

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：12601

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(A））

研究期間：2020～2023

課題番号：19KK0392

研究課題名（和文）森林流域における土砂災害対策に資する土壌侵食モデルの開発と土石流モデルの適用

研究課題名（英文）Development of Soil Erosion Model and Application of Debris-Flow Model for Sediment Disaster Mitigation in Forested Watersheds

研究代表者

堀田 紀文（Hotta, Norifumi）

東京大学・大学院農学生命科学研究科（農学部）・准教授

研究者番号：00323478

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,800,000円

渡航期間： 6ヶ月

研究成果の概要（和文）：流木災害を含む森林流域での土砂災害対策のために、土壌侵食モデルと土石流モデルの改善を行った。土壌侵食モデルについては、斜面と河道のそれぞれで生じる土砂動態を適切に記述したうえで、流域からの長期的な土砂流出量を再現できた。土石流モデルでは、扇状地上での土石流の挙動に着目し、観測データと実験データの解析を行ったうえで、数値計算によって堆積形状を再現することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

森林における長期的な土砂流出量が土壌侵食モデルで再現することで、森林管理の影響を数十年スケールで検討することが可能になる。一般に、日本における土砂流出は侵食などの面的な土砂生産より、崩壊や土石流などの局所的な土砂生産源が支配的であると考えられているが、土石流モデルによって土石流の堆積範囲を正確に予測することで、森林流域からの土砂流出量を、攪乱を考慮しつつ予測することが可能になる。

研究成果の概要（英文）：This study improved a soil erosion model and a debris-flow model for the mitigation of sediment disasters, including driftwood disasters. The soil erosion model reproduced long-term sediment discharge from forested watersheds by appropriately describing sediment dynamics on slopes and within channel sections, respectively. The debris-flow model, after analyzing field data and laboratory tests focusing on the behavior of debris flows on debris-flow fans, successfully reproduced the deposition patterns on these fans.

研究分野：砂防工学

キーワード：土壌侵食モデル GeoWEPP 土砂流出 土石流数値計算 微細土砂

## 1. 研究開始当初の背景

本申請の基課題では流木災害軽減のための森林管理手法の提案を目的としている。流域における流木の動態を、土砂移動との **coupling** (斜面崩壊による供給や土石流と一体化した流下など) と **decoupling** (掃流域での輸送や、堆積後の腐朽・分解) の観点から評価・整理する点が特長である。このような検討を経ることで、既存の水・土砂流出モデルの流用によって流木災害の被害予測と対策に関するシナリオ検討が可能になる。

水・土砂流出モデルに関しては、**Process-based model (PBM)** である土壤浸食モデルを用いて流域全体の水・土砂動態の長期計算を実施したうえで、申請者らが開発済みの崩壊予測モデル・土石流モデルを適用して、流域内での流木の配置の変化を検討する。過去複数回の流木災害を経験した流域における現地調査の結果から、流域内に残置される流木は土石流発生勾配以上の溪流に存在していることが明らかになりつつあり、流木の挙動の評価には、土壤浸食モデルと土石流モデルの組み合わせによる予測が有効であるという基課題の基本方針が妥当であるという見通しを得ている。

研究課題全体では、モデルによる検討と現地調査に基づく検証を主な方法としている。当初想定していた技術的な課題は以下の **3** つであった。

(i) 土壤浸食モデルの選定と適用

(ii) 土石流モデルの精緻化：多様な条件下での適用と粒子法による流木の挙動の表現

(iii) 上記モデルの検証のための適切な研究サイトの選定とモデルの実地適用

(i) ~ (iii) によって流域の将来予測が可能になり、生態系内での流木の役割や住民の防災行動を踏まえた長期的な森林・流域管理の検討が可能になる。(iii) が円滑に進み、データの蓄積とそれを用いたモデルの検証が早い段階から始められたこともあって、基課題のうちで重要な位置を占める (i)(ii) の進捗状況と課題は、本申請時点で以下の通りであった。

(i) 土壤浸食モデルの選定と適用

現在の土壤浸食モデルの大部分は経験式である **USLE (Universal Soil Loss Equation)** に基づく。基本的には農地への適用を想定し、山地での適用性は高くない。そのため、海外と比較して日本での土壤浸食モデルの利用は進んでいない。土砂流出に関わる流域のアセスメントにとって強力なツールとなり得ることから、日本での適用性を担保したうえで、流木動態のバックグラウンドとしての水・土砂動態の評価に用いるのが基課題の狙いである。

観測データの省略、および流域環境の変化に伴う再現性の低下を避けるため、物理モデルベースの **GeoWEPP** モデルを用いることとした。東京大学生態水文学研究所を対象地としたが、基課題開始と同時期に、散逸していた過去 **80** 年以上の量水・土砂流出データの整備が進んだことが研究の進捗に大きく寄与している。ハゲ山からの森林回復に伴う長期にわたる土砂流出量の変化が **GeoWEPP** を用いて良好に再現されるという点と、河道の堆積土砂量の取り扱いの重要性が示された。通常、土壤浸食モデルでは境界条件として与える数値標高モデル (**DEM**) を不変とすることで計算負荷を軽減させるが、**GeoWEPP** では仮想河道上での土砂移動を計算することによって、河床変動に伴う河床勾配の変化を内部的に処理可能な仕様となっている。崩壊や土石流によって供給された土砂は河床変動を通して下流に運搬されるため、山地での土砂動態を適切に表現するためにはこのような河道プロセスの評価が有効と考えられる。一方で、物理モデルに準じる **GeoWEPP** では、他の多くのモデルで実装される計算の安定化のための **spin-up** プロセスが存在しないため、河道に与えた土砂量によっては計算初期に過大な土砂流出が生じることも明らかになった。

したがって、河道の堆積土砂の適切な取り扱いが研究上の課題であるが、加えて、**ESRI** 社の **ArcGIS10.4** のプラグインとしてのみ提供されている **GeoWEPP** は、**ArcGIS** のバージョンアップとともに、限られた研究期間でのみ使用可能であり、今後の更新について検討しなければならない状況であった。

(ii) 粒子法による流木の挙動の表現と、多様な条件下での適用が可能な土石流モデルの開発

土石流の抵抗則の粒子法への適用を可能としたという前提が、基課題の優位性の一つである。粒子法を用いることで、流木(粒子の結合によるモデル化)と土石流の混合流れの計算が可能になるからである。基課題の進展によって流木 - 土石流流れの計算には目処がついた。加えて、粒子法は計算時間を要するため、基課題では、格子法と粒子法の組み合わせ計算手法の開発を行うことで実用性を高めた。

現地調査の結果から、流木の運搬は斜面崩壊が直接土石流化した場合に顕著であることが明らかになった。日本で主流のモデルではこのような土石流の再現性は高くないため、土石流の抵抗則についても見直しを行った。微細土砂が多く含まれる土石流で生じる間隙流体の密度上昇を考慮したモデル化に成功したが、これによって、海外で主流のモデルが対象とする崩壊土塊の流動化の再現もある程度可能になった。

結局、土石流の堆積範囲を適切に評価することが肝要であるが、現在世界で主流となりつつ二流体モデルに対して、日本で主流の一流体モデルは、土石流の抵抗則を詳細に与えることが可能な反面で、侵食・堆積などの流れの急変部(粒子と間隙流体に相対速度が生じると考えられている)での再現性は劣るとみなされているため、堆積域での再現性が不明であることがもっとも大きな課題と言える。

## 2. 研究の目的

- 以上を踏まえて、課題(i)と(ii)に対応する形で、本研究では以下のような目的を設定した。
- ・河道からの供給土砂の寄与の大きな流域への **GeoWEPP** の適用性の検証と、今後の **GeoWEPP** の更新に向けた仕様の検討
  - ・現地観測データ、および水路実験データを用いた堆積域での土石流の挙動の解明と、モデルによる再現性の検討

## 3. 研究の方法

課題(i)については、斜面部における土壌侵食量の観測の実施と **GeoWEPP** による計算結果の比較も追加で行うことで、これまで行ってきた流域全体での土砂収支の検討を、斜面と河道部に分けて実施する。これにより、**GeoWEPP** を用いた森林流域の土砂動態の再現性を素過程に分けて検討することが可能になり、そこで得られた知見をもとに、**GeoWEPP** の今後の開発方針について、共同研究者と議論を進めて行く。

課題(ii)については、研究代表者らがこれまで国内で取得してきた土石流に関する現地観測、および水路実験データについて、堆積過程に着目して再解析を実施し、堆積時の土石流の挙動の特徴を整理したうえで、土石流数値計算を用いた再現計算を実施する。その際、研究代表者らのモデルに加えて、海外の共同研究者らのモデルによる計算を実施し、結果の比較を行う。

## 4. 研究成果

コロナ禍の影響で海外渡航が困難となったために研究期間を延長したこと、その間に生じた複数の状況の変化によって、当初と計画を変更した部分はあるが、以下のように研究の目的は概ね達成できたと言える。

### (1) 土壌侵食モデルの適用と開発

愛知県大洞市の森林流域において斜面における土砂生産量をモニタリングするとともに、流域末端の量水堰堤において、自動採水器と濁度計を併用した掃流砂、および **SS (Suspended Solids)** の観測を実施することで、流域での土砂収支、土砂動態を詳細に把握したうえで、**GeoWEPP** を適用した。森林斜面における土砂生産量は小さく、**GeoWEPP** の検出限界に近い値となったが、概ね再現できることが明らかになった。ただし、表面流量との対応関係は大きなばらつきを伴い、実斜面では、雨滴侵食のような **GeoWEPP** では想定していなプロセスによる土壌侵食が含まれることが示唆される結果が得られた。流域から流出する **SS** と掃流砂は、流出量と粒径組成の点において、斜面で生産された土砂では説明できず、河道が供給源となっていることが明らかとなった。過去に流域が荒廃していた時点で供給されて河道に堆積した土砂が流出していることを意味しているが、これは基課題において、同じく愛知県の白坂流域で得られた結果と調和的な結果である。また、河道に沿って地形測量と粒度分布の測定を行った結果、ソースエリアは狭い範囲に限られ、下流から上流に遡上している途中であることも分かった。

白坂流域と大洞流域で得られた結果について、**GeoWEPP** による再現結果を米国農務省 **National Soil Erosion Research Laboratory** において検討した結果、長期再現計算を行った白坂流域において、**flow path** を追跡した計算結果と、流域分割によって計算結果に乖離が見られることが明らかになった。これは、地表条件の変化を時空間的に細かく入力した際に、グリッドベースで計算を実施する **flow path** と、分割された小流域ごとに土砂生産量を算出する場合とで齟齬が生じるためだと突き止めたうえで、実際の流域の変化を再現しつつ、計算結果に影響を及ぼさない、最低限の地表条件を明らかにしたうえで入力し、再計算を実施した(図1)。

これらの検討の過程で、森林流域における長期計算に **GeoWEPP** を用いる際に望ましい仕様などが明らかになったので、今後の **GeoWEPP** の更新に反映することとした。当初は、この成果を基に **GeoWEPP** の更新・開発のための研究費の獲得の算段をする必要があると考えていたが、研究期間の途中で、共同研究者が大学から米国政府の研究機関(**GeoWEPP** の基となる斜面

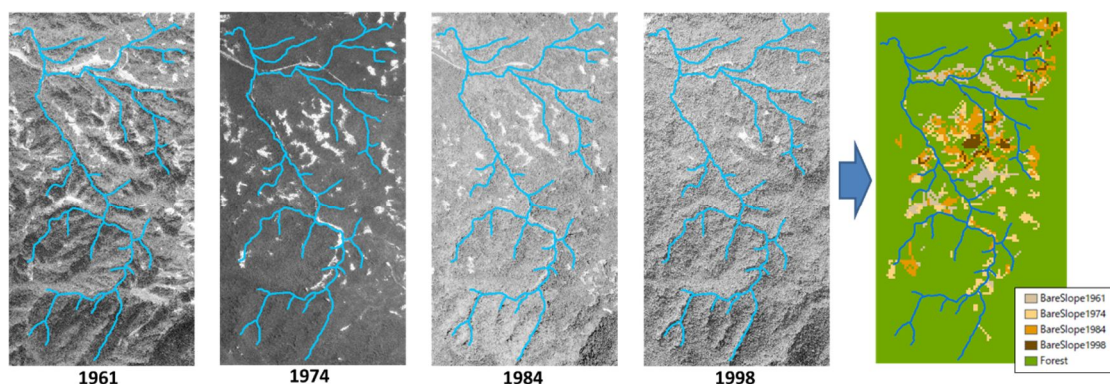


図1 白坂流域における裸地の変遷とそれを反映した計算条件

コンポーネントである **WEPP** の開発を行っている) に所長として異動することになったため、**GeoWEPP** の開発もその研究機関のプロジェクトとして実施されることとなった。1~2年のうちに、おそらく **QGIS** のプラグインの形で、新しい **GeoWEPP** が公開されることになる予定である。

## (2) 土石流の堆積過程の検討と数値計算による再現

雲仙普賢岳のガリー内の土石流の長期的な動態と、静岡県大谷崩で頻発する土石流の土石流扇状地上での挙動を検討することで、土石流と地形条件の相互作用が非常に大きいことが明らかになった。雲仙普賢岳ガリーでは、土石流によってガリー内の地形条件が変化することが、次の土石流の発生条件を規定することで、土石流を引き起こす降雨条件が変動していた。大谷崩れにおいては、土石流が段波として発生する際に、土石流によって侵食された谷部を埋める形で土石流堆積物が遡上 (**back filling**) していき、それが扇頂に達した時点で首振りが生じて、次の土石流サージが下流まで長距離を流送されるという周期性を有すること、扇頂勾配によって土石流サージの規模が規定されることが明らかになった。これらの土石流の機構的ではあるが複雑な動態は、現状ではどの土石流モデルでも再現できないため、特に短期間に生じるという点で

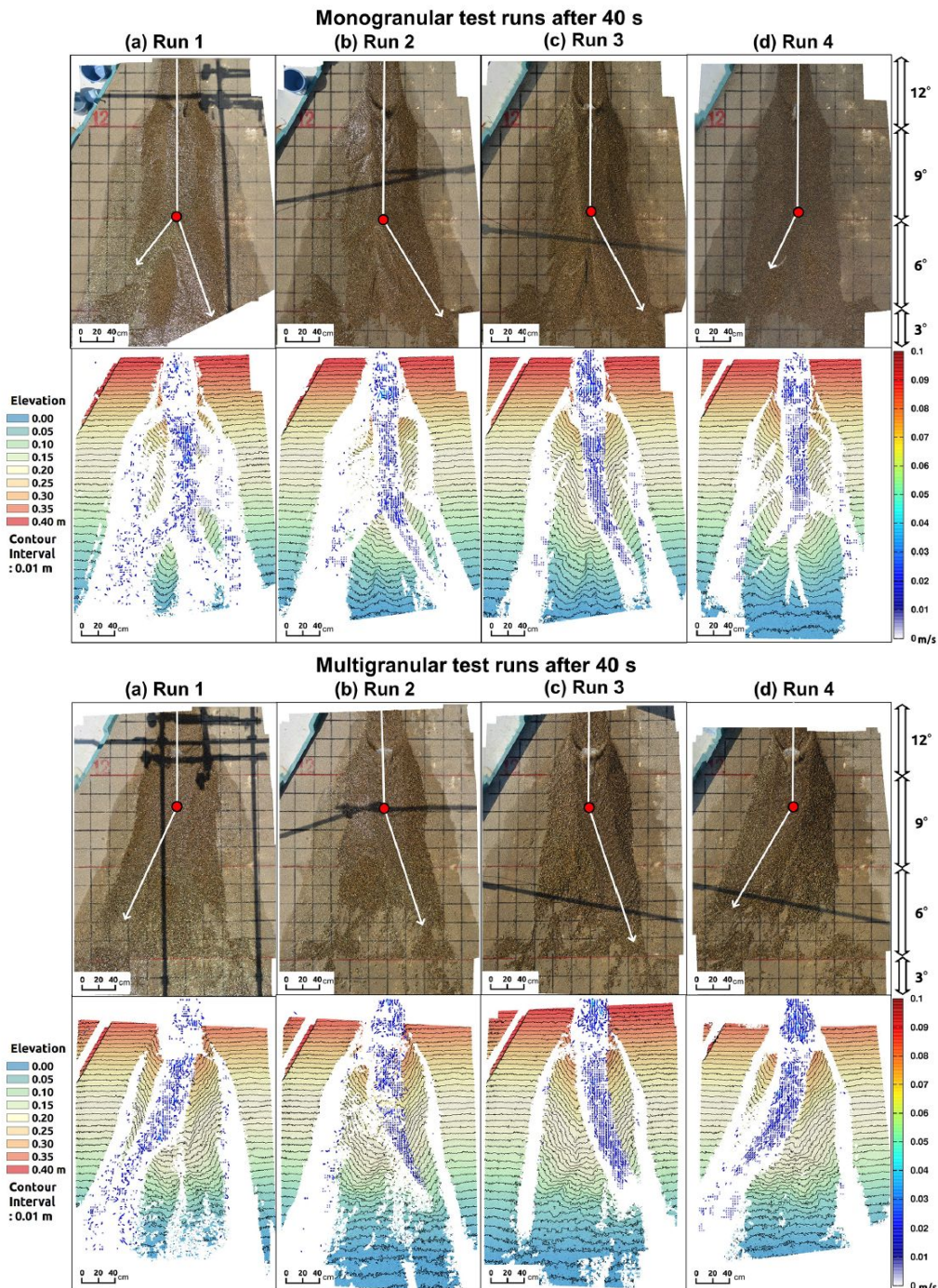


図2 扇状地における均一粒径(上)・混合粒径(下)土石流の挙動の違い

再現計算の需要が高い扇状地上の土石流について、水路実験データを用いて詳細に検討した。

土石流扇状地の水路実験では、土石流材料の粒度分布によって、首振りが異なるという興味深い結果が得られた。均一粒径の土石流では扇状地での首振りは堆積末端部で生じるため、扇状地の堆積形状が毎回ほぼ同じになるのに対して、混合粒径の土石流では、首振りが上流から生じるため、扇状地の堆積形状の形が左右のどちらかに偏り、実験によって大きく異なった（図 2）。混合粒径土石流では、先頭部に集中する粗礫が勾配変化点で堆積した際に、その表面が不飽和となるため、後続流の堆積が急激に生じることで、首振りが生じることが主要因と考えられた。

当初は、土石流のモデル計算は、崩壊土塊の流動化などを含む幅広い計算条件を対象に海外において実施する予定であった。しかしながら、渡航を見送っている間に共同研究者が転職したことと、現地観測と水路実験の検討結果から、扇状地での堆積過程に焦点をあてる必要性を感じたことから、同様の問題意識を有する海外の研究者にコンタクトを取ったうえで、二流体モデルとの比較を実施した。均一粒径での実験の資源計算を実施した結果として、流れが急激に変化する場合には二流体モデルの再現性が優れているものの、扇状地のように勾配が連続的に変化する条件では、一流体モデルと二流体モデルの間に大きな差異が生じないことが確認できた。一般に、立木の輸送は森林が成立する程度には、土石流が稀にしか発生しない溪流・流域で生じるため、ここでの結果から、研究代表者が用いる土石流モデルで流木災害の評価が可能であると考えられるが、一方で、土石流の材料特性（粒度分布）は従来考えられていたように、流下中に構成則を通して流れに作用するだけでなく、堆積時に大きな影響を及ぼす場合もあるので、今後さらに検討が必要である。

## 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 3件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Oda Tomoki, Hotta Norifumi, Miura Satoru, Endo Izuki, Tanoi Keitaro, Renschler Chris S., Ohte Nobuhito	4. 巻 47
2. 論文標題 Redistribution of the soil <sup>&lt;sup&gt;137&lt;/sup&gt;Cs inventory through litter and sediment transport on a hillslope covered by deciduous forest in Fukushima, Japan</sup>	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Earth Surface Processes and Landforms	6. 最初と最後の頁 2531 ~ 2543
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/esp.5393	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 該当する
1. 著者名 Tsunetaka Haruka, Hotta Norifumi, Sakai Yuichi, Wasklewicz Thad	4. 巻 10
2. 論文標題 Effect of debris-flow sediment grain-size distribution on fan morphology	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Earth Surface Dynamics	6. 最初と最後の頁 775 ~ 796
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/esurf-10-775-2022	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 該当する
1. 著者名 Tsunetaka H, Shinohara Y, Hotta N, Gomez C, Sakai Y	4. 巻 46
2. 論文標題 Multi-decadal changes in the relationships between rainfall characteristics and debris-flow occurrences in response to gully evolution after the 1990-1995 Mount Unzen eruptions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth Surface Processes and Landforms	6. 最初と最後の頁 2141-2162
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/esp.5148	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 Wong Hock-Kiet, Tai Yih-Chin, Tsunetaka Haruka, Hotta Norifumi	4. 巻 188
2. 論文標題 Two-phase approach to modeling the grain-fluid flows with deposition and entrainment over rugged topography	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Advances in Water Resources	6. 最初と最後の頁 104691 ~ 104691
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.advwatres.2024.104691	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 該当する

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 堀田紀文
2. 発表標題 流域への土砂供給は土石流扇状地を介してどのように制御されるのか？ 大谷崩における研究を通して考えたこと
3. 学会等名 2024年日本地理学会春季学術大会（招待講演）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Sakai Y, Hotta N, Tobe J
2. 発表標題 A numerical model for large-scale landslides based on digital elevation models
3. 学会等名 The 8th Geoinformation Science Symposium 2023 "Geoinformation Science for Sustainable Planet" Hybrid Conference (Yogyakarta, Indonesia): 28-30 August 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Sakai Y, Hotta N
2. 発表標題 Laboratory investigation of the effects of grain size on the dynamics of debris flows: Measurement of pore fluid pressure in an open channel
3. 学会等名 The 8th International Conference on Debris Flow Hazard Mitigation, Turin, Italy, 26-29 June 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 堀田紀文, 裴靖, 佐藤貴紀, 田中延亮, 大谷侑也, 蔵治光一郎
2. 発表標題 壤侵食モデルを用いた森林流域からの土砂流出の再現性の検討
3. 学会等名 令和5年度砂防学会研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 酒井 佑一, 堀田 紀文
2. 発表標題 泥流の堆積機構の実験的検討
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 堀田紀文, 戸部潤一郎, 酒井佑一, 西口幸希, 内田太郎
2. 発表標題 微細土砂の液相化を考慮した崩壊起因土石流の数値計算結果の比較
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Norifumi Hotta, Gaku Nagaoka, Nobuaki Tanaka, Christian Renschler
2. 発表標題 Reproducing long-term sediment discharge with GeoWEPP in a steep watershed with forest recovery
3. 学会等名 AGU Fall meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鳥田康平, 勝山正則, 堀田紀文
2. 発表標題 森林流域における50年間の土砂流出量変動と近年の増加要因の推定
3. 学会等名 第134回日本森林学会大会
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 酒井佑一, 堀田紀文
2. 発表標題 泥流の堆積機構：二層モデルに基づく検討
3. 学会等名 2022年度砂防学会研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 堀田紀文, 裴靖, 田中延亮
2. 発表標題 森林の管理や状態変化が土砂流出に及ぼす影響
3. 学会等名 第133回日本森林学会大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 裴靖, 長岡岳, 堀田紀文, 田中 延亮
2. 発表標題 GeoWEPPを用いた森林流域内の土砂生産量分布と土砂流出の評価
3. 学会等名 第132回日本森林学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堀田紀文
2. 発表標題 森林の水源涵養機能の科学的な評価に向けて：モ デル化の展望
3. 学会等名 第132回日本森林学会大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 戸部潤一郎, 堀田紀文, 酒井佑一, 西口幸希, 内田太郎
2. 発表標題 微細土砂の液相化を考慮した数値計算は崩壊起因土石流の再現に有効か?
3. 学会等名 令和3年度(公社)砂防学会オンライン研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 酒井佑一, 堀田紀文
2. 発表標題 均一粒径土石流における流れの遷移: 間隙水圧の測定
3. 学会等名 令和3年度(公社)砂防学会オンライン研究発表会
4. 発表年 2021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
	レンシュラー クリスチャン  (Renschler Christian)	米国農務省・National Soil Erosion Research Laboratory・ Research Leader	

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			
米国	Purdue University	USDA, NSERL		