

急勾配河川湾曲部における流れと側岸浸食 に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON FLOW AND BANK EROSION
IN STEEP AND CURVED RIVER

有光 剛¹・大江一也²・出口 恭³・森山陽一⁴・藤田一郎⁵

Tsuyoshi ARIMITSU, Takashi DEGUCHI, Yoichi MORIYAMA and Ichiro FUJITA

¹正会員 博(工) 関西電力株式会社 電力技術研究所 (〒661-0974 兵庫県尼崎市若王寺3-11-20)

²正会員 工修 関西電力株式会社 電力技術研究所 (〒661-0974 兵庫県尼崎市若王寺3-11-20)

³正会員 工修 株式会社ニュージェック 河川グループ (〒531-0074 大阪府大阪市北区本庄東2-3-20)

⁴学生会員 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

⁵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 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

It is very difficult to evaluate the quantity of sediment transport in steep rivers and there are many unknowns concerning the relation between flow characteristics and bank erosion. This paper aims at investigating the characteristics of sediment transport as well as bank erosion process in curved steep slope rivers through hydraulic experiments. The experiments were conducted by varying the width and the curvature of the trapezoidal channel for different discharges. Riverbed elevation was measured at start and end of each test. By using two kinds of tracers, not only surface flow pattern but also depth-averaged velocity distribution could be measured, from which the difference between each flow pattern was made clear. Flow pattern near the bed was also estimated by analyzing transport of the colored sand. It was also made clear that bank erosion process and characteristics of sediment transport were influenced by the complicated secondary flow generated due to the strong curvature of the channel.

Key Words : steep river, bed form, bank erosion, secondary flow, sediment transport, PIV

1. はじめに

近年、ダム貯水池の機能維持や水系一貫の土砂管理の観点から、いくつかのダムでフラッシング排砂、排砂バイパストンネル、ダム下流への置土などによるダム堆砂の下流河川への還元が試みられている。これらの方法はいずれも未だ試行錯誤の段階であり、効果的な堆砂対策技術とその運用方法は確立されていない。地点特性に合わせた最適な方法の選択と、その効率的な運用方法のためには、河川上流域における河床変動状況、流下土砂の量や質、さらに流下土砂が下流の河川環境に及ぼす影響を予測する必要がある。特に湾曲部では、2次流の発生や外岸部の河床洗掘、内岸部での砂州の発達等、複雑な土砂水理現象が起こるため、さまざまな程度の蛇行がみられる山地河川ではこれらの諸元を定量的に評価し、土砂移動やそれに伴う河床変動を的確に予測することが重要となる。しかしながら、周辺に人の居住がない山地河

川では、沖積河川と比較すると工学的意義が弱く研究が遅れているのが現状である。

上流域の河床形態については、水深スケールの小規模起伏・流路幅スケールの中規模起伏・谷幅スケールの大規模起伏に分類され、それぞれの成因について、長谷川・藤田¹⁾、長谷川²⁾、沢田・芦田³⁾が現地調査に基づき考察を行っている。また目黒ら⁴⁾による水理実験でも、複数スケールの形態が再現されている。一方で、山地河川の河床変動の予測に関しては、ダム建設などによる大規模な縦断地形変化の予測に用いられてきた1次元河床変動計算が、現在ある程度の精度で予測が可能となっており、河道計画立案時には重要な役割を果たしている。ただし、湾曲部における浸食や堆積が引き起こす河床形状の横断的な変動を考慮してより精度良く河床変動を計算するためには、平面的な取り扱いが必要となるが、急勾配河川湾曲部における側岸浸食を含む河床変動に関しては十分な検討がなされていない。例えば、芦田ら⁵⁾は、急勾配河川の側岸浸食に関する水理実験を行っているが、

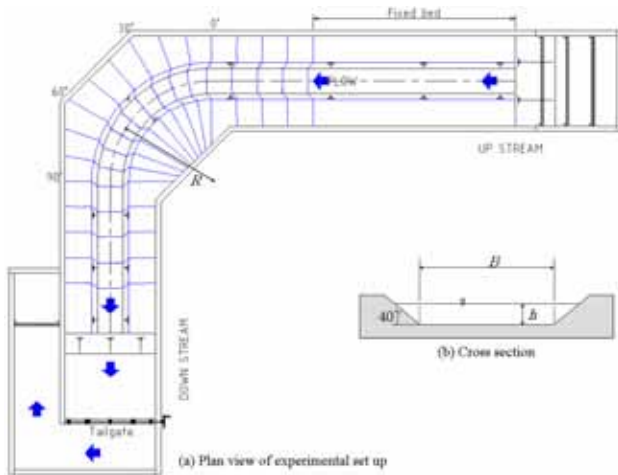


図-1 実験装置

直線水路を用いており、湾曲部における流れや側岸浸食に関する議論はなされていない。

湾曲部における側岸浸食に関する水理実験は、福岡ら⁶⁾、守田ら⁷⁾が一樣湾曲水路、清水ら⁸⁾、Rahman⁹⁾らが蛇行流路を用いて実施している。これらの実験に基づき、関根¹⁰⁾、清水ら⁸⁾、長田ら¹¹⁾は側岸浸食を含む河床変動を数値解析により検討している。しかし、これらの側岸浸食を考慮した河床変動計算の対象はいずれも沖積河川であり、急勾配な山地河川への数値計算モデルの適用性については確認されていない。湾曲部を通る射流は、Knappの式¹²⁾や台形断面を対象としたLenauの式¹³⁾、岩佐らの解析法¹⁴⁾のように、常流とは異なる水理現象がみられることから、緩勾配河川湾曲部を対象としていた従来の数値計算モデルの適用が可能であるかは不明である。

本研究では、急勾配河川の側岸浸食を含む河床変動の予測手法の確立し、ダム堆砂対策の評価に用いることを最終目標としている。本検討は、その第1ステップとして単一湾曲水路を用いた基礎的な水理実験を行い、急勾配河川湾曲部の側岸浸食を含む河床変動特性に影響をおよぼすパラメータに関する検討をおこなったものである。

2. 実験装置および実験方法

(1) 実験装置

水理実験には、図-1に示す幅2m、長さ12mの水槽内に設けた湾曲水路を用いた。中心角90°の湾曲部の上下流に直線区間を設けている。河床勾配は1/80とし、低水路は法面勾配40°の台形断面とした。固定床実験では1通り、移動床実験では川幅および曲率半径の組み合わせを変化させた合計5通りの湾曲水路を製作した。固定床実験の河床はモルタル、移動床実験はほぼ一樣な粒径 $d=1.86\text{mm}$ の珪砂を用いて整形した。循環式のポンプで河道に給水し、インバータと手動バルブおよび電磁流量計で所定の流量に調整を行った。

表-1 固定床実験ケース

Case	曲率半径 R	川幅 B	流量 Q
F1	2m	0.5m	0.0170 m^3/s
F2			0.0085 m^3/s

表-2 移動床実験ケース

Case	曲率 半径 $R(\text{m})$	川幅 $B(\text{m})$	流量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$	等流 水深 $h(\text{cm})$	Froude数 Fr	通水時間 $t(\text{min})$
M1	2.0	0.3	0.0085	3.2	1.39	21.5
M2			0.0113	3.8	1.40	43
M3	2.0	0.5	0.0085	2.4	1.40	57
M4			0.0170	3.6	1.48	12
M5	3.0		0.0085	2.4	1.40	57
M6			0.0170	3.6	1.46	21
M7	2.0	1.0	0.0085	1.6	1.35	55
M8			0.0170	2.4	1.43	15.5
M9	3.0		0.0085	1.6	1.35	58
M10			0.0170	2.4	1.43	31

(2) 固定床実験方法

固定床実験では表-2に示すとおり、1種類の平面形状に対して、2通りの流量を通水した。対象とした流量はいずれも低水路満杯流量以下である。

実験は、所定の流量を定常的に通水して流れが安定した後、超音波水位計を用いて湾曲部は10°間隔、直線区間は0.5m間隔で設けた測線上の中央・左右岸沿いの水位を計測した。また、通水中の流況は水面の上方約4mの高さから2台のデジタルビデオカメラで撮影し、後述する可視化手法により流速を解析した。

(3) 移動床実験方法

移動床実験の条件を表-2に示す。移動床実験では、湾曲部の曲率半径を2mおよび3mの2種類、川幅を0.3m、0.5mおよび1.0mの3種類の組み合わせとし、各形状に対して流量を2ケースずつ設定し、合計10ケースの実験を行った。なお、対象とした流量はいずれも低水路満杯流量以下である。

実験は、整形した初期河床に対して、表-3に示す時間通水を行った。通水前後に、湾曲部では10°毎、直線部では0.5m毎に設けた測線において、レーザー変位計を用いて断面形状の計測を行った。高速流が発生し、河床の変化速度が大きくなり、通水途中の実験中断が河床変動におよぼす影響が大きいため、本研究では地形計測を通水前後のみとしたため、通水中の地形変化状況は確認できない。通水時間は、ビデオテープの録画可能時間とした。ただし、外岸の浸食の進行が顕著なケースについては、法肩が水槽の壁に到達する前に通水を停止した。なお、Case M7については、初期地形整形時に側岸の一部に着色砂を用い、通水時に着色砂流下状況を観測することで、浸食土砂の流下特性を検討した。

表-3 PIV解析パラメータ

ピクセルの物理長さ	0.0025m/pixel
テンプレートサイズ	30×30pixel
テンプレート数	約1500個
フレームレート	30fps
画像数	約750枚

(4) 流れ場の可視化

画像解析にはPIV (Particle Image Velocimetry) を用いた。これは、従来の実験で用いられるピトー管や電磁流速計といったプローブタイプの計測機器を用いた点計測では、湾曲部のように流れが平面的に大きく変化する場合の流況の把握のためには数多くの計測点が必要となることや、移動床実験において計測プローブそのものが流れを乱し不必要な河床変動を引き起こす可能性があるためである。

本検討で対象とした湾曲部のように強い2次流が発生する場合には、表面流と内部流に大きな差が生じる。そこで表面流および内部流の流れの差異を明確にするために、トレーサーとして表面に散布する塩化ビニル粒子およびポスターカラーを水で溶いた染料を用いて、表面流と水深平均的な流れの計測を行った。なお、森山ら¹⁵⁾は、これらの2種類のトレーサーにより、表層流と水深平均流の流況を解析が可能であることを示している。

画像解析に用いたパラメータを表-3に示す。通常、PIV解析で発生する異常値ベクトルを除去するためには、テンプレート内の輝度値の相互相関係数に閾値を設定する。ただし、染料をトレーサーとして用いた場合には、水中への噴霧直後から生じる拡散によりテンプレート内の輝度パターンの変化が乏しくなったため、本検討では相互相関係数に加えて、輝度値の分散値、最大輝度差といったパラメータに閾値を設けることで、より厳密なフィルタリング処理を行った。

3. 急流河川湾曲部の流れ場の数値計算

本検討では、湾曲部の流れ場の特性の把握のために固定床実験を行ったが、対象とした河川形状は1種類のみであり、曲率半径や川幅などのパラメータが流れおよび影響を把握することができない。そこで、数値計算により、形状が異なる河川における流れ場を推定する。本研究の最終目標は、山地河川で生じる複雑な現象を的確に表現できる流れおよび土砂移動の数値計算モデルの構築であり、本検討はその第1ステップである。山地河川では縦断方向に谷幅の変動が大きく、また排砂時の水位低下に伴う側岸浸食や、河川内の置土の洪水流による浸食のように、非常に複雑な流れや地形変化が生じると考えられるため、今後地形変化の数値計算を行うことを念頭に、複雑地形への適用が比較的容易である非構造格子

表-4 数値計算ケース

Case	曲率半径R	川幅B	流量Q
N1	2.0m	0.5m	0.0170m ³ /s
N2			0.0085m ³ /s
N3	3.0m	0.5m	0.0170m ³ /s
N4			0.0085m ³ /s
N5	2.0m	1.0m	0.0170m ³ /s
N6			0.0085m ³ /s

を用いた有限体積法¹⁶⁾を採用し、急勾配河川湾曲部における平面2次元の流れ場の計算を試みた。

計算条件は表-4に示すとおりとし、固定床実験と同じ水路形状の計算 (Case N1, N2) により数値計算の妥当性を検証した上で、曲率半径および川幅を変更した条件に対する計算を行った。

4. 急流河川湾曲部の流れ場

(1) 水位分布

ここでは、急流河川湾曲部流れの水位分布について、計算結果と実験結果およびLenauの式との比較を行い、流れの数値計算の妥当性を検証するとともに、河床形状が流れに及ぼす影響について整理する。

射流湾曲部の流れは、湾曲の始点より出る衝撃波および下流で発生する衝撃波の干渉のため、水面は縞模様に変化して常流の場合とは著しく異なる。Lenauは台形断面を有する湾曲水路の外岸側で最初に最大水位が生じる位置 $\theta_{\max}$ と水位偏差 $\Delta h_{\max}$ について次式を導いている。

$$\frac{\Delta h_{\max}}{h} = F_r^2 \frac{B}{R} \left(2m \frac{h}{B} + 1 \right) \quad (1)$$

$$\theta_{\max} = F_r \frac{B}{R} \left(2m \frac{h}{B} + 1 \right) \beta \quad (2)$$

ここで、 m は側岸勾配、 β は衝撃波角と呼ばれ、 $\sin \beta = (1/F_r)$ とあらわされる。他の変数については表-2に用いているものと同じである。

固定床実験のCase F1, F2における両岸沿いの水深分布を図-2に示す。図中には、同じ条件で計算した数値計算のCase N1, N2の結果と、Lenauの式から求めた最初の最大水深が生じる位置とそこでの水深を合わせて示している。湾曲部下流側における水深分布は、実験結果と比べると計算値の変動が小さいものの、両岸沿いの水位分布に関しては、計算値と実験値が同様の傾向を示している。また、最初に水深最大となる位置およびその水深に関してはLenauの式とも概ね一致している。

図-3に、数値計算のCase N1～N6における最初に水深最大となる位置 $\theta_{\max}$ の計算結果と、Lenauの式から求めた

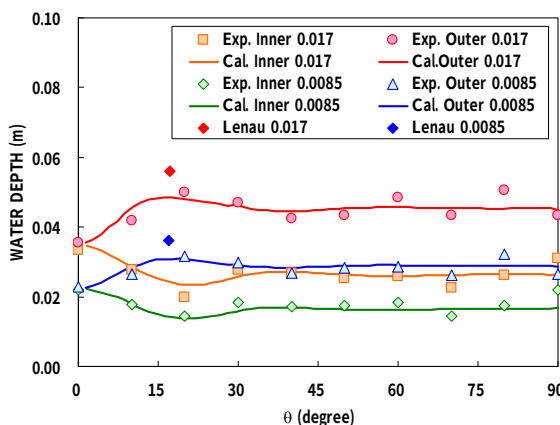


図-2 両岸沿いの水深分布

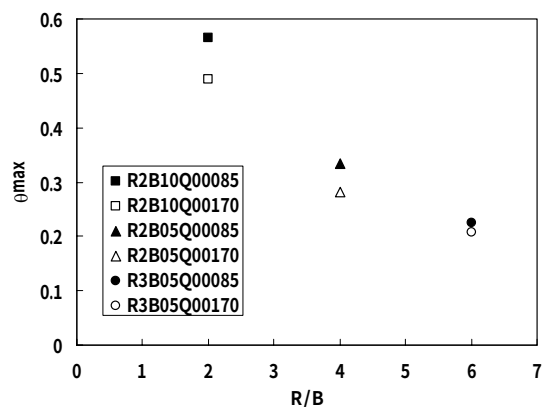


図-4 R/B と最大水深位置の関係

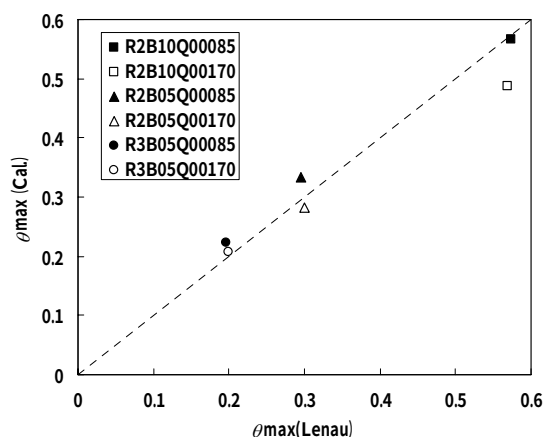


図-3 Lenauの解との最大水深位置の比較

値との比較を示す。両者は良く一致しており、水位が最大となる位置に関しては、本検討で用いた計算手法の妥当性が確認できた。以後、数値計算結果を用いて、河床形状と水深最大となる位置との関係を整理する。

図-4に、数値計算により求めた水深最大位置と R/B との関係を示す。 R/B が小さいほど下流側で水深最大となる。流量が同じ場合でも、川幅による衝撃波角の差異のために水位分布が異なるのは、式(2)からも明らかである。また、水位分布は曲率半径の影響も受けることから、河床形状が流れにおよぼす影響は非常に大きいといえる。

(2) 湾曲部の流況

図-5に固定床実験のCase F1において、塩化ビニル粒子と染料の2種類のトレーサーを用いて解析した湾曲部の流速分布を示す。塩化ビニル粒子より解析された表層流は、染料により解析された水深平均流と比べて流速が大きい。両者の差異は湾曲部の後半で大きくなり、水深平均流は湾曲に沿って流下するのに対して、表層では湾曲部の外岸に向かう流れがみられる。これは、対象の流れ場の水深が非常に小さいにもかかわらず、2次流が発生し3次元的な構造が存在していることを示している。

図-6に、数値計算Case N1の流速計算結果を、同じ条

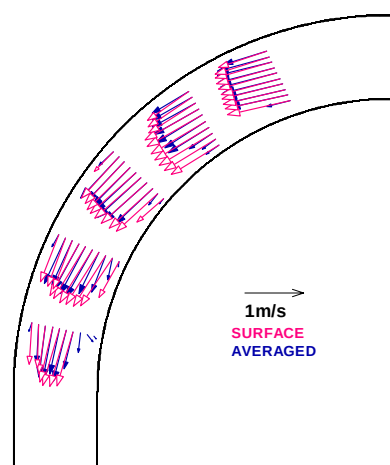


図-5 水深平均流速と表層流速 (実験値)

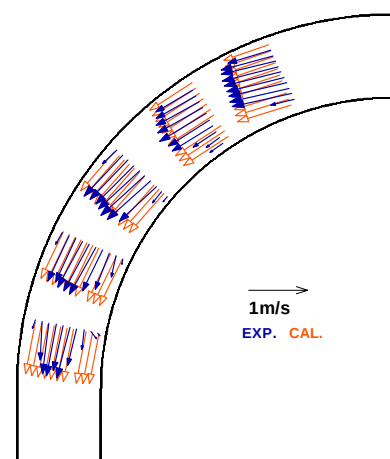


図-6 水深平均流速の計算結果と実験値の比較

件の固定床実験Case F1における水深平均流速と合わせて示す。両者の全体的な流速と流向は概ね一致しており、数値計算の良好な再現性が確認できる。計算結果が横断方向にほぼ一様な流況を示すのに対して、実験では湾曲部の内岸沿いで流速が小さいのは、水際線付近にまでトレーサーが十分に分布していなかったことが原因と考え

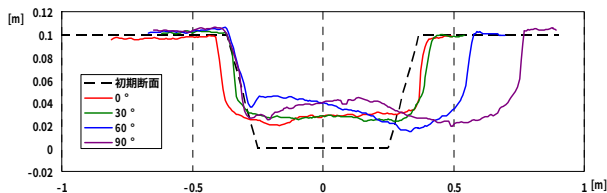
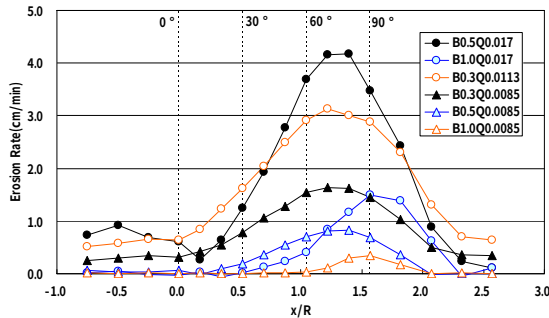
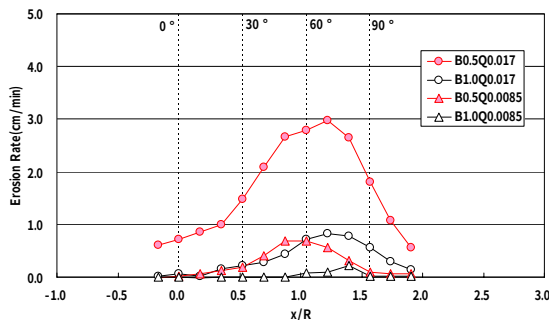


図-7 通水前後の横断形状 (Case M3)



(a) R=2m



(b) R=3m

図-8 側岸浸食速度の分布

られる。また、湾曲部出口付近で実験値と計算値の差異が大きいのは、数値計算において2次流が考慮されていないためであり、2次流の影響の大きさが確認できる。

5. 急流河川湾曲部の側岸浸食・河床変動特性

図-7に、移動床実験の結果の例としてCase M3における通水前後の30°毎の横断形状を示す。0°断面と同様に、上流直線区間では左右両岸で側岸浸食が生じ、河床部では堆積が生じている。湾曲部では、内岸の側岸は浸食を受けないが、外岸では顕著な側岸浸食がみられる。これは、緩勾配を対象とした福岡ら⁹⁾の実験や関根¹⁰⁾による解析でも見られた傾向であり、湾曲部においては勾配に関係なく同様の河床変動が生じるといえる。なお、各断面を比較すると下流ほど外岸の側岸浸食が大きい。

図-8に、各ケースの外岸の側岸浸食速度の分布を示す。ここで側岸浸食速度とは、河床断面における法肩位置の初期値からの変化量とした。前述の通り、地形の計測が通水前後のみであるため、図の縦軸は、表-2に示した通水時間中の平均浸食速度を示している。同一の河床形状

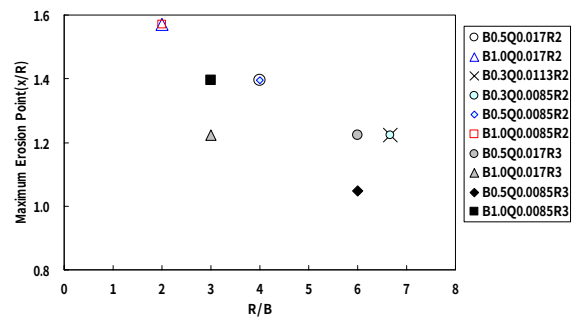


図-9 曲率半径と側岸浸食速度最大地点の関係

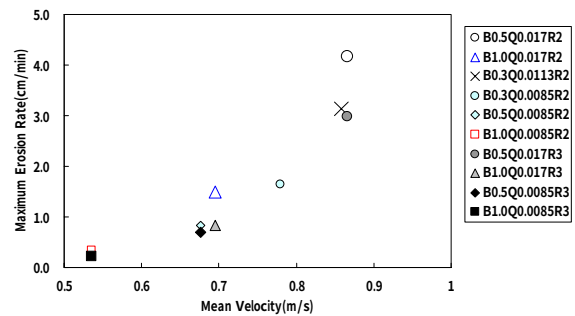


図-10 断面平均流速と側岸浸食速度最大値の関係

に対しては、流量が大きいほど浸食速度が大きい。また曲率半径と流量が等しい場合には、川幅が小さいほど浸食速度が大きい。流量と川幅が等しい場合、(b)R=3mと比較すると、曲率半径が小さい(a)R=2mの浸食速度が大きい。側岸浸食速度が大きい範囲は河床形状の影響を受け、川幅が大きいほど下流の浸食速度が大きくなる。

図-9に、R/Bと側岸浸食速度が最大となる位置との関係を示す。曲率が急であるほど、下流で浸食が生じる。これは、図-4に示したように、R/Bが小さいほど射流湾曲部の外岸沿いで最初の最大水位が現れる位置が下流になることと一致している。このことから、湾曲部開始地点で発生する衝撃波が、顕著な浸食が生じる位置に影響している可能性がある。ただし、側岸浸食速度が最大となるのは、湾曲部外岸沿いで最初に水深が最大となる位置と比べるとさらに下流の地点である。これは、衝撃波による流れに加えて湾曲部下流で発達する2次流の影響を強く受けていることや、地形の変化に伴い流況も変化することが原因と考えられる。これは、緩勾配河川湾曲部においても、R/Bが小さいほど下流で深掘れが生じる(芦田ら¹⁷⁾) ことと同様の結果である。

図-10に、側岸浸食速度最大値と平均流速の関係を示す。各ケースの平均流速は、流量と初期断面に対する等流水深から求められる流積から求めた。平均流速が大きいほど側岸浸食速度が大きい。また平均流速が同じ場合には、曲率半径が小さいほど側岸浸食が大きくなる。これは曲率が急なほど強い2次流が発生するためだと考えられ、側岸浸食速度には平均的な流速だけでなく、2次流のような局所的な流れも影響しているといえる。



図-11 着色砂の流下状況

図-11に、移動床実験Case M7において外岸側の $45^{\circ} \sim 60^{\circ}$ の範囲に着色砂を用いた際の、通水開始20分後の着色砂の分布を示す。図には画像解析により求めた同時刻の表層流速ベクトルを合わせて示している。内岸側には砂州が形成されて水深が非常に小さくなっており、表層の流れは外岸沿いに集中している。一方で、側岸浸食により河床部に供給された着色砂は、外岸から離れて水路中央部にまで分布している。このことから、底面付近では外岸から水路中央部に向かう流れが存在しており、3次元的な流れの構造が土砂の流下に大きな影響をおよぼしていることが確認できた。

5. まとめ

本検討では、単一湾曲水路を用いた基礎的な水理実験を行い、急勾配河川湾曲部の側岸浸食を含む河床変動に関する検討をおこなった。主要な結論を以下に示す。

- 1) 急勾配河川湾曲部の流れは衝撃波の影響を受け、内岸と外岸で水深が異なる。水深の分布は河川形状によって異なるが、本検討で用いた平面2次元モデルにより再現できることが確認された。
- 2) 2種類のトレーサーを用いた可視化の結果、2次流による3次元的な流れが確認できた。側岸浸食によって河床に供給された土砂は、底層付近の流れによって表層流とは異なる方向へ輸送される。
- 3) 湾曲部では、内岸で堆積、外岸で浸食が生じた。これは既往の緩勾配の実験と同様の結果である。
- 4) 顕著な浸食が生じる位置は、緩勾配を対象とした実験と同様に曲率の影響を受け、曲率が急であるほど下流となる。また、浸食速度は平均流速に加えて、2次流のような局所的な流れの影響を受ける。

以上のように、急勾配河川においても、従来の緩勾配河川と同様の河床変動が確認されたことから、今後は、既往の河床変動計算モデルを用いて、移動床実験の再現計算を行い、急勾配河川への適用性を検証する。

謝辞：水理実験には、(株)日本工業試験所・池田博和氏、

新幸弘行氏の協力を得たことを記して、謝意を表する。

参考文献

- 1) 長谷川和義・藤田睦博：ステップ・プールに視点をのいた山地河道の流れの抵抗，第30回水理講演会論文集，pp.79-84，1986。
- 2) 長谷川和義：山地河川の形態と流れ，水工学シリーズ88-A-8，土木学会水理委員会，pp.1-20，1988。
- 3) 沢田豊明，芦田和男：山地溪流における流路形態と土砂流出，第33回水理講演会論文集，pp.373-378，1989。
- 4) 目黒嗣樹，長谷川和義，大塚剛史，竜澤宏昌：山地河川に見られる大・中・小規模共存河床形態の再現実験，水工学論文集，第45巻，pp.733-738，2001。
- 5) 芦田和男，江頭進治，加本 実：山地流域における侵食と流路変動に関する研究(2) 一流路の側岸侵食機構一，京大防災研年報，第26号B-2，pp.353-361，1983。
- 6) 福岡捷二，山坂昌成，竹内 聡，古屋 晃，永納栄一：湾曲流路の側岸浸食，第27回水理講演会論文集，pp.721-726，1983。
- 7) 守田克成，江頭進治，金 海生，青木章浩，大槻英樹：湾曲河道における流れの集中度と河岸浸食に関する研究，土木学会第52回年次学術講演会概要集，第2部，pp.434-435，1997。
- 8) 清水康行，平野道夫，渡辺康玄：河岸侵食と自由蛇行の数値計算，水工学論文集，第40巻，pp.921-926，1996。
- 9) Md. M. Rahman , N. Nagata : Experimental study on morphological process of meandering channels with bank erosion, 水工学論文集，第40巻，pp.947-952，1996。
- 10) 関根正人：側岸侵食を考慮した河川の流路変動に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.553/ II -34，pp.51-59，1996。
- 11) 長田信寿，細田 尚，村本嘉雄，Md. M. Rahman：移動一般座標系による側岸侵食を伴う河道変動の数値解析，水工学論文集，第40巻，pp.927-932，1996。
- 12) Knapp, R. T. : Design of channel curves for supercritical flow, Trans. ASCE, Vol. 116, pp.296-325, 1951。
- 13) Lenau, C. W. : Supercritical flow in bends of trapezoidal section, Proc. ASCE, Vol. 105, No.EM1, pp.43-54, 1979。
- 14) 岩佐義朗，細田 尚，河村直明，米山 望：高速流における水際線の取扱いとその適用について，水工学論文集，第35巻，pp.531-536，1991。
- 15) 森山陽一，藤田一郎，出口 恭，有光 剛，景山 学：染料注入法を用いた浅水流場の水深平均流速計測の試み，水工学論文集，第52巻，pp.751-756，2008。
- 16) 重枝末玲，秋山壽一郎，浦 勝，有田由高：非構造格子を用いた有限体積法に基づく平面2次元洪水流数値モデル，水工学論文集，第45巻，pp.895-900，2001。
- 17) 芦田和男，大槻英樹，劉 炳義，大本雄二，藤田 暁，中川哲志：多自然型護岸の実験的研究(2)，河川環境総合研究所報告，第3号，pp.129-138，1997。

(2008.9.30受付)