

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

THE EFFECT OF FLOW BEHAVIOR AT DOWNSTREAM OF A RIVER
CONFLUENCE ON FLOW AND BED TOPOGRAPHY IN A VICINITY OF A
RIVER CONFLUENCE

重枝未玲¹・秋山壽一郎²・森山拓士³・池田寛³
Mirei SHIGE-EDA, Juichiro AKIYAMA, Takuji MORIYAMA, Hiroshi IKEDA

¹正会員 博士(工) 九州工業大学大学院准教授 工学研究院建設社会工学研究系
(〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

²フェロー会員 Ph.D. 九州工業大学大学院教授 工学研究院建設社会工学研究系 (同上)

³学生会員 九州工業大学大学院 工学府建設社会工学専攻 (同上)

The effects of flow behavior at downstream of a river confluence on the flow and bed variation in the vicinity of a river confluence were investigated experimentally. The experiment was conducted on the fixed bed as well as mobile bed to examine flow mechanism and bed morphology development in a confluence. Through the experiments, it is found that the local scour around confluence was generated by the flow toward the opposite bank of the tributary near the bed when the main stream was affected by the tributary flow and tributary bar was generated by the flow toward bank of tributary side when the main stream was weakly affected by the tributary flow. Such a characteristic were changed by the relationship of water surface profile of main stream between upstream and downstream

Key Words : river confluence, bed variation, secondary flow, sediment transport, streamline, water surface profile

1. はじめに

河川合流部は、洪水時に河床の洗掘や土砂の堆積、それに伴う水位の上昇などが生じるため、氾濫の危険性が高く¹⁾²⁾³⁾、防災・減災のいずれの観点からも重要な地点である。

合流部付近の流れについては、実験⁴⁾⁵⁾⁶⁾や3次元数値シミュレーション⁷⁾⁸⁾により、3次元的な流れの構造が解明されており、例えば、門谷と藤田⁹⁾は流れの可視化により開水路合流部の流れ場の三次元特性について検討し、底面近傍では合流部の螺旋流の影響によって底面流速が分離する特徴的な流れが生じることを明らかにしている。また、流れと河床変動との関連性についても検討している。このように、河川合流部では3次元性の強い流れが生じ、その影響によって生じる底面付近の流速は河床変動と密接に関係している。

合流部付近の河床変動については、実験や数値解析に

より調べられており、合流部に生じる局所洗掘の発生位置や形状を実験的に調べた研究⁹⁾や数値解析により実験結果の再現を試みた研究¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾などがある。これらの実験結果に着目すると、いずれも本川の合流点付近が大きく洗掘され、①支川との合流部の直下流が洗掘され、その下流に土砂が堆積する場合⁹⁾¹¹⁾¹²⁾と②直下流にはじめから土砂が堆積する¹⁰⁾¹²⁾場合とがあるようである。①の場合は合流部下流で最大局所洗掘⁹⁾¹¹⁾が、②の場合には合流部の反対側に水衝部が生じ、そこでの局所洗掘が大きくなる¹⁰⁾傾向にある。しかしながら、このように合流部の河床変動の違いが生じるメカニズムはあまりわかっておらず、どのような条件であれば、どこに局所洗掘や土砂の堆積が生じるかは不明である。また、合流部の河床変動は合流前の本川、支川および合流後の本川の流況によって変化すると予想されるが、合流後の流れの変化が河床変動に及ぼす影響を検討した研究も数少ないように思われる。これは、河川改修が下流から行われることを踏まえると、非常に重要である。

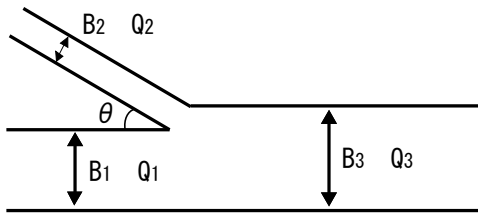


図-1 定義図

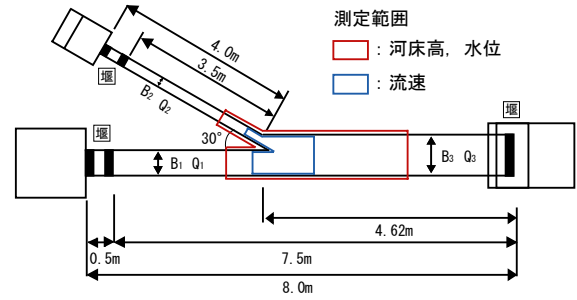
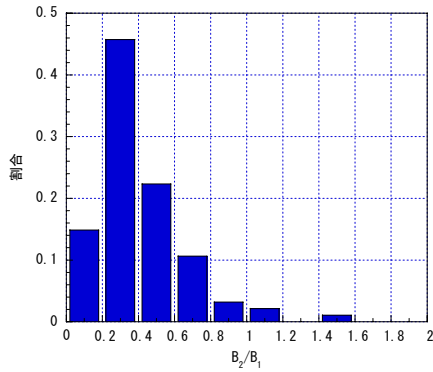


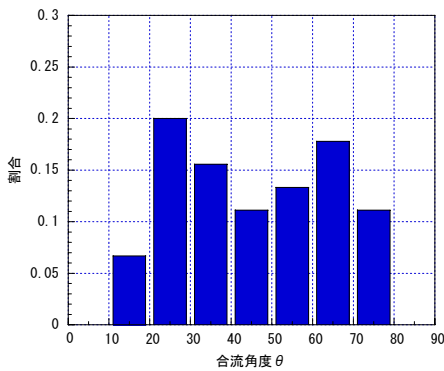
図-3 実験装置の概要

表-1 実験条件

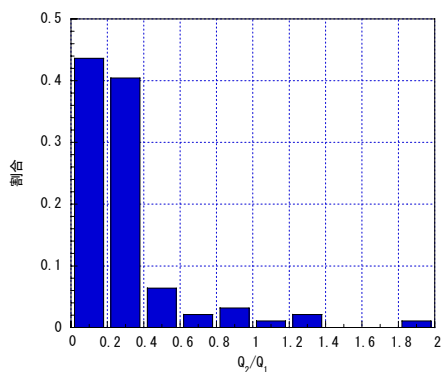
Case	B_1 (m)	B_2 (m)	B_3 (m)	流量比	Q_1 (ℓ/s)	Q_2 (ℓ/s)	Q_3 (ℓ/s)
固定床	A-1	0.25	0.1	0.30	1:0.4	3.6	1.4
	A-2			0.35			
	A-3			0.40			
移動床	B-1	0.25	0.1	0.30	1:0.4	3.6	1.4
	B-2			0.35			
	B-3			0.40			



(a) 河道幅比



(b) 合流角度



(c) 流量比

図-2 合流部の統計資料

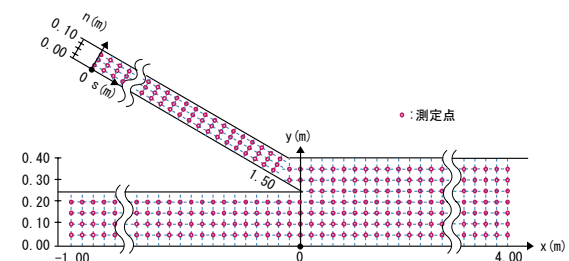


図-4 測定点

2. 実験の概要

(1) 合流部の統計資料

合流部の特性を調べる目的で、日本の一級水系の本川と支川の(1)河道幅比、(2)合流角度、(3)流量比について調査を行った。図-1に調査項目の定義図を示す。(1)河道幅比 B_2/B_1 については、Google Earth¹³⁾の航空写真を用いて、合流前の本川の河道幅 B_1 と支川の河道幅 B_2 を計測することで、(2)合流角度 θ は、Google Earth¹³⁾の航空写真を画像解析ソフトで解析することで、(3)流量比 Q_2/Q_1 は、各水系の河道整備流量配分図¹⁴⁾に基づき求めた。

図-2は調査結果を示したものである。(a)は合流前の本川と支川の河道幅比 B_2/B_1 、(b)は本川と支川の合流角度 θ 、(c)は合流前の本川と支川の流量比 Q_2/Q_1 の割合を示している。これらより、(1)合流前の本川と支川の河道幅比 B_2/B_1 の割合は0.2~0.4でピーク値となり、多くの場合0~0.8に含まれること、(2)合流角度 θ は、20~30°でピーク値となり、多くの場合20~80°に含まれること、(3)流量比 Q_2/Q_1 は0.0~0.2でピーク値となり、多くの場合0.0~0.4の間に含まれること、などが確認できる。

(2) 実験装置と条件

本実験では、調査結果を踏まえ、合流前の本川と支川

本研究は、以上のような背景を踏まえ、比較的小さい支川が本川に流入する状況を想定し、下流の流況が変化した場合に、合流部の河床変動にどのようなインパクトを与えるかを実験的に把握するとともに、そこで生じる河床変動のメカニズムについて検討したものである。

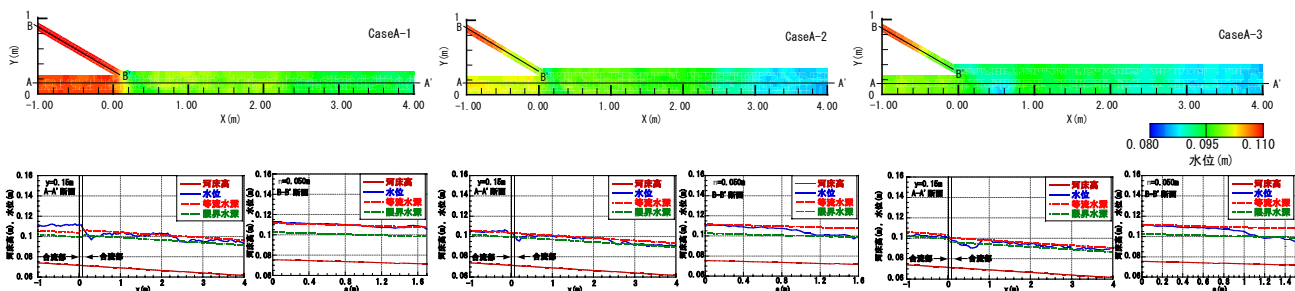


図-5 水位コンターと水面形状

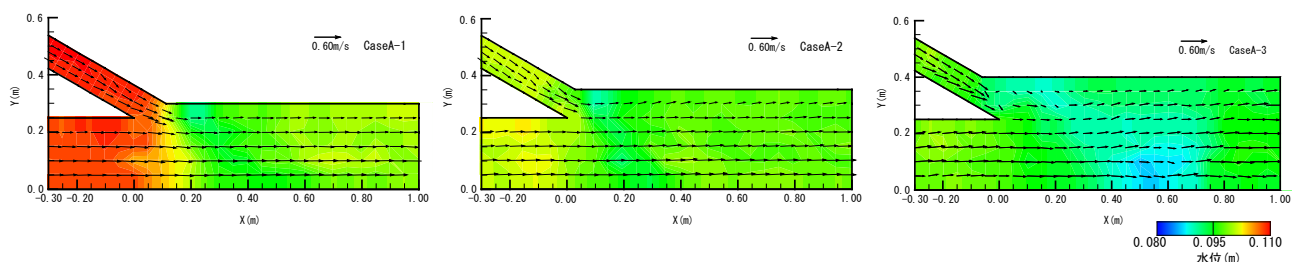


図-6 水深平均流速ベクトルと水位コンター

の河道幅比 $B_2/B_1=0.4$ ，合流角度 θ を 30° ，流量比 $Q_2/Q_1=0.4$ とした。

実験装置は，図-3に示すような本川(長さ $8\text{m} \times$ 幅 $0.4\text{m} \times$ 高さ 0.4m)と支川(長さ $4\text{m} \times$ 幅 $0.1\text{m} \times$ 高さ 0.3m)とで構成される可変勾配水路である。

実験は，固定床実験(CaseA)と移動床実験(CaseB)を行った。CaseAでは合流部下流の流れの変化が合流部周辺の流れに及ぼす影響を，CaseBでは合流部周辺の河床変動特性に及ぼす影響を調べることを目的とした。

河床勾配は，本支川共に $1/400$ に設定し，移動床の実験では，粒径 $d=0.00075\text{m}$ ，水中比重 1.65 の様な砂を実験水路に 0.06m で敷き詰めて行った。

実験条件は，表-1に示す通りである。本川と支川の流量を一定とし，合流後の河道幅を 0.30m ， 0.35m ， 0.40m の三通りに変化させた。なお，流れの状態は常流となるように設定した。

測定項目は，CaseAでは水位と水表面・水深平均流速および底面での流線を，CaseBでは水位，河床高を求めた。固定床実験では定常状態であることを確認し，移動床実験では上流端においては河床が低下しないように給砂を行い，平衡状態であることを確認した後に測定を開始した。水位と河床高については砂面測定器で，水表面の測定については，直径約 5mm の発砲スチロール球を，砂の移動方向の測定については，直径約 3mm のプラスチック球を流し，その動きをビデオカメラで撮影しPTV解析を行い求めた。なお，プラスチック球は流れに追従するわけではないので流速値は正確な値ではない。そこで，以下では底面流速については流向についてのみ議論する。水深平均流速については，電磁流速計を用いて一点法で測定した。測定点は，縦断横断方向のいずれも 5cm ずつ測定した。測定点は図-4に示す通りである。

3. 結果と考察

(1) 流れに関する考察

まず，合流部周辺の流れの把握を行った。図-5，6は，それぞれ水位コンター図と水面形状，合流部周辺の水深平均流速ベクトル図を示したものである。なお，流速ベクトル図には水位コンター図も併せて示している。これらより，(1) 合流部上流では水位が上昇し，その上昇の割合は合流後の河道幅が狭いCaseA-1，2，3の順で大きいこと，(2) 合流部周辺では水位が低下し，低下する位置はCaseA-1，2の間にはさほど大きな違いはないが，CaseA-3では下流側に移動すること，(3) 合流部付近の流速ベクトルについては，CaseA-1では右岸側に向けたベクトルであること，CaseA-2では $X=0.05\text{m}$ ， $Y=0.2\text{m}$ 付近で右岸側に向いているがほとんどが水路に沿ったベクトルであること，Case-3については水路に沿ったベクトルであること，などがわかる。合流部では支川の流入状況により，①本川の流れを対岸に押し付ける流れと②本川に沿う流れが生じるが，CaseA-1では①の流れが，CaseA-2では①と②の間中間的な流れが，CaseA-3では②の流れが生じたと考えられる。この時の本川の水面形状に着目すると，CaseA-1，2の水面形状は上流側で堰上げ背水曲線，下流側で低下背水曲線となっており，CaseA-3では上下流で低下背水曲線となっていた。なお，CaseA-1では明確な堰上げ背水であったが，CaseA-2では等流水深と同程度でさほど明確ではなかった。また，支川では，いずれのCaseについても低下背水となった。このことを踏まえると，CaseA-1では合流前の本川の流れが，合流部の堰上げによって減速され，相対的に支川の流勢が強くなり，本川の流れが支川によって対岸へ押し付けられ

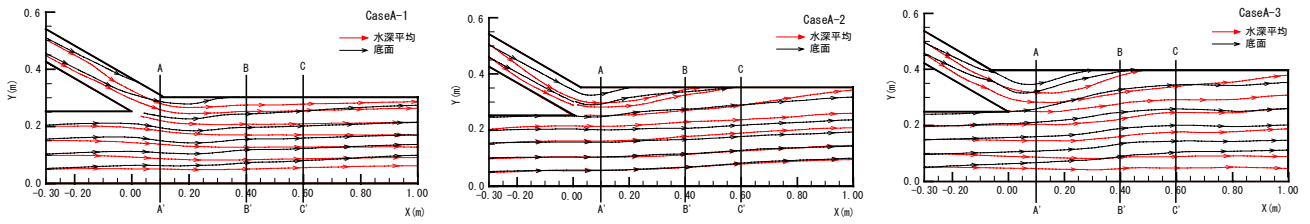


図-7 底面流線と水深平均流線

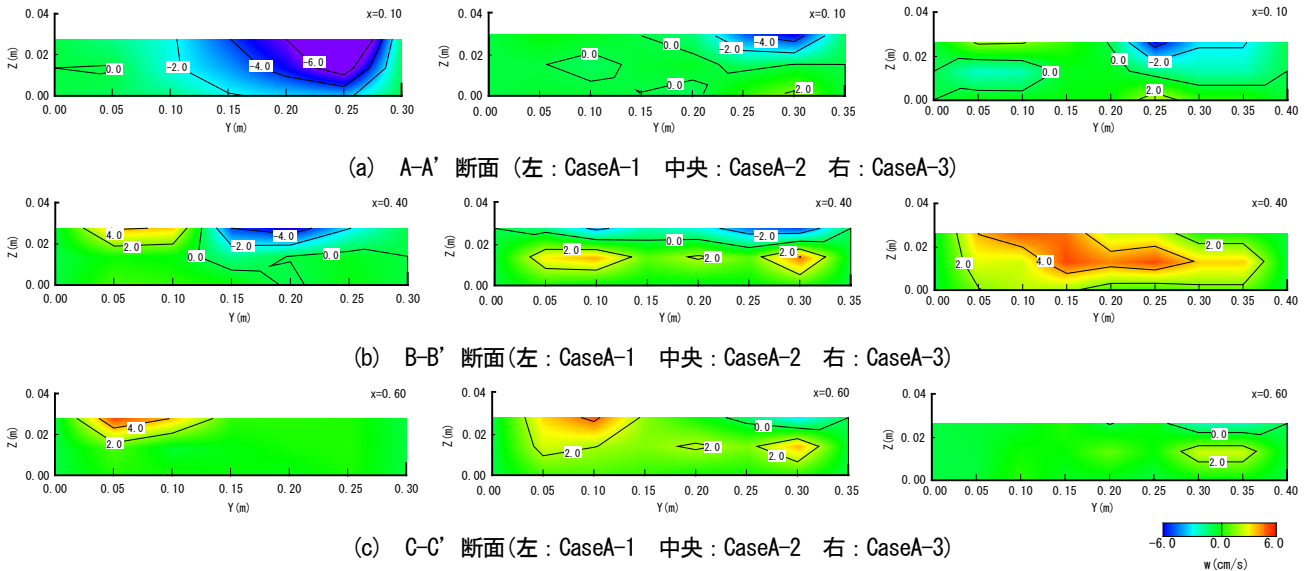


図-8 横断方向流速

たとえられる。一方、CaseA-2では合流前の本川の流
れは、合流部の堰上げの効果はさほど無いため減勢さ
れず、CaseA-3では合流前の本川の水位は合流後の本川
の水位よりも高く加速されるために減勢されず、本川に
沿った流れが生じたと考えられる。

図-7は、底面で流下するプラスチック球の流線を示し
たものである。なお、図中には水深平均流速の流線を併
せて示している。これより、合流部付近の底面流線は、
(1) CaseA-1では本川の $X=0.25\text{m}$ まで右岸側に向いて流下
し、その後左岸側へ向かうこと、(2) CaseA-2では合流部
周辺で右岸側へ曲げられる流線もあるが、CaseA-1に比
べてその曲がり小さいこと、また、下流側では左岸側へ
向かう流線であること、(3) CaseA-3ではCaseA-1、2で
みられた右岸側への曲がりはなく、いずれも左岸側へ向
かう流線であること、などが確認できる。また、合流部
付近の水深平均流速の流線と比較すると流線は大きく異
なり、特にCaseA-1では底面流線は左岸側へ向くのに
対し、水深平均流速に基づく流線は右岸側へ向くこと
から、3次元性の強い流れが生じていると考えられる。

図-8は、各Caseについて、図-7中のA-A'断面
($X=0.10\text{m}$)、B-B'断面($X=0.40\text{m}$)、C-C'断面
($X=0.60\text{m}$)の位置での表面流速、水深平均流速およ
び底面流速を用いて作成した横断方向の流速コンター
図を示したものである。正の値は左岸側へ、負の値は
右岸側へ向かう流れが生じていることを表している。
CaseA-1では、(1) A-A'断面で全体的に負の値とな
っており右岸

側へ向かう流れが生じていること、(2) B-B'断面では
水路中央部分の水面から $z=0.02\text{m}$ にかけて負の値が
生じており右岸側へ向かう流れが生じているが、水面
で生じる左岸側へ向かう流れによって流速は小さくな
ること、底面付近では正の値であり左岸側へ向かう
流れが生じていること、(3) C-C'断面では全体的に
正の値となっており、左岸側へ向かう流れが生じてい
ること、などが確認できる。CaseA-2では、(1) A-A'
断面では水面付近で負の値となっており右岸側へ流
れが生じることや、底面では左岸側付近で正の値、
水路中央では負の値となっており、左岸側と右岸側
へ向かう流れが生じていること、(2) B-B'断面では
水面付近は全体的に右岸側へ流れが生じているが、
底面では左岸側へ向かう流れが生じていること、(3)
C-C'断面では底面付近で左岸側へ向かう流れが生じ
ていること、などが確認できる。CaseA-3では、い
ずれの断面においても底面では正の値となっており、
左岸側へ流れが生じていること、などがわかる。こ
れらの結果より、(1) CaseA-1の底面付近では右岸
側へ向かう流れから流下に伴い左岸側へ向かう流れ
が生じる領域が大きくなること、(2) CaseA-2の底
面付近では右岸側へ向かう流れが生じる領域は小さ
く、ほとんどの領域で左岸側へ向かう流れが生じる
こと、(3) CaseA-3の底面付近では左岸側へ向かう
流れのみが生じることが確認された。

以上をまとめると、①合流部の堰上げ効果が大き
く、合流前の本川の水位が低く本川の流が減速され、
支川の影響が相対的に大きくなる場合には、本川の
流線が支

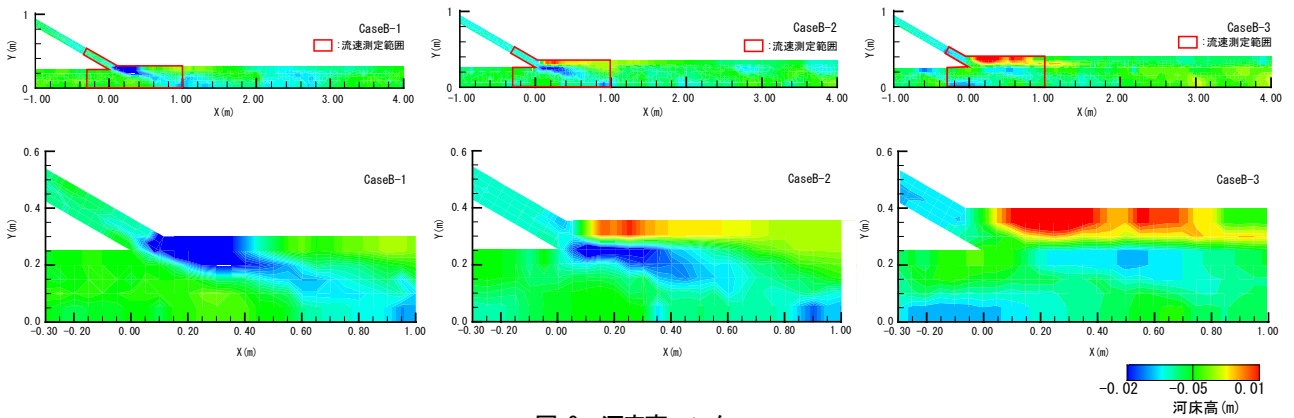


図-9 河床高コンター

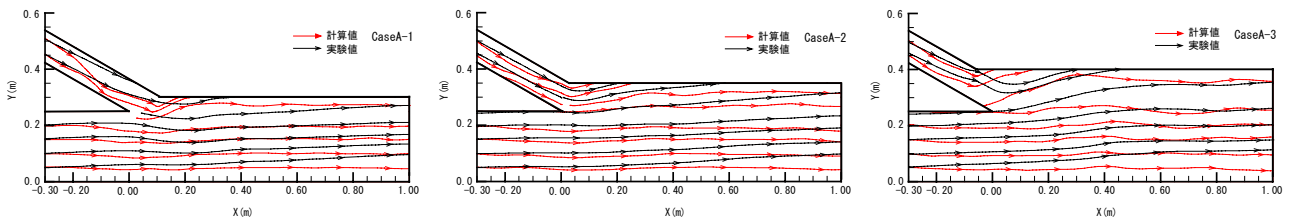


図-10 流線の曲がりから求められる底面流線と実験値との比較

川によって曲げられることで、底面付近ではCaseA-1のように右岸側へ向かう流れから流下に伴い左岸側へと向かう流れが生じること、また、②合流前の本川の水位が低く本川の流れが減速されるが、その程度が小さい場合には底面付近ではCaseA-2のように右岸側へ向かう流れはほとんど生じなくなり、ほとんどの領域で左岸側へと向かう流れが生じること、一方、③合流前の本川の水位が合流後の本川の水位よりも高く本川の影響が相対的に強く、支川の流線が本川の流線に沿う場合には、底面付近ではCaseA-3のように左岸側へ向かう流れが生じること、が確認された。

(2) 河床変動に関する考察

図-9はCaseBの河床コンターを示したものである。なお図中には流速測定を行った範囲の拡大図も併せて示している。これより、(1) CaseB-1では合流部左岸と右岸1.00m付近の水衝部で局所洗掘されること、(2) CaseB-2では水路中央付近と右岸1.00m付近の水衝部で局所洗掘が生じるとともに、合流後左岸側に土砂が堆積すること、(3) CaseB-3では局所洗掘は認められず、合流部左岸側に土砂が堆積すること、(4) CaseB-1, 2では流れに沿った流路ができていたが、CaseB-3では認められないこと、などが確認できる。

合流角度や流量比等が異なり定性的な比較しかできないが、これらの結果を従来の実験結果と照らし合わせてみると、CaseB-1の形状はWeerakoonら⁹⁾、舛屋ら¹¹⁾、著者ら¹²⁾の実験結果と、CaseB-2の形状は出口ら¹⁰⁾、著者ら¹²⁾の実験結果と類似している。また、CaseB-3は、実河川の合流部で生じる寄州に類似している。

(3) 流れと河床変動のメカニズム

以下では、上記のような河床変動が生じるメカニズムについて、(1) **流れに関する考察**に基づき考察する。

CaseB-1~3で河床変動は以下のようなプロセスで生じたと考えられる。CaseB-1については、(1) 図-9に示す左岸側の局所洗掘が生じる区間では、支川の流勢が強いために、図-6に示すように右岸側へ向かう流れが生じる。(2) この流れにより、左岸側壁付近の砂が右岸方向へ流されるとともに、図-7の底面流線に示すように、そこの砂は下流まで流送される。(3) そのため、合流部付近では局所洗掘が生じ、左岸側への流れが生じる下流では土砂が堆積する。(4) また、支川の流れに沿った流路は右岸側に到達し、側壁の影響により左岸側へ流向を変化させるので、局所洗掘が生じる。CaseB-3については、左岸側へ向かう流れのみが生じるので、合流部下流に土砂が堆積する。CaseB-2については、CaseB-1とB-3のメカニズムが混在する状況で、合流部付近では、底面で右岸側へ流れが生じる区間($y=0.2\sim 0.3m$)と左岸側への流れが生じる区間が現れるので、合流部直下流で土砂が堆積するとともに、水路中央付近で局所洗掘が生じる。

以上のようなメカニズムで合流部の河床は形成されたと考えられる。本研究の実験ケースは少なく断定はできないが、本川の合流前と合流後の水面形の形が堰上げ背水曲線あるいは低下背水曲線になるかで、そこでの河床変動の特徴が決定されるのではないかと推察される。

(4) 水深平均流速を用いた底面ベクトルの予測

合流部の河床変動の予測には、当然ながら流れの3次元性を考慮できる数値モデルが必要となる¹⁵⁾。しかし、

実現象への3次元モデルの適用は計算効率の観点から困難であるため、平面2次元モデルの枠組みで流れの3次元性を取り扱う数値モデルを用い、底面流速を評価する方法^{11), 15)}が妥当と考えられる。ここでは最も一般的な方法である局所的な流線の曲率から底面流速を求める方法の妥当性について検討した。ただし、水深平均の流速結果には当然のことながら流れの3次元性の影響が含まれているので、ここでは2次元湾曲流で求められた流速分布が合流部においても適用可能かどうかを検討していることになる。

主流方向の底面流速 u_{bs} 、主流直角方向の底面流速 u_{bn} は、それぞれ次式より求める。

$$u_{bs} = \beta U_s ; \beta = 3(1 - \sigma)/(3 - \sigma) ; \sigma = 3/(\phi\kappa + 1) \quad (1)$$

$$u_{bn} = -u_{bs} N_* \frac{h}{R_s} ; \frac{1}{R_s} = -\frac{1}{U_s} \left\{ u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} \right\} \quad (2)$$

ここに、 $U_s = (u^2 + v^2)^{1/2}$ 、 u 、 $v = x$ 、 y 方向の流速、 ϕ =流速係数(U_s/u^*)、 κ =カルマン定数(=0.41)、 $\theta = \tan^{-1}(v/u)$ 、 R_s =水深平均流の曲がりの曲率半径である。 N_* は、Engelund¹⁶⁾に従い7とした。

図-10に実験結果の水深平均流速から求めた底面流線と実験値との比較を示したものである。これより、いずれのCaseについても流向を再現しており、式(1)、(2)より、水深平均流速から底面流向の予測が可能となることが確認できる。このことを踏まえると流線の曲がりから求められる2次流分布を用いた準3次元モデルであれば、合流部での河床変動を高い精度で予測できると考えられる。この点については、今後モデルの開発も含めて検討したいと考えている。

4. おわりに

本研究では、合流後の流れの変化が河川合流部周辺での流れと河床変動に及ぼす影響を、固定床と移動床で実験を行い検討した。その結果、合流前の流れが、合流部の堰上げによって減速されると、支川の流勢が強く本川の流れが対岸側へ押し付けられ、これに伴い底面では右岸側へ向かう流れが生じ、局所洗堀を引き起こす。一方、支川の影響が小さく本川に沿った流れが生じる場合には、底面付近で左岸側へ向かう流れが生じ、合流部下流で土砂が堆積される。このような特徴は、本川の合流前後の水面形の形によって決定されると推察された。しかしながら、実験ケースが少なく断定はできない。そのため、今後は数多くの条件下で実験を行い検討するとともに、数値モデルを構築し、実験と数値解析より合流部での流れと河床変動との関係を明らかにしたいと考えている。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金若手研究B(課題番

号：21760388、研究代表者：重枝未玲)の助成を受け実施したものである。本研究を遂行するに当たり、本学学部4年生の河口武司君にはデータ整理等で多大な協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 牛山素行, 寶 馨, 立川康人, 近森秀高: 2002年8月31日~9月1日の台風15号による韓国の豪雨災害, 自然災害科学, Vol.21-3, pp.299-309, 2002.
- 2) 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, 土木学会水工学委員会, 2004.
- 3) 舛甚甲介, 清水康行: 河川合流点を含む流れに関する研究, 水工学論文集, 第49巻, pp.529-534, 2005.
- 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) Weber, J. L. Schumate, E. and Mawer, N.: Experiments of flow at a 90° open-channel junction, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.127, No.5, pp.340-350, 2001.
- 6) 門谷健, 藤田一郎: 小角度で合流する開水路流の三次元性, 水工学論文集, 第53巻, pp.925-930, 2009.
- 7) 玉井信行, 上田悟: 乱流モデルによる河川合流部の流れの予測, 水理講演会論文集, 第31巻, pp.437-442, 1987.
- 8) Bradbrook, K.F., Lane, S.N., Richards, K. S., Biron, P.M, Roy, A.G: Role of bed discordance at asymmetrical river confluences, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.127, No.5, pp.351-368, 2001.
- 9) Weerakoon, S. B. Tamai, N. and Kwahara, Y.: Bed topography, bed shear stress distribution and velocity field in a confluence, *Proceedings of hydraulic engineering*, JSCE, No.34, pp.307-312, 1990.
- 10) 出口 恭, 藤田一郎, 椿 涼太, 大菌政志: 勾配の異なる急勾配河川合流部における固定床および移動床の解析, 水工学論文集, 第51巻, pp.823-828, 2007.
- 11) 舛屋繁和, 清水康行, 舛甚甲介: 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.
- 12) 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平面2次元解析, 水工学論文集, 第53巻, pp.793-798, 2009.
- 13) Google Earth, <http://earth.google.co.jp/>
- 14) 国土交通省河川局: 河川整備基本方針・河川整備計画, http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/gaiyou/seibi/index.html
- 15) 内田龍彦, 福岡捷二: 浅水流方程式と渦度方程式を連立した準三次元モデルの提案と開水路合流部への適用, 水工学論文集, 第53巻, pp.1081-1086, 2009.
- 16) Engelund, F.: Flow and bed topography in channel bends, *Journal of Hydraulic Division*, ASCE, Vol.100, No.HY11, pp.1631-1648, 1974.

(2009. 9. 30受付)