

令和 5 年 5 月 1 日現在

機関番号：15201

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01980

研究課題名(和文) 降下火砕物斜面地域における降雨・地震による長距離運動地すべりの発生・運動機構

研究課題名(英文) Occurrence and motion mechanism of long runout landslide due to rainfall and earthquake in tephra deposit slope

研究代表者

汪 発武 (Wang, Fawu)

島根大学・その他部局等・名誉教授

研究者番号：10324097

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は胆振地震によって群発的に発生した高速長距離運動地すべりの発生機構及び運動機構を研究する。詳細な現地調査を実施し、地すべりが発生する地形、地質、地下水状況を解明したとともに地すべりの長距離運動の特徴も把握した。最も重要なのは、現地における長期観測によって、すべり面となるTa-d層の破砕物が間隙比が極めて高く、せん断抵抗が極めて弱く、また普段の降雨と関係なく高い飽和度を持つ持水性と吸水性が見出された。さらに、その高い持水性と吸水性の根本的な原因であるハロイサイトの存在も確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義：降下火砕物Ta-d層が風化作用によって、ハロイサイトが形成され、高い間隙比、低いせん断抵抗、季節的降雨と関係なく、地下水面以上でも高い飽和度を持つことで、地震によって、すべりゾーン液状化現象が発生することで、群発的高速長距離運動地すべりの原因として見出された。

社会的意義：従来の排水工法が効かなくて、ハロイサイトを排除すれば、高速長距離運動地すべりを根本的に対処できることを意味しており、今後の斜面防災に資することとなった。

研究成果の概要(英文)：This project studies the initiation and motion mechanism of rapid and long runout landslides generated in clusters caused by Iburi earthquakes. In this study, we conducted a detailed field survey to elucidate the topography, geology, and groundwater conditions where landslides occurred, and to understand the characteristics of the long-distance motion of the landslides. We also used GIS methods to analyze many influence factors that contributed to the occurrence of landslides. Most importantly, long-term field observations have revealed that the soil in the Ta-d layer, which is the sliding zone, has an extremely high void ratio, extremely weak shear resistance, and high degree of saturation regardless of rainfall. Furthermore, the existence of halloysite, which is the fundamental reason of its high water retention and water absorption, was confirmed, and it make the study useful for landslide disaster prevention.

研究分野：斜面防災

キーワード：斜面防災 地すべり 高速長距離 火砕物 風化 粒子破砕 非排水せん断 粘土鉱物

1. 研究開始当初の背景

2018年9月6日の北海道胆振東部地震によって、降下火砕物の分布地域で3,800個所を超える斜面崩壊が発生し、そのほとんどは高速かつ長距離で運動し、その下方にある家屋や建築物、道路、農地などに破滅的なダメージを与えた。人口密度の低い農村部にも関わらず、41人の死者を出した。今回の災害に対して、「降下火砕物の斜面地域」で、台風通過による17mmの降雨量が発生した直後の地震によるものとの共通認識によってなされているように思われる。

2. 研究の目的

今後の降下火砕物斜面地域における降雨・地震による斜面防災に資するために、以下のことを解明しなければならない。

- a) 降雨・地震による斜面崩壊に影響する地形、地質条件（特に火砕物の年代効果）；
- b) 斜面崩壊発生および長距離運動における降下火砕物の水理特性と動的せん断挙動；
- c) 降下火砕物での高速長距離運動地すべりの発生・運動機構、判定・予測方法

よって、本研究の目的は、粗粒の軽石から細粒の火山灰まで含む「空中堆積構造を有する降下火砕物」を研究対象とし、特定の地形条件下で、降雨による地下水の浸透・流出過程において、降下火砕物破碎性の年代効果を評価し、地震動条件での変形-破壊-流動プロセスを微視的粒子スケールから火砕物堆積構造まで解明することである。

3. 研究の方法

- (1) 詳細地質調査で、降下火砕物の詳細記載と構造解明を実施し、特に風化過程における組成成分の影響と年代効果に注目する。
- (2) 降下火砕物の力学および水理的特性を調べるために、代表斜面や露頭における簡易貫入試験、硬度試験、透水試験を実施し、降下火砕物の原位置せん断強さ、透水係数を測定する。
- (3) 降下火砕物斜面における降雨浸透過程を把握するために、土壌水分センサーによる鉛直方向浸透過程、自然電位観測による地下水流動方向を観測する。定体積現場一面せん断試験を実施し、軽石層の非排水せん断特性を調べる。

4. 研究成果

胆振地震による地すべりは、主に震源地の北西、北海道南部の厚真市とその周辺でPGAが7.0-8.5 m/s<sup>2</sup>の地域で発生した。PGAが7.0~8.5 m/s<sup>2</sup>と高い地域は地すべりの大部分を占めており、地すべり数率(LSNP)と地すべり面積率(LSAP)がそれぞれ92.5%と96.8%となっている(図1)。火砕物Ta-d層の厚さが全体で<0.3 mであるPGA >9.0 m/s<sup>2</sup>の地域では、地すべりはほとんど発生しなかった(図3)。これらの特徴は、テフラの拡散(特にTa-dの拡散)が、従来認識されていた地震動や斜面の急峻さの要因に加えて、浅い胆振地すべりの発生と分布に重要な影響を及ぼしていることを示している。

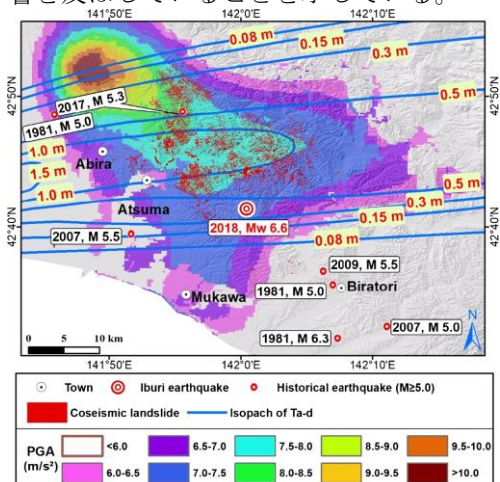


図1 胆振地震による地すべり分布とPGA及び火砕物Ta-d層の分布範囲

胆振地震による地すべりは主に旧地表面をすべり面として運動した浅い並進地すべりである。地すべりの多くは移動性が高く運動距離が長いのが特徴で、すべり面のほとんどがすべり土塊と重なることなく露出している。現地調査を通じて、滑り塊がTa-d軽石とその下にある古土壌の界面に沿って移動したことが発見された。すべりゾーンでの液状化と、すべり運動中に飽和

軽石層(図2のL5、L6、L7)内で粒子破砕が起きた。破砕・液化した軽石層は堆積領域に広がり、上部すべり土塊が水平方向に伸長した。これを考慮して、胆振地すべりの崩壊モードの可能性を図2に示している。火砕物は元の斜面に均等に堆積したため、破壊後の傾斜角は変化していなかった(図2a)。その上方に急峻な滑落崖が現れ(図2b)、将来の地震振動による逆退性斜面崩壊の可能性が高くなる。

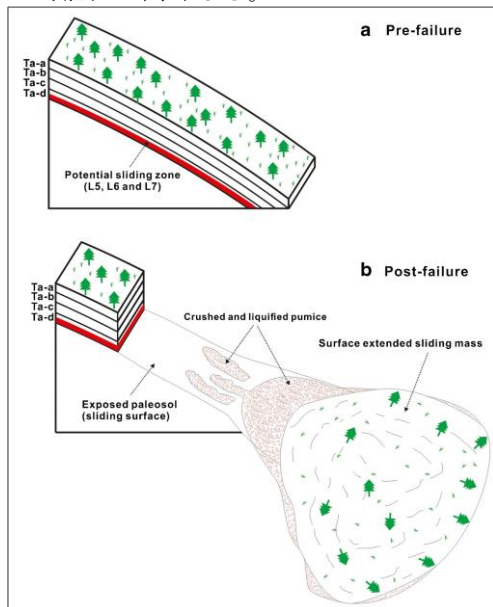


図2 地震地すべりの破壊モードを示す模式図。A 崩壊前火砕流堆積物斜面；b 破壊後の長距離運動並進性地すべり

地すべり発生地域は、樽前火山、恵庭火山、支笏火山、倶多楽カルデラを起源とする空中落下テフラによって覆われていた。樽前火山からの空中落下テフラは、Ta-a(西暦1739年)、Ta-b(西暦1667年)、Ta-c(2.5ka)、およびTa-d(8.7-10ka)がある。これらの層は、胆振地すべりの主要なすべり体を構成している(図3)。樽前火山の空気落下テフラと胆振地すべりの分布の相関分析から、地すべりの発生率はTa-cおよびTa-dアイソパックとよく一致している。胆振地すべりは、主にTa-dの揺れによる破壊を特徴としている。Ta-cとの相関関係も存在するが、この層ははるかに薄く(図5a)、掘削現場では主要な破壊面として特定できない。したがって、本研究では、胆振地すべり発生率とTa-dアイソパックの相関のみが描かれている。

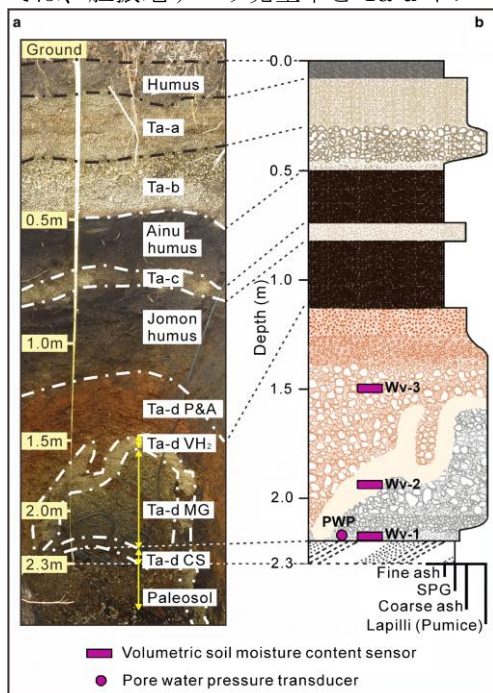


図3 典型的な地すべり冠部の代表的な層序断面図(a)と現地観測センサの位置を示す層序柱(b)

粒度分析によると、Ta-d 軽石は Ta-d VH2 で >20% のピークを持つかなりの粘土含有量を持

っている(図4a)、粘土サイズの粒子は他の層(腐植質や古土壌でさえ)にはほとんど存在しない。また、胆振地震ではTa-d VH2で $W_v$ が約100%ピークに達するため、Ta-d VH2はほぼ完全に飽和状態を維持していたと考えられる(図4b)。Ta-d VH2のほぼ完全な飽和状態を確認するために、スイカとナシの $W_v$ 測定も実験室で行われた。スイカの $W_v$ は84.6から94.4%の範囲であり、ナシの $W_v$ は85.3%から94.4%の間で変動する。これは、Ta-d VH2の水分含有量がスイカの水分含有量よりもさらに高いことを意味する。したがって、高い $W_v$ は、Ta-d VH2の高い飽和度を示すだけでなく、緩い状態も意味する。同様に、Ta-d VH2の乱されていない土壌でも最も高い含水比が観察された。

Ta-d VH2の高度な飽和度は、その顕著な特徴の1つである胆振地すべりの高い移動性を完全に説明できる。高い飽和度に加えて、低い土壌強度は斜面崩壊に有利な特性である。硬さ試験で得られた一軸圧縮強度値は、Ta-d VH2では最小値(ほぼゼロ)に達し、土壌強度が極めて低いことを示している(図4c)。乱されていない土壌の間隙比もテストされ、Ta-d 軽石で8の最も高い間隙比が確認された(図4c)。Ta-d MGサブユニットは、主に間隙比が最も高い比較的健全な軽石粒子で構成されています。要約すると、非常に低い一軸圧縮強度が、高い間隙性ととともに、Ta-d VH2の非常に高い $W_v$ と非常に一致することを示している。この組み合わせは、Ta-d VH2が土壌強度の低い高度に飽和した緩い状態で存在し、胆振地すべりの広範な発生を促進したことを示している。

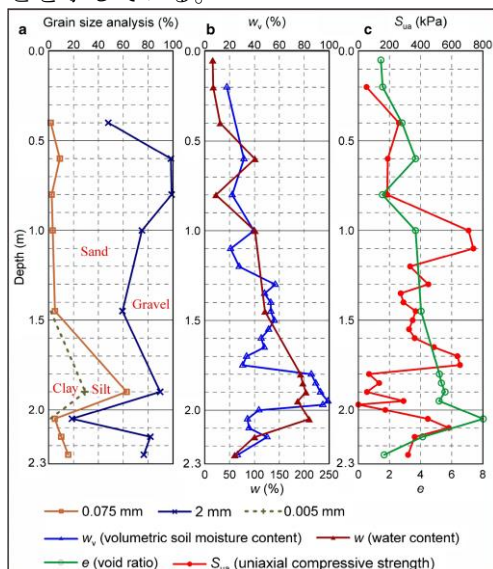


図4 典型的な地すべり冠部の層序セクションに沿った土質の地質工学的特性。a 粒度分析、b 体積土壌水分含有量、c 一軸圧縮強度

Ta-dの特異に高い飽和度の原因を究明するために、典型的な地すべり冠部で土壌水分と降雨量の長期観測を行った。予想に反して、3つのセンサーすべての $W_v$ sは降水量によってわずかに増加しただけである(図5)。重要な観察は、Ta-d VH2のチャンネル2( $W_v$ -2)の $W_v$ が、降水量の変動に関係なく、90%以上という非常に高い値にとどまっていることである。これらの非常に高い $W_v$ 値は、Ta-d VH2が非常に緩い状態にあり、乾燥期間中であってもほぼ完全に飽和状態に維持されていることを示唆している。しかし、観測期間中、間隙水圧変換器(PWP)による非拘束地下水の検出は見られず、トレンチ掘削中も自由地下水は観察されなかった。これは、Ta-d VH2サブユニットが「持水性」または「吸水性」という特異な性質を有しており、胆振の場合に先行降水の影響が過大評価されていることを意味する。

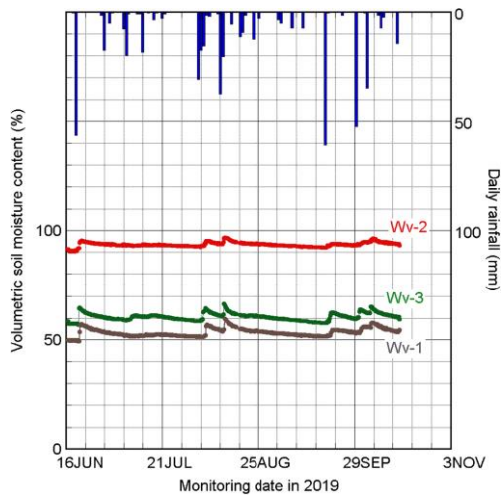


図5 2019年6月16日から11月23日までの典型的な地すべり冠部層序セクションにおける原位体積土壌水分含有量観測結果

Ta-d VH2 のユニークな「持水性」または「吸水性」特性をさらに説明するために、X線回折(XRD)分析を実施した。XRD 試験では、反射ピークが風乾条件下で約  $8.8^\circ$  から加熱条件下で約  $11.8^\circ$  にシフトしたため、ハロイサイトの存在が確認された(図6)。ハロイサイトは、火砕物分布地域の斜面安定化を損なうことで知られる粘土鉱物である、それは Ta-d VH2 でのみ検出された。さらに、Ta-d VH2 の斜長石ピークは特に小さく、ガラス片に加えて斜長石の変化もハロイサイト形成に寄与したことを意味する。Ta-d VH2 の豊富なハロイサイトは、前の降雨の産物ではなく、液状化軽石の非常に高い飽和度を説明している。さらに、ハロイサイトは、比較的緩やかな斜面にもかかわらず、胆振地すべりの高い移動性と長い運動も引き起こす。ハロイサイトの存在は、重ね合わされた多孔質テフラを通して水が浸透し、空隙率と透水性の低い古土壌の上に蓄積したため、最下部の古土壌を覆う Ta-d 堆積物の長期風化に起因している。風化作用によりハロイサイトの生成が促進され、Ta-d VH2 を極めて緩い状態で保持できるようになり、最終的には土壌強度が弱く、完全に飽和した状態になった。

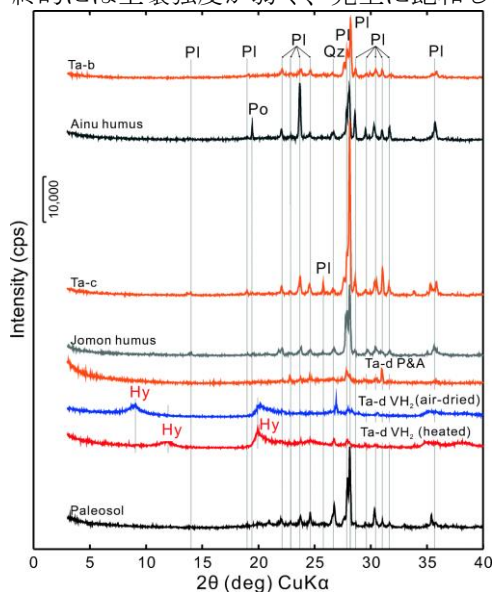


図6 典型的な地すべり冠部層序セクションからのサンプルのXRDパターンにおける粘土鉱物分析。XRDパターンのPl、Po、Qz、およびHyは、それぞれ斜長石、ポルトランドイト、石英、およびハロイサイトの略語です。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Auer Andreas	4. 巻 6
2. 論文標題 “ Volcanism in the Chugoku region: a review for the first UNESCO field school on Geoenvironmental disaster reduction ”	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geoenvironmental Disasters	6. 最初と最後の頁 1-24
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40677-019-0132-x	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 Ran Li, Fawu Wang & Shuai Zhang	4. 巻 17
2. 論文標題 Controlling role of Ta-d pumice on the coseismic landslides triggered by 2018 Hokkaido Eastern Iburu Earthquake	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Landslides	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10346-020-01349-y	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 Shuai Zhang, Ran Li, Fawu Wang & Akinori Iio	4. 巻 16
2. 論文標題 Characteristics of landslides triggered by the 2018 Hokkaido Eastern Iburu earthquake, Northern Japan	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Landslides	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10346-019-01207-6	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 Ran Li, Fawu Wang & Shuai Zhang	4. 巻 17
2. 論文標題 Failure mechanism of a flow-like landslide triggered by the 2018 Western Shimane Earthquake	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Landslides	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10346-020-01401-x	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 Nam Koungoon, Wang Fawu	4. 巻 6
2. 論文標題 The performance of using an autoencoder for prediction and susceptibility assessment of landslides: A case study on landslides triggered by the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake in Japan	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geoenvironmental Disasters	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40677-019-0137-5	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 Nam Koungoon, Wang Fawu	4. 巻 7
2. 論文標題 An extreme rainfall-induced landslide susceptibility assessment using autoencoder combined with random forest in Shimane Prefecture, Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geoenvironmental Disasters	6. 最初と最後の頁 1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40677-020-0143-7	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 -

1. 著者名 Ama-Miyasaka Mizuho, Miura Daisuke, Nakagawa Mitsuhiro, Uesawa Shimpei, Furukawa Ryuta	4. 巻 540
2. 論文標題 Stratigraphy and chronology of silicic tephra in the Shikotsu-Toya volcanic field, Japan: Evidence of a Late Pleistocene ignimbrite flare-up in southwestern Hokkaido	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Quaternary International	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.quaint.2019.11.019	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 Matsumoto Akiko, Nakagawa Mitsuhiro	4. 巻 28
2. 論文標題 Reconstruction of the eruptive history of Usu volcano, Hokkaido, Japan, inferred from petrological correlation between tephra and dome lavas	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Island Arc	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/iar.12301	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1件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Fawu Wang
2. 発表標題 Rapid and long runout landslides triggered by earthquake: motion mechanism and countermeasure
3. 学会等名 2nd International Symposium on Seismic Performance and Design of Slopes (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020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	中川 光弘  (Nakagawa Mitsuhiro)  (50217684)	北海道大学・理学研究院・教授    (10101)	
研究分担者	志比 利秀  (Shibi Toshihide)  (60311792)	島根大学・学術研究院環境システム科学系・助教    (15201)	
研究分担者	宮島 昌克  (Miyajima Masakatsu)  (70143881)	金沢大学・地球社会基盤学系・教授    (13301)	
研究分担者	A n d r e a s A u e r  (Auer Andreas)  (80778613)	島根大学・学術研究院環境システム科学系・講師    (15201)	

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
---------	---------