

固定床および移動床における小角度 合流部の流れと局所洗掘の特性

CHARACTERISTICS OF FLOW AND LOCAL SCOUR AT A SMALL ANGLE CONFLUENCE IN FIXED AND MOVABLE BED

門谷 健¹・田中俊史²・藤田一郎³

Ken KADOTANI, Toshifumi TANAKA and Ichiro FUJITA

¹学生員 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

²学生員 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

³正会員 学術博 神戸大学教授 工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

Combining flows at an open-channel confluence generate local scour along the mixing zone between the two flows, since the descending helical flow increases the local bed shear stress along the dividing line. However, detailed examination of three dimensional flow structures has not been conducted so far because of the complexity of the flow. In this research, we firstly performed detailed measurements of three dimensional flow structures for a fixed bed channel by using PIV methods. Secondly, we measured surface flow velocity distribution by PIV and bathymetry by stereoscopic measurement method for a movable bed channel. It was made clear that a couple of spiral flows are actually generated at the confluence through the direct measurements. It was verified that the spiral flow becomes the cause of local scour at the confluence for the movable bed condition.

Key Words: open-channel confluence, PIV, 3-D flow structure, local scour.

1. はじめに

河川合流部では、いくつかの特徴的な流れが発生する。例えば、合流した流れ界面における自由せん断層の発達、合流部先端での淀み領域の発生、合流界面に沿ったらせん流の生成などである¹²⁾。合流角度が大きい場合には、これらに加えて下流側で大規模な非定常剥離渦が発生する点が特徴的である³⁻⁶⁾。著者らは15度という小角度で合流する流れを対象として、底面への染料注入法やPIV (Particle Image Velocimetry) などによって計測実験を行った結果、先に挙げたような合流部の特性が現れることを確認した⁷⁾。一方、河床底面が移動床の場合には、先にあげたらせん渦の影響によって局所洗掘が発生する可能性がある⁸⁻¹²⁾。Miyawaki¹³⁾らは実河川を対象とした三次元解析で合流部のせん断層付近でらせん流が発生することを報告しているが、実際に流れの三次元場を詳細に計測した例はほとんどない。

本研究では、合流角度が小さくしかも合流前後の平均流速に大きな差のない合流部においてらせん流が発生し、それが河床底面に与える影響を実験的に確認するこ

とを一つの目的としている。そのために、まず固定床の合流部を対象として詳細な流れの三次元構造を多断面PIV計測により調べる。次に、同じ水路の路床にアンスラサイト(無煙炭破碎粒子)を敷いて移動床水路とし、表面流速の計測とステレオ撮影による合流後の水路床形状の計測を行う。一般に、合流角度が大きくなると支流側下流に大規模な剥離渦が発生することが知られているが、ここでは合流部の混合層付近の流れ場に注目するために15度という比較的小さな合流角を対象とした。なお合流部のような流れ場は流れの三次元性が高いため¹⁴⁻¹⁷⁾、従来用いてきたパターンマッチングに基づくPIVでは詳細な流れ構造を捉えきれない可能性がある。そこで本研究では、高次精度の時空間微分法¹⁸⁾に基づくPIVを用いて内部流れの構造解析を行うこととした。

2. 実験概要

実験装置の模式図を図-1に示す。二台のポンプと流量計を用いてそれぞれ上流側の流量を計測できるようにしている。本研究では合流角を $\theta=15^\circ$ 、合流前の本流の

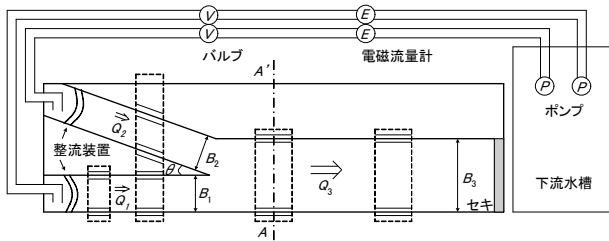


図-1 実験装置

表-1 固定床実験ケース

CASE	Q_1 l/s	Q_2 l/s	Q_3 l/s	Q_r	h cm	Fr_1	Fr_2	Fr_3
F01	0.902	0.602	1.503	0.4	4	0.24	0.16	0.2
F02	0.752	0.752		0.5		0.20	0.20	
F03	0.602	0.902		0.6		0.16	0.24	
F04	1.803	0.902	3.007	0.4		0.48	0.32	0.4
F05	1.503	1.503		0.5		0.40	0.40	
F06	0.902	1.803		0.6		0.32	0.48	

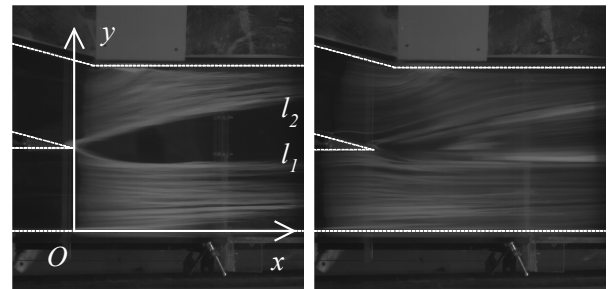
表-2 移動床実験ケース

CASE	Q_3 l/s	Q_r	Re_3	h_1 cm	h_2 cm	h_3 cm	Fr_1	Fr_2	Fr_3
M01	1.0	0.4	3333	2.1	1.5	1.8	0.28	0.68	0.43
M02		0.5		1.8	1.7	1.8	0.45	0.47	0.44
M03		0.6		1.1	1.8	1.5	0.71	0.54	0.60
M04	2.0	0.4	6666	3.8	2.8	3.3	0.34	0.36	0.36
M05		0.5		3.0	2.9	2.9	0.40	0.43	0.44
M06		0.6		2.7	3.7	3.3	0.37	0.36	0.36
M07	3.0	0.4	10000	4.9	3.4	4.1	0.35	0.40	0.39
M08		0.5		4.3	4.3	4.2	0.36	0.36	0.37
M09		0.6		3.5	4.7	4.2	0.38	0.37	0.37

h_1, h_2, Fr_1, Fr_2 は $x=-5\text{cm}$, h_3, Fr_3 は $x=35\text{cm}$ の平均水路床高さによる

水路幅 B_1 および支流の水路幅を $B_2=15\text{cm}$, 合流後の水路幅を $B_3=30\text{cm}$, 水路勾配は1/1000で一定とした。表-1に固定床実験, 表-2に移動床実験ケースを示す。ここに流量比 $Q_r=Q_2/Q_3$ とする。座標系は流下方向を x , 横断方向を y , 鉛直上向きを z とする。原点は図-2 (a)に示す。水深 h_1, h_2 , フルード数 Fr_1, Fr_2 は $x=-5\text{cm}$, 水深 h_3 , フルード数 Fr_3 は $x=35\text{cm}$ の平均水路床高さをもとに算出した。

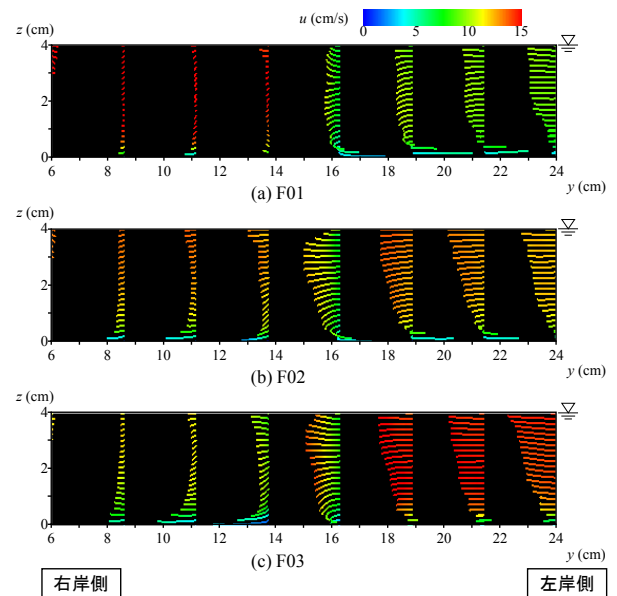
合流部の流れの特徴として, 底面での流線の分離現象が見られる。図-2 (a)は, 底面流線可視化実験⁷⁾の結果である。 $x=0\text{cm}$ の線に沿って底面に染料を注入し数十秒程度経過した後撮影した画像の多重合成画像を生成した。合流部先端から下流部に向かって染料のまったくない楔状の領域(曲線 l_1 と l_2 に挟まれた領域)が形成されることがわかる。図-2 (b)は全体に染料が分布するように染料を注入し同様に経過を待った画像であるが, 図-2 (a)の楔状の領域では下流に向かって放射状に流線が伸びて底面の分離流線が形成されていることが推定できる。即ちこの領域では底面に向かう下降流が形成されていることがわかる。このような楔状領域は他の固定床のケー



(a) $x=0\text{cm}$ で染料塗布

(b) 全体に染料塗布

図-2 白色染料による底面可視化 (F02, 多重合成)



(計測範囲: $x=0\sim15\text{cm}$, $y=6\sim24\text{cm}$, $z=0\sim4\text{cm}$)

図-3 流線の横断面投影図

スでも確認できたが, 流量比の違いに起因して領域の位置が若干ずれることも確認できている。

3. 固定床合流部の流れ構造

流れ場の計測では水路側面からレーザーシートをあてて上方から撮影した画像を用いた水平断面, および水路底面側からレーザーシートをあてて側面から撮影した画像を用いた縦断面の多断面計測を行った。水平断面計測の撮影画像サイズは $1024\times992(\text{pixel})$, フレームレートは200fpsとし, 10秒間撮影した。計測断面は底面からの鉛直距離 $z=0.2\sim3.8\text{cm}$ の9断面とした。PIVのテンプレートサイズは30pixel, ベクトル間隔は30pixel(実スケールで約1cm)とした。鉛直断面の計測では画像サイズは $1024\times496(\text{pixel})$, 合流部付近では横断方向流速が相対的に大きく粒子のレーザーシート内における滞在時間が短いため, フレームレートは500fpsとし, 8秒間撮影した。計測断面は右岸からの水平距離 $y=6\sim24\text{cm}$ の15断面とした。

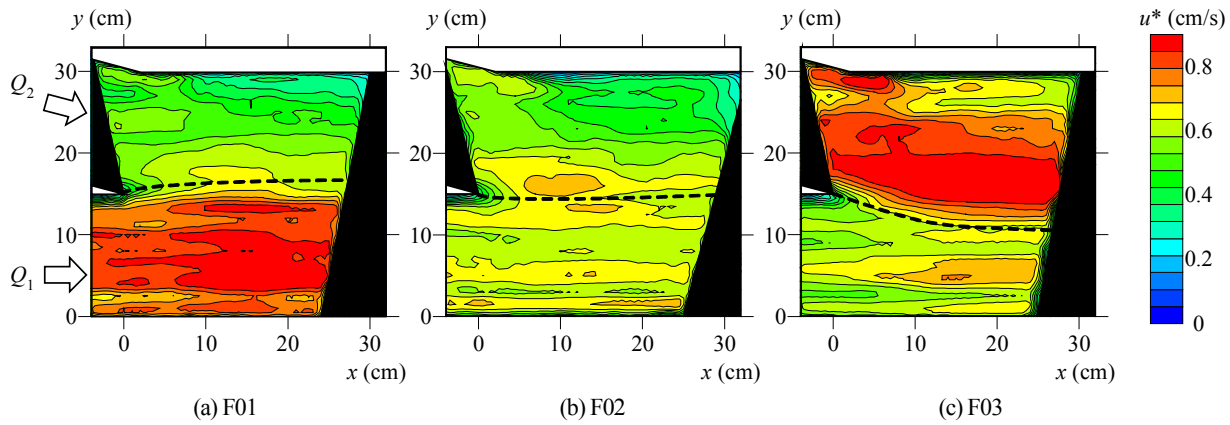


図-4 底面摩擦速度分布

テンプレートサイズは30pixel, ベクトル間隔は流下方向に対しては30pixel(約0.5cm), 水深方向に対しては詳細な鉛直成分をとらえるため10pixel(約0.17cm)とした. 縦断面計測で得られた流下方向成分 u および鉛直方向成分 w に水平断面計測で得られた横断方向成分 v のデータを加えて $x=0\sim 15$, $y=6\sim 24$, $z=0\sim 4$ (cm)の範囲の三次元速度場データを作成した.

図-3は $x=0$ から下流方向に向かって $x=15$ (cm)までプロットした三次元流線を横断面に投影した図である. 流線の色は各流線上の流下方向速度の大きさを表している. 支流に角度がついているため, どのケースにおいても支流側では負の方向に流線が伸びており, 本流側にも若干の影響がみられる. しかし流線の構造は流量比によって異なり, 本流側の相対流量が大きい図-3 (a)のケースでは本流側の流線はほとんど支流の影響が見られず流下方向を向いているのに対し, 図-3 (b),(c)では影響を受けていることがわかる. どのケースにおいても底面付近では水路中心($y=15$ cm)付近を境に外側に向かって流線が形成されている. その傾向は底面に近づくにつれて急激に大きくなっていることが特徴的で, 図-2で可視化した底面流線の傾向に一致する. 支流側の流量が小さい図-3 (a)のケースでは, 支流側でより強くこの流れが形成されているのに対し, 支流側の流量比が大きくなるにつれて本流側に移行している. また, 水路中心の $z=3$ cm付近より下では流れ場は下降流となっているのに対し, それよりも上では弱い上昇流が形成されている. すなわち $x=0\sim 15$ cmの範囲では支流側の流れは上下に分かれて本流側に流入し, 下降流の一部が支流側に反転して扁平ならせん渦を形成していることがわかる. このらせん渦構造は, 本流に対する支流の流量が小さいケースほど, 顕著にあらわれている.

図-4は $\Delta z=0.2$ cmの水平断面PIV計測結果から以下の二層モデルの式¹⁹⁾を用いて求めた底面摩擦速度分布(u^*)のコンターである.

$$\bar{u}/u^* = z^+ \quad (z^+ < 11.81)$$

$$\bar{u}/u^* = 8.3(z^+)^{1/7} \quad (z^+ > 11.81)$$

ただし $z^+ = u^* z / \nu$ である. 図-4 (a)のF01のケースでは, $y=0\sim 15$ cmの本流側の領域では支流が本流に及ぼす影響が小さいため, $y=7.5$ cmを境にして横断方向にほぼ対称的な分布を見せている. せん断力分布は帯状になっており, これは縦筋の二次流によるものであると考えられる. $y=13$ cm付近では支流側の下降流による影響も大きい. また, 支流側では流速が本流側よりも低いため全体的に摩擦速度の値が小さくなっているが支流側領域のみに着目すると $y=18$ cm付近で相対的に高い値をとっており, おなじく合流に伴う下降流の影響であると考えられる. 図-4 (b)では, 本流と支流の流速がほぼ等しいため, 支流側壁の剥離領域を除くと全体的に様に底面せん断力が分布しているが, $y=14$ cm付近を境とした両側で若干摩擦速度が大きくなっている. これも $y=14$ cm, $z=0.5$ cm付近で本流側および支流側へ向かって分離する下降流により, 高速流体塊が底面に達するためであると考えられる. なお $y=14$ cmにおいては底面付近までは下降流が達しないため, 周囲に比較して底面摩擦力が小さな値となっている. このことから図-4に破線で示した相対的に摩擦速度が低下している部分が底面での分離流線の中心に対応しているといえる. 図-4 (c)でも同様に帯状に流速が局所的にわずかに低下している領域が見られる. これらの分離流線を挟んで分布する底面せん断力は図-2に見られるような楔状の領域上に重なっており, 底面が移動床であれば洗掘を引き起こす駆動力の一端を担っている可能性がある.

4. 移動床実験

移動床における河川合流部の局所洗掘を確認するために, 本研究では実験装置に0.6mm径のアンスラサイト(無煙炭破碎粒子: 比重1.4)を敷設し実験を行った. まず所定の流量で水を循環させ, 上流から給砂をしながら水路

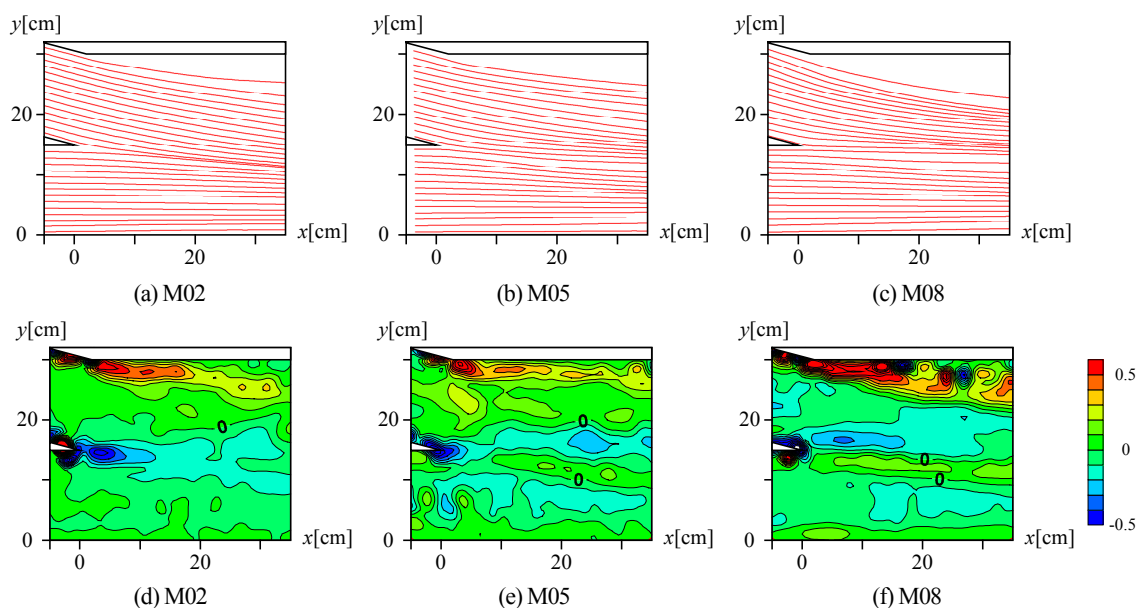


図-5 表面における表面流跡線および流速発散値の分布

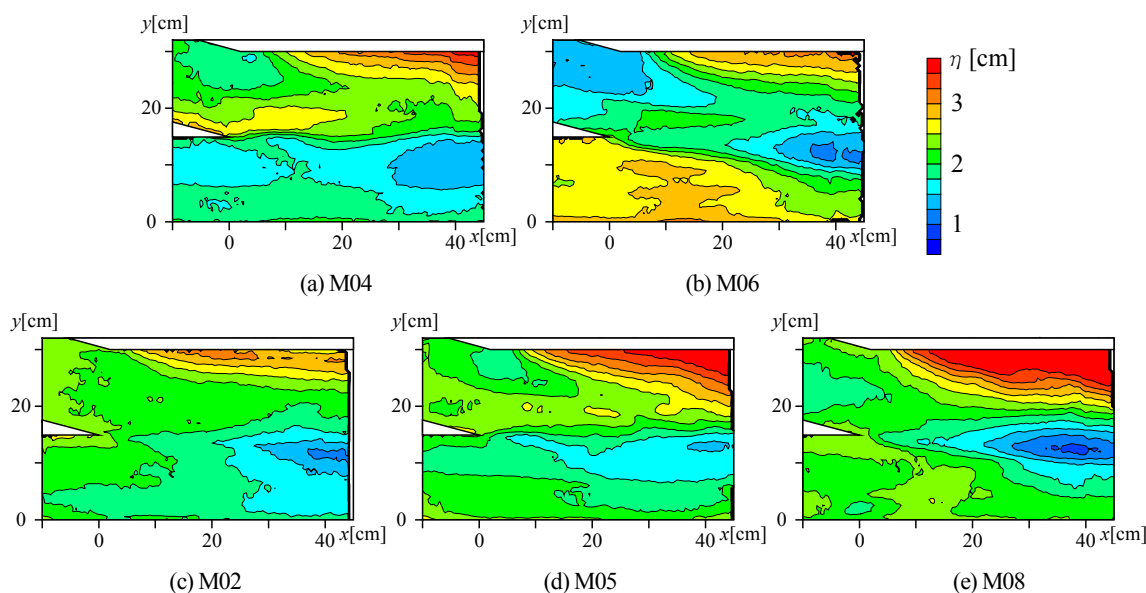


図-6 水路床形状

床変動のモニタリングを続けた。そして、ほぼ動的平衡に達したと判断した段階で $20\mu\text{m}$ のトレーサを表面に散布して100fpsで撮影した後、表面流のPIV解析を行った。次に水路の循環を停止し水の排水を行った後に、杭状のGCP(標定点)設置し、水路上方から撮影した二枚ペアのステレオ画像を画像測量ソフトErdas Imagineを用いて、水路床形状の計測を行った。

図-5に表面流計測によって得られた速度場から求めた流跡線および速度の発散値のコンターを示す。図-5 (a)のケースでは混合層付近で顕著に流跡線の間隔が減少していることがわかる。これは、この領域で下降流が発生していることを示しており、図-5 (d)では負の発散値として表れている。一方図-5 (b), (c)のケースでは混合層付近では若干流跡線の間隔が広がっているが、その両側

ではやはり間隔が減少している。これらは図-5(e), (f)において混合層付近で正の発散値、その両側で負の発散値が表れていることから確認できる。M02と他のケースで差が生じたのは、M02では水深が相対的に小さくらせん流構造が水面近くまで及んだために、水面近くでの流れの沈み込みが卓越したのに対し、他のケースでは沈み込みらせん流の上方にその反流としての上昇流が局所的に発生したためと考えられる。

図-6は水路床高(η)のコンター図である。図-6 (a)は本流の流量が支流よりも大きいケース、図-6 (b)は逆に支流の流量が本流の流量よりも大きいケースの水路床形状を表している。図-6 (c)-(e)はそれぞれ本流と支流の流量が等しいが流量規模の異なるケースの水路床形状を表している。まず特徴として挙げられるのが、すべての

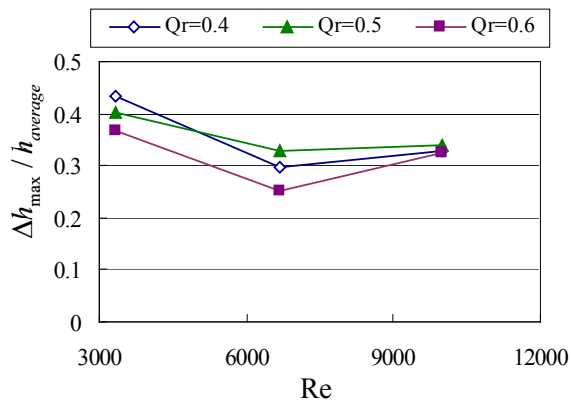


図-7 $x=40\text{cm}$ の横断面での平均河床高さに対する最大洗掘深($h_{\text{max}} - h_{\text{average}}$)の比較

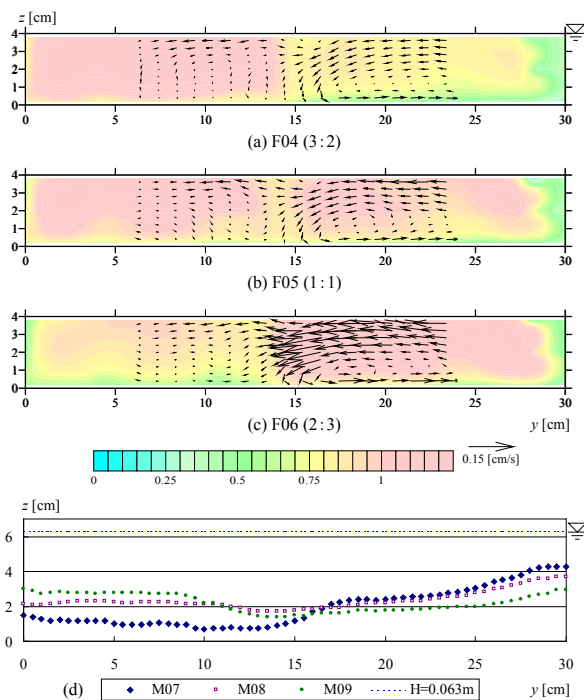


図-8 $x=15\text{cm}$ の横断面における固定床流速分布と、移動床河床形状の比較

ケースにおいて合流後の支流側において堆積が見られることである。合流角が小さいため水表面での剥離渦は小規模なものであったが、それでも支流側のコーナー部分では相対的に負圧となるため、支流から供給される流砂の一部はこの部分に捕捉されて予想以上の堆積傾向となった。この傾向は相対水深の増大につれて顕著となり、特にM08では支流側下流に大規模な堆積部（合流洲）が形成された。

もう一つの大きな特徴は、どのケースにおいても合流先端から流下方向に向かって水路床の局所洗掘が帯状に発達している点である。底面流砂の移動状況から、この帯状の部分への流砂の入り込みはわずかなものであり、逆にその両側を流砂が活発に流下している様子が見て取

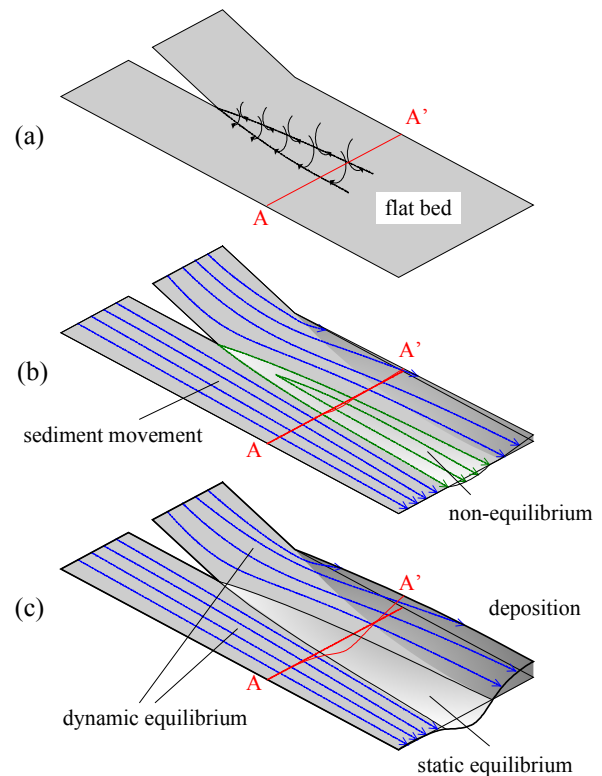


図-9 合流部洗掘課程の模式図（青および緑のラインは掃流砂の移動軌跡、A-A' は横断面形状を表す）

れた。このことから、この帯状の領域では合流部らせん流が卓越し、上流からの流砂の入り込みを阻害していることが推察される。したがって、この帯状の部分の底面は動的に変化しているのではなく限界掃流力に近い状態に漸近するものと考えられる。M08では、堆積厚の増加とともにこの部分の局所洗掘量も増大した。

図-7は各実験ケースの合流後のレイノルズ数を横軸に、 $x=40\text{cm}$ の横断面における平均水路床高さからの最大洗掘深の相対値を縦軸にとってプロットした図である。若干のばらつきはあるが、どの実験ケースにおいても0.3～0.4の付近に集中している。このことから合流部の局所洗掘量は、合流角度および水路幅一定の条件の下ではレイノルズ数に因らず、水深に依存すると推測できる。

5. 局所洗掘発達についての考察

図-8(a)-(c)に $x=15\text{cm}$ における固定床実験によって得られた横断面内流速ベクトルおよび流下方向速度のコンター、図-8(d)に移動床実験によって得られた $x=15\text{cm}$ における水路床高さを示す。固定床の実験結果図-8(a)-(c)はそれぞれ、図-3(a)-(c)の流線プロットのケースに流量比が対応しており、どのケースでも水路中心付近で底面方向へ向かう下降流が形成されていることがわかる。特に支流流量が相対的に大きくなるにつれて、下降流の

強さも大きくなっていることが、これらのケースにおいても確認することができる。図-8(b)のF05および図-8(d)のM08のケースは合流前の流量が等しく水深もほぼ等しいためここで比較してみる。図-8(b)のF05では混合層水面付近で弱い上昇流が形成されていて、その支流側で沈み込みが見られるが、これは図-5(f)の発散分布と一致していることからM08の流れ構造もF05と類似した構造となっていると考えられる。M07, M09については、初期状態ではそれぞれF04, F06に類似した流れ場により水路床変動が促進されるが、動的平衡状態では本・支流で接近流速がほぼ等しくなるため、局所的にはF05に近い流れ構造となって混合層付近で下降流が形成されるものと考えられる。

これまでの実験結果および移動床における流砂運動の観察から、合流部における河床変動過程の模式図を描くと図-9のようになる。まず、初期の平坦床の状態では合流部混合層の河床底面近傍で互いに外向きの流速成分をもつらせん流が生じる(図-9(a))。次に、流砂移動の開始に伴って本流と支流から掃流砂が流下してくるが、このらせん流が存在しているために、合流部下流の楔状の領域への流砂の侵入が阻害される(図-9(b))。楔状の領域内では局所的に外向きの流れが生じているために、非平衡状態で徐々に洗掘が進行する。一方、支流側下流ではコーナーに向かう流れによって流砂の堆積が始まる。この楔状領域での洗掘とコーナー部への堆積は本流と支流からの供給砂が動的平衡に至るまで継続し、最終的には図-9(c)に示すような河床形状へと発達する。このとき、楔状領域内の流砂は静的平衡状態に近づき、その両側に動的平衡状態で流下する流砂が存在し、さらに支流側下流では流砂が堆積するといった複雑な移動床の状態(図-9(c) A-A')が生じる。このような河床状態の影響はかなり下流にまで及ぶが、最終的には全幅に渡る動的平衡状態に到達する。

6. おわりに

本研究では、大規模な合流部剥離渦が発生しない小角度の合流流れを対象として実験的な検討を行った。特に合流部の先端から発達するらせん流の構造に着目して検討を行った結果、合流部らせん流が合流部の河床形状の発達に重要な役割を果たしていることを示した。ただし、合流部らせん流の下流への影響範囲については実験水路長の制約もあって検討できなかった。

今後は、乱れが局所洗掘に及ぼす影響の有無の検討、合流角度および水路幅が洗掘に及ぼす影響について研究を進めるとともに、二次元あるいは三次元の数値解析モデルによる再現計算を行う予定である。

参考文献

- 1) Biron, P., Best, J. L., and Roy, A. G.: Effects of bed discordance on flow dynamics at open channel confluences, *Journal of Hydraulic Engineering*, 122, 676-682, 1996.
- 2) 谷一郎：せん断流れにおける縦渦の形成，ながれ，Vol.2, pp.160-165, 1983.
- 3) Best, J. L. and Reid, I.: Separation zone at open channel junctions, *J. Hydraulic Engineering*, 110, 1588-1594, 1984.
- 4) 藤田一郎・河村三郎：離散渦法による合流部流れの解析，土木学会論文集，411号/II-12, pp.25-33, 1989.
- 5) 藤田一郎・河村三郎：画像処理による合流部大規模剥離渦の運動特性に関する研究，水工学論文集，36巻，pp.187-192, 1992.
- 6) 板倉忠興：河川合流点における流れの機構の研究，水理講演会講演集，Vol.16, pp.7-12, 1972.
- 7) 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，53巻，pp.925-930, 2009.
- 8) Best, J. L.: Sediment transport and bed morphology at river channel confluences, *Sedimentology*, 35, 481-498, 1988.
- 9) 出口恭・藤田一郎・椿涼太・大藁政志：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，51巻，pp.823-828, 2007.
- 10) 藤田一郎，河村三郎：動的平衡状態における合流部の河床形状，土木学会第41回年次学術講演会講演概要集第2部，pp.395-396, 1986.
- 11) Gaudet, J. M. and Roy, A. G.: Effect of bed morphology on flow mixing length at river confluences, *Nature*, 373, pp.138-139, 1995.
- 12) Rhoads, B. L. and Kenworthy, S. T.: Flow structure at an asymmetrical stream confluence, *Geomorphology*, 11, pp.273-293, 1995.
- 13) Miyawaki, S., Constantinescu, G., Kirkil, G., Rhoads, B. and Sukhodolov, A.: Numerical Investigation of Three-Dimensional Flow Structure at a River Confluence, 33rd IAHR Congress, 2009.
- 14) 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，34巻，pp.301-306, 1990.
- 15) 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，Vol.31, pp.437-442, 1987.
- 16) Weerakoon, S. B. and Tamai, N.: Three-dimensional calculation of flow in river confluences using boundary fitted coordinates, *J. Hydrosience and Hydraulic Engineering*, 7, pp.51-62, 1989.
- 17) 福岡捷二・五十嵐崇博・西村達也・宮崎節夫：河川合流部の洪水流と河床変動の非定常三次元解析，水工学論文集，Vol.39, pp.435-440, 1995.
- 18) 藤田一郎：時空間微分に基づく高精度PIVの開発，水工学論文集，48巻，pp.721-726, 2004.
- 19) Werner, H. and Wengle, H.: Large-eddy simulation of turbulent flow over and around a cube in a plane channel, *Turbulent Shear Flow* 8, pp.155-168, Springer-Verlag, Berlin, 1991.