

上流端からの土砂流入量が下流流路の変動特性に与える影響について

Effect of sediment supply quantity on the downstream channel deformation

北海道大学工学部環境社会工学科
寒地土木研究所寒地河川チーム
寒地土木研究所水環境保全チーム
北海道大学大学院工学研究院
(株) 北開水工コンサルタント

学生員 ○小川大和 (Yamato Ogawa)
正会員 井上卓也 (Takuya Inoue)
正会員 水垣滋 (Shigeru Mizugaki)
フェロー 清水康行 (Yasuyuki Shimizu)
フェロー 長谷川和義 (Hasegawa Kazuyoshi)

1. 研究背景

平成 28 年 8 月に起こった北海道豪雨により、ペケレベツ川などの中小河川では急激な流量の増加と大量の土砂移動が生じた。それに伴い大規模な流路変動が引き起こされ、多くの建築物、公共インフラに甚大な被害を及ぼした(写真-1)。今回の出水では、土砂が堆積する扇状地において、河岸侵食が原因と思われる橋梁被災が多く見られた。このことから、土砂流入量と川幅の増減に何らかの関連性があることが考えられる。しかし、既往の河岸侵食や流路蛇行に関する研究では、河川が動的平衡状態にある場合を想定したものが多いため、それ以外の条件における河川の挙動については把握出来ていない部分が多い。

土砂流入と流路変動の關係に着目した実験的研究として、井上・水垣¹⁾の研究が挙げられる。彼らは、ペケレベツ川上流部を対象に移動床実験を行い、土砂流入の増加に伴い、(i)上流側の河岸侵食が増加すること、(ii)蛇行流路の波長が短くなること、(iii)大きな河床材料が砂州上に堆積しやすくなることを示している。しかし、ペケレベツ川上流部の比較的勾配が急な場合を対象としており、住宅地が広がる下流部を対象としていない。また、実験流量は、平成 28 年洪水の流路規模より小さく、大洪水時の流路の挙動については知見が得られていない。

そこで、本研究ではペケレベツ川下流部を対象に流量規模と土砂流入条件が異なる移動床実験を行う。また、本研究の実験結果と、井上・水垣¹⁾の実験結果と比較することで、河床勾配と流量規模が流入土砂量と流路変動の關係に及ぼす影響の分析を試みる。

2. 方法

2.1 実験装置

本研究では、ペケレベツ川の流路変動を把握するために、写真-2のような実験水路(EmRiver Em2, Little River Research & Design)を用いて実験を行った。実験水路の長さは 190 cm、幅は 80 cm である。河床材料は、水中比重 0.55 のメラミン樹脂粒子で、4つの粒径階の粒子(平均粒径はそれぞれ 0.4 mm, 0.7 mm, 1.0 mm, 1.4 mm)を混合した。4粒子を混合した場合の平均粒径は約 1.0 mm である。この実験では土砂の挙動を視覚的に理解し易くするために、粒径階ごとに色分けされた粒子を用いた(細かい順に赤、黒、白、黄)。

Em2 の利点は、小型で簡易的に実験を行うことが可



写真-1 ペケレベツ川 (PASCO 提供)

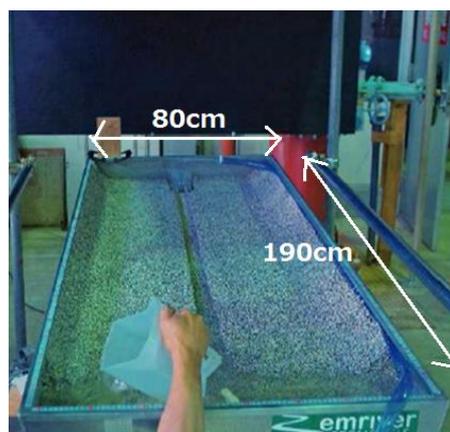


写真-2 実験水路

能であり、かつ比重の軽い粒子を用いているため、地形変化の速度が通常の砂を用いた実験と比べて速く、多くのケースの実験を行うのに適していることである。一方、水中比重が実際の砂と異なることによって生じる歪みを、相似則によって補正しなければならない点に留意する必要がある。

2.2 縮尺の考え方

実験縮尺の設定にあたっては、縮尺は内島・早川²⁾の交互砂州河床河川の移動床歪模型の相似則を応用する。内島・早川は、黒木・岸³⁾の中規模河床形態の領域区分図の縦軸と横軸の2つの無次元量を、実河川と実験模型で一致させることで、交互砂州の再現実験を行っている。

$$\frac{h_p l_p}{s_p d_p} = \frac{h_m l_m}{s_m d_m} \quad (1)$$

$$\frac{B_p I_p^{0.2}}{h_p} = \frac{B_m I_m^{0.2}}{h_m} \quad (2)$$

ここで、 h は水深、 I は勾配、 s は水中比重、 d は粒径、 B は川幅であり、添え字の p は実河川スケールを、添え字の m は実験模型スケールをそれぞれ表している。

水深の縮尺（鉛直方向の縮尺）を $h_r (= h_m/h_p)$ と定義すると、式(1)は以下の式に置き換えることができる。

$$h_r = s_r d_r / I_r \quad (3)$$

ここで、 $I_r (= I_m/I_p)$ 、 $s_r (= s_m/s_p)$ 、 $d_r (= d_m/d_p)$ はそれぞれ勾配、水中比重、粒径の縮尺である。同様に、川幅の縮尺（水平方向の縮尺）を $B_r (= B_m/B_p)$ と定義すると、式(2)は以下の式に置き換えることができる。

$$B_r = h_r / I_r^{0.2} \quad (4)$$

流量 Q は、マンニングの流速公式に水深と川幅を掛け以下の式で求められる。

$$Q = \frac{1}{n_m} h^{5/3} I^{1/2} B \quad (5)$$

ここで n_m はマンニングの粗度係数であり、マンニング・ストリックラー式より以下の式で与えられる。

$$n_m = \frac{k_s^{1/6}}{7.66\sqrt{g}} \quad (6)$$

ここで、 g は重力加速度、 k_s は等価砂粗度高であり、一般に河床材料粒径の2倍である。したがって、流量の縮尺 Q_r は以下の式で与えられる。

$$Q_r = d_r^{-1/6} h_r^{5/3} I_r^{1/2} B_r \quad (7)$$

模型の水平方向と垂直方向の縮尺をひずませ、模型と実河川で異なる勾配を用いる方法もあるが、縮尺の考え方が複雑になるため、本研究では模型と実河川の勾配を同じにする ($I_r = 1$)。Em2 で用いるメラミン樹脂粒子の水中比重は 0.55、粒径は約 1.0 mm である。一方、ペケレベツ川の河床材料の水中比重は 1.65、粒径は約 100 mm である。したがって、 s_r は約 1/3、 d_r は 1/100 のため、 h_r は式(3)より 1/300、 B_r は式(4)より同じく 1/300、 Q_r は式(7)より 5.3×10^{-7} となる。

洪水前のペケレベツ川の河床勾配は、市街地の上流側で約 3.5%、下流側で 2.3% である。井上・水垣¹⁾が実施した Run1 の河床勾配は 3.5%、本研究で実施する Run2、Run3 の河床勾配は 2.3% とする。また、ペケレベツ川の洪水前の川幅は約 15 m であるため、初期水路幅は 1/300 の 5 cm とする (写真-2)。ペケレベツ川の洪水前の河岸高さは確認できなかったため、6 m 程度と仮定し、実験上の河岸高さは 1/300 の 2 cm とする。初期水路の形状は Run 1～Run 3 で共通である。

実験流量は、Run1 と Run2 では中小洪水規模 (実河川で 40 m³/s 相当) の 21 ml/s とし、Run3 では大洪水規模 (実河川で 120 m³/s 相当) の 60 ml/s とする。

式(5)を用いて等流水深を逆算すると、Run1 の条件で 0.20 cm (実河川スケールで 0.60 m)、Run2 の条件で 0.23 cm (実河川スケールで 0.68 m)、Run3 の条件で 0.44 cm (実河川スケールで 1.32 m) である。

2.3 給砂量

給砂量を決定するために、事前に予備実験を行い、上

流端付近の河床高大きく変わらない量 (実験ベースの平衡流砂量) を把握した。実験ベースの平衡流砂量はそれぞれ Run 1 の水理条件で 40 cc/min、Run2 の水理条件で 6.46 cc/min、Run 3 の水理条件で 50 cc/min であった。

Run 1 では実験ベースの平衡流砂量の 0%、50%、100%、200% の 4 ケースを、Run2 と Run3 では、0%、100%、200% の 3 ケースを実施した。

2.4 実験条件

模型実験はひずみの影響により、現地と比べ水深粒径比が 3 倍ほど大きくなっている。この結果、通常の砂を用いたときよりも、地下水面の勾配が初期河床勾配よりも緩くなりやすい傾向にある。そこで、水路床の勾配を、初期河床の勾配をより急にし、地下水面の勾配と初期河床勾配がなるべく同じになるように調整した。

表-1 に示すような設定条件で実験を行った。流量は Run1 では 21 ml/s (通水時間は 15 分)、Run2 では 21 ml/s (通水時間は 12 分)、Run3 では 61ml/s (通水時間は 8 分) で行った。通水時間については本実験前に複数回の予備実験を行い設定している。具体的には、上流端から下流端に向けて蛇行が生じ、蛇行流路が安定した後一度目の交番が起こる時間を実験終了時間としている。

表-1 模型実験の条件

	流量 ml/s	勾配 %	初期等 流水深 cm	通水 時間 min	給砂量 cc/min
Run 1-1*	21	3.5	0.20	15	0
Run 1-2*					20
Run 1-3*					40
Run 1-4*					80
Run 2-1	21	2.3	0.23	12	0
Run 2-2					6.46
Run 2-3					12.9
Run 3-1	60	2.3	0.48	8	0
Run 3-2					50
Run 3-3					100

*井上・水垣¹⁾による実験結果

2.5 地形測量及び解析

実験前後の地形変化を評価するために、SfM (Structure from Motion: 異なる方向から撮影した複数の写真から、カメラと対象物の 3 次元構造を復元する手法) を用いた地形測量を行った。まず、初期地形、実験後の地形それぞれについて、デジタルカメラを用いて実験水路の垂直写真 (河床から約 1 m) を、ラップ率が 60% 程度となるように撮影した (約 100 枚)。撮影した画像から SfM ソフトウェア (PhotoScan Professional 1.3.4, Agisoft) を用いて各写真の撮影位置および撮影方向を推定し、地形の 3 次元モデルを作成した。実験水路に配置した 6 点の標定点の座標を 3 次元モデルに与え、DEM (Digital Elevation Model; 数値標高モデル) を作成した。

地形変化量を解析するにあたり、GIS ソフトウェア (QGIS 2.18, QGIS Development Team) で読み込んだ通

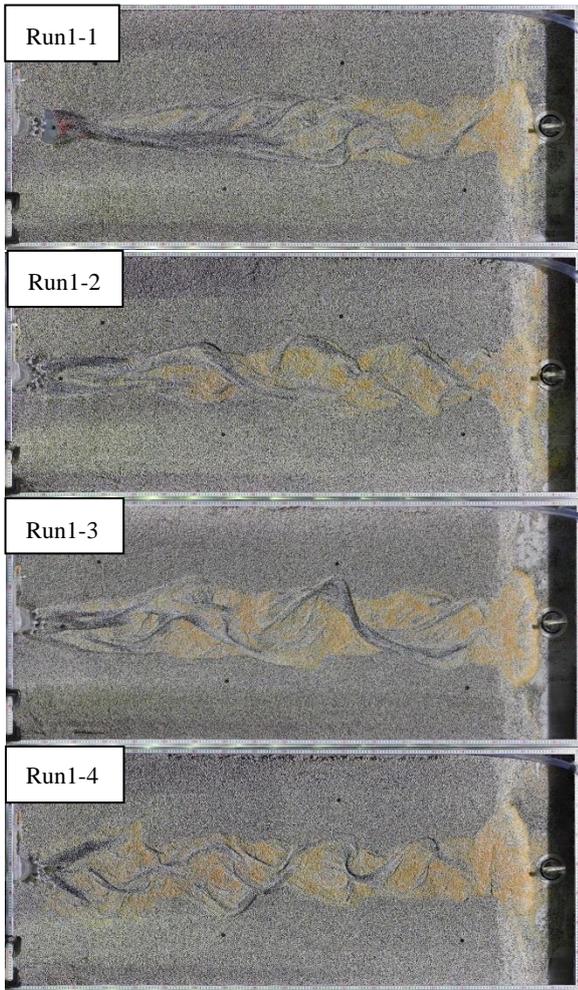


写真-3 Run 1 の垂直写真 (左が上流)

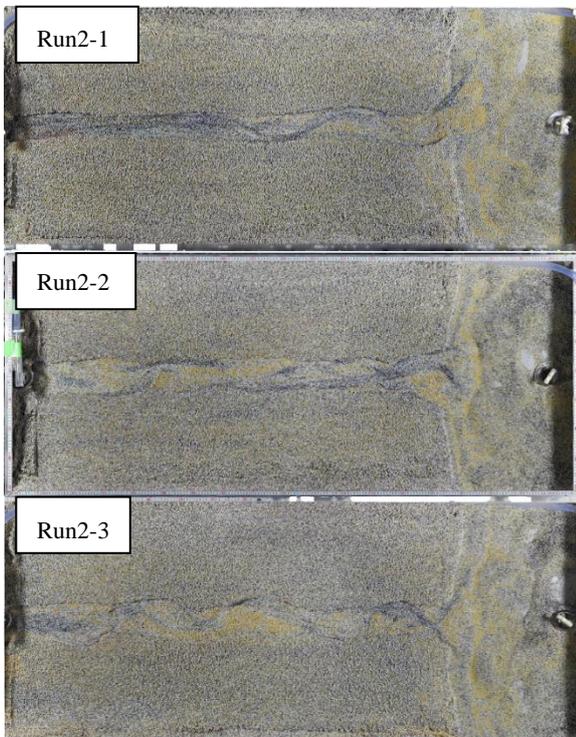


写真-4 Run 2 の垂直写真 (左が上流)

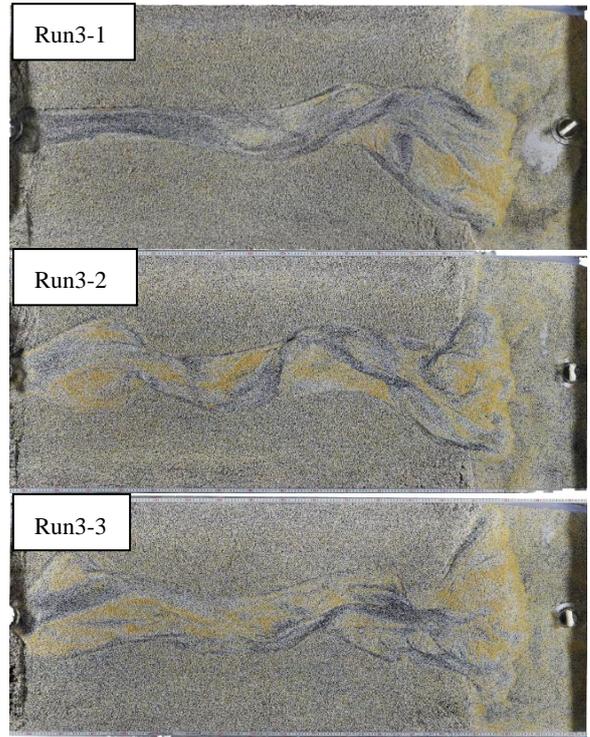


写真-5 Run 3 の垂直写真 (左が上流)

水後の DEM 上で、初期地形から変化した部分のみをポリゴンで囲み、地形の変動範囲を確定した。河川シミュレーションソフトウェア (iRIC, iRIC Project) を用いて、実験前後の河床変化高を算出した。

3. 結果

3.1 Run1 の実験結果

Run1 の各ケースについて実験後の垂直写真を写真-3 に示した。Run1-1 では上流から中流にかけて川幅が拡大し、中流で最大となった。その後わずかに縮小し下流に至った。また、下流に大きな浮洲状の砂洲が形成された。上流側では黒い粒子、中流から下流にかけては黄色の粒子が目立った。Run1-2 では上流側から川幅が拡大し、その後拡縮を繰り返しながら下流へ至った。また、中流付近から下流にかけて浮洲状の大きな砂洲が見られた。上流側では黒い粒子、中流付近から下流にかけては黄色の粒子が堆積していた。Run1-3 では上流と中流の間で川幅の拡大が顕著で、中流で縮小した後に拡縮を繰り返して下流へ至った。また、上流と中流の間にかけて浮洲状の砂洲が見られた。その表面には黄色の粒子が存在した。Run1-4 では上流端付近で最も川幅が拡大し、拡縮を繰り返しながら流下していった。上流から下流にかけて複列砂洲のような形が見取れた。また、上流から下流にかけてまんべんなく黄色の粒子が堆積していた。

3.2 Run2 の実験結果

Run2 の各ケースについて実験後の垂直写真を写真-4 に示した。Run2-1 では上流端でわずかに川幅が拡大し、その後ゆるやかに拡縮を繰り返して下流に至った。上流から中流にかけては黒色の粒子、中流から下流にかけては黄色の粒子がやや目立つ程度であった。また下流側では

浮洲状の砂洲の形成が見て取れた。Run2-2 では上流から下流にかけて、川幅が緩やかに拡縮を繰り返した。上流から中流にかけては黄色の粒子が目立った。また、下流端には浮洲状の砂洲が形成されていた。Run2-3 では上流で川幅が拡大し、そこから下流にかけて蛇行をしながら下流端に至った。中流に浮洲状の大きな砂洲が見られ、表面には黄色の粒子が堆積していた。また、上流側の河床は黒い粒子が目立っていた。

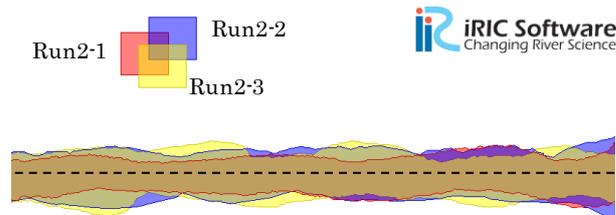


図-1 Run 2 における地形変化範囲

3.3 Run3 の実験結果

Run3 の各ケースについて実験後の垂直写真を写真-5 に示した。Run3-1 では上流から中流手前までは川幅の変化がほとんどなく、中流から下流にかけて蛇行をしながら川幅が拡大していった。また上流から中流にかけて黒い粒子が目立ち、下流に行くに従い黄色の粒子が目立った。Run3-2 では上流端から川幅が顕著に拡大しており、上流と中流の間で急激に川幅が減少した。その後、川幅に変化はほとんどなく、下流側で再び拡大した。また上流から下流までまんべんなく浮洲状の砂洲が形成されていた。Run3-3 では上流側で急激に川幅が拡大した後には縮小し、中流ではほとんど変化はなく下流側で再び拡大した。また上流側で川幅が最大となった。上流と下流に黒い粒子が目立って現れた。

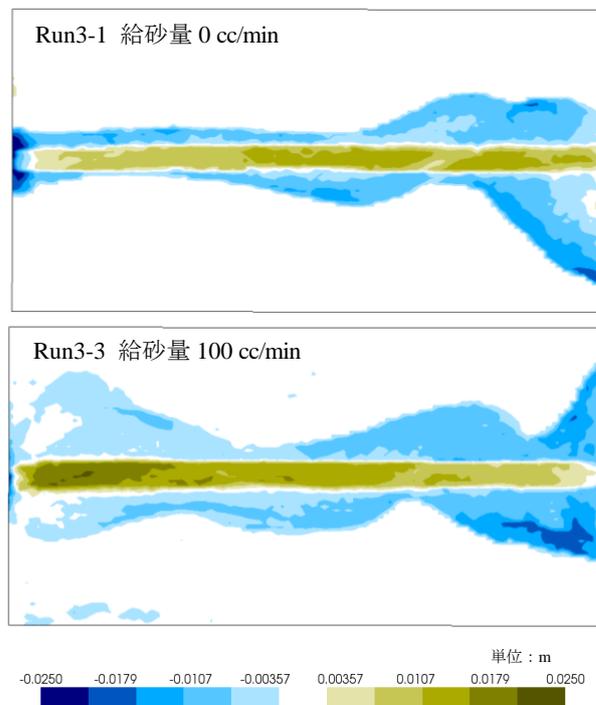


図-2 Run 3-1 および Run3-3 における初期からの地形変化高のコンター図

3.4 Run1 から 3 のまとめ

Run1 の 4 つのケースを比較すると、下流側における川幅にはあまり大きな差は見られなかったが、給砂量が増加するに従い上流側での川幅の拡大が見られた。粒子の分布については、給砂量が増加するにつれ上流側にまで黄色の粒子が堆積しているのが分かる。また、浮洲状の砂洲が Run1-1、Run1-2 では交互砂洲のような形状であるが、Run1-3、Run1-4 のように給砂を増やすと複列砂洲のような形状になり、地形が不明瞭になることが見て取れた。

図-1 は、Run 2 における地形変化範囲の重ね図である。赤色が Run 2-1、青色が Run 2-2、黄色が Run 2-3 を表している。前述したとおり、勾配が緩い場合でも給砂量が無い Run 2-1 に比べ、給砂量が多い Run 2-3 の川幅が広く、左右岸への流路蛇行が顕著になっていることが分かる。

図-2 は、Run 3-1 と Run 3-3 における初期からの変化高のコンター図である。地形の変化高は初期と実験後の DEM の差分から算出している。初期水路は無給砂の場合 (Run3-1) でも堆積しており、河岸侵食に伴う土砂生産による河床上昇が認められる。一方、高水敷部分では侵食に伴い低下している。Run2 に比べて流量が多い Run 3 では、給砂の増加に伴う上流側の河岸侵食幅の増加が顕著なことがわかった。

4. まとめ

Run1 と Run2 の実験結果を比較した場合、勾配が急な条件の方が上流側の河岸侵食が顕著に表れることがわかった。また Run2 と Run3 の実験結果を比較した場合

にも、流量が大きいほど上流側の河岸侵食が大きいことが分かった。他にも、Run1 と Run3 の地形形成に類似点を見出すことが出来た。どちらのケースも上流側の河岸侵食が顕著であるが、給砂量を増加させるにつれ交互砂洲から複列砂洲のような地形形成を行うという傾向が見られた。この現象は無次元剪断力に依存している可能性がある。Run1 から Run3 において無次元剪断力はそれぞれ 1.27, 0.96, 2.01 である。この値が Run2 に比べ高いことから二つのケースは似たような傾向を示したのかもしれない。

参考文献

- 1) 井上卓也, 水垣滋: 流砂系シナリオの変化と蛇行の挙動, 砂防学会研究発表会概要集, R1-15, 2017.
- 2) 内島邦秀, 早川博: 交互砂州河床河川の移動床歪模型の相似則に関する研究, 土木学会論文集, Vol.479, pp.71-79, 1993.
- 3) 黒木幹男, 岸力: 中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究, 土木学会論文集, Vol.342, pp.87-96, 1984.