

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：33919

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04374

研究課題名(和文) 砂州形状と粒度の伝播特性の解明および粒径別流砂量評価技術の提案

研究課題名(英文) Study on estimation of sediment transport rate on bars under the condition that bed composed of mixed sediment

研究代表者

溝口 敦子(寺本敦子)(MIZOGUCHI, ATSUKO)

名城大学・理工学部・教授

研究者番号：40362280

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：実河川における河床材料の粒度分布の特徴を整理するとともに、画像解析技術を用いて河床材料の粒度の平面分布を把握した。一方で、水路実験を用いて基礎的な土砂流下現象の検討や砂州の流下や供給条件の変化に伴う応答に関する検討を行った。これらの検討を通じ、流砂の水流への影響や他粒径の影響によって流砂速度や量が変化し、河床構成材料の供給状態が砂州の進行や変化に関わること、細粒分の供給が流砂現象の活性化につながることなど今後砂州動態の解明や流砂量評価に取り入れるべき機構や検討課題を明確にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題の検討を通じ、掃流砂、浮遊砂として流下する土砂が河床や河川に形成している砂州に対して果たす役割、流れに対する役割、他の粒径の動きに与える影響が重要な視点となりえることなどを示した。これらは、取り扱う事象によっては、河床と流れの境界面を明確に分けて、流砂量評価をしてきた既往の知見からの脱却の必要性を示しており、学術的な意味がある。なお、流砂現象は河川の洪水処理能力に関係し、昨今の災害現象にも大きく関わるため、本研究課題は社会的にも影響を及ぼすと考える。

研究成果の概要(英文)：The characteristics of the particle size distribution of the riverbed materials were investigated in some rivers. The plane distribution of the particle size of riverbed materials were also observed in some rivers with image analysis technology. On the other hand, one series of flume experiments were taken in order to investigate both the characteristics of sand particle motion and water flow, and also another series of flume experiments were done in order to examine in detail of bar motion accompanied with the change of the sand supply condition. Experimental results show that suspended load influences bed load transport, and also show that active motion of bed load correspond to activity of bar migration. These experiments results also indicate that differences of sediment transport motion play different roles to bed changing. This research indicates important future topics and discussion in order to estimate sediment transport rate considering motion of each particle size.

研究分野：河川工学，移動床水理学

キーワード：交互砂州 流砂量 混合粒径 土砂管理

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

河川では、河道内への土砂堆積や、土砂移動による災害や大きな環境変化を引き起こさないように、かつ海浜にとって重要な質(粒度)の土砂をより多く海まで流送できるように、健全な土砂移動の管理が必要となる。しかしながら、河道部に関しては、河道の変化が複雑で予測が非常に難しい課題であったために、河道変化・河床変動のメカニズム解明を目的とする研究が従来数多く行われ、大きな成果があるにも関わらず、河道内を流下する土砂の量や質の評価には至っていない。

ここで、砂州を有する河道について考える。砂州河道における土砂の流れには、砂州の挙動が大きくかわる。大出水時に砂州が動く場合には、砂州波長スケールで洗堀と堆積の繰り返す、つまり、深掘れ部で洗堀された土砂が前縁線付近で堆積することを繰り返すため、土砂は砂州とともに流下する。したがって、砂州形成河道における出水時の土砂移動には砂州の形状とその挙動が極めて重要である。また、既往の研究から混合砂河床上の砂州にとって、基盤となる河床材料の粒度と供給される土砂の粒度、量との関係が、土砂の流送および砂州地形の変化に重要な要素となることが推察される。

砂州地形は各流量時の平面流況の基盤となり、そこに存在する河床材料の粒度は、河床変動、土砂の流れを決める。ただし、これまでの混合砂河床上の砂州に関する研究は、申請者の検討も含め、混合砂で取り扱うことで砂州波長、波高が変化し、粒径の幅が変わると発生する砂州の列数が変化するなど現象の傾向を示すことによって混合砂で移動床現象を考えることの重要性の指摘にとどまっていた。また、ダム排砂や近年みられる局所豪雨時の斜面崩壊等で、特定の粒度の過剰な供給が考えられるが、河道内砂州を介した土砂の流れに与える影響は明らかになっていない。以上を踏まえると、実河川に形成されている砂州を対象として、砂州形状、伝播特性と構成材料の粒度分布の関係、供給土砂の量と粒度に対する砂州形状と伝播特性の応答を明らかにする必要がある。

2. 研究の目的

上記背景を踏まえ、本研究は、高度化した計測技術、解析技術を利用し、改めて河道内砂州が下流へ伝播する過程とその河道形状を構成する土砂の量と質の変化に着目することによって砂州河道を流下する土砂の評価方法の提案を目的とした。具体的には、まず、実河川の粒度分布特性により決まる砂州の特徴(砂州の形状・伝播特性と粒度分布の関係)、そして、供給土砂の影響を受けて砂州上を土砂が流下するとともにその砂州の特徴が変化し、伝播していくか(供給土砂の量と粒度に対する砂州形状・伝播特性の応答)を調べることにした。これらの調査、検討を通じて得られた成果を整理し、混合砂河床の砂州における粒径別流砂量の評価方法を提案につなげる。

3. 研究の方法

本研究では、上記目的を達成するために、まずは実河川の状況把握および土砂の動きの特徴について把握し、現地の状況を踏まえたうえで実験等の検討を行うことにした。

実河川における粒度分布の特徴の整理

手取川、庄川、矢作川、天竜川、大井川の実河川を対象に、粒度分布の整理を行うとともに、GIS上で航空写真などを整理し、勾配、平均川幅等物理環境の整理やこれまでの変遷の整理を行った。なお、一部データは、国土交通省各河川事務所から提供を受けた。

なお、これらの結果とその他の検討を元に、実河川の砂州の動き、表層粒度と土砂供給の特徴と流砂量を関係づけるつもりであったが、平均的な粒度の捉え方はの検討とともに提案にいたっておらず、上記関係づけは今後の課題とした。

砂州河道における粒度分布の平面的な特徴および縦断方向の変化に関する現地調査

ダム下流河道への土砂バイパスによる土砂供給が始まった天竜川支川の小渋川、また、土砂生産が激しく土砂動態の課題を多数抱えている大井川などを対象に砂州地形の特徴把握と表層河床材料のパターンをつかむためのドローンを用いた空撮によりオルソ画像を取得などの現地調査を行った。このなかで実河川の表層粒度の平面的な分布を把握するとともに、場の平均的な粒度分布に関する情報整理方法を検討した。

土砂動態を把握するための基礎実験

固定床上に砂を供給し、PIVを用いて流れおよび砂の動きを把握する。これを混合粒径でも実施することで、各粒径の動きなどを把握していく。

土砂供給に応じた砂州進行状況に関する実験

混合粒径で形成した交互砂州に関して、通水途中に土砂供給の停止、再開を行うことで、土砂供給に関する砂州の動きを調べる実験を行った。

上記の研究項目のうち、最終的には、に力を入れて実施し、既往の研究成果を踏まえ、砂州の動きと粒度分布、砂の流れと河床材料に関する情報整理を行うことで、砂州河道における粒度分布の捉え方、および流砂量算定方法の検討を行い、提案に向けた整理を行った。

4. 研究成果

本研究の成果として、交互砂州、複列砂州を有する河川の粒度分布の平面的なばらつき等の把握、実験室内での検討により、掃流砂、浮遊砂の流下特性から、供給量の質と砂州の動き、河床の状態の関係など流砂量推算に必要な視点に関する定性的な結論を得ることができた。ただし、これらが定性的な結論であることや実河川における河床材料としての平均的な粒度分布の概算方法や具体的な流砂量評価を行うには課題が残り、引き続き検討を続ける予定である。以下に、上記成果に至ったキーとなる研究成果の一部を記述する。

(1) 流砂速度等動態の計測

掃流、浮遊形態での流砂について、PIV/PTV を駆使して、流速および砂粒子の速度の関係を調べた実験について述べる。図-1 で示す勾配 1/50 に設定した幅 20cm の実験水路を用いて平均粒径 0.88mm 程度の三河珪砂 4 号を粗度として貼り付けた固定床に一定流量 $0.006\text{m}^3/\text{s}$ 通水し、同時に一樣粒径および二粒径の土砂供給を行い高速度カメラでグリーンレーザにより照射されたトレーサ粒子や砂を撮影し PIV/PTV により鉛直方向粒度分布と粒子速度を計測した。実験に用いた砂は、平均粒径 2.1mm, 0.88mm, 0.2mm 程度の三河珪砂 3, 4, 6 号であり、事前に計測した固定床に堆積ができない平衡流砂量およびその半分、1/4 倍の量を供給するなどした。なお、浮遊砂を伴う流れとなる珪砂 6 号については、全体的に砂が多いため精度の確保が難しかったため底面付近は参考値である。

この実験から、浮遊砂の流下速度などが得られた。図-3, 4 は粒子速度計測結果の一例であり、流砂の粒子速度にはばらつきがあり、計測された平均値は流速より少し小さな値となることがわかる。また、浮遊砂を伴う 6 号砂供給実験では、浮遊砂濃度も計測し、図-4 のように Rouse 分布に従うことが確認され、この濃度と、流速をかけたものが流砂通過体積の高さ方向の分布と言える。また計測値のうち底面付近の濃度が掃流砂の濃度だと仮定すると、今回の平衡流砂量を供給するケースではおおよそ 8 割程度が浮遊砂として流下し、残りの 2 割は掃流砂として流下することが概算された。

また、掃流砂のみで流下する 3 号砂、4 号砂についても粒子速度が得られ、平均粒子速度は流速より少し遅くなる結果となった。

また、混合粒径の実験は、3 号砂の半分の平衡流砂量に対し 6 号、4 号砂の供給量を変化させて流速と粒子速度の変化を調べたり、一樣粒径時の平衡流砂量の半分以下を供給している条件で他の粒径の流下可能量を計測したりして、混合粒径が供給されている砂の挙動の変化について調べた。その結果、浮遊砂としても移動する 6 号珪砂が

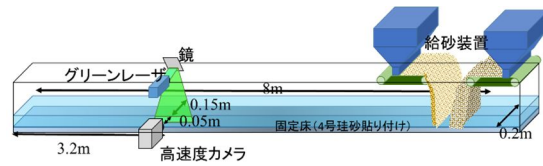


図-1 実験装置 (PIV 実験)

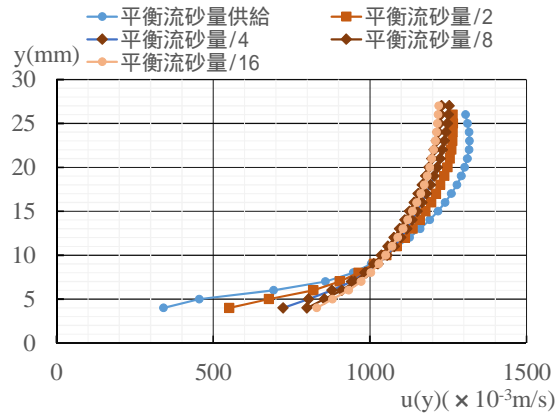


図-2 6号砂供給時の流速分布の変化

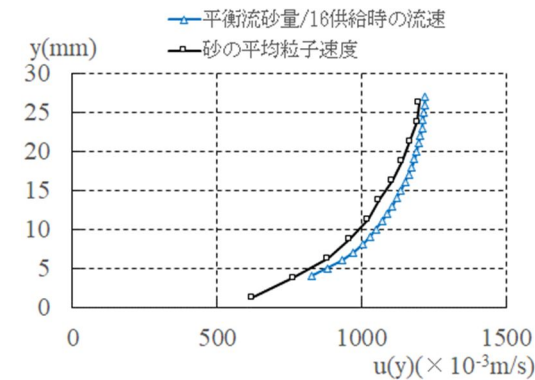


図-3 6号砂平衡流砂量供給時の流砂粒子速度中央値 (計測粒子数 50% 値) と流速の関係

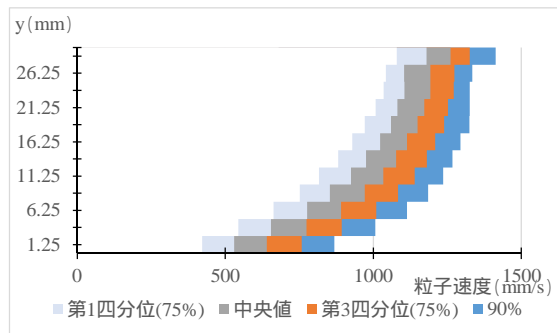


図-4 6号砂粒子速度のばらつき

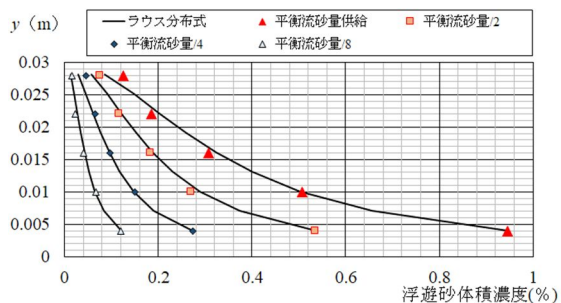


図-5 6号砂供給時の浮遊砂濃度分布

供給されるケースで3号砂の流下速度が速くなることが分かった。図-6は、実験時に瞬間的に底面に存在した砂の量であり、これに速度を乗ずると流砂量になる。つまり、一定量供給している3号砂の瞬間存在量が少なければ、流砂速度が速いということになり、掃流砂となる4号砂と一緒に投入すると3号砂の速度は遅くなり、浮遊砂でも存在する6号を入れた際にはばらつきが大きくなるものの、3号砂の速度が大きくなる結果を示している。こうした結果は、砂の流下速度と河床との入れ替わり特性に大きく関与することが考えられた。

(2)土砂供給量の変化が及ぼす交互砂州流下特性の実験的検討

供給量に対する河床の応答を調べるため、全長10m、幅0.2mの変可勾配水路を勾配は1/100に設定して供給量の変化に対する砂州の応答を調べる実験を混合粒径で行った。水路内には、三河珪砂3号(平均粒径2.1mm)、4号(平均粒径0.88mm)5号(平均粒径0.53mm)、6号(平均粒径0.24mm)を重量比1:2:4:3の割合で混合した平均粒径0.67mmの河床材料を厚さ6cmで水路全体に敷きならした。実験は個々の河床に対し、通水流量 $0.00055\text{m}^3/\text{s}$ に対する平衡流砂量を調べたうえで行った。ここでは、土砂供給をしながら平衡状態の砂州が形成した後、供給を停止、その後供給を再開し、水路上の河床の応答を調べた。こうした実験では、既往の研究通り、混合粒径河床においても土砂供給の停止により砂州波長が間延びし、かつ深掘れ部が深くなり、波高が高くなることが確認された。これに対し、平衡状態の砂州、および土砂供給が再開された後に形成された砂州の波高は低く、波長も短い結果となった。例えば、初期の平衡状態の砂州、土砂供給を停止および再開時した際の砂州の流下速度を表す図-7の走時曲線を見ると、供給量の影響は上流から徐々に表れ、一度供給が停止し変化した砂州は、砂州の流下条件下では再開による回復が見られないことが分かる。再開時には再開後に上流部で形成された砂州が現れ、平衡時の状態の砂州が流下する結果となった。

今回の研究で行った一連の実験で、砂州は、堆積、洗堀を繰り返し流下するため、砂州動態との関係によって、供給土砂の変化が及ぼす河床の応答、表層粒径を規定することになることが示唆された。

(3)土砂供給条件と砂州の進行、流砂量に関するまとめ

申請者の既往の研究から、図-8のような砂州形状と流線、河床変動量の分布の例のように、砂州の流下時には前縁線で砂が堆積することが分かっている。これは砂州が掃流状態で流下する粒径のみで形成される場合、砂州形成時、砂州一波長進行する際に入れ替わる土砂体積を流砂量で除したものが一波長進行するのに要する時間となることを示しており、これは数値解析や実験で示されている。これに対し、今回扱ったような混合粒径の河床で形成される交互砂州では、砂州のベースになる材料は前縁線でほぼ停止するのに対し、浮遊状態またはそれに近い挙動をする細粒分は前縁線を通り流下する。このとき、砂州の進行には特に掃流砂と

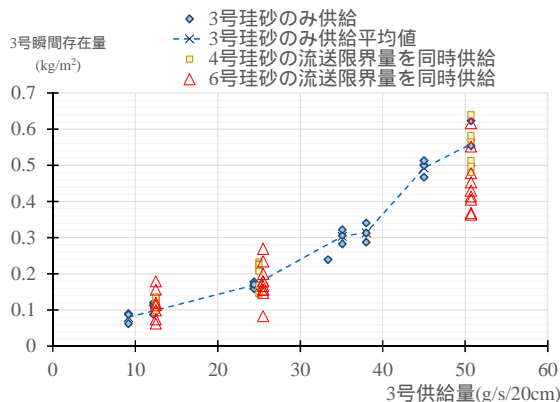
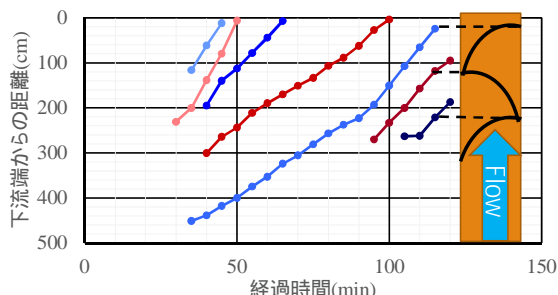
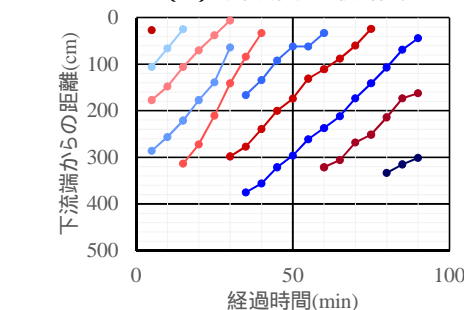


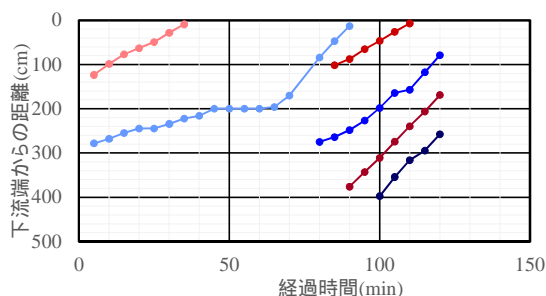
図-6 3号珪砂の瞬間存在量



(a) 平衡流砂量供給時



(b) 土砂供給停止後



(c) 供給再開後

図-7 砂州の走時曲線

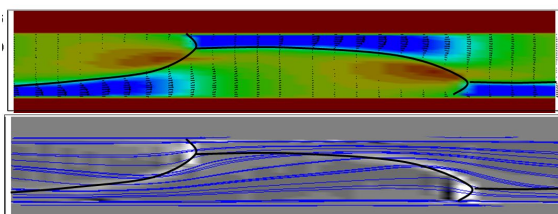


図-8 砂州の平衡形状(上図青～赤が河床高が低い～高い)と流線、河床変動量(下図:白が堆積、黒が洗堀)平面分布の例

して流下する材料の供給量が深く関わり、かつその影響範囲は供給地点付近に限定される。しかし、その一方で、浮遊砂またはそれに近い状態で流下するものの供給は全体的な土砂移動の活性度に関わる。例えば、土砂の供給を停止すると、その直下の砂州の進行は遅くなり洗掘部を深く洗掘するため、波高が大きくなり、この影響は徐々に下流へ伝わる。また、供給の質が変化し細粒分のみが供給される際には、場合によっては直下の砂州を超えて下流の砂州表層の材料を活発に動かすようになり、その量に見合った量が上流から供給されていなければ、河床低下を起こす。逆に細かい粒径のみの供給が減った際には、河床低下はそれほど起こらないものの供給量と流砂量のバランスが崩れ、徐々に河床材料の動きが鈍くなり、すべての供給がなくなった場合とは少し異なる影響がでる。

こうした各粒径の土砂動態と砂州挙動、表層河床材料の状態の関係を実河川のそれぞれの河床材料条件下でつかむためには、各河床材料の役割を明確にし、それぞれの流砂動態を適切に表現する必要がある。本研究全体で得られた結果から考えると、流砂が流れの抵抗を変化させ、流下速度も変化させるなどの機構を入れたうえで砂の流下速度と流砂量の評価が必要となり、現存の流砂量、河床変動モデルの改良が必要となる。これらの課題を踏まえ、今後、さらなる検討を行う予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 溝口 敦子	4. 巻 Vol.76, No.2
2. 論文標題 急こう配水路における流砂運動と流れへの影響に関する実験的研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_1129-I_1134
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 秦夢露, 知花武佳	4. 巻 26
2. 論文標題 急勾配大規模扇状地に見られる流路形態に流域地質が及ぼす影響	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 河川技術論文集	6. 最初と最後の頁 229-234
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kyuka Tomoko, Okabe Kazunori, Shimizu Yasuyuki, Yamaguchi Satomi, Hasegawa Kazuyoshi, Shinjo Kho	4. 巻 31
2. 論文標題 Dominating factors influencing rapid meander shift and levee breaches caused by a record-breaking flood in the Otofuke River, Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Hydro-environment Research	6. 最初と最後の頁 76 ~ 89
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jher.2020.05.003	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 溝口 敦子	4. 巻 Vol.75 No.2
2. 論文標題 流砂の存在が流速分布へ及ぼす影響の実験的検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1(水工学)	6. 最初と最後の頁 I_877-I_882
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 秦夢露, 知花武佳	4. 巻 Vol.75 No.2
2. 論文標題 河床材料の粒度分布とその分級特性が扇状地河道の砂州 形態に及ぼす影響	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1(水工学)	6. 最初と最後の頁 I_985-I_990
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 山口里実, 久加朋子, 岡部和憲, 桑村貴志	4. 巻 Vol.75 No.2
2. 論文標題 急流河川における低水護岸背後の高水敷侵食特性に関する水理模型実験	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1(水工学)	6. 最初と最後の頁 I_955-I_960
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 溝口敦子	4. 巻 Vol.74No.5
2. 論文標題 急こう配礫河床上の細砂流下現象における粗度低下と充填率評価の重要性	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1(水工学)	6. 最初と最後の頁 I_1147-I_1152
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 網状流路を有する大井川を例とした移動床河道の維持管理に向けた課題と展望	4. 巻 Vol.24
2. 論文標題 溝口敦子	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 河川技術論文集	6. 最初と最後の頁 209-214
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 山口里実, 久加 朋子	4. 巻 Vol.74No.5
2. 論文標題 低水護岸または水制まわりの流砂特性が流路変動へ与える影響に関する水理模型実験	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1(水工学)	6. 最初と最後の頁 I_961-I_966
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 住友 慶三, 渡邊 康玄, 泉 典洋, 山口 里実, 米元 光明	4. 巻 Vol.74No.5
2. 論文標題 出水時の河道変化に対する分岐流路維持の効果	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1(水工学)	6. 最初と最後の頁 I_1003-I_1008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 溝口 敦子, 吉江 海斗, 青木 七海, 清水 峡太, 中根 蒼斗
2. 発表標題 川幅の急拡急縮を伴う河道における流れの特徴と拡幅部での土砂堆積, 流木の通過特性に関する基礎実験
3. 学会等名 令和2年度土木学会中部支部研究発表会概要集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川村里実, 大石哲也, 矢部浩規
2. 発表標題 2016年出水後の十勝川における流路変動および側岸侵食について
3. 学会等名 国土交通省令和元年度国土技術研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 溝口敦子
2. 発表標題 急こう配礫河床上の細砂流下現象における粗度低下と充填率評価の重要性
3. 学会等名 第63回水工学講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 溝口敦子
2. 発表標題 礫河床への細砂沈み込み現象の検討
3. 学会等名 第23回計算工学講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山口里実
2. 発表標題 低水護岸または水制まわりの流砂特性が流路変動へ与える影響に関する水理模型実験
3. 学会等名 第63回水工学講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	知花 武佳 (CHIBANA TAKEYOSHI) (10372400)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授 (12601)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	川村 里実 (山口里実) (SATOMI KAWAMURA) (70399583)	国立研究開発法人土木研究所・土木研究所 (寒地土木研究所)・主任研究員 (82114)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関