

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K15105

研究課題名（和文）土砂を含んだ洪水氾濫災害の予測シミュレーションの実現と発生条件の推定

研究課題名（英文）Developing a predictive simulation of flood and inundation with sediment transport

研究代表者

山野井 一輝（Yamanoi, Kazuki）

京都大学・防災研究所・助教

研究者番号：30806708

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：多量の土砂生産を含んだ氾濫現象の被害領域の予測手法を構築するため、まずスパコン上で動作する土石流シミュレーションを構築した。次に、地形条件からの土石流始点位置の確率的な推定手法を構築し、これを入力としたシミュレーションを実行することで、再現でない予測型の被害予測シミュレーションを構築した。併せて、LiDAR差分観測データと降雨観測データに基づいた土砂生産量の推定手法構築に取り組み、従来は困難であった土砂生産量の直接的な推定方法を構築した。また、当研究成果で得られた被害予測データを機械学習の訓練データとして利用することで、衛星観測データから被害を瞬時に予測できる手法の構築にも取り組んだ。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果により、土砂を含んだ氾濫現象の被害領域を、観測可能な地形データや降雨データを用いて予測するためのシミュレーション手法を開発した。この方法に基づいたリアルタイムの予測システムを構築することができれば、例えば豪雨が観測または予測されたとき、どこでどの程度の被害が発生するのかを、確率の空間分布として示すことができるようになると期待できる。

研究成果の概要（英文）：To develop a method for predicting the affected area of the inundation, which contains a large amount of sediment, we first developed a simulation of a debris flow that can be run on a supercomputer. Next, a probabilistic estimation method of the initiation point of the debris flow was developed based on the topographical conditions. We conducted the simulations using the initiation point data as input to develop a predictive-type simulation. In addition, we developed a direct estimation method of sediment production based on LiDAR differential observation data and rainfall observation data. We also developed a method for instantaneously predicting the 3D damage information from satellite observation data by using the predicted data obtained in this research as training data for machine learning.

研究分野：水工学

キーワード：土砂災害 土石流 HPC 被害推定 確率ハザードマップ

## 1. 研究開始当初の背景

近年、豪雨時に斜面崩壊・土石流等により大量の土砂が生産され、その土砂が下流まで輸送され、河床や河道周辺の地形を変化させて甚大な洪水氾濫が生じる現象が頻発している。例えば、2017年九州北部豪雨における筑後川右岸流域の事例や、2018年7月豪雨における広島県南部の事例等が代表的である。

このような現象による被害領域を予測するには、水と土砂の流出・輸送を一体的に解析できるシミュレーション手法が有効である。研究代表者らもこれまで、降雨流出と掃流砂・浮遊砂形態での土砂輸送モデルを結合し、二次元型シミュレーション手法を開発してきた。しかし、上流部でのいわゆる土石流としての高濃度な土砂輸送形態が考慮できないこと、また河道外の土砂の生産量を適切に予測して組み込むことができないことに課題があった。

一方で、既往の二次元型土石流シミュレーションも複数存在しているが、その多くが災害後にしか得られない発生位置情報を入力に用いており、被害の予測に用いるには課題がある。また、先述の代表者らの手法では、スパコン上での並列化が施されているもの、既往土石流シミュレーションの多くが十分に並列化されておらず、例えば多数の計算ケースの実行が困難なことに課題である。

また近年、降雨については、詳細な時空間分布まで反映された観測や短時間予測技術が発達しており、このような降雨条件を用いて被害領域まで予測できれば、有効な予測情報となりうる。しかしながら、上記のシミュレーションや条件設定については、適切に降雨データが反映されるものとなっていない現状にある。

## 2. 研究の目的

以上に述べた研究背景から、本研究では、(1) OpenMP-MPI ハイブリッド並列化を施した二次元型の土石流シミュレーション方法構築 (2) 地形解析に基づく予測によって推定された始点位置を入力とした予測型シミュレーション (3) 降雨条件と地形条件を入力とした土砂生産量予測手法の開発 (4) 始点位置に降雨情報を取り込んだ確率的被害予測手法の開発を、それぞれ研究目的と設定した。各項目に対応する研究方法・研究成果は下記のとおりである。

## 3. 研究の方法

(1) 地形解析に基づく予測によって推定された始点位置を入力とした予測型シミュレーション  
まず、石礫型土石流、掃流状集合流および掃流砂による異なる濃度の土砂輸送を考慮可能な、高橋モデルに基づいたシミュレーションプログラムを構築した。座標系はデカルト直交座標とし、数値不安定性を解消するため、人工粘性を付与した Maccormack 法に基づいた差分化を行った。

(2) 地形解析に基づく予測によって推定された始点位置を入力とした予測型シミュレーション  
(1)で開発した手法を用いて予測型のシミュレーションを実行するため、計算の入力条件となる土石流の生起位置情報を予測するモデルを開発した。具体的には、2017年九州北部豪雨で被災した赤谷川周辺の領域を対象とし、対象領域内の10m×10mのセルを1サンプルとして、土石流始点の有無を目的変数、地形条件(曲率(断面曲率および接曲率)と勾配、集水面積)を説明変数とした Logistic 回帰分析を実施した。これにより、地形条件から土石流始点が発現する確率の空間分布を推定するモデルを構築した。ここで得られる確率空間分布に疑似乱数を与えることで、疑似的な土石流始点データを生成し、これを入力としたシミュレーションを実行することで、予測型のシミュレーション方法を構築した。

(3) 降雨条件と地形条件を入力とした土砂生産量予測手法の開発

XRAIN の分解能と同等の 250m メッシュの空間スケールで、順序ロジスティック回帰分析に基づく土砂生産量の確率的推定モデルを構築した。ここでは、航空 LiDAR 測量で得られた土砂の生産量(侵食量の総和)をレベル化した値を目的変数、平均勾配と XRAIN から算出される最大 60 分雨量、最大土壌雨量指数を説明変数とした。これによって得られる、土砂生産レベルの確率推定モデルを入力に、土砂の堆積域を推定できる簡易的なシミュレーション手法を構築し、これを用いた土砂の堆積域や土砂の通過確率の予測計算を実施した。

(4) 始点位置に降雨情報を取り込んだ、確率的被害予測手法の開発

(2)で開発した方法は、地形のみから始点の位置を予測するもののため、降雨に応じた被害予測は困難であった。これを解決するため、XRAIN から算出した土壌雨量指数を説明変数に加えた確率的始点位置予測モデルを、2018年西日本豪雨で多数の斜面崩壊・土石流が発生した広島県の花崗岩地質領域を対象に構築した。これを用い、観測される降雨データを入力とした予測シミュレーションが可能となった。さらに、モンテカルロシミュレーションによって被害が発生する

確率の空間分布を予測する方法も開発した。

#### 4. 研究成果

##### (1) OpenMP-MPI ハイブリッド並列化を施した二次元型の土石流シミュレーション方法構築

先述の方法で得られた計算結果の一例を図-1 に示す。観測結果と比較しても矛盾なく被害領域が推定された。なお、ここでは全領域を 5m 解像度で計算した結果を示している。

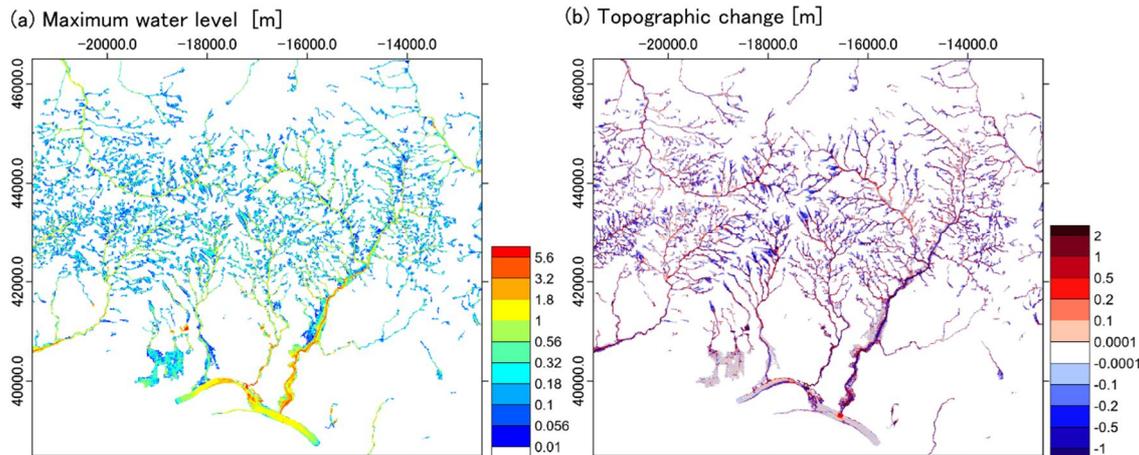


図-1 2017年九州北部豪雨で被災した赤谷川周辺を対象にした計算結果<sup>1)</sup>。左図が最大水深の空間分布を、右図が地形変化の空間分布を示す。

##### (2) 地形解析に基づく予測によって推定された始点位置を入力とした予測型シミュレーション

始点位置の発現確率を地形解析から推定し、これをもとに疑似乱数によって 60 パターン生成した疑似始点位置を入力としたシミュレーションを実施した。得られた最大水位(初期河床位基準)の平均値と相対標準偏差(標準偏差を平均値で除した値)それぞれの空間分布を図-2 に示す。図から、上流域では平均値が小さくばらつきも大きい一方で、谷底にある下流部周辺は平均値が大きく相対標準偏差が小さくなっていることが分かる。すなわち、土石流の発生位置にかかわらず、同程度の被害が発生する領域が下流部に存在し、そのような領域の被害については、ある程度の精度・確度で予測が可能であることが示された。

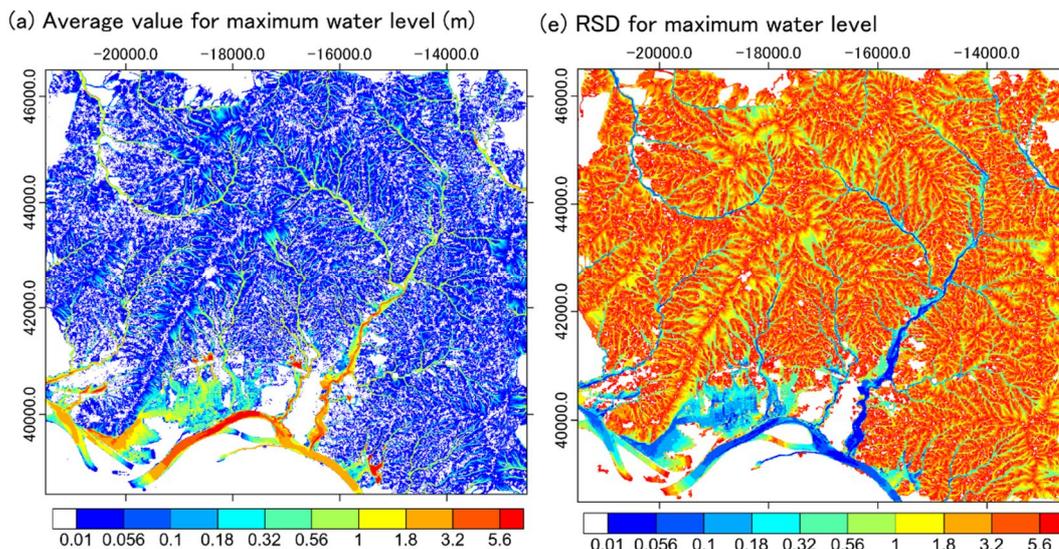


図-2 60パターン生成した始点位置を入力にしたシミュレーション結果<sup>1)</sup>。左図が最大水位の平均値、右図が最大水位の相対標準偏差を示す。

##### (3) 降雨条件と地形条件を入力とした土砂生産量予測手法の開発

先述の方法で予測された土砂生産量の規模と、土砂の通過確率を図-3 に示す。確率値としては小規模生産が発生するものが相対的に大きくなっているが、南側の領域で中規模から大規模の生産が発生する確率も一定程度算出されていることがわかる。また、これを入力とした簡易的な土砂移動計算に基づく土砂通過確率の空間分布をみると、谷底域では 0.9 以上の高い確率で土砂通過が生起することが分かり、このような領域での被害発生確率は非常に大きいと捉えることができる。土砂移動計算は厳密な手法ではないものの、雨と地形データのみを入力として、被災確率の空間分布を定量的に示した結果と評価できる。

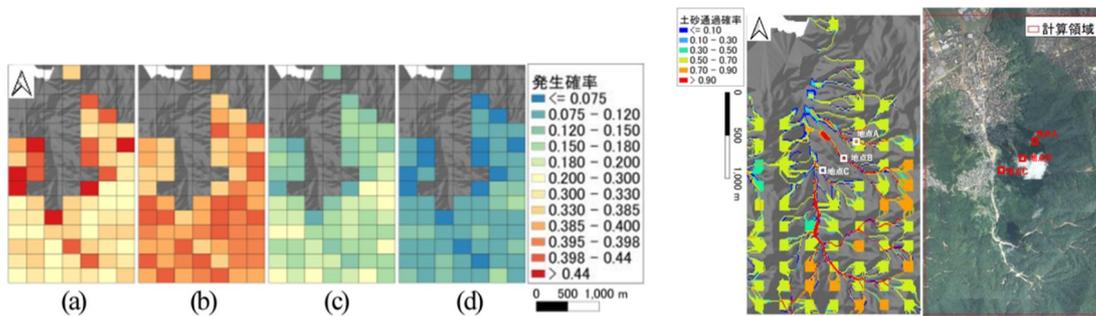


図-3 左図：2018年7月豪雨条件で予測された土砂生産規模の予測結果<sup>2)</sup>。ここでは(a),(b),(c),(d)それぞれが土砂生産なし、小規模生産、中規模生産、大規模生産が発生する確率の空間分布を示す。右図：左図の確率情報を入力とした、簡易土砂移動モデルによるモンテカルロシミュレーションの結果。ここでは土砂の通過確率の空間分布と、災害後の空中写真との比較を示す。

(4) 始点位置に降雨情報を取り込んだ、確率的被害予測手法の開発

提案した手法を用いた始点位置の予測結果と、モンテカルロシミュレーションによる土石流の計算結果を図-4に示す。この方法を用いることで、降雨データに応じて被害の生起する確率が空間分布として示された。

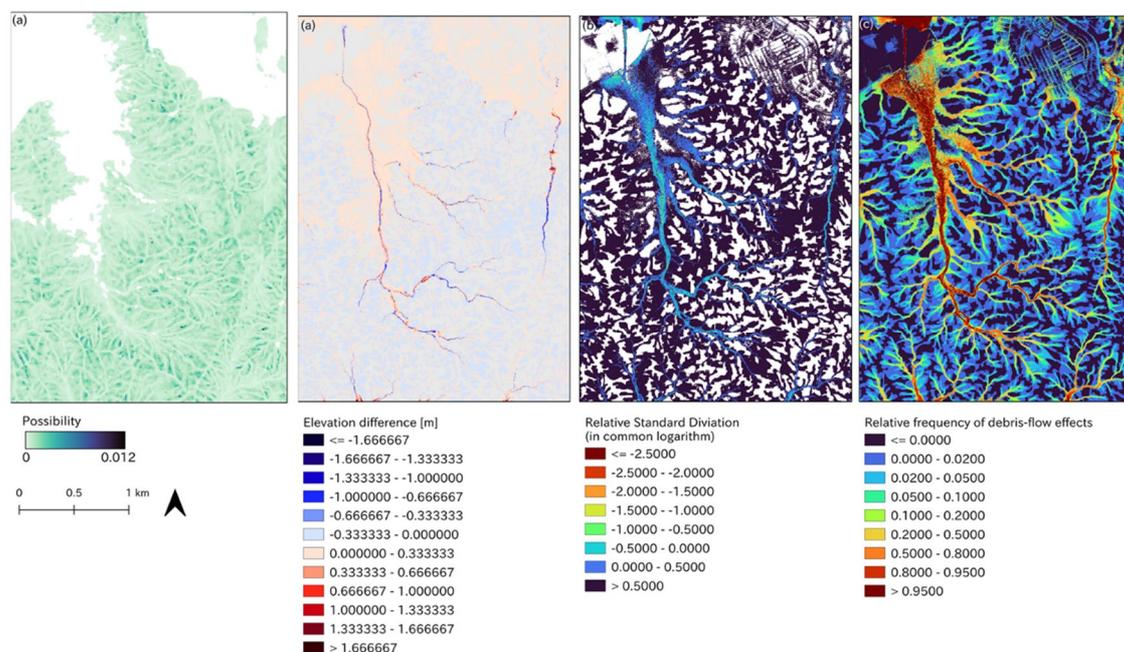


図-4 広島県坂町の総頭川流域を対象とした計算結果<sup>3)</sup>。左から、降雨情報を入力に加えて予測した土石流始点発生確率の空間分布、100回のモンテカルロシミュレーションにおける地形変化量の平均値、同相対標準偏差、および地形変化量の絶対値が0でない領域を被害領域ととらえた場合の、被害発生相対頻度を示す。

(5) その他関連する成果

本研究で提案した手法は、疑似的な土石流始点の位置を多数生成して、想定できる多数のパターンでの土石流被害の予測結果を生成できるものである。つまり、従来の観測ベースだと1パターンしか得られない空間分布のデータが、シミュレーションによって疑似的に多数得られると捉えることができる。これを機械学習の訓練データとして活用することで、衛星観測によって得られる2次元の被害有無のみの情報から、最大水位や地形変化などの3次元的情報を推定する手法を、AI研究者と協同で実施した。ここで提案したフレームワークの一例を図-5に示す。

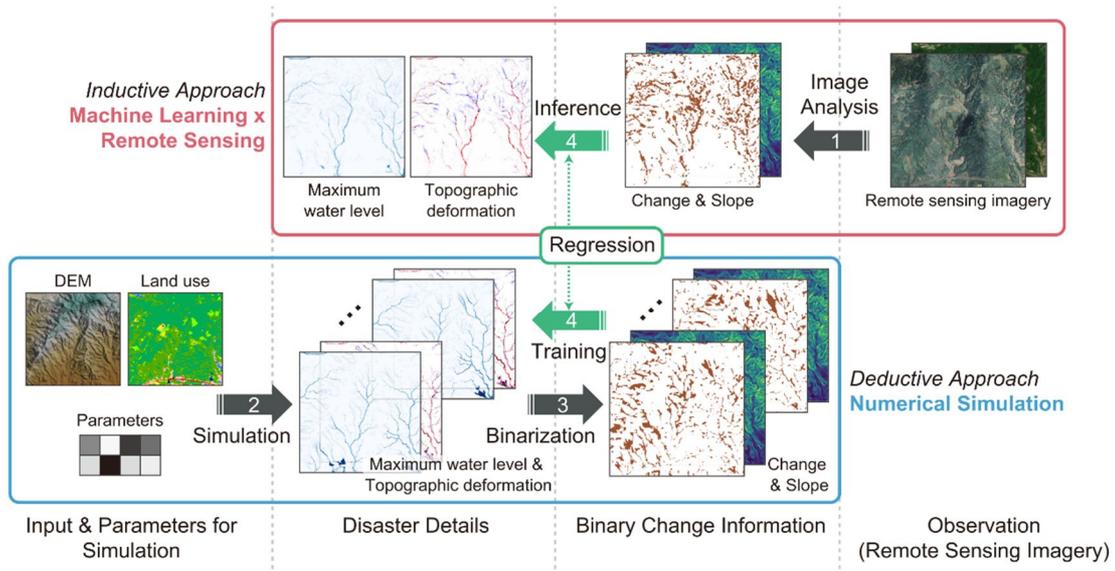


Fig. 2. Overview concept of the proposed framework.

図-5 機械学習とシミュレーションを組み合わせた，衛星データからの詳細な被害即時推定技術の提案フレームワーク<sup>4)</sup>

参考文献

- 1) Yamanoi, K., Oishi, S., Kawaike, K., & Nakagawa, H. (2022). Predictive simulation of concurrent debris flows: How slope failure locations affect predicted damage. *Journal of Flood Risk Management*, 15( 2), e12776. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12776>
- 2) 野口 新之助, 山野井 一輝, 川池 健司, 中川 一, 平成 30 年 7 月豪雨災害データに基づく生産土砂量及び土砂堆積域の確率的予測手法, 土木学会論文集 B1 (水工学), 2020, 76 巻, 2 号, p. I\_877-I\_882
- 3) Kazuki Yamanoi et al., Prediction of spatial distribution of debris-flow hit probability considering the source-location uncertainty, arXiv:2211.06837, 2022
- 4) N. Yokoya, K. Yamanoi et al., "Breaking Limits of Remote Sensing by Deep Learning From Simulated Data for Flood and Debris-Flow Mapping," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 60, pp. 1-15, 2022, Art no. 4400115, doi: 10.1109/TGRS.2020.3035469.

## 5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Yamanoi Kazuki, Oishi Satoru, Kawaike Kenji, Nakagawa Hajime	4. 巻 -
2. 論文標題 Predictive simulation of concurrent debris flows: How slope failure locations affect predicted damage	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Flood Risk Management	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） 10.1111/jfr3.12776	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 Yokoya Naoto, Yamanoi Kazuki, He Wei, Baier Gerald, Adriano Bruno, Miura Hiroyuki, Oishi Satoru	4. 巻 -
2. 論文標題 Breaking Limits of Remote Sensing by Deep Learning From Simulated Data for Flood and Debris-Flow Mapping	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 1~15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TGRS.2020.3035469	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 山野井一輝, 堤大三, 藤田正治	4. 巻 76
2. 論文標題 ストリームチューブに基づく地形分割を用いた斜面崩壊と土砂流出の統合シミュレーション	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_889-I_894
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2208/jscejhe.76.2_I_889	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 MUSUMARI Herman, NAKAGAWA Hajime, KAWAIKE Kenji, TALCHABHADEL Rocky, YAMANOI Kazuki	4. 巻 75
2. 論文標題 TREATMENT OF DEBRIS FLOW INITIATION AND DEVELOPMENT OVER A PARTIALLY SATURATED RIVERBED	5. 発行年 2019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_871~I_876
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_871	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 野口 新之助, 山野井 一輝, 川池 健司, 中川 一	4. 巻 76
2. 論文標題 平成30年7月豪雨災害データに基づく生産土砂量及び土砂堆積域の確率的予測手法	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 1_877 ~ 1_882
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.76.2_1_877	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 -

[学会発表] 計13件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Kazuki YAMANOI, Satoru OISHI, Kenji KAWAIKE
2. 発表標題 Numerical Simulation for Evaluating the Effect of Source Locations in Concurrent Debris-flow Disaster
3. 学会等名 AOGS Annual Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山野井一輝, 大石哲, 川池健司, 中川一
2. 発表標題 土石流による地形変化と降雨流出・氾濫の予測型シミュレーション
3. 学会等名 砂防学会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuki YAMANOI, Satoru OISHI, Kenji KAWAIKE, and Hajime NAKAGAWA
2. 発表標題 Multi-case Simulation on Water- and Sediment-Related Disasters for Estimating the Uncertainty of Damage Prediction Due to Input Conditions
3. 学会等名 COMPSAFE (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山野井一輝, 大石哲, 川池健司, 中川一
2. 発表標題 土石流による地形変化と降雨流出・氾濫の予測型シミュレーション
3. 学会等名 砂防学会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuki Yamanoi, Satoru Oishi, and Kenji Kawaike
2. 発表標題 Numerical Simulation for Evaluating the Effect of Source Locations in Concurrent Debris-flow Disaster
3. 学会等名 AOGS 2021 VIRTUAL (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山野井一輝, 孝子倫図, 堤大三, 藤田正治
2. 発表標題 九州北部豪雨災害を対象としたストリームチューブ地形分割に基づく斜面崩壊-土石流統合モデルの適用
3. 学会等名 砂防学会研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 和田孝志, 山野井一輝, 岩井優弥, 三輪浩, 藤田正治
2. 発表標題 土砂災害警戒情報の高密度化に向けた土砂移動形態の分類と空間分布特性の把握
3. 学会等名 砂防学会研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木豪太, 藤田正治, 山野井一輝, 坂井紀之, 内田良始
2. 発表標題 平成29年九州北部豪雨における赤谷川流域での土砂・洪水氾濫プロセスのシミュレーション
3. 学会等名 砂防学会研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中智昭, 堤大三, 山野井一輝
2. 発表標題 Topotubeを利用した表層崩壊解析法の地震災害への適応
3. 学会等名 砂防学会研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuki YAMANOI, Satoru OISHI, Kenji KAWAIKE, and Hajime NAKAGAWA
2. 発表標題 Watershed-scale simulation of rainfall-runoff, inundation and sediment transport affected by landslides and its application for prediction
3. 学会等名 AGU Fall Meeting
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山野井一輝, 大石哲, 川池健司, 中川一
2. 発表標題 土砂を含む洪水氾濫の予測に向けた土砂移動現象の生起確率を用いたシミュレーション手法の提案
3. 学会等名 日本自然災害学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 堤大三, 孝子 綸, 山野井一輝, 藤田正治, 中智昭
2. 発表標題 ストリームチューブによる地形分割を基にした表層崩壊解析手法の開発
3. 学会等名 日本自然災害学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuki Yamanoi, Satoru Oishi, Kenji Kawaike
2. 発表標題 Development of probabilistic debris-flow hazard map considering the uncertainty of initiation points
3. 学会等名 The 9th International Conference on Flood Management (国際学会)
4. 発表年 2022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