

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：15401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K21995

研究課題名（和文）任意形状の混合粒径土砂の水流中の運動を対象としたオイラー型解析法の開発とその応用

研究課題名（英文）Eulerian calculation method for motion of the sediment particles with grain size distribution in water flows

研究代表者

内田 龍彦（Uchida, Tatsuhiko）

広島大学・先進理工系科学研究科（工）・准教授

研究者番号：00379900

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：砂礫、石礫河川において河床を構成する幅広い粒度分布に対して、流れによる河床変動解析を行う場合、空隙率とコントロールボリューム厚さをどうするかの問題が解決されておらず、これらが長く混合粒径河床変動解析のネックになっている。本研究では、空間平均された粒子運動を記述できるオイラー的解析手法に着目し、新たな混合粒径土砂輸送解析モデルを開発することを目的としている。各粒径粒子が利用できる空隙率（利用可能空隙率）の概念を提案し、それをを用いたオイラー型混合粒径堆積モデルを開発した。また、水理実験により、分級による土砂体積の変化が生じることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

DEMと高度な三次元乱流解析法をカップリングした数値解析は新しい土砂水理の発展に期待が大きいですが、従来の混合粒径流砂モデルとの関係は単純な場に留まっている。本研究では、これまでの枠組みに捉われず、混合粒径粒子群に対して、各粒径相ごとに連続式と運動方程式をオイラー型で記述する独創的な解析法に挑戦するものである。混合粒径土砂の流れによる流送過程と地形変化の解析法を開発することは治水、環境両面で河川管理において重要であるだけでなく、土石流、山地土砂流出、堤防強度、浸透などの評価においても重要である。さらに、水と混合粒径の粒状体力学は、機械工学、化学工学、粉体工学においても重要な研究テーマである。

研究成果の概要（英文）：In the case of flow-induced riverbed elevation analysis with a wide range of grain size distributions, the problems of porosity and control volume thickness have not been solved, and these have long been a bottleneck in the analysis. This study aims to develop a new analytical model for mixed-size sediment transport, focusing on the Eulerian analysis method, which can describe the available porosity concept. The concept is proposed and an Eulerian mixed-size sediment transport model is developed using this concept. Hydraulic experiments have shown that changes in sediment volume occur as a result of classification.

研究分野：水工学

キーワード：混合粒径 空隙率 交換層 オイラー型モデル 利用可能空隙率 土砂堆積膨張 土砂輸送 分級

### 1. 研究開始当初の背景

粒度分布をもつ混合粒径河床の土砂輸送解析には、平野によって提案された交換層の概念[1]が世界的に広く応用されている[2][3]。交換層は混合粒径河床の粒度分布と河床変動量を求めるために、河床表層付近の粒度分布が混合する層があるとして概念的に導入された、河床表層のコントロールボリュームである。しかし、未だ空隙率と交換層厚の問題が解決されておらず、これらが長く混合粒径土砂問題の発展を停滞させてきた。前者について、交換層の考えは、空隙率を一定にすることに限ったものではないが、これまで空隙率を適切に評価する手法は確立されていない課題がある。河床の空隙率は流れによる分級効果によって変化するために、斜面崩壊による土砂供給、ダム、河道の土砂堆砂、海域への土砂流出を考える際には、従来の河床高(河床体積)を保存量のように扱うことは適切ではなく、土砂堆積過程と空隙率の変化を考慮することが必要である。また、空隙率の変化が考慮できない解析法では、土砂管理において重要な礫床河川の砂分の移動などの基本的な課題に対してさえ解析が困難となっている。後者の交換層厚は粒度分布の計算結果を支配する重要なパラメータであるが、最大粒径などの値から経験的に定められる以外に決定的な評価手法は無い。そもそも交換層はコントロールボリュームを考えるうえで必須とされてきたが、交換層が何を意味しているのかは研究者によって分かれている。即ち、交換層の物理的意味が明確でないことが空隙率と交換層厚の評価の根本的な原因と考えられる。一方、個別の粒子をラグランジュ的に解析する個別要素法(DEM)では、粒子間の相互作用を直接的に解析するために、交換層厚、空隙率といった問題が表れず、従来の流砂の未解決問題の解決のツールとして着目されている。しかし、無数の土砂粒子を個別で取り扱うことは計算能力の点から非現実的であるうえに、粒径範囲にも制限があり、DEMの適用は比較的一様に近い粒度分布をもつ狭域かつ単純な条件への適用に限られる。しかし、DEMにおいては交換層の問題が表れないことは重要な点である。空隙率と交換層厚の問題は混合粒径粒子の連続式に関わる微分方程式の問題であり、粒子法は離散化手法の一種であることから、領域積分可能なオイラー型モデルでも空隙率や交換層の問題を解決することはできるべきであろう。即ち、DEMなどの粒子法は方程式のラグランジュ的な離散化手法であり、粒子群の平均的な運動はオイラー的手法でも同様に解けると考えられる。これまでの流体解析における粒子法とオイラー的手法の比較からも明らかのように、粒子法は移流項を数値拡散無く解くことが出来るが、交換層厚、空隙率などの連続式(圧力)や応力のつり合い条件などは格子を用いるオイラー型離散化の方が適していると考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、広い粒度分布と任意の形状をもつ粒子群で構成される土砂と水流の相互作用の新たな力学問題を構築するものである。本研究では、まず従来の混合粒径土砂問題を根本解決するために、交換層を定義せずに空隙率の空間分布を直接解くことが出来るオイラー型粒子充填理論を構築し、検証する。そして、この新しい理論に基づき、水と任意形状混合粒径土砂を対象としたオイラー型多相流解析法を開発する。

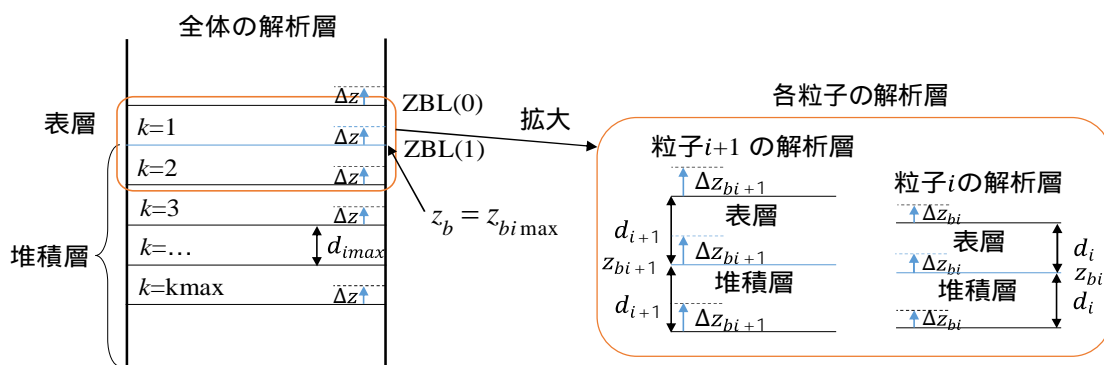


図-1 解析層の説明

### 3. 研究の方法

オイラー型粒子充填モデルでは、粒度分布をインプットデータとし、それぞれの粒子存在割合を微量ずつ単位面積に堆積させ、最大粒径で定義された全体解析層の高さと粒度分布を計算する。全体解析層(図-1 左)の各粒径  $i$  の存在率  $P_i$  を計算するために、粒径  $i$  ごとに堆積高  $z_{bi}$  と表層及び堆積層の存在率  $P_i$  を計算する解析層を設ける(図-1 右)。各粒径の解析層における他の粒径の存在率  $P_j$  は、全体の解析層から空間補間によって求める。ここで、小さな粒径を押しつけて大きな粒径が沈下することを考えなければ、粒子  $i$  より大きな粒子  $j$  は粒子  $i$  が侵入できない空隙に侵入できないため、堆積高  $z_{bi}$  は堆積高  $z_{b(i-1)}$  より常に低いか等しいかである。各粒径の堆積高  $z_{bi}$  と存在率  $P_i$  の変化は、表層に粒子  $i$  が侵入できる空隙  $\lambda_i$  が満たされた充填状態( $P_i = \lambda_i (1 -$

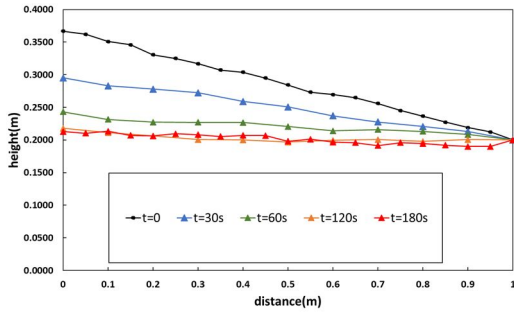


図-2 河床高の時間変化

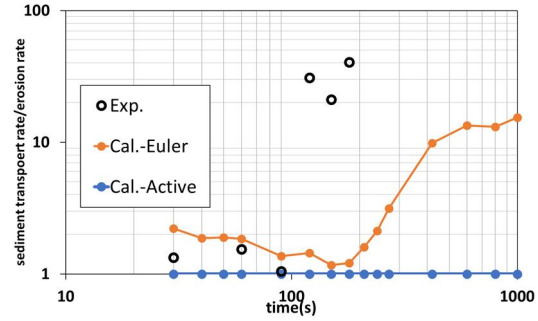


図-3 土砂流出量と侵食量の関係

$\lambda_0$ )とまだ侵入可能な空隙が存在する未充填状態( $P_i < \lambda_i(1 - \lambda_0)$ )とで分けられ、それぞれ以下の式で表される。

$$\frac{\partial z_{bi}}{\partial t} = \frac{D_i}{\lambda_i(1 - \lambda_0)}, \quad \frac{\partial P_i}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial z_{bi}}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial P_i}{\partial t} = \frac{D_i}{\Delta z_i} \quad (2)$$

ここに、単位時間あたりの粒子  $i$  の堆積量を  $D_i$ 、粒子  $i$  の表層に占める存在率を  $P_i$ 、堆積層上面高さを  $z_{bi}$ 、一様粒径空隙率を  $\lambda_0$  としている。 $\lambda_i$  は粒子  $i$  が侵入可能な空隙であり、粒子  $i$  より大きな粒子の存在率  $P_j$  を用いて以下の式(3)により計算する。

$$\lambda_i = 1 - \sum_{j=1}^{i-1} \alpha_{ij} P_j \quad (3)$$

ここに、 $i$  粒子径  $< j$  粒子径である。 $\alpha_{ij}$  は粒径比の関数であり、二粒径充填モデルを拡張した以下の式(4)~(6)によって表される。

$$\alpha_{ij} = 1 + \frac{\lambda_0}{1 - \lambda_0} \gamma_{ij} C_2 (1 - \beta_{ij})^{C_1} \quad (4)$$

$$\beta_{ij} = (1 - \gamma_{ij}) \left( 1 - \frac{P_j}{(1 - \lambda_0) \lambda_j} \right) \quad (5)$$

$$\gamma_{ij} = \min \left( C_3 \frac{d_i}{d_j}, 1 \right) \quad (6)$$

ここに、 $d_i, d_j, i, j$  粒子の粒径、 $C_1=1, C_2=0.5, C_3=2$  である。この係数の値は、二粒径充填問題を再現するように決定された。また全体の空隙率は式(7)で与えられる。

$$\lambda = 1 - \sum_{i=1}^{imax} \bar{p}_i \quad (7)$$

以上の理論に基づき、土砂堆積の数値解析法を構築した。本モデルでは最大粒径で定義された全体解析層の高さと粒度分布を計算する(図-1)。空隙率を実験結果と解析結果と比較、検証した。

#### 4. 研究成果

砂防堰堤からの土砂流出量の評価法においては、混合粒径による空隙率の時間的変化が考慮できるオイラー型堆積モデルを考慮した河床変動計算法を用いて実験を対象に検証を行った。図-2 に河床形状の時間的変化を実験開始から 1800 秒までの結果を示す。混合粒径を用いた砂防堰堤からの土砂流出実験において、河床高は直線的に減少することが分かった。また、侵食量に対する土砂流出量は初期では 2 倍程度であったが河床変化がほぼなくなった 100 秒以降は 20 倍以上になった。

図-3 に土砂流出量と侵食量の比の時間変化を示している。ここで、土砂流出量は砂防堰堤下流で 6 秒間に流出した単位幅土砂量、侵食量は各計測時間の堆積が減少した部分の量とした。実験初期では土砂流出量と侵食量の比は 2 倍ほどであるが、100 秒以降、数十倍となった。これは大きい粒子の間に充填された小さい粒子が流出し、骨格となる大きい粒子の移動がないため、侵食量がほとんどなくなるためと考えられる。120 秒以降はほとんど河床高の変化がなくなるため、この現象が顕著に見られたと考えられる。砂防堰堤からの土砂流出量の評価法においては、オイラー型堆積モデルを侵食過程に拡張したモデルと掃流力から評価される流砂量式を組み合わせたモデルを用いた。実験結果と解析結果を比較すると、初期では解析値と実験値で一致が見られるが、120 秒後から実験値では、土砂流出量が侵食量の 20 倍以上となっている。時間が経過すると、オイラー型堆積モデルの解析値でも侵食量に対する土砂流出量が 10 倍以上となった。本解析では流砂量を適切に評価できなかったため、土砂流出量と侵食量の時間変化を捉えること

が出来なかったが、空隙率の時間変化による見かけの侵食量と土砂流出量の特徴を説明することが出来た。河床変動、流砂量の時間的変化を概ね再現できた。河床が安定状態になるまでの時間は解析値と実験値で異なること、土砂流出量と侵食量の比の時間的を再現することなどに課題を残したが、空隙率の時間変化による見かけの侵食量と土砂流出量を捉えることが出来た。

次に、現地堆積土砂を用いた移動床水理実験を行ない、貯水池における水流での土砂分級作用による堆積土砂の空隙率と体積の変化を検討した。実験には幅 0.50 m、長さ 16 m、深さ 0.65 m の平坦水路を用いた。水路上流端(x=0 m)から 3 m の位置から 10 m の区間の右岸壁は透明なアクリル板となっている。粒度分布は、野呂川ダム上流の粒度分布を参考に作成した case1 の場合と沖積河川の粒度分布を参考に作成した case2 の場合について調べた。この粒度分布を持つ初期体積  $V_0(=0.123 \text{ m}^3)$  の土砂を静水状態において  $x=3.32 \sim 4.42 \text{ m}$  の範囲に滑らかな凸形状にして、締固めて設置した。なお初期堆積形状は超音波式河床計測器で縦断方向に 0.02 m、横断方向に右岸から 0.05 m、0.15 m、0.25 m、0.35 m、0.45 m の 5 点で計測している。実験流量  $Q(=0.020 \text{ m}^3/\text{s})$  が一定の条件下流端水深(x=16 m)を土砂が動かない初期 0.56 m から段階的に下げて、各下流端水位で静的安定状態となるまで通水した。各下流端水位の静的安定後の形状は横断方向に 5 点、縦断方向に 0.10 m で計測したが、侵食部と堆積部の境界等の変化については縦断方向に 0.02 m 間隔で細かく計測した。なお、礫河床の河床高の定義はいくつか考えられるが、本研究では河床高は上から計測した場合の横断平均値と定義する(12)。case1 については下流端水深 0.268 m(パターン 1)と下流端水深 0.13 m(パターン 2)の 2 つの場合について形状測定後、空隙率と粒度分布を計測した。パターン 1 では縦断方向に 0.10 m ごと鉛直方向に 0.06 m ごと、パターン 2 では堆積部分について 0.20 m ごと土砂を取り出し、乾燥体積を測定した。

図-4 に各下流端水深ごとの侵食量と堆積量を示す。ここで初期河床形状  $z_0$  と各段階の安定形状  $z^n$  を比較し、体積が減少した部分の量を侵食量  $E^n$ 、下流で堆積した部分の量を堆積量  $D^n$ 、各段階間の変化量を  $\Delta E^n$ 、 $\Delta D^n$  とした(図-5)。横軸は初期体積  $V_0$  に対する侵食土砂量の割合、縦軸は侵食量に対する堆積量の体積割合を表わす。case1 では初期の変化では土砂堆積量は侵食量の 2 倍以上であるがその後は急激に減少し、最終的に堆積土砂量は侵食土砂量の約 1.1 倍に収束した。図-6 に初期段階における case1 の表面粒度分布の変化を示す。初期段階では堆積土砂から平均粒径より小さい土砂が流出し、下流斜面途中に堆積したため堆積土砂体積  $D$  は大きい、平均粒径より大きな土砂は動かずその場にとどまり、空隙が大きくなるため、見かけの侵食土砂体積量  $E$  は小さくなることがわかる。分級が進み水深がさらに下がると、平均粒径より小さい土砂と合わせて露出した大きな土砂も流送されるようになり、砂が堆積した下流斜面を崩しながら再堆積した。侵食した体積は、その礫が斜面上に堆積し、流出する平均粒径より小さい土砂のみが下流に運ばれるため、 $\Delta D/\Delta E$  は徐々に小さくなると考えられる。図-6 の粒度分布を見ると、初期以外は平均粒径と分散は大きく変化せず、下流に移動していることが分かる。さらに水位が低下すると砂と礫が交互に層を形成しながら下流に輸送され、砂の流出以外にも水深が低下し礫が上流から供給され堆積することで下流も表面の粗粒化が進んでいき、結果的に侵食量に対する堆積量の割合が一定となった。一方、図-4 に示すように case2 では体積増加割合は初期から分級後まであまり変化しないが、最後の下流端水深の変化割合のみ増加した。これは初期の水深変化で平均粒径より小さい土砂が流送されるが、初期堆積土砂の砂の割合が多いため、case1 に比べて表面に露出する礫が少なくなり、侵食土砂体積量と堆積土砂体積量の割合がほぼ等しくなったと考えられる。 $\Delta D/\Delta E$  の変化が増加したのは、多くの砂が流送され礫が露出

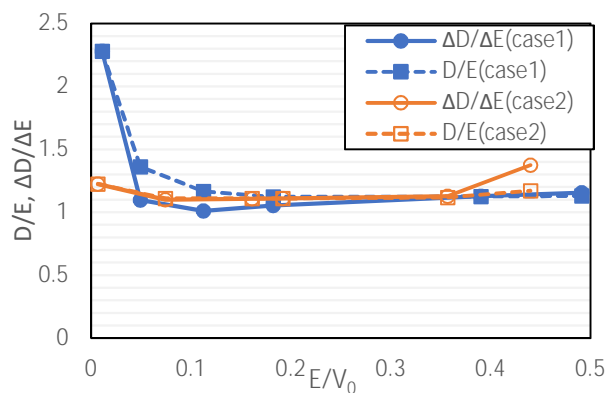


図-4 侵食量と堆積量の変化

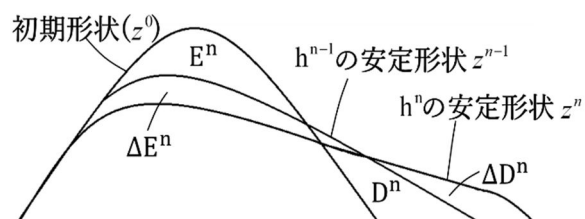


図-5 各下流端水深  $h^n$  (n 番目)における安定形状  $z^n$  と体積変化の定義

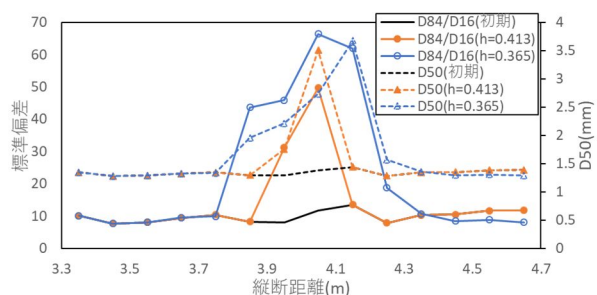


図-6 初期段階における表面粒度分布の変化(case1)

したことで見かけの侵食土砂量が小さくなり、堆積土砂量が多くなったためである。以上のことから粒径範囲が狭い水路実験の条件においても流れの分級作用によって土砂体積が増加していくことが示された。次に解析結果と実験結果を比較した。図-7 に各断面の平均空隙率と河床高について示す。上流端と下流端のように堆積土砂量が少なく、最大粒径で定義される堆積層が1層分に満たないようなところで解析値が大きくなっている。また、実験結果では表層が粗くなっており鉛直方向に粒度分布と空隙率に変化があることについて解析では考慮していないが、解析値は実験結果の全体的な空隙率の変化を捉え、河床高を精度よく計算できているといえる。また標準偏差が大きくなると空隙率は小さくなり、標準偏差が小さくなると空隙率が大きくなる傾向があるが、両者の関係より標準偏差を用いた空隙率推定は難しいことが分かる。パターン2では分級作用の影響で下流へいくにつれて標準偏差は小さく一様粒径に近づき、流下方向に空隙率は大きくなる。初期状態の空隙率は0.204(解析値)であり、堆積部始めも妥当な値といえ、実験値と概ね一致しているの、粒子充填モデルで空隙率の変化が捉えられるといえる。また、式(8)で定義した河床高は粒度分布が広いところで多少の開きはあるものの実験河床高と概ね一致した。

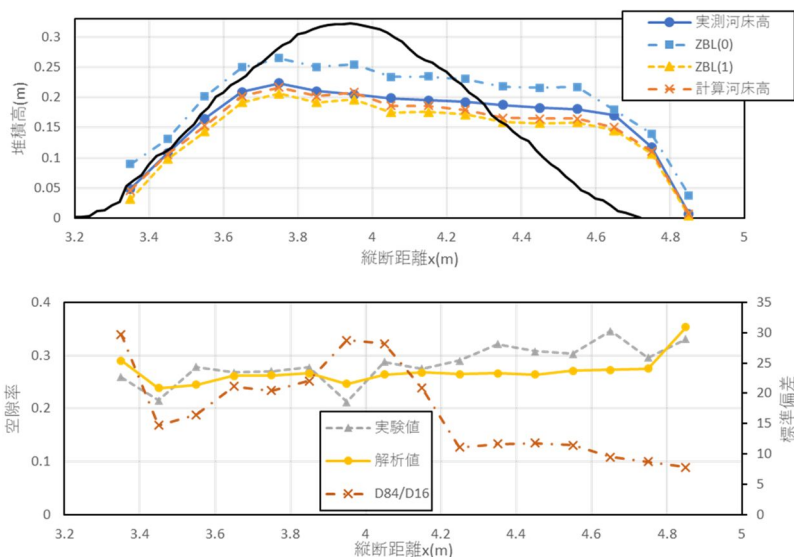


図-7 河床高と空隙率の比較

#### 参考文献

- [1] 平野宗夫: Armoring をともなう河床低下について, 土木学会論文報告集, No.195, pp.55-65, 1971.
- [2] 水理公式集 [2018 年度版], 丸善出版, 2018.
- [3] Garcia, M. H. (2008) Chapter 2 Sediment transport and morphodynamics, Sedimentation Engineering, process-es, measurements, modeling, and practice, edited by Garcia, M. H., ASCE manuals and reports on engineer-ing practice No. 110, pp. 21-163.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4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 1件）

1. 著者名 Uchida, T., Kawahara, Y., Hayashi, Y., and Tateishi, A.	4. 巻 146(10)
2. 論文標題 Eulerian deposition model for sediment mixture in gravel-bed rivers with broad particle size distributions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Hydraulic Engineering	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) 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001783	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 中島奈桜, 田丸雄大, 内田龍彦, 河原能久	4. 巻 26
2. 論文標題 流れによる砂防堰堤からの流出土砂量の評価に関する基礎的研究	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 615-620
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/river.26.0_615	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 林 勇輔, 内田龍彦, 河原能久	4. 巻 75
2. 論文標題 分級作用に伴う混合粒径土砂の空隙率と体積の変化に関する基礎的研究	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_913-918
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_913	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 林勇輔, 内田龍彦, 濱田隆敬, 堀博幸, 加國奈緒子	4. 巻 27
2. 論文標題 土石流堆積土の空隙率推定方法とオイラー型堆積モデルの適用性	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 河川技術論文集	6. 最初と最後の頁 673-678
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/river.27.0_673	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6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Yusuke Hayashi, Tatsuhiko Uchida, Yoshihisa Kawahara
2. 発表標題 Experimental investigation of porosity and volume of sediment mixture in straight open channel flows
3. 学会等名 22nd IAHR-APD congress 2020 in Sapporo (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nao Nakashima, Tatsuhiko Uchida, Yoshihisa Kawahara
2. 発表標題 A sediment transport model considering porosity variation of sediment mixture coupled with a Eulerian deposition model
3. 学会等名 22nd IAHR-APD congress 2020 in Sapporo (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中島奈桜, 内田 龍彦, 河原 能久
2. 発表標題 水流による砂防堰堤からの土石流堆積土砂流出量の評価法
3. 学会等名 令和2年度土木学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木本祥太, 林勇輔, 中島奈桜, 内田 龍彦, 河原 能久
2. 発表標題 混合粒径土砂の堆積・侵食過程に関する基礎的研究
3. 学会等名 令和2年度土木学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 林 勇輔・内田 龍彦・河原 能久
2. 発表標題 分級作用に伴う混合粒径土砂の空隙率と体積変化
3. 学会等名 令和元年度土木学会全国大会in四国
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 内田 龍彦
2. 発表標題 混合粒径土砂のオイラー型堆積モデル
3. 学会等名 第5回流砂・河床変動に関する研究会
4. 発表年 2019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	河原 能久  (Yoshihisa Kawahara)  (70143823)	広島大学・先進理工系科学研究科(工)・名誉教授   (15401)	
研究 分担者	橋本 涼太  (Hashimoto Ryota)  (60805349)	広島大学・先進理工系科学研究科(工)・准教授   (15401)	

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