

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2016

課題番号：26702010

研究課題名(和文)革新的アプローチによる表層崩壊の発生位置・規模・発生時刻の予測システムの開発

研究課題名(英文) Development of a system for predicting location, magnitude, and timing of shallow landslide using an innovative approach

研究代表者

松四 雄騎 (MATSUSHI, Yuki)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：90596438

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、降雨に起因する山地斜面の表層崩壊について、その発生位置と規模、発生時刻を精緻に予測するための手法の開発に取り組んだ。まず崩壊予備物質である土層の生成と輸送の過程を、宇宙線生成核種の加速器質量分析と航空レーザー測量による地形の詳細解析という新規性の高い手法を用いて定量化し、表層崩壊の発生場となる谷頭凹地への土砂の集積をシミュレートできるシステムを構築した。また、降雨に対する土層中の間隙水圧の応答をモデリングした。これらの研究により、斜面での長期的な地形プロセスと短期的な水文プロセスの両方の定量的モデリングを組み合わせ、表層崩壊発生の予測精度を大きく向上させることができた。

研究成果の概要(英文)：This study attempt to construct a system for predicting location, magnitude, and timing of shallow landslides. Soil production and transport were quantified by a coupling of terrestrial cosmogenic nuclide analysis and air-borne laser survey of hillslope topography. This parameterization enable us to calculate soil accumulation in head hollows leading to landsliding. A modeling of temporal change in subsurface pore-water pressure was also established. These outputs makes a tight link between long-term geomorphic processes and short-term hillslope hydrology, which help achieve better prediction of shallow landslides.

研究分野：自然地理学

キーワード：表層崩壊 土層 宇宙線生成核種 航空レーザー測量 地理情報システム 斜面水文 減災 モデリン  
ケ

### 1. 研究開始当初の背景

表層崩壊は、主として基盤岩の風化によって山地の斜面上に形成された土層が崩落する現象である。特に降雨を引き金として発生する表層崩壊は、崩土がしばしば土石流化して谷を流下し、崩壊源から離れた下流の平坦地にまで到達する。細かな起伏の多い丘陵地では、局所的な豪雨によって、数百か所以上の表層崩壊が  $10^1 \text{ km}^2$  の狭い範囲に集中して発生する例も多く、近年では、2010年に広島県の庄原市で発生した災害がその典型的なものである。表層崩壊は、個々の崩壊土量は  $<10^3 \text{ m}^3$  と小規模であるものの、同時多発的で急激な土砂移動を伴うため、土石流扇状地に立地する集落を中心に、全体としては甚大な被害をもたらす災害となることが多い。

表層崩壊による土砂災害の軽減を実現するため、斜面安定工や砂防ダムなどによるハード対策が行われているが、数量的にもコスト的にも限界がある。近年の人為的気候変動に伴う極端気象現象の頻度と強度の増大によって、従来のハード対策が十分に機能しない事例が増加するものと予想され、表層崩壊の発生場と発生時の予知・予測に基づく警戒・避難を中心としたソフト対策の高精度化が必要となっている。経験に基づく大まかな予測という意味では、既に気象庁によって、実行雨量や土壌雨量指数を根拠とした土砂災害警戒情報の発信が行われているものの、山地斜面の、「どこが、いつ、どれほどの規模で崩れるのか」というピンポイント予測を導き出すことは方法論的に不可能であった。

表層崩壊の発生場と発生時の予測に向けて、これまで主として分布型流出モデルを援用した研究が行われてきている。これは、山地に供給された降水が、斜面の土層を浅い地下水流（飽和側方流）として流下し、地下水位の上昇に伴う土層-基盤境界での間隙水圧の増大が、表層崩壊を引き起こすと想定するものである。このモデリングでは、当然、谷頭凹地に相対的に地下水が集中することになり、谷頭凹地を崩壊源として樹枝状に崩壊や土石流の痕跡が形成されることが多いという実態を、ある程度説明することができる。そのため、1990年代には、このモデルは表層崩壊の発生場を説明しうるものとして一定の評価を受けた。しかし、分布型流出モデルは斜面傾斜方向への水の移動を前提とするため、降水の供給と間隙水圧の上昇の間に、土層の透水係数に規定されるタイムラグを持ち、降雨ピークとほぼ同時に発生する崩壊のタイミングを説明するには至らなかった。

2000年代以降、よく濡れた斜面土層における急激な間隙水圧の上昇の大部分が、水の鉛直浸透に伴う圧力拡散によってもたらされることが指摘され、この  $10^1 \text{ h}$  程度の短い時間スケールで生起する水文プロセスが、表層崩壊の直接的なトリガーとなっていることが明らかになった。すなわち、分布型流出

モデルは、より長い時間スケール ( $>10^2 \text{ h}$ ) での谷頭凹地の水分状態をモデリングする上では適当であるが、そもそも表層崩壊が、水分量が定常的に多い集水型斜面で発生しやすいという特性を持つために、このモデルの出力である崩壊分布予測は、「見かけ上、実態と整合的となる場合が多い」というものに過ぎないことがわかってきた。事実、近年多発している極めて大きな降雨強度を持つ豪雨イベントでは、平板型の斜面や散水型斜面の一部でも表層崩壊が群発しており、分布型流出モデルの限界が明らかとなりつつあった。

### 2. 研究の目的

本研究では、降雨に起因する山地斜面の表層崩壊について、その発生位置と規模、発生時刻を精緻に予測できる革新的な手法を開発する。航空レーザー測量による細密デジタル地形情報を用いて、地表に存在している土層（崩壊予備物質）の厚みおよび植物根系による補強効果の空間分布を定量的に推定した上で、高時空間解像度のレーダー解析雨量を入力として、斜面への降水浸透による間隙水圧の変動を計算する。これにより、地理情報システム上で斜面安全率の空間分布の時間変化をリアルタイムで追跡し、従来よりも飛躍的に確度・精度の高い警戒・避難情報の発信を可能にするシステムを構築する。

### 3. 研究の方法

本研究では、降雨に対する土層中の間隙水圧の応答を正確に予測するために、長期 ( $>10^2 \text{ h}$ ) スケールでの先行降雨による土層の水分状態を分布型流出モデルで計算した上で、表層崩壊のトリガーとなる短期 ( $<10^1 \text{ h}$ ) スケールでの降水の鉛直浸透による間隙水圧上昇については、圧力拡散モデルを適用するというカップリングを行う。そして、試験流域でのテンシオメータ（負・正圧いずれでも計測可能な間隙水圧計）の埋設および降雨-流出の観測により、モデルの妥当性を検証する。これにより、斜面水文プロセスにおける実態とモデルの乖離は解消され、表層崩壊発生時刻の予測精度を大きく向上させることができる。

一方、表層崩壊の発生位置と規模（土層の崩落範囲と崩土量）の予測には、斜面上に存在している土層の厚みの空間分布に関する情報が必要である。表層崩壊のすべり面は、土層と基盤岩の境界付近に形成されることが多いため、斜面上での土層厚と、土層底部での樹木根系による補強効果を含むせん断強度定数がわかれば、斜面安定解析を行うことができる。従来、斜面上の土層の厚みを予測することは困難とされてきたが、これまで行ってきた宇宙線生成核種の加速器質量分析による土層形成速度の定量化と、航空レーザー測量による細密地形計測を組み合わせれば、斜面の地形曲率等の形状データから土

層の厚みを推定することができる。土層のせん断強度については、不攪乱試料のせん断試験によって直接的に強度定数を求めるとともに、原位置蛍光 X 線分析装置を利用した多数地点での斜面材料（基盤岩及び土層とその遷移過程物質）の定量的風化度判定を行い、強度定数の空間分布推定を行う。また、土層底部での樹木根系によるせん断強度の増分については、航空レーザー測量時に取得される樹冠形状データから、樹高と立木位置を割り出し、根系の伸展モデルを援用することで算定することができる。以上の手法の改良により、地理情報システム上で、表層崩壊によって崩落しうる斜面部位と崩土量を正確に割り出すことができる。

手法の妥当性の検証は、高空間解像度の降雨記録および地形情報が得られる地域で、過去の土砂災害事例について表層崩壊の位置と発生のタイミングを説明できるかどうかを確認することによって行う。具体的には過去の表層崩壊災害を取り上げ、本研究で構築したシステムに、災害時の降雨記録を入力し、実際の崩壊の範囲、位置、個数、崩壊深が正しく出力されるかどうかを検証する。

#### 4. 研究成果

京都近郊の丘陵地にモデル区画を設定し、まず土層の厚みが時空間的に定常状態とみなせる凸型尾根斜面を対象に、土層直下のサブソライト中の石英粒子に含まれる宇宙線生成核種の分析によって、土層の形成速度を決定した。さらに、この尾根斜面において土層の厚みの空間分布を調査し、航空レーザー測量に基づく細密地形モデルから計算される地形曲率と比較して、土層の輸送係数を決定した。そして、土層の形成・輸送計算によって、凹型谷斜面での土層の発達過程をシミュレートできるシステムを構築した。

宇宙線生成核種の分析によって得られた土層形成速度は、 $10^2 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  のオーダーであり、土層の厚みの増大とともに指数関数的に減少するという従来のモデルを支持する結果となった。全体の傾向として土層深は地形曲率の大きな場所（尾根）で 0.5 m 前後と小さく、地形曲率の小さな場所（谷頭凹地）では最大 1 m 程度と大きい。地形曲率が正の領域（凸型尾根斜面）を対象に、指数関数を用いた包絡線を当てはめることで、土層の輸送係数は  $K = 3.2 \times 10^{-3}$  から  $5.6 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ yr}^{-1}$  の範囲であると推定された。

得られたデータを用いて土層の形成・輸送シミュレーションを行った。調査流域近傍の  $400 \times 500 \text{ m}$  の範囲を計算対象とし、土層深の初期値は、尾根における代表的な値を採用して 0.5 m で空間的に一様とした。地理情報システム上で 1 m メッシュ、1 年の時空間解像度でセルベースの繰り返し計算を行った。

このシミュレーションにおいて、おおよそ現在の観測された土層の厚みが再現された

時点で、斜面の安定性を評価すると、植物根系の土層補強効果を考えない場合は、尾根筋と谷筋を除きほぼすべての斜面で斜面安全率が 1 以下、すなわち土層が安定的に存続できない状態となっていることがわかった。一方、一般的な樹木根系による土層の粘着力増分（最大で数キロパスカル程度）を深度の関数として与えた場合では、谷頭凹地のみで斜面が不安定となり、現実にはしばしば観測される表層崩壊の樹枝状分布をよく説明するような出力が得られる。このことは、土層の厚みの増加とともに、森林が結果的に自らの生存基盤を維持するような形で根系を伸展させ土層を斜面上にとどめる効果を発揮していることを示唆している。

豪雨によって発生する表層崩壊は、時折、谷頭凹地から土層を除去することで、地表面と森林を更新する。シミュレーションの結果は、そのサイクルが数百年程度の時間スケールであることを示しており、それよりも長い千年万年スケールでは、流域斜面は谷頭凹地を含めて、土層の厚みの増減を繰り返す準動的平衡状態にあると言える。森林伐採や樹根採掘など過剰な山林利用による人為的インパクトは、その平衡状態を破り、別の定常状態へと山地斜面を遷移させるものであると捉えることができる。本研究の成果は、山地流域環境への人為的インパクトの定量的評価とその影響の将来予測に役立つであろう。これらの研究により、斜面での長期的な地形プロセスと短期的な水文プロセスの両方の定量的モデリングを組み合わせ、表層崩壊発生の予測精度を大きく向上させることができた。

#### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 3 件)

松四雄・外山 真・松崎浩之・千木良雅弘, 2016. 土層の生成および輸送速度の決定と土層発達シミュレーションに基づく表層崩壊の発生場および崩土量の予測. 地形 37, 427-453. 査読あり.

Matsushi Y., Yamakawa Y., Takami Y., Masaoka N., Kosugi K., 2015. Rainfall-recharge-runoff processes through bedrock groundwater: implications for triggering of deep-seated catastrophic landslides. Proceedings of 10th Asian Regional Conference of IAEG, Tp1-09. 査読あり.

Watakabe T., Matsushi Y., Chigira M., Tsou C. -Y., Hirata Y., 2015. Characteristics of shallow landslides, soil layer structure and soil properties on hillslopes underlain by granite and hornfels: cases from the disaster on 20

August 2014 at Hiroshima, Japan. Proceedings of 10th Asian Regional Conference of IAEG, Tp1-P31. 査読あり。

〔学会発表〕(計13件)

Matsushi Y.: River incision, climate change, and bedrock landslides in a high-relief mountainous landscape in Japanese Alps. Japan Geoscience Union Meeting 2016, Makuhari Messe, 26 May 2016. 25.

Matsushi Y.: 4 D-hazard mapping for shallow landslides by heavy rainfall. GADRI Geohazard 2016 Workshop "New generation of geohazard mapping and strategy for its social application", Kyoto University, Japan, 12 Mar 2016.

Matsushi Y., Yamakawa Y., Takami Y., Masaoka N., Kosugi K.: Rainfall-recharge-runoff processes through bedrock groundwater: implications for triggering of deep-seated catastrophic landslides. 10th Asian Regional Conference of IAEG. Kyoto, Japan. 26 Sep 2015.

Matsushi Y., Matsuzaki H.: Controls of soil production, type of landslides and denudation rate of watersheds: cases from several Japanese mountains. XIX INQUA Congress, The International Union for Quaternary Research. Nagoya, Japan. 1 Aug 2015.

Matsushi Y., Kariya Y., Harayama S., Matsuzaki H.: Dating deep-seated catastrophic landslides in Japanese Alps by terrestrial cosmogenic <sup>10</sup>Be: an implication to the influence of climate change in shaping mountainous landscapes. XIX INQUA Congress, The International Union for Quaternary Research. Nagoya, Japan. 31 Jul 2015.

松四雄騎・佐藤達樹・千木良雅弘: 阿蘇カルデラ周辺における地震および降雨に伴うマスマーブメント: 類型化と発生場の特徴. 日本地形学連合, 明治大学, 2016年10月8日.

松四雄騎・松崎浩之・吉田英嗣・金田平太郎: 大起伏山地における大規模岩盤崩壊の発生場と誘因: 地形解析と露出年代測定からの推定. 京都大学防災研究所研究発表講演会, 京都大学防災研究所, 2016年2月24日.

松四雄騎: 崩壊予備物質の空間分布を考慮した表層崩壊の発生場・発生時・発生規模予測. 土砂災害予測に関する研究会, 国立研究開発法人防災科学技術研究所, 2015年12月3日.

松四雄騎・苅谷愛彦・松崎浩之: 大起伏山地の地形形成過程における大規模岩盤崩壊の役割: 日本アルプスを例として. 日本地形学連合, 鹿児島大学, 2015年10月10日.

松四雄騎・苅谷愛彦・松崎浩之: 大起伏急傾斜山地の地形形成過程における岩盤崩壊の役割. 日本地理学会春季大会, 日本大学, 2015年3月29日.

松四雄騎・千木良雅弘・鄒青穎・渡壁卓磨・平田康人: 花崗岩およびホルンフェルスを基盤とする山地における豪雨による表層崩壊の発生機構. 京都大学防災研究所研究発表講演会, 京都大学, 2015年2月24日.

松四雄騎: 災害調査報告: 2014年の豪雨と土砂・水災害—降雨・地質・地形からみた斜面災害—. 京都大学防災研究所研究発表講演会, 京都大学, 2015年2月23日.

松四雄騎・寺嶋智巳・八反地剛・竹田尚史: 伊豆大島における降雨によるテフラの表層崩壊メカニズムと火山噴火史を考慮したハザードマップ作成の試み. 日本地形学連合, 奈良大学, 2014年10月12日.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

○取得状況(計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕  
ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

松四雄騎 (MATSUSHI Yuki)  
京都大学防災研究所 地盤災害研究部門  
山地災害環境研究分野・准教授

研究者番号：90596438

(2)研究分担者

( )

研究者番号：

(3)連携研究者

( )

研究者番号：

(4)研究協力者

( )