

洪水時のウォッシュロード濃度の簡易計測に基づく土砂再堆積予測

ESTIMATING SEDIMENTATION RATES BASED ON SIMPLE MEASUREMENT OF FINE SEDIMENT CONCENTRATION

原田守啓¹・赤堀良介²・武田正太郎³

Morihiro HARADA, Ryosuke AKAHORI and Shotaro TAKEDA

¹正会員 工博 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)

³非会員 工修 国土交通省中部地方整備局木曽川上流河川事務所 (〒500-8801 岐阜県岐阜市忠節町5-1)

This research proposes the method which can forecast fine-sediment deposition rate after flood-channel excavation work in lowland rivers. We conducted the surface water sampling during the floods in the Ibi River and the Nagara River, the results of the water sampling showed that the Ibi River had a higher sediment concentration than the Nagara River. Based on the relationship between the grain size distribution of bed material in the main channel and the sediment at the excavation site, the analysis results of the origin of the sediment; suspended-load or wash-load, were shown. The model calculation of fine-sediment deposition rate proposed in this study can obtain the result which agrees well with the field survey only by the fine-sediment concentration corresponding to the flow discharge and the frequency distribution of the discharge in the situation where the excavation site is inundated.

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

1. はじめに

河道の洪水流下能力を向上するための樹木伐採・河道掘削が全国的に行なわれている。とくに近年の豪雨災害の頻発を受けて措置された2018年度からの3ヶ年緊急対策では、直轄河川のみならず都道府県管理河川においても、伐採・掘削が大々的に実施されている。これらの措置は、河積を増加させ、河道の粗度を低下させることによって洪水時の水位低下を図るものであり、現実性が高い方策であるが、河川や流程によっては、掘削後に土砂の再堆積^{1,2)}や樹林化^{3,4)}が生じる事例が報告されている。掘削後の河道のレスポンスを予測し、計画的かつ順応的な河道管理を行うためには、河川ごと・流程ごとに傾向が異なる掘削後の土砂再堆積を予測可能な手法が望まれる。これは同時に、河川ごと・流程ごとに異なる土砂輸送特性を、工学的にどのように把握・記述するかという課題としても捉えることができる。

流砂は一般的に、ベッドマテリアルロード（掃流砂と浮遊砂）とウォッシュロードに分けて現象の記述がなされてきた。ウォッシュロードは、河床材にはほとんど含

まれない細粒成分⁵⁾とされ、運動特性の面からは、移動限界を超えると掃流状態を経ずに浮遊状態に移行する概ね0.1～0.2mm以下の土砂⁶⁾を指す。自然堤防帯河道の低水路の河床にはみられない（あるいはわずかに存在しない）が、高水敷の堆積土砂にはウォッシュロードに相当する細粒土砂が多く含まれ、河道拡幅後の川幅縮小⁷⁾や高水敷掘削後の再堆積^{12,7)}に、ウォッシュロードが占める役割は無視できない。

著者らは木曽川水系揖斐川における高水敷掘削後の再堆積土砂の堆積速度と粒度分布を調査した結果、揖斐川の堆積速度は大きく、堆積土砂の大部分がウォッシュロードに相当する細粒土砂であることを示した⁸⁾。また、土砂再堆積過程を簡易なモデルにより解析した結果を踏まえ、揖斐川と長良川の土砂堆積速度と堆積物の違いが、両河川が輸送するウォッシュロード濃度の違いによる可能性を指摘した²⁾。流水中に輸送されるウォッシュロードの量は、流域の土砂供給源に依存しており、河道の水理的条件のみでは定まらない⁹⁾。したがって、高水敷掘削後にウォッシュロードが再堆積しうるかを判断するには、その河川特有のウォッシュロードの輸送特性を把握する必要があると考えられる。

本研究は、木曽川水系揖斐川と長良川における土砂再堆積傾向の違いが、両河川のウォッシュロードの輸送特性によるとの仮説を検証すべく、2018年と2019年の出水期の高水流量観測時の採水により得られたウォッシュロード濃度の計測結果を示す。また、計測結果を踏まえてウォッシュロードを中心とした細粒土砂の再堆積の予測手法の高度化を図る。さらに、これらの手法の他河川への適用性について議論するものである。

2. 手法

(1) 高水敷掘削工区と採水地点

揖斐川では平成13年度から平成19年度にかけて、32kpから39kpの区間において14工区における高水敷掘削が行なわれた。長良川では平成21年度から現在にかけて、39kpから44kpの区間で20工区における高水敷掘削が行なわれている。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2-2への遷移区間にあたる。

採水地点は、揖斐川は万石水位・流量観測所が設置されている揖斐大橋（40.6kp）、長良川は墨俣水位・流量観測所が設置されている長良大橋（39.0kp）とし、木曽川上流河川事務所が高水流量観測を実施する際に、後に示す手法で採水を行った。両河川の掘削地と水位・流量観測所の位置は、既報²⁾のとおりである。

(2) 各工区の土砂堆積速度の算出

両河川における各工区の土砂再堆積速度を定量的に評価するため、定期横断測量成果を距離標座標に基づき3次元点群データに変換し、ArcGIS 3D Analystによって生成したTINサーフェスの差分により得られる地形変化量(m^3)を、各工区ごとに面積(m^2)と年数で除して、各工区の平均的な土砂堆積速度($m/year$)を算出する。揖斐川は全14工区、長良川は全20工区について、各工区の土砂堆積速度と掘削高さの関係について整理する。

(3) 河床材料・堆積土砂の粒度分布の把握

掘削地に再堆積した土砂の粒度分布と、低水路の河床材料の関係性を把握するため、揖斐川14工区のうち3工区、長良川20工区のうち3工区を掘削高さの違いに着目して抽出し、土砂サンプリングと土の粒度試験を行う。揖斐川掘削地においては、掘削後の再堆積の過程で、低水路に沿って形成される自然堤防状の微高地とその背後に後背湿地的な景観を呈する微高地とが形成¹⁾され、堆積土砂の粒度分布が異なることが把握されていたことから、それぞれについてサンプリングを行う。また、河床材料、堆積土砂の粒度分布と、(4)に示す採水試料中に含まれる細粒土砂の粒度分布とを比較する。さらに、堆積土砂中に含まれるウォッシュロードの割合と、(2)で

算出した堆積速度を組み合わせることにより、ウォッシュロードの堆積速度を算出し、(5)に示すモデルの検証データとする。

(4) 高水流量観測時の採水方法と室内分析手法

揖斐川、長良川各1地点（高水流量観測地点となっている橋梁）での採水は、1洪水中に複数回行われる高水流量観測の合間に行うことにより、流量波形と土砂濃度波形を同時観測することを目的とする。採水方法は、高水流量観測作業の合間に短時間に安全に採水できること、採水試料中に含まれる土砂濃度の分析が可能であること、の2つの視点から検討した。

流水中を浮遊しながら運搬される土砂の粒径と濃度は、時空間的な分布を持つ。とくに、水深方向の濃度分布は粒径によって異なることから、浮遊砂量全体を捉えるのであれば、水深方向に複数地点で採水することが必要であり、横断方向にも複数の箇所から採水することが望ましい。しかしながら、高水流量観測時の採水には多くの危険があるため、本研究では、ロープをつけた採水バケツを用いた表面採水のみとした。採水地点は、2018年の採水は低水路中央のみ、2019年の採水は、低水路中央と低水路・高水敷境界付近で採水を行った。表面採水により得られる試料に含まれる粒度分布と鉛直濃度分布の関係性については結果に示す。

1採水試料の必要量は、分析機器の精度に依存する。本研究では、採水試料の体積をメスシリンダーにより1ml単位で計測した後、ガラス繊維ろ紙GS-25（保持能：0.6 μm 、直径：11cm）を用い、プフナー漏斗と吸引ろ過装置を用いてろ過し、ろ紙を乾燥炉にて乾燥した後、電子天秤で計量し、ろ紙分を差し引いて土砂の重量を得る。土砂の密度で除せば土砂体積も得ることもできる。この手法では、採水試料の必要量は電子天秤の機器精度と採水試料中の土砂濃度に依存する。本研究では、最小表示0.001gの電子天秤（島津製作所 BL320H）を用いた。過去の観測記録を参照し、体積濃度 $1.0 \times 10^{-5} (m^3/m^3)$ オーダーまでは信頼できる値を得ることを目標とし、1試料の採水量は2.0Lとした。なお、土粒子比重を2.6と仮定した場合、2.0Lの採水試料における0.001gの土砂は、体積濃度 $1.3 \times 10^{-6} (m^3/m^3)$ に相当する。

採水試料に含まれる細粒土砂の粒度分布は、ごく微量のため沈降分析が困難であったため、レーザー回折・散乱法により計測した。

(5) ウォッシュロード堆積速度の簡易モデル

既報²⁾の簡易浮遊砂モデルは、高水敷掘削地を含む河川断面をかなり単純化し、低水路を流送されうる土砂フラックスのうち掘削地よりも高い部分を流下する分と、掘削地上を流送されうる土砂フラックスを比較して、その大小関係によって堆積を判定するという、非常に粗い仮定を置いて計算を簡略化する代わりに、年間の流量変

動（水位変動）を時間頻度分布に変換し、最小水位から最高水位までの全ての流況における土砂堆積を扱うという利点を有する。本研究では、簡易浮遊砂モデルの利点を踏襲しつつ、堆積判定の部分の計算方法を精査した上で、ウォッシュロードのみを対象とした堆積速度を算出することを目標にモデル修正を行う。

簡易浮遊砂モデルの基本的な計算手順は以下のとおりである。①計算対象とする断面における水位の頻度分布を設定する。本研究では、最寄の水位観測所における直近10年分の時刻水位（欠測がなければ $n=87,648$ ）より水位1cm刻みで頻度分布を作成する。②計算断面における H - Q 式を設定する。計算水位と流量 Q を関係づけるためである。③計算対象粒径を設定する。④水位を1cm刻みで変化させながら、堆積速度 dz_b/dt (m/s)を求める。⑤各水位において計算した堆積速度に、計算水位の発生頻度に応じた時間を乗じて積分することにより、1年あたりの堆積速度(m/year)を得る。③～⑤の手順を計算対象粒径ごとに行うことにより、掘削地にどの粒径の土砂がどれくらい堆積するか、すなわち堆積土砂の粒度分布も想定することが可能である。

一般的な河床変動解析における浮遊砂の扱いでは、河床近傍の基準面高さ z_a における境界面を仮定して、境界面を通過する巻き上げと沈降の収支によって、流水中の浮遊砂の輸送方程式と河床変動方程式（(1)式）の間での土砂のやりとりが表現されている。

$$\frac{dz_b}{dt} = \frac{1}{1-\lambda} w_0 C_b - q_{su} \quad (1)$$

ここに、 z_b : 河床高 (m) , λ : 空隙率, w_0 : 粒子沈降速度 (m/s) , C_b : 基準面における土砂濃度 (m^3/m^3) , q_{su} : 単位時間・単位面積に河床から巻き上げられる土砂体積 ($=w_0 \cdot C_a$, m/s) , C_a : 平衡状態における基準面濃度である。左辺は河床高の変化速度、すなわち堆積速度 (m/s) となる。本研究では一般的な浮遊砂の取り扱いに準じ、掘削地において(1)式を計算して堆積速度を求めることとする。

ウォッシュロードのみを対象とした際の(1)式の取り扱い、ウォッシュロード堆積による川幅縮小を論じた藤田ら⁶⁾の手法を一部参考とする。空隙率 λ は簡単のため0.40とする。掘削地における河床からの巻き上げ量 q_{su} は、Lane-Kalinske式（以下、L-K式）により基準面高さ $z_a=0.05h$ における基準面濃度 C_a を与える。粒子沈降速度 w_0 はRubey式により与える。

掘削地を流下するウォッシュロードの濃度 C は、河川ごとにあらかじめ設定した流量 Q との関係式（ Q - C 式）により直接的に与えるものとし、本研究においては採水調査結果に基づく Q - C 式を計算に用いる。後述するように本研究の採水調査では、低水路中央と高水敷境界付近の細粒土砂濃度は同程度であった。また、複断面河道においては、大規模な流れ構造の一つである強い水平混合が生じる。これらも踏まえ、断面内における横断方向の

ウォッシュロードの濃度分布は一樣と仮定する。また、掘削地の基準面 z_a における濃度 C_b は、粒径に応じた土砂濃度の鉛直分布を考慮して設定する必要がある。鉛直分布形状は各種の分布式により多少の違いはあるものの、粒径が小さければ鉛直分布はほぼ一樣となる。例えば0.1mmに対してL-K式を計算すると、水面付近の相対土砂濃度 C/C_a は0.46となるが、0.05mmでは0.82、0.01mmでは0.99となり、底面付近から水面付近までは濃度は一樣になる。後に結果(2)に示すように、表面採水で得られた土砂の粒度分布は揖斐川と長良川ではほぼ同様で、その幅は0.3 μm ～0.2mm程度であり、その80～90%が0.05mm以下であったことから、土砂濃度の鉛直分布はほぼ一樣とみなし、 $C_b=C$ とおく。

L-K式に限らず、基準面濃度 C_a の計算式では沈降速度 w_0 と摩擦速度 u^* の比（ラウス数）が支配的な変数となる。摩擦速度 u^* は、掘削地における水深 h とエネルギー勾配 I_e を用いて $u^*=(ghI_e)^{1/2}$ として算出する。このとき用いる I_e の設定方法がモデルの結果に大きな影響を与えるため、本研究では、3通りの方法を検討した。1番目は掘削地の I_e を低水路の I_e と同じと仮定する方法、2番目は掘削地の河床勾配と同じ一定値と仮定する方法、3番目は掘削地の I_e エネルギー勾配が非常に小さい(≈ 0)と仮定し、巻き上げ量 q_{su} を考慮しない方法である。

3. 結果

(1) 各工区の土砂堆積速度の算定結果

揖斐川は全14工区、長良川は全20工区における地形変化量から割り出した土砂堆積速度について、掘削高さとの関係に着目して整理した結果を、図-1に示す。揖斐川は、掘削後長期間が経過しているため、3期分の測量成果を用いた2期間の結果と、既往研究結果⁹⁾を示す。長良川は近年掘削された工区も多いため、掘削工事図面と最新の測量成果により1期間のみ算出した結果を示す。

揖斐川は濁水位程度で低く掘削した工区は堆積速度が小さくむしろ侵食傾向であるが、掘削地の比高が高めの工区は堆積速度が大きい傾向があることは既報⁹⁾の傾向と同様であった。一方、長良川では掘削地の比高が低い工区は侵食傾向が明瞭で堆積速度は全体的に小さかった。

(2) 河床材料・堆積土砂の粒度分布の関係性

揖斐川D, O, F工区、長良川C, G, S工区における河床材料、堆積土砂の粒度分布を図-2に示す。また、揖斐川、長良川の洪水時における表面採水試料のろ紙に残った土砂の粒度分布も図-2に河川毎に示す。

揖斐川の掘削地堆積物（黒実線）と低水路河床材料（黒破線）の関係に着目すると、掘削地の再堆積土砂のうち、自然堤防状の微高地（黒丸）の粒度分布は低水路の河床材料のうち凡そ1mm以下のものが堆積しており、

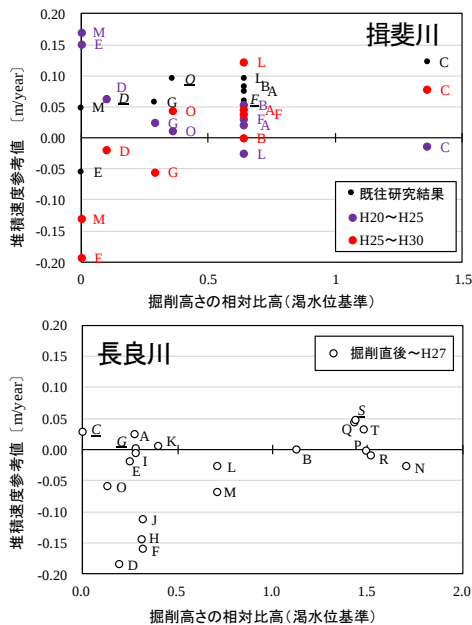


図-1 高水敷掘削地における土砂堆積速度 (揖斐川・長良川)

これは、低水路河床由来の浮遊砂が堆積したものと判断することができる。一方、後背湿地的な微高地を構成する土砂（灰色丸）には、低水路河床には存在しない0.1mm以下の細粒土砂が多量に含まれている。これは、洪水時の表層採水試料に含まれる細粒土砂（灰色破線）と対応しており、いわゆるウォッシュロードが堆積したものと判断することができる。すなわち、揖斐川では掘削地のうち低水路に沿った場所には低水路河床由来の浮遊砂が堆積し、低水路から離れた位置には主にウォッシュロードが堆積しているといえる。しかしながら、その割合には工区によって違いがある。F工区のように、自然堤防状の微高地と後背湿地的な微高地の堆積物が明瞭に異なる工区もあれば、O工区のように低水路河床由来の浮遊砂とウォッシュロードが半々くらいの割合で混ざって堆積している工区もみられる。

長良川の掘削地堆積物と低水路河床材料の関係に同様の見方を適用すれば、G工区、S工区の掘削地の堆積土砂の大部分は低水路河床由来の浮遊砂であると分かる。掘削地の比高が低いC工区では掘削地と低水路河床の粒度分布がほぼ同じであり、洪水時に低水路と同程度の掃流力が作用して掃流砂及び浮遊砂として土砂輸送が生じている可能性がある。このように、長良川では、ウォッシュロードの堆積はあまりみられないが、G工区では、掘削地堆積物に10～20%のウォッシュロードが含まれている。この工区にはオギと推測される背丈を超えるイネ科植物が密生していることが影響していると考えられる。

後にこれら6工区に対するウォッシュロード堆積速度のモデル計算結果を示すが、各工区の土砂堆積速度に、ウォッシュロード由来と考えられる0.1mm以下の土砂の割合を乗じた値を、現地におけるウォッシュロードの堆積速度とみなす。ただし、揖斐川では掘削地面積の大部分を後背湿地的な微高地における調査結果を用いる。例

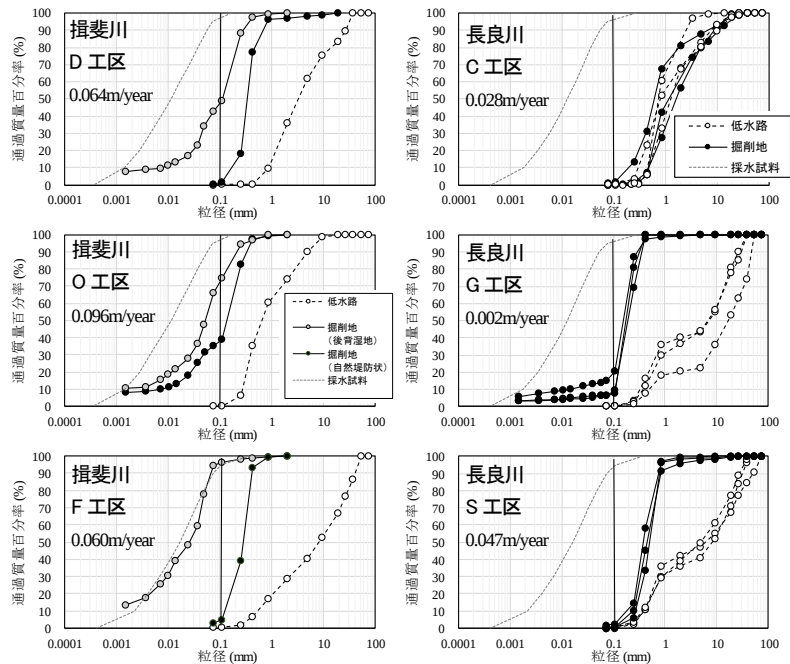


図-2 低水路河床材料、掘削地堆積土砂の粒度分布

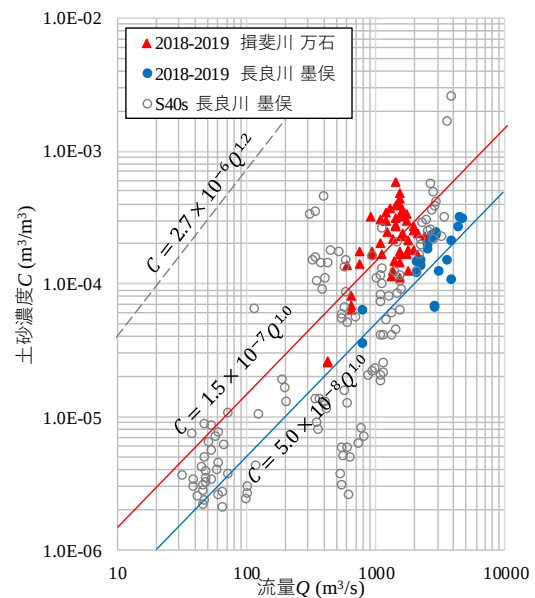


図-3 表面採水試料の土砂濃度 (揖斐川・長良川)

えば、揖斐川D工区では堆積速度0.064m/yearのうち50%をウォッシュロードとみなし、0.032m/yearをモデル計算結果と比較することとする。

(3) 流量と表面採水試料の土砂濃度の関係

図-3に、2018年と2019年の出水期における高水流量観測時の観測流量 Q と、ほぼ同時刻の表面採水試料より得られた土砂体積濃度 C の関係を示す。揖斐川の土砂濃度（赤三角）は、長良川の土砂濃度（青丸）に対して全体的に高い傾向があり、「揖斐川掘削地におけるウォッシュロードの堆積は、揖斐川の土砂濃度が高いことによる」という仮説を裏付けるものではあったが、同じ流量であっても土砂濃度にかかなりの幅がみられた。例えば、出水期の最初の出水は、土砂濃度が高い傾向が共通して見られた。また、1出水の間でも、増水期と減水期の土

砂濃度に違いがあり、増水期の土砂濃度の方が高く、右回りのヒステリシスカーブを描く傾向がみられた。

これらの結果に基づき、モデル計算の与条件として用いるためのQ-C式を設定した。観測値のばらつきが大きく、厳密なフィッティングを行うことはあまり本質的ではないと考えられたため、一般的にQ-C式の形式として用いられる $C = \alpha Q^n$ ($n=1$) を仮定して、揖斐川は赤実線、長良川は青実線を設定した。掘削地は比較的少ない流量でも冠水するため、小流量の領域における土砂濃度の設定やヒステリシスの影響によってモデル計算結果に大きな影響が生じている可能性があり、Q-C式の適切な設定方法は、今後解決すべき課題ではある。なお、図-3中左上に灰色破線で示したQ-C式は藤田ら⁹がパウダー川における川幅縮小の検討に用いた値を参考まで示している。昭和40年代の調査結果⁸より、日本の河川の平均的な土砂濃度は、 $C = 1.0 \times 10^{-7} Q$ 程度とされており、揖斐川は日本国内ではやや濃いめ、長良川は薄めという位置づけであるが、パウダー川などと比較すれば、土砂濃度が低い河川であるといえる。

(4) ウォッシュロード堆積速度のモデル計算結果

モデル計算結果として、3通りの方法で設定したエネルギー勾配 I_e による堆積速度の計算結果を図-4に示す。計算対象粒径は、表面採水試料の粒度分布の d_{50} に相当する0.013mmとしている。なお沈降速度 w_0 は、Rubey式により0.15mm/sである。ウォッシュロードのみに着目した堆積速度の計算結果と現地状況を比較するため、図-2に示す堆積土砂の粒度分布と各工区の堆積速度を組み合わせ、現地のウォッシュロードの堆積速度を試算した。

方法1, 2では、ウォッシュロードの堆積はほぼ生じないという結果になった。方法1では、全ての計算水位において堆積が生じないという結果であった。方法2では掘削地のエネルギー勾配が方法1よりも小さいために、堆積速度が正の値をとる（ウォッシュロード濃度が基準面濃度を上回る）領域が、高い水位の範囲に存在するが、高い水位の時間頻度は非常に少ないために、堆積量としてはほぼゼロと計算された。掘削地からの巻き上げ q_{su} をゼロとした方法3は、最も現地の値に近い堆積速度が得られた。とくに、揖斐川においては、堆積速度のオーダー、大小関係ともに現地状況に近い値が計算された。長良川においては、現地ではウォッシュロードの堆積がほぼ見られないのに対し、揖斐川よりは少ないものの、ウォッシュロード堆積が生じることが計算された。

4. 考察

(1) 表面採水による土砂濃度計測の妥当性

本研究では、高水流量観測作業の合間に表面採水を行うことにより、流量と同時に概ね 10^5 オーダーまでの土

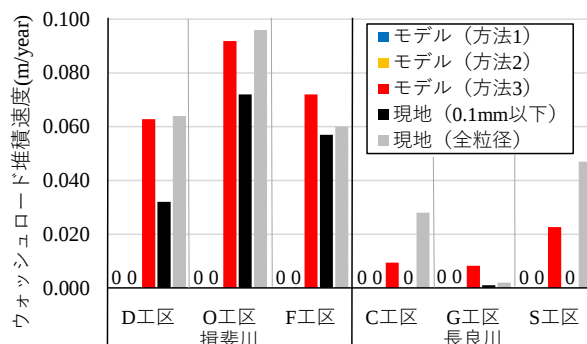


図-4 ウォッシュロード堆積速度のモデル計算結果

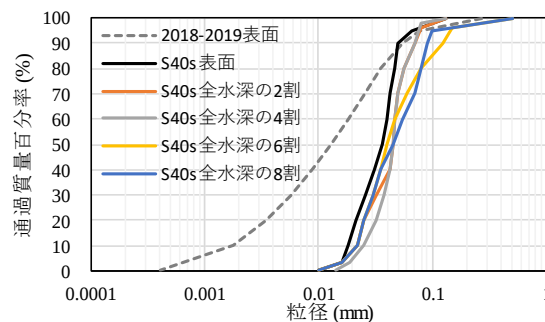


図-5 異なる水深の土砂粒度分布（長良川墨俣）

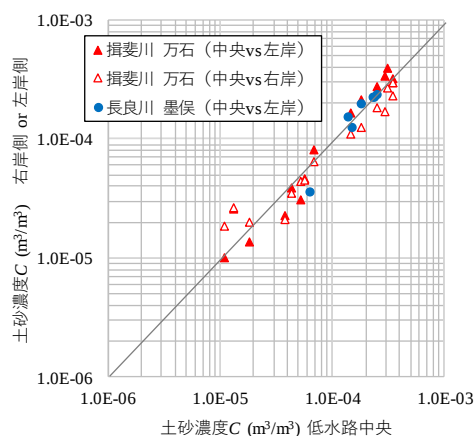


図-6 低水路中央と高水敷境界の土砂濃度の比較

砂濃度を把握した。本手法の妥当性について考察する。

旧建設省河川局治水課と土木研究所河川研究室が、昭和40年（1965年）から国内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⁸に、長良川墨俣地点におけるプロット（図-3白丸）も多数含まれており、昭和40～43年度に47回の測定が行われている。本調査報告⁹において、墨俣地点における鉛直方向の土砂濃度分布と粒度分布も示されており、これを図-5に示す。本研究で調べた表面採水試料の粒度分布はずいぶん細かいが、試験方法による違いである可能性もあるものの、50年前と現在の長良川では浮遊砂濃度や粒度分布が変化している可能性がある。現在と過去の比較はいったん置き、昭和40年代の異なる水深の粒度分布に着目する。いずれの試料も、0.1mm以下が85～98%程度を占めており、採水試料に含まれる土砂の大部分がウォッシュロードであったことが分かる。また、細粒土砂濃度の鉛直分布はほぼ一様であることから、ウォッシュロード濃度を把握するた

めだけの目的であれば、本研究が採用した表面採水でも十分であると考えられる。また、図-6に、低水路中央と高水敷境界付近における同時刻の採水試料の濃度の比較を示す。図-3における同流量に対する濃度のばらつきと比べ、同時刻における横断方向のばらつきはかなり小さいといえる。本研究の手法は高水流量観測と同時に実施可能であり、他河川でも実施可能な一般性を有する。

(2) ウォッシュロード堆積速度の簡易モデルの妥当性

高水敷掘削地におけるウォッシュロード堆積速度を目的としたモデル計算において、堆積が生じるか否かは、(1)式に示すとおり、土砂濃度 $C(=C_b)$ と掘削地河床における基準面濃度 C_0 の大小関係にほぼ依存している。

前者は流量に応じて与えるため、 $Q-C$ 式の設定の妥当性が問われる。よく用いられる $C=\alpha Q^n$ ($n=1$ 程度)の形式は、その河川の相場を示すには妥当と考えられるが、図-3に示すように、流量と土砂濃度の対応には同じ河川でもかなりの幅があり、このことが実現象として土砂堆積にどれほど影響しているのか、検討が必要である。また、ウォッシュロードの堆積判定において、方法1~3を試行した結果(図-4)、沈降速度が非常に小さいウォッシュロードの堆積が生じるためには、(1)式中の巻き上げ量 q_{su} 、これを与える C_0 がほぼゼロでなくてはならないことが確認された。巻き上げをゼロとした方法3は、掘削地が冠水する状況で、土砂濃度 C に沈降速度 w_0 をかけあわせ、当該流量が発生する時間頻度に応じて積分しただけの結果でもある。このような簡便な計算が、現地の堆積状況を良く表現しえた理由を考察する。

ウォッシュロードの沈降速度は非常に小さく、鉛直濃度分布はほぼ一様である。したがって、その堆積が生じるためには、河床面近傍を浮遊する粒子が非常に小さい沈降速度にも拘わらず沈降し着底する静穏な環境が必要である。別の見方をすれば、河床面のごく近傍のみ、流れが滞留した微環境があればよいことになり、このような条件を満たす場として、密な植生を有する流れ場が挙げられる。植生域を有する流れの鉛直構造において、底面近傍の乱れは抑制されており、巻き上げを生じない。したがって、方法3は地表を植物が覆った条件におけるウォッシュロード堆積速度を計算していると解釈できる。

実際のところ、揖斐川調査地では、平坦な掘削地が、陸域(微高地)と水域(ワンド・たまり)に分化⁹⁾した後、植物が生えた陸地では土砂堆積が続く一方、一見土砂が堆積しそうな止水域であるたまりには、堆積が生じておらず、現在も分化が進んでいる。長良川の大部分の掘削地には細粒土砂の堆積がみられないが、オギが密に繁茂しているG工区のみ、細粒土砂の堆積が確認されている。これらの観察結果は、上記の考察を支持しており、長良川においても地表面を密に植物が覆えば、モデルで予測された程度の堆積は生じうると考えられる。

5. 結論

本研究は、木曽川水系揖斐川及び長良川の自然堤防帯区間における高水敷掘削地における土砂再堆積傾向の違いが、両河川のウォッシュロードの輸送特性によるとの仮説を検証するため、高水流量観測時の簡易な表面採水により2018年と2019年の出水期におけるウォッシュロード濃度を計測し、揖斐川は長良川よりも濃度が高いことを示した。また、低水路河床材料と掘削地堆積土砂の粒度分布の比較により、堆積土砂が低水路河床由来の浮遊砂によるものとウォッシュロード由来のものに分離できることを示した。ウォッシュロードの堆積速度を対象とした簡易なモデル計算は、流量に応じた土砂濃度を直接与えて掘削地における堆積速度を求め、冠水が生じる水位流量の時間頻度をもって積分することにより、年間の堆積速度を予測可能であることを示した。ただし、地表を覆う植物などの微環境が伴わない場合、ウォッシュロードの堆積は生じえないことも示唆された。

謝辞：本研究は、河川砂防技術研究開発助成地域課題(代表：原田守啓)、JSPS科研費19K04625(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、岐阜大学水系動態研究室の角田美佳氏、富田浩生氏、木曽川上流河川事務所調査課と流量観測業務委託先諸氏より多大なる協力を得た。記して謝意を表す。

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)、71、4、pp. I_1171-1176、2015。
- 2) 原田守啓、角田美佳、赤堀良介、永山滋也：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～、河川技術論文集24、pp. 173-178、2018。
- 3) 池田茂、片桐浩司、大石哲也、對馬育夫、萱場祐一：河道掘削箇所におけるヤナギ類の過剰な繁茂に関する要因分析と抑制方策について、土木学会論文集F4、73、2、pp. 38-49、2017。
- 4) 内藤太輔、金縄健一、福永和久、今村史子、萱場祐一：全国の河川を対象とした河道内植生の分布特性と成立要因および河道掘削後の変化、河川技術論文集、22、pp. 469-474、2016。
- 5) 土木学会水工学委員会：水理公式集[2018年版]、丸善出版、pp. 295-298、2019。
- 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) 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。
- 8) 建設省河川局治水課、土木研究所河川研究室：河床変動に関する研究、第22回建設省技術研究会報告、pp. 559-582、1969。(2020. 4. 2受付)