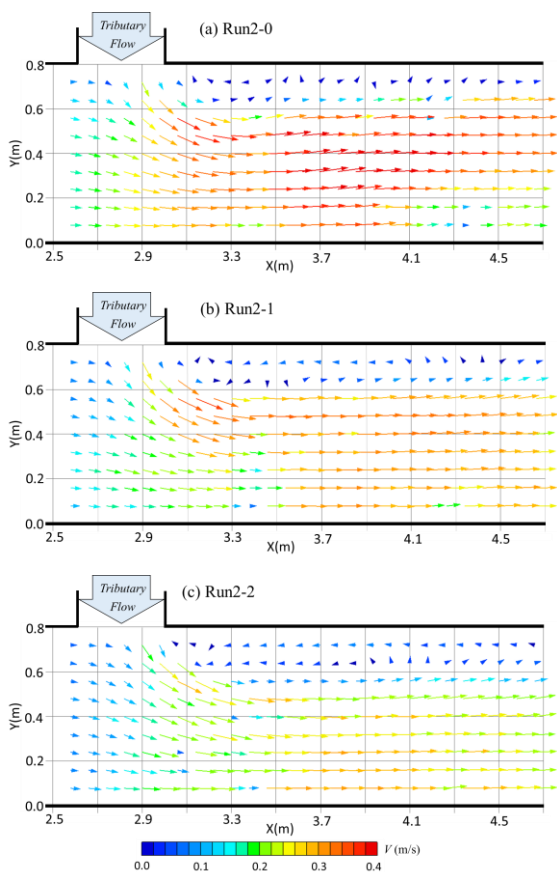


図-9 表面流速ベクトル図

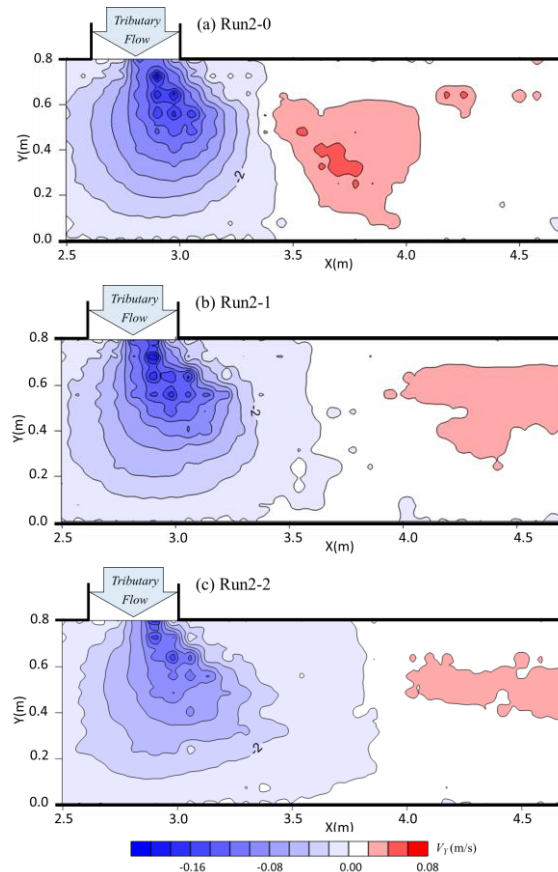


図-10 Y方向流速成分のコンター図

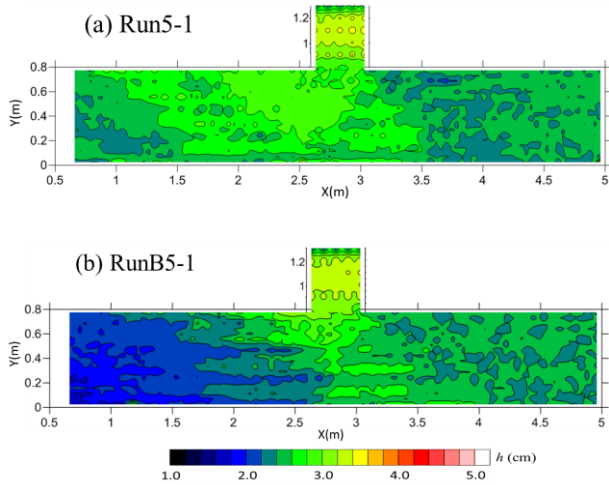


図-11 水深コンター図 (Run5-1, B5-1)

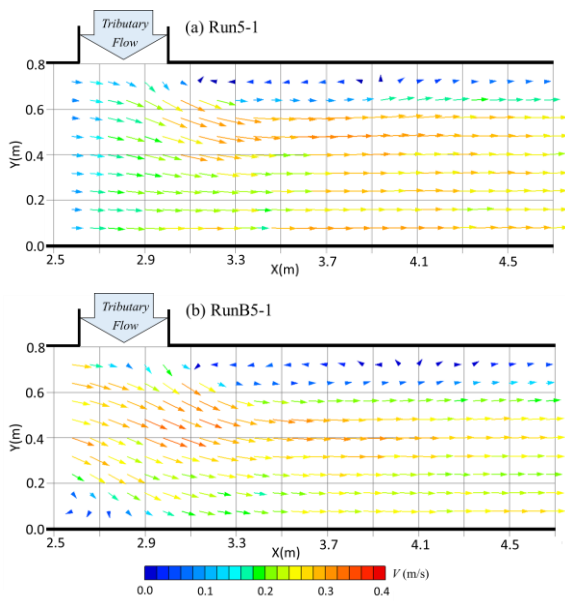


図-12 表面流速ベクトル図 (Run5-1, B5-1)

4. 合流部の流れ特性に関する数値解析

(1) 基礎式と解析方法

合流部の流れ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Nays2D⁷⁾を用いた。基礎式は、以下に示す平面二次元の連続式と運動方程式である。

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

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

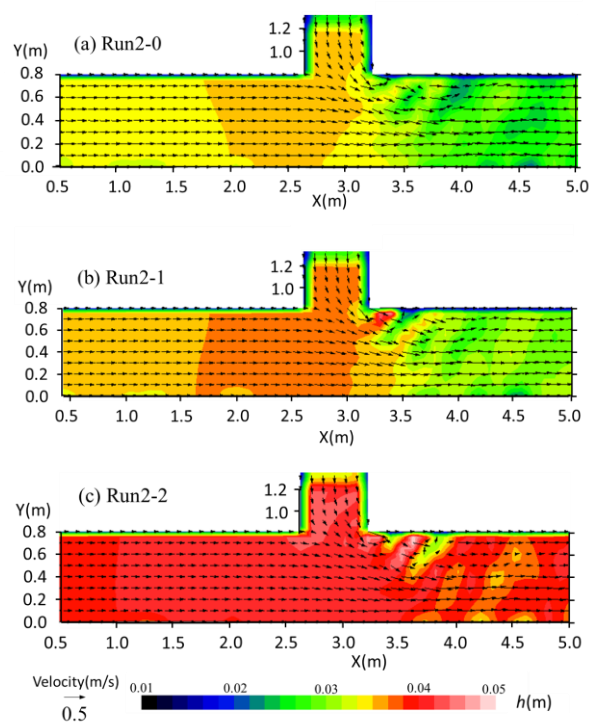


図-13 数値解析結果

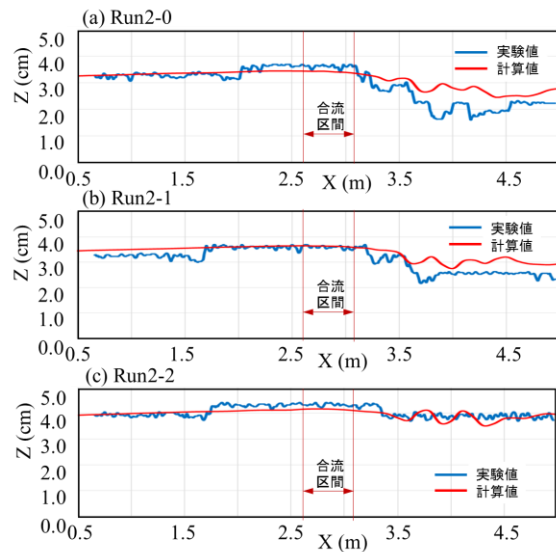


図-14 水面形の実験と計算結果の比較

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

ここで、 x, y : 平面直交座標、 u, v : x, y 方向の水深平均流速、 t : 時間、 h : 水深、 H : 水位、 g : 重力加速度、 ρ : 水の密度、 τ_x, τ_y : x, y 方向のせん断力、 D_x, D_y : 拡散項である。

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、乱流モデルは k - ϵ モデルが適用されている。境界条件としては、本川及び支川の上流端で流量を与え、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、せん断応力項には、マンニングの抵抗則を適用し、粗度係数は $n=0.01$ とした。

(2) 解析結果

図-13に $\lambda=0.5$ (Run2-0~2-2) の場合における再現計算の結果を示す。水深をコンターで、水深平均流速の平面分布をベクトルで表している。また、図-14は、 $X=0.405\text{m}$ の測線上での縦断水面形を実験結果と比較したものである。

いずれの解析結果も、合流点から上流部の水位上昇、合流部左岸での流線の曲りと剥離域の範囲など、実験結果をほぼ再現できている。一方、下流部の計算結果をみると、Run2-0及び2-1 (図14(a), (b)) では実験値よりも水深が大きくなっており、波高 0.5cm 程度の水面波が生じている。これは、実験では常・射流の混在域であって流れが不安定であること、合流部下流区間の計算領域が十分でなかったことによるものだと考えられ、今後、下流端の境界条件の設定を含め、解析手法の改良が必要である。

5. 結論

本研究は、堰の湛水及び上流河道の弯曲の影響を受ける支川合流部での流れ特性の解明を目的として、固定床模型実験及び数値解析を行ったものである。以下に得られた知見をまとめる。

- (1) 合流部の上流域ではエネルギー損失によって水位が上昇するが、下流端水位が低い場合には合流部直下流で射流域が存在する。合流部下流では、流線の曲りに伴って流れが剥離し、平面渦が発生する。堰高 H_D を大きくすると、その湛水効果は水路全体に及び、合流点から上流

部や支川においても一様な水位上昇がみられるが、下流の剥離域は大きくなる。合流に伴う水位上昇は、流量比 λ が大きい程、下流水位が小さい程増大する。

- (2) 上流の弯曲を模擬して流れを左岸側 (支川流入側) に偏奇させた場合、主流部の流れは、支川の合流によって右岸側に流向を変えながら蛇行するが、流線の曲りが顕著であって、直線流路の場合に比べて合流の影響がより大きくなる。
- (3) 数値解析による計算結果は、支川合流の影響を受ける流れ特性を概ね再現できた。ただし、合流部下流の水深は、実験結果に対して過大に評価しており、今後下流端条件の設定に改良が必要である。

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檀報告書, 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) 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.
- 4) 重枝未玲・秋山壽一郎・森山拓士:河川合流部周辺での流れと河床変動の2次元解析, 水工学論文集, 第53巻, pp.793-798, 2009.
- 5) 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, 2014.
- 6) iRIC研究会:iRIC講習会テキストin KANSAI, 2013.
- 7) 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.

(平成24年12月14日受付)

FLOW CHARACTERISTICS AT A RIVER CONFLUENCE ASSOCIATED WITH THE RELEASE OF BARRAGE WATER FURTHER UPSTREAM

Shoya TAKATA and Keiichi KANDA

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, fixed-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 observe the flow characteristics at the junction and their influence on river topography. The numerical calculations were analyzed using the two-dimensional flow analysis software, Nays2D, to verify the experimental results and to investigate how they can be applied.