

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：82102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04068

研究課題名(和文) 斜面積雪における水の側方流動過程の解明と積雪変質モデルへの導入

研究課題名(英文) Elucidation of lateral flow process of water in slope snow and its application to the numerical snowpack model

研究代表者

平島 寛行(Hirashima, Hiroyuki)

国立研究開発法人防災科学技術研究所・雪氷防災研究部門・主任研究員

研究者番号：00425513

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)：本研究では、斜面積雪において着色水をトレーサーとした野外浸透実験、複数のライシメータ(マルチライシメータ)を用いた自動観測、積雪中の水分移動を計算する数値モデルを用いて積雪中で斜面に平行な方向に水が移動する側方流の発生メカニズムの解析や、モデルによる再現計算を行った。実験結果や再現計算により、側方流の発生するメカニズムや、数値モデルでどこまで再現できるかが明らかになった。一部の過程は再現が難しかったものの、今後の改良に向けた課題も明らかになった。研究期間中には、国内外における側方流に関する過去の研究もとりまとめ、雪氷に総説として掲載された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

積雪地域では、全層雪崩や融雪地すべり等の湿雪災害、水資源の予測等において積雪中の水分移動過程が重要である。豪雪地帯では斜面上に積もった積雪中の水は層構造の影響を受けて斜面に平行な方向へ移動することがあるため、地盤への水の浸透が集中し、湿雪災害につながる可能性がある。このような側方流過程を解明するため、本研究では野外実験や自動観測、数値モデルを組み合わせて側方流の発生メカニズムの解析や再現計算を行った。本研究により、これまで考慮できなかった積雪から土壌へ水が浸透する際の局所的な集中などの積雪期特有の過程が明らかとなり、湿雪災害や水資源管理に対してより高精度な予測手法の創出が可能となる。

研究成果の概要(英文)：In this study, the mechanism of lateral flow in the snowpack was investigated using infiltration experiments with dyed water as a tracer in the snowpack on slopes, automated observation using multi-compartment lysimeters, and a numerical water transport model for the reproduction simulation. The experimental results and reproduction simulations revealed the mechanism of lateral flow generation and the extent to which it can be reproduced by the numerical model. Although some processes were difficult to reproduce, issues for future improvement were also identified. During the research period, previous studies on lateral flow in Japan and abroad were also compiled and published as a review article in seppyo.

研究分野：雪氷学

キーワード：積雪中の水分移動 斜面積雪 側方流 マルチライシメータ 水分移動モデル

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

積雪地域では、全層雪崩や融雪地すべり等の湿雪災害、また河川流出等の水資源の予測等において積雪中の水分移動過程が重要である。豪雪地帯における中山間地域では3~5mの積雪が斜面上に積もり、斜面積雪中の水は層構造の影響を受けて斜面に平行な方向へ移動する(側方流)ことがあるため、鉛直方向より斜面下方側に移動して地盤への水の浸透が集中することがある。その結果、積雪底面から地盤に供給される水が局所的に融雪量や雨量を大きく上回り、地すべり等の災害につながる可能性がある。このように斜面積雪中における側方流動は湿雪災害予測に重要であるものの、その過程は現在の積雪モデルでは考慮されていない。

2. 研究の目的

側方流は斜面積雪中で水が帯水しやすい場所において顕著であるが、帯水の主な原因は氷板や毛管障壁(capillary barrier)の存在である。本研究では、積雪中の水分移動の中でも解明やモデル化が難しかった側方流過程に着目し、野外実験やマルチライシメータ、3次元水分移動モデル等を用いてそれを解明し、積雪モデルで再現可能にすることを目的としている。積雪内部における水の側方流を再現することで、これまでの分布型の積雪・水文モデルでは考慮できなかった積雪から土壌へ水が浸透する際の局所的な集中などの積雪期特有の過程にアプローチが可能となる。本研究でモデルに側方流過程を新たに加えることにより、湿雪雪崩や融雪土砂災害等の湿雪災害に対してより高精度な発生予測手法を創出することを目指していく。

3. 研究の方法

3-1 斜面積雪における野外浸透実験およびその再現計算

本研究では、新潟県上越市の伏野試験地の斜面積雪において着色水をトレーサーとした浸透実験を行った。標高600m付近の斜面地において、毎年3月上旬に積雪調査を行っており、本研究の浸透実験もその一環として行った。対象斜面付近で積雪断面観測を行った後で、斜面上流部で一辺0.5mの正方形の範囲で、70-80mm相当の着色水を1時間程度の時間をかけて散水した。散水した翌日に断面を掘削して水の移動経路を確認し、断面の写真撮影等を行った。本研究期間中や、その前に行った実験等も含めて、5パターンの積雪構造、傾斜角(6度~29度)の結果が得られた。

その後各々の実験に対して、3次元水分移動モデルを用いて再現計算を行ったが、計算時間の節約のため計算は2次元で行った。断面観測で得られた上部1mの層構造の情報を積雪条件として与え、実験斜面と同じ傾斜に設定し、縦1m、横3m、メッシュサイズ2mmで計算区間を設定した。実験と同じ供給範囲(上流部50cm)で同量の水を1時間与え、その後の水の供給を0にして23時間分計算した。

3-2 マルチライシメータデータを用いた側方流発生の解析

長岡の雪氷防災研究センターの露場に設置しているマルチライシメータでは2005年以降のデータが蓄積されており、その間に行われた気象観測や積雪断面観測の情報と組み合わせる様々な積雪パターンにおける水分浸透の再現計算に用いることが可能である。本研究では、断面観測で観測された様々な積雪条件下において、マルチライシメータで観測された積雪底面流出の不均一性に対して水分移動モデルを用いて再現計算を行い、モデルと実測の間で得られる流出の不均一性に関する比較を行った。マルチライシメータは1m²×1m²のライシメータを3×3で並べたものである。各々のライシメータにおける時間流出量の違いから、積雪中の横方向の移動量が確認できる。Yamaguchi et al. (2018)はそのデータの解析を行っており、流出に不均一が発生した時には多くのケースで中心のライシメータに水が集中していたことを確認している。ライシメータは平地に設置されたものであるが、その外側に外部からの流入や流出を防ぐために10cmのフレームで囲われている。ここでは、フレームが僅かな傾斜を形成し、その傾斜が原因で側方流が発生して中心のライシメータへの集中が起きていると仮定した。再現計算では断面観測が行われた時刻を起点に48時間計算を行い、水の供給量は観測された降雨量と積雪変質モデルのSNOWPACKで計算された融雪量の合計を与えた。ライシメータの外側を上流側、内側を下流側として単純傾斜を想定して計算した。

3-3 マルチライシメータが与える積雪斜面形成

3-2の再現計算では、マルチライシメータの枠が形成したわずかな傾斜によって側方流が発生し、個々のライシメータ間での流出量の偏りを生じさせているという仮定で計算を行っている

るが、実際にできていた傾斜を確認する必要がある。そのため、マルチライシメータの枠が積雪構造や傾斜の形成、またそれによる側方流発生にどう影響しているか調べるための野外実験を行った。マルチライシメータは、外側への水の流入を防ぐため、縁を高さ 10cm の枠で囲っているほか、個々のライシメータ間においてはそれより 3cm 低い 7cm の枠で仕切られている。これらの枠が積雪に傾斜を与えるかどうかを確認するために、横 3cm × 高さ 3cm × 奥行き 180cm の立方体の材木を用意して露場に設置した。その際に高低差や間隔は実際のマルチライシメータの枠や仕切りにあわせた。枠と仕切りの高低差を表現するため、外側の柱は 4 本束ねて 2 倍の高さを持つようにした。雪が積もる前に雪氷防災研究センター露場に設置して、十分な積雪がある条件の下で断面観測を実施し、積雪の構造に関する観察を行った。この実験は 2021 年度及び 2022 年度の 2 冬期にわたり行った。

4. 研究成果

4-1 斜面積雪における野外浸透実験と再現計算の比較

斜面浸透実験後に浸透経路を確認するために観測した断面の写真を図 1 に示す。29° の斜面で行った実験(図 1a)においては、積雪は湿ったざらめ雪と乾いたしまり雪が交互に存在する互層構造であり、湿ったざらめ雪中を均一に浸透しながら(a)、粒径が異なる層境界に達したときに帯水し、そこから側方流が発生して下流側に水が移動するとともに帯水した層から鉛直方向へ水の移動した跡も確認できた(b)。水がしまり雪に達した際には水みちを形成して選択的に水分が移動したが(c)、水が氷板に到達した際には再び帯水し、そこでも側方流が発生したことが確認された(d)。再現計算(図 2a)でもこれらの過程に沿った水の移動が計算され、図 1a の浸透経路と図 2a の含水率分布の比較でも、水の浸透経路がよく再現されていたことが確認された。

一方で、側方流が正しく再現できなかったケースも見られた。表層付近で側方流の発生が見られることがあり、そこでは傾斜が 6° 程度の緩やかな斜面でも側方流が発生していた(図 1b)。再現計算ではそのような表層付近での帯水は再現されず、実験とモデルで異なる浸透経路をとる原因となった(図 2b)。この表層付近における側方流は新雪の毛管力が影響しているが、新雪は水を含むと急速に変質するため水分移動に関する実験は困難であり、新雪の水分特性が十分に理解されていないのが現状である。本実験により、側方流を精度良く再現するためには新雪に関する水分特性の解明が重要であることが提起された。また、側方流の発生に関する氷板の扱いに関しても課題が残された。浸透実験後の断面観測で確認された斜面積雪中に形成された氷板にはところどころに穴があり、通常では不透水層となる氷板はそのような穴を通して水を通過させることがある。このような氷板上で起きた帯水層においてどこから水が抜けるかを再現するために、氷板に関するモデル化の研究も必要となることが本実験から提起された。

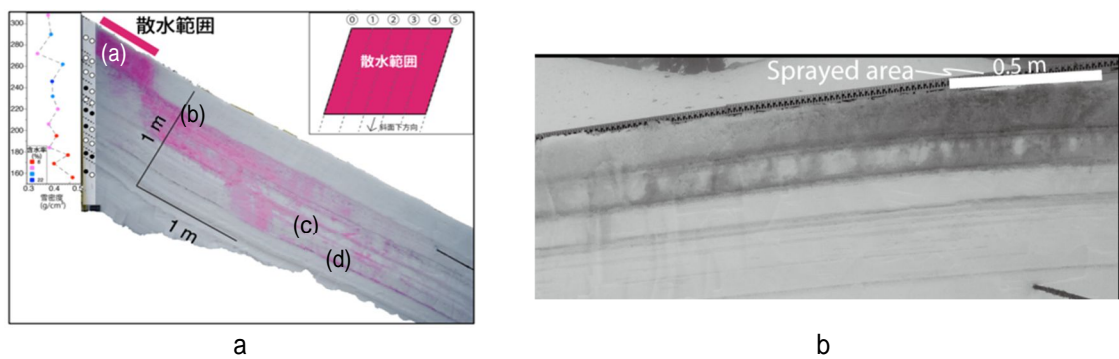


図 1 野外実験において観測された側方流の浸透経路 (a: 29° 斜面, b: 6° 斜面)

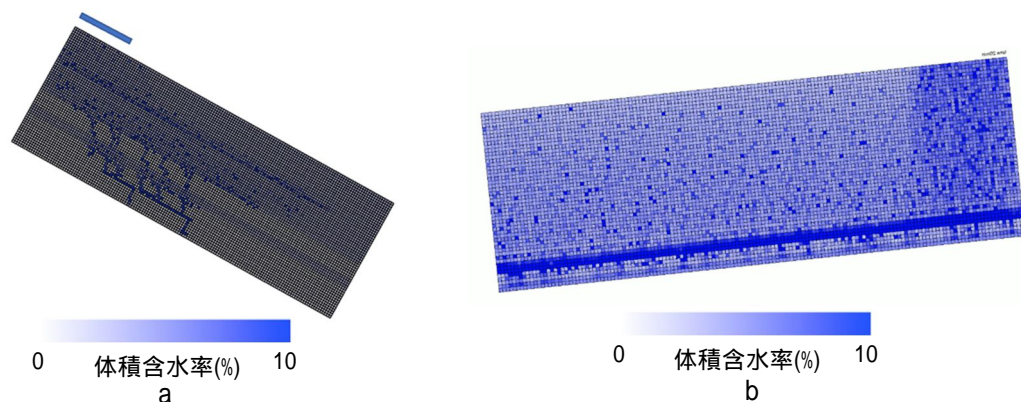


図 2 水分移動モデルを用いた側方流の計算における含水率分布。(a: 29° 斜面, b: 6° 斜面)

4-2 マルチライシメータのデータを用いた再現計算

マルチライシメータで観測された底面流出については、断面観測後 2 日間で測定された底面流出が不均一であったか否かに着目した。図 3 に不均一な流出が見られたケース(図 3a; ケース A)と、流出が均一であったケース(図 3b; ケース B)を示す。図 4 に、図 3 で示したケース A 及び B における水分移動モデルで計算した積雪内部の含水分布と、上流部と下流部における底面流出の比較を示す。ケース A においては、積雪上部に毛管障壁により帯水した層があり(図 4a)、そこで起きた側方流の影響で下流部における流出が多かった傾向が見られた(図 4c)、流出量の偏りの計算結果は観測結果より大きかったが、不均一な流出となったことに関しては一致した。ケース B においては、そのような毛管障壁がなかったため均一に浸透し、流出量に関してもほとんど偏りがなかった(図 4b, d)。

50 以上のケースに対して同様の比較を行った結果、偏りの度合いを一致させることは難しいものの、帯水層が形成されて側方流が発生し、それにより流出に不均一が生じるといったメカニズムは再現できたことが確認された。モデルを用いることで自動観測のみでは得られない積雪内部における過程が推測可能となり、またマルチライシメータのデータと比較することでその推測を裏付けることができた。再現できなかったケースとしては、モデルで計算された毛管障壁の影響が強すぎたため過剰に帯水して流出に至らなかったケースなどが見られた。断面観測で測定した粒径が厳密でないことや、計算で与えている傾斜が単純化されていること等はモデルと実測の間の不一致につながる。本研究により、今後の精度改善に必要な課題が示された。

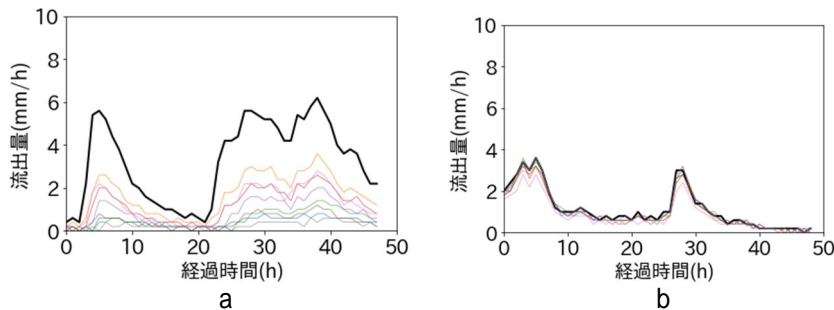


図 3 マルチライシメータで観測された個々のライシメータからの流出量。黒が中心のライシメータからの流出量を示す。(a: ケース A、b: ケース B)

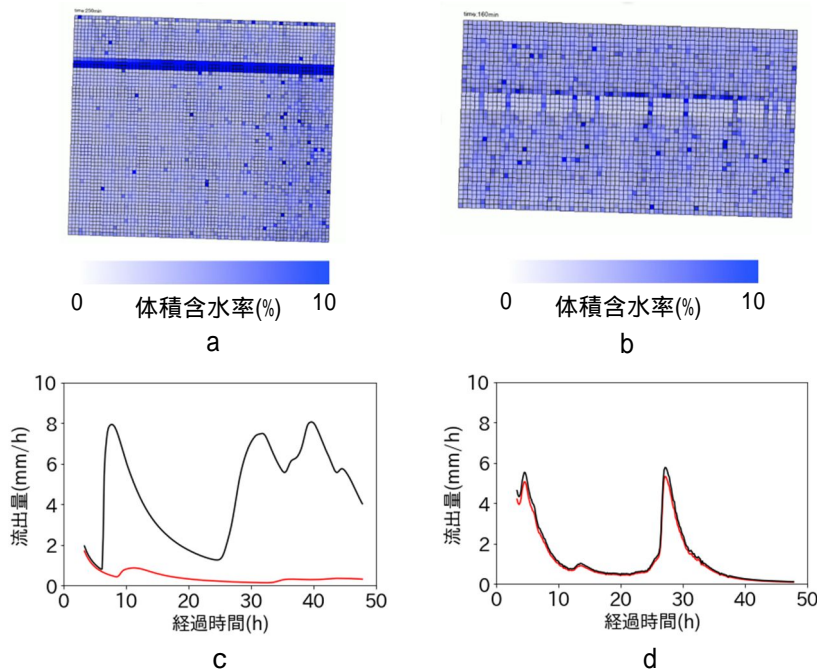


図 4 水分移動モデルで計算したマルチライシメータ上の積雪中を流れる水分移動の計算結果。a 及び b は含水率分布、c 及び d は流出量を示す。流出量グラフは上流側での流出を赤、下流側での流出を黒で示した。(a: ケース A の含水率分布、b: ケース B の含水率分布、c: ケース A の流出量グラフ、d: ケース B の流出量グラフ)

4-3 マルチライシメータの枠による積雪構造への影響の確認

マルチライシメータは図 5a に示すように外側が枠で囲まれており、個々のライシメータが仕切りで区切られている。これを模擬するために、図 5b のように等間隔で柱を設置した。その後雪が堆積した後に、積雪深が 1m を超えた天気の良い日を選んで、積雪の断面を掘り出して観測を行った。図 5c に示すように、設置した柱の周辺付近では積雪が褶曲しており、側方流が発生してもライシメータの枠を超えて水が移動しにくいことが確認された。このことから、枠は外側への流出入を防ぐとともに、水を内側に移動させる効果を持つことがわかる。内側では外側より小さい柱を設置しているが、そこでも小さい褶曲が見られた。小さい柱の真上の積雪下部ではライシメータ間の境界を越えづらいう方で、積雪の上部では褶曲は小さくなり、境界を越えることが可能と推測された。それを確認するために上部から水を流したところ、実験時は全層がざらめ雪であったため帯水は起きにくい条件であったが、わずかにできた帯水、側方流の箇所の一部の水が柱の上をまたいで移動する様子も見られた(図 5d)。写真から得られた柱による積雪の褶曲の形はサインカーブで近似し、積雪上部に行くほどその振幅が小さくなる形で近似できた。特定の事例に限定されるが、写真の解析から積雪の高さと振幅の大きさの関係式を作成し、褶曲の形を定式化した。これをモデルに組み込むことによりライシメータの枠により作成された実データに基づいた傾斜のシミュレーションも可能にした。

本研究で行ってきた研究成果は雪氷研究大会や地すべり学会、地球惑星科学連合のほか、国際雪氷シンポジウム(IGS)で発表し、開催した積雪ワークショップでも紹介した。また、本研究では側方流に関する国内外のレビューの取りまとめも行い、発起人となって発行した雪氷の湿雪特集号に総説として掲載された。

以上のように、着色トレーサーによる浸透断面の野外実験、マルチライシメータによる地表面流出の自動観測、および 3 次元の水移動の数値計算により、斜面積雪内における選択的な浸透プロセスを実証した。これにより積雪開始から消失までの融雪を逐次計算可能な積雪変質モデルへ組み込む基礎的知見を得ることができた。

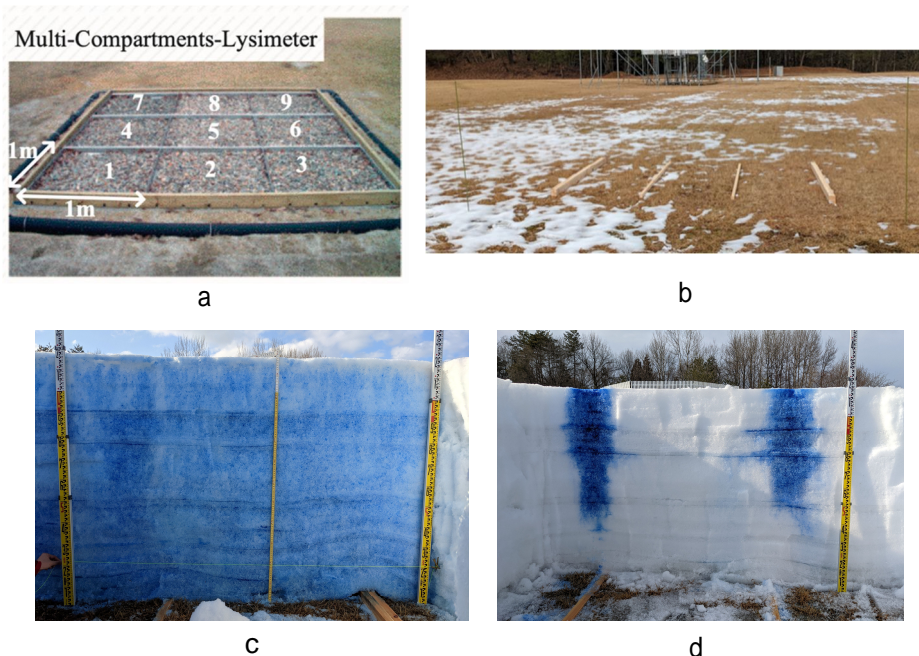


図 5 マルチライシメータの枠の影響に関する模擬実験(a: マルチライシメータの写真, b: 模擬実験における柱の設置, c: 柱の上に堆積した積雪構造の写真, d: 上部から水を流した後の浸透の様子)

参考文献

Yamaguchi et al. (2018), Cold Reg. Sci. Tech., 149. 95-105.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 1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 田邊章洋・青木輝夫・井上峻・平島寛行・山口悟	4. 巻 85
2. 論文標題 国際雪シンポジウム参加報告	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 雪氷	6. 最初と最後の頁 19-24
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 平島寛行・山口悟・庭野匡思・山崎剛・加茂祐一・荒川逸人・安達聖・勝島隆史・大澤光・橋本明弘・石元裕史	4. 巻 85
2. 論文標題 積雪ワークショップ開催報告	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 雪氷	6. 最初と最後の頁 25-42
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 平島寛行・大澤光	4. 巻 83
2. 論文標題 斜面積雪中における水の側方流の解明に向けたこれまでの研究と課題	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 雪氷	6. 最初と最後の頁 555-567
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 平島寛行・本吉弘岐・山口悟・大澤光
2. 発表標題 マルチライシメータの枠が積雪構造および側方流発生に与える影響
3. 学会等名 日本雪氷学会北信越支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平島寛行・大澤光・山口悟・Francesco Avanzi
2. 発表標題 積雪中における水の側方流のモデル計算 - トレーサー実験とマルチライシメータ測定結果を用いた再現計算 -
3. 学会等名 雪氷研究大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroyuki Hirashima, Hikaru Osawa, Francesco Avanzi, Satoru Yamaguchi
2. 発表標題 Lateral flow of liquid water in the snowpack
3. 学会等名 International Symposium on Snow (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大澤光・岡本隆・松浦純生・柴崎達也
2. 発表標題 積雪が斜面変動へ及ぼす影響に関するレビュー
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大澤光・平島寛行・松四雄騎・勝島隆史・岡本隆・松浦純生・竹内由香里・勝山祐太
2. 発表標題 斜面積雪層内における水の移動過程に関する野外実験
3. 学会等名 雪氷研究大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平島寛行・山口悟・Francesco Avanzi・Nander Wever・大澤光
2. 発表標題 積雪中の側方流による流出不均一の水分移動モデルを用いた再現計算
3. 学会等名 雪氷研究大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大澤光・平島寛行・岡本隆・土佐信一・松浦純生
2. 発表標題 地すべり地における積雪期の流出水量観測
3. 学会等名 雪氷研究大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平島寛行・大澤光・松浦純生・岡本隆
2. 発表標題 水分移動モデルを用いた斜面積雪中における水分浸透実験の再現計算
3. 学会等名 雪氷研究大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大澤光・岡本隆・松浦純生・平島寛行
2. 発表標題 地すべり地における多雪年と少雪年の間隙水圧応答の比較
3. 学会等名 日本地すべり学会
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	大澤 光 (Osawa Hikaru) (70839703)	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・研究員 (82105)	

	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
研究協力者	アバンジ フランシスコ (Avanzi Francesco)		

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		
イタリア	国際環境モニタリングセンター (CIMA)		