

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01523

研究課題名（和文）地域指向性を備えた統合型地震地すべりシミュレーション技術の開発と展開

研究課題名（英文）Development and deployment of integrated seismic landslide simulation technology with regional orientation

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） 12,700,000円

研究成果の概要（和文）：AHP法による地震斜面崩壊危険度の評価において、地形的素因の重要性を確認した。地震によって生じた土砂崩壊サイトで常時微動観測を行った結果から、火山灰層と地形の影響で地震動が増大した可能性を指摘した。斜面模型（傾斜角20度）に対して遠心力載荷試験を実施し、特徴的な二つの変形モードを得た。1G場の模型振動台実験によって、地震動の固有振動数に関係なく入力地震動の加速度振幅が大きい場合に斜面崩壊が起きることを確認した。実災害を対象にSPH法による再現解析を実施した。実被災範囲との比較により解析の妥当性を確認した。斜面が地震作用により流出する過程を取り扱う弾性体-流体ハイブリッド粒子を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震地すべりは、道路、鉄道、上水道、電力といった社会インフラを破壊し、地域社会に長期的に影響を及ぼす。地震地すべりが発生するのは人口密度の低い中山間地域であることがほとんどであり財源、人的資源が極めて限られることから、全ての危険箇所に対して十分な対策を講じることは難しい。この状況は我が国特有のものではなく、世界各地で共通して見られる課題である。本研究の成果は、質の高い情報が豊富に入手できる日本国内だけでなく、これらが限られた途上国の中山間地域にも展開・適用可能な地震地すべりハザード評価法を確立するための一助となる。

研究成果の概要（英文）：We confirmed the importance of topographical factors in the evaluation of seismic slope failure risk using the AHP method. Based on the results of microtremor observation at the earthquake-induced landslide site, it was pointed out that the seismic motion may have been increased by the volcanic ash layer and topography. Centrifuge tests were conducted on a slope model (inclination angle: 20 degrees), and two characteristic deformation modes were obtained. 1G shaking table experiments confirmed that slope failure occurs when the acceleration amplitude of the input seismic motion is large, regardless of the natural frequency of the seismic motion. The SPH method was used to simulate a real disaster. The validity of the analysis was confirmed by comparison with the actual disaster area. An elastic-fluid hybrid particle was developed to handle the process of slope runoff due to seismic action.

研究分野：地震工学

キーワード：地震地すべり 数値解析 GIS ハザード 常時微動

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

地震地すべりは、道路、鉄道、上水道、電力といった社会インフラを破壊し、地域社会に長期的に影響を及ぼす。地震地すべりが発生するのは人口密度の低い中山間地域であることがほとんどであり、財源、人的資源が極めて限られることから、全ての危険箇所に対して十分な対策を講じることは難しい。この状況は我が国特有のものではなく、世界各地で共通して見られる課題である。また、地震地すべりの発生には、地質や地形、気象、植生といった要因に加えて、作用する地震動の強さが影響する。さらに、地震地すべりは、降雨等によって発生する地すべりと比較して斜面勾配が小さい場合においても発生するため予測が難しいという特徴がある。本研究では、質の高い情報が豊富に入手できる日本国内だけでなく、これらが限られた途上国の中山間地域にも地域で入手可能な情報を最大限活用して適用可能な地震地すべりハザード評価法を構築することを目指した。

### 2. 研究の目的

本研究では、過疎化が進み財源、人的資源に乏しい我が国の中山間地域を対象とし、詳細な現地調査を必要とせず、広域的に入手可能なデータのみに基づく地震地すべりハザード評価法の開発を目的とする。開発する手法は、国内だけでなく、国外、特に入手できるデータの精度と種類に制約の大きい国や地域への展開と適用可能なものとする。

### 3. 研究の方法

本研究は以下(1)から(4)の具体的な項目に分割し実施した。以下、それぞれの概要を述べる。

#### (1) 地域指向性を備えた AHP 法に基づく地震地すべりハザード評価法の開発

地形、地質、植生等の地域特性を考慮した階層分析(AHP: Analytic Hierarchy Process)法に基づく地すべり危険度評価手法について、新たな地震地すべりとの相関を再検討する。

#### (2) 常時微動計測に基づく地すべり流出土砂の堆積状況の推定と地震動増幅特性の検討

過去に地震地すべりが発生した地点において、常時微動計測により崩壊して流出した土砂の堆積状況の推定を試みる。

#### (3) 粒子法に基づく高精度な地震地すべりシミュレーション技術の開発

これまでの粒子法による地震地すべりの数値シミュレーションでは、振動台実験や被災事例の再現解析が行われてきたが、地すべりで発生する剛体ブロック状土塊の考慮、および地すべりの発生過程とすべり中の挙動の再現性については不十分であった。さらに、比較的単純な形状のみを対象としており、複雑な形状を有する事例を対象とした三次元解析は実施されていない。そこで、本研究では、これらの問題を解決するための検討を行う。

#### (4) 山陰地方とインドネシア国パダン近郊中山間地域への展開

本研究で構築した地震地すべりの予測手法をインドネシア国スマトラ島中西部に位置するパダン市周辺の山間地に適用する。対象地域での地震動特性の評価のため、現地で地震観測を実施する。

### 4. 研究成果

3で述べた4つの研究項目について、それぞれ成果の概要を述べる。

#### (1) 地域指向性を備えた AHP 法に基づく地震地すべりハザード評価法の開発

約16,000箇所及び地すべり地形を基に、AHP法とGISを用いて中国地方をモデルに地すべりハザードマップの作成を試行し、過去の斜面変動が起きた箇所と同等の危険度を有する斜面の抽出を行った。特に、AHP法による地すべり危険度に関する評価項目の対比較において、地すべり地形分布と評価項目の関係を数値化したものを導入した。次に、平成30年北海道胆振東部地震および平成28年熊本地震により発生した斜面崩壊を例に、斜面崩壊分布の特徴および両地域の共通点について調査した。さらに、インドネシアTandikat村における地質および地形データの収集、古期地すべり地形の抽出を行った。これらの検討に基づき更新した評価手法をH30北海道胆振東部、H28熊本、H20年岩手・宮城内陸およびH16新潟県中越地震による斜面崩壊分布域に適用して4地域の共通点を探ったところ、地震時の斜面崩壊分布には地形的素因が大きく関与していることが分かり、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、地形的素因(斜面傾斜角、斜面型および集水度)を用いて評価することが有効な方法となり得るという知見を得た。

#### (2) 常時微動計測に基づく地すべり流出土砂の堆積状況の推定と地震動増幅特性の検討

2018年9月にインドネシアTandikat地震地すべりの発生時に流出した崩壊土砂が堆積したサイトにおいて微動観測を実施し、観測地点の卓越周期を求めた。さらに、2018年11月に平成30年北海道胆振東部地震の被害箇所の視察と地すべり箇所での地震観測および微動観測、建物被害がみられた箇所など6地点で微動観測を実施した。その結果、微動H/Vからは各観測地点の卓越

周期がわかり、微動アレイ観測による位相速度分散曲線から、表層のS波速度構造モデルを推定した。また、地震記録による地震動H/Vからは、地すべり箇所の地形の状況に応じた特徴的なスペクトル特性が把握できた。また、既存の地形データやボーリングデータ、表層地質図、被害報告、論文などの情報収集を行い、地震地すべり発生と地盤構造との関係を把握した。これまでに観測した微動および地震観測データより、地盤震動特性と地盤構造を把握し、地形地質との関連性について詳細に検討した。微動および地震データを用いて、地震動や微動波形の震動方向の把握、H/Vスペクトルの卓越周期や地盤増幅特性の把握、位相速度分散曲線を用いた地盤構造モデルの構築を行った。その結果、軟弱な火山灰層による増幅効果と地形の影響で地震動が増大した可能性が示唆された。

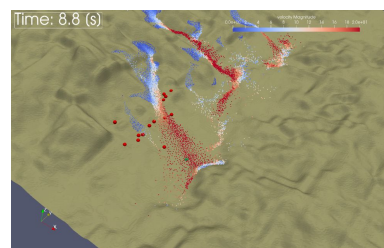


図1 インドネシア Tandikat 地震地すべりの再現解析の一例

インドネシアでの常時微動観測の際には、併せて地すべり土砂発生エリアの現地視察を実施した。その結果に基づき、風化層を想定した乾燥砂層(表層)の下部に三次元的な谷地形(岩盤)を有する斜面模型(傾斜角20度)に対して遠心力载荷試験を実施し、地震時による地すべりを再現した。その結果、表層の砂が谷部に集まる三次元的な変形を示したケースと、斜面方向に平行移動する二次元的な変形を示すケースとに分かれた。1G場において加振による地すべり発生機構に関する模型振動台実験を行い、地震動の振動数、振幅、斜面の表層厚などの特性が斜面の動的な安定性に与える影響について考察した。また、斜面全体の変形を捉えるための動画撮影を行った。今回の実験では、固有振動数に関係なく入力地震動の加速度振幅が大きい場合に斜面崩壊が起きることを確認した。滑動距離は、入力地震動の振動数が固有振動数に近いほど大きなものとなった。

### (3) 粒子法に基づく高精度な地震地すべりシミュレーション技術の開発

2009年インドネシア・パダン地震の際に発生した Tandikat 地すべりを対象に、Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法による数値解析を実施した。対象地域の Digital elevation model から入力データを作成し、ピンガム流体により土砂の流出範囲を計算した。計算結果の一例を図1に示す。

2018年北海道胆振東部地震による地すべりの滑落崖付近で採取した試料に対する室内試験より求めた地盤の強度定数を SPH 法のパラメータとして入力した場合、地すべりは発生しなかったものの、地震による強度低下を考慮し地すべりが再現される強度定数の範囲を特定できた。次に、2009年パダン地震で発生した Tandikat 村の大規模地すべりを対象として粒子法(SPH法)による数値解析を実施した。Google Earthで閲覧可能な過去の衛星画像を用いて地すべり後に消失した家屋の有無を調べることで、この地すべりで被災した範囲を推定し、数値解析結果と比較したところ良い一致が見られた。すなわち、粒子法(SPH法)により、地すべりの土砂の到達範囲の推定が可能であった事例を示した。

2009年インドネシア・パダン地震によって発生した Tandikat 地すべり、2018年北海道胆振東部地震により発生した地すべりは、斜面に堆積していた軟弱な火山性地盤が地震作用を受けて流動したものである。平時には安定して斜面に堆積していた地盤が地震作用により不安定化し、流出する過程を SPH 法によるシミュレーションモデルに組み込むため、弾性体と流体のハイブリッドな材料特性を持つハイブリッド粒子モデルを開発した。ハイブリッド粒子モデルを用いた解析結果の一例を図2に示す。

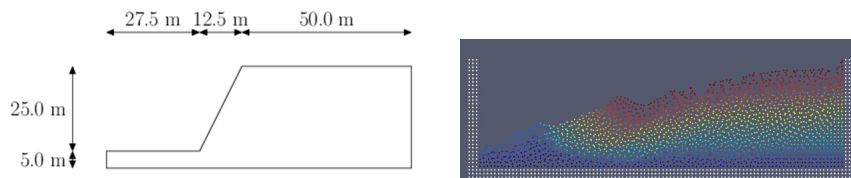


図2 弾性体と流体のハイブリッド粒子を用いた SPH シミュレーション結果の一例

### (4) 山陰地方とインドネシア国パダン近郊中山間地域への展開

なお、新型コロナウイルス感染症のパンデミックのため、2019年度は現地調査が実施できておらず、現地に設置した地震記録のデータ回収が完了していない。現地の研究協力者に地震観測装置の管理を依頼しており、渡航が可能になり次第データ回収を実施し、分析を行いたい。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 12件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 10件）

1. 著者名 Ono Yusuke	4. 巻 20
2. 論文標題 SIMULATING EARTHQUAKE-INDUCED SLOPE FAILURES USING A SOLID-FLUID COUPLING MODEL BASED ON THE SMOOTHED PARTICLE HYDRODYNAMICS FRAMEWORK	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of GEOMATE	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.21660/2021.82.Gx183	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 Noguchi Tatsuya	4. 巻 20
2. 論文標題 ESTIMATION OF SUBSURFACE STRUCTURE BASED ON MICROTREMOR AND SEISMIC OBSERVATIONS IN AREA DAMAGED BY 2018 HOKKAIDO EASTERN IBURI EARTHQUAKE, HOKKAIDO, JAPAN	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of GEOMATE	6. 最初と最後の頁 8-15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.21660/2021.81.Gx194	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 山本航, 飛田哲男	4. 巻 40
2. 論文標題 2018年スラウェシ島地震における緩斜面地すべりの発生メカニズムに関する解析的検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 第40回地震工学研究発表会講演論文集	6. 最初と最後の頁 1-7
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 -
1. 著者名 Kohno Masanori	4. 巻 20
2. 論文標題 EVALUATION OF EARTHQUAKE-INDUCED SLOPE FAILURE DISTRIBUTION USING THE AHP METHOD AND GIS	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of GEOMATE	6. 最初と最後の頁 74-81
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.21660/2021.79.GX192	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, 城一達哉, 小野祐輔, 野口竜也, 梶川勇樹	4. 巻 10
2. 論文標題 平成30年北海道胆振東部地震による斜面崩壊分布と地形的素因との関係	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 第10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 213-218
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 野口竜也, 西村武, 小野祐輔, 河野勝宣, 日比慧慎	4. 巻 39
2. 論文標題 平成30年北海道胆振東部地震の被害地域における微動観測および臨時地震観測	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 第39回地震工学研究発表会講演論文集	6. 最初と最後の頁 1-8
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 -

1. 著者名 河野勝宣, 野口竜也, 西村強	4. 巻 57
2. 論文標題 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	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本地すべり学会誌	6. 最初と最後の頁 3-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3313/jls.57.3	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 小野祐輔	4. 巻 75(4)
2. 論文標題 地震時の進行型斜面崩壊を対象とした SPH 解析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集A1 (構造・地震工学)	6. 最初と最後の頁 770-777
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejsee.75.1_770	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 Masakatsu Miyajima, Hendra Setiawan, Masaho Yoshida, Yusuke Ono, Kenji Kosa, Ida Sri Oktaviana, Martini and Irdhiani	4. 巻 6(1)
2. 論文標題 Geotechnical damage in the 2018 Sulawesi earthquake, Indonesia	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geoenvironmental Disasters	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40677-019-0127-7	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 Tobita, T and K. Kashiwagi	4. 巻 -
2. 論文標題 Static and dynamic analysis on gentle slopes stability	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The 7th China-Japan Geotechnical Symposium	6. 最初と最後の頁 326-332
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 -

[学会発表] 計10件(うち招待講演 0件/うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Masanori Kohno, Yusuke Ono
2. 発表標題 Evaluation of earthquake-induced slope failure hazard using the analytic hierarchy process method
3. 学会等名 The 10th International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment (GEOMATE 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tatsuya Noguchi, Isamu Nishimura, Yusuke Ono, Masanori Kohno
2. 発表標題 Kohno: Estimation of subsurface structure based on microtremor and seismic observation in the damaged area due to 2018 Hokkaido Eastern Iburu Earthquake, Hokkaido, Japan
3. 学会等名 The 10th International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment (GEOMATE 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yusuke Ono
2. 発表標題 SIMULATING EARTHQUAKE-INDUCED SLOPE FAILURES USING A SOLID-FLUID COUPLING MODEL BASED ON THE SMOOTHED PARTICLE HYDRODYNAMICS FRAMEWORK
3. 学会等名 The 10th International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment (GEOMATE 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本航, 飛田哲男
2. 発表標題 2018年スラウェシ島地震における緩斜面地すべりの発生メカニズムに関する解析的検討
3. 学会等名 第40回地震工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西村武, 野口竜也, 小野祐輔, 河野勝宣, 日比慧慎
2. 発表標題 2018年北海道胆振東部地震の被害地域における微動観測および臨時地震観測
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野口竜也, 西村武, 小野祐輔, 河野勝宣, 日比慧慎
2. 発表標題 平成30年北海道胆振東部地震の被害地域における微動観測および臨時地震観測
3. 学会等名 第39回地震工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tobita, T., Kashiwagi, K., Chigira, M. and Iai, S.
2. 発表標題 Effective Stress Analysis for Landslide on Gentle Slopes
3. 学会等名 5th International Conference on Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小野祐輔
2. 発表標題 地震時の進行型崩壊を対象としたSPH解析
3. 学会等名 第38回地震工学研究発表会
4. 発表年 2018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	飛田 哲男 (TOBITA Tetsuo) (00346058)	関西大学・環境都市工学部・教授  (34416)	
研究分担者	野口 竜也 (NOGUCHI Tatsuya) (20379655)	鳥取大学・工学研究科・准教授  (15101)	
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)	

#### 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
---------	---------