

急流河川における浮遊砂の高水敷および 樹木域への堆積過程に関する水理実験

EXPERIMENTS ON SEDIMENTATION PROCESS OF SUSPENDED LOAD AT
FLOOD PLAIN AND VEGETATION AREA IN A STEEP CHANNEL

山口 里実¹・柏谷 和久²・谷瀬 敦¹・渡邊 康玄³・赤堀 良介⁴
Satomi YAMAGUCHI, Kazuhisa KASHIWAYA, Atsushi TANISE, Yasuharu WATANABE and
Ryosuke AKAHORI

¹正会員 (国研) 土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3-1-34)

²正会員 北海道開発局帯広開発建設部 (〒080-8585 帯広市西4条南8丁目)

³正会員 北見工業大学 (〒090-8507 北見市公園町165)

⁴正会員 愛知工業大学 (〒470-0392 豊田市八草町八千草1247)

To grasp the behavior of fine grain sand is important in order to elucidate the process of expanding vegetation growth area in gravel bed rivers. However, the sedimentation process of suspended load especially in steep gravel bed rivers has not yet been sufficiently studied because of the small influence of fine grain sand on the shape of the river. In this study, we report the data of the particle size distribution change on the flood plains during an artificial flood in the Satsunai River, and carried out the experiments on the sedimentation process of suspended load at the flood plain and vegetation area in a steep channel. It was found that the vegetation effect to deposition of suspended sediment was limited, as the effect was shown only until reaching the dynamic equilibrium state in our experiments.

Key Words : *suspended sediment, a steep channel, flood plain, vegetation area, hydraulic experiments*

1. はじめに

急流な河道の河床材料は主に粒径の粗い砂礫で構成されるが、高水敷や樹木が繁茂した領域では浮遊砂として運ばれてきた細砂の堆積が見られる(写真-1および写真-2)。セグメント1に分類されるような急流河川である札内川でも、高水敷上の樹木域の地盤を調査すると、下層に礫層、上層に細砂の堆積が確認できる。ただし、この細砂の層厚はせいぜい数十cm程度と大きいものではない。セグメント2の河道で高水敷上または砂州上への細粒土砂の顕著な堆積が報告されている¹⁾²⁾のに対して、セグメント1に分類されるような急流河川では、細粒土砂が河道形状へ与える影響は小さいと考えられる³⁾。

一方で、近年の樹林化やダム排砂実施等の背景もあり、下流側の河道地形や河川環境への影響を把握する上でも、セグメント1の河道において浮遊砂の堆積・流下過程を予測する必要性が高まりつつある。特に細粒土砂は樹木の定着・繁茂に影響しており⁴⁾、急流河川における樹林



写真-1 礫上に堆積した細砂 (札内川上流部)



写真-2 高水敷上に繁茂するヤナギ (札内川上流部)

化現象を解明するためにも細粒土砂の挙動を把握することは重要である。しかしながら前述のように河道形状への細粒土砂の影響が小さいことから、急流河川での浮遊砂の流下現象については未だ十分に検討されていない。そこで、本研究では、札内川の高水敷における粒度分布の変化について報告するとともに、水理模型実験により急勾配の複断面河道における高水敷および樹木域への浮遊砂の堆積過程について検討し考察を行った。

2. 札内川フラッシュ放流前後の粒度分布の変化

札内川では、礫河原再生の取り組みとして平成24年度より札内川ダムからの中規模フラッシュ放流が実施されている⁹⁾。平成25年度の放流前後で高水敷における河床材料の粒度変化を調査した。図-1に調査地点を示し、図-2に調査結果を示す。調査は他地点でも実施したが、ここでは高水敷上かつ冠水範囲内の地点のみ示している。どの地点でも1mm前後の粒径の割合が増大して細粒化しているのがわかる。フラッシュ放流では、高水敷上の大きな地形変化は認められないが、数mmサイズの砂が高水敷上を被覆したために、表層の粒度分布を変化させたと考えられる。フラッシュ放流時のダム湖内の濁度(SS)は1以下であり、1mm前後の細砂はダム由来とは考えにくく、河床や河岸の侵食に起因するものと考えられる。河道内を移動する細砂が高水敷を被覆することで表層の粒度分布に大きく影響する過程が実河川で確認された。

3. 浮遊砂の流下過程に関する水理実験

(1) 実験概要

現地調査では浮遊砂堆積過程の詳細な把握は難しいため、本研究では以下に示すような水理実験を実施した。

従来の浮遊砂に関する実験は緩勾配または直線河道で多く実施されている^{6) 7)}。本研究では図-3に示すような低水路が蛇行した急勾配(勾配1/100)の固定床複断面

河道を現地の1/100スケールを想定して作成した。低水路内には事前に河床変動計算を実施し想定される砂州形状を配置している(図-4)。高水敷には粗度を増大させるために縦横断方向に10cm間隔でM12タイプのナット(幅19mm, 奥行22mm, 高さ10mm)を配置した。上流側の低水路直線区間で粗度を検証し、低水路部 $n=0.018$, 高水敷 $n=0.022$ であることを確認した。

図-3中の詳細計測区間の直上流から細砂(東北硅砂8号, 平均粒径0.12mm)を供給し、高水敷上の細砂の堆積状況を上空からのカメラ撮影で観測した。細砂の供給は低水路内右岸側(外岸側)および左岸側(内岸側)の2箇所で行われ、それぞれ側岸法尻部に漏斗を用いてスポット状に0.12L/分を投入した。通水は90分間実施した。

(2) 実験条件

実験条件を表-1に示す。Run3およびRun4では、図-3に色塗りで示す高水敷箇所を樹木を模擬した竹串(直径2.5mm)を密度 3m^{-2} で配置した(写真-3)。

各ケースでは、細砂を供給する前に電磁流速計を用いて表面付近の流速を測定した。平面的に得られた流速分布を図-5に示す。SP6.5~11.5の蛇行半波長区間について1m間隔の横断測線で計測したものである。

(3) 実験結果

実験で撮影した画像の時間経過をケース毎に図-6~図-9に示す。Run1(図-6)では高水敷上の砂の堆積はほとんど見られない。これに対して、Run2~4では最終的に高水敷上がほぼ全面砂で覆われている。通水中、いず

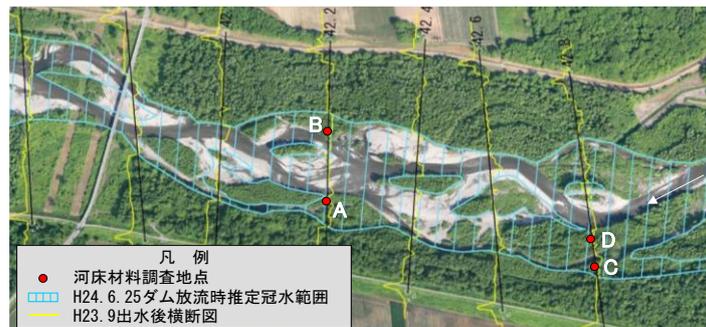


図-1 河床材料調査地点(札内川上流部 KP42~43付近)

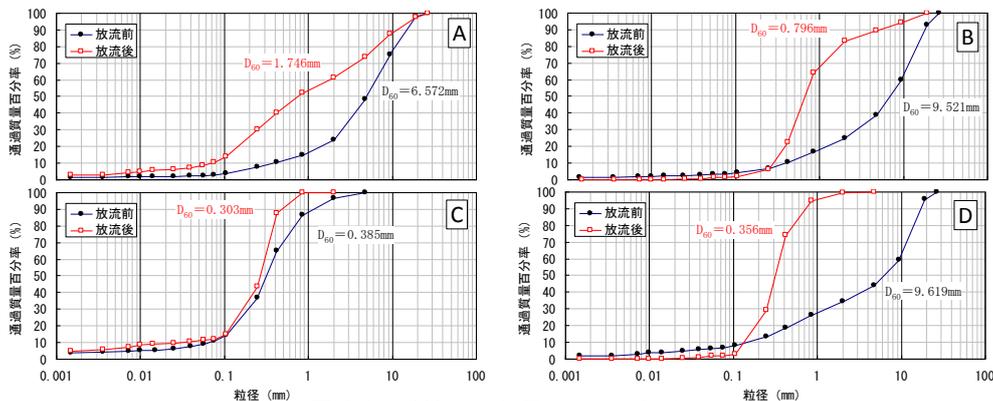


図-2 河床材料調査結果(A-D地点)

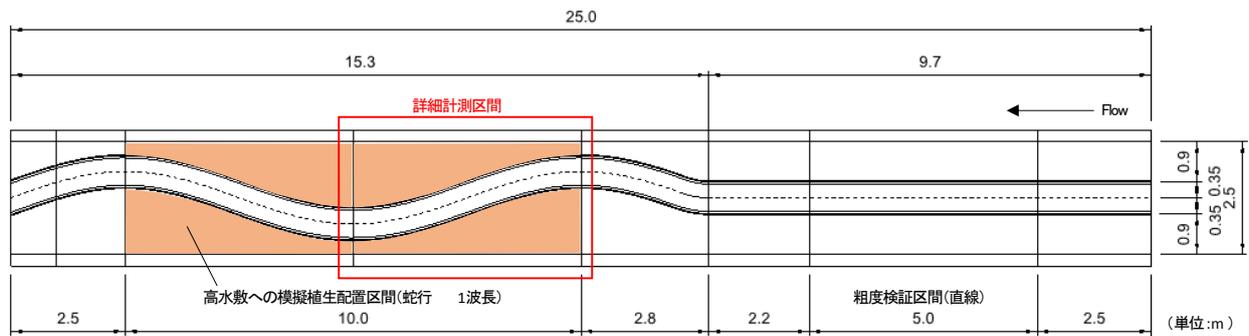


図-3 実験水路の概要 (平面形)

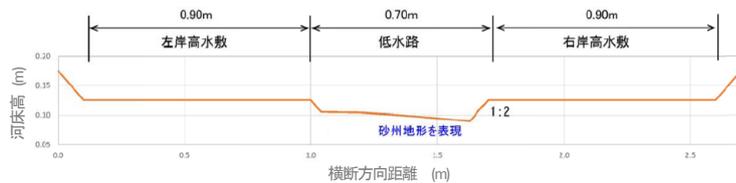


図-4 実験水路の概要 (横断形の例)

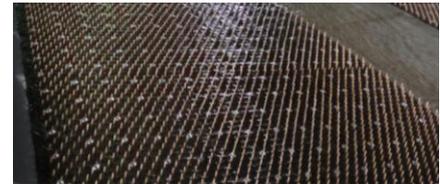


写真-3 高水敷に配置した模擬植生

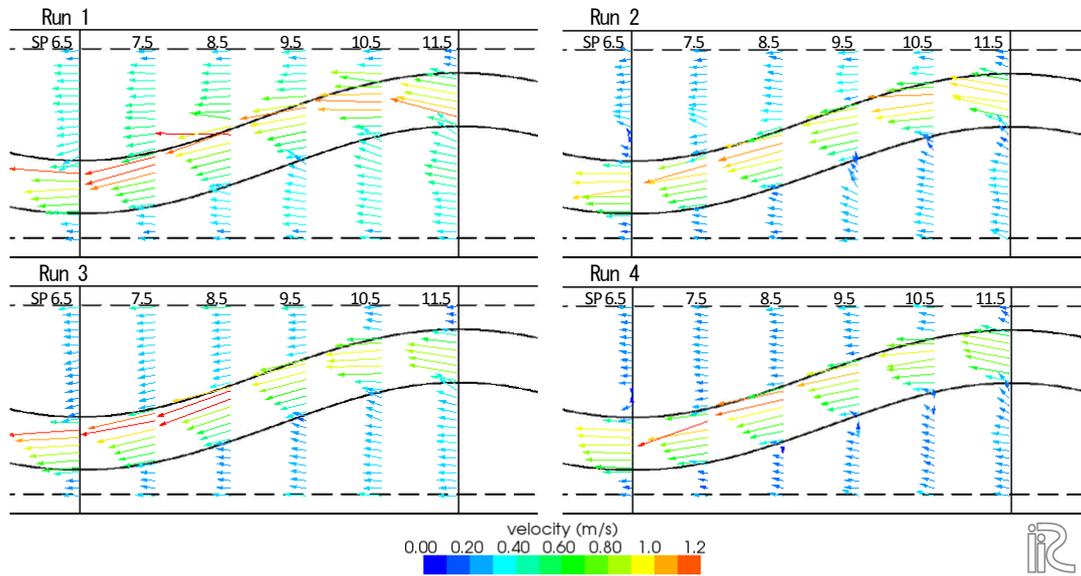


図-5 流速分布 (計測値)

れのケースでも細砂で被覆された領域が拡大する様子がみられたが、堆積厚が継続して増大する様子は認められなかった。ほぼ全面が被覆されると、細砂が活発に流下しながら動的平衡状態に達している状況が目視で確認できた。各ケースにおいて90分の通水終了後にレーザー砂面計で測定した河床横断形状を図-10に、各測線の堆積厚の平均値および最大値を図-11に示す。平均値はどのケースもそれほど大きくないが、Run2, 3および4で最大10mm程度の堆積が見られる。樹木を配置したRun3およびRun4では、樹木無しのRun1およびRun2に比べて全体的に平均堆積厚が大きく、樹木による浮遊砂の捕捉効果があると思われる。また、Run2では最大値と平均値ともにSP8.5で最大となるのに対して、同流量で樹木有りのRun4では上流側のSP9.5で最大となり、樹木による浮遊砂の捕捉効果によって堆積域が上流へ移動したと思われる。しかし前述のとおり、通水中に動的平衡状態に達するため、その効果は限定的であると考えられる。

表-1 実験条件

Run No.	流量 (L/s)	高水敷上の樹木	高水敷上の平均水深 (mm)
1	30	無	17
2	20	無	10
3	30	有	21
4	20	有	11

4. 考察

(1) 砂粒子の流下形態区分

砂粒子の移動形式として掃流と浮遊が卓越する領域は次のように表される^{8),9)}。

$$\text{掃流卓越領域} \quad u_* / w_f < 1.08 \quad (1)$$

$$\text{掃流・浮遊の混在領域} \quad 1.08 < u_* / w_f < 1.67 \quad (2)$$

$$\text{浮遊卓越領域} \quad 1.67 < u_* / w_f \quad (3)$$

ここで、 u_* は摩擦速度であり、 w_f は粒子の沈降速度であ

る。上式は、流水の乱れによる上方への砂粒子の移動速度 u_s が理論的または実験的に摩擦速度の0.6~0.93倍であること、また、浮遊限界が $u_s/w_f=1$ で表されることより導かれている。上式に沈降速度にRubeyの式¹⁰⁾を適用すると図-12のように示される。本実験で使用した東北砂8号の粒径は最大で約0.2mmであることから、 u_s^2 の値が約20より大きければ、この砂砂に含まれる全ての粒子が浮遊卓越の移動形態となることが図-12よりわかる。

実験で計測した流速を用いて算出した u_s^2 を図-13に示す。摩擦係数は平均流速公式にマニング則を適用して算出した。Run1では右岸側高水敷上のほぼ全面で u_s^2 の値が20を超えており、浮遊卓越の移動形態に分類されるのに対して、Run2~4ではほぼ全面で20以下であり、掃流・浮遊混在の移動形態に分類される。したがって、Run1では流下する砂全てが活発に浮遊しながら流下したために高水敷上にほとんど砂が残らなかったことがわかる。また、掃流・浮遊の混在領域に分類される場合は、Run2~4のように形状を大きく変化させるほどの堆積は生じないまでも、一部の砂が掃流形態で流下することによって表層の粒度変化には大きく寄与する可能性がある。

(2) 浮遊砂の移流による移動形態

樹木を配置した2ケースをよくみると、Run3 (図-8) では高水敷の上流側から堆積域が拡大しているのに対して、Run4 (図-9) では上流からだけでなく、低水路側からも拡大している。また、図-10をみると、Run3は上流側のSP11.5の低水路寄りに大きな堆積厚が見られるのに対して、Run4は少し下流側のSP9.5の低水路寄りの位置に大きな堆積厚が見られる。低水路寄りに比較的大きな堆積が見られる箇所は低水路内の浮遊砂が高水敷へ乗り上がる位置と関連していると思われる。浮遊砂の移動過程を把握するために、流況の再現計算を実施した。計算にはiRIC Nays2DH (<http://i-ric.org/>)を使用した。計算では、密生度に応じた植生の抵抗を考慮している。

図-14にRun3およびRun4の再現結果を示す。各側線の流速ベクトルについて計測値と計算値を比べると概ね良好に再現される。計算結果に基づいた流線を青実線で示す。流線は実験での右岸側の給砂地点を基点に図示したものである。どちらのケースも流線が高水敷に乗り上がる位置は比較的大きな堆積厚の位置と概ね一致している。流線に沿うように運ばれた浮遊砂が樹木域における掃流

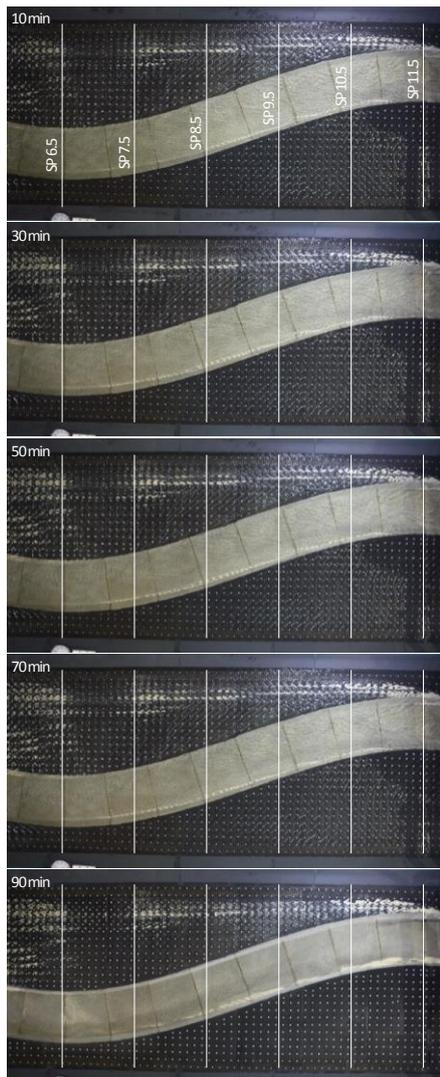


図-6 高水敷上の細砂 (Run1)

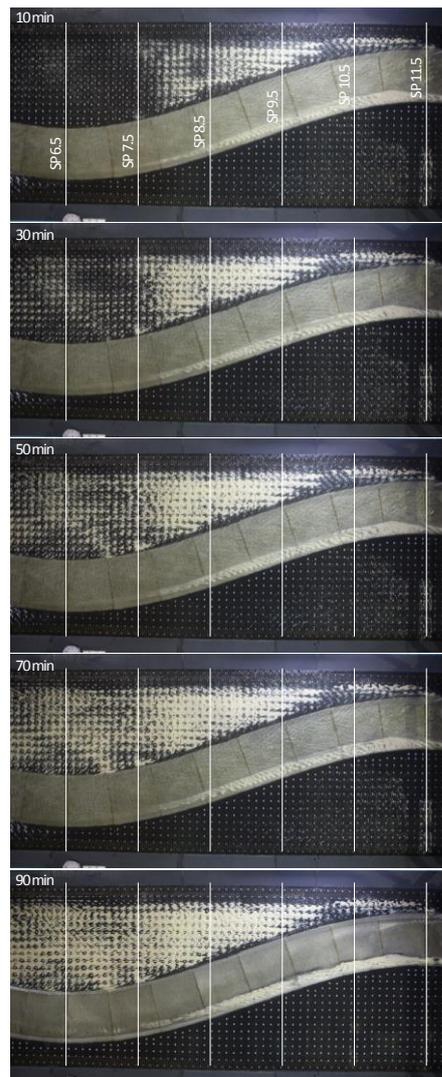


図-7 高水敷上の細砂 (Run2)

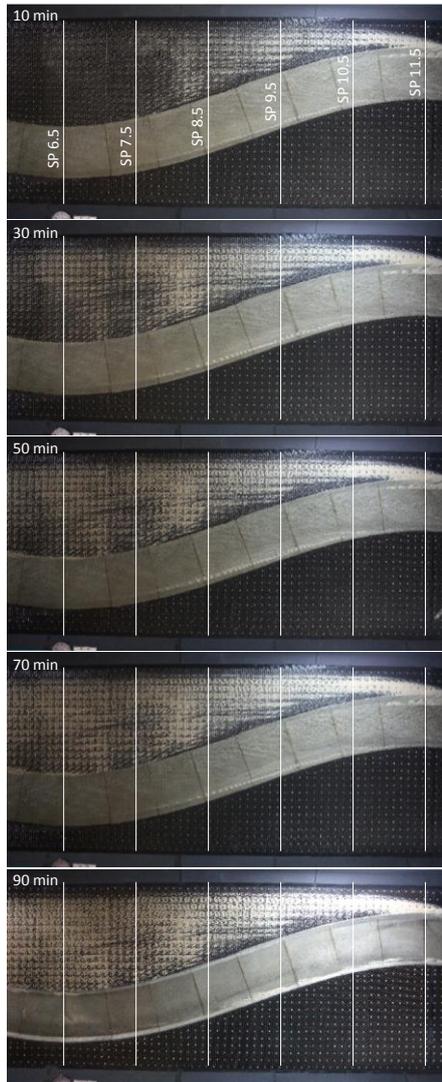


図-8 高水敷上の細砂 (Run3)

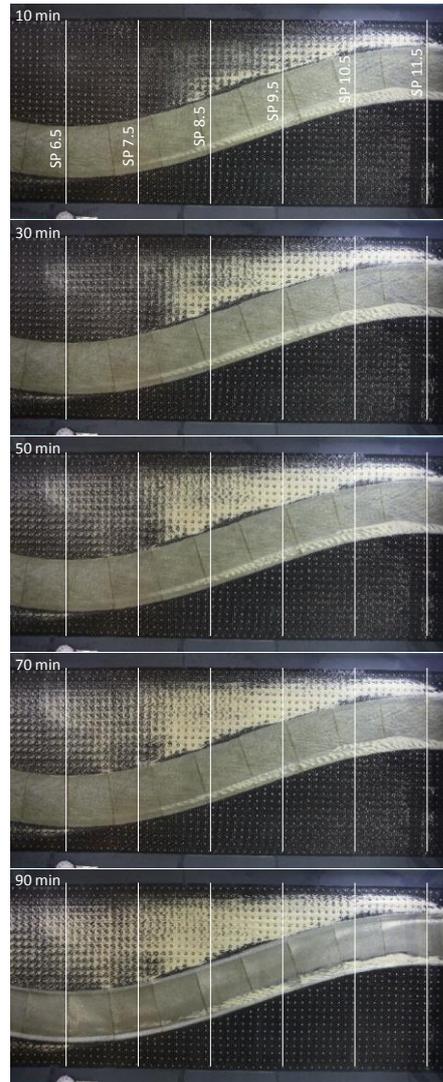


図-9 高水敷上の細砂 (Run4)

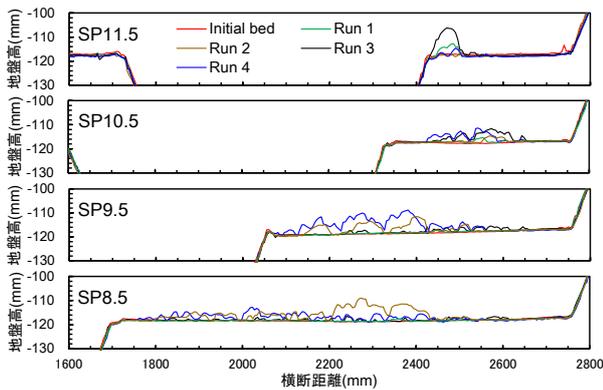


図-10 通水終了後の堆積形状

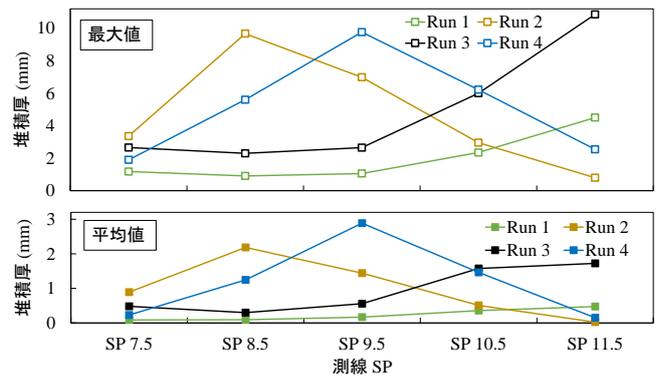


図-11 各測線の堆積厚 (上:最大値, 下:平均値)

力の低下により沈降しやすくなったため、堆積厚が大きくなったと考えられ、これらの位置では横断方向への拡散よりも主流によって浮遊砂が移流され高水敷へ乗り上がる過程が支配的であったと示唆される。少なくとも急勾配河道を対象とした本実験のような条件下では、蛇行低水路内の流れの水衝部における低水路から高水敷への横断方向の移流が浮遊砂の堆積に与える影響は大きいと考えられる。

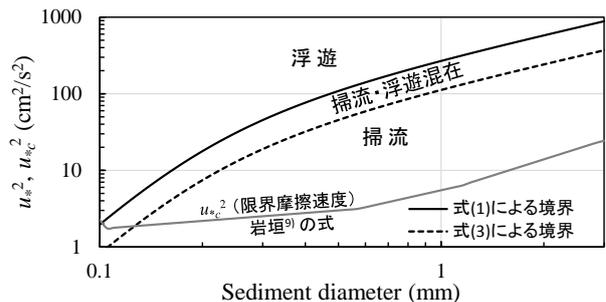


図-12 砂粒子の掃流・浮遊の境界

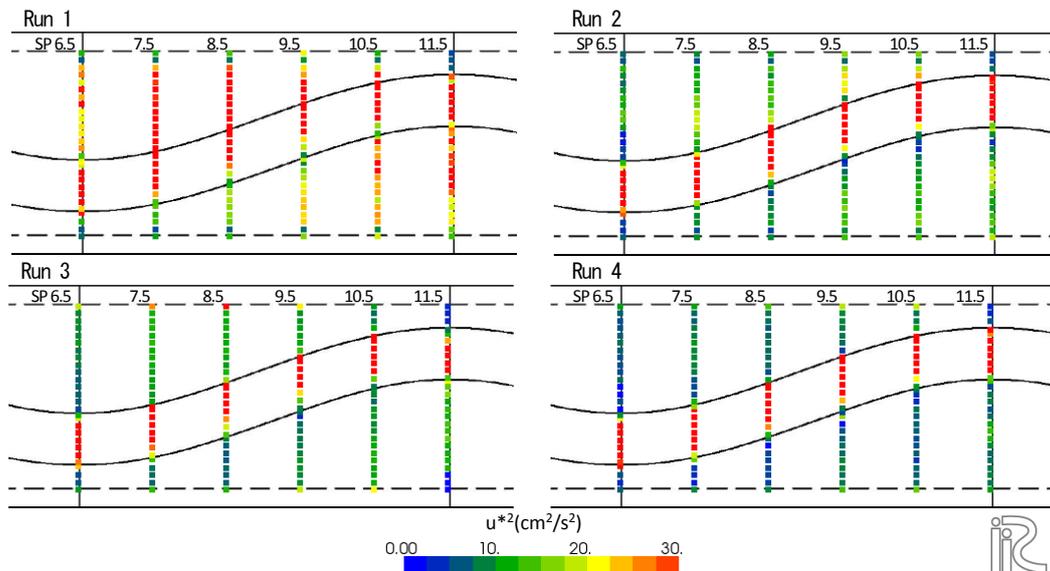


図-13 計測値から算出した u_*^2 の分布

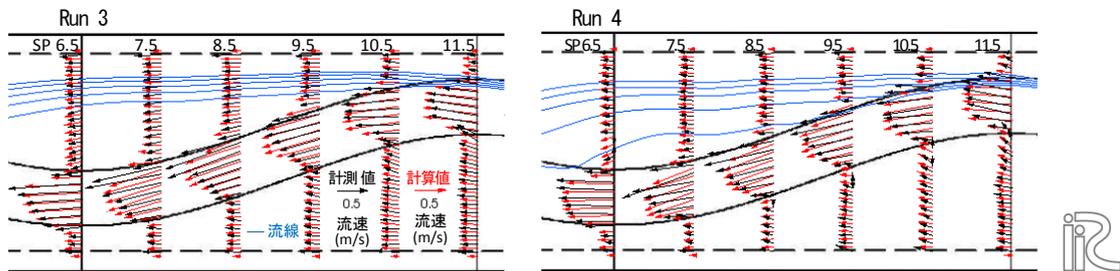


図-14 流況の再現計算および流线

5. おわりに

急流河川である札内川の高水敷きにおける粒径分布の変化を確認するとともに、水理実験によって急流な河道における細砂の流下過程に関する実験を実施し、主に以下のような結果が示された。

- ・樹木による浮遊砂の捕捉効果はある程度確認されたが、いずれのケースもすぐに動的平衡状態に達することが確認され、樹木による捕捉効果は限定的であった。

- ・砂粒子の移動形式が掃流・浮遊の混在領域に分類される条件下では、大きな地形変化は生じなくても、表層の粒度変化に大きく寄与する可能性が示された。

- ・樹木域において細砂が比較的大きく堆積した箇所では、横断方向の拡散よりも主流によって浮遊砂が移流され高水敷へ乗り上がる過程が支配的であったと示唆された。

以上より、急流河川では、細砂の移動形態が掃流・浮遊の混在領域に分類される条件下になり得るため、細砂は、地形変化には大きく影響することがなくても、表層の粒度変化には大きく影響することがあると考えられる。

謝辞：本研究では、北海道開発局帯広開発建設部より貴重なデータを提供いただいた。ここに感謝の意を記す。

参考文献

- 1) 原田守啓, 永山滋也, 大石哲也, 萱場祐一: 揖斐川高水敷掘削後の微地形形成過程, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.71, No.4, I_1171-I_1176, 2015.
- 2) 池田共実, 飯田孝, 傳甫潤也: 尻別川における河畔林管理一平成23年9月出水での低水路樹木の倒伏検討一, 北海道開発局技術研究発表会, 2014.
- 3) 山本晃一, (財)河川環境管理財団企画: 沖積河川一構造と動態一, 技報堂出版, 2010.
- 4) 大石哲也, 天野邦彦, 中村圭吾: 砂礫構造の違いからみた河原植物の生育環境特性について, 河川技術論文集, vol.12, pp.477-482, 2006.
- 5) 北海道開発局帯広開発建設部: 札内川技術検討会資料, <https://www.hkd.mlit.go.jp/ob/tisui/tisuijigyou/satsunaigawatorikum/i/kentoukai/kentoukai.html>.
- 6) 芦田和男, 藤田正治, 劉柄義: 複断面直線河道における浮遊砂の流送過程, 第32回水理講演会論文集, 407-466, 1988.
- 7) 佐野良久, 野崎一郎, 濱谷拓, 中井正則, 管和利: 高水敷に樹木を有する複断面直線水路の流れと浮遊砂の輸送について, 水工学論文集, 第35巻, 483-488, 1991.
- 8) 椿東一郎: 水理学II (第14章), 基礎土木工学全書7 (森北出版), 1974.
- 9) 荒井信行, 清水康行: 現場のための水理学 (3) 一掃流砂と河床変動一, 土木試験所月報, No.413号, 1987.
- 10) Rubey W. W.: Settling Velocities of gravel, sand and silt particles, American Journal of Science, Series 5, Vol. 25, :325-338, 1933
- 11) 岩垣雄一: 限界掃流力の流体力学的研究, 土木学会論文集, 第41号, pp.1-21, 1956.

(2018. 4. 3受付)