

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K04623

研究課題名（和文）屈撓性河岸保護工としての袋詰玉石工の洪水時の安定性解析とそれを用いた新しい設計法

研究課題名（英文）Numerical investigation on stability of gravel bags in flooding as flexible riverbank protection works and a new design method

研究代表者

福田 朝生（Fukuda, Tomoo）

琉球大学・工学部・准教授

研究者番号：00709694

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）：本研究では、屈撓性を有する袋詰玉石工と水流の相互作用を推定することができる新たな数値解析法を開発した。洪水流により袋詰玉石工が流失した事例を対象に、開発した数値解析法で解析を行った。解析結果は、袋詰玉石工の流失現象を良く説明できることが確認された。さらに、開発した数値解析法を活用することにより、効果的な袋詰玉石工の配置方法と袋詰玉石工の構造を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

袋詰玉石工に作用する水流による流体力や、袋詰玉石工間の相互作用力の推定は容易ではなく、袋詰玉石工の流失事例が後を絶たない。本研究では、水流に対して安定しやすい袋詰玉石工の構造と配置を提案した。さらに、袋詰玉石工と水流の相互作用を解析することができるこれまでにない新しい数値解析法を開発した。開発した数値解析法の活用により、任意の河岸地形や水流の境界条件に対して、効果的な袋詰玉石工の設計が可能になると考えられる。

研究成果の概要（英文）：A new numerical simulation method was developed that is capable of estimating the interaction between flexible gravel bags and flood flows. The developed numerical method was utilized to simulate a case where gravel bags were washed out away by flood flows. The simulation result reproduced well the phenomenon of gravel bags washout. Furthermore, by utilizing the developed numerical method, effective arrangements and structures for gravel bags were proposed.

研究分野：水工学

キーワード：袋詰玉石工 固液混相流解析 構造 配置 屈撓性 河岸保護 流体力 三次元解析

1. 研究開始当初の背景

袋詰玉石とは 20 cm 程度の石礫数トン进行網で包んだものである。袋詰玉石工は、複雑な河岸地形でも施工ができ、河岸侵食を抑制し、また、空隙があるため環境面からも生物の生息場として優れている。しかし、袋詰玉石工は、屈撓性があるため、水理実験による流体力の測定が容易ではなく、さらに、種々の配置の袋詰玉石群の袋詰玉石群相互の作用力などの測定は容易ではない。このようなことが大きな要因となり、洪水流中の袋詰玉石工の力学関係は明確になっておらず、袋詰玉石工の適切な設計法がなく流失してしまう事例が多い (例えば図-1、図-2)。袋詰玉石工の利点を生かした河川管理を行う上で、流失限界状態の把握とこれに基づく効果的な設計・施工法の確立が大きな課題となっている。

2. 研究の目的

本研究では、水流と屈撓性を有する袋詰玉石工の相互作用を推定し得る、数値解析法を構築する。構築した数値解析法を活用し、種々のケースで水流に対する袋詰玉石工の安定性の解析を行い、解析結果を分析し、洪水流に対して安定な効果的な袋詰玉石工の配置や構造を提案する。

3. 研究の方法

研究代表者は、これまでの研究において様々な形の石礫と水流の三次元運動を高精度に解析することができる固液混相モデル (Arbitrary Particle Multiphase: APM) を構築してきた¹⁾。このモデルでは、粒子運動は剛体として Lagrange 的に解析する。そして流体運動は、粒子よりも小さな計算格子を用いて Euler 的に解くことで粒子の形を考慮した流れと粒子の運動を詳細に解析できるものである。このように水流を詳細に解析するため、粒子に作用する流体力は抗力係数などのあいまいな係数を用いることなく、解かれた水流の応力分布から直接求めることができる。この解析モデルは、本研究で対象とする袋詰玉石工の袋の中の石礫と水流の相互作用の解析に極めて適したモデルである。

本研究では、APM 法をベースとし、袋詰玉石の網の紐を小球の連結としてモデル化し、この紐のモデルをつなげて作った網の袋の中に石礫を入れることにより、これまで実現されていない屈撓性をもつ袋詰玉石工と水流の相互作用を適切に考察し設計に供する数値解析法を開発する (図-3 参照)。そして、構築した解析モデルを用いて現地の袋詰玉石工の流失事例を解析し、再現性の確認を通して解析結果の妥当性を調べる。さらに、この数値解析法を活用して、袋詰玉石工の石の投入量や網の構造、また、袋詰玉石工の配置を変化させ、種々の袋詰玉石工の水流中の安定性解析を行う。これにより、袋詰玉石工の移動限界状態を明らかにし、流失しにくい袋詰玉石工の効果的な設計法を提案する。

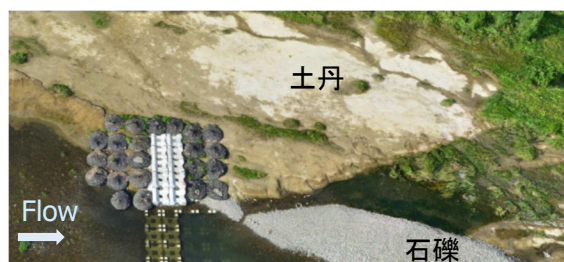
4. 研究成果

(1) 解析モデルの内容

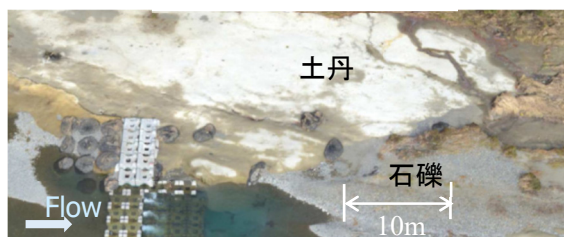
本研究で構築した水流と袋詰玉石工の相互作用を解く数値解析方法を以下で説明する。

① 流体運動の解析法

液相の運動解析では、固相を密度の異なる流体として全体を非圧縮性流れとして解いている。SGS の乱流モデルとして



平成 27 年 8 月 27 日撮影



平成 29 年 11 月 22 日撮

図-1 袋詰玉石工の流失前後の状況 (多摩川 44.7k) (上段：流失前、下段：流失後)

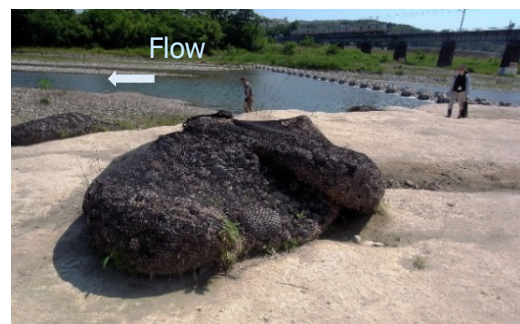


図-2 移動した袋詰玉石工の近景

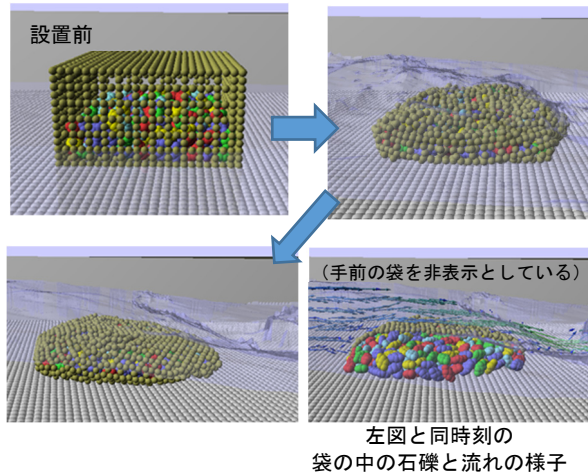


図-3 水路上の袋詰玉石工の安定解析例

Smagorinsky モデルを用い LES として解いている。流体解析における固相との連成方法は、APM¹⁾と同様である。解析法の詳細は文献¹⁾を参照されたい。

② 袋詰玉石工のモデル

本研究で構築した袋詰玉石工のモデルを数値的な水路に設置して安定性を解析した例を図-3に示す。図-3に示すように本研究では小球を連結させて紐状とし、これらを網の様に連結させることで網袋のモデルを構築している。図中の石礫は9つの小球を隙間が無いように連結して作成し、複数の石礫を網モデルの中に入れ、屈撓性のある袋詰玉石の運動を解析できるようにしている。

袋の中に入れる石礫と、袋を構成するそれぞれ小球の運動は、剛体の並進と回転の運動方程式を用いて解析している。粒子に作用する流体力は、液相の運動解析で解かれた混相流体の粒子部分に作用する力を体積積分することで求めている¹⁾。

③ 接触力の算定法

本解析における接触力の算定法は2パターンに分類される(図-4参照)。1パターン目は、網袋の紐を構成する小球が結合相手の紐の小球と接触する場合であり(結合接触と呼ぶ)、2パターン目はそれ以外(通常接触)である。この通常接触には、石礫同士の接触、石礫と紐の小球との接触、結合されていない紐の小球同士の接触が含まれる。これらの2パターンの接触力は、バネ、ダッシュポット、摩擦スライダーを用いて解析している⁴⁾。通常接触は、結合されていない小球間の接触であるため、引張力を作用させない。一方、結合接触では引張力も考慮する。結合接触となる初期の小球は、図-3に示すように互いに1点で接するように配置する。このため法線方向のバネの力は、重なる際は圧縮力、離れる場合には引張力が算定される。袋の紐のしなやかに変形を可能とするため、結合接触では法線方向のバネについては考慮するが、接平面上の方向のバネは考慮していない。

④ 並列計算方法

申請者は、既往の研究において、複雑な地形かつ大規模な計算となる現地河川を対象とした固液混相流解析に適した並列計算方法として、領域を複数の立方体ブロックに分割し、1つまたは複数の立方体ブロックの解析を各プロセスに割り当て、さらにプロセスの負荷を平滑化するように、プロセスとブロックの関係を動的に変化させることのできる並列計算法 Prural Blocks 法(PB法)²⁾を開発している。本研究で構築した袋詰玉石工の解析もこの枠組みの並列計算方法を可能としている。

(2) 現地河岸に設置した袋詰玉石工の洪水流中の安定性解析

多摩川 44.7k 付近を対象フィールドとして構築した解析モデルの適応性検討および、効果的な袋詰玉石工の施工法を検討した。

① 解析ケース

本研究では、図-1に示す JR 八高線多摩川鉄橋直下流の帯工袖部の袋詰玉石工を対象とし袋詰玉石工が流失した平成 29 年 10 洪水相当の外力を与え、2 ケースの袋詰玉石工の安定性解析を実施した。ケース 1 (再現計算と呼ぶ) は、流失する前の袋詰玉石の大きさ、配置で安定性解析を実施した。再現計算では、現地に施工された袋詰玉石と同様に、図-3に示すように1つの大きな袋で石礫を包んだ袋詰玉石のモデルを用いた(大袋モデルと呼ぶ)。大袋モデルの諸元を表-1に示す。大袋モデルに詰めた石礫は 3,700 kg である。この解析から袋詰玉石工の流失に対するモデルの再現性を確認し、また、実際に流失した袋詰玉石の配置の課題を考察した。

ケース 2 (新規案と呼ぶ) は、再現計算の結果を踏まえて、流失しにくいように工夫した新しい袋詰玉石の施工案で安定性解析を行い、施工案の効果を評価した。図-5には、新規案で用いた

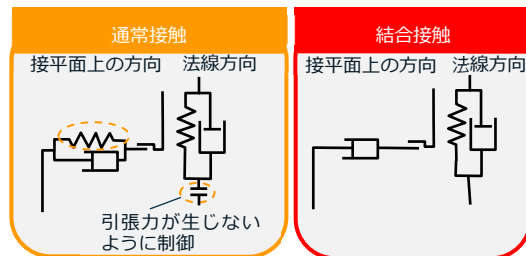
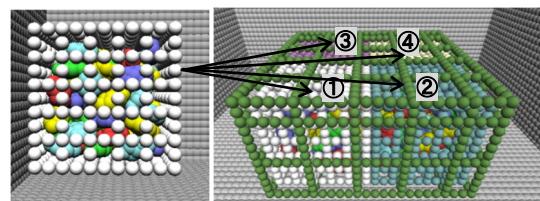
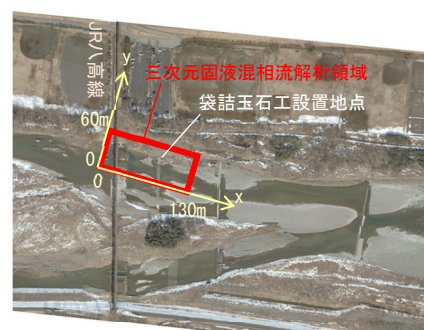


図-4 接触力の算出方法



小袋 大袋
図-5 小分け袋詰玉石工モデル



※z 方向は鉛直上向きである。

図-6 固液混相流解析対象領域および座標系の定義

表-1 袋詰玉石工のモデルの諸元

	単位	大袋 モデル	小分け袋 モデル
石礫径	m	0.2	0.2
石礫密度	kg/m ³	2,650	2,650
袋の小球径	m	0.1	0.1
袋の小球密度	kg/m ³	1,000	1,000
小袋内石礫数	—	—	84
小袋内石礫質量合計	kg	—	931
大袋内石礫数	—	334	336
大袋内石礫質量合計	kg	3,700	3,720

袋詰玉石工のモデル(小分け袋モデルと呼ぶ)を示す。小分け袋モデルの諸元は表-1に示している。小分け袋モデルは、袋の中の石礫の動き(変位)を抑制するため、まず、約1tの石礫を含む小袋を作成し、この小袋4つを1つの大きな袋で包む新しい袋詰玉石工である。

② 解析条件

図-6には三次元固液混相流の解析領域および本解析の座標系の定義を示す。解析領域は縦断方向に130m横断方向には60mである。ALB測量により得られた1mメッシュの地盤高データをもとに0.2mの小球を並べ河床と河岸の地形を構築した。PB法における立方体の計算領域ブロックの1辺の大きさは2mであり、複雑な河床地形に応じて6,082個のブロックを配置して計算領域を設定した。流体計算格子サイズは、計算負荷を考慮し、石礫径よりはやや大きいものの、高さ約1m程度の袋詰玉石工の周囲の流れを説明できるサイズとして0.25mとした。三次元の固液混相流の解析では、境界条件として上下流端に平成29年洪水のピーク水位を与えた。

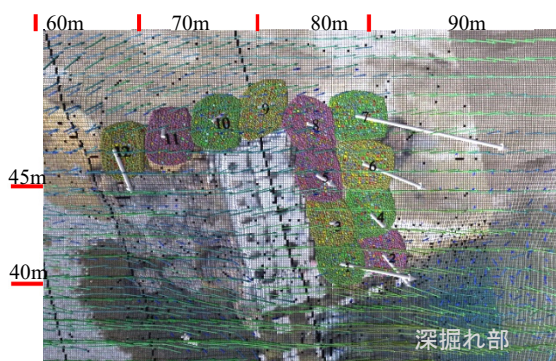
③ 再現計算

再現計算では、袋詰玉石工の移動速度を算出した。一時間当たりの移動距離として白色のベクトルで表示したものを図-7に示す。図-7は帯工袖部の近景であるため、河道線形との位置関係については、図-6も併せて確認されたい。図-7より、帯工の下流部では、1時間当たり10m近くも移動することが推定されており、解析結果は、平成29年洪水で袋詰玉石工が移動した状況を概ね再現できていると考えられる。図-8には、 $y=40\text{m}$ と $y=45\text{m}$ の鉛直平面内の x 方向流速コンター図を示す。帯工を越流する付近では、6m/s近い高速流が発生している。一方で、帯工からおおよそ20m程度下流の河岸では、帯工を越流する局所流の影響は小さくなり、河床付近で流速が3m/s程度まで落ち込んでいることがわかる。当該付近は、図-3(下段)で流失した袋詰玉石工の多くが停止している領域であり、また、河床には石礫の堆積が見られる。現地の状況からも、帯工から20m程度下流まで行くと流速が低くなっていることが示唆されている。

④ 新規案の検討

再現計算結果を踏まえて流失しにくい袋詰玉石工(新規設置案)の設置方針を図-9に示す。再現計算結果より、帯工から20mほど下流では、帯工付近と比較し、流速は大きく減じられている。このため、新規設置案では、帯工直下から約20mほど下流まで袋詰玉石工を連続的に配置した。そして、最下流付近の比較的流速が減じられた位置に設置された袋詰玉石工がアンカー的役割を担い、上流の高流速部の袋詰玉石工を支えることを狙っている。なお、新規案では、49基の袋詰玉石工を用いた。

図-10には、新規案の解析結果の時間当たりの移動距離を示している。この図より、再現計算(図-7参照)の帯工直下($x=85\text{m}$ 付近)で見られた、袋詰玉石工の10mほどの大きな移動は、ほぼ抑制できていることがわかる。一方、新規案では、河岸の斜面部を守るため、斜面部にも袋



※袋詰玉石工の個体の別を示すため、袋詰玉石工の袋の色を、黄色、黄緑、ピンクの3色に分けて表示している。
※白色の太いベクトルは、時間当たりの推定移動距離を示す。

図-7 時間当たりの推定移動距離(再現計算)

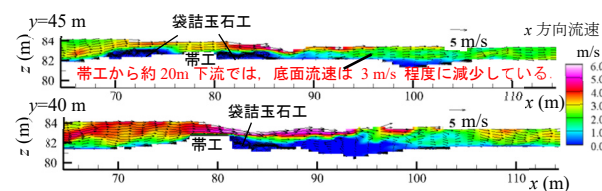


図-8 鉛直平面内の x 方向流速コンター図(再現計算)

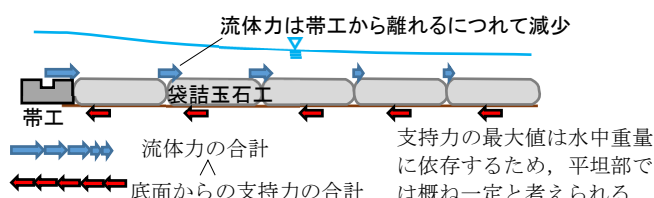
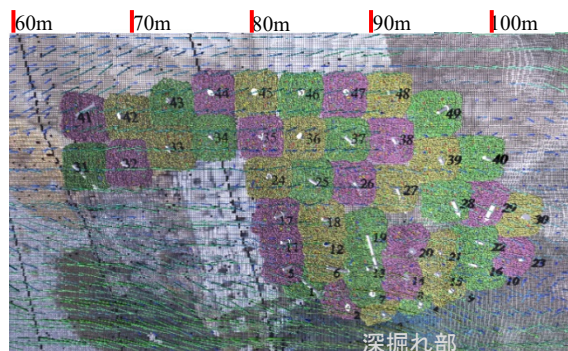


図-9 新規案の設置方針



※袋詰玉石工の個体の別を示すため、袋詰玉石工の袋の色を、黄色、黄緑、ピンクの3色に分けて表示している。
※白色の太いベクトルは、時間当たりの推定移動距離を示す。

図-10 時間当たりの推定移動距離(新規案)

詰玉石を配置したが、配置方法が必ずしも十分ではなく、図-10では斜面部の袋詰玉石は河道中央方向に移動している。

当該部分の移動状況の詳細を示すため、図-11に $x=86\text{m}$ 断面の初期と計算終了時の袋詰玉石の頂部の高さ分布を示す。図-8に示すように帯工を越流する流れは 6m/s 近くになっており、このような高速流を受けて斜面部の袋詰玉石は、洗掘の最深部へずり落ちている。ずり落ちの対策として、第1に図-12に示すように、洗掘の最深部から密に、かつできるだけ鉛直方向に力を伝えやすいように、袋詰玉石を斜面でも水平になるように設置していくことが重要である。また、第2には袋詰玉石それぞれを結び、引張力を発揮できるようにして平坦部の袋詰玉石が斜面部の袋詰玉石のずり落ちを抑制することも効果的と考えられる。

(3) 改良した袋詰玉石工の施工

新規案をベースに4つの小袋を包んだ袋詰玉石工を用いて図-13に示すように、袋詰玉石工を新しく配置した。2019年10月に当該地点では、2017年10月洪水(当該地点ピーク流量 $1,900\text{m}^3/\text{s}$)のピーク流量を大きく上回るピーク流量が約 $4,600\text{m}^3/\text{s}$ の洪水が発生した。しかし、新しく配置された改良型の袋詰玉石工は、一部めくれ上がりはしたものの、流失することなく、大部分が元の形状を保持することができており³⁾、新規案をベースとした施工法は、巨大な外力に対しても安定に機能する構造と配置であることが確認された。

(4) 研究成果のまとめ

本研究では、屈撓性をもつ河岸保護工である袋詰玉石工と水流の相互作用を解析することができる数値解析技術を構築した。これにより、複雑形状河岸における種々の袋詰玉石工の洪水流に対する安定性解析が可能となった。数値解析を活用し、現地の袋詰玉石の流出事例を分析し、さらに、袋詰玉石工の施工方法を考察し、効果的な袋詰玉石工の構造と配置を提案した。検討から得られた、袋詰玉石工の構造と配置に関する主要な技術的知見を以下に示す。

- ・ 従来用いられてきた袋詰玉石工を小分けし大きな袋で包むことによって内部の石の動きを抑制し、安定性を向上させることが重要である。
- ・ 袋詰玉石工の安定のためには、高速流が減速する領域まで連続的に袋詰玉石工を設置することが重要である。
- ・ 斜面部の袋詰玉石工の落ち込み流によるずり落ち対策のため、できるだけ平らな面を水平にし、河道中央の洗掘の最深部から袋詰玉石を十分に配置することが重要である。
- ・ 一体的に流れに抵抗させるため袋詰玉石同士を連結することが重要である。

参考文献

- 1) Tomoo Fukuda, Shoji Fukuoka: Interface-resolved large eddy simulations of hyperconcentrated flows using spheres and gravel particles, *Advances in Water Resources*, Vol.129, pp.297-310, 2019
- 2) 福田 朝生, 福岡 捷二: 複雑境界形状の大規模固液混相流解析のための動的負荷分散を考慮した並列計算法, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.74, No.5, pp.I_703-I_708, 2018.
- 3) 佐久間 清和, 澁谷 慎一, 福岡 捷二: 2019年台風19号洪水に対する「改良型袋詰玉石工」の洗掘防止効果, 河川技術論文集, 26巻, p.413-418, 2020.

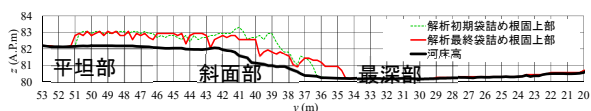


図-11 横断面内の袋詰玉石工の移動の様子 ($x=86\text{m}$) (新規案)

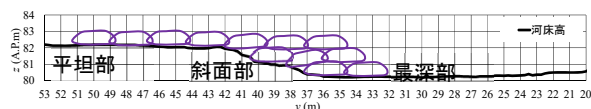


図-12 洗掘部へのずり落ちに対応した配置案 ($x=86\text{m}$)

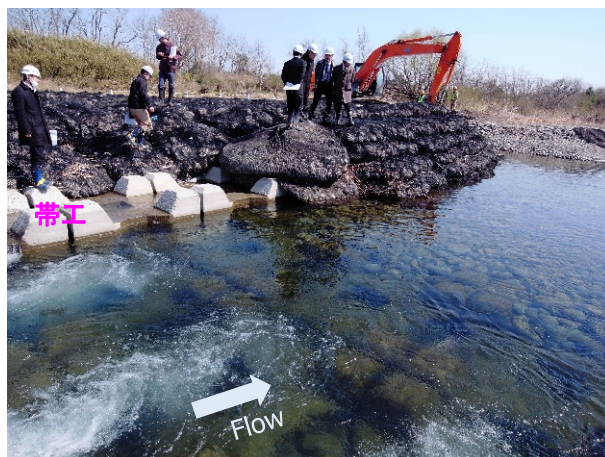


図-13 新たに設置した帯工袖部の袋詰玉石工の全景

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 福田朝生	4. 巻 41巻第3号
2. 論文標題 Interface-Resolved Simulationによる水土砂災害対策の検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ながれ	6. 最初と最後の頁 184-191
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 山口栄治, 福田朝生	4. 巻 78
2. 論文標題 固体群と流体の三次元連成数値シミュレーションを用いた単一粒径粒子群の土砂流の乱れ構造に関する研究	5. 発行年 2022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_895-I_900
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2208/jscejhe.78.2_I_895	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 福田朝生, 福岡捷二	4. 巻 76巻
2. 論文標題 凸型の鋼製フレームを持つ砂防堰堤による流木を含む高精度数値解析法を用いた土石流捕捉効果の検討	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 _1177-1182
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 福田朝生, 澁谷慎一, 福岡捷二	4. 巻 第25巻
2. 論文標題 改良された袋詰玉石工の洪水時の安定性評価技術の開発とこれを活用した袋詰玉石工の構造・配置の技術的検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 河川技術論文集	6. 最初と最後の頁 pp.463-468
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 Tomoo Fukuda, Shoji Fukuoka	4. 巻 4th
2. 論文標題 Interface-resolved large eddy simulation of a field debris flow with large stones and woods	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The 4th symposium on two-phase modeling for sediment dynamics in geophysical flows	6. 最初と最後の頁 -
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 -

〔学会発表〕 計2件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 福田朝生
2. 発表標題 固体と流体の3次元連成数値解析の最先端とその応用
3. 学会等名 第34回日本沿岸域学会全国大会シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福田朝生, 澁谷慎一, 福岡捷二
2. 発表標題 帯工袖部の侵食対策としての袋詰玉石工の構造・配置検討
3. 学会等名 第74回土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

琉球大学工学部社会基盤デザインコース水圏環境工学研究室ホームページ
<http://www.hydraul.skr.u-ryukyu.ac.jp/>
 中央大学研究開発機構福岡ユニットホームページ
<https://sfuku.r.chuo-u.ac.jp/top/sfuku/>

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
---------	---------