

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04611

研究課題名(和文) 堤防天端の凹凸の周期性を考慮したガリー侵食特性の解明

研究課題名(英文) Elucidation of gully erosion characteristics considering the periodicity of unevenness on embankment crest

研究代表者

八木澤 順治 (Yagisawa, Junji)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：70549998

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)：本研究は、堤防越流初期に生じるガリー侵食の特性を、越流水深、堤防天端の縦断的な凹凸の周期性、裏法勾配と関連付けることで、早期に破堤に繋がるリスクの高い箇所を明らかにすることを目的とした。実験および数値解析の結果、越流外力が同程度でも、ガリー侵食の規模(侵食深)や隣り合うガリーの間隔が短くなる、すなわち堤体欠損が助長される天端凹凸波長があることを明らかにした。このことは、越流危険箇所の天端凹凸波長を把握することで、早期の破堤リスクが高い弱点箇所の把握に有用であることを示唆している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来堤防越流を伴う侵食に関する研究は、堤防形状を理想化した状態での評価に留まる研究が多い。本研究では、堤防天端に生じる縦断的な凹凸を考慮した上で、生じるガリー侵食の特性を把握できるため、その学術的意義は高い。本研究で得られた知見は、現存する堤防の越流危険箇所に対して天端の凹凸の状況を把握することで、堤防天端の効率的な補修計画に大きく貢献できると期待され、本研究の工学的、社会的意義は非常に高い。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to clarify the high-risk points leading to the levee breakage at an early stage, considering the overflow water depth, the periodicity of the longitudinal unevenness of the top of the levee, and the difference in the back slope. As a result of experiments and numerical analysis, it was clarified that there is a peak uneven wavelength in which the scale of gully erosion (erosion depth) and the distance between adjacent gully are shortened even if the overflow conditions are the same. This suggests that it is useful to grasp the weak points where the risk of early levee breakage is high by grasping the wavelength of the top unevenness at the points where the risk of overflow is high.

研究分野：水工水理学

キーワード：河川堤防 越流 ガリー侵食 堤防天端の凹凸の周期性

## 1. 研究開始当初の背景

近年、我が国では破堤を伴う洪水氾濫被害が多発している。我が国における堤防の破堤原因としては越流によるものが約 7-8 割を占めており、越流時における堤体の侵食過程を把握することは対策を考える上で非常に重要である。研究代表者は 2015 年関東・東北豪雨災害の調査団の一員として河川堤防被害を調査し、鬼怒川本川の破堤地点のみならず、周辺支川において、小規模な越流は生じたものの破堤には至らなかった箇所も数多く調査している。こうした越流箇所では、堤防裏法面に周期的なガリー侵食が生じることが観測されている。越流により生じる裏法面のガリー侵食は、特に越流初期の裏法面の侵食地形を決定づけるとともに、侵食箇所への流れが集中することで、その後の堤体侵食過程や破堤までの時間、すなわち堤防の粘り強さにも大きな影響を与えることが予想される。

本研究で対象とする、堤防のような一様斜面上に形成されるガリー侵食に関連する研究としては、既往研究<sup>1)</sup>において一様斜面上に形成されるガリー侵食を実験的・理論的に検討されており、水深の 1000 倍程度の周期でガリー侵食が生じることが明らかとなっている。しかし、この研究も含めたガリー侵食に関する多くの検討では、降雨による表面流出を想定しているため、斜面上の水深が非常に浅い(数 mm 程度)場合を対象としており、堤防越流時のように数 cm 程度のオーダーの異なる大きな越流水深に対して生じるガリー侵食の特性に関しては不明な点が多い。本研究では、この点に関して先行的に越流水深を変化させた堤防模型実験を実施し、越流水深の増加によって形成されるガリー侵食の周期(隣合うガリー同士の距離)が既往研究と比べて大幅に短くなることを明らかにしている。このことは、越流初期に生じた隣り合うガリー侵食同士が結合しやすく、より大きな侵食を生じることで、破堤までの時間を大幅に短くさせる可能性が高まることを意味している。また、ガリー侵食に関する既往研究の多くは、平坦床から一様斜面へ表面流を流す形が多い。しかしながら、前述の 2015 年関東・東北豪雨災害の調査より、堤防天端には周期的な凹凸が形成されていることを確認している。こうした箇所で越流が生じた場合、縦断的に異なる越流水深となり、そのような状況下で形成されるガリー侵食の特性(発生周期、侵食規模)は不明な点が多い。

上記の背景のもと、「実際の堤防天端で見られる凹凸の周期性」といった、既往研究とは異なる視点でガリー侵食の形成特性を把握することは、越流による破堤危険箇所の把握のみならず、堤防(天端)の維持管理、補修計画の効率化の観点から極めて重要であるという着想に至った。

## 2. 研究の目的

本研究では、越流初期に生じるガリー侵食の特性を、越流水深(洪水外力)、堤防天端の縦断的な凹凸の周期性と関連付けることで、越流後、早期に破堤に繋がるリスクの高い箇所を明らかにすることを目的とする。これまで堤防越流を伴う侵食に関する研究は、模型実験および数値計算においても、堤防形状を理想化した状態での評価に留まる研究が多い。本研究では、堤防天端に生じる縦断的な凹凸を考慮した上で、生じるガリー侵食の特性を把握できるため、その学術的意義は高い。本研究で得られる知見は、現存する堤防の越流危険箇所に対して天端の凹凸の状況を把握することで、堤防天端の効率的な補修計画に大きく貢献できると期待され、本研究の工学的、社会的意義は非常に高い。

## 3. 研究の方法

研究期間の 3 年間において、主に、1: 堤防天端の凹凸波長が裏法尻周辺の落堀特性に与える影響の把握のための数値解析的検討、2: 堤防天端の凹凸波長がガリー侵食に及ぼす影響の把握のための実験および研究期間中に生じた 2019 年東日本台風による現地スケールでのガリー侵食の形成特性との比較、を実施した。以下に上記 2 点の研究手法の概略を示す。

### (1) 堤防天端の凹凸波長が裏法尻周辺の落堀特性に与える影響把握に関する数値解析的検討

3 次元流体解析には、オープンソースコード群 OpenFOAM 内の標準ソルバーの 1 つである interFoam を用いる。基礎方程式は、以下に示す連続式(1)と非圧縮性流体の Navir-Stokes 方程式(2)である。

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} = \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p^* + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}_s \quad (2)$$

ここで、 $\nabla$ は 3 次元領域におけるベクトル微分演算子、 $\mathbf{U}$ は流速ベクトル、 $\rho$ は水の密度、 $p^*$ は疑似動圧、 $\boldsymbol{\tau}$ は粘性応力テンソル、 $\mathbf{g}$ は重力加速度ベクトル、 $\mathbf{f}_s$ は表面張力に相当する体積力である。解析モデルの堤防越流現象に対する妥当性は、既往研究の堤防越流実験<sup>2)</sup>を再現することで確認した。侵食解析には中川らによって提示された pick-uprate  $p_s$ に基づく推定式<sup>3)</sup>から単位時間あたりの河床高変動量を算出し、その量に応じてメッシュを变形させた。

計算は天端に周期的凹凸を設置した水理模型実験と同条件で図-1のように計算領域を定めた。越流幅を 80cm、天端の周期的な凹凸は全振幅を 1.0cm とするよう固定、波長は 8, 16, 24cm

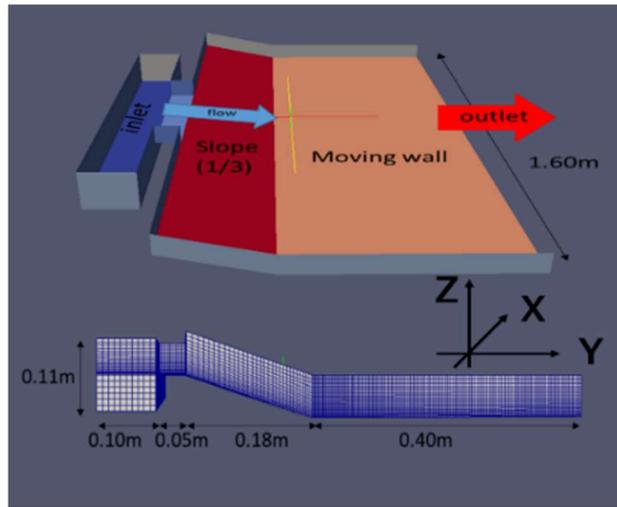


図-1 堤体モデル概要

表-1 解析実施ケースと比較実験ケースの有無

越流幅(cm)	80						160						
凹凸波長(cm)	水平	8.0	16	24	30	40	水平	16	24	30	40	60	80
実験の有無	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×

の3ケースに加え、天端が水平なケースも含めて計4ケース実施する。プール底面に境界条件として与える流量は、天端が水平なケースで表法肩水深が2.0cmとなるように設定し、天端に凹凸があるケースにおいては、天端が水平なケースと等しい流量を与えた。また、実験では検討が難しい条件として、表-1に示すように越流幅と天端凹凸波長が実験よりも長いケースを実施し、侵食を促す凹凸の特性を明らかにする。なお侵食は初期形状が形成されるのと同傾向で発達していくと仮定をし、計算時間は8秒行い、初期の侵食形状との比較で検討した。

## (2) 堤防天端の凹凸波長がガリー侵食に及ぼす影響に関する越流侵食実験

長さ18m、幅2.7m、高さ0.9mの水路に図-2に示すようなスケールの堤防モデルを設置した移動床実験を実施した。実験では、まず、長さ3.1m、厚さ0.2mで基盤層を作成し、その上に、同様の材料で表、裏勾配1/2、長さ2.12m、高さ0.5mの堤防モデルを粘土(荒木田土)で締固め度約90%になるように設置した。その後、裏法面および裏法尻以降に細粒分質礫質砂を敷き、ハンドタンパーを用いて10cm層厚ごとに転圧し、締固め度約70%として一様な厚さ(20cm)で設置した。今回使用した細粒分礫質砂は、礫分21%、砂分52%、シルト・粘土分で構成される細粒分が26.2%であり、平均粒径、最大粒径がそれぞれ0.65mm、19mmの材料である。なお、締固めが不均質となると土壤材料の移動限界が変化するため、全ケースにおいて、締固め後に裏法面上の水路中央で流下方向に3点と、裏法尻(水路横断方向中央)の1点、計4点でコアサンプリングし、締固め度を計測した。全サンプリングで多少ばらつきはあるものの、65.9-71.4%であったことから、場所による締固め度の差は小さいものとした。

図-2に示す天端モデル設置箇所には、異なる波長を有するサインカーブ状の凹凸モデルを設置した。凹凸モデルは3Dプリンター(X-MAX:QIDI社)により再現した。凹凸の波長は、20cm、40cm、80cmの3ケースに、水平なケースも加えた4ケースを実施した。振幅は1.0cmと一定値とした。また、越流水深は水平ケースで2.5cmとなるよう流量を調整し、他のケースにおいても同一流量で実施した。

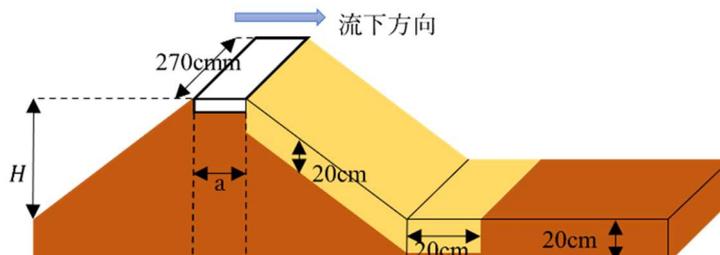


図-2 堤防モデル H:堤体高さ,a:流下方向長さ

全ての実験において越流時間は2分間とし、通水を止めたあと地盤高を測定した。測定区間は裏法尻より上流方向50cm、下流方向20cmの計70cm区間とし、横断方向に関しては、左右岸側壁から35cmを除いた中心2.0mの範囲の地盤高を測定した。測定には2Dレーザー変位計(LJ-V700:KEYENCE社)を用い、横断方向0.4mm、流下方向5cm間隔で計測した。得られた地盤高は横断方向に3cmで平均化し、横断方向に3cm、流下方向に5cmのグリッドを生成し、地盤高分布を取得した。なお、実験前に上記と同様の方法であらかじめ取得した初期地盤高から、実験後の地盤高を差し引くことで、侵食深分布を把握した。また、本研究では法尻から発達し1cm以上の侵食量が見られたものをガリーと判断し、各ケースで生じたガリー侵食の深さ( $S_d$ )、各ガリーの形成間隔( $l$ )を計測した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 数値解析に基づく天端凹凸波長が裏法尻周辺の落堀特性に与える影響

###### ① 侵食高の比較

解析の結果、**図-3**のように横断的な周期的落堀の発生が見られ、実験と侵食パターンの傾向が一致することを確認した。天端の周期的な凹凸による侵食への影響を評価するため、天端が水平なケースの最大侵食深に対する凹凸有ケースの最大侵食深の割合(最大侵食深増加率)と凹凸波長の関係を**図-4**に示す。実験値と解析値を比較すると凹凸波長24cmまでは凹凸波長が大きくなるほど最大侵食深が大きくなる傾向が一致する。さらに波長が長くなると、越流幅80cmでは波長24cmから、越流幅160cmでは波長30cmから最大侵食深が減少していく。つまり、越流幅あるいは、越流幅に対する天端凹凸の波数に関わらず、本研究の条件である振幅1.0cm、水深2.0cmの条件においては波長約24cm-30cm程度の天端凹凸が、最も落堀の初期形成の規模が大きくなることが確認された。

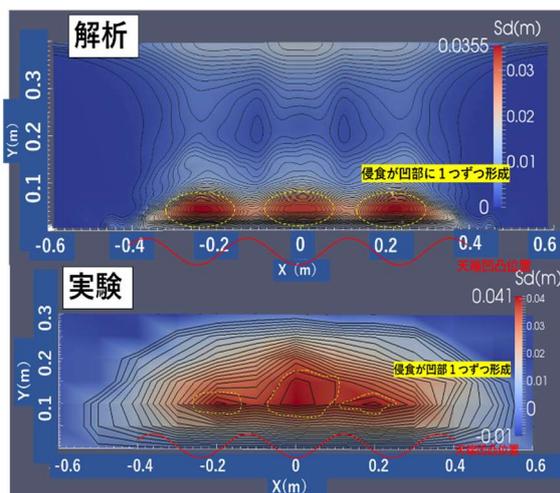


図-3 越流幅80cm・波長24cm ケース侵食高の比較

###### ② 流体計算と侵食の関係

前節で示した、同じ水理条件下においても最大侵食深が極大値を示すメカニズムを明らかとするため、60秒間の固定床の流体解析を行い、流れ場の時間平均値と侵食解析の結果の比較から考察を行う。

**図-5**は天端中央における計算グリッドごとの流量を鉛直方向に積分した流量の横断分布をケースごとに比較して示した図である。代表して越流幅が80cmで凹凸波長8cm, 16cm, 24cmの結果を示す。天端凹凸波長が大きくなるほど凹部の頂点に流量が多くなるのがわかる。つまり、天端凹凸波長8cmから24cmの範囲では波長が長くなるほど、越流流れが天端上で凹の位置に集中することで、底面せん断力が増加するため、最大侵食深が増加すると考えられる。

波長が更に長いケースにおいては凹部の頂点の流量に変化がなくなることが確認された。よって、波長が30cmを超えると上流から侵食位置に供給される流量には変化がないが、波長が長くなるほど横断方向の侵食勾配が緩やかになるためせん断力の横断方向成分が減少し、最大侵食深が小さくなると考えられる。

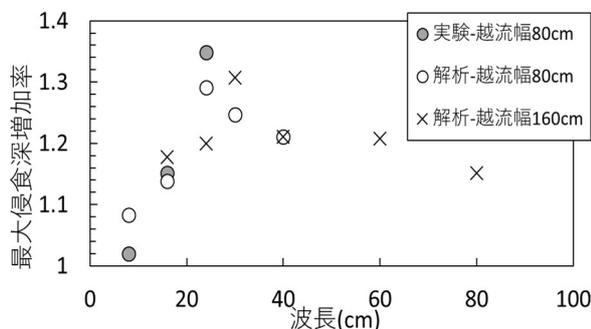


図-4 最大侵食深増加率と天端凹凸波長の関係

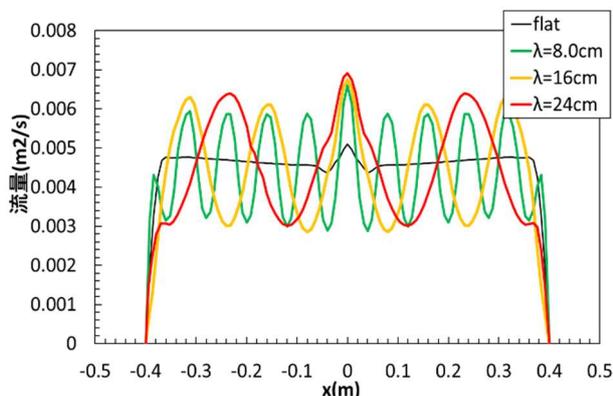


図-5 越流幅80cmにおける天端中央流量の横断分布

###### (2) 室内実験に基づく天端の凹凸波長がガリー侵食に及ぼす影響および実現象との比較

**図-6**に天端凹凸の無次元波長 $\lambda/H$ に対する、無次元ガリー深さ $S_d/H$ 、無次元ガリー間隔 $l/\lambda$ との関係を示す。**図-6(a)**より、 $S_d/H$ はどの $\lambda/H$ においても裏法面勾配が小さくなるにつれて侵食量が小さくなり、裏法面、裏法尻周辺での流速が減少することでせん断力が低下したことが考えら

れる。また、いずれの勾配においても  $\lambda/H=1.6$  程度で  $S_d/H$  が最大となる傾向が確認された。本実験は 1/10 スケールで行っており、現地換算した天端凹凸波長は 8m, 波数  $k=0.79$  となる。この波数の値は、図-7 に示すように、泉<sup>4)</sup>によって得られた、法面に与えられた擾乱の成長率が最大になる  $k$  の値とほぼ一致することが確認された。

図-6(b)より、 $l/\lambda$  に関しては勾配によって大きな差は見られなかったものの、 $\lambda/H$  の増加に伴って減少する傾向が確認できる。また、 $1 < \lambda/H < 1.5$  において  $l/\lambda$  の値が 1 を上回るか下回るかの境界になっていることが分かる。 $l/\lambda$  の値が 1 より小さいということは、与えた天端の凹凸波長内に、複数のガリー侵食が発生することを意味する。すなわち、隣り合うガリー同士の間隔が近づくことで、より大きな侵食となる可能性が高いことを示唆する重要な指標である。 $l/\lambda$  についても  $S_d/H$  と同様に、泉<sup>4)</sup>の擾乱の成長率の傾向と比較する。図-3 に示すように  $k=1$  付近で、擾乱の成長率は正から負に転じていることがわかる。

成長率の正負は、擾乱が成長しガリー侵食となるか、成長せずに減衰することとし、ガリー形成の有無を意味する。本研究においては、越流初期に天端凹凸によって形成された微かな侵食が発達しやすいか否かに対応する。そこで、本検討で  $l/\lambda$  が 1 前後となった際の波長(40-80cm)を実スケール換算して  $k$  の値を算出すると、 $0.8 < k < 1.5$  であり、概ね擾乱の成長率の正負が変わる波数と一致していることがわかる。以上のことは、越流規模が同じでも、裏法面に形成されるガリー侵食の発達を促進させる天端凹凸波長があることを示唆している。

【参考文献】 1) 泉, Parker(1995), 土木学会論文集, No. 521/II-32, 79-91., 2) 奥田(2014), 京都大学博士論文, 3) 中川ら(1985), 第 29 回水理講演会論文集, p.561-566, 4) 泉(2003), 応用力学論文集 Vol.6, pp959-966.

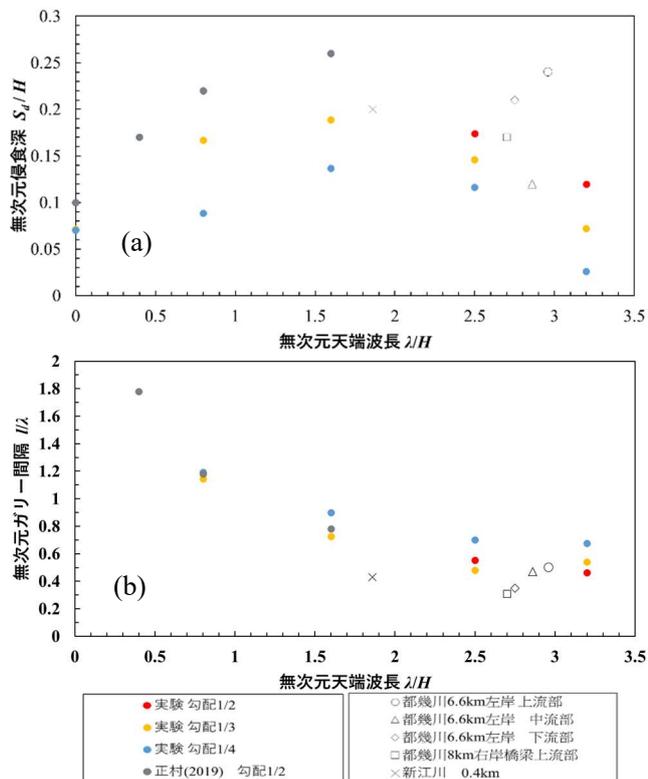


図-6 天端の無次元波長  $\lambda/H$  に応じた侵食深, ガリー間隔の変化(a) 無次元侵食深  $S_d/H$ , (b) 無次元ガリー間隔  $l/\lambda$

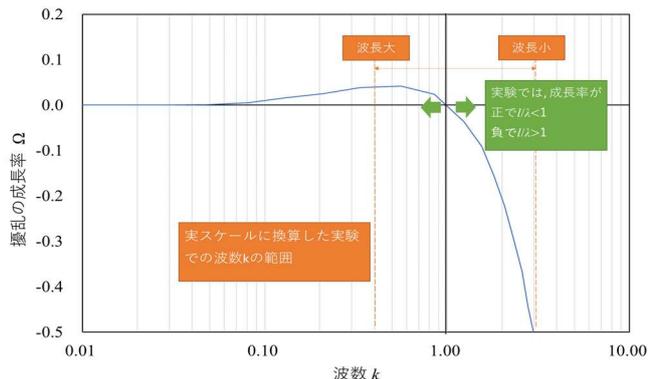


図-7 既往研究<sup>4)</sup>における波数  $k$  と擾乱の成長率  $\Omega$  の関係と実験結果との比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3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 西川 咲良・八木澤 順治	4. 巻 76
2. 論文標題 難侵食層が法尻周辺の洗堀に及ぼす影響	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_1165-I_1170
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 Md Masum BILLAH・Junji YAGISAWA	4. 巻 76
2. 論文標題 EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON EFFECT OF INITIAL PHREATIC LINE POSITION INSIDE EARTHEN EMBANKMENT ON HEADCUT MIGRATION DURING OVERTOPPING FLOW	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_565-I_570
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 八木澤順治・正村亮太	4. 巻 26
2. 論文標題 堤防天端の縦断的な凹凸の周期性が越流時の ガリー侵食に及ぼす影響	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 accepted
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2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 西川咲良・八木澤順治
2. 発表標題 堤体材料特性に応じた粘性土の限界せん断応力の予測式の提案
3. 学会等名 第47回土木学会関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Md Masum Billah, Junji Yagisawa
2. 発表標題 Experimental study on local scour at embankment toe due to overtopping flow
3. 学会等名 JSCE 22nd International Summer Symposium
4. 発表年 2020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