

令和 3 年 6 月 4 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04367

研究課題名（和文）水際の流れと土砂輸送に着目した川の流路変動機構に関する計算力学的アプローチ

研究課題名（英文）Computational approach for river channel processes with bank erosion

研究代表者

音田 慎一郎（Onda, Shinichiro）

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50402970

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：近年の豪雨災害では、洪水流によって河川の流路が大きく変動する現象が確認されており、災害リスクが高くなってきている中、洪水流の非定常的な挙動と地形変化を予測することは河川工学的に重要な課題である。本研究では、河道内における砂州の挙動、及び砂州形成に伴って生じる流路変動を精度よく予測できる3次元数値解析モデルの構築を目的とし、表面流と浸透流を同時に予測できるデカルト座標系での3次元流体解析モデルと土砂輸送モデルを組み合わせ、水際・河床近傍の複雑な流れ構造と土砂輸送特性を考慮した数値解析モデルを構築した。さらに、蛇行流路形成過程に関する水理模型実験を行い、モデルの妥当性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、災害リスクが高くなってきている中、洪水流の非定常的な挙動と地形変化を予測することは河川工学的に重要な課題である。本研究では、河岸侵食を伴う蛇行流路形成過程を対象とし、水理模型実験によって流路変動プロセスを明らかにするとともに、表面流と浸透流を同時に予測できるデカルト座標系での3次元流体解析モデルと土砂輸送モデルを組み合わせ、水際・河床近傍の複雑な流れの3次元性と土砂輸送特性を考慮した数値モデルの構築を行った。本研究は適切な河道管理に向けた予測モデルの高度化に大きく貢献すると考えられる。

研究成果の概要（英文）：River channel processes with bank erosion recently occur during floods. For disaster mitigation, it is of great importance to predict the flow fields and bed deformation accurately by computational model. In this study, numerical model to simulate river channel processes with bank erosion is proposed, by coupling the 3D flow model which solves simultaneously overtopping and seepage flows and the equilibrium sediment transport model. Then, the verification of numerical model is carried out through comparison with the hydraulic experiments.

研究分野：水工学

キーワード：流路変動 数値モデル

## 1. 研究開始当初の背景

近年の局地的集中豪雨に伴う水災害では、普段水が流れていないところに洪水流が流れるとともに、河床や河岸を構成する多量の土砂を侵食し、河道が大きく変動する現象が確認されている。こうした現象を予測する河川洪水解析では、実用性の観点から平面的な水の流れ場を解く巨視的なモデルが汎用されてきたが、災害リスクが高くなってきている中で精度の高い予測を行うためには、氾濫流の非定常的な挙動と、地形変化をもたらす河岸、河床近傍の流れと土砂輸送特性を取り扱うことのできる数値解析モデルの構築が必要である。そこで、表面流と浸透流を同時に予測できるデカルト座標系での3次元流体解析モデルと土砂輸送モデルを組み合わせ、水際・河床近傍の複雑な流れ構造と土砂輸送特性を考慮した数値解析モデルの構築に取り組んだ。

## 2. 研究の目的

本研究では、河道内における砂州の挙動、及び砂州形成に伴って生じる流路変動を精度よく予測できる3次元数値解析モデルの構築を目的としている。

交互砂州形成とそれに伴う流路変動解析についてこれまでの研究を整理すると、計算負荷の観点から流れのモデルに水深積分モデルを適用する<sup>1),2)</sup>のが一般的であり、河床・河岸近傍の流れを平均流として取り扱うため、十分な精度を有しているとは言い難い。そこで、精度の高い予測を行うためには、流れの非定常的な挙動と、地形変化をもたらす河床・河岸近傍の流れと土砂輸送特性を取り扱うことのできる3次元モデルの構築が必要であると考えられる。

著者らは密度関数法とポーラスメディア法を組み合わせ、表面流と浸透流を同時に予測できる3次元流体解析モデルを構築するとともに、土砂輸送モデル・河岸崩落モデルと組み合わせ、正面越流破堤過程を予測している<sup>3)</sup>。そこで本研究では、河岸侵食を伴う蛇行流路形成過程を再現できるように、水際での無次元掃流力、流砂量の取り扱いについてモデルを発展させ、数値モデルの開発に取り組むとともに、水理模型実験に適用し、モデルの妥当性を検証した。具体的には、まず、直線水路での交互砂州形成過程、3次元反砂堆の形成過程に関する数値解析を行い、砂州、反砂堆の形状特性や移動方向について考察した。次に、初期条件として上流側に砂州形状を与え、蛇行流路形成過程に関する水理模型実験を行うとともに、数値モデルを適用して妥当性を検証した。

## 3. 研究の方法

### (1) 開水路流れモデル

3次元流体解析モデル<sup>3)</sup>には、水面捕捉法として密度関数法を用いるとともに、3次元数値解析の計算格子において水域、土中とその境界を容易に表現し、土中の浸透流を考慮するためにポーラスメディア法を適用した。また、土中の流れの抵抗則を評価するため、本研究ではDarcy則を適用するとともに、表面流における乱流諸量を計算するため、乱流モデルには非線形k-εモデルを用いた。

### (2) 土砂輸送モデル

土砂輸送形態として掃流砂のみを取り扱う。主流方向の流砂量にはKovacs and Parker<sup>4)</sup>による式を、また、横断方向の流砂量には長谷川<sup>5)</sup>の式を適用する。以上より求めた主流方向、横断方向の流砂量をデカルト座標系での流砂量に変換した後、流砂の連続式から河床変動の計算を行い、河床高を求める。その際、水際には計算格子の解像度の問題から水が存在しているにも関わらず無次元掃流力が無次元限界掃流力を超えず、流砂量がゼロになってしまう場合がある。そこで、簡易的な手法ではあるが、このような場合には水域側からのせん断力を線形補間によって外挿し、水際のせん断力を与えた。また、局所的な河床勾配が増加し、ある限界角（ここでは簡単のため一定値とし、24°とする）以上の斜面が形成すると土砂の崩壊が生じる。本研究でも崩壊による土砂移動計算を考慮した。

## 4. 研究成果

### (1) 交互砂州形成過程への適用

数値モデルの適用の最初のステップとして、側岸を固定した直線水路での交互砂州形成に関する模型実験に適用し、再現計算を行った。全長14.9(m)、水路幅0.4(m)、水路勾配1/200の一樣水路に12(m)の移動床区間を設け、平均粒径0.51(mm)の珪砂5号を均一に5(cm)敷き詰め、上流から0.0023(m<sup>3</sup>/s)の流量の水を流している。実験から得られた砂州波長が3.0(m)であったことから、計算対象領域はその2倍の6.0(m)とし、周期境界条件を用いるとともに、初期河床に粒径の10%程度の微小擾乱を与え、計算を行った。

図-1に河床高コンターの時間変化を示す。図より時間の経過とともに砂州が形成し、下流側へ移動している様子が確認できる。また、 $t = 6000$ (s)のときに $x = 1.8$ (m)から $x = 3.3$ (m)にかけて

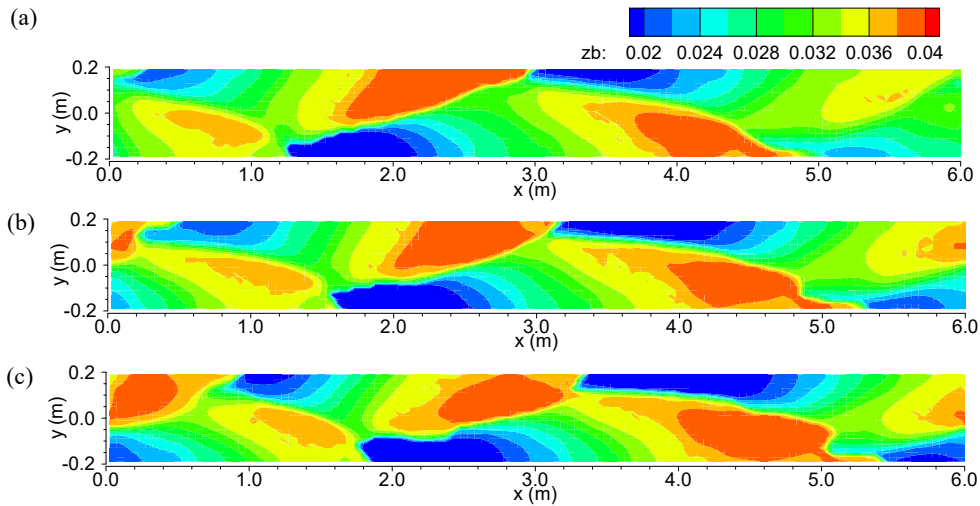


図-1 河床高コンターの時間変化 ((a)  $t = 4800$  (s), (b)  $t = 5400$  (s), (c)  $t = 6000$  (s))

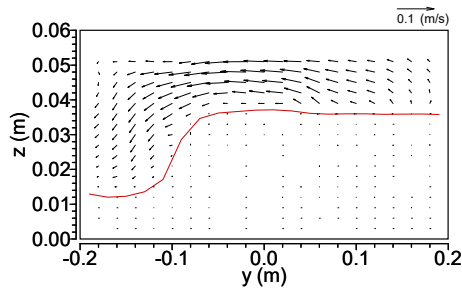


図-2 横断面内流速ベクトル図

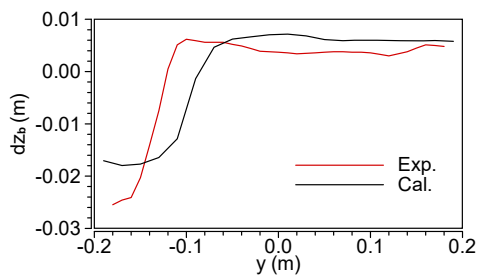


図-3 河床変動量横断分布の比較

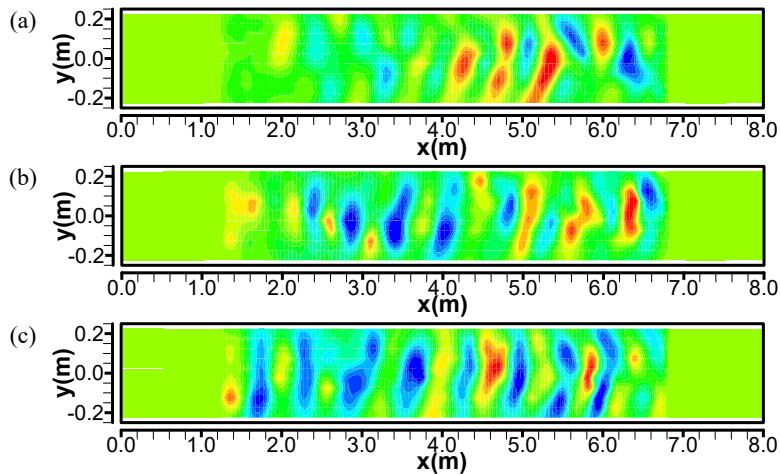


図-4 河床高コンターの時間変化 ((a)  $t = 50$  s, (b)  $t = 75$  s, (c)  $t = 100$  s)

て形成した砂州の最深河床を含む断面 ( $x = 2.225$  (m))での横断面内流速ベクトルを図-2 に示す。初期河床高は  $z = 0.03$  (m) であり、図には  $t = 6000$  (s)のときの河床高を赤線で示している。図を見ると、河床の高いところから低いところに流れ込んでいる様子が確認でき、3次元モデルを用いることにより河床近傍の流れを詳細に予測することができると考えられる。次に、砂州の形状特性について比較する。波長については図-1 c)より計算結果として  $2.8$  (m)から  $3.2$  (m)が得られた。実験の波長は  $3.0$  (m)であり、砂州の整数倍を計算領域とし、周期境界条件を用いているため、計算結果は実験結果と概ね同じ波長を示している。実験での最深部を含む断面での初期河床からの変動量、及び図-1 c)において  $x = 2.225$  (m)での変動量の横断分布を図-3 に示す。砂州の波高については計算結果として  $0.025$  (m)が得られた。実験での波高は  $0.032$  (m)であり、計算結果での河岸近傍の洗堀深は実験結果に比べて若干過小評価されている。

## (2) 3次元反砂堆形成過程への適用

数値モデルを井上らが行った反砂堆形成実験<sup>6)</sup>のRun7に適用する。実験は長さ  $25$  (m)、幅  $0.5$  (m)の水路で行われており、実験の流況については、水面波の横断方向列数は通水初期では  $1$ 、通水後期では  $1 \sim 2$  で、初期の水面波がほぼ維持され、波列数の変化はほぼ見られなかったと指摘されている。また、Run7では水面波と河床波は同位相のまま下流に移動していた。

計算条件について説明する。実験水路全体を計算領域に設定するのは計算時間の問題から困

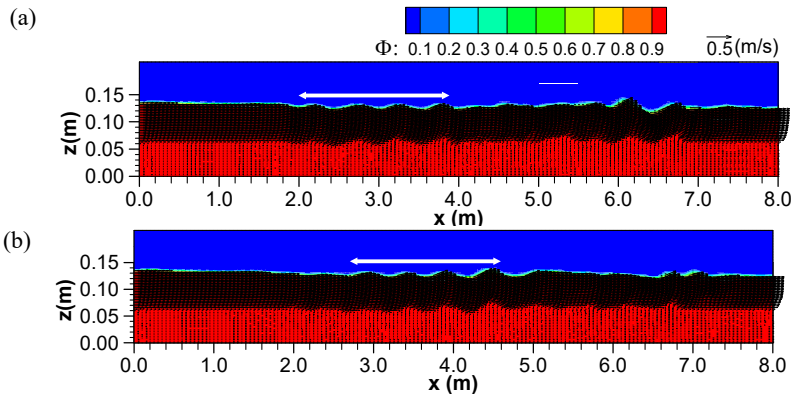


図-5 水路中央断面での流況の時間変化 ((a)  $t = 35$  s, (b)  $t = 40$  s)

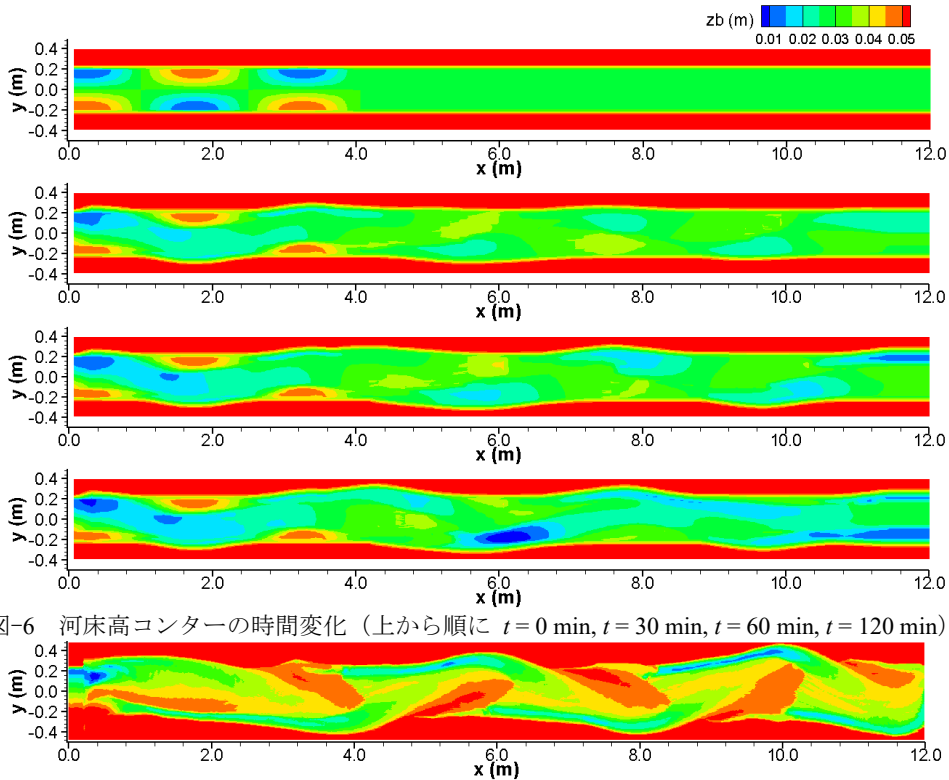


図-6 河床高コンターの時間変化 (上から順に  $t = 0$  min,  $t = 30$  min,  $t = 60$  min,  $t = 120$  min)

図-7 通水後の河床高コンターの実験結果

難であることから、ここでは全長 8m を計算領域の対象とする。計算領域の上下流端から一定区間を固定床とし、その間を移動床区間に設定してその境界で流れ場に応じた平衡流砂量を与えた。境界条件として上流で流量と水位を与え、下流端で勾配 0 の条件を課した。

図-4 は Run7 における河床高コンターの時間変化を示したものである。図をみると、時間の経過とともに 3 次元的反砂堆が形成しており、河床高の高いところがクレストであると考えられる。反砂堆の横断方向波列数は 1~2 程度であることが確認できる。図-5 に Run7 における水路中央断面での流況の時間変化を示す。水面波の頂部が連なっている矢印で示した区間を注目すると、水面波と河床波が同位相のまま下流方向へ移動している様子が確認できる。本数値解析モデルが流下反砂堆を再現できた理由として、浸透流の影響を考慮したことが考えられる。浸透流の影響を考慮することで流速の遅い浸透流が河床面を通過し、クレスト下流で表面流と一緒に流れるため、クレストからトラフにかけて河床近傍の流速が遅くなり、結果としてクレスト背後で土砂が堆積する様子を再現できたからではないかと考えている。また、形状特性について比較したところ、計算結果における水面波と河床波の波長はほぼ一致しており、その波長は実験結果で観測された波長と概ね一致した。一方で、計算結果における水面波の波高は実験結果を大きく下回っている。この点については今後の検討課題としたい。

### (3) 蛇行流路形成過程への適用

数値モデルを蛇行流路形成過程へ適用する。まず実験条件について説明する。長さ 12(m)、幅 1.0(m)、勾配 1/200 の水路に厚さ 0.08(m) の砂を敷き詰め、底部 0.40(m)、上部 0.52(m)、深さ 0.03(m) の台形断面を掘削し、底部の厚さが 0.05(m) となるようにした。その後、低水路部分の上流端より 3.95(m) 区間においては、砂州波長 3.0(m)、砂州波高 0.04(m) の砂州形状を初期の起伏として与え、成形した。用いた河床材料は粒径 0.51(mm) の 5 号珪砂であり、流量は 0.002(m<sup>3</sup>/s)

である。

図-6 に計算結果における  $t=0\sim 120$  (min)までの河床高コンターの時間変化を示す。  $t=30$  (min)の図をみると、初期砂州形状のトラフである  $x=1.75$  (m)右岸、および  $x=3.25$  (m)左岸において河岸侵食が始まるとともに、初期において平坦河床であった下流側では砂州の形成が見られる。その後、 $t=60, 120$  (min)と時間が進むにつれ、上流側の初期砂州形状区間ではトラフにおいて河床の洗堀と河岸侵食が進み、流路の蛇行が大きくなることで、側岸侵食の位置が若干下流に移動する。一方、その下流の平坦河床区間では、 $x=6.0$  (m)右岸、 $x=8.0$  (m)左岸、 $x=10.0$  (m)右岸と交互に河岸侵食が進み、蛇行流路が形成していく様子が確認できる。ただし、その側岸侵食が生じている位置は、ほぼ移動していないことがわかる。実験通水後の河床高コンターを図-7 に示す。実験では初期に成形した砂州のクレストから土砂が下流側に流され、河岸侵食が進み、流路の蛇行が進んでいるとともに、対岸に向けて砂州の形成が見られる。一方、計算結果では、初期砂州形状のクレストから土砂が下流に流されず、トラフの位置で河岸侵食が進行してしまったため、蛇行の頂点が移動せず、結果として蛇行振幅の大きくなる位置を再現できていない。その理由として、実験では対岸側へ斜めに伸びている砂州が確認できるのに対し、計算結果では計算格子が大きすぎたため、流砂量の分布が捉えられず砂州の形成が再現できなかったからではないかと思われる。砂州の形成が再現できなかったことで、蛇行流が表現できず、結果として蛇行振幅が大きくなる位置も動かなかったものと考えられる。この点については今後の検討課題としたい。

#### 参考文献

- 1) 長田信寿, 細田 尚, 村本嘉雄 : 河岸侵食を伴う河道変動の特性とその数値解析法に関する研究, 土木学会論文集, No.621/II-47, pp.23-39, 1999.
- 2) Asahi, K., Shimizu, Y., Nelson, J. and Parker, G.: Numerical simulation of river meandering with self-evolving banks, *Journal of Geophysical Research: Earth surface*, Vol.118, pp.2208–2229, 2013.
- 3) Onda, S., Hosoda, T., Jacimović, N. and Kimura, I.: Numerical modelling of simultaneous overtopping and seepage flows with application to dike breaching, *Journal of Hydraulic Research*, Vol.57, No.1, pp.13-25, 2019.
- 4) Kovacs, A. and Parker, G.: A new vectorial bedload formulation and its application to the time evolution of straight river channels, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.267, pp.153-183, 1994.
- 5) 長谷川和義 : 沖積蛇行の平面および河床形状と流れに関する水理学的研, 北海道大学学位論文, 1983.
- 6) 井上卓也, 長谷川和義, 渡部靖憲, 船木淳悟 : 三次元的な反砂堆上の水面波に関する実験的研究, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.71, No.2, pp.I\_739-I\_746, 2015.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 音田慎一郎, 安庭正晴, 細田 尚	4. 巻 Vol.76, No.2
2. 論文標題 河岸侵食を伴う流路変動過程に関する3次元数値モデルの適用性について	5. 発行年 2020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_1231-I_1236
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 Onda, S., Inaba, R. & Hosoda, T.	4. 巻 22
2. 論文標題 NUMERICAL COMPUTATION OF ANTIDUNE MIGRATION USING 3D FLOW MODEL	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 22nd IAHR-APD Congress 2020	6. 最初と最後の頁 1-3-4
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 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 音田慎一郎, 稲葉良也, 細田 尚	4. 巻 Vol.75, No.2
2. 論文標題 3次元反砂堆の形成過程に関する数値シミュレーション	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_1003 ~ I_1008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.75.2_I_1003	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 音田慎一郎, 安庭正晴, 細田 尚	4. 巻 Vol.74, No.5
2. 論文標題 交互砂州形成と河岸侵食を伴う流路変動に関する3次元数値シミュレーション	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_991 ~ I_996
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.74.5_I_991	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 稲葉良也, 音田慎一郎, 細田 尚
2. 発表標題 反砂堆形成に関する 3 次元数値シミュレーション
3. 学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 音田慎一郎, 安庭正晴, 細田 尚
2. 発表標題 側岸侵食を伴う蛇行流路形成過程に関する数値シミュレーション
3. 学会等名 第33回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安庭正晴, 音田慎一郎, 細田 尚
2. 発表標題 3次元流れ解析モデルを用いた交互砂州形成の数値シミュレーション
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 栗田祥太郎, 音田慎一郎, 細田 尚
2. 発表標題 一般座標系での密度関数法による連続蛇行流れの数値シミュレーション
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 音田慎一郎, 安庭正晴, 細田 尚
2. 発表標題 河岸侵食を伴う流路変動過程に関する数値シミュレーション
3. 学会等名 第32 回数値流体力学シンポジウム
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

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