

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04235

研究課題名（和文）すべり剛体ブロック連成モデルによる斜面の地震時脆弱性の広域的評価手法の構築

研究課題名（英文）Development of a Regional Assessment Method for Seismic Vulnerability of Slopes Using a Coupled Sliding Rigid-Block Model

研究代表者

小野 祐輔（Ono, Yusuke）

鳥取大学・工学研究科・教授

研究者番号：00346082

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：地震による広域かつ高精度な地すべり予測を実現するため、すべり剛体ブロックを用いた高度な解析手法を開発した。複数の剛体ブロックの連成モデルの完成には至らなかったものの、三次元地震波に解析を拡張できた。広域の地震斜面ハザード評価を実現するため、斜面角度と方位を離散化し、各組み合わせのハザードを決定する方法を提示した。AHP-GISを用いた地すべりハザードマッピングを過去の四つの地震に適用し、地形要因が斜面崩壊分布に支配的であることを確認した。さらに、崩壊土流入が河川洪水流れに与える影響を考慮する数値シミュレーションモデルを開発し、洪水流向の変化や上流の浸水拡大を表現できることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

国土の大半を山地が占める日本では、比較的規模の大きな地震が発生すると必ずと言えるほど地すべり・斜面崩壊が発生する。地すべり・斜面崩壊は、道路や水道といったライフラインを破壊する他、発生した崩壊土砂が土石流に発展するなどして広域的長期的に地域社会に影響を与える。そのため、地震による地すべり・斜面崩壊を予測する手法は常に発展させていかなければならない。本研究の研究成果は実用的な手法として広く用いられるまでにはギャップが多数残っているものの、これまでよりも技術レベルを一段上げることに貢献できたと考えられる。

研究成果の概要（英文）：To achieve wide-area and accurate prediction of landslides and slope failures during earthquakes, we developed an advanced analytical method using a rigid sliding block. Although we couldn't create a coupled model of multiple rigid blocks, we extended the method to include three-dimensional seismic waves, which previous studies hadn't considered. For wide-area seismic slope-slip hazard assessment, we devised a method to discretize slope angle and orientation, determining hazards for each combination using rigid-slip blocks. Applying AHP-GIS-based analysis to slope failure areas from four earthquakes (2008 Hokkaido, 2008 Kumamoto, 2008 Iwate-Miyagi Nairiku, and 2004 Niigata-Chuetsu) showed topographic factors predominantly influence slope failure distribution. We also developed a numerical simulation model considering collapsed soil inflow on flood flow in river channels, confirming the model can represent changes in flo

研究分野：地震工学

キーワード：地震 地すべり 斜面崩壊 ハザード

1. 研究開始当初の背景

地震時の斜面崩壊を広域的に予測するためには、計算負荷が低いことから、グリッド状に整理された地形データに対して、グリッド内のセルごとに独立したすべり剛体ブロックの応答を求めるモデルが用いられてきた。しかし、すべり剛体ブロックを用いたモデルを広域的なハザード評価をより有効なものにするためには、地震動の方位依存性や地形との対応についての拡張を行う必要があった。さらに、すべり剛体ブロックモデルで斜面崩壊が生じた後、災害へと発展する過程を予測するため、すべり剛体ブロック連成モデルに基づき発生が予測された崩壊土砂の流動を取り扱えるように、土石流の数値解析モデルとの統合が必要となっていた。

2. 研究の目的

山間地において地震時に発生する斜面崩壊は様々な被害を引き起こす。地震による斜面崩壊は広範囲で同時多発的に生じることが特徴の一つである。実際に、2018年北海道胆振東部地震では、震源域を中心に広い範囲で無数の斜面が崩壊した。厚真町では住宅裏で斜面が崩壊し住民が犠牲となった。同じく厚真町において、崩壊した斜面に巻き込まれ、稼働開始から間もない浄水場が完全に破壊された。その他、崩壊した斜面による道路の寸断や河川の閉塞が多数発生した。本研究では、これらの災害の発生を抑制するために不可欠な、地域の特性を考慮した地震時の斜面崩壊危険度の事前評価手法を確立することを目的として設定した。

3. 研究の方法

(1) 本研究では Newmark の滑りブロックモデルを地震動の直交三成分すべてを考慮できるような拡張を試みた¹⁾。ただし、剛体の運動を三次元で求めるのではなく、地震動の三次元作用のみを取り入れている。すなわち、本研究で提示したモデルは完全な三次元モデルにはなっていない。簡単のため最大静止摩擦力と動摩擦力が等しいと仮定する。図1のように摩擦のある斜面上に置かれたブロックに地震動が作用し、ブロックに作用する力が最大静止摩擦力 f_0 を上回るとブロックの運動が始まる。このとき、地震動の作用とブロックの運動を x 方向(斜面方向)にだけ限定して考えると、ブロックに作用する力は図2のようになる。すなわち、ブロックの x 方向には地震動の慣性力と重力の合力 f の x 方向成分が働き、この力が最大静止摩擦力 f_0 を超えた分の力 f_x^a によってブロックは運動する。ところが y 方向の地震動の作用も考えると、最大摩擦力の大きさ f_0 は向きによらないため、ブロックを運動させる力は f_x^b となる。力 f_x^a と f_x^b の大きさを比較すると f_x^b の方が大きいため、ブロックの移動量は f_x^b を考えたほうが大きくなる。以上の考えを導入した解析コードを開発し、過去に観測された地震動に対してその効果を確認した。

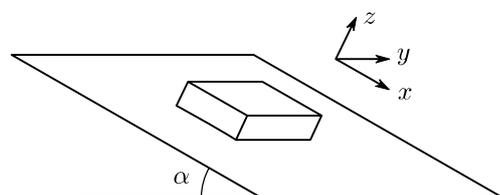


図1 地震動の直交三成分を考慮した滑り剛体ブロックモデル

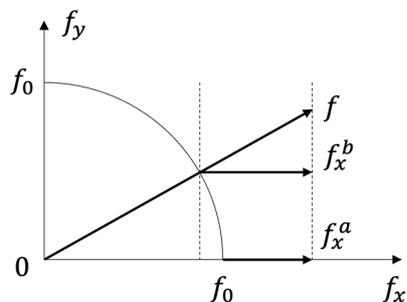


図2 ブロックに作用する力

(2) 河野ら²⁾が提案した AHP-GIS 解析による地すべりハザードマッピング手法を4つの地震(平成30年北海道胆振東部地震,平成28年熊本地震,平成20年岩手・宮城内陸地震および平成16年新潟県中越地震)による斜面崩壊分布域に適用し、地すべりハザードランクと斜面崩壊分布との整合性について検討し、地震による斜面崩壊分布に対する地形・地質・植生等の影響度を確認した上で、4つの地震による斜面崩壊分布に及ぼす評価項目の共通点を探った。まず、各地域における防災科研の地すべり地形分布図³⁾を基に、地すべり地形と評価項目・要素との関係性(すなわち、両者の面積比)を調査した。本研究ではデータの入手が容易で汎用性が高いという利点に重きを置いて、AHP法による地すべり危険度に関する評価項目(階層レベル1)を標高,斜面傾斜角,斜面型,集水度,地質および植生の6つに設定した。これらの設定した評価項目に基づいて、地すべり危険度の階層システムを構築した。

(3) 河道閉塞の形態や早期決壊の有無を事前に予測するため、崩壊発生後の崩壊土塊の挙動と、崩壊土塊の流入が河道の洪水流に及ぼす影響を同時に考慮可能な数値シミュレーションモデルを構築した。基礎となるモデルは、土石流に関する1次元,2次元数値計算モデルを組み合わせ、谷筋での土石流流動から扇状地上の氾濫堆積までを一括して取り扱う「結合モデル」(デカルト座標系上の直交格子による有限差分法)⁴⁾である。本研究では、「結合モデル」をさらに発展させ、2次元計算平面の複数の任意地点で1次元計算領域との接続を可能とし、氾濫場の複数の任意地

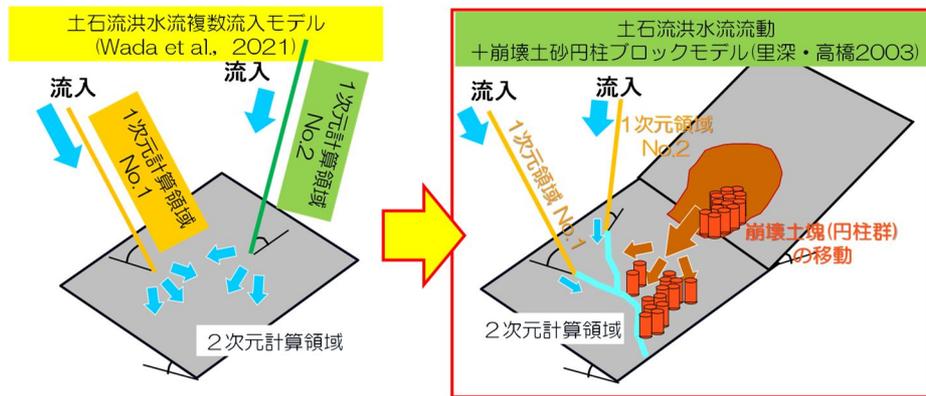


図3 「崩壊土塊ブロック + 複数流入モデル」の概略

点からの土石流(もしくは河川流)の流入を考慮可能とした Wada et al.⁵⁾「土石流洪水流複数流入モデル」を用いる。構築したモデルの妥当性検証として、平成 30 年発生 of 兵庫県宍粟市一宮町小原地区大規模崩壊⁶⁾を対象とした再現解析を行い、構築モデルの妥当性確認と崩壊土塊のパラメータの特性を検討する。

開発する数値計算モデルの概要を図 3 に示す。開発モデル「崩壊土塊ブロック + 複数流入モデル」は、Wada et al.³⁾が開発した「土石流洪水流複数流入モデル」の 2 次元計算平面に、里深・高橋^{7,8)}が開発した崩壊土塊円柱ブロックモデルによる「2 次元ハイブリッド土石流モデル」を組み込むことで構築した。

4. 研究成果

(1) 作成した解析プログラムを用いて地震動の作用に対する滑りブロックの運動を求め、 zx 面内のみの入力を与えたもの、三方向すべての入力を与えたものとの比較を行った。前者を 2D モデル、後者を 3D モデルと表記する。図 4 は地震動を作用させた解析結果の一例である。斜面傾斜角は 30 度、斜面とブロックの摩擦係数は重力に対する安全率を 2.5 と設定した。入力地震動は 2018 年北海道胆振東部地震の際に K-NET 追分観測点 (HKD127) で記録された波形である。EW 成分を y 軸方向に、NS, UD 成分を斜面の傾斜にしたがって変換したものを x 軸, y 軸方向に与えた。図 4(a)から(c)はそれぞれの軸方向に作用させた地震動波形である。図 4(d)はこの地震動に対して得られたブロックの x 方向の変位を 2D と 3D で比較したものである。両者は明らかに異なっており、 y 軸方向の地震動の影響が無視できないことを示している。次に、同じ地震記録に対して斜面の方向を変化させ、各方向に対するブロックの最終変位量を 2D と 3D で比較した。結果は図 5 に示すとおりである。すべての方向に対して、3D が 2D を上回っている。また、周回方向に見てブロックの変位量が最大となる方向が異なっていることが確認できる。この結果から、本研究で構築した地震動の直交三成分を考慮した滑り剛体ブロックの有効性が示された。

(2) 各地域の地すべりハザードマップの一例を図 6⁹⁾に示す。分析結果から河野ら²⁾の手法を用いた場合には、地震時の斜面崩壊分布の様子を適切に表現することはできなかった。そこで、作成した地すべりハザードマップにおいて設定した評価項目のうち、どの要因が最も斜面崩壊分布に影響を及ぼしていたのかを調査した結果、地震時の斜面崩壊分布には地形的素因が大きく関与することがわかった。そこで、「傾斜角」、「斜面型」、「集水度」のみを評価項目に設定して、再度地すべりハザードマッピングを行い、得られた地すべりハザードマップと地震時の斜面崩

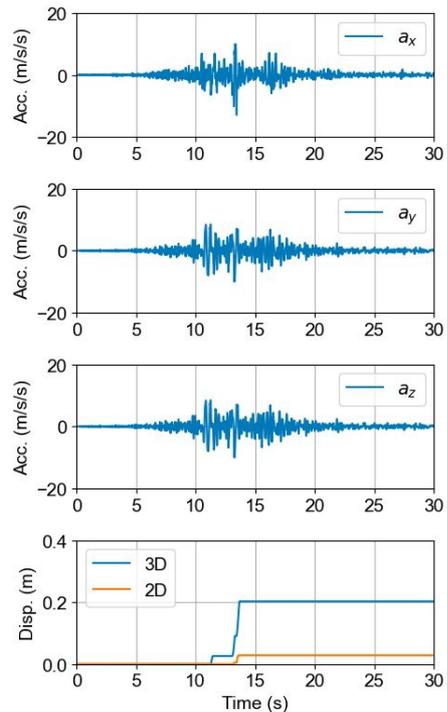


図 4 地震動とブロックの滑り量

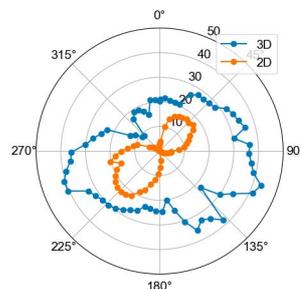


図 5 斜面の方位角と滑り量の関係

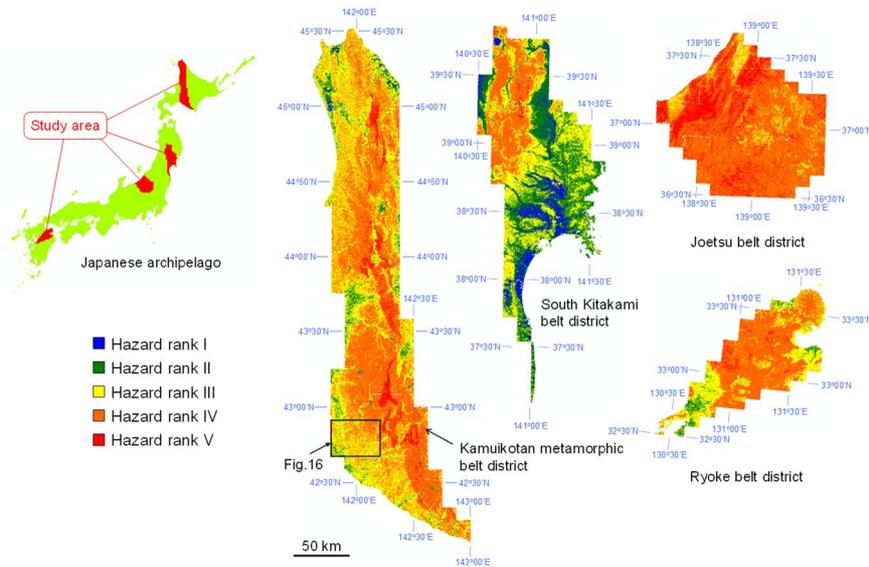


図 6 各対象地域の地すべりハザードマップの一例⁹⁾

壊分布との関係を調査した。地すべりハザードランクが高くなるにつれて、斜面崩壊面積占有率が大きくなる傾向がみられ、地すべりハザードマップと斜面崩壊分布との間に良好な対応が見られた。これは言うまでもなく、斜面崩壊分布と関連性が大きい要因のみを集めて設定して地すべりハザードマッピングを行ったためである。したがって、傾斜角、斜面型および集水度の3つの要因を用いて斜面崩壊危険度を評価することは、地震のような突発的な現象に伴う斜面崩壊危険度の高いエリアを事前に把握するうえで、有効な方法の一つになり得ると考えられる。また、本手法は、地質や植生等のデータを必要とすることなく、DEMデータのみを用いて解析が行えるので、データが乏しい、または、データの精度が劣るような地域への適用にも有効であると考えられる。本手法は、現地調査を要する地震時の不安定斜面の抽出に期待でき、優先順位を考えた効率的な対策を行うことが可能となることから、斜面防災技術の発展へ貢献できる。

(3) 構築したモデルの妥当性検証として、平成30年発生の兵庫県宍粟市一宮町小原地区大規模崩壊⁶⁾(図7)を対象とした。図7に示すように、崩壊面直下では、崩壊土塊が一時的に河道閉塞を起こし、これに伴って公文川の洪水流の流向が変化して崩壊面对岸の左岸側護岸の裏を通るようになり、護岸裏側の侵食を引き起こしたことが推察された。計算地形メッシュは、兵庫県が提供する1mメッシュDSM(Digital Surface Model)データを使用し、2mメッシュで地盤高を平均化して作成した。崩壊土塊形状や崩壊後の土砂堆積厚分布データは、2018年8月10日現地調査にてドローンで撮影した写真を写真測量ソフトMetaShapeにより合成し、作成した。再現計算条件は、現場調査や既報の情報だけでは設定が困難な崩壊土塊のパラメータ、 d_{mb} (土塊の平均粒径)、 U_{blim} (土塊の移動停止判定速度)、 c_b (土塊の粘着力)を変更して合計27ケースで計算を行った。なお、崩壊土量は既報⁵⁾の土量に見合うように、1辺の長さを2m、最大円柱高さを8mとする538個の円柱ブロックを崩壊後の崩壊面に配置した。なお、ブロック移動開始時刻は公文川洪水流供給開始から30分後とした。公文川流量は合理式により求めた $36.74 \text{ m}^3/\text{s}$ を用いた。図8に、実測の崩壊後土砂堆積厚と実測結果と最も近い結果となった計算ケースの土砂堆積厚分布を示す。計算結果では崩壊土塊の移動範囲が過大に評価されており、構築モデルにおいて改善すべき部分が残されていると考えられるが、崩壊土塊移動部分の堆積状況や周辺の影響範囲について定性的に実現象を表現できていると考えられる。図9に計算期間内の最大流動深分布を示す。崩壊土塊が公文川に流入することで流れが対岸側に偏った傾向が定性的に表現可能となったことがわかる。以上の解析結果から、構築モデルによって崩壊土塊の河道流入による洪水流の流向変化や閉塞上流側での湛水拡大等が表現可能となり、実際の堆積厚分布や近傍家屋の浸水状況も再現可能であることを確認した。モデル内パラメータと土塊物性値の整合性、崩壊土塊底部の侵食機構等について物理的検証の余地はあるものの、地震動に起因した崩壊土塊流下による二次災害規模の推定に繋がる数値モデルを確立することができた。

参考文献

- 1) 小野祐輔：地震動の三次元入力を考慮したNewmark滑りブロックモデル，第75回土木学会中国支部研究発表会発表概要集，I-27，2023年5月。
- 2) 河野勝宣・野口竜也・西村強：AHP法およびGISを用いた中国地方における地すべりハザードマッピングの試み，日本地すべり学会誌，Vol.57，No.1，pp.3-11，2020。
- 3) 防災科学技術研究所：地すべり地形分布図デジタルアーカイブ：地すべり地形GISデータ，http://dil-opac.bosai.go.jp/publication/nied_tech_note/landslidemap/gis.html。
- 4) 和田孝志・里深好文・水山高久：土石流計算における1次元・2次元シミュレーションモデルの結合，砂防学会誌，Vol.61，No.2，pp.36-40，2008。



図7 大規模崩壊土塊の流入による公文川短期閉塞と洪水流の迂回痕跡 (背景図は2018年8月10日ドローン撮影画像の合成により作成)

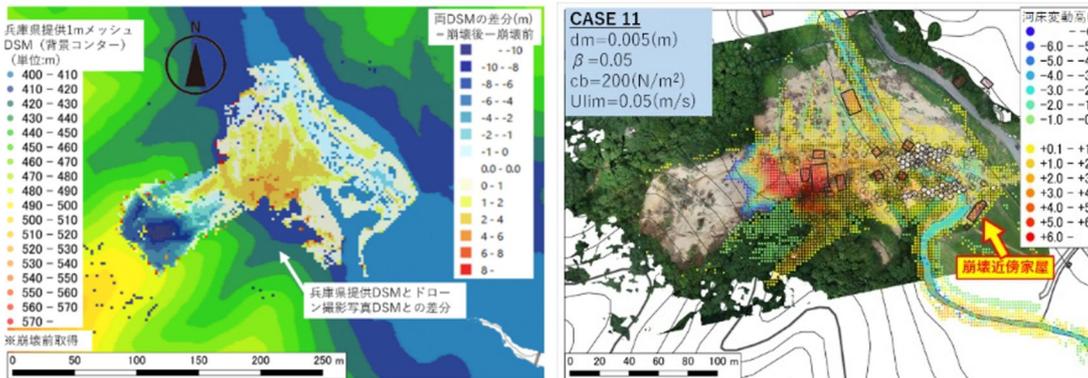


図8 崩壊後堆積厚変化に関する実測値(左)と崩壊2時間後の土砂堆積厚計算結果(右)

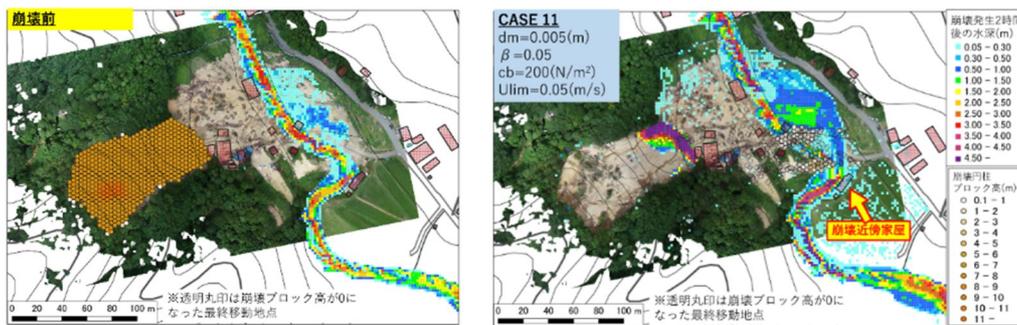


図9 崩壊前(左)と崩壊2時間後(右)の水深分布

- 5) Wada, T., Nakatani, K., Satofuka, Y., Mizuyama, T., Kosugi K. and Miwa H. : Development of a Numerical Model for Deposition and Flood Propagation by Multiple Inflows of Debris Flows and River Floods, International Journal of Erosion Control Engineering , Vol.14, No.2, pp.20-30, 2021 .
- 6) 公益社団法人日本地すべり学会 HP : 平成 30 年 7 月豪雨 調査団報告特設ページ 2018 年 7 月 25 日 宍粟市一宮町公文地区の崩壊 (閲覧日 2024/6/6) URL: https://japan.landslide-soc.org/branch/kansai/saigai/180725shiso_wang.pdf
- 7) 里深好文・高橋 保 : 斜面崩壊を起因とする土石流に関する数値シミュレーション, 水工学論文集, Vol.47, No.2, pp.583-588, 2003 .
- 8) 里深好文 : ハイブリッド土石流モデルによる平成 15 年水俣市集川の土石流に関する再現計算, 水工学論文集, Vol.48, No.2, pp.925-930, 2004 .
- 9) Kohno, M., Higuchi, Y., Ono, Y.: Evaluating earthquake-induced widespread slope failure hazards using an AHP-GIS combination, Natural Hazards, Vol.116, No.2, pp.1485-1512, 2023.

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 4件）

1. 著者名 Kohno Masanori, Higuchi Yuki, Ono Yusuke	4. 巻 2
2. 論文標題 Evaluating earthquake-induced widespread slope failure hazards using an AHP-GIS combination	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Natural Hazards	6. 最初と最後の頁 1485, 1512
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11069-022-05725-w	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 Kohno Masanori, Higuchi Yuki	4. 巻 12
2. 論文標題 Landslide Susceptibility Assessment in the Japanese Archipelago Based on a Landslide Distribution Map	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ISPRS International Journal of Geo-Information	6. 最初と最後の頁 37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/ijgi12020037	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 河野勝宣	4. 巻 11
2. 論文標題 地すべりハザードマップ作成範囲の大きさが地すべり危険度に及ぼす影響 - 国道9号出雲市多伎町地すべり地域の例 -	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 第11回土砂災害に関するシンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 245, 250
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 WADA Takashi, NAKATANI Kana, SATOFUKA Yoshifumi, MIZUYAMA Takahisa, KOSUGI Ken'ichirou, MIWA Hiroshi	4. 巻 14
2. 論文標題 Development of a Numerical Model for Deposition and Flood Propagation by Multiple Inflows of Debris Flows and River Floods	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Erosion Control Engineering	6. 最初と最後の頁 20 ~ 30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.13101/ijece.14.20	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7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Moe Sasaki and Yusuke Ono
2. 発表標題 RELATIONSHIP BETWEEN SLOPE FAILURE DISPLACEMENT AND FREQUENCY OF INPUT GROUND MOTION - NUMERICAL STUDY USING THE SPH METHOD
3. 学会等名 The 8th Asia Conference on Earthquake Engineering (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuto Matsuura, Yusuke Ono and Masanori Kohno
2. 発表標題 Capture Effect by flat ground on slope failure debris - A study using distinct element analysis
3. 学会等名 The 20th Anniversary International Symposium on Geo-Disaster Reduction (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masanori KOHNO, Yuki HIGUCHI, Yusuke ONO
2. 発表標題 Examination of a method to evaluate earthquake-induced slope failure hazard using the AHP
3. 学会等名 Third International Symposium on Risk Assessment and Sustainable Stability Design of Slopes (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松浦悠斗, 小野祐輔, 河野勝宣
2. 発表標題 斜面下の地盤が崩壊土砂の到達距離に及ぼす影響に関する模型実験
3. 学会等名 第73回（令和3年度）公益社団法人土木学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 樋口裕葵, 河野勝宣, 小野祐輔
2. 発表標題 AHP法を用いた地震による斜面崩壊ハザード評価手法の検討
3. 学会等名 第73回(令和3年度)公益社団法人土木学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河野勝宣
2. 発表標題 階層分析法を用いた地震時の斜面崩壊ハザード評価手法の開発
3. 学会等名 鳥取大学工学部附属地域安全工学センター・とっとり防災・危機管理研究会合同報告会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 和田孝志, 丸堂真輝, 廣地星大, 三輪浩, 里深好文
2. 発表標題 小規模ハード対策による土石流・洪水流複合氾濫時の避難安全性向上効果
3. 学会等名 令和3年度自然災害研究協議会中国地区部会研究発表会
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
研究分担者	河野 勝宣 (Kohno Masanori) (60640901)	鳥取大学・工学研究科・准教授 (15101)	

6. 研究組織（つづき）

	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	和田 孝志 (Wada Takashi) (60832996)	鳥取大学・工学研究科・准教授 (15101)	

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