

1.一様砂礫場と混合砂礫場における高濃度細粒土砂の堆積特性と河床材料構成の変化に関する水路実験

久加 朋子¹・山口 里実²

Tomoko KYUKA, Satomi YAMAGUCHI

¹ 富山県立大学 工学部 准教授

² 国立研究開発法人 寒地土木研究所 主任研究員

要 旨

近年、全国各地の山地流域にて斜面・河岸崩落、土石流等に伴う多量の土砂移動による災害事例が増加しているなか、中長期的な河川環境の把握を行うためにも、崩壊地からの細粒土砂の輸送・堆積特性について把握することは重要な課題であると考えられる。昨年度までの検討では、数値計算および水路実験において、流路形状（直線から蛇行角の大きな水路まで）および河岸固定の有無が異なる複数シナリオについて比較検討し、交互砂州と蛇行流路において細粒土砂の堆積特性（場所や濃度）が異なること（交互砂州では低水路側へ細粒土砂が堆積し、蛇行流路では砂州上へと細粒土砂が堆積しやすい傾向がある）、河岸が固定されている流路ほど細粒土砂が高濃度に堆積する（交互砂州も蛇行流路も同様）ことが確認された。また、最も細粒土砂の堆積量と堆積位置が広範囲に及ぶケースは、河岸固定ありの蛇行角の大きい水路であった。以上の結果より、本実験の対象河川として想定していたH28胆振東部地震後の厚真川における細粒土砂の堆積特性は、砂州上や河岸沿いに比較的限られるものと推察された。しかしながら、厚真川下流域（河口2km～11km付近）は比較的粒径が一樣に小さい河川であることに対し、一般的な河川ではより粒度分布の広い河床材料構成を有する。そこで、本研究の1年目の検討では、R4既往実験の条件を混合粒径場へと変化させた場合について、河床変動および細粒土砂の堆積特性がどのように変化するかについて水路模型実験より現象把握することを目的とし、4ケースの実験を実施した。

《キーワード：細粒土砂；河床変動；蛇行角；混合砂礫；水路実験》

1. 研究の背景

降雨に伴い山地から河道内へと流出してきた細粒土砂成分の輸送過程および河床への堆積・侵食を予測するには、河道外における降雨流出、河道外からの土砂の供給プロセス、河道内における水と土砂の輸送過程を適切にモデル化し、統合的なシミュレーションを実施する必要がある。河道内に流入する細粒土砂は、その濃度によって氾濫原の高さ、河岸侵食量、土砂輸送特性を変化させ、沖積河川の中長期的な河床・流路形態に影響を与えることが知られている¹⁾。しかしながら、我が国のような急勾配河川における山地から生産される細粒土砂の挙動や、それらが河道内へ流入した後の輸送特性に関する知見は非常に限られた状況にある。こうした背景のもと、我々の検討では、これまでに一様粒径で構成される場を対象とし、平衡掃流砂量に細粒土砂を加えて供給すると2粒径水路実験を行うと共に、数値解析モデルの改良と細粒土砂堆積場所の検討を行ってきた。結果、以下3つの結果を得ている（図-1）。まず、水路実験より、細粒土砂は高濃度で上流から供給されたとしても河床・流路変動特性へと殆ど影響しないことが確認された。これは、細粒土砂は砂州の構成材料とならないためである。ただし、細粒土砂の存在は河床材料の粒度構成には影響を与える。

河床材料に対する細粒土砂の影響は、水路形状（蛇行角度）および水路河岸の固定有無によって影響を受ける。具体的には、流路が比較的直線的で交互砂州が発達する場では、細粒土砂の堆積は低水路の砂州前縁直下において局所的に生じた。これは、砂州前縁直下における流れの剥離域に細粒土砂が取り込まれて堆積するものである。一方、流路の蛇行度が大きい水路では、細粒土砂は低水路には殆ど堆積せず、砂州上や蛇行外岸部などの比高が高い場所に堆積した。これは、蛇行流路における低水路の流速が直線流路よりも速くなりやすいこと（低水路に堆積しにくい）、および洪水流量下の流れは砂州上や蛇行外岸へと溢水するためと考えられる（細粒土砂が比高の高い場所に局所的に堆積しやすい）。これらの結果より、蛇行角の違いによる細粒土砂の堆積量を比較すると、直線水路に比べて蛇行流路の方が明らかに広域的に多量の細粒土砂が堆積することが確認された。さらに低水護岸等を想定した河岸固定ケースでは、河岸侵食を許容するケースに比べてより多くの細粒土砂が短時間で局所的に堆積する傾向

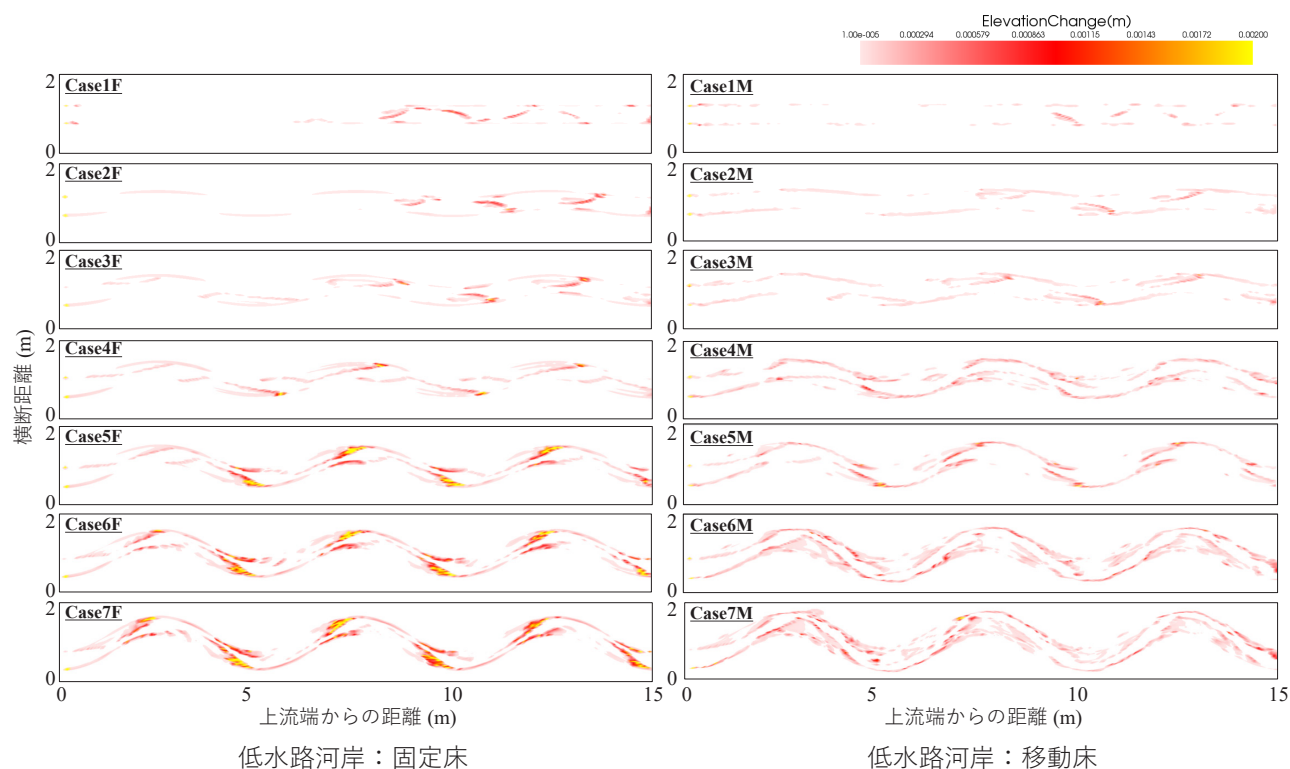


図-1 蛇行度と河岸固定有無の違いに伴う細粒土砂の堆積状況（既往実験）

が認められた。これは、護岸等によって河岸が固定された場合、低水路と砂州との比高差が大きくなりやすく、砂州前縁の下流側にて大規模な流れの剥離が生じることで細粒土砂が捕捉されるものと推察された。

以上の結果より、既往研究において対象河川として想定していたH28 胆振東部地震後の厚真川では、細粒土砂の堆積は砂州上や河岸沿いに比較的限られるものと推察された。しかしながら、厚真川下流域（河口2km～11km付近）は比較的粒径が一樣に小さい河川であることに對し、一般的な河川ではより粒度分布の広い河床材料構成を有する。そこで、本研究の1年目の検討では、R4既往実験の条件を混合粒径場へと変化させた場合について、河床変動および細粒土砂の堆積特性がどのように変化するかについて水路模型実験より現象把握することを目的とした。

2. 水路実験

2.1. 実験条件

実験には、寒地土木研究所所有の長方形矩形水路を用い、初期水路形状として水路延長11.7 m、低水路幅0.45 m、勾配0.01、蛇行角28.7°、河岸をモルタルで固定した蛇行水路を作成した（図-2）。これより、通水中に河岸侵食に伴う流路変動が生じないようにした。本水路において、初期地形は水路内に土砂を厚さ10 cmで敷設し、河岸高2 cmとなるように作成した。初期河床材料は、一樣砂の実験では平均粒径0.76 mm、比重2.65の珪砂を用いた。混合砂の実験では平均粒径0.87mmの山砂を用いた。本実験にて用いた混合砂の粒径加積曲線を図-3に示す。

実験ケースを表-1に示す。実験水理条件は既往実験²⁾³⁾および岸・黒木⁴⁾を参考とし、初期条件のもとでは交互砂州形成領域となるように定めた。流量は一定流量（0.00276 m³/s）とし、水路上流端からは河床材料と同じ粒径の土砂の平衡掃流砂量（上流端河床高が上昇・低下しない量）を与え続けた。

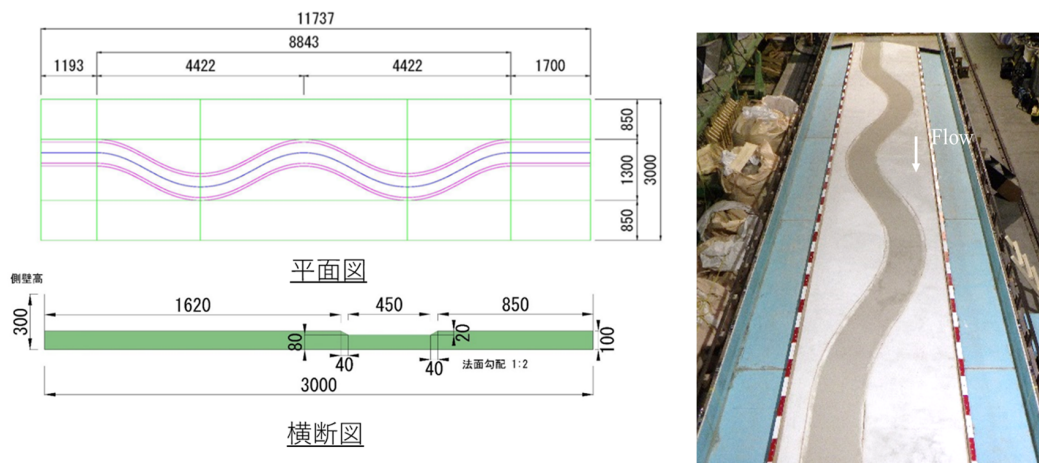


図-2 水路概要（蛇行角28.7°、河岸をモルタルにて固定した水路を形成）

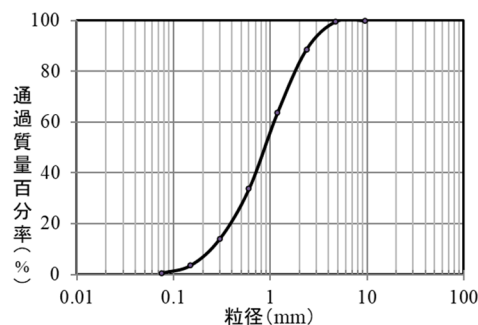


図-3 実験に用いた混合粒径材料の粒径加積曲線

表-1 実験ケース

Case	水路形状	河岸状態	初期河床	細粒土砂供給量	通水時間 (min)	蛇行角 (°)	蛇行長	流量 (m³/s)
Case1	蛇行	固定	一様砂	30%	60	28.7	4.71	0.00276
Case2	蛇行	固定	混合砂	30%	60, 150	28.7	4.71	0.00276
Case3	蛇行	固定	Case2終了時河床	0%	150	28.7	4.71	0.00276
Case4	蛇行	固定	Case3終了時河床	0%	150	28.7	4.71	0.00355
Case5	蛇行	固定	一様砂	0%	150	28.7	4.71	0.00276
Case6	蛇行	固定	混合砂	0%	150	28.7	4.71	0.00276

※ Case5とCase6は細粒砂を供給しない一様砂，混合砂のみのケースであり，R6年度（検討2年目）に実施予定。

Case1は初期河床材料を一様砂とし，水路上流端から平衡掃流砂量に加えて細粒土砂を供給したものである。Case2は初期河床材料を混合砂とし，Case1と同じく河床材料と同じ土砂を用いて水路上流端から平衡掃流砂量を供給すると共に，細粒土砂を追加で供給したものである。Case3はCase2終了後の地形を用い，多量の細粒土砂の供給が止まった場を想定して平衡掃流砂量のみ上流端から供給したものである。Case4はCase3終了後の地形を用い，低水路満水状態となる流量規模の確認およびその水理条件下において平衡掃流砂量と重量比30%の細粒土砂を上流端から供給したものである。Case5はCase1と同じ一様砂河床とし，上流端から平衡掃流砂量のみを与えたものである。他，混合砂のみのケース（Case6）は次年度実施予定である。本実験に用いた細粒土砂は，結果の解釈を容易とするため，粘着性をほぼ有しない珪砂8号（約0.120 mm）とした。細粒土砂量の供給量は，平衡掃流砂量に対する重量比3割を与えるようにした。細粒土砂量はピンク色に着色（流砂着色塗料）しており，水路上部からの撮影画像より河床表層への堆積を把握することができるようにした。

実験中は水路上部に4Kビデオおよびタイムラプスカメラを設置し，河床変動の様子を記録した。また，通水前と通水終了後は，河床高を超高速度インラインプロファイル測定器（KEYENCE社製）にて計測した。河床構成材料は実験終了後にサンプリングを行った。サンプリング方法は，砂州半波長を対象とし，河床に15 mm×10 mmの方形枠を設置し，その中に含まれる土砂を表層5 mmおよび底層10 mmとスパチュラを用いて別々に採取した。

3. 結果と考察

3.1. Case1（一様砂，細粒土砂30%追加供給）

図-4に，Case 1の初期河床および実験終了時の河床高コンター図および河床変動量コンター図の時間変化を示す。また，図-5に実験終了時における土砂採取場所と細粒土砂含有率を示す。図-4より，Case1では細粒土砂（ピンク色）は（1）砂州前縁（砂州下流側），（2）砂州前縁直下の低水路，（3）砂州の上流側の3か所に集中的に堆積しているように見受けられる。また，図-5より細粒土砂の含有率を確認すると，細粒土砂の含有割合は全体的に表層5 mmの範囲の方が下層（5 mm～15 mm）よりも高濃度となる傾向が認められる。ただし，最上流の断面や下流側から4本目の断面のように，細粒土砂が表層よりも下層側にて高い値で取り込まれた場所も存在することが分かる。前者は上述の（3）に該当する場所であり，後者は出水時に砂州から低水路へ向かう滞筋が形成される場所である。河床材料の10%を超えて細粒土砂の堆積が認められる場所は，（3）の砂州上流側のみであり，蛇行角が大きく河岸が固定された地形の場合，この場所にて土砂が堆積傾向であり（図-4参照），表層のみでなく比較的深い場所まで細粒土砂が取り込まれるものと考えられる。一方，砂州から低水路へ向かう滞筋が形成される場では，低水路が洗掘される。この場所では出水後半においても流れの剥離が継続しており，細粒土砂が比較的深い場所へと取り込まれやすい状況にあるのではないかと推察される。今後，本結果を視覚的に分かり

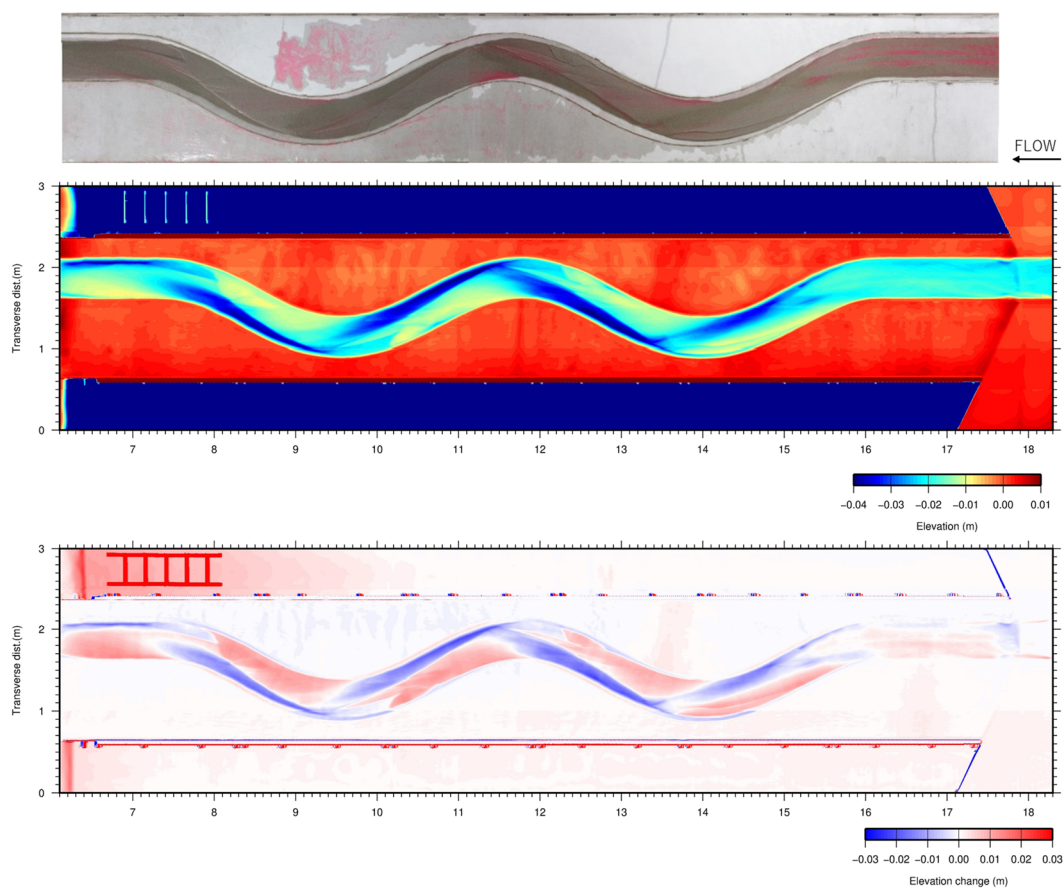


図-4 Case1の通水60分経過時（実験終了時）の様子，河床高コンター図，河床高コンター図

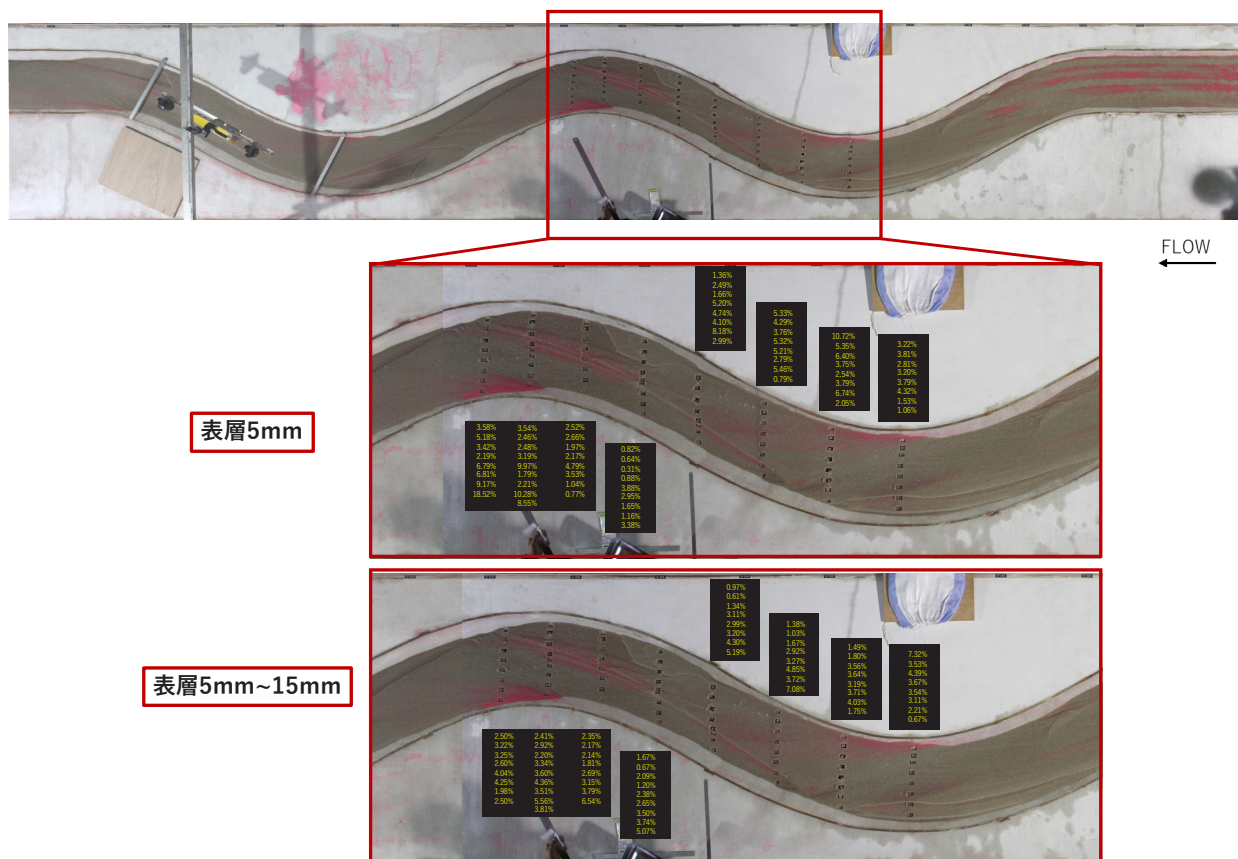


図-5 Case1の実験終了時（通水60分後）における河床材料への細粒土砂含有率

やすく整理する方法を検討すると共に、混合粒径場を対象とした数値解析モデル改良（検討3年目に実施予定）を行う際に検証データとして利用する。

3. 2. Case2（混合砂，細粒土砂30%追加供給）

図-6にCase2の実験開始から60分後の河床高コンター図を示す。図より、Case1と同じく蛇行内岸側に砂州（固定砂州）が形成され、砂州前縁部（流れが段落ちになる場所）における比高差が明瞭に形成されることが分かる。ただし、混合粒径を用いたCase2では、Case1と異なり、実験開始から短時間で浮州が形成され、砂州と低水路との比高差が大きくなることで低水路に流れが集中することが特徴的であった。このため、実験終了時の低水路の蛇行外岸側の深掘れはCase1よりもCase2の方が大きくなった。

図-7に、実験終了時における土砂採取場所と平均粒径を示す。Case2は混合粒径であるため、細粒土砂含有率の示し方を検討する必要があるが、ここでは平均粒径を用いて実験開始時との比較を行うこととする。実験開始時の平均粒径は、上述のとおり0.87 mmである。図より、着色した細粒土砂の堆積場所を確認すると、Case1と同じく、(1)砂州前縁（砂州下流側）、(2)砂州前縁直下の低水路、(3)砂州の上流側の3か所に集中的に堆積しているように見受けられる。Case1において最も細粒土砂が堆積する場所は、(3)の砂州上流側であった。

Case2では、図-7より平均粒径の変化を確認すると(1)砂州前縁（砂州下流側）および(2)砂州前縁直下の低水路にて平均粒径がより小さくなる傾向が認められる。しかしながら、混合粒径の分級作用と上流から供給した高濃度(30%)細粒土砂の影響とを切り離せないため、次年度、混合粒径のみを対象とした同水理条件下での実験を行う予定である。

図-8にCase1とCase2の60分通水後の斜め写真を示す。Case1と細粒土砂の堆積状況を比較すると、Case2では砂州上への堆積が少なく、低水路における堆積範囲が広域に及ぶように見受けられる。

砂州上への堆積が少ない要因は、通水後、すぐに浮州化が進んだことによるものと考えられる。一方で、低水路側への堆積範囲が広がったことについては、Case1で考察したような砂州前縁直下における流れの剥離（鉛直方向の渦）とは言い難い（砂州は浮州化しているため）。この点については、研究開始時に想定していなかった結果であり、なぜ一様砂と混合砂で細粒土砂の堆積特性が異なるのか、より

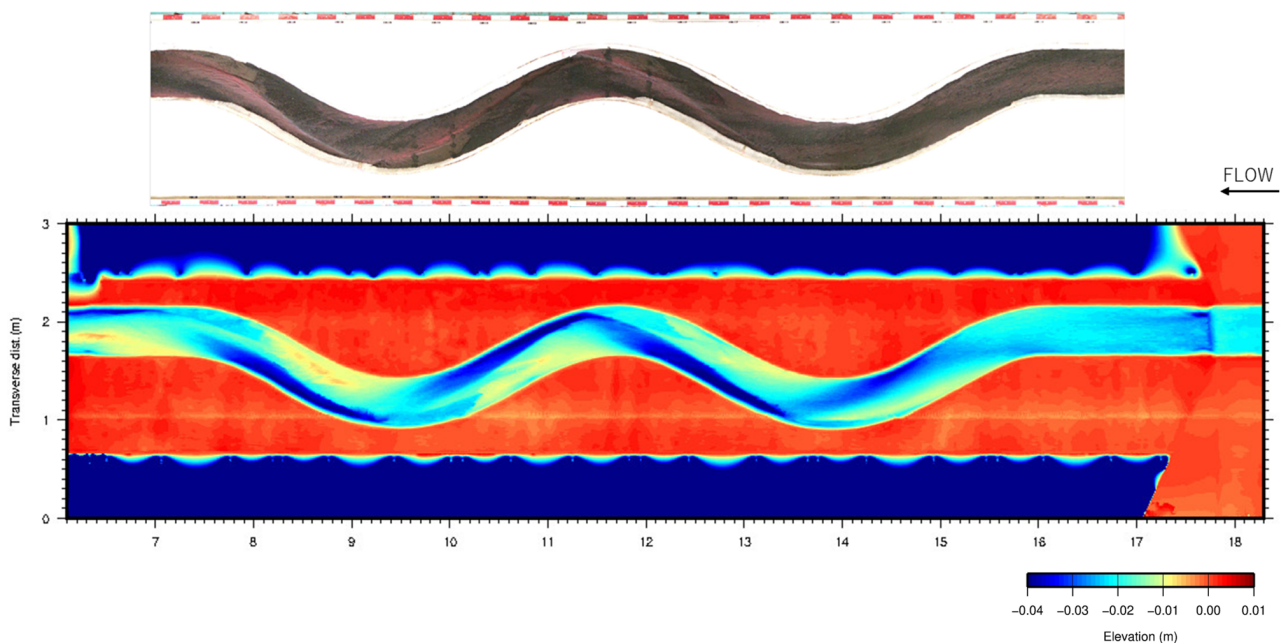
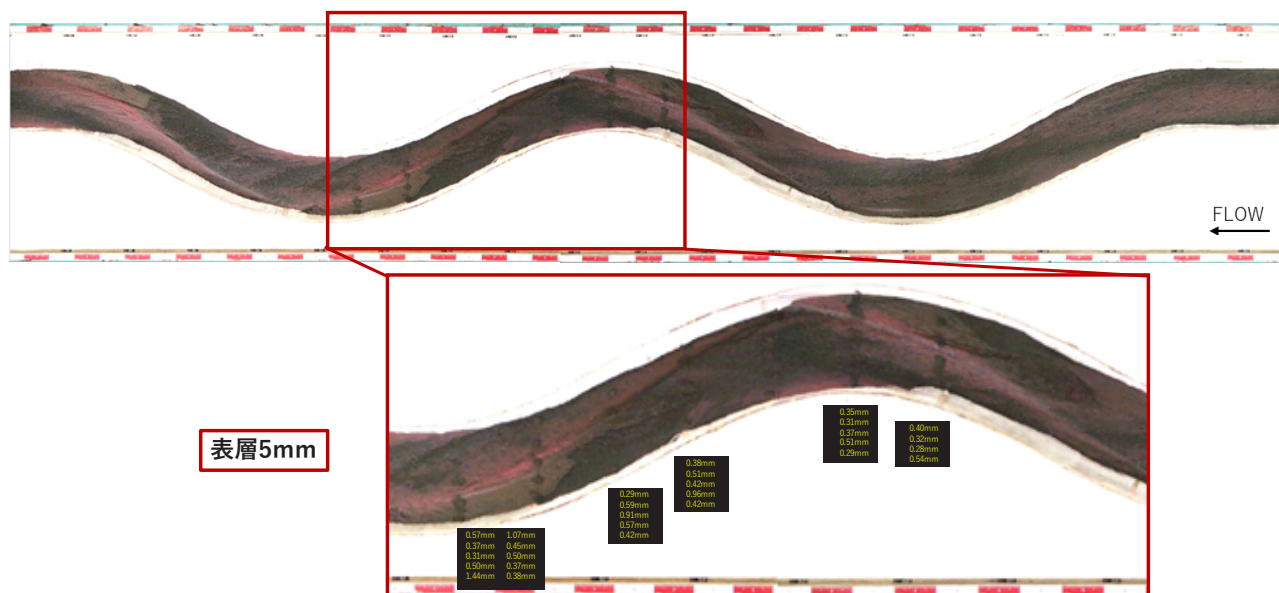


図-6 Case2の通水60分経過時（実験終了時）の様子，河床高コンター図，河床高コンター図



※ 5mm~15mmの層は結果整理中。

図-7 Case2の通水60分後における河床材料の平均粒径の変化

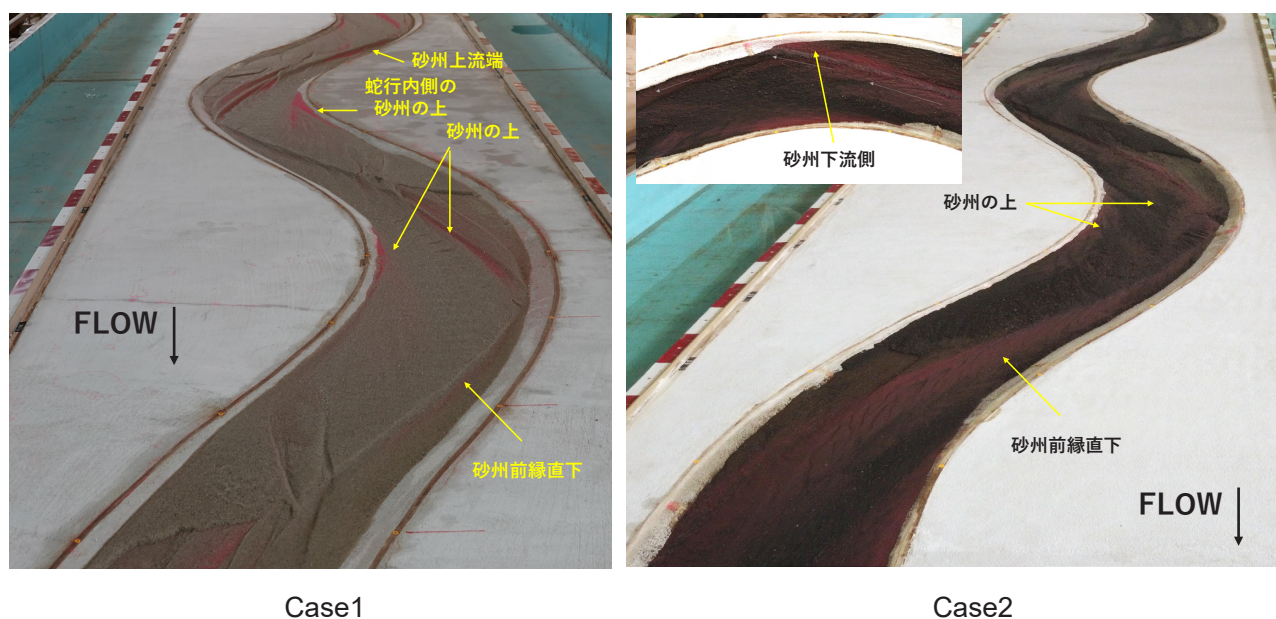


図-8 Case1とCase2の斜め写真

詳細に調べることが必要である．一つの可能性として，Case2の方が砂の色が黒いため，Case1に比べて細粒成分の堆積量が多く見える可能性もある．この点については確認することが必要であり，上述の通り，次年度，混合粒径のみを対象とした同水理条件下での実験を行う．

図-9に，Case1の通水150分経過後（実験終了時）における様子を示す．実験終了後に採取した河床材料の平均粒径は分析中であるが，図より砂州下流側および砂州前縁と前縁直下において多量の着色された細粒土砂の堆積が認められる．一様砂河床に比べ，混合砂河床の方が細粒土砂を捕捉しやすい傾向があるように見受けられるが，妥当かどうか，次年度以降に確認する．

3. 3. Case3（混合砂，Case2実験終了時の河床を初期河床として利用，細粒土砂追加なし）

図-10に，Case1の通水150分経過後（実験終了時）における様子を示す．実験終了後に採取した河床

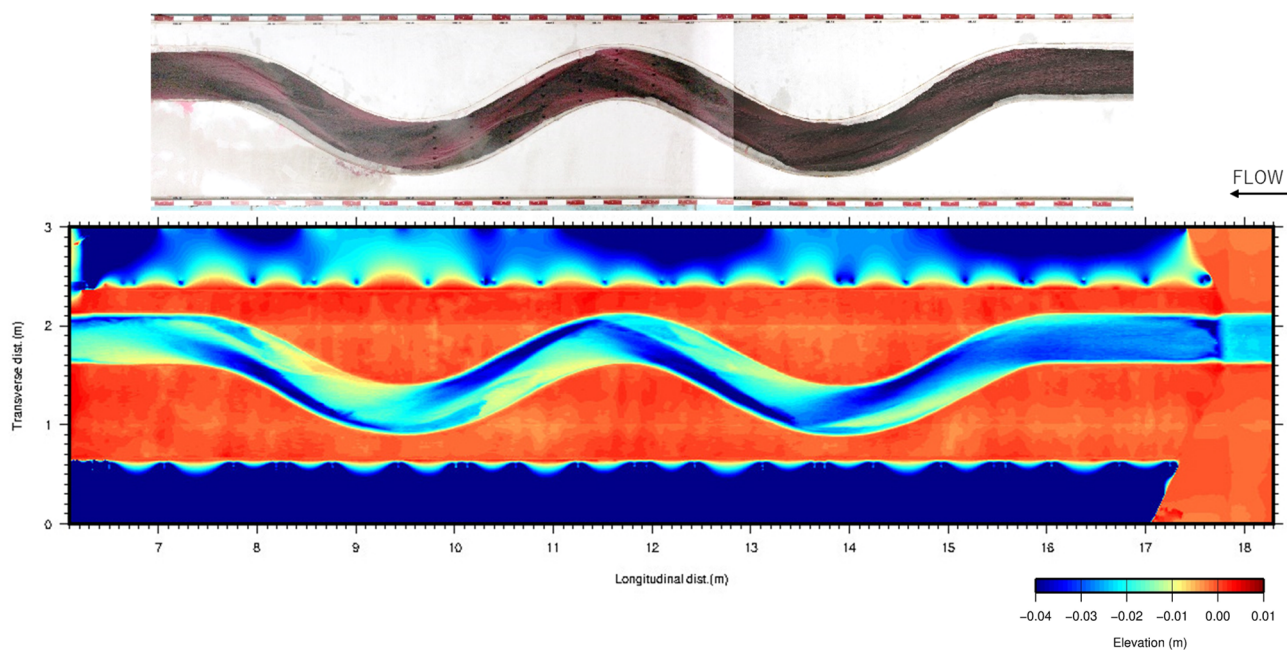


図-9 Case2の実験終了時（通水150分後）の様子，河床高コンター図

材料の平均粒径は分析中である．図より，過度な細粒土砂（ピンクに着色した砂）の供給を停止した場合，砂州前縁や砂州前縁直下の低水路に堆積した細粒土砂は次第に流出し，河床表層における細砂の堆積量が減少したように見受けられる．今後，採取した土砂の分析結果を用いて，表層および下層の粒径変化について確認する．

3. 4. Case4（混合砂，Case3実験終了時の河床を初期河床として利用，細粒土砂追加なし，低水路満杯）

Case4では，Case3実験終了時の河床を初期河床とし，まずは通水可能な低水路満水状態となる流量規模の確認を行った．これは，一様砂での実験に比べて低水路側の洗堀深が大きく，Case3までに与えて

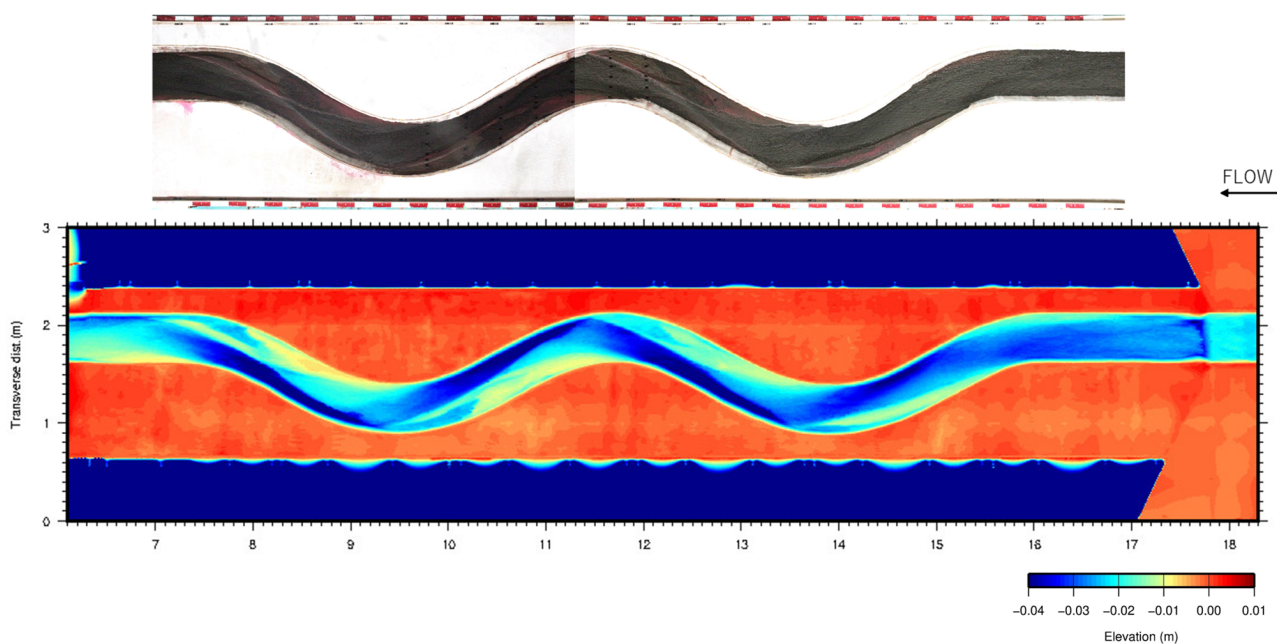


図-10 Case 3の実験終了時（通水150分後）の様子，河床高コンター図

いた一定流量 ($0.00276 \text{ m}^3/\text{s}$) では砂州の大部分が浮州化する状況にあったためである。結果、低水路満水状態になる流量規模は一定流量にて $0.00355 \text{ m}^3/\text{s}$ であり、一様砂で構成された水路に比べて1.3倍程度まで大きな流量を低水路のみで流すことが出来ることが確認された。

図-11に、Case4の通水150分経過後（実験終了時）における様子を示す。実験終了後に採取した河床材料の平均粒径は分析中である。Case4ではCase3よりも流量を増やした条件下において過度な細粒土砂（ピンクに着色した砂）の供給を停止している。図より、河床表層への着色した細粒土砂の堆積状況を確認すると、砂州上流側や低水路に堆積した細粒土砂の大半は流出したように見受けられる。しかし、砂州下流側および低水路の深み（砂州下流側直下に形成される淵）に堆積した細粒土砂は残存しており、一度細粒土砂が堆積すると流出しにくい場所であると分かる。今後、採取した土砂の分析結果を用いて、表層および下層の粒径変化について確認する。

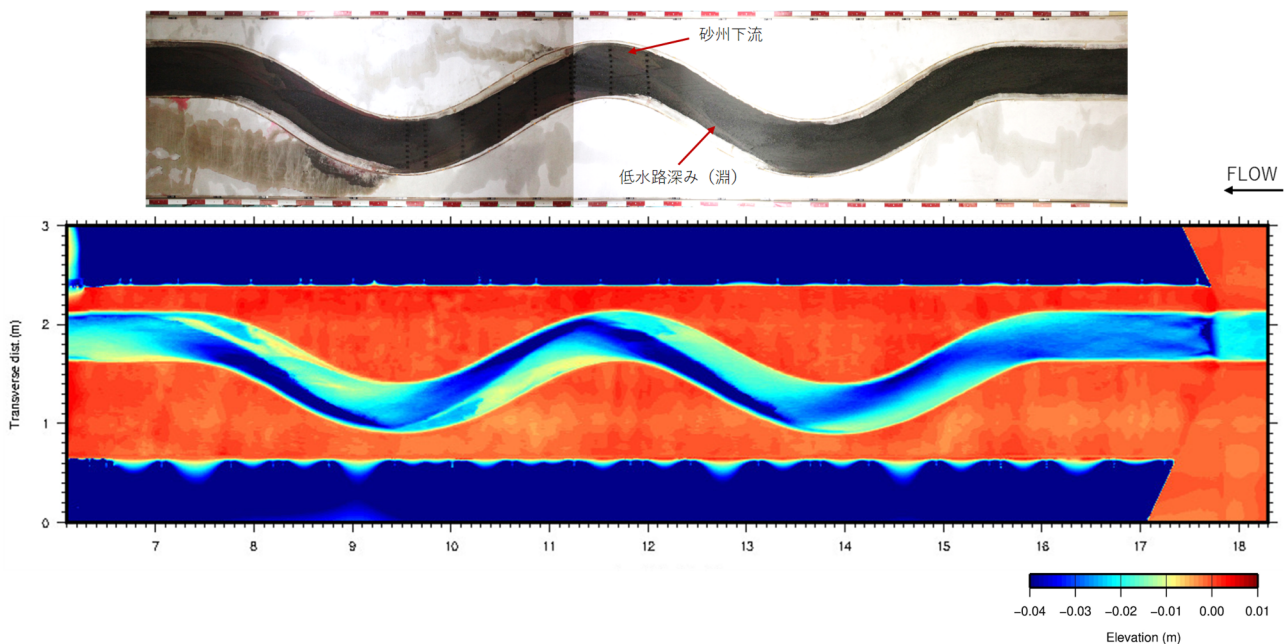


図-11 Case4の実験終了時（通水150分後）の様子，河床高コンター図

4. 結論

混合粒径を用いた検討として1年目となる本研究では、昨年度までに実施した2粒径での水理実験の水理条件を参考とし、一様砂と混合粒径場における細粒土砂の堆積特性および河床変動特性の違いについて比較するための実験データを取得した。主な結果は以下のとおりである。

- (1) 河岸の固定された一様砂で構成された蛇行流路へと高濃度細粒土砂を供給した場合、細粒土砂の堆積場所は比較的明瞭であり、砂州下流側，砂州上流側，砂州前縁と前縁直下低水路の3か所に集中する状況が認められた。
- (2) 河岸の固定された混合砂で構成された蛇行流路へと高濃度細粒土砂を供給した場合、一様砂で同様の実験を行った場合に比べて広域的に多くの細粒土砂が堆積したように見受けられた。混合砂河床では分級作用によって河床材料構成が通水と共に変化するため、供給した細粒土砂の影響のみを把握することが難しい課題がある。次年度、混合粒径のみの実験を実施し、分級作用による平均粒径の変化と、細粒土砂供給に伴う平均粒径の変化とを分けた考察を試みる。なお、上空からの写真および河床材料分析結果から確認すると、細粒土砂は砂州下流側および砂州前縁と前縁直下低水路の2か所に集中する傾向が見受けられた。

- (3) 混合粒径場において、過度な細粒土砂の供給を停止した場合、一度堆積した細粒土砂がどの程度流出するかを把握するための実験を行った。結果、河床表層においては時間経過に伴い大部分の細粒土砂の流出が確認された。ただし、砂州下流域においては実験終了時点においても細粒土砂が残存しており、一度堆積すると流出しにくい場所のようである。今後、河床材料サンプルの分析を行い、表層および下層における粒度分布の変化について確認を行う。

参考文献

- 1) M. G. Kleinhans, B. de Vries, L. Braat, M. van Oorschot: Living landscapes: Muddy and vegetated floodplain effects on fluvial pattern in an incised river, *Earth Surface Processes and Landforms*, 43, pp. 2948–2963, 2018.
- 2) 久加・山口：河道内に供給される高濃度細粒土砂の輸送特性に関する研究, 北海道河川財団研究所紀要, 2022.
- 3) 久加・山口：細粒土砂の供給が土砂流出・流路変動特性に与える影響に関する研究（3年目）, 北海道河川財団研究所紀要, 2023.
- 4) 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, 土木学会論文報告集, 342, pp.87–96, 1984.