

令和元年5月26日現在

機関番号：94307

研究種目：基盤研究(A)（海外学術調査）

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02744

研究課題名（和文）地震後に変形が加速する伏在不安定斜面の抽出と崩壊時リスク評価

研究課題名（英文）Extraction of hidden and unstable landslide masses and their risk assessment

研究代表者

小長井 一男（Konagai, Kazuo）

特定非営利活動法人 国際斜面災害研究機構・その他部局等・学術代表

研究者番号：50126471

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 33,300,000円

研究成果の概要（和文）：2015年ネパール・ゴルカ地震で19,000を超える斜面崩壊がヒマラヤ山中で発生した。急峻な山中で広域にかつ同時多発的に発生した斜面崩壊であるため、斜面崩壊の発生・流動・堆積を支配する3つのパラメータと、地形の集水度を表すrain concentrationの4つのパラメータについて、この地域の被害を説明する最適値の組み合わせを求めた。特に斜面崩壊が集中したTrishuli川河谷沿いの対象地域では、実際の斜面崩壊の73%がこの条件に該当することを示すとともに、崩壊しても不思議でなかった30%の斜面や、地震後も緩慢に変形する斜面の安定性や復旧対応の検討を他地域も含めて行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2015年ネパール・ゴルカ地震が襲った当該地域はヒマラヤの山中にあってアクセスも困難で、多数の崩壊の中で特定の斜面崩壊だけに特化した調査は現実的ではない。本研究は、広域の斜面災害の全体像を、数を絞った物理的パラメータで的確に迅速に把握し、地震後も変形が継続する斜面への対応検討の事例を示したものであり、ネパールに限らず、類似の被害が広域かつ多数に及び人的・物的資源も限られた状況での復旧戦略策定への貢献につながる道筋を示したところに学術的・社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：The Gorkha Earthquake of April 25, 2015, Nepal, has caused many landslides along the Trishuli River in Himalayas where a straightforward method to analyze every detail of slope movement is difficult for seeing the whole picture of the disaster. A numerical approach has been taken to assess the remaining risk of landslides. The debris mass movements are described in simulations with only four parameters, namely, the critical angle, Gauckler-Manning roughness coefficient, angle of repose, and the rain concentration, an index to describe rain-water collectivity of gulleys. The optimum set of these parameters, obtained through a batch of numerical simulations to minimize the prediction error, was then used to identify locations of unstable colluvium deposits remaining along gullies on steep valley walls of the Trishuli River.

研究分野：工学

キーワード：斜面災害 地形変動 国土保全 ネパール・ゴルカ地震

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

2015年4月25日、ネパールの首都カトマンズ北西77km付近の深さ15kmを震源としてモーメントマグニチュード7.8のゴルカ地震が発生した。この地震の被害総額は67億ドルを上るとされた。これはネパールのGDPの約1/3に相当する。2015年6月25日にカトマンズで開催された支援国会議では、各国および国際機関から総額約44億ドルの支援が表明されたが、世界銀行総裁のJim Yong Kim氏は「金額の多寡も大事だが、それ以上にそれがどのように使われるかが重要だ」と懸念を隠さなかった。政情不安な最貧国では、支援金の使途が不明になり、これが復興を著しく停滞させかねないことへの警戒感の顕れだった。地震で斜面上に残された不安定な土塊は、その後の豪雨などで土石流化することがある。また緩慢に変形が累積し長期に復興への阻害要因となることもある。しかし地震後すぐに顕在化しない災害への対応は、往々にして後回しにされ、それが結局、復興を大きく阻害する心配があった。ネパールは、その電力需要の9割を水力発電（707MW程度、2011年）に依存し、その多くは流込式取水であるため、震災後の土石流の影響が深刻になりかねない事情もある。したがって不安定な土塊がどこにどのような形で残され、今後どう変形していくのかの情報抽出が必要であった。

### 2. 研究の目的

この地震の余震域は、ヒマラヤ山脈に沿って次第に南東部に広がり、5月12日にはM7.3の最大余震が発生している。これらの一連の地震で、ヒマラヤ山脈から流れ出る主要河川沿いに多数の斜面崩壊が発生した。その総数は衛星写真判読で19,000ほどに及ぶとされた（それをはるかに上回るとの調査結果もある）。本研究ではこれらのうち、ヒマラヤを横断する基幹ハイウェイ沿いの崩壊地を対象に、どのような条件下で崩壊が集中したのか、また伏在している不安定斜面が残されているのかの検討を行い、さらに崩壊した斜面の痕跡から今後の復興に対して必要な情報を抽出する手法を示すことを目的とした。その手法は、急峻でアクセス困難な山岳地で、限られたリソースしか使えない途上国でも可能なものであり、また対象地域ばかりでなく、より広域で復興に役立つ情報抽出にも活用できることも求められた。併せて、地震後も変形が緩慢に進行している疑いのある場所は首都カトマンズの盆地内部でも報告されていたため、その変形のメカニズム解明と対応の検討を行うことも目標に組み入れた。

### 3. 研究の方法

この地震で斜面災害が多発したヒマラヤの急峻な山岳地帯を横断するネパールの基幹ハイウェイには、アラニコハイウェイとパサンラミュハイウェイがある。本研究では、研究開始時点で通行可能であったパサンラミュハイウェイ沿いのTrishuli川河谷の谷壁に多発した崩壊地を主たる対象にした。ここで精密な地形変動計測、降雨観測などを行い、斜面の傾斜、集水地形の抽出、崩壊土砂の堆積状況の変化などを3年間にわたり調査した。そして、(1)地震で崩壊が集中した斜面を記述する地形的パラメータ、崩壊土砂の流動過程を支配する物性値、そして堆積土砂の範囲を支配したパラメータの解析と検討を行った。さらに(2)“地震で崩壊しても不思議ではなかった”斜面のエリアを抽出し、その一部についてドローンによる近接撮影を含め、精査し、今後さらなる調査が優先的に必要な個所として、ネパール復興庁やネパール地質学会など関連機関と情報共有を図ることとした。さらに、地震時に陥没し地震後も緩慢な変形がしばらく続いた疑いのある(3)首都カトマンズの盆地内部を東西に横断するアラニコハイウェイの一部区間で、その原因を地盤調査から探り、今後カトマンズでの発生が懸念されている地震についての対応案をまとめた。

### 4. 研究成果

(1) Trishuli川河谷の谷壁に多発した崩壊地での調査成果：

対象地域で多数の崩壊が集中したのはRamcheからDhuncheに至る深さ1,000mを超えるTrishuli川の谷壁であり、雲母を多く含み所々に石英の貫入の見られる風化した変成岩を主体とする。崩壊が集中した斜面は、どのような地形的パラメータで記述されるのか、崩壊土砂の流動過程を支配する物性値はどのようなものだったのか検討するため、研究分担者の松島亘志、そして本研究の研究員であったAlessandra Mayumi Nakataらが開発した「深さ方向粒子積分法」を用いた解析を行った。この解析では、崩壊は斜面がある限界角 $i_f$ を越えた場所で発生し、土砂の流動はマニングの粗度係数 $n$ に依存し、そして最終的な堆積域は安息角 $i_d$ に支配されるとして、これらの3つのパラメータの対象地域での平均的な値を推定した。さらに、地形による集水効果を表す指標としてRain concentration,  $r_c$ というパラメータを導入した。これは、「深さ方向粒子積分法」で扱う土粒子を水の粒子に置き換え、その水が完全に排水される過程で計算領域内の各格子にどの程度の水が通過するかを計算して得られる指標であり、この指標が大きいほど地形の集水性が高いことを示すものである。対象地域でこれら4つのパラメータの最適値を求めたところ、 $i_f = 41^\circ$ ,  $n = 0.2 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ ,  $i_d = 10^\circ$ ,  $r_c \geq 30$ で観測された崩壊跡の73% (True Positive, TP) が説明できることが示された。一方、この条件に当てはまりながら崩壊しなかった面積 (False Positive) は30%であった (図1)。

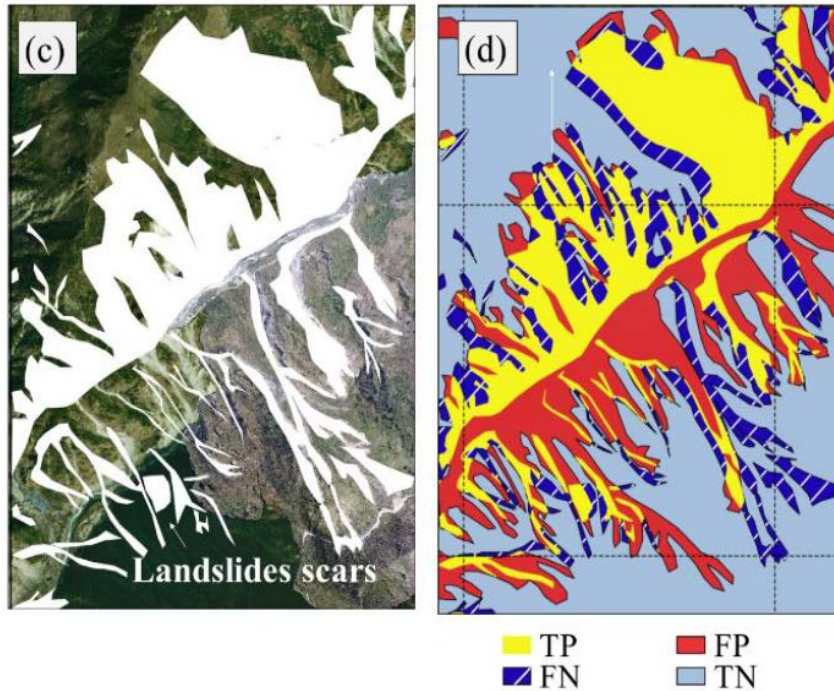


図 1. 実際崩壊した斜面(左)と対象地域を代表する四つのパラメータの組み合わせ( $i_f=41^\circ$ ,  $n=0.2\text{ m}^{-1/3}\text{s}$ ,  $i_d=10^\circ$ ,  $r_c\geq 30$ )で崩壊するとした斜面(右)の比較(雑誌論文①) 略号は以下の通り、TP: True Positive, FP: False Positive, FN: False Negative, TN, True Negative.

このパラメータは、対象地域が変われば変化する。仮に対象地域を谷壁北西側にのみ限定した場合の解析を行うと、四つのパラメータの組み合わせは( $i_f=40\sim 41^\circ$ ,  $n=0.1\text{ m}^{-1/3}\text{s}$ ,  $i_d=30^\circ$ ,  $r_c\geq 63$ )となり、特に堆積域を支配する  $i_d$  に大きな差異が現れた(雑誌論文④)。これは谷底の堆積域で片側斜面からの土砂のみを考えた影響が現れたもので、解析対象を決める場合に、影響のある土砂供給源(崩壊の源頭部)を除外することのないようにすることが大切であることを示している。一方で崩壊源の限界角  $i_f=40\sim 41^\circ$  は谷に沿って大きく変化することがなく、Trishuli 川沿いが広域に類似の風化変成岩で覆われていることと矛盾しない。

(2) 「地震で崩壊しても不思議ではなかった斜面」の抽出：

$i_f=40\sim 41^\circ$  が谷沿いに大きく変化しないという上記の検討結果は、Trishuli 川沿いが広域に類似の風化変成岩で覆われていて、滑り残った場所でも不安定な風化層が残っている可能性を示唆している。対象地の急峻な谷壁は、かつて段々畑で埋め尽くされ人々の営みがあった場所であるが、そこに通じる狭隘な道路も地震ですべて寸断され、取り残された住民はヘリコプターで搬送され、やむなく洪水の危険がある谷底の仮設キャンプで生活している状況であった。こうした斜面に機材を運び上げての調査は困難であることから、当面、 $i_f=40\sim 41^\circ$  を超える斜面が Ramche から Dhunche にどの程度存在し、今回の地震で崩落しなかったエリアはどのように分布しているのか、また平均的な風化土層厚はどの程度なのかを衛星画像から作成された地震前後のデジタル標高モデル(Digital Elevation Model, DEM)、ドローン撮影画像などから検討した。その結果、崩落した部分に累積していた風化土層厚は平均 11 m ほど、川沿いの調査対象域のおよそ 760,000  $\text{m}^2$  の崩壊源から滑り落ちたであろう土砂量は 8,700,000  $\text{m}^3$  ほど、調査時点で川底に残存した堆積土砂量は 2,100,000  $\text{m}^3$  程で、これは崩落した土砂のほぼ 3/4 がすでに流されてしまったものと推定された。そして仮に  $i_f=40\sim 41^\circ$  以上で残存している斜面が同様に平均 11m の風化土層で覆われているものとするれば、その土量は 13,000,000  $\text{m}^3$  に達すると推定された。これらは、今後の実証的な調査を待たなければならない数値であるが、その重要性に鑑み、ネパール地質学会のジャーナルにも掲載されるとともに(雑誌論文④)、ネパール復興庁にも報告された。

調査地の地形調査を進める中で、パサンラミュ ハイウェーは  $i_f=40\sim 41^\circ$  に達する斜面を避けるように建設されていたことが確認された。しかしながら  $i_f=40\sim 41^\circ$  以下の緩斜面でも、厚く堆積した崩積土が緩慢に変形し続けていること、またその変動量はモンスーンの降雨期の雨量に強い相関を示している様子が確認された(次ページ、図 2)。ハイウェーはこの緩慢な動きに従って徐々に移動し、狭隘で悪路となったハイウェーからの転落事故も報告されている。

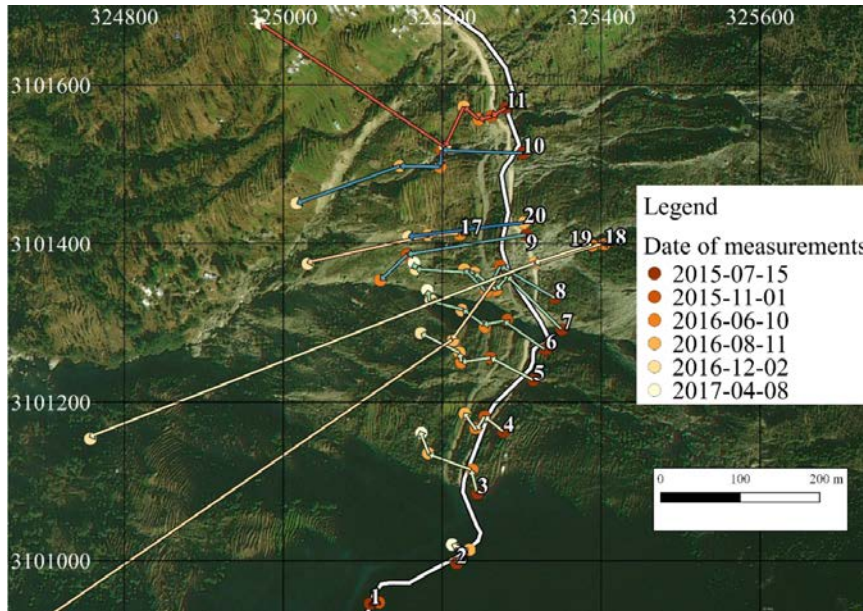


図2 パサンラミュ ハイウェイの Ramche 付近でのクリープ変形：各点の観測変位は 1000 倍に誇張されている（雑誌論文①）。特に 2017 年 8 月にはネパール全土で 25 人が死亡した豪雨があり、この時期の累積変位が大きくなっている。

上記(1), (2)の研究で解析・検討された「深さ方向粒子積分法」の 4 つのパラメータのばらつきは、ヒマラヤの急峻な調査地域内では比較的小さいが、他地域では、異なる地形・地質条件も反映し異なってくるはずである。ネパール国内の他地域、あるいは他国での活用を考えた場合には、研究計画調書に記載したように、「同時多発の斜面災害」としての類似の事例を検討しておく必要がある。最終年度には 2017 年のスリランカの豪雨斜面災害や 2018 年日本の北海道胆振東部地震の事例についても情報を収集し、ネパールの関係者とその共有を進めている。

(3) カトマンズ盆地内アラニコ ハイウェイの一部陥没：

アラニコ ハイウェイの一部、カトマンズ盆地を東西に走る Kathmandu – Bhaktapur 道路は、片側 2 車線のネパールで最も重要な基幹道路である。盆地内の丘陵部分を 10m 程下刻する小さな谷地をこの道路が斜めに横断する盛土部が地震で陥没した。谷地の中央辺りで道路舗装が少し競り上がっているので、谷を挟む両側の傾斜地が陥没ばかりでなく谷の中心部に向かって流動し、互いに押し付けあったものと推定された。

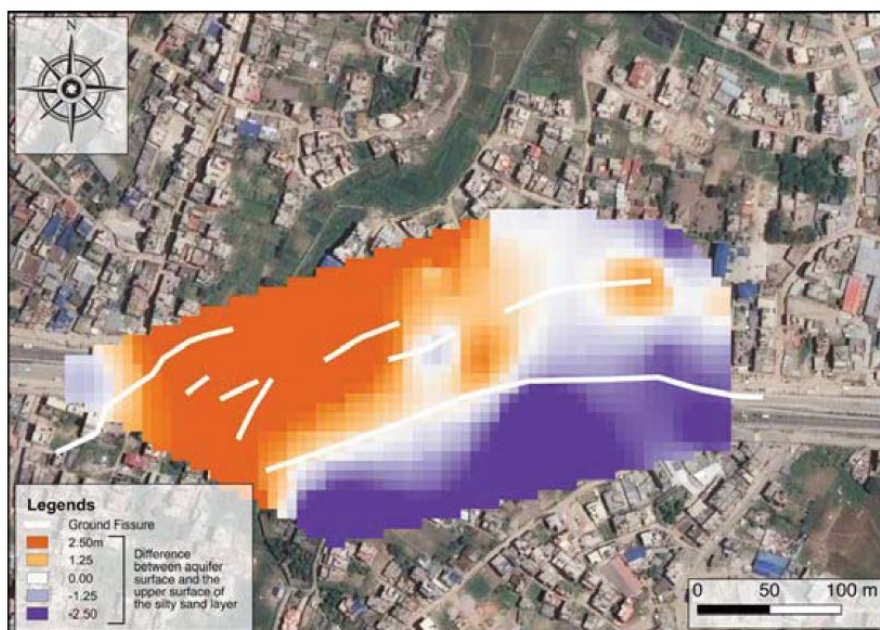


図3 Kathmandu – Bhaktapur 道路の陥没区間地表に現れた段差、亀裂の位置（白線）と地下水面下にある砂質シルト層（橙色）（雑誌論文⑤および学会発表②より作成）

地震から2か月後の研究代表者らの調査で、緩慢な動きが継続している痕跡が指摘されたが、このことで復興庁は、道路を横断している歩道橋に落橋の恐れがあるとして、これを撤去した(雑誌論文⑩)。本研究の実施期間内に、表面波探査やボーリング調査、放射性炭素<sup>14</sup>Cによる年代調査、家屋の井戸の水位調査を行い、以下の結果を得た。すなわちこの谷地に面する傾斜地の5mほど地下に砂質シルト層があって、これが地下水下にある部分が軟化(液状化)し、傾斜地全体が小谷地に向かって移動した可能性が高い。地表にできた段差や亀裂も、この推定された移動土塊の縁に沿うように現れている(図3)。ネパールでは次の巨大地震の発生が懸念されているが、各家庭に備えられている浅井戸などを用地下水のくみ上げを行うことで、液状化発生域を大幅に低減できる可能性を示し、ネパール復興庁に提言している。これらの成果の一部は雑誌論文⑤や、ネパールで2017年に開催されたInternational Association of Engineering Geology and the Environmentの国際会議で報告された(学会発表②)。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 10件)

- ① Alessandra Mayumi NAKATA, Kazuo KONAGAI (2019). Overall features of multiple landslides along Trishuli River triggered by the 2015 Gorkha Earthquake, Nepal, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE)), 75(4), (査読有, 登載決定) .
- ② Kazuo KONAGAI, Alessandra Mayumi NAKATA (2019). Runouts of landslide masses detached in the 2018 Hokkaido Eastern Iburu Earthquake, JSCE Journal of Disaster Fact Sheets, FS2019-E-0001, 1-6, <http://committees.jsce.or.jp/disaster/FS2019-E-0001>. (査読有)
- ③ Kazuo KONAGAI, Seiji NISHIYAMA, Kanta OHISHI, Daiki KODAMA, Yuki NANNO (2018). Large ground deformations caused by the 2018 Hokkaido Eastern Iburu Earthquake, JSCE Journal of Disaster Fact Sheets, FS2018-E-0003, 1-8, <http://committees.jsce.or.jp/disaster/FS2018-E-0003>. (査読有)
- ④ Hikaru TOMITA, Alessandra Mayumi NAKATA, Kazuo KONAGAI, Takashi MATSUSHIMA, Masataka SHIGA, Takaaki IKEDA, and Rama Mohan POKHREL (2018). Landslides triggered by the 2015 Gorkha Earthquake and analysis of their long-lasting impact, Journal of Nepal Geological Society, 55, 77-84, <https://doi.org/10.3126/jngs.v55i1.22793>. (査読有, 国際共著)
- ⑤ 志賀 正崇, 小長井 一男, 池田 隆明 (2018). 2015年ネパール・ゴルカ地震による高速道路盛土部とその周辺部の亀裂及び段差の発生原因に関する考察, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), 74(4), [https://doi.org/10.2208/jscejseee.74.I\\_1070](https://doi.org/10.2208/jscejseee.74.I_1070). (査読有)
- ⑥ Md Aftabur RAHMAN and Kazuo KONAGAI (2018). A hands-on approach to estimate debris flow velocity for rational mitigation of debris hazard, Canadian Geotechnical Journal, 55(7), 941-955, <https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0211>. (査読有, 国際共著)
- ⑦ Kazuo KONAGAI, Masataka SHIGA, Takashi KIYOTA, Takaaki IKEDA, Ground deformation built up along seismic fault activated in the 2016 Kumamoto Earthquake, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE)), 73(4), I\_208-I\_215, [https://doi.org/10.2208/jscejseee.73.I\\_208](https://doi.org/10.2208/jscejseee.73.I_208). (査読有)
- ⑧ Md Aftabur RAHMAN, Kazuo KONAGAI (2016). Substantiation of debris flow velocity from super-elevation: a numerical approach, Landslides, 14(2), 633-647, <http://dx.doi.org/10.1007/s10346-016-0725-3>. (査読有, 国際共著)
- ⑨ Hitoshi MATSUBARA, Omer AYDAN, Kazuo KONAGAI, Rama Mohan POKHREL and Masataka SHIGA (2016). Rock slope failures, liquefaction and permanent deformation in 2015 Gorkha earthquake, Nepal, JSCE Journal of Disaster FactSheets, FS2016, E-0001, 1-11, <http://committees.jsce.or.jp/disaster/FS2016-E-0001>. (査読有)
- ⑩ Kazuo KONAGAI, Rama Mohan POKHREL, Takkaki IKEDA, Masataka SHIGA, Rahman Md AFTABUR, Hiroki OKUDA (2016). Follow-up report of damage caused by the Gorkha Earthquake, Nepal, of April 25th, 2015, JSCE Journal of Disaster FactSheets, FS2016, E-0002, 1-9, <http://committees.jsce.or.jp/disaster/FS2016-E-0002>

[学会発表] (計 8件)

- ① Alessandra Mayumi NAKATA, Kazuo KONAGAI (2018). Analysis of remaining risk of landslides in Nepal, 38<sup>th</sup> JSCE Symposium on earthquake Engineering, IIS., University of Tokyo.
- ② Masataka Shiga, Kazuo Konagai, Rama M. Pokhrel, and Takaaki Ikeda (2017). The 11th Asian Regional Conference of International Association of Engineering Geology

- and the Environment, Kathmandu (Nepal).
- ③ Hikaru Tomita, Alessandra Mayumi Nakata, Kazuo Konagai, Takashi Matsushima, Masataka Shiga, Takaaki Ikeda and Rama Mohan Pokhrel (2017). Landslides triggered by the 2015 Gorkha Earthquake and analysis of their long-lasting impact, The 11th Asian Regional Conference of International Association of Engineering Geology and the Environment, Kathmandu (Nepal).
  - ④ 志賀正崇, 小長井一男, 池田隆明 (2017). 第 37 回土木学会地震工学研究発表会, 熊本.
  - ⑤ Alessandra Mayumi NAKATA, Hikaru TOMITA, Kazuo KONAGAI, Takashi MATSUSHIMA, Masataka SHIGA, Takaaki IKEDA, Rama Mohan POKHREL (2017). Analysis of landslides effects triggered by the 2015 Gorkha Earthquake along Trishuli River, 37<sup>th</sup> JSCE Symposium on earthquake Engineering, Kumamoto.
  - ⑥ 志賀正崇, 小長井一男, 清田隆, 桑野玲子, 片桐俊彦, 池田隆明, 柳浦良行, 武政学, 吉川猛, Pokhrel Rama Mohan (2017), ネパール・ポカラにおける地盤陥没被害の概要と現地調査, 第 52 回地盤工学研究発表会, 名古屋.
  - ⑦ Kazuo KONAGAI in place of Md Aftabur RAHMAN (2017). 16th World Conference on Earthquake Engineering, Convention Center, Santiago, Chile.
  - ⑧ Kazuo KONAGAI (2016). Some matters of geotechnical concern for rational reconstruction of areas hit by the April 25<sup>th</sup>, 2015, Gorkha earthquake, Invited lecture at the 8th Nepal Geological Congress, Yak And Yeti Hotel, Kathmandu, Nepal.

[その他]

以下のウェブサイトにも成果の一部 (リンク) 掲載

(英語) <https://main-konalab.ssl-lolipop.jp/home-e/index-projects.html>

(日本語) <https://main-konalab.ssl-lolipop.jp/home-j/index-projects.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名: 松島 亘志  
ローマ字氏名: (Matsushima Takashi)  
所属研究機関名: 筑波大学  
部局名: システム情報系  
職名: 教授  
研究者番号 (8 桁): 60251625

研究分担者氏名: 清田 隆  
ローマ字氏名: (Kiyota Takashi)  
所属研究機関名: 東京大学  
部局名: 生産技術研究所  
職名: 准教授  
研究者番号 (8 桁): 70431814

研究分担者氏名: 竹内 渉  
ローマ字氏名: (Takeuchi Wataru)  
所属研究機関名: 東京大学  
部局名: 生産技術研究所  
職名: 教授  
研究者番号 (8 桁): 50451878

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名: 池田 隆明  
ローマ字氏名: (Ikeda Takaaki)

研究協力者氏名: ポカレル ラマ モハン  
ローマ字氏名: (Pokhrel Rama Mohan)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。