

令和元年6月20日現在

機関番号：11101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03149

研究課題名(和文)ネパールヒマラヤにおける地震によるランドスライドリスク評価とその地域防災への利用

研究課題名(英文) Risk evaluation of earthquake-induced landslides in the Nepal Himalaya and its application to local disaster preparedness

研究代表者

檜垣 大助 (Higaki, Daisuke)

弘前大学・農学生命科学部・教授

研究者番号：10302019

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,300,000円

研究成果の概要(和文)：2015年ネパールゴルカ地震でのランドスライド発生箇所の地形特性についてGISを用いて分析し、今後の地震に備えた発生危険箇所評価手法を提案した。同地震では、13,000箇所の主に表層崩壊が発生した。ゴルカ、トリスリ川、ボテコシの3崩壊集中域での分析から、傾斜・起伏量・地上開度が発生要因として重要であることが分かり、崩壊発生・非発生データをバッファ移動分析と過誤確率で解析した結果から、地震による斜面崩壊危険箇所評価手法を提案した。崩壊は農地・宅地と異なる斜面傾斜条件の場で多く発生していたので、ヒマラヤ地域でこの評価手法は土地利用計画面で地震防災に資すると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、2015年ネパール大地震で多発した斜面崩壊発生箇所の地形・地質的分析から地震による崩壊危険箇所を把握する手法を提案したものである。研究成果は、ネパールの復興だけでなく、東西方向に類似した地形・地質構造の山地に多数の人口を擁するヒマラヤ諸国の今後の地震災害の軽減に役立つ。同時に、類似の地質を持つ西南日本の南海トラフ地震想定被害域での斜面災害危険箇所予測にも役立つ。

研究成果の概要(英文)：Based on the geomorphological and geological distribution analysis of the landslides induced by the Nepal Gorkha Earthquake in 2015, a GIS-based landslide susceptibility mapping method is proposed. The 13,000 landslides dominated by shallow disrupted slides are identified. Intensive occurrences in the Gorkha, Trishili River and Bhotekoshi areas reveal that slope gradient, relative relief and ground openness to the sky are the important topographical factors of landslides. Weight of three factors and ranks in each is introduced by the buffer movement analysis and blunder analysis of these factors for the occurrences and non-occurrences of landslides. Since gradient of the slopes occupied by the landslides are different from those of houses and farmlands, the susceptibility mapping might be effective in land use planning for seismic hazard management.

研究分野：斜面防災

キーワード：ゴルカ地震 ランドスライド 表層崩壊 危険箇所評価 地形 ヒマラヤ ネパール

## 様式 C-19、F-19、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

2015年4月25日に発生したネパール大地震（ゴルカ地震）(M=7.8)では、多数の人々が居住するヒマラヤ山岳部で斜面崩壊により広範囲に被害が発生した。この震災からの復興に加え、大規模地震の頻発するヒマラヤ山脈沿いでは、今後の地震に備えた斜面崩壊危険箇所の把握は重要な課題である。また、同地震被害域の地質は中生代以前の硬質岩が主体で、わが国で喫緊の課題となっている南海トラフ地震での想定震源域と近傍の山地のそれに共通する。このため、同地震での崩壊発生箇所の地形・地質特性分析はわが国の地震防災上にも重要な情報を提供する。

### 2. 研究の目的

本研究は、2015年ネパール大地震によるランドスライド発生箇所の分布を把握し、その地形・地質要因を解析することで地震による崩壊・地すべりなどのランドスライド発生危険箇所評価手法を構築することを目的とする。さらに、ネパールヒマラヤの斜面での土地利用別の分布特性と崩壊発生分布を地形的に比較することで、今後の地震被害を受けにくい居住地・避難地選択にも生かす手法を検討することで評価手法をより実用的なものとする。

### 3. 研究の方法

本研究は、2015年ネパール大地震被災域を対象に次のように進めた。1) H28年度～29年度：公開衛星画像による震源域を中心としたランドスライド発生分布の把握と、代表的な崩壊集中域での高精度数値標高データからの発生場地形要因の把握、現地調査による地質条件の把握、主にGIS統計解析にもとづく地形・地質要因抽出と重みづけ、AHP法による地震時ランドスライド発生危険箇所評価モデルの作成、2) H30年度：上記評価モデルによる他のランドスライド集中発生域での検証と必要に応じモデルの改良、その中でのハザードマップ試作、3) ランドスライド集中発生域の中で農地・宅地が広がる代表的範囲を選び、崩壊分布と土地利用分布を地形条件で比較し、ハザードマップの地震防災への適用を検討。

### 4. 研究成果

#### 4.1 地震によるランドスライド発生箇所分布

2015年ゴルカ地震によるランドスライド発生箇所の分布を、Google earth上の地震前後の公開衛星画像を用いて把握した。地形解析には、RESTECの提供するAW3D数値地形データ(5mメッシュ)とASTER G-DEM(30mメッシュ)を用いた。震源断層破壊域で崩壊多発が報告されている7800km<sup>2</sup>の範囲を判読した結果、約13,000箇所の新規ランドスライドが発生し、そのほとんどが表層崩壊であった。発生域1か所当たりの平均面積は1ha以下が92%を占め、発生域で見れば比較的規模の小さい崩壊が多かった。一方で、トリスリ川上流部では、ランタンリルン峰(7200m)での雪氷の大規模崩落と岩屑なだれの複合発生による集落の壊滅、谷中谷の遷急線付近での岩盤地すべり発生(檜垣ほか, 2015a)も見られた。

1) トリスリ川地域、2) ゴルカ地域、3) ボテコシ地域、のランドスライド発生集中域が認められたため、これら地域で、主に崩壊発生域(移動・堆積域を除く)の地形・地質条件を、上記数値地形データと現地調査およびデジタル地質図によってArc GIS10.2を用いて解析した。

ランドスライドは、低ヒマラヤ北部から高ヒマラヤに向かって起伏量が急激に増大する地域で多発し、急激な隆起と侵食による高ヒマラヤの地形形成に強く支配されたと考えられる。谷中谷の急斜面、受け盤斜面の稜線付近の凸型斜面での表層崩壊が多かった。一方で、地すべり地形の多く分布する傾斜斜面(dip slope)でのランドスライド発生は、滑落崖付近を除き少なかった。これらの原因として、地震発生が4月末と乾季末期で、先行降雨が少なかったことが考えられた。また、流下・堆積域を含む崩壊地全体で見ると、形態的に縦長の崩壊が多いが、これもネパールヒマラヤの隆起・侵食による大起伏山地での地震による崩壊の特徴といえる。

#### 4.2 崩壊発生場の地形条件の検討

##### 4.2.1 検討手法

4.1に示した3地域で面積1000m<sup>2</sup>以上の崩壊地の位置を把握し、Arc GIS10.2を用いてAW3D 5mDEMから作成した各種地形量の分布データに重ね合わせ、地形条件の解析を行った。そして、崩壊地に占めるメッシュの平均(崩壊地(平均))とメッシュ出現回数(崩壊地(面積))を求め、各対象地域全体の地形量分布と比較して崩壊発生場の地形特性を把握した。

・起伏量：接峰面と接谷面の差を、崩壊地の大きさを考慮し200m窓の範囲で算出

・傾斜：5mDEMから計算

・標高：500-1500m, 1500-2500m 2500-3500mの高度帯に分け、それぞれの高度帯での傾斜ランク別面積を算出し、そこから高度別の崩壊発生面積を算出

次に、大起伏山地での地震による崩壊の形態特性として、縦長の度合いを見るための1)横縦比、流下・堆積域も含めた崩壊地全体に占める発生域の面積比である2)崩壊源の面積比、を各崩壊地について算出した。

1)横縦比：崩壊地ごとに最高点、最低点の位置と標高を求め2点間の距離(L)を長さとし、

崩壊地の平均的な横幅として崩壊地面積 A から  $A/L$  を求め、 $A/L^2$  で算出、2) 崩壊源の面積比：Arc GIS10.0 の geometry 演算で崩壊地に占める崩壊源の面積比を算出。

崩壊地は、ゴルカ地域（調査域：801km<sup>2</sup>、標高：420-4300m）で 1419 箇所、トリスリ川地域（面積 460km<sup>2</sup>、標高 560-4040m）で 543 箇所、ボテコシ地域（657km<sup>2</sup>）で 1513 箇所あった。

#### 4.2.2 崩壊地発生地の地形条件

##### (1) 起伏量

ゴルカ地域では、調査域全体で起伏量がほぼ 0~300m であった。崩壊地（平均）と崩壊地（面積）は起伏量 100~300m に集中しており、崩壊は、主に調査域の起伏量平均値 151.9m より大きい場所で発生していた。トリスリ川地域もゴルカ地域と似たような傾向であった。ボテコシ地域では、崩壊地の半数が調査域の起伏量平均値 152.4m 程度の場所で発生し、残り半数はそれ以上の起伏量で発生していた（図-4.2.1）。

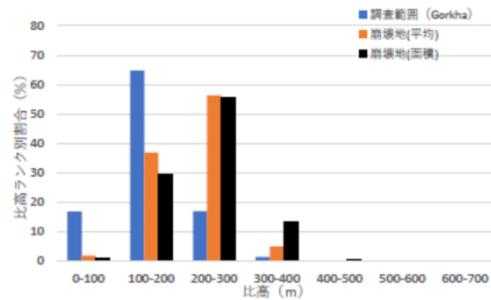


図 4.2.1 ゴルカ地域の起伏量ランク別頻度分布（調査範囲全体、崩壊地）

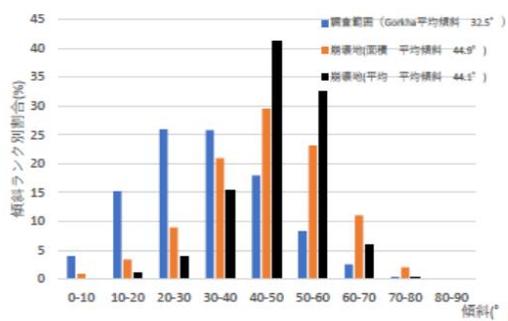


図 4.2.2 ゴルカ地域の傾斜ランク別頻度分布（調査範囲全体、崩壊地）

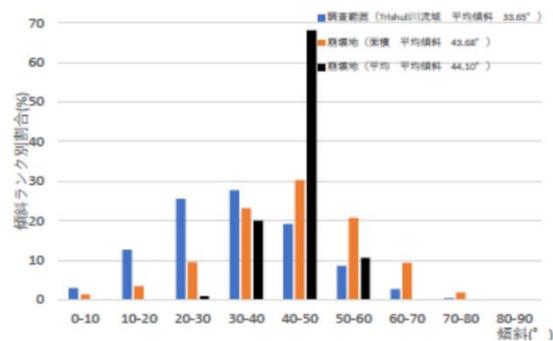


図 4.2.3 トリスリ地域の傾斜ランク別頻度分布（調査範囲全体、崩壊地）

##### (2) 傾斜と標高

ゴルカ地域の調査域全体の平均傾斜は 32.5° で主に 10~50° の範囲にある。これに比べると、地震による崩壊は調査域全体よりも 10~20° 急な斜面で発生していた。また、ゴルカ地域における高度別の調査域面積割合では、高度 500~1500m が 45% で最も多く、1500~2500m、2500~3500m の順になるが、崩壊発生は 1500~2500m で 0.014% と最大であった（図 4.2.2）。これは、2500m 以下の高度で急傾斜な斜面が多いためである。

トリスリ川地域では、調査域全体で平均傾斜 33.7°、10~50° の斜面が多い。高度別では、調査域で 1500~2500m の割合が 40% と最も多いが、崩壊発生面積割合では 1500m 以下が 0.03% で最も多い。これは、谷中谷の急斜面最も低い標高帯にあるのに対応する（図 4.2.3）。

ボテコシ地域では、調査域全体で平均 33.1°、10~50° の斜面が多い。高度別では、調査域で 1500~2500m の割合が 47% と最も大きく、崩壊発生面積割合でも 1500~2500m で 0.016% と最も大きい。

3 地域とも河川により谷の開析が進んでいる。谷開析の進む斜面では遷急線付近で地震時の崩壊が起きやすく、地上開度はその評価要因となる（例えば、檜垣ほか、2015b）。

##### (3) 横縦比

ゴルカ地域では、横縦比 0~0.3 の崩壊が全体の 86% を占める。トリスリ川地域では同じく全体の 78% を占める。両地域では縦長の崩壊地が多い。これは、乾期の地震発生で深層崩壊・地すべりが少なかったことにも関係する。

##### (4) 崩壊源の面積比

崩壊発生源の崩壊地の中に占める面積比は、ほとんど 5~50% の範囲にある。ゴルカ地域で面積比 0~20% の崩壊地の累積箇所数は全体の 41% を占めるのに対し、トリスリ川地域でのそれは 31% であった。これは、ゴルカ地域の崩壊の崩壊源が小さいものが多いことを示す。

##### (5) ボテコシ地域での地すべり地形および地震にともなう崩壊発生場の地形・地質条件

ボテコシ・スンコシ川、インドラワティ川流域に分布する地すべり地形は、標高 3500m 以下に認められる。地すべり地形の分布は、斑状・眼球片麻岩分布地域、千枚岩地域および粘板岩地域に箇所数や面積的に広く分布する。特に片麻岩地域では、規模が大きくなる傾向が強く、北西方向に単斜構造を示す流れ盤斜面に於いて大規模化し、移動体が 10 億 m<sup>3</sup> クラスのヒマラヤ最大級の地すべりも発生していることを発見した。本地域では北西方向に単斜する地質構造が卓越することから層すべりとして発達したことが考えられる。千枚岩地域では MCT の下盤側にあたる

Robang Phyllite 地域で北西向き斜面で規模の大きなものが現れる。Kuncha Phyllite 地域では、卓越した方向性は認められない。MCT に沿った結晶片岩地域でも、北西向き地すべり地形が多く認められるが、規模が前者に比べ若干小さい傾向がある。

地震にともなう斜面災害の大半は河谷内の遷急線に沿って発生した表層崩壊であった。発生箇所は、粘板岩類、ドロマイト、MCT 上盤の結晶片岩分布域および片麻岩類地域に集中していた。いずれも、ボテコシやバレフィコーラ沿いの遷急線下位の 26°~50°の急斜面で発生した。バレフィコーラ上流では南~東向き受け盤斜面での発生が著しい。地すべり地形の再滑動は地震前から活動的であったものを除き認められなかったか、劇的な地形変化を伴わなかった。あらたな深層地すべりの発生も認められなかった。地震発生時期が乾季末期であったことで深層地すべりの発生を抑制したと考えられる。

#### 4.3 3 地区の崩壊特性からみた地震による崩壊発生場所の特徴

ゴルカ地震による崩壊は 3 地域に共通して、200m 窓の範囲での起伏量 100-300m と起伏の大きい場所で、また、傾斜 40° 以上の急斜面で発生していた。各調査域の起伏量・傾斜の平均値より大きい場所で崩壊が多発した。

一方、3 地域の地形条件の差で崩壊集中場所が異なることも分かった。ゴルカ地域で標高 500-2500m、崩壊地(平均)の傾斜 40-60° にある崩壊は稜線直下に発生したもので、7 次谷の河川沿いの急斜面でも崩壊が発生していた。崩壊地形態では、崩壊源が小さい縦長のものが多い。地震加速度が増大しやすい高い稜線の頂部付近で崩壊し、起伏量の大きい斜面を長距離移動したためとみられる。地質図との対比から、このような稜線は、石灰岩や片麻岩など硬質岩が帯状に分布する所に現れる。トリスリ川地域では 7 次谷が深く谷中谷を作る遷急線付近から下の急斜面で崩壊が集中した。ボテコシ地域では、崩壊は高(2500-3500m)・低(500-2500m)の両標高帯で崩壊が多かった。これは、7 次谷周辺の急斜面のほか開析の進んだ支川上流の斜面でも多く崩壊したため、本震だけでなく 2 回の M7 前後の余震が起り揺れの累積で斜面が他地域より多数崩壊したためとみられる。

#### 4.4 崩壊発生危険箇所の評価手法提案

対象地域は、隆起・侵食による大起伏山地をなす。起伏量について、解析メッシュスケールを変えて崩壊発生との整合性を見た結果、500m 窓での起伏量 500-700m で崩壊が多発している傾向が見られた。次に、尾根や凸型傾斜変換線など、地形的な地震力の増加や地形的に不安定となりやすい斜面位置を捉える地形要素として、地上開度(横山ほか, 1999)の変化位置と崩壊位置の関係を見た。尾根肩の位置を捉えるには計算距離の大きい高い位置が良いが、谷壁斜面下部の遷急線は、計算距離のやや小さい方が良い。濱崎ほか(2015)によるバッファ移動分析(検索半径 150m)で地上開度の分布と崩壊発生率の関係を計算し、地上開度の計算距離の大きさとその関係を見ると、計算距離を 1~2 km より小さくすると過誤確率値が大きくなる(図-4.4.1)。そこで、計算距離 2km での地上開度分布と崩壊位置を見ると、尾根部や谷壁の遷急線など地上開度の変化点で崩壊が発生していることが読み取れる。

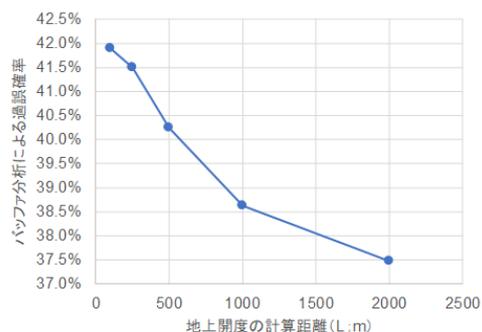


図 4.4.1 地上開度の計算距離とバッファ移動分析での過誤確率の関係

以上から、傾斜・地上開度・起伏量を 10m メッシュでの地形量として評価指標に用い、それらの検索範囲を各メッシュ中心から半径 150m のバッファとし、バッファを移動させるスキップ距離も 150m とした。分析範囲で集積したデータを崩壊の発生データ (X) と非発生データ (Y) に分類し、指標値の階級値 (i) がそれぞれにおいて占める割合 ( $X_i, Y_i$ ) から指標内ウエイト ( $\alpha_i$ ) を決定した。次に、3 つの要因データで、発生及び非発生データごとの  $\alpha_i$  のヒストグラムとその平均値 ( $\mu$ ) 及び標準偏差 ( $\sigma$ ) による正規確率密度関数の分布を求め、要因データごとの過誤確率 ( $P_j$ ) を算出した。 $P_j$  が小さいほど発生・非発生を良く分類できる要因データであることから、過誤確率の逆数  $P_j^{-1}$  を用いて式(1)で要因間ウエイト ( $W_j$ ) を求めた。

$$W_j = \frac{P_j^{-1}}{\sum_{j=1}^n P_j^{-1}} \times 100 \dots \dots \dots (1)$$

最後に、地震時崩壊危険性スコア(S)を要因間ウエイト( $W_j$ )と指標内ウエイト( $\alpha_i$ )の積の総和をして式(2)より求めた。

$$S = \sum_{i,j=1}^n \alpha_i \cdot W_j \cdot \dots \dots \dots (2)$$

危険度評価モデルを構築したゴルカ地域と、構築した危険度評価モデルを適用したボテコシ地域の解析結果を図4.4.2, 図4.4.3に示す。ゴルカだけでなくボテコシ地域でも、危険度評価値と崩壊発生率に良好な相関が得られた。

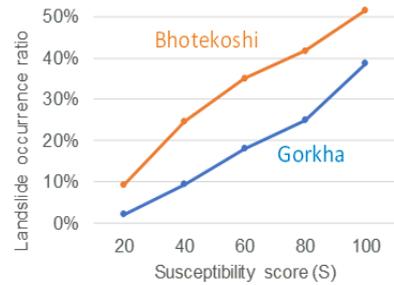


図 4.4.2 危険度評価値と崩壊発生率の関係

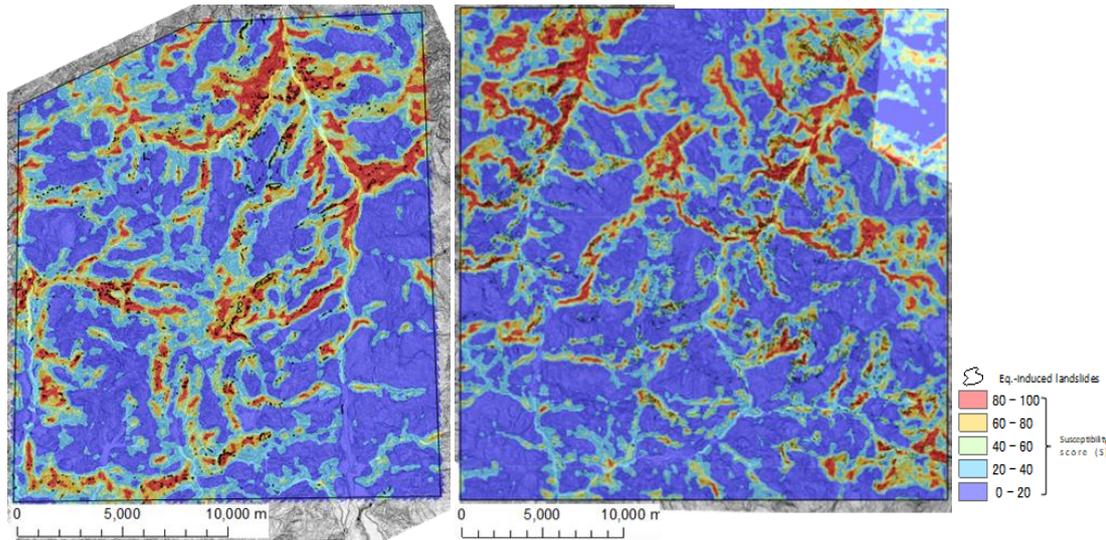


図 4.4.3 崩壊発生危険度評価値 (S) の分布と崩壊箇所対比 (ゴルカ地域 (左) . ボテコシ地域 (右))

#### 4.5 ゴルカ地震による崩壊と土地利用からみた今後の地震による斜面災害危険性

ゴルカ地域西部のアルガート地区 (約 5km<sup>2</sup>) で地震による崩壊 223 箇所の発生場の土地利用を地震発生前の Google earth 衛星画像判読と現地踏査で調べた。この地区の平均傾斜は 36.4° でゴルカ地域で平均的な値を示し、土地利用は、大きい方から農地 (36.6%)、森林地 (35.8%)、草地・低木地 (18.0%)、裸地 (7.3%)、河川 (2.3%) であった。

同地区内の崩壊を含む 100m メッシュの割合、すなわち崩壊率 (17.0%) を図 4.5.1 中に黒線で示す。裸地と草地・低木地ではそれぞれ崩壊率は 41.4%、27.6% と、調査地内の他の土地利用よりかなり崩壊発生が多かった。一方、農地は崩壊メッシュ率 4.7% (メッシュ 77 個)、建造物は崩壊率 0.1% (4 件) と少なかった。以上から、この地域で、建造物や農地は地震による崩壊が影響した場所 (発生・移動・堆積域) にはほとんど立地していなかったことが分かった。

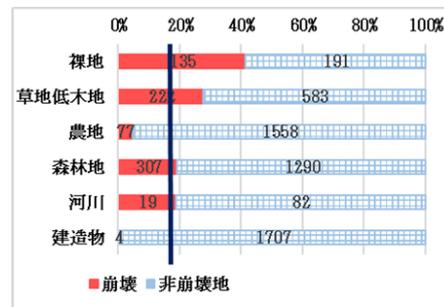


図 4.5.1 土地利用別の崩壊箇所率

#### 4.6 まとめ

2015 年ネパールゴルカ地震でのランドスライド発生箇所の地形・地質特性について GIS を用いて分析し、今後の地震に備えた発生危険箇所評価手法を提案した。乾期であったためほとんどは表層崩壊として同地震の震源域を中心に 13,000 箇所の発生が確認された。その中でゴルカ、トリスリ川、ボテコシの 3 崩壊集中域では、傾斜・起伏量・地上開度が発生要因として重要であることが分かり、崩壊発生・非発生データをバッファ移動分析と過誤確率で統計開析した結果から地震による斜面崩壊危険箇所評価手法を提案した。ゴルカ地域の代表地区での土地利用と崩壊発生場の分析からは、同地震による崩壊は、斜面傾斜の立地条件で農地・宅地とはほぼ異なる斜面傾斜条件の場で発生していた。このため、危険箇所評価手法を今後の土地利用やインフラ開発の計画で活かすことが考えられる。

## 参考文献

濱崎英作・檜垣大助・林一成 (2015) GIS に基づく斜面変動予測評価のためのバッファ移動分析と過誤確率分析法—2008 年岩手・宮城内陸地震での事例研究—, 日本地すべり学会誌 Vol.52 No.2, 3-11.

檜垣大助・八木浩司・若井明彦(2015a) : ゴルカ地震によるネパールでの地盤災害緊急調査報告, 日本地すべり学会誌, Vol. 52 No. 4, 43-46.

檜垣大助・林一成・濱崎英作・(公社) 日本地すべり学会河川砂防技術研究開発実施チーム・蒲原潤一 (2015b) : 日本地すべり学会による国土交通省河川砂防技術研究開発課題の実施—地震による斜面変動発生危険地域表評価手法の開発—, 日本地すべり学会誌 Vol.52 No.2, 37-44.

横山隆三・白沢道生・菊池 祐 (1999) : 開度による地形特徴の表示, 写真測量とリモートセンシング, Vol.38, No.4, pp.26-34.

## 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 4 件)

- ① Tsou, C.Y., Chigira, M., Higaki, D., Sato, G., Yagi, H., Sato, H.P., Wakai, A., Dangol, V., Amatya, S.C., Yatagai A. 2018, Topographic and geologic controls on landslides induced by the 2015 Gorkha earthquake and its aftershocks: an example from the Trishuli Valley, central Nepal. Landslides, 15(5), 953-965. (査読有)
- ② Yagi, H., Hayashi K., Higaki, D., Tsou, C.Y. and Sato, G., 2018, Dormant landslides distributed in upper course of Sun Kosi watershed and landslides induced by Nepal Gorkha Earthquake 2015. Journal of Nepal Geological Society, 55,61-67. (査読有)
- ③ Tsou, C.Y., Higaki, D., Chigira, M., Yagi, H., Dangol, V., Amatya, S.C., Hayashi, K., Kato, H. 2018, Topographic characteristics of landslides induced by the 2015 Gorkha earthquake, Nepal. Journal of Nepal Geological Society, 55(Sp. Issue), 69-75, 2018. (査読有)
- ④ 八木浩司, 2017, 2015年ネパール・ゴルカ地震の被害と地盤災害. 地理, 62-9, 14-21, 古今書院. (査読無)

[学会発表] (計 5 件)

- ① 林一成・檜垣大助・鄒青穎・八木浩司, 2019, 2015 年ネパールゴルカ地震時の崩壊地の分析に基づく危険度評価モデル, 平成 31 年度日本地すべり学会研究発表会, 熊本市.
- ② 八木浩司・下岡順直・長友恒人・松四雄騎・檜垣大助, 2019, ネパール中部・小ヒマラヤ帯の河谷を埋積するように発達する高位段丘とその形成年代. 日本地理学会 2019 年春季大会, 専修大学(川崎市).
- ③ Hiroshi Yagi, Yuki Matsushi., 2018, Gunsakot landslide, a gigantic dormant landslide found in central Nepal Himalayas. JpGU2018, 千葉市幕張
- ④ 檜垣大助・加藤京樹・鄒青穎・林一成・八木浩司・千木良雅弘, 2018 : ネパールゴルカ地震による斜面崩壊発生場の地形・地質特性, 平成 30 年度砂防学会大会, 鳥取市
- ⑤ 檜垣大助・加藤京樹・鄒青穎, 2018, 2015 年ゴルカ地震による斜面崩壊の発生場条件—ネパールゴルカ地域, 2017 年度京都大学防災研究所研究発表会, 宇治市.

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

## 6. 研究組織

(1) 研究分担者

鄒青穎 (TSOU, Ching-Ying)

弘前大学・農学生命科学部・助教

研究者番号 : 40750055

八木浩司 (YAGI, Hiroshi)

山形大学・地域教育文化学部・教授

研究者番号 : 40292403

(2) 研究協力者

林 一成 (HAYASHI, Kazunori)

AMATYA, Shanmukesh Chandra