

自然堤防帯河川の高水敷掘削後の土砂再堆積 ～揖斐川と長良川の相違点とその要因～

RE-SEDIMENTATION PROCESS AFTER FLOOD-CHANNEL EXCAVATION IN LOWLAND RIVERS: A CASE STUDY IN THE IBI RIVER AND THE NAGARA RIVER

原田守啓¹・角田美佳²・赤堀良介³・永山滋也^{4,5}

Morihiro HARADA, Mika TSUNODA, Ryosuke AKAHORI and Shigeya NAGAYAMA

¹正会員 博(工) 岐阜大学准教授 流域圏科学研究センター (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

²学生員 岐阜大学大学院 自然科学技術研究科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

³正会員 Ph.D. 愛知工業大学准教授 土木工学科 (〒470-0392 愛知県豊田市八草町八千草1247)

⁴非会員 博(農) 岐阜大学研究員 流域圏科学研究センター (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

⁵ 株式会社建設環境研究所 中部支社 (〒460-0003 愛知県名古屋市中区錦2-15-22)

Flood-channel excavation is being implemented as a flood countermeasure in lowland rivers. The purpose of this research is to examine the cause of the difference in the sediment deposition phenomenon occurring after flood-channel excavation among each river system. The re-sedimentation process at the excavation site was investigated in the Ibi River and the Nagara River. The difference between the two rivers became clear by investigating the grain size distribution of sediments accumulated in the past and last flood term. In the Ibi River, the accumulation of wash load was observed, whereas in the Nagara River, it did not occur after excavation work. In two study sites, the accumulation potential of suspended-load was estimated by a simple model while changing the water level and particle size. The model expected that deposition of wash load occurred at both sites. The model result was consistent with the observation in the Ibi River. However, there was no deposition of wash load at the site of the Nagara River. Our results and past observations indicate that the difference between the two rivers is attributed to wash load concentration of flowing water dominated by watershed characteristics.

Key Words: flood-channel excavation, sediment deposition, wash load, lowland rivers

1. はじめに

河道の洪水流下能力の向上のため、多くの河川で河積確保のための河道掘削が実施されており、自然堤防帯(セグメント2)河道においては低水路に沿った高水敷の掘削により対応されている例が多い。高水敷掘削によって河道内にかつての氾濫原的な環境を創出しようとする試みもなされてきており、土砂の再堆積に伴って形成される微地形や水域が、イシガイ科淡水二枚貝など、氾濫原的な環境に依拠する生物の生息場の形成に寄与していることも報告されている¹⁾。しかしながら、掘削後の短期間に土砂が再堆積^{2,3)}したり、植物が繁茂^{例えば4)}したりすることによって、掘削の効果が次第に低下する事例が各地で報告されており、高水敷掘削による治水面での効果、氾濫原的環境の創出という意味での環境面での効果は永続的なものではないことを前提に河川管理を行っ

ていく必要がある⁵⁾と考えられる。

高水敷掘削後の土砂再堆積のプロセスには、河川植生が細粒土砂を捕捉する効果が深く関与していること⁶⁾が理解されてきているものの、高水敷掘削後のレスポンスに水系・河川によって違いが生じる要因については、未だ解明されていない点も多く残されている。

本研究では、自然堤防帯区間における高水敷掘削が実施された木曽川水系揖斐川及び長良川を対象に、両河川における掘削後の土砂再堆積状況を現地調査等により把握した。また、簡易な浮遊砂モデルを構築して、両河川において堆積しうる浮遊砂の粒度分布等について検討した。さらに、モデル計算結果を現地調査結果と比較することにより、高水敷掘削後に両河川の間で堆積傾向の違いを生じさせるいくつかの要因について考察した。

2. 手法



図-1 揖斐川・長良川高水敷掘削範囲と調査地の位置
濃尾平野水害地形分類図⁷⁾を下図として作図.

(1) 調査地の概要

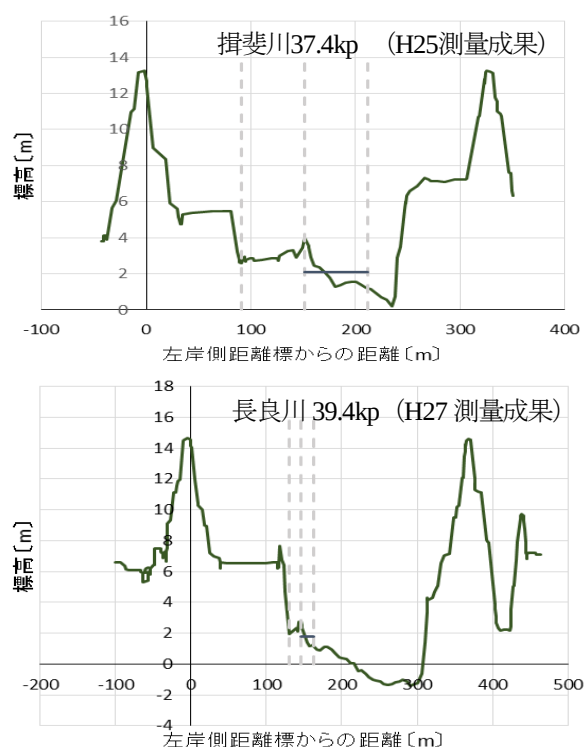
揖斐川では32kpから39kpの区間において、平成13年度から平成19年度にかけて高水敷掘削が行なわれた。長良川では39kpから44kpの区間において、平成21年度から現在にかけて高水敷掘削が行なわれている。図-1に示すとおり、これらの区間はともに扇状地区間の少し下流に位置しており、セグメント1からセグメント2への遷移区間にあたる。調査地は、2河川の比較を容易にするために、河道が直線的な区間であること、最寄りの水位流量観測所のデータを使用しやすいこと等の観点から、揖斐川は37.4kp付近、長良川は39.4kp付近に設定した。それぞれ掘削後に12年、5年が経過している。揖斐川は先行研究²⁾で掘削後に堆積した土砂の層序と粒度分布が把握されており、細砂やシルトを中心としたいわゆるウォッシュロードが多く堆積していることが分かっている。

(2) 水文観測、河川測量成果、河床材料縦断分布の把握

両河川における水位流量を把握するため、揖斐川は万石水位・流量観測所(40.6kp)，長良川は墨俣水位・流量観測所(39.0kp)における観測値を水文学データベースより取得した。また、河川管理者より、定期縦横断測量成果、低水路における河床材料調査結果を借用し、両河川の縦断形や河床材料の縦断分布を把握した。

(3) 現地調査

揖斐川調査地、長良川調査地を対象に、堆積土砂の層厚、粒度分布を把握するとともに、2017年出水期におけ



W.L.: 水位[m]
 h_1 : 低水路水深[m], h_2 : 掘削地水深[m]
 z_m : 低水路河床高[m], z_r : 掘削地河床高[m]

図-3 単純化した河道モデル

る堆積層厚及び堆積物の粒度分布を把握した。加えて、UAV空中写真撮影により、調査地の状況を記録した。

堆積土砂の層厚及び粒度分布の把握は、揖斐川は2地点、長良川は4地点の定点を設置して行なった。堆積土砂は現地でサンプリングし、室内試験（土の粒度試験）により粒度分布を把握した。揖斐川は先行研究で堆積土砂について十分な知見が得られていること、掘削後12年が経過し、土砂堆積等による急激な地形変化が予想されなかったことから、2地点のみとした。長良川は調査地の経年変化や出水等による変化の傾向に不明な点が多いため、4地点の定点に加えて、土砂の堆積量を正確に把握するために、VRS-GPSを用いた多点計測により掘削地の面的な形状を把握した。

(4) 単純化した河道における簡易な浮遊砂モデル

両河川の掘削地に堆積する土砂の粒度分布や量につ

いて検討するために、低水路と掘削地における浮遊砂フラックスの差によって、掘削地に堆積を生じうるポテンシャルを推定する簡易モデルを構築した。

現実の河川で高水敷掘削地への浮遊砂の堆積を生じさせる現象は複雑であり、例えば、浮遊砂の横断方向への拡散⁹⁾、複断面河道に見られる大規模平面渦⁹⁾、低水路と高水敷の境界部に発生する二次流⁹⁾による輸送に加え、河道の湾曲の影響、さらに樹木や草本類による影響^{6,10)}が重複していると考えられる。これらの事象を全て考慮することが可能な土砂堆積評価モデルを構築することは、現象の的確な表現という観点からは好ましいが、本研究では各地の河川にも容易に適用可能な簡易手法を指向する立場から、掘削地への土砂堆積を可能な限り単純化したモデルにより評価することを試みる。

本モデルでは、図-2に示す複雑な形状の河川断面を、図-3に示すように、異なる高さの低水路、掘削地、高水敷からなる河道モデルへと単純化し、低水路と掘削地における浮遊砂フラックスの鉛直分布にのみ着目する。低水路(main channel)の浮遊砂フラックスを $F_{sm}(z)[\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2]$ 、掘削地(excavation site)の浮遊砂フラックスを $F_{se}(z)[\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2]$ としたとき、土砂堆積ポテンシャル F_{sp} を式(1)のとおりに定義する。

$$F_{sp} = \int_{z_e}^{WL} F_{sm}(z) dz - \int_{z_e}^{WL} F_{se}(z) dz \quad (1)$$

なお、ここでいうポテンシャルとは、物理的な意味での用語ではなく、堆積を生じうる土砂の潜在的な量を示す意図で用いている。

浮遊砂フラックスの計算過程は以下のとおりである。紙数の都合から計算手順のみ示す。個々の数式は文献¹¹⁾を参照されたい。まず、計算を行う地点の低水路河床高 z_m 、掘削地河床高 z_e 、河床勾配 I_b 、粗度高さ k_s を計算地点に依存する与条件とし、土砂の粒径 d 、計算水位 WL を変数とする。摩擦速度 u^* を河床勾配と水深 h により求め、粗面乱流の対数則式により流速分布 $u(z)$ を得る。続いて、浮遊砂濃度分布 $C(z)$ は、Rouseの濃度分布式により与える。Rouse式に含まれる粒子沈降速度 w_{0l} はRubey式により与える。浮遊砂濃度の基準面高さは $z_a=0.05h$ とし、Garcia and Parker式により基準面濃度 C_a を与える。ウォッシュロードに属する細粒分も、流水中の運動機構の面では浮遊砂と同様であることから、浮遊砂とみなして計算する。こうして求めた浮遊砂濃度分布 $C(z)$ と流速分布 $u(z)$ の積により、浮遊砂フラックスの鉛直分布 $F_s(z)$ を得る。

土砂堆積ポテンシャル F_{sp} は、低水路及び掘削地を流下する表流水に含まれる浮遊砂が平衡濃度で流れる際に、掘削地河床高 z_e よりも高い位置を流れる低水路の浮遊砂が、移流や拡散等によって掘削地に運ばれ、その結果掘削地に堆積しうる土砂の量を表現している。実際には、ある河川区間における浮遊砂濃度は、上流から流下してくる流水に含まれる濃度や、河床での存在量にも依存しているのに対し、本モデルは流水が流しうる最大値で評価していることとなる。また、土砂堆積ポテンシャルは、鉛直積分された流砂フラックスの差の量として表現されており、もしも、この量がその場に瞬時に堆積すると仮定した場合、この量は単位時間・単位平面積あたりの土砂の堆積ボリューム $[\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2]$ を示している。見方を変えれば土砂の堆積速度 $[\text{m}/\text{s}]$ を示しているといえる。

表-1に示す揖斐川掘削地(37.4kp断面)、長良川掘削地(39.4kp断面)における河道の条件に対し、まず、流送土砂の粒径 d と河川水位 WL を変化させて、土砂堆積ポテンシャルを算出した。次に、各粒径・各水位での土砂堆積ポテンシャルに、河川水位の時間頻度分布を掛け合わせるにより、時間頻度分布を考慮した土砂堆積ポテンシャルを算出した。これを粒径ごとに積分することによって生成した粒度分布と実際に堆積している土砂の粒度分布との比較を行った。

3. 結果

(1) 掘削地堆積物の粒度分布と堆積速度

現地調査は、出水期の前(2017/5/31)と出水の間(7/30, 9/6)、出水期の後(11/28)の計4回行った。今出水期中に、掘削地が十分冠水する出水は、揖斐川で3回、長良川で5回発生した。

揖斐川の高水敷掘削地では、年あたり数cmから10数cmの速度で土砂が堆積している²⁾。図-4に示す調査地では、平成17年度の掘削後に85cm程度の土砂堆積が生じており、平均堆積速度は年あたり約8cmである。堆積物の内容は、下層から、砂が45cm、砂質シルトが20cm、粘土が20cmであった。出水期前後に行った定点調査では、新たに2cmの堆積が確認された。堆積物は粘土からシルトであった。一方、図-5に示す長良川の掘削地にみられる土砂は粗砂から細礫であり、揖斐川調査地にみられるようなシルトや粘土は確認されなかった。また、定

表-1 簡易な浮遊砂モデルの計算条件

項目	単位	揖斐川調査地	長良川調査地	備考
河床勾配 I_b	-	1/3265	1/4594	計画河床勾配
粗度高さ k_s	m	0.036	0.036	Manningの粗度係数0.024を換算
低水路河床高 z_m	m	2.11	1.79	低水路のうち掘削地前面の平均河床高
掘削地河床高 z_e	m	3.10	2.18	VRS-GPS測量結果(2018/5/31現地調査)
土砂の粒径 d	mm	0.003, 0.017, 0.053, 0.091, 0.18, 0.34, 0.64, 1.43, 3.38 (9段階)		ふるい分け試験及び沈降試験の粒径階級の中央値を目安に設定
計算水位 WL 刻み	m	0.05		
計算水位の上限	m	11.50		既往最高水位を参考に設定



図-4 2017年出水期後の揖斐川調査地の状況（左：景観，中：空撮写真及び定点位置，右：No.5 堆積土砂）

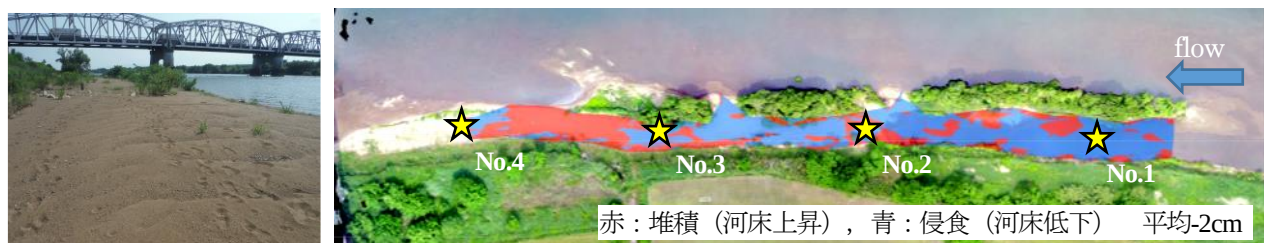


図-5 2017年出水期後の長良川調査地の状況（左：景観，右：空撮写真，定点位置及び河床変動傾向）

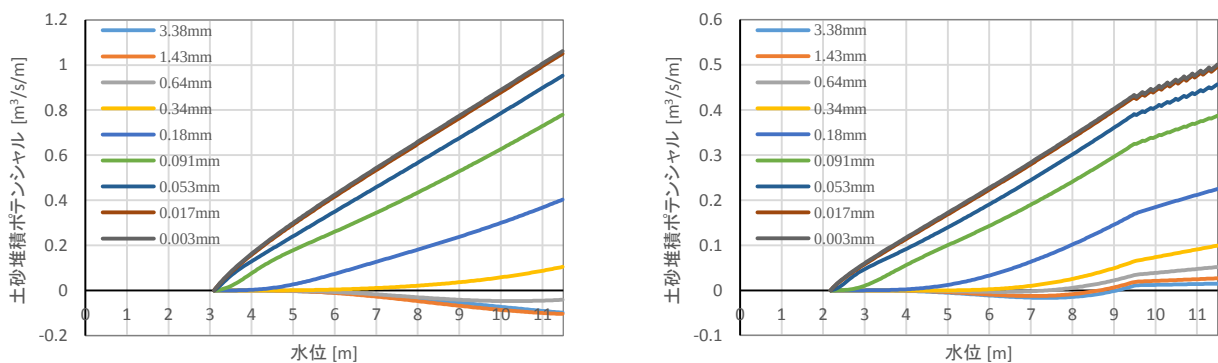


図-6 土砂堆積ポテンシャル（左：揖斐川調査地，右：長良川調査地）

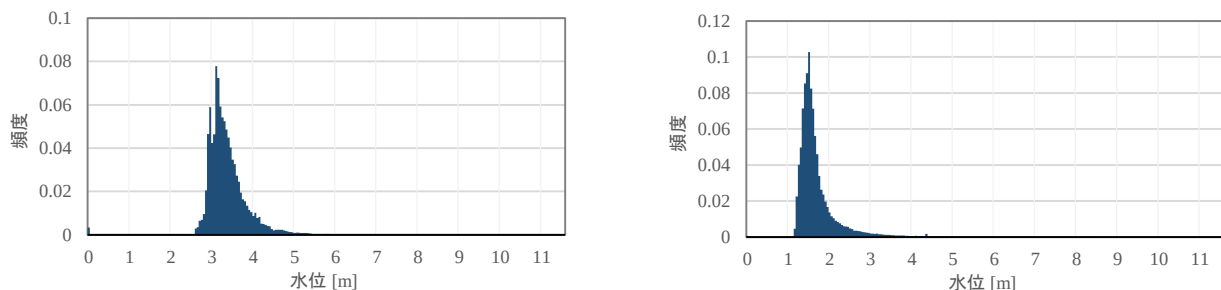


図-7 水位時間頻度分布（左：揖斐川調査地，右：長良川調査地）

点調査及びVRS-GPS測量の結果，平成24年度の掘削後に土砂の堆積はほとんど生じておらず，今出水期における調査地の平均的な河床変動量は-2cmであった。

(2) 水位，粒径と土砂堆積ポテンシャルの関係

図-6に示すとおり，土砂堆積ポテンシャルの評価結果は，2河川で概ね同様の結果であった。粒径が小さい土砂ほど，低い水位から堆積が生じること，土砂堆積ポテンシャルが高い傾向にあることを読み取ることができる。また，粗い粒径の土砂は水位が上昇しても浮遊砂として堆積することは想定されないことも確認される。

(3) 水位の時間頻度を考慮した土砂堆積ポテンシャル

土砂堆積ポテンシャルに時刻水位の頻度分布をかけ合わせることで，水位の発生頻度を考慮した土砂堆積ポテンシャルの計算が可能である。水位の発生頻度は，揖斐川万石，長良川墨俣の観測所における過去10年間の時刻水位を集計し，1年あたりの発生頻度を示す確率密度分布として表した。また，水位観測所と調査地の区間距離に河床勾配を掛け合わせた分の水位をスライドさせて調査地における水位の頻度分布として利用した。水位頻度分布を図-7に示す。

時間頻度を考慮した土砂堆積ポテンシャルを図-8に示す。頻度が低い大出水よりも，数m程度の水位上昇時のほうが，土砂の堆積に寄与する割合が大きいことを示している。

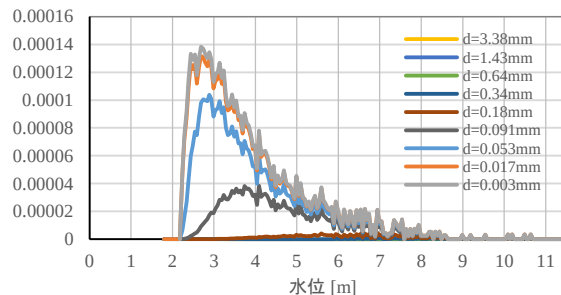
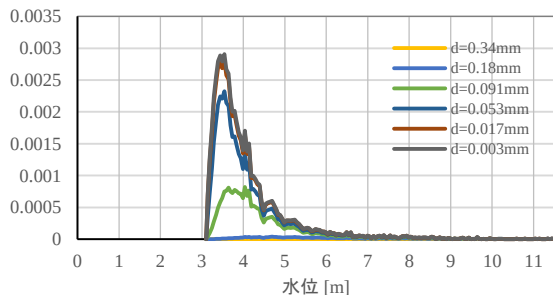


図-8 時間頻度を考慮した土砂堆積ポテンシャル (左：揖斐川調査地，右：長良川調査地)

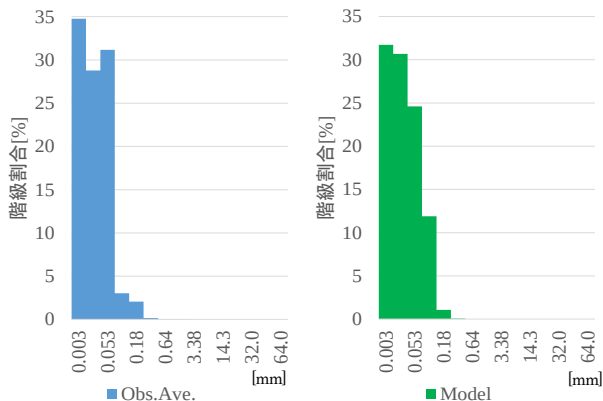


図-9 揖斐川堆積土砂の粒度分布
(左：実測，右：モデル推定)

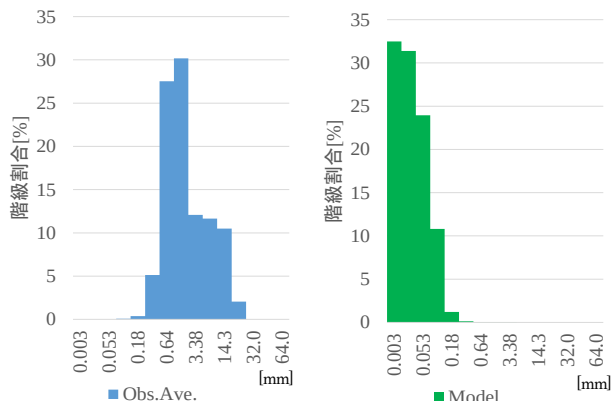


図-10 長良川堆積土砂の粒度分布
(左：実測，右：モデル推定)

(4) 土砂堆積ポテンシャルから推定される粒度分布

図-8に示した土砂堆積ポテンシャルを粒径ごとに全水位にわたって積分すると、各粒径の積分値が総量に占める割合により、堆積する可能性がある土砂の粒度分布が表現される。このようにして推定された粒度分布と現地調査で確認された粒度分布を図-9、10にヒストグラムで示す。本モデルから推定された堆積土砂の粒度分布は、揖斐川と長良川の間に大きな違いはなく、ウォッシュロードの堆積が卓越することが予測された。モデルによる推定結果は、揖斐川掘削地で観測された堆積土砂の粒度分布と良く一致した。しかし、細粒分の堆積が見られなかった長良川掘削地の観測結果には一致しなかった。

4. 考察

(1) 長良川に細粒分の堆積が見られない要因

簡易な浮遊砂モデルによる検討の結果、揖斐川も長良川も、ウォッシュロードとみなされる粒径集団が堆積している状況であると評価されたにも関わらず、長良川掘削地では細粒分の堆積が確認されなかった。この原因について考察する。

まず、掘削地の状況の違いが指摘される。揖斐川の掘削地には草本類やヤナギ類が繁茂しており、流水に含まれるウォッシュロードをより捕捉しやすい状況であるといえる。また、掘削地の幅が相対的に広く、低水路と比べて掃流力が低い掘削地の領域が広いことも影響してい

ると考えられる。しかし、これだけでは長良川掘削地にウォッシュロードの堆積がみられない原因は説明できない。もしも、長良川においても、高濃度のウォッシュロードが一次的に堆積し、その後フラッシュされたとすれば、堆積土砂の中から細粒分が検出されるはずであるが、図-10に示した掘削地表層付近の堆積土砂だけでなく、より深い層や自然堤防状の微高地の土砂についても、ウォッシュロードに相当する粒径集団は検出されなかった。このことから、長良川では出水時のウォッシュロードの濃度は掘削地に堆積が生じるほどは高くなく、一方で、揖斐川では出水時に高濃度のウォッシュロードが流下している可能性が示唆される。

(2) 長良川の出水時のウォッシュロード濃度

長良川は出水時のウォッシュロード濃度が、掘削地に堆積が生じるほど高くない可能性が示唆されたが、この可能性を裏付ける調査が過去になされている。

建設省が国内16河川地点で出水時に採水して行なった浮遊砂の観測結果¹²⁾に、長良川墨俣地点におけるプロットも多数含まれている。本調査結果により浮遊砂量 Q_s [m³/s] と流量 Q [m³/s] の間に $Q_s = \alpha Q^2$ の関係性が見出されているが、 α は川によって 10^2 オーダー程度の幅があり、長良川墨俣地点はその最も低い領域に位置している。このことから、長良川は元来、出水時のウォッシュロード濃度が低い流域特性を有する河川であると考えられ、示唆された可能性を裏付けるものとなっている。揖斐川については直接比較できる資料が得られていないため、揖斐川が長良川よりもウォッシュロード濃度が高い可能性

を証明することは現時点ではできないものの、河川管理者の経験によれば、揖斐川は長良川よりも出水によって濁りやすい傾向があるとの証言を得ている。

(3) 揖斐川と長良川の自然堤防帯区間に流下する土砂の質と量に影響を及ぼしうる要因

揖斐川と長良川の自然堤防帯区間における高水敷掘削後の土砂堆積に影響を及ぼしうる要素として、出水時のウォッシュロード濃度の違いが要因の一つとして示唆され、それを支持する資料を示した。ウォッシュロードは河道内に留まらず一出水中に河口にまで至るものされており、土砂生産域からのウォッシュロードの生産量が、そのまま掘削地に到達する土砂濃度に反映されていると考えられる。しかしながら、揖斐川掘削地に多量に堆積している土砂はウォッシュロードばかりではなく、掃流砂としても浮遊砂としても振舞いうる砂分も、低い層には多く含まれている²⁾。そのため自然堤防帯区間に流下する土砂の質と量には、土砂生産域である山地から、谷底平野・扇状地（セグメント1）を経て、自然堤防帯に至る土砂の流下過程の影響も考慮されなくてはならない。

考えられる影響要因としては、ダム・堰等による土砂の貯留や濁水放流、セグメント1からセグメント2に至る河床縦断形等の影響が考えられる。とくに、高水敷掘削が盛んに行なわれている区間は、セグメント1からセグメント2への勾配変化点の下流側であり、上流区間から流下してくる土砂の質と量に、河床縦断形が大きく影響していることは、沖積河川のセグメント形成機構¹³⁾からも想定される。揖斐川は本川にダムが複数あるのに対し長良川は本川にダムがないこと、揖斐川のセグメント1は長良川と比べて延長が短く、勾配も急であることなどが2河川の違いとして挙げられる。上記の要因が、自然堤防帯の高水敷掘削地まで流下する土砂の質と量に与える影響について、今後より詳細に検討を進めていく。

5. 結論

本研究では、自然堤防帯区間における高水敷掘削が実施された木曽川水系揖斐川及び長良川を対象に、2河川における掘削後の土砂再堆積状況を現地調査等により把握した。また、簡易な浮遊砂モデルを構築して、両河川において堆積しうる浮遊砂の粒度等について検討した。

現地調査の結果、揖斐川掘削地ではウォッシュロードの堆積が継続していることが観測されたのに対して、長良川掘削地では細粒土砂の堆積は確認されなかった。

時間頻度を考慮した土砂堆積ポテンシャルは、頻度が低い大出水よりも、数m程度の水位上昇時のほうが、土砂の堆積に寄与する割合が大きいことを示した。また、土砂堆積ポテンシャルを積分することによって得た粒度

分布は、揖斐川掘削地における堆積土砂の粒度分布の傾向とよく一致したが、長良川掘削地の状況とは一致しなかった。

高水敷掘削後の土砂再堆積に2河川間の違いを生じさせる要因として、山地での生産土砂の質と量、土砂生産域からセグメント1を通過してセグメント2に至る土砂の輸送経路等が影響していることが示唆された。特に、2河川で出水時のウォッシュロード濃度に違いがあることが過去の資料から強く示唆されており、これらの要因の検証を今後進めるとともに、モデルに反映していく。

謝辞：本研究は、河川砂防技術研究開発助成地域課題「平成29年度 高水敷掘削後の再堆積過程に流送土砂の粒度組成と流況が与える影響に関する研究（代表：原田守啓）」、JSPS科研費16K06520（代表：赤堀良介）の助成により実施された。本研究の実施にあたり、木曽川上流河川事務所調査課より多大なる協力を得た。

参考文献

- 1) 永山滋也, 原田守啓, 佐川志朗, 萱場祐一: 揖斐川の高水敷掘削地におけるイシガイ類生息環境一掘削高さおよび経過年数との関係一, 応用生態工学, 19(2), pp.131-142., 2017.
- 2) 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), 71, 4, pp.I-1171-1176., 2015.
- 3) 武内慶了, 服部敦, 藤田光一, 佐藤慶太: 細粒土砂堆積による高水敷形成現象を1次元河床変動計算に組み込んだ河積変化予測手法, 河川技術論文集, 第17巻, pp.161-166., 2011.
- 4) 池田茂, 片桐浩司, 大石哲也, 原田守啓, 萱場祐一: 河道掘削後の河川氾濫原の変化過程に関する考察, 河川技術論文集, 21, pp.247-252., 2015.
- 5) 永山滋也, 原田守啓, 萱場祐一: 高水敷掘削による氾濫原の再生は可能か?～自然堤防帯を例として～, 応用生態工学, 17(2), pp.67-77, 2015.
- 6) 藤田光一, John A. Moody, 宇多高明, 藤田政人: ウォッシュロードの堆積による高水敷の形成と川幅縮小, 土木学会論文集, No.511/II-37, pp.47-62, 1996.
- 7) 大矢雅彦編, 地形分類の手法と展開, 古今書院, 219pp (附図), 1983.
- 8) 池田駿介, 泉典洋: 浮遊砂の横断方向拡散係数について, 土木学会論文集, 434, II-16, pp.47-55, 1991.
- 9) 池田駿介, 佐野貴之, 福元正武, 河村一弘: 複断面開水路に生じる大規模組織渦と浮遊砂輸送, 土木学会論文集, 656, II-52, pp.135-144, 2000.
- 10) 清水義彦, 小葉竹重機, 新船隆行: 樹林化河道の洪水流況と浮遊砂輸送に関する数値計算, 水工学論文集, 第44巻, pp.819-824, 2000.
- 11) 関根正人著: 移動床流れの水理学, 共立出版, pp.115-133, 2005.
- 12) 建設省河川局監修: 改訂建設省河川砂防技術基準(案)調査編, pp.314-315, 1976.
- 13) 藤田光一, 山本晃一, 赤堀安宏: 勾配・河床材料の急変点を持つ沖積河道縦断形の形成機構と縦断形変化予測, 土木学会論文集, 600, II-44, pp.37-50, 1998.

(2018. 4. 3受付)