

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月24日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03151

研究課題名(和文) 強風時の森林斜面における融雪地すべりの発生機構と危険度評価

研究課題名(英文) Mechanisms and risk evaluation of meltwater-induced landslides on forest-covered slopes during strong wind

研究代表者

松浦 純生 (Matsuura, Sumio)

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号：10353856

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：豪雪地帯で強風によって地すべりが発生する危険度を評価するため、現地観測・試験、室内実験を行うとともに数値実験を行った。その結果、森林斜面では強風時に樹冠部で乱流が発生し、従来の予測以上に雪が解けることが示唆された。積雪表層で解けた雪は積雪層に浸透した後、複雑な水みちを形成し、融雪水が積雪層底面から局所的に流出することが明らかとなり、数値実験によっても再現できた。豪雪地帯では斜面表層の浸透能が積雪荷重によって低下するため、無積雪期と異なる水循環過程となり、間隙水圧等の応答特性も変化することを明らかにした。以上の成果により、強風時における融雪地すべりの発生危険度の予測精度を向上させることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気温による融雪予測は研究蓄積も数多くある。一方、積雪層に雨が降る場合は雨の観測が容易なうえに融雪熱量も計算しやすい。ところが、風による融雪は発生頻度が少ないため、他の融雪要因の研究に比べ大幅に遅れている。また、前二者については、「気温上昇=融雪促進」、「降雨=災害多発」というイメージがあることから、災害に対する注意を喚起しやすい。ところが、風による融雪については強風で急激に雪が融けることが、必ずしも流域内の住民に共有されていない。本研究で強風時の融雪現象が明らかとなり、地すべり発生危険度評価の精度を高めることができた。したがって積雪地帯における地域住民の安心と安全の確保に寄与できる。

研究成果の概要(英文)：To evaluate the landslide hazard caused by meltwater on a forested slope during strong wind, we carried out field observations and in-situ tests in a heavy snowfall area in addition to laboratory experiments and numerical simulations. As a result of the laboratory experiments and field observations, turbulent flow generated near the canopy in a relatively sparse forest stand can cause a large amount of snow melting. Because the meltwater infiltrates the snowpack and then forms complex water pathways, meltwater flows out locally, and we reproduced this phenomenon by numerical models. Based on long-term results of deep pore-water pressure in snow-covered conditions, the magnitude of the pore-water pressure increase tends to be relatively suppressed because of the seasonal decrease in the permeability of the surface soils and a decrease in the volume of the vadose zone. These research results should help improve the accuracy of landslide risk evaluation in heavy snowfall areas.

研究分野：傾斜地保全学

キーワード：積雪地帯 強風時の融雪 積雪層内水移動 積雪荷重 浸透能 土壌水分 間隙水圧 地すべり

1. 研究開始当初の背景

地表面に形成された積雪層は降水を一時的に貯留しているため、急激に融けると地すべりなどの土砂災害を引き起こす。このため、毎年のように積雪地帯である北海道や東北、北陸地方などで多くの地すべり災害が発生している。近年では、平成 24(2012)年 3 月に新潟県上越市国川地区の森林斜面で発生した大規模な地すべり災害が記憶に新しい。

この地すべりについては、発生前に強い風が吹き多量の融雪水が発生したことが原因と指摘されている。しかし、強風によってどの程度の雪が融けるのか、さらに融雪水がどのようなプロセスで積層内から斜面地盤に浸透し、間隙水圧を高め地すべりを発生させるのかについては未解明な点が多い。したがって、極端な気象現象が頻発する現在、降雨だけでなく、積雪地帯における土砂災害などの問題についても研究を深化させる必要性が高まっている。

通常、無積雪時では降雨はそのまま地盤内部に浸透し、間隙水圧が上昇することで地すべりが発生する。このため、降雨(地表到達水)～間隙水圧～地すべりの関係が明らかになれば、降雨から地すべりの発生をある程度、予測することが可能となる。

ところが、地表面に積雪層が形成されると融雪水の大部分は積雪表層で発生するため、融雪水と地すべりの関係は、融雪水～地表到達水～間隙水圧～地すべりの関係となる。このため、融雪水～地すべりの関係が明らかになれば地すべりの発生危険度をより正確に評価することができる。しかし、ここには様々な問題点がある。つまり、積雪表層での融雪特性、とくに強風時の山地斜面での融雪特性が不明であることに加え、積雪表層で発生した融雪水が積雪層内をどのように浸透・流下し強度とタイミングを変えながら地表面に到達するのが良く分からないことが挙げられる。

さらに、深く重い積雪層に覆われた状態での地すべり移動体の透水性や間隙水圧の変動特性についても、測定事例はもちろんのこと、観測事例もほとんどない。このため、強い風が吹くような極端な気象現象時の地すべりの発生機構を明らかにし、危険度をより正確に評価するためには、強風時の融雪特性や積雪層および山地斜面内部における一連の水循環過程を、現地試験や観測、室内および数値実験などで明らかにする必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、極端な気象現象の中でも特に強風によって地すべり災害が発生することに着目し、室内実験などによって強風時の森林斜面における融雪特性を解明する。さらに、現地観測・試験や室内および数値実験を行い、積雪表層で発生した多量の融雪水が、強度とタイミングを変えて積雪層内および斜面地盤内に浸透する過程を明らかにするとともに、積雪荷重が載荷された状態での間隙水圧の変動特性など地すべり移動の関係について詳しく解析を行い、融雪水量から地すべりの発生危険度を評価することで、極端気象時の災害予測技術の高精度化を目標とする。

3. 研究の方法

本研究では、強風時の森林斜面における融雪特性を明らかにするため、樹木模型を用いた融雪実験を行うとともに、豪雪地帯の中山間地に試験地を設置し(新潟県上越市安塚区伏野地区)、大気～林間～雪面間における熱フラックスの変動特性などを解明することを目的として、超音波風向風速計を用いた高頻度の乱流観測を実施した。

また、積雪層内における融雪水の浸透と地表面への到達過程を明らかにするため、積雪変質モデル(SNOWPACK)や水分移動モデルを応用し、試験地における積雪状態、および斜面地盤への水分浸透量などを見積るとともに、現地での調査や観測結果と比較検討し、水移動モデルの検証や応用手法の開発を行った。

さらに、浅層土の水文学的状态の季節変化が、斜面深部での間隙水圧の変動に影響することを、積雪層～不飽和帯～飽和帯の水文学的連結性の観点から実証的かつ統合的に明らかにするため、原位置水理試験を行うとともに、荷重を載荷しながら透水試験を行うことができる試験機を考案し、実験を行なった。また、試験地において、複数の土壌水分計と間隙水圧計を設置して、通年にわたる観測を実施した。

4. 研究成果

(1)強風時の融雪特性

森林植生が融雪に及ぼす影響に着目し、樹木模型を用いた融雪実験を実施した。風速 0～3 m/s の条件で植被率を 0～7% に変化させ、風速は可動式の X 型熱線風速計を用いて水平および垂直の 2 成分を 1kHz で測定するとともに、融雪水量はライシメータで捕捉した量をデジタル重量計で計測した。模型林内における歪度の鉛直分布について検討したところ、いずれの植被率においても樹冠上部から樹冠下部、および樹幹部で歪度が大きくなる結果が得られた(図-1)。特に植被率 7.0% で風速 2.0m/s の実験ケースでは他の実験ケースよりも大きい値となった。これらの結果から、樹木植生の存在によって樹冠上部から暖かい空気が模型林内に取り込まれ、鉛直下向きの風が卓越し、暖かい空気が雪面ま

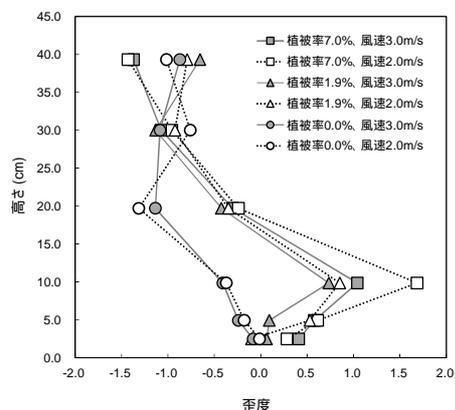


図 - 1 歪度の鉛直方向の分布

で伝播されることで、雪面との熱交換が活発に行われ、融雪が促進された可能性が考えられる。

一方、平成 29(2017)年 4 月にはメソスケールの擾乱が原因となる強風によって、最大 7 mm/h で 12 時間に 65mm、24 時間雨量に換算して最大 125mm の地表面到達水量が観測された(図-2)。放射収支量を考慮しなくて良い夜間に発生した融雪現象について熱量を計算したところ、地表面到達水量の大部分は顕熱と潜熱のフラックスによる融雪と推定され、融雪水量から逆算した結果、合計で約 600W の融雪熱量が強風時に積雪面に供給されてことが分かった。この熱量はバルク法による計算熱量よりも2倍以上大きく、強風時には従来の予測以上に融雪が進行することが、現地観測の結果からも明らかとなった。

(2)積層内の水移動

伏野試験地で観測された気象データを入力して SNOWPACK で計算した結果を図-3 に示す。SNOWPACK では温度や密度等、さまざまな積雪の物理量が計算されるが、ここでは融雪地すべりに関連の深い雪質、含水率、及び底面流出量について示した。SNOWPACK で水分浸透を計算する際には水みちを考慮しない Richards Equation 方式と、水みちを考慮する Dual Domain Approach 方式がある。水みちを考慮しないで計算した場合、乾いた状態のまま下方方向に浸透することができないため、冬期中ほとんどが全層がぬれざらめ雪となり、断面観測でみられるしまり雪の層が再現されなかった。したがって、本計算には水みちを考慮した計算方式を用いた。実測結果と比較したところ、ぬれざらめ雪の割合が過大評価気味である傾向はみられたものの、おおよそ再現できた。また、底面流出量の計算結果(図-3c)のように、厳冬期でも少量であるが地表面への水の供給があること、また融雪期に大きく増加することが示され、表層地盤への水分浸透量の推定値が得られた。

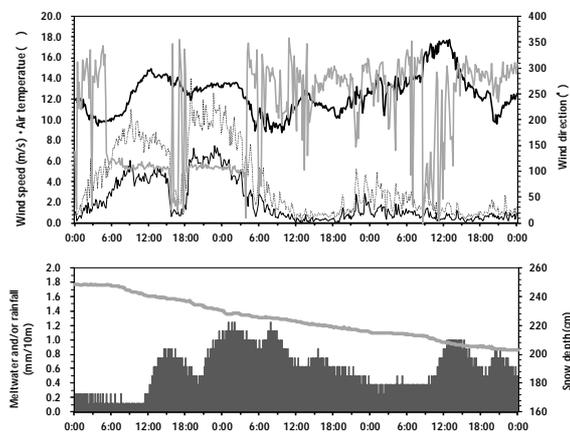


図-2 強風時の地表面到達水量等の観測結果 (April 6 to 8, 2017)

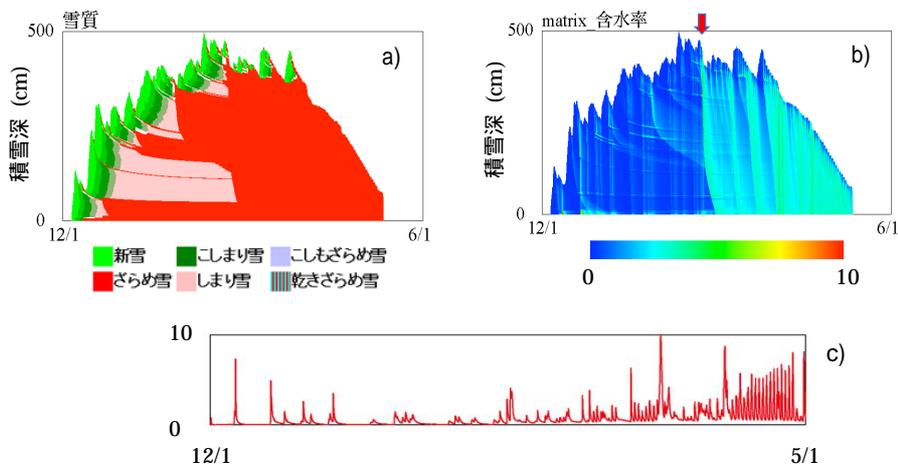


図-3 SNOWPACK を用いた計算結果(a)雪質、(b)体積含水率、(c)底面からの流出量

続いて、この SNOWPACK で面的に積雪を計算するツール ALPINE3D を使った計算を行った。計算は 2014/15 冬期を対象に、300m × 300m の領域で 10m メッシュで行った(図-4)。

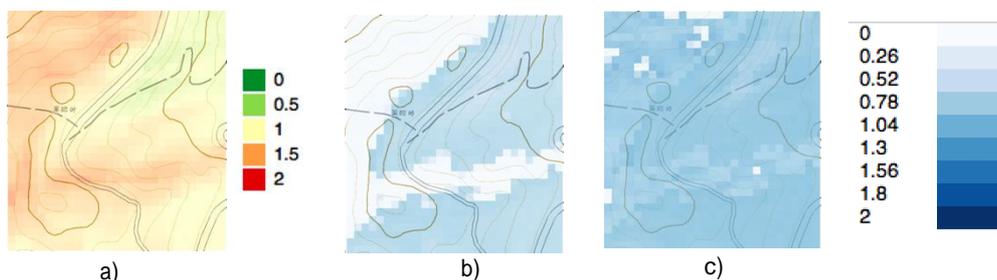


図-4 ALPINE3D で計算した積雪深及び底面流出量の分布 (a)積雪深(3/10)、(b)底面流出量(3/9 18:00)、(c)底面流出量 (3/10 3:00)

図-4a に示すような積雪深のほか、図-4b, c のような底面流出量の時間変化も計算された。吸収される日射量は傾斜方向によって異なるため、北向き斜面は南向き斜面より積雪深が多い傾向が見られた(図-4a)。底面流出量についても標高や傾斜の違いによる影響が見られた。全体的に積雪量が過少評価気味の傾向があり、今後ドローンを用いて推定した積雪深分布との比較検証や最適化を行っていく必要があるが、本モデルを用いて融雪地すべりの予測に必要な斜面地盤への浸透量の見積もりが可能となった。

表層地盤へ水が浸透するまでに積雪が与える影響としては、積雪底面に到達までの遅れの他に水みちの形成による不均一化がある。それを確認するために、積雪中の降雨イベント(2月22日、図-3bの矢印)を対象に、SNOWPACKで推定した積雪層構造に見積もった降雨量と融雪量を与えて2次元水分移動モデルを用いて水の浸透計算を行った(図-5)。

その結果、水みちの形成により積雪底面から表層地盤に浸透する際に局所的な集中が起きていた。土壌水分計のデータによると同時期に水分が深いところから上昇していたことが確認されており、本計算と合わせて考察することにより、積雪中の不均一な水分浸透が土壌への水分供給の局所化につながり、地下水位の上昇の形で深い位置からの土壌水分の増加につながったことが考察された。

(3) 斜面表層部の水理特性と斜面地盤内の間隙水圧の応答特性

現場で採取した試料を用いて土質試験を行った結果、地盤表層の粘性土層は過圧密状態の粘性土で構成されていた。一方、通年にわたって実施した原位位置浸透能試験からは、地表面の透水性が融雪後から夏期にかけて上昇し、秋の間に低くなることを実証した(図-6, 7)。

また、冬期において最大 22 kN/m² に及ぶ積雪荷重が、地表面に緩速載荷することで透水性が低下することが考えられたために、

新たに考案した圧密透水試験機を使用し、現位置から採取した乱さない試料および再構成試料を用いて検証した結果、荷重の載荷に伴い飽和透水係数が指数関数的に減少することを明らかにした。

連続的な気象および水文観測の結果、地表への水の供給に対する間隙水圧の応答性は、夏季に比べ冬季に低くなることが明らかとなった(図-8)。これらのことから、積雪下の地表面では、水分浸透の抑制に伴うホートン流がパッチ状に発生し、それによる地中浸透量の減少、また地下水位が高くなるため最上位の高透水性の崩積土層内を効率的な排水されることにより、冬季における間隙水圧の上昇は抑制されていることが示唆された。

間隙水圧変動を鉛直一次元非常降水浸透モデルにて再現計算した結果、透水係数と水分拡散係

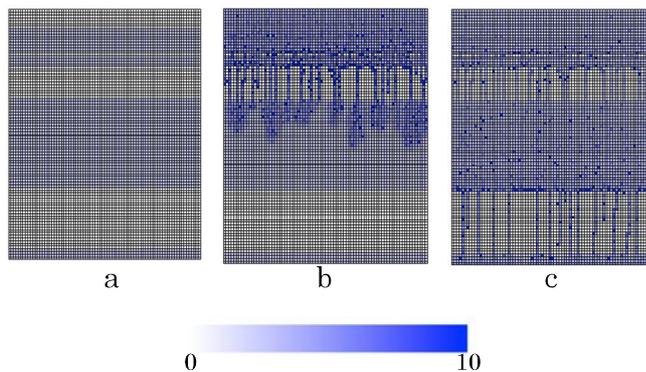


図-5 水分移動モデルを用いた2次元浸透計算
色は体積含水率(%)
(a)降雨前(b)降雨開始8時間後 (c)降雨開始24時間後

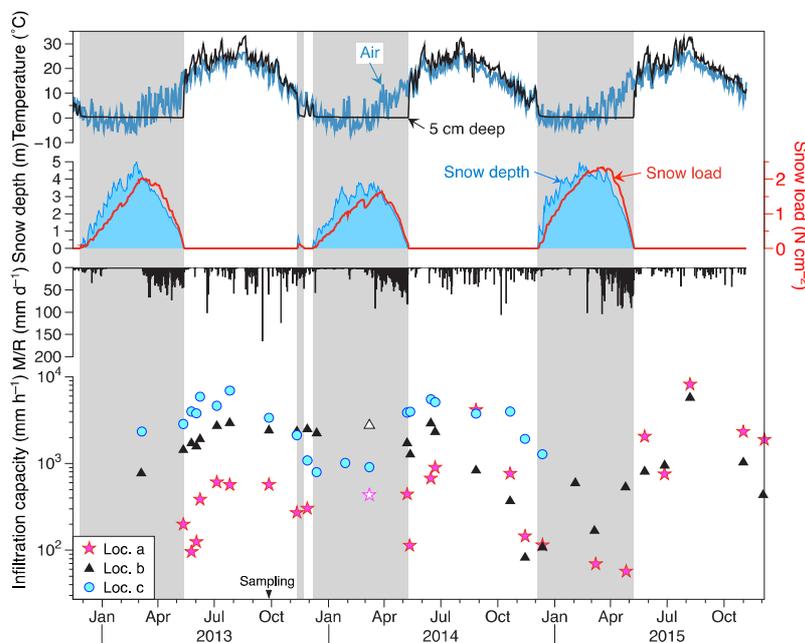


図-6 地表面における浸透能の季節変化

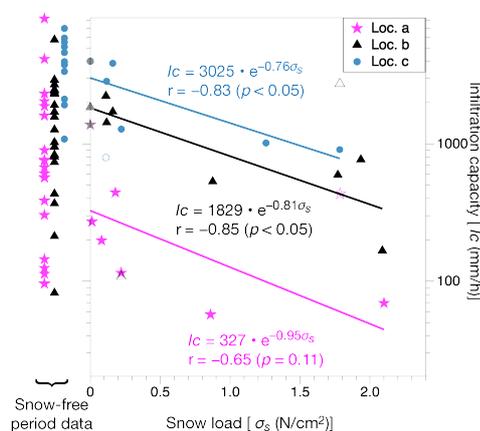


図-7 積雪荷重と浸透能の関係

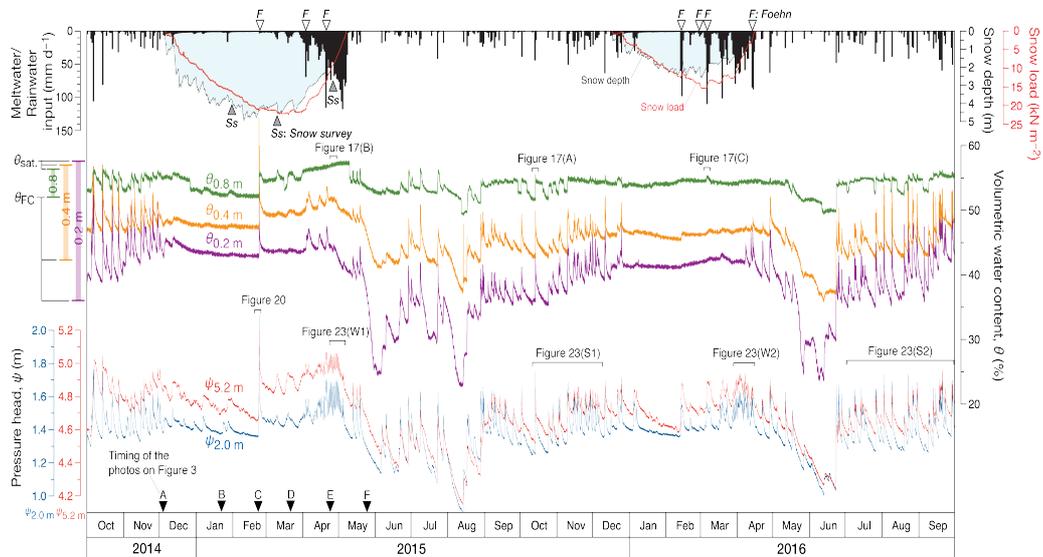


図-8 地すべり地内において観測した地表面到達水に応答する
 土壌水分と圧力水頭の季節変化。

数はそれぞれ冬に高く夏に低くなるという季節性として抽出でき、またこれらの水理学的の性質を支配する土壌水分の観測結果とも調和的であった。地すべり地内の基盤岩内での地下水の上向きのフラックスは冬季により、強化される傾向にある。一方、厳冬期にはフェーンに伴う融雪により、融雪水は積雪層内を選択的に流れ、局所的に集中して地表面へ供給され、顕著な間隙水圧の上昇を引き起こした。そしてこの特異なイベントから、移動体内において部分的に露出した飽和状態の風化残積土が地下深部まで圧力を伝播させる水理学的連続体の役目を担うことが顕在化した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計6件)

- Shibasaki, T., Matsuura, S. and Okamoto, T. (2016): Experimental evidence for shallow slow-moving landslide triggered by decrease in ground temperature, *Geophysical Research Letters*, 43(13), 6975-6984, DOI: 10.1002/2016GL069604. 査読有
- 中町聡, 松浦純生, 平島寛行, 阿部修, 阿部和時 (2017): 樹木模型を用いた予備的な融雪実験, *日本雪工学会誌*, 33(3), 10-15. 査読有
- Osawa, H., Matsuura, S., Matsushi, Y., Okamoto, T. (2017): Seasonal change in permeability of subsurface soils on a slow-moving landslide in a heavy snow region, *Engineering Geology*, 221, 1-9, DOI: 10.1016/j.enggeo.2017.02.019. 査読有
- Matsuura, S., Okamoto, T., Asano, S., Osawa, H., Shibasaki, T. (2017): Influences of the snow cover on landslide displacement in winter period: a case study in a heavy snowfall area of Japan, *Environmental Earth Sciences*, 76:362, 1-10, DOI: 10.1007/s12665-017-6693-7. 査読有
- Osawa, H., Matsushi, Y., Matsuura, S., Okamoto, T., Shibasaki, T., Hirashima H. (2018): Seasonal transition of hydrological processes in a slow-moving landslide in a snowy region, *Hydrological Processes*, 32, 2695-2707, DOI: 10.1002/hyp.13212. 査読有
- Okamoto, T., Matsuura, S., Larsen, J. O., Asano, S. and Abe, K. (2018): The response of pore water pressure to snow accumulation on a low-permeability clay landslide, *Engineering Geology*, 242, 130-141, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.06.002>. 査読有

[学会発表] (計14件)

- 平島寛行, 松浦純生, 大澤光, 阿部修, 岡本隆 (2016): 融雪土砂災害予測にむけた積雪モデルの応用(1), 雪氷研究大会(2016・名古屋).
- 大澤光, 松浦純生, 岡本隆, 柴崎達也, 平島寛行 (2016): 積雪期の地すべり地における特異な間隙水圧変動, 第55回日本地すべり学会研究発表会(高知).
- 中町聡, 松浦純生, 阿部修, 平島寛行, 岡本隆, 大澤光, 柴崎達也 (2016): 樹木分布が林内の融雪特性に及ぼす影響, 雪氷研究大会(2016・名古屋), P1-59.
- 松浦純生, 岡本隆, 平島寛行, 阿部修, 石川裕彦, 土井一生, 大澤光, 柴崎達也 (2017): メソスケールの擾乱による融雪と地すべり, 雪氷研究大会(2017・十日町), C4-2.
- 平島寛行, 松浦純生, 大澤光, 阿部修, 岡本隆 (2017): 融雪土砂災害予測にむけた積雪モデルの応用(2)―積雪中における水みちの土壌浸透への影響―, 雪氷研究大会(2017・十日町).
- 石川裕彦, 松浦純生, 岡本隆 (2017): 融雪時の顕熱フラックス直接観測, 気象学会 2017年秋大会予稿集.
- Osawa, H., Matsuura, S., Matsushi, Y., Okamoto, T. (2017): Seasonal fluctuation in pore-water pressure of a landslide in a seasonal snow cover region, 4th Slope Tectonics Conference, Kyoto.

大澤光、松浦純生、岡本隆、平島寛行(2017): 季節積雪地帯の地すべり地における間隙水圧の季節変動、第 56 回日本地すべり学会研究発表会(長野)。
大澤光、松浦純生、松四雄騎、岡本隆、柴崎達也(2017): 積雪期の斜面変動場における特異な間隙水圧変動、平成 28 年度 京都大学防災研究所研究発表講演会、40、京都。
大澤光、松四雄騎、松浦純生、平島寛行、阿部修、岡本隆(2018): 積雪層内における選択流に関する野外実験、雪氷研究大会(2018・札幌)。
平島寛行、松浦純生、大澤光、阿部修、岡本隆(2018): 融雪土砂災害予測にむけた積雪モデルの応用(3)、雪氷研究大会(2018・札幌)。
平島寛行、松浦純生、大澤光、阿部修、岡本隆(2018): 融雪地すべりの予測に向けた積雪モデルの応用、第 57 回日本地すべり学会研究発表会(新潟)。
大澤光、松四雄騎、松浦純生、岡本隆(2018): 再活動型地すべり地における降水に対する間隙水圧変動の予測、第 57 回日本地すべり学会研究発表会(新潟)。
大澤光、松浦純生、松四雄騎、岡本隆、柴崎達也、平島寛行(2018): 積雪地帯の堆積性軟岩を基盤とする地すべり地における水文過程の季節的遷移、平成 29 年度 京都大学防災研究所研究発表講演会、D07、京都。

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 平島寛行
ローマ字氏名: Hiroyuki HIRASHIMA
所属研究機関名: 防災科学技術研究所
部局名: 雪氷防災研究部門
職名: 主任研究員
研究者番号(8桁): 00425513
研究分担者氏名: 松四雄騎
ローマ字氏名: Yuki MATSUSHI
所属研究機関名: 京都大学防災研究所
部局名: 山地災害環境研究部門
職名: 准教授
研究者番号(8桁): 90596438

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: 岡本隆
ローマ字氏名: Takashi OKAMOTO
研究協力者氏名: 上石 勲
ローマ字氏名: Isao KAMIISHI

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。