

沖積河川区間での土砂・洪水氾濫の 発災リスクに関する基礎的検討

FUNDAMENTAL STUDY ON FLOOD RISK OF RIVER SEDIMENTATION IN ALLUVIAL RIVER SECTION

瀬崎智之¹・神谷電¹・福島雅紀²

Tomoyuki SEZAKI, Akira KAMIYA and Masaki FUKUSHIMA

¹非会員 国土技術政策総合研究所 河川研究部河川研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

²正会員 工博 国土技術政策総合研究所 河川研究部河川研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

Two basic studies were conducted to gain insight into the risk of flooding from river sedimentation on nationally managed rivers. First, as information on sediment supply conditions, we investigated the sedimentation in dam lakes of flood control dams that often exist at the upper end of rivers managed by the government or slightly more mountainous. The other was a moving bed channel experiment to understand the sedimentation process when high concentration suspended sediment flows down an alluvial river section with a riverbed gradient of about 1/50. As a result of the investigation, the basic process of flood inundation due to sedimentation on the river channel in the alluvial river section was understood.

Key Words : *suspended load, sediment runoff, sedimentation, alluvial river section, dam sedimentation data, hydraulic experiment*

1. はじめに

平成29年九州北部豪雨, 平成30年西日本豪雨, 令和元年東日本台風による水害等では, 粗砂~細礫といった出水時の水理量では浮遊砂として流送される材料で河道が埋塞して氾濫が生じる, いわゆる土砂・洪水氾濫が発生している。

これらの多量の土砂流入による河道の埋塞は, 豪雨が集中した比較的小さい流域の小河川で発生しているが, 国が管理するような大河川や中規模の河川において, どのようなリスクがあつて, どのような対策が必要であるのか, 知見が不足している。

本報は, 河床勾配が1/50程度の砂防事業と河川事業の両方で取り扱うような区間での河道埋塞リスクについて, 河道計画や河道管理に資する知見を得ることを目的に行つた2つの基礎的な調査結果について報告するものである。具体的には, 1つは, 土砂供給条件に関する情報として, 国が管理する河川の上流端あるいはそれより少し山地側に存在することの多い国土交通省管理の治水ダムのダム湖内の堆砂について調査した結果を報告するものである。もう1つは, 高濃度の浮遊砂が河床勾配

1/50程度の沖積河川区間に流下してきた場合の堆砂プロセスを把握するための移動床水路実験を行った結果を報告するものである。

2. ダム堆砂中の大量土砂流入イベントの調査

(1) 国土交通省管理ダムの最大年間堆砂量の抽出

国土交通省が管理するダムでは, 1~2年に1回の頻度で, ダム湖内を測量して年間堆砂量を把握していることが多い。ダムでは, 流入する河川に比べて著しく流速が低下するため, 流水型ダム, 排砂トンネルなどの排砂設備があるダム等を除いて, ウォッシュロード成分を除く流入土砂のほとんどが, ダム湖内に堆積する。

河道埋塞の原因となるようなイベント的な土砂流入についても, ダム湖内に堆砂しているものと考え, 国土交通省が管理するダムのうち, 運用開始直後のダムや排砂設備が運用されて流入土砂量が推測できないもの等を除いた81のダムについて, 堆砂測量等の資料を収集し, 整理を行った。

各ダムの年間堆砂量の最大値を抽出した結果を図-1に示す。平成29年九州北部豪雨で赤谷川中流域に流入した

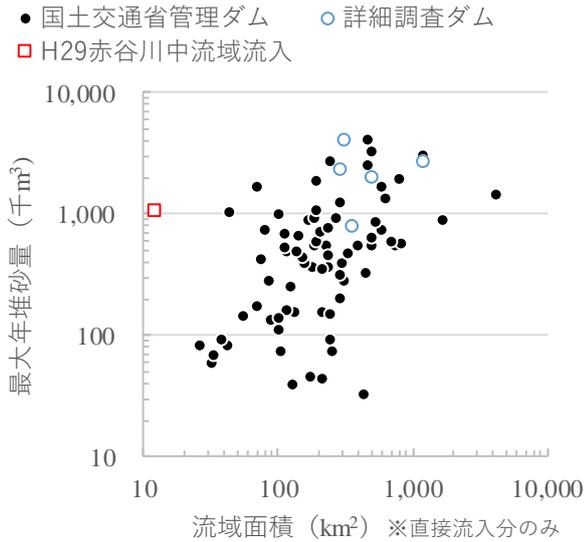


図-1 国土交通省が管理する81ダムの最大年間堆砂量

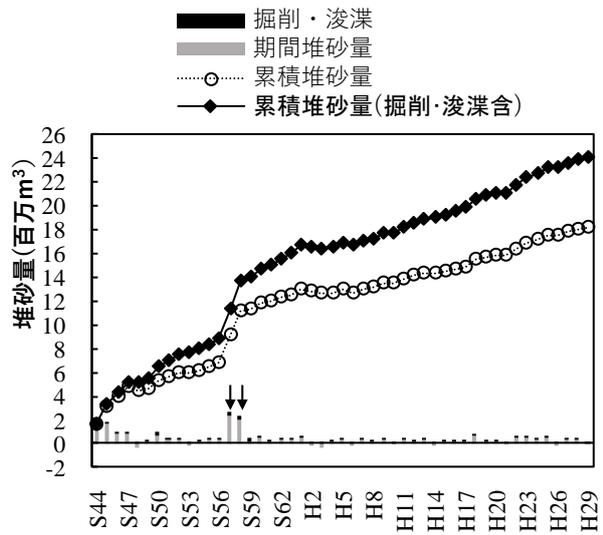


図-2 ダムの年間堆砂データの例

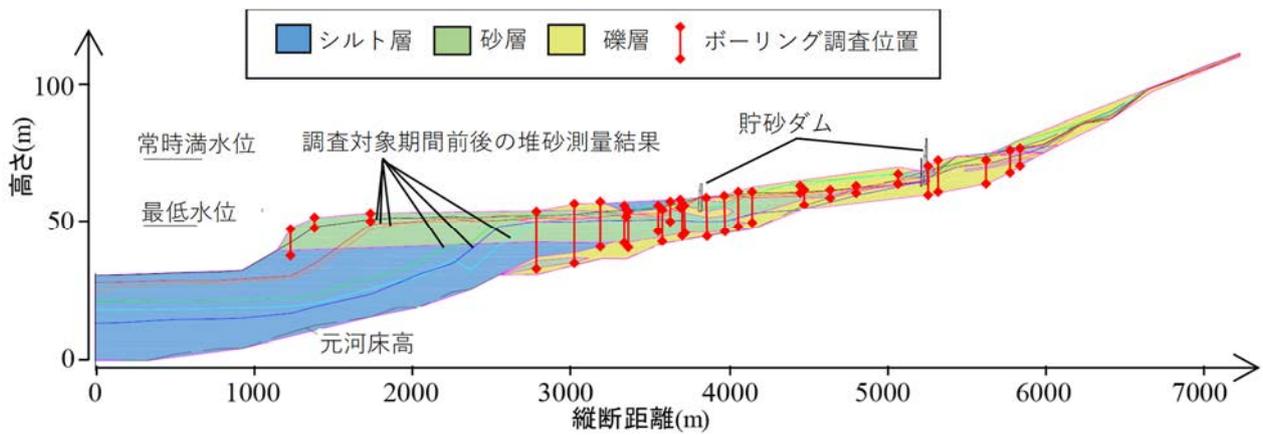


図-3 ダム堆砂の縦断地質縦断図の例

土砂量である110万 m^3 を γ を超える土砂流入が過去に起きたダムは、17ダム存在した。しかしながら、流域面積との関係に着目すると、直轄ダムの流域面積は赤谷川より1オーダー以上大きいものがほとんどで、比堆砂量としては最大のものでも赤谷川中流域の1/5程度であった。

(2) 土砂流入イベントの土砂量と粒度構成の分析

(1) で80万 m^3 以上の年間土砂流入があったダムのうち、堆砂部でのボーリング調査データが充実している5つのダム(図-1中の詳細調査ダム:○マーカー)を対象に、年間の堆砂の中から1回の出水で流入した分だけの土砂の量を算出し、また流出土砂の粒度構成について推計するための分析を行った。1回の出水分だけを抽出するのは、流域が荒廃している場合や複数の出水が連続した場合などでは、年間堆砂量と1回の大出水で流入した量とで有意な差異が生じる可能性があると考えたためである。分析の手順は、以下1)~4)のとおりである。

1) 図-2に例示するようなダムの年間堆砂データの中から、年間堆砂量が大きい年と中程度の年からな

る複数の調査対象年を選定する。この際、図-2中矢印で示すような年間堆砂量が極めて大きい年はもれなく選定することとする。また、掘削や浚渫により測量前に除去した土砂量を資料等により整理して堆砂量として加えるとともに、ダム周辺の災害記録を調査し、年間堆砂量が突出した年には大規模な土砂災害や豪雨が流域で発生していることを確認している。

- 2) 堆砂測量の成果とボーリング調査データから、図-3に例示するようなダム堆砂の粒度構成(礫、砂、シルト及び粘土)を区分けした地質縦断図を作成し、1)で抽出した年の流入土砂の粒度構成を推計する。
- 3) (社)日本大ダム会議土砂管理分科会²⁾を参考に、ダム湖への各粒径集団の流入量 Q_s が、式(1)により概略推計できると見なし、この定数である α と β を、1)2)で抽出した抽出年の粒径集団別土砂流入量とダムへの洪水流量(毎正時データ)のデータセットを用いて回帰分析を行い、算出する。

$$Q_s = \alpha \cdot Q^\beta \quad (Q > Q_c) \quad (1)$$

ここに、 Q_s は粒径集団別の流入流砂量 (m^3/s)、 Q は流入地点の流量 (m^3/s)、 Q_c は足切り流量 (m^3/s)、 α 及び β は流入土砂量を設定するパラメータである。

- 4) 3)の回帰分析結果を用いて、大量に土砂が流入した年の粒径別流入土砂量の中から、1洪水イベント分の流入土砂量を算出する。
- 5) ウォッシュロードのダム湖通過分については、Bruneの式を用いて補正を行う。

なお、2)～5)の詳細については、(社)日本大ダム会議土砂管理分科会²⁾の成果を参考としている。

以上の手順により算出した、5つのダムで発生した計16回の出水での粒径別流入土砂量の推計結果を、図-4に示す。なお、Bダムの昭和57年には、1年間に2回の大規模な出水が発生しており、それぞれを記載している。これを見ると、1出水イベント分であっても、100万 m^3 を超えているケースが確認できる。また、該当する出水時の平均土砂濃度を試算すると、1～5%程度であった。これは、一般に土砂・洪水氾濫で扱われる土砂濃度と比べて小さいものである。

また、5つのダムのうち、3つのダムについては、櫻井ら³⁾により、ダム湖全体の粒度構成が推計されている。これと今回の出水イベントでの流入土砂の粒径を比較すると、出水の規模が大きい場合には移動限界の大きい粗粒の材料の流入割合が増加する傾向にあるが、土砂・洪水氾濫で見られるような多量の砂成分の流入は見られなかった。

更に1出水イベントでの土砂流入量について、芦田ら⁴⁾による調査研究と比較した(図-5)。これを見ると、芦田らの成果と比較して、流域面積が大きい地点を対象としたため、評価軸であるストリームパワー($AR_d I_{200}$:ここで、 A は流域面積(km^2)、 R_d は最大日雨量(mm)、 I_{200} は対象とする地点から標高差200m区間の河床勾配)が大きい範囲にプロットが集中しているが、流出土砂量については、図中の近似式範囲より小さい結果となった。芦田ら⁴⁾が整理した現象が、今回整理した現象より、例えば、生起確率の小さい現象であった等条件が異なる可能性は否定できないが、流域面積が大きくなると、流域面積内の崩壊地の割合が小さくなるため土砂生産量が小さくなることも知られている(例えば⁵⁾)。今後調査を重ね、沖積河川区間の流入土砂量のリスクについて定量的な知見を得る必要がある。

3. 高濃度の浮遊砂を含む流れの水路実験

(1) 実験の概要

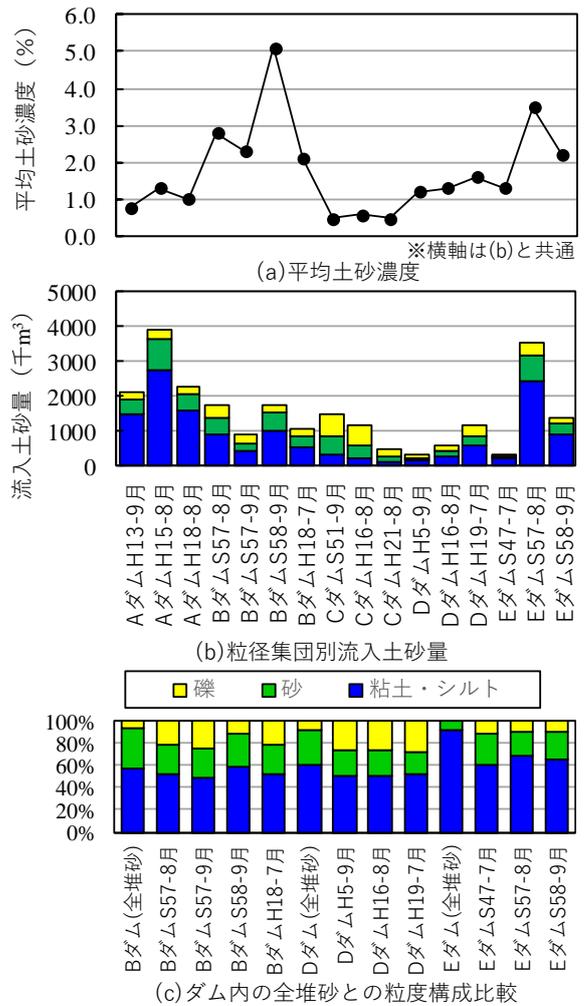


図-4 大量土砂流入イベントの粒度構成別流入量

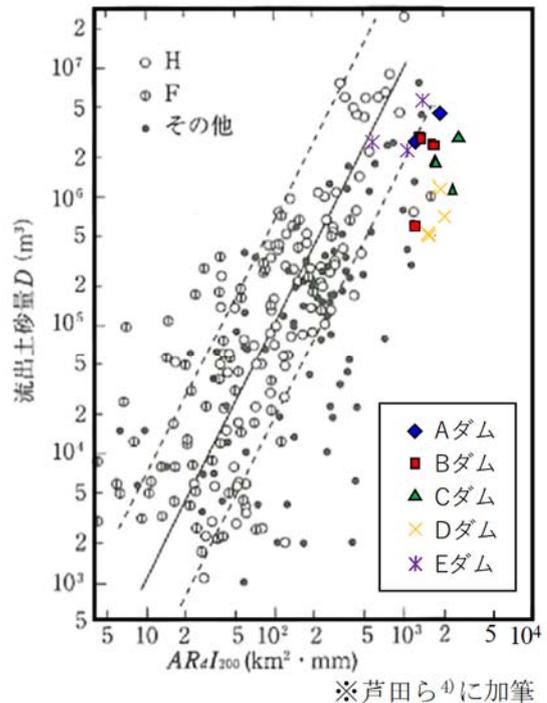


図-5 大量土砂流入イベントの既往研究との比較

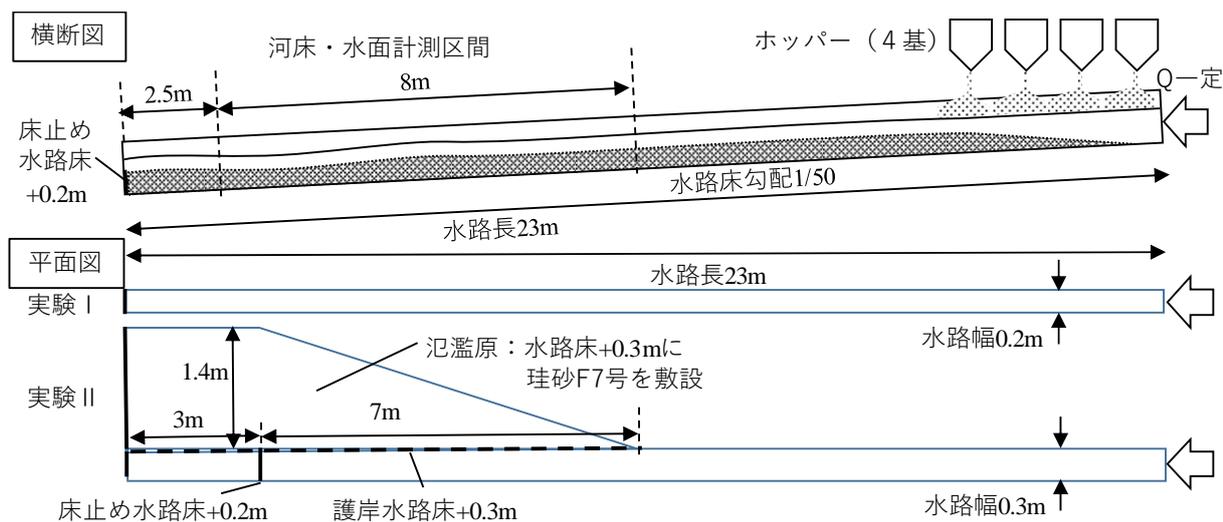


図-6 実験水路の概要

芦田ら⁴⁾は、洪水記録から、流出土砂量の平均濃度が、河床勾配の増加とともに上昇し、特に河床勾配が1/50～1/25の区間で急変することを示し、これが掃流や浮遊形態から土石流や泥流形態等への流砂モードの変化によるものと考察している。

橋本ら⁶⁾は、泥流と通常の浮遊砂流との中間領域の流送モードである「高濃度浮遊砂流」の状態では、泥流と同様に底面近傍に粒子間力の卓越した高濃度層が現れ、その上に慣性力の卓越した浮遊砂層が存在するとしている。また、この高濃度の浮遊砂の流れについても、土粒子の沈降速度が小さくなる、高濃度層での混合距離が小さくなる等の物理現象について研究が進んでいる(例えば、7) 8))。

しかしながら、赤谷川中流域で河道埋塞が生じたような1/50程度の河床勾配での高濃度の浮遊砂流動、とりわけ堆積現象について、流砂モードの変化の影響をどの程度考慮しなければならないのかははっきりわからない。また、河床変動計算等によって河道計画を検討する際の流砂量について、既往の流砂量式が適用できるのか、実験に多量の給砂を必要とするなど作業手間上の困難さもあつてか、知見が少ないことから、水路実験を行い、確認することとした。

なお、本実験は、河道埋塞等のリスクに河道法線形状、河川構造物の配置、河道内の粗度分布等が与える影響を把握するために今後実験を予定している縮尺模型実験の予備実験を兼ねており、給砂量等の実験条件の設定に必要な知見を得ることも目的としている。

水理量や使用する河床材料等の実験条件は、平成29年九州北部豪雨時の赤谷川中流部(支川乙石川合流点から大山川合流点まで区間)の水理量をモデルに、1/30縮尺のフルード相似則を満たすよう設定した。

実験水路等の概要を図-6に示す。実験Ⅰでは、幅0.2m、延長23m、勾配1/50の矩形水路を使用した。下流端に高さ0.2mの床止めを設置し、上流端を除く水路のほぼ全区

間を河床材料で覆った状態で通水を行った。河床材料は珪砂F7号($d_{50}=0.21\text{mm}$ の一樣砂)又は珪砂8号($d_{50}=0.12\text{mm}$ の一樣砂)を使用した。上流部にホッパー4台を設置し、給砂地点で水路が埋塞しないよう、流れが加速していく区間で縦断的に少しずつ給砂を行うことで所要の土砂濃度になるよう各ホッパーの給砂量を調整した。河床高と水位の計測は、下流端より2.5m～10.5mまでの8mの区間を、側壁の格子状のメモリ付きの亚克力板越しにビデオカメラで撮影し、実験後に判読を行っている。

実験Ⅱでは、幅0.3mの河道部と床止めとの高低差が10cmで観測区間上流端を起点に幅1.4mまで広がる氾濫原部を併設する複断面水路で河道埋塞の過程を観察した。実験Ⅰと同様に、下流端より2.5m～10.5mまでの8m区間の亚克力製壁面の様子をビデオカメラで撮影し、画像から河床高と水位を判読した。

(2) 実験Ⅰの結果(矩形水路での動的平衡状態の把握)

実験Ⅰでは、流量、給砂量(すなわち土砂濃度)を一定に保って、10分程度通水し、平均的に河床が安定した状況で、河床、水面を計測した。流量(単位幅流量で $q=0.025\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}\sim 0.15\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$)、土砂濃度(体積濃度で1.3%～15%)、河床材料(主に珪砂F7号、一部ケースで珪砂8号)を変えた47ケースの通水を行っている。

図-7は、そのうち単位幅流量が $0.065\text{m}^3/\text{s}$ で、珪砂F7号の給砂濃度を変えた5つの実験ケースの河床と水面を示したものである。通水を継続して平均的な河床高が安定していく過程で、反砂堆が形成される。給砂量が大きくなるほど、河床勾配は急になり、反砂堆の波長や波高も大きくなった。

反砂堆が形成された状況での流れや流砂を観察した結果を図-8に示す。河床が一番窪んだ地点近傍(図中下向き矢印地点)で跳水が発生し(時間とともに変化して潜水跳水になる時間帯もある)、跳水部では主流から剥離

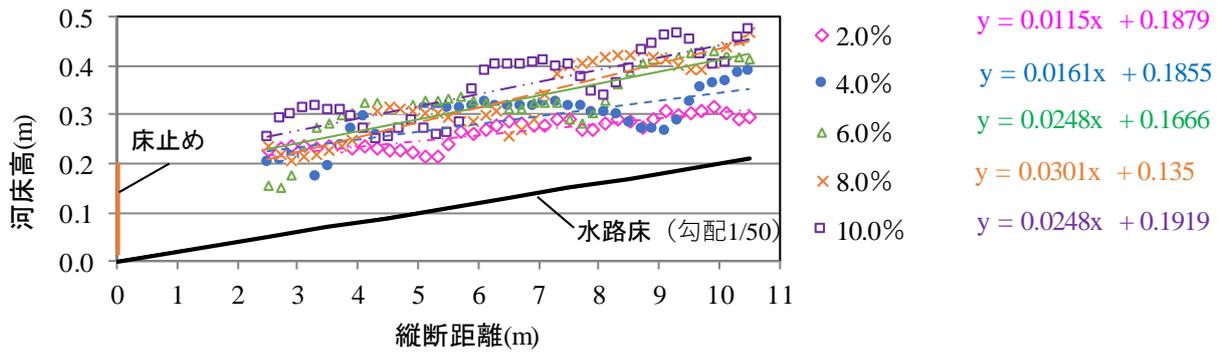


図-7 実験Ⅰ 通水後の河床高の例 ($q=0.065\text{m}^3/\text{s}$, 珪砂F7号)

した循環流が形成される。循環流のある箇所では河床材料が沈降して堆積していくので河床が上昇する。跳水の箇所から砂州の頂部にかけては、鉛直方向の乱れが大きく、全層にわたって河床材料が巻き上がった濁った状態であった。

一方で、砂州の頂部より下流側では水深が薄く流速の大きな流れになっており、反砂堆の下流側斜面が侵食されて、底層部分はシートフロー状の土砂濃度の高い流れの層が発生していた。鉛直方向の乱れは少なく、水面近くでは濁りが少ない濃度分布のついた状態であった。これら反砂堆上流部での堆積と下流部での侵食によって、反砂堆は上流側にゆっくりと移動していた。

次に、流砂量について確認する。計測区間全体の水面勾配と水深から等流条件で算出した摩擦速度 u_* と、水温と土質試験結果から算出した沈降速度 w_0 との比を横軸に、単位幅流砂量 q_s を縦軸に整理した(図-9)。図-9からは、F7号珪砂と8号珪砂それぞれで、 u_*/w_0 によって q_s が推計できることがわかった。また、図-9に併記した全流砂量式⁹⁾と、およそ合致するが、過小評価する傾向にあることがわかった。

(3) 実験Ⅱの結果 (複断面河道での河道埋塞の再現)

実験Ⅱでは、河道の埋塞プロセスを観察するため、高低差10cm程度の氾濫原を右岸側にだけ設けた水路を使用した。通水前の河床は、平成29年九州北部豪雨発生前の赤谷川中流部を参考に、氾濫原部分は1/50勾配、河道部分は1/80勾配になるよう珪砂F7号を整形し、上流から流量を変えた通水を行っている。給砂量としては、実験Ⅰで把握した1/50動的安定勾配相当の土砂濃度を与えている。

0.03 m^3/s の定量で通水した際の水路の様子を図-10に示す。(a)には、河床・水位計測区間での河床と水面の水路床からの高さを、(b)には水路左側のやや下流側高位から撮影した水路全景を、(c)には水路上流から主に氾濫原部がある区間を撮影した写真を示している。

通水開始から2分後では、床止め近傍の反砂堆頂部付近で溢水が生じているものの、氾濫水量は限定的であって全体としての流れに大きな変化はない。通水開始から

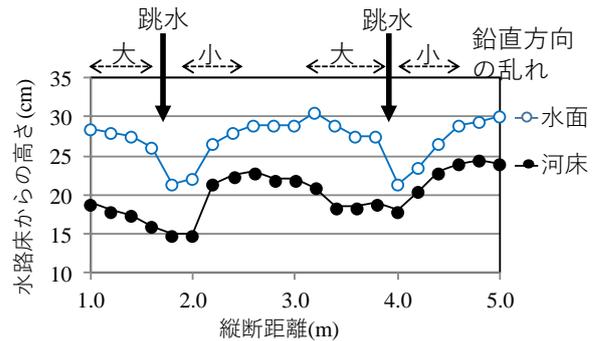


図-8 反砂堆が形成された場合の流れと流砂

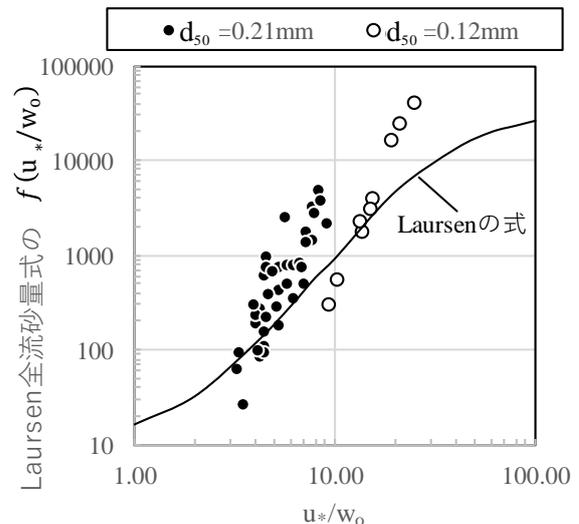
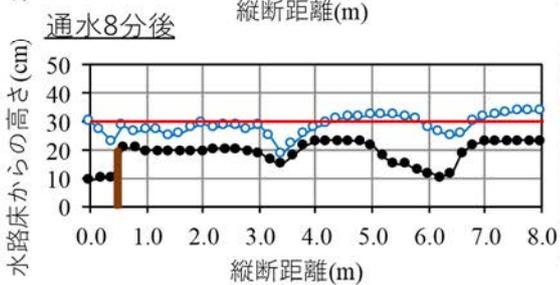
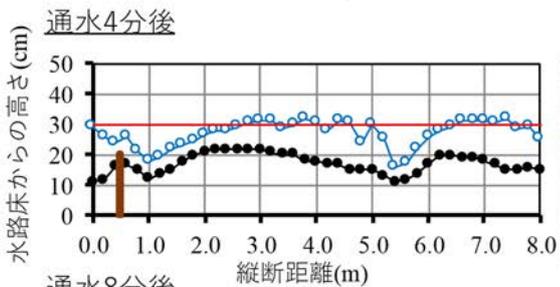
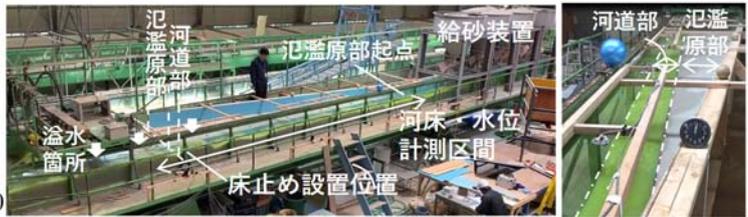
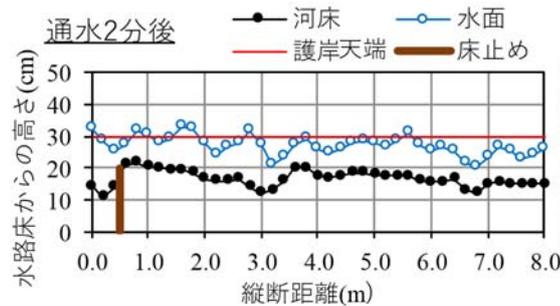


図-9 流砂量と u_*/w_0 との関係

4分後になると、縦断距離2~3m及び6~7m付近で全体的に河床が上昇し、溢水量が多くなっている。通水開始から8分後になると、縦断距離4~5m及び7~8m付近でも河床が上昇し、溢水量が多くなっている。

溢水量の増加に伴って、河道部分の流量は減少して水深が浅くなる。これによって河道内での掃流力が低下し、反砂堆の下流面での侵食よりも上流部での堆積が卓越し、反砂堆の波長が伸びて全体的に河床が上昇していく様子が観察された。平成29年九州北部豪雨の赤谷川においても、災害前の河床勾配は氾濫原の勾配より小さく、上下



(a)河床と水面の縦断形状

(b)水路全体の様子

(c)氾濫原の様子

図-10 実験Ⅱ(河道埋塞の再現)の状況

流にわたって複数存在する取水堰や床止めによって護岸等の基礎が沈下するような河床低下を防いでいる状況であったが、出水後には堰等を起点に河床勾配が氾濫原と同等になって河道が埋塞する状況が確認されており、基本的な現象は再現できたものと思われる。

4. まとめ

国土交通省が管理するダムの堆砂調査を行い、流入土砂量としては赤谷川の土砂・洪水氾濫に相当するような土砂流入イベントが多く発生していたが、比堆砂量や出水時の土砂濃度としては、数倍の差があった。

河道埋塞が発生した赤谷川の水量を参考に移動床縮尺実験を行い、高濃度の浮遊砂が流下して急勾配の河床が形成された条件下での流砂現象や河道が埋塞して氾濫するプロセスについて、基本的な知見を得ることができた。

参考文献

1) 筑後川右岸流域河川・砂防復旧技術検討委員会：筑後川右岸

流域河川・砂防復旧技術検討委員会報告書，PP.66，2017.

- 2) (社)日本大ダム会議土砂管理分科会：土砂管理分科会報告書—貯水池の土砂動態と土砂制御工法—，大ダム，No.212，2010.
- 3) 櫻井寿之，柏井条介，大黒真希：ダム貯水池の堆砂形態，土木技術資料，45-3，pp.56-61，2003.
- 4) 芦田和男，奥村武信：豪雨時の流出土砂量に関する資料の解析研究，自然災害資料解析，4，PP.85-91，1977.
- 5) 芦田和男，奥村武信：ダム堆砂に関する研究，京都大学防災研究所年報，第17号B，PP.1-16，1974.
- 6) 橋本晴行：土砂の移動現象とそのメカニズム，ながれ，29，pp.193-202，2010.
- 7) 高橋保，里深好文：石礫型及び乱流型土石流の一般理論とその実用化モデル，砂防学会誌，55(3)，pp.33-42，2002.
- 8) 江頭進治，芦田和男，田野中新，佐藤隆宏：泥石流に関する研究，京都大学防災研究所年報，第35号B-2，PP.79-88，1992.
- 9) Laursen, E. M. : The total sediment load of streams, *proc. of ASCE*, Vol.84, HY1, pp.1530-1-36, 1958.

(2020. 4. 2受付)