

令和 2 年 9 月 9 日現在

機関番号：32511

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K01232

研究課題名(和文) 加速度孔内傾斜計を用いた火山灰被覆斜面の動的観測と崩壊発生機構の解明

研究課題名(英文) Dynamic observation of tephra-dominated slope deposits using acceleration sensors and the elucidation of shallow landslide mechanisms

研究代表者

佐藤 剛 (SATO, GO)

帝京平成大学・現代ライフ学部・教授

研究者番号：00468406

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は阿蘇カルデラ内に調査地を設定し、地形地質調査と土質試験を組み合わせることによって、火山灰被覆斜面の崩壊発生機構について説明することを試みた。地形地質調査では降下テフラとクロボク土からなる互層が重力変形している露頭を発見し、変形がクロボク土層の流動で発生したことを明らかにした。土質試験結果からは、流動した土層が非流動のものと比較し強度が低下したことを証明した。また、MEMSを搭載した浅層孔内傾斜計を用いて斜面堆積物の変動の観測を試みた。流動に至るような変動は認められなかったものの、ミリスケールの微小な動きを捉えることに成功した。降雨量と斜面変動との関係を実証するため観測は継続して実施していく。

研究成果の学術的意義や社会的意義

局地的な豪雨を誘因とした山地斜面の崩壊とそれに伴う土砂災害は我が国の深刻な問題である。本研究では豪雨によって引き起こされた崩壊によって多くの被害が生じてきた阿蘇地域を調査地に設定し、崩壊の発生プロセスを明らかにすることを地形・地質・土質調査をもとに実施した。現地では斜面の変動をとらえるべく観測装置も設置した。今後も引き続き観測を続けることで降雨量と崩壊発生との関係等が明らかになることも期待される。

研究成果の概要(英文)：This study attempted to explain the shallow landslide mechanisms of volcanic-ash covered slopes by topographical and geological surveys, as well as soil tests at Aso Caldera. Topographic and geological survey revealed an outcrop consisting of deformed layers of tephra and kuroboku soils. The deformation was generated by the flow of the kuroboku soil layer. The result of soil tests proved that the flow layer's strength was lower than that of the non-flowing layers. Although the observation of the gravitational movement of slope sediments using a MEMS-installed strain-gauge did not show any deformation leading to the flow, the author succeeded in capturing minute movements on a millimeter scale. Observation will continue to verify the relationship between rainfall and slope movement.

研究分野：自然地理学

キーワード：崩壊 斜面変動 火山灰 クロボク土 孔内傾斜計

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

局地的な豪雨を誘因とした山地斜面の崩壊とそれに伴う土砂災害は、我が国の深刻な問題である。近年では平成24年九州北部豪雨による阿蘇地域の土砂災害や平成25年台風16号の豪雨による伊豆大島の土砂災害など火山体周辺での土砂災害が頻発している。これらの災害の原因となった崩壊に共通して言えるのは、降下火山灰とレス(風成塵起源の堆積物)が互層する斜面物質が崩壊に関与していることである。しかしながら、崩壊の発生機構は単純ではない。例えば平成25年台風16号の豪雨により伊豆大島で発生した崩壊では、降下火山灰とレスの層数や層厚、あるいは斜面の傾斜や位置によって、すべり面の形成位置が異なることが示されている(佐藤ほか, 2015; 木村ほか, 2016)。報告者らは平成24年九州北部豪雨被害を受けた阿蘇カルデラ内の斜面において地形・地質調査を行い、崩壊の発生機構について検討するため調査をはじめた。そのなかで、阿蘇カルデラ内の斜面で発生した崩壊が、従来の研究で紹介された機構では説明できないものが多数あることを発見した。先行研究によれば、阿蘇カルデラ中央火口丘を構成する斜面における九州北部豪雨による崩壊は、中央火口丘のひとつである往生岳を供給源とするスコリア層(OjS層)とそれを覆うクロボク土層との境界がすべり面とされてきた(宮縁, 2012; Shimizu, 2016など)。これらの研究が示すように、もしOjS層とクロボク土層の境界にすべり面が位置するのであれば、すべり面にはOjS層が露出しているはずである。しかしながら、航空写真判読と現地踏査を行ったところ、すべり面(崩壊面)がクロボク土層にすべて覆われている崩壊も多数認められた。そこで報告者らは、すべり面形成の可能性をクロボク土層内に求め、崩壊に至るプロセスを復元するとともに、その動きを観測することを試みた。

2. 研究の目的

本研究では火山灰被覆斜面の地形計測、地質調査および土質試験結果を組み合わせることで崩壊発生機構を復元するとともに、浅層孔内傾斜計を用いて斜面堆積物の変動を観測することを目的としている。後者の観測に関しては、Micro Electro Mechanical System (MEMS) 加速度センサを搭載した孔内傾斜計(以後、MEMS 孔内傾斜計)を用いて火山灰被覆斜面のクリプと崩壊の動きを検知しようとする新規的な取り組みとなっている。

3. 研究の方法

調査地は阿蘇火山の中央火口丘の北側斜面に位置し、筋状に発達する開析谷の斜面上にある(図-1-A)。斜面は南東向きで、稜線から谷底までの比高は54m、見通し角は約30°あり、基盤である鷲ヶ峰火山の火砕岩(小野・渡辺, 1985)を降下テフラとクロボク土の互層がマントルベディングするように覆っている。斜面上には多数の表層崩壊跡があり、図-1-Bの範囲でも破線で示すように表層崩壊の滑落崖が残存する。例えば、斜面中腹に滑落崖をもつ表層崩壊aは、2012年7月の豪雨で発生したもので、崩壊深は1.5m~2.0m程度ある。崩壊面には、クロボク土の面的な露出が認められた。

現地調査は表層崩壊aの南向きの側方崖に位置する露頭(図-1-B)を対象に集中的に行った。ここでは降下テフラとクロボク土からなる互層が複雑に重力変形していることが土層構造から認められた。この構造は表層崩壊の先行現象を示すものと考えられたことから、まず詳細な地質構造の記載を行い、堆積物の強度特性を評価するためのペーンコーンせん断試験を現地で実施するとともに、堆積物の透水特性と物理特性とを明らかにするため屋内土質試験も行った。

MEMS 孔内傾斜計は地すべり観測用孔内傾斜計(傾斜角分解能0.01°、精度±0.5°以下)を浅層用に応用し(図-2)、図-1-Bに示したM-1およびM-2に設置した。両設置位置におけるOjS層の深度は地表から130cm程度である。MEMS 傾斜計の長辺30cmあることから、これを5個つなぎ合わせOjS層も含めた150cmの層厚を観測した。観測サイトでは、隣り合うように2本の観測孔を作成し、各MEMS 加速度センサの設置深さを15cmずらし挿入することで、原理的には15cm間隔での変位を計測しその精度を高めた。また、現地観測にあ

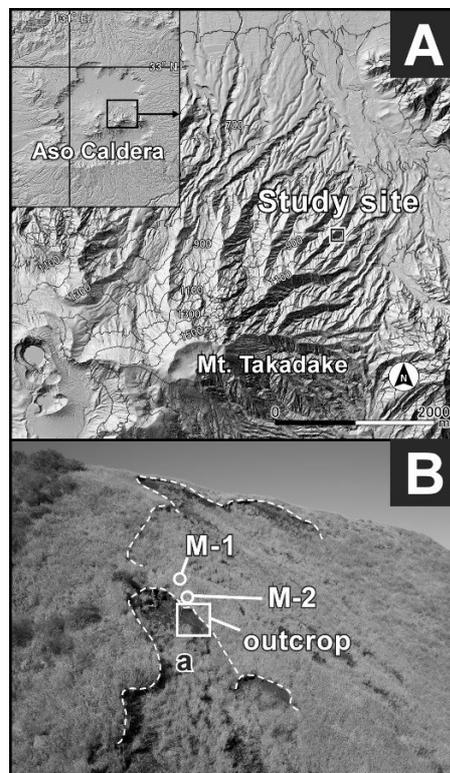


図-1 A) 調査地位置。陰影図の作成にあたっては陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS)の30m DSMおよび2013年に国土交通省がLiDARで計測した1m DTMを用いた。B) 調査地の写真。破線は2012年7月に発生した表層崩壊の滑落崖の位置。

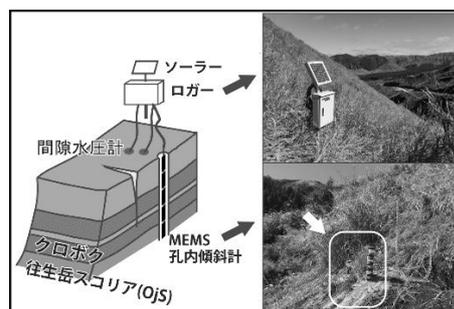


図-2 調査地に設置したMEMS 孔内傾斜計

っては、間隙水圧計も埋設した。これらのデータは、データロガーに30分間隔で蓄積されている。

4. 研究成果

4.1 地形地質調査および土質試験結果

基盤を覆う斜面堆積物は、未固結のテフラとクロボク土からなり、上位からA~Hの計8層に分けられる。A層は腐植に富む黒色の砂質火山灰、B層は腐植まじりの黒色砂質火山灰、C層は暗褐色のスコリア混じりの砂質火山灰、D層は砂質火山灰を含む腐植に富むクロボク土(斜面下方でスコリア層を挟在する)、E層は明褐色のスコリア、F層およびG層は砂質火山灰を含む腐植に富むクロボク土、H層は暗赤褐色のスコリアからなる(図-3)。また、E層およびH層は、その層相から宮縁・渡辺(1997)が報告した中岳の降下スコリア(「N2S」と呼ぶ)、および往生岳スコリア(「0jS」と呼ぶ)に対比される。N2Sおよび0jSの降下年代はそれぞれ、約1.5kaおよび約3.6kaである(Miyabuchi, 2009)。堆積物の構造をみると、露頭西側のクラックと図-3-B- /dから /fに至るせん断面の存在から、クラックより谷側の幅1mほどの土塊は斜面下方に変動したことが分かる。また、荷重痕(/fと /fにおけるF層とG層の境界にみられる火炎状の構造と、その構造の西端にG層がF層に押し込まれている構造)が認められた。これはF層の流動にともない、F層がその下位のG層にのめり込み、G層にかかる荷重が変化することで形成されたと解釈できる。また、露頭の山側はこの変形により引張場となり開口クラックが生じるとともに、 /dではH層にせん断面が形成されたと考えられる。

本研究では、図-3で観察された斜面堆積物の強度特性を把握するため、土層強度検査棒を用いたベーンせん断試験を行った。対象としたのは、変形および非変形域のクロボク土(F層)と、その下位にある0jS(H層)である。通常、ベーンせん断試験は、土層に対しベーン全体を鉛直方向に貫入させて行うが、対象とする斜面堆積物の各層厚は数10cmであり、構造も複雑であることから、露頭面に対し垂直方向にベーンを貫入させ測定した。また、一度せん断した箇所は乱れることから、荷重を変えて測定する際には同一層準内で移動し試験を行った。各層で試験を実施したのは、図-3-Aの黄色線で示した範囲内(K-a, K-bおよびO-a)にある。ベーンせん断試験の結果を図-4に示す。クロボク土の最大せん断応力は、非変形域のクロボク土(K-a)に対し変形域のクロボク土(K-b)で相対的に低下していることがわかる。参考に測定結果から求められるクロボク土の粘着力(c)と内部摩擦角(ϕ)は、非変形域のもので c が 22.5 kN/m^2 、 ϕ が 29.4° 、変形域のもので c が 14.3 kN/m^2 、 ϕ が 32.0° だった。内部摩擦角の値はおおまかには変わらないが、変形域の粘着力は低くなっている。非変形域では、0jS(O-a)も対象に試験を行っているが、最大せん断応力は、クロボク土と比較高い値を示している。

室内土質試験はクロボク土層(E層)を対象に行った。試料は非変形域のK-1と変形域のK-2から採取した(図-3-A)。これらの採取試料を対象に、土粒子の密度試験、土の湿潤密度試験、土の含水比試験および土の粒度試験を行った。試験結果から算定された土粒子の密度(ρ_s)、湿潤密度(ρ_w)、乾燥密度(ρ_d)、間隙比(e)および自然含水比(w)を表-1に示す。また、粒度

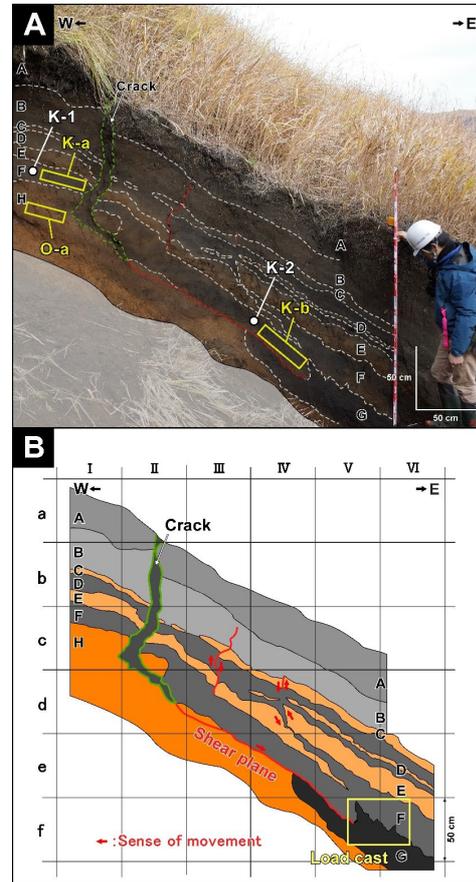


図-3 A: 調査対象露頭の写真(2016年12月12日撮影)。破線(白)が地層境界、破線(緑)はクラック、破線(赤)はせん断面を示す。B: 調査対象露頭のスケッチ。

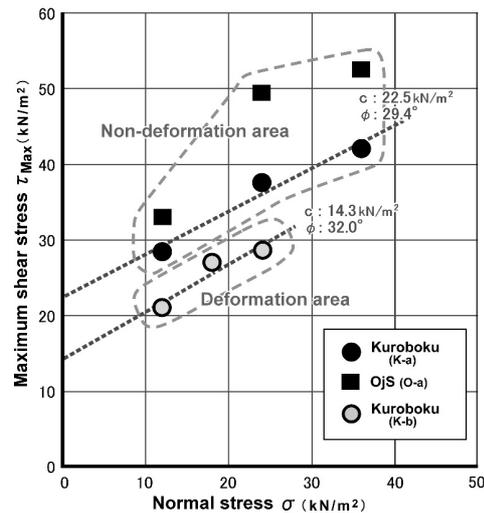


図-4 ベーンせん断試験の結果

表-1 土質試験結果

試料 Sample	土粒子の密度 ρ_s [g/cm ³]	湿潤密度 ρ_t [g/cm ³]	乾燥密度 ρ_d [g/cm ³]	間隙比 %	自然含水比 w [g/cm ³]
K-1	2.794	1.32	0.68	3.10	94.56
K-2	2.534	1.15	0.59	3.29	95.07

試験の結果は図-5に示す。表-1をみると、クロボク土の土粒子の密度は、非変形域で2.79g/cm³、変形域で2.53g/cm³と同じ層準ではあるが、変形域で小さくなっている。湿潤密度は非変形域で1.32g/cm³、変形域で1.15g/cm³、乾燥密度は非変形域で0.68g/cm³、変形域で0.59g/cm³と湿潤密度も乾燥密度もともに変形域のクロボク土で低下している。これに対応するように間隙比も非変形域で3.10、変形域で3.29と後者で高くなっている。図-5に示した土の粒度試験結果は、非変形域で0.075mmおよび0.1mmの粒径が若干多いが、ほぼ同様の粒度特性となっている。

ベーンコーンせん断試験の結果、非変形域のクロボク土の最大せん断応力はH層を構成する0jSよりも小さい値を示した。また、佐藤ほか(2017)で報告された非変形域の飽和透水係数は、クロボク土が 9.83×10^{-5} m/s、0jSが2012年7月(推定)の豪雨時には、この物性の違いを反映しH層の上位でF層の間隙水圧が上昇し流動変形したと考えられる。流動の証拠は、露頭観察で認められた荷重痕の存在である。非変形域と変形域におけるクロボク土のベーンコーンせん断試験結果は、変形域のクロボク土の最大せん断応力が非変形域のそれと比べて顕著に小さくなっている。この結果は土質試験の結果とも整合的であり、非変形域と変形域のクロボク土の粒度特性には大きな違いがない状態で、変形域では密度の低下とそれともなう間隙比の増加が認められた。クロボク土層の土粒子間の結合は弱まったままであると判断される。なお、非変形域と変形域の土粒子の密度には有意な差異がみられる。この原因についてはよく分からないが、地層内の不均質さが影響した原因と、もう一つの可能性としては、変形中もしくは変形後、地下水による運搬等の作用で変形域の一部の粒径帯の粒子が失われた、あるいは逆に異種の粒子が混入してきた、などの影響も考えられる。今後の検討が必要である。さて、流動により間隙比が増加したクロボク土層がせん断を受けると、負のダイレイタンス(体積収縮)が生じ、少なくとも非変形域のクロボク土と同程度までは密度増加すると考えられる。しかしながら、変形の原因として考えられたように、豪雨時にH層の上位でF層の間隙水圧が上昇した条件の下では、排水による体積収縮が進まず有効応力が低下するため、変形域の斜面堆積物は変形前よりも崩壊に至りやすい状態にあると考えられる。本研究は、降下テフラとクロボク土の互層からなる斜面堆積物が流動タイプの重力変形をすると、その強度は低下する事例があることを示した。調査対象の斜面堆積物は崩壊予備物質であり、今後の豪雨を誘因に再び流動し崩壊に至ると考えられる。

4.2 MEMS 孔内傾斜計による観測結果

2017年11月以降、孔内傾斜計による観測を2地点で継続的に行い、断線等による欠損はあるものの2年間にわたるデータを収集することができた。解析の結果、流動に至るような変動は認められなかったものの、ミリスケールの微小な動きを捉えることに成功した。例えば、M-2の孔内傾斜計の観測結果からは2018年1月23日~24日に深度45cm以浅で最大3.0mm南西側への変動量が認められた(図-6)。また、2019年6月19日には2地点M-1、M-2の両孔内傾斜計で数mm程度であるが変動が認められることもあった。気象庁アメダス阿蘇乙姫における当日の24時間雨量は187mmあり、豪雨により斜面全体で微動していると推定された。降雨量と斜面の変異との関係を実証するため現地での観測は継続して実施する予定である。なお、孔内傾斜計の収縮により観測データには1mm以下の季節変動を受けることも把握できた。この結果に関しては観測機材の精度検証にも役立つ。

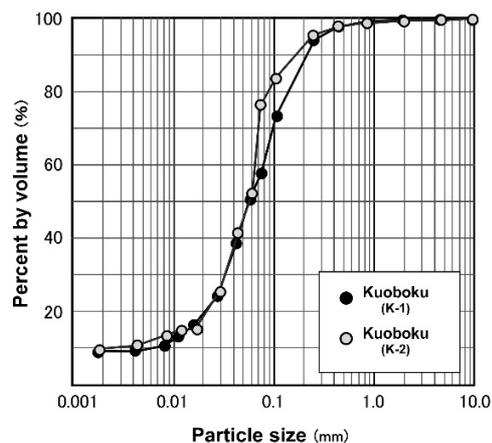


図-5 粒度試験の結果

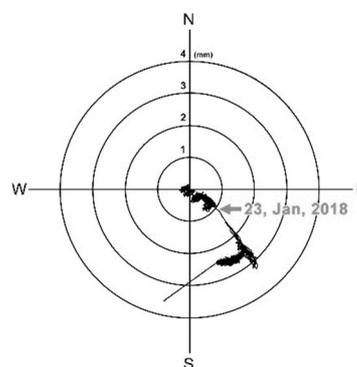


図-6 観測孔 M-2 (深度 45cm) 傾斜計変動方向図

謝辞 本研究を遂行するにあたり、阿蘇市日の尾牧野組合にご協力いただきました。記して感謝いたします。本報告には科研費 JP17K01232 の助成を受け実施した研究成果（佐藤ほか，2017；佐藤ほか，2019）を用いた。

引用文献

木村 誇・後藤 聡・佐藤 剛，若井明彦・土志田正二（2016）：

伊豆大島火山のカルデラ外縁斜面における降下火山砕屑物の層厚分布．日本地すべり学会誌，53，43-49．

宮縁育夫・渡辺一徳（1997）：埋没黒ボク土層の14C年代からみた完新世阿蘇阿蘇火山テフラの噴出年代，火山，Vol. 42，No. 6，pp. 403-408．

Miyabuchi, Y. (2009): A 90,000-year stephrost-graphic framework of Aso Volcano, Japan. Sedimentary Geology, Vol. 220, Np. 3-4, pp.169-189.

宮縁育夫（2012）：阿蘇カルデラにおいて2012年7月の九州北部豪雨によって発生した斜面崩壊．地学雑誌，12，1073-1080．

小野晃司・渡辺一徳（1985）：阿蘇火山地質図（1：50,000），火山地質図，4，地質調査所．

佐藤 剛・小森次郎・千葉達朗・後藤 聡・岸本博志・林 一成（2015）：2013年台風26号により伊豆大島大宮沢で発生した土砂移動プロセス．日本地すべり学会誌，52，255-260．

佐藤 剛・後藤 聡・木村 誇・林信太郎・Mega Lia Istiyanti・小森次郎（2017）：阿蘇カルデラ内で発見されたテフラ被覆斜面堆積物の重力変形，日本地すべり学会誌，54（5），199-204．

佐藤 剛，若井明彦，木村 誇，後藤 聡（2019）：重力変形する降下テフラとクロボク土からなる斜面堆積物の強度特性 -ペーンコーンせん断試験を用いた阿蘇カルデラでの試み-，日本地すべり学会誌，56（Special Issue），250-253．

Shimizu, O. (2016): Relationship of tephra strati-graphy and hydraulic conductivity with slide depth in rainfall-induced shallow landslides in Aso Volcano, Japan. Landslides, 13, 577-582.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 佐藤 剛、後藤 聡、木村 誇、林 信太郎、小森 次郎	4. 巻 54
2. 論文標題 阿蘇カルデラ内で発見されたテフラ被覆斜面堆積物の重力変形	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本地すべり学会誌	6. 最初と最後の頁 199 ~ 204
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3313/jls.54.199	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 佐藤 剛, 若井 明彦, 後藤 聡, 木村 誇	4. 巻 56
2. 論文標題 重力変形する降下テフラとクロボク土からなる斜面堆積物の強度特性: - ベーンコーンせん断試験を用いた阿蘇カルデラでの試み -	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本地すべり学会誌	6. 最初と最後の頁 250 ~ 253
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3313/jls.56.250	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 佐藤 剛, 木村 誇, 廣田 清治, 郷 青穎, 八木 浩司	4. 巻 56
2. 論文標題 平成30年7月豪雨によって発生した愛媛県興居島の崩壊分布と土砂移動プロセス	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本地すべり学会誌	6. 最初と最後の頁 129 ~ 134
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3313/jls.56.129	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 佐藤 剛, 八木 浩司, 木谷 一志, 千田 良道, 廣田 清治	4. 巻 57
2. 論文標題 室戸半島, 野根山街道の岩佐関所遺跡の立地と重力性山体変形地形	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 19 ~ 23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.3313/jls.57.19	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 佐藤 剛, 八木 浩司, 新田 邦弘, 梅村 順, 三瓶 和法, 熊井 直也	4. 巻 57
2. 論文標題 2019年8月24日福島県いわき市で発生した落盤を誘因とした斜面変動	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 111 ~ 115
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3313/jls.57.111	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4件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 佐藤 剛, 林田 昇, 木村 誇, 後藤 聡
2. 発表標題 阿蘇カルデラにおけるテフラ被覆斜面堆積物の動的観測(中間報告)
3. 学会等名 日本地すべり学会2018年研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤 剛, 木村 誇, 納谷 宏, 林田 昇, 後藤 聡, 小森次郎
2. 発表標題 阿蘇カルデラにおけるテフラ被覆斜面堆積物の重力変形構造と動的観測計画
3. 学会等名 日本第四紀学会2017年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤 剛, 若井明彦, 後藤 聡, 木村 誇
2. 発表標題 重力変形する火山灰被覆斜面堆積物の強度特性 - 阿蘇カルデラでの事例 -
3. 学会等名 日本地理学会 2019年春季学術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤 剛, 八木浩司, 木谷一志, 千田良道, 廣田清治
2. 発表標題 野根山街道・岩佐関所遺跡の立地と重力性山体変形地形
3. 学会等名 日本地すべり学会2019年研究発表会
4. 発表年 2019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
--	---------------------------	-----------------------	----