

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：82105

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H03009

研究課題名(和文)「雪氷圏地すべり学」の確立に向けて - 地すべり活動に積雪が及ぼす力学作用の解明

研究課題名(英文) Elucidation of the mechanical effects of snow on landslide movements - Toward the establishment of "Cryospheric Landslide Science"

研究代表者

岡本 隆 (Okamoto, Takashi)

国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等

研究者番号：30353626

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)：積雪期に地すべり活動が鈍化する特異な地すべり機構を明らかにするため、現地測定及び数値解析により、積雪層の力学的作用が地すべり活動に与える影響を調査した。地すべり地の積雪調査により、積雪層の平均せん断強度は7.9kN/m²が得られ、その強度は積雪の圧密や再凍結により深部ほど高くなる傾向が認められた。同地すべりの地形・地質特性や得られた積雪層のパラメータ等を用いた斜面安定解析によれば、積雪層の载荷により同地すべりの斜面安全率は13.5%上昇した。この上昇には特に積雪層のせん断強度が強く寄与していた。以上から、積雪期における地すべり活動の鈍化現象を説明しうる新たな知見が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

積雪地域の地すべりの一部は、地下水位が高い融雪期にも活動が鈍い事例が散見されるため、同時期の正確な危険度評価を困難にしていた。本研究成果で得られた積雪の力学的作用を考慮することで、融雪期をはじめとする積雪期の地すべり危険度の正確な評価に貢献でき、ひいては積雪地域の地すべり警戒・避難態勢の構築に寄与できると期待される。

研究成果の概要(英文)：In order to elucidate the unusual landslide mechanism that slows down the landslide activity during the snowy season, we investigated the effect of the mechanical action of the snowpack layer on the landslide activity through field measurements and numerical analysis. The average shear strength of the snowpack was 7.9 kN/m² which tended to increase with depth due to snow consolidation and refreezing. Slope stability analysis using the topographic and geologic characteristics of the landslide and the obtained snowpack parameters indicated that loading of the snowpack increased the slope safety factor by 13.5%. The shear strength of the snow cover layer in particular contributed strongly to this increase. In conclusion, we obtained reasonable results on the mechanism of the slowdown of landslide activity during the snow season.

研究分野：治山工学

キーワード：地すべり 積雪 せん断強度 斜面安定解析

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地すべりは最も大規模なマスムーブメントのひとつである。その主誘因は降雨や地震だが、積雪地域では雪も強く関与する。冬季の積雪深が3mを超えるような豪雪地域では、融雪期に累積1000mm以上の融雪水が継続的に土層へ浸透して間隙水圧を長期間にわたって上昇させ、いわゆる融雪地すべりを引き起こす。これまで、地すべり災害の防止・軽減に向けて、融雪浸透-地下水変動プロセスに基づいた積雪環境下の地すべり機構に関する水文学的研究が進められ、多くの成果が得られてきた。一方、近年の調査結果を整理すると、積雪期にこれらとは異なる活動パターンを示す地すべり、例えば急激な豪雪の直後に発生する地すべり(古谷ら、2017)や、融雪期に活動が鈍化する地すべりも報告されている(岡本ら、2008)。研究代表者らが長期観測をおこなっている新潟県伏野地すべりは、地すべりは秋から初冬に大きく移動するが積雪深が増えると速度が低下し、大量の融雪水が発生する融雪期にはほとんど動かない特徴をもつ。この地すべり機構は従来の融雪のみでは説明ができず、他の要因に求める必要がある。

近年、積雪期の地すべり活動に重要な役割を果たす要因として、積雪の力学的作用が注目されている。地すべり地に堆積する積雪層は積雪荷重の作用(岡本ら、2008)のほか、地すべり移動域と不動域の境界でせん断抵抗力を發揮して地すべり活動の抑制力として働くことが想定される(図1)。先述した積雪期の多様な地すべり活動は、融雪浸透による水文的作用と積雪の力学的作用の複合作用(せめぎ合い)の結果として生じたと考えられる。しかし積雪の持つ力学的作用の実態はほとんど分かっておらず、積雪期の地すべり機構を理解するうえでの学術的ネックとなっている。

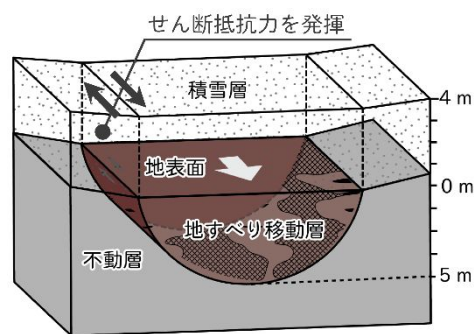


図1 積雪層の發揮するせん断抵抗力

2. 研究の目的

本研究の目的は、積雪期の地すべり活動を支配する誘因のひとつである積雪の力学的作用に着目し、その実態と地すべり活動への影響を解明することである。目的達成のため対象地すべりの積雪調査を実施し、積雪層のせん断強度の深度分布及び積雪荷重を正確に測定する。さらに、現地調査によって得られた積雪層のパラメータを取り入れた地すべり斜面安定解析をおこなって、地すべりに与える積雪層の力学的作用の影響を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 調査地の概要

本研究の調査地として、新潟県上越市の伏野(ぶすの)地すべり(北緯37度03分、東経138度27分)を設定した。伏野地すべりは東頸城丘陵内の標高550-630mの東斜面に位置する再活動型地すべりで、幅30-60m、長さ350m、斜面勾配5-15°の緩やかで細長い形状を成す。地すべり土層の地質は第三系の椎谷・寺泊層および西山層に属する黒色泥岩を中心として一部に凝灰岩を挟在するが、いずれの層も浅層域は強い風化を受けて構造の脆弱化が進んでいる。すべり面は既往調査により深度3-7mの風化泥岩あるいは風化凝灰岩中にあることが判明している。伏野地すべりの位置する東頸城丘陵は全国有数の豪雪地域であり、地すべり地近傍の気象観測露場によれば1989年から1999年までの年平均降水量は約3000mmで、うち47%を降雪が占める。1989年から1999年まで11年間の最大積雪深は平均357cm、最大464cmである(松山ら、2004)。

(2) 積雪層のせん断強度測定

伏野地すべり左岸側上部斜面において積雪調査を実施した。掘削により露出した積雪断面を用いて積雪層のせん断強度のほか、雪質、粒径、雪温、密度、含水率を雪質の変化した積雪層ごとに測定した。調査時の積雪深は3.08m、雪質はザラメ雪としまり雪の互層であった。せん断強度の測定には、シアーフレーム(有効せん断面積0.01m²、チタン製)およびプッシュゲージ(Push gauge)の2種類を用いた。シアーフレームによるせん断強度測定は積雪層上部から下部に向け、雪質の変化した層ごと(平均間隔10cm)に3回おこない、その平均値を深度別のせん断強度とした。本研究では、地すべり移動時の積雪層のせん断状態を考慮して、せん断断面を積雪層の平行面(SFIH)および鉛直面(SFIV)の両面でせん断強度の測定を行った。

プッシュゲージ(デジタル式荷重測定器)はTakeuchiら(1998)が考案したデジタル式荷重測定器を用いた積雪層の硬度を測定する装置である。測定が比較的単純なため多点の硬度を短時間で測定可能な利点があり、また既往の経験式を用いれば、測定された硬度から積雪のせん断強度を推定可能なメリットも有する。本調査ではシアーフレームと同じく積雪断面の上部から下部に向けて、雪質の変化した積雪層ごとに各3回の測定をおこない、その算術平均を経験式に適用し深度別のせん断強度(H)を得た。

(3) 三次元斜面安定解析

測定された積雪層のせん断強度が地すべりの安定性に与える影響を検討するため、Shibasakiら(2008)の先行研究を参考に単純な形状からなる地すべり移動層の上に積雪層を載荷させた三次元数値モデルを作成した(図2)。地すべり移動層、すべり面、積雪層の材料パラメータは表1に示すとおりである。地すべり移動層の形状は、調査をおこなった伏野地すべりの実態を反映した舟底型で、長さ120m、幅40m、層厚5.0m、勾配7.0度とした。すべり面の強度パラメータは、既往の土質試験結果を考慮して内部摩擦角を8.0度に設定したうえで、積雪載荷前の斜面安全率が1.00となるよう粘着力 3.0 kN/m^2 を逆算値で与えた。解析時の地下水位はすべり面底面から地表までの距離の2/3に相当する水位を設定し、積雪荷重時でも不変とした。以上の初期条件のもとで、層厚3.1mの積雪層を載荷させた。積雪層の荷重は、積雪深に単位体積重量を乗じて求められる 13.33 kN/m^2 とし、そのうえで積雪層のせん断強度を $0\text{--}10\text{ kN/m}^2$ の範囲で変化させたときの斜面の三次元安全率(F_s)の変化を計算した。同計算は鶴飼ら(1988)の簡易Janbu法に基づく計算プログラムSSA_3Dを用いた。

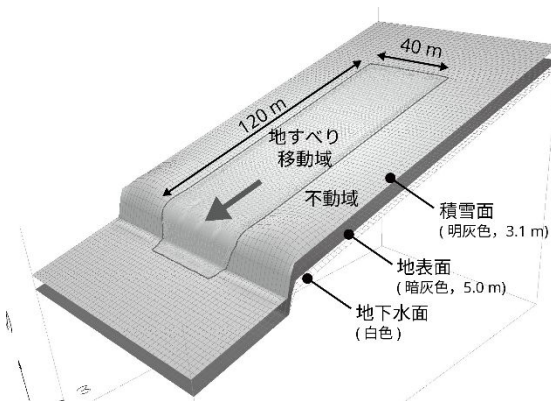


図2 積雪層を載荷させた地すべりの三次元数値モデル

表1 三次元斜面安定解析に用いたパラメータ

地すべり移動層	長さ120m, 幅40m, 層厚5.0m 地下水位GL-1.7m
すべり面	内部摩擦角 8.0° , 勾配 7.0° 粘着力 3.0 kN/m^2
積雪層	層厚3.1m, 単位体積重量 4.3 kN/m^3 内部摩擦角 0.0° , 粘着力 $0\text{--}10\text{ kN/m}^2$

4. 研究成果

(1) 積雪層のせん断強度

シアーフレーム及びプッシュゲージにより得られた積雪層のせん断強度(SFIH、SFIV、(H))を積雪密度と合わせて図3に示す。せん断強度は積雪表層では小さく(約 $0\text{--}1.0\text{ kN/m}^2$)、圧密や再凍結などが進む下層ほど大きい(約 $6\text{--}15\text{ kN/m}^2$)。シアーフレームの測定面方向によるせん断強度(SFIH、SFIV)に大きな差異は認められなかった。せん断強度の全層平均値はプッシュゲージ測定で 3.6 kN/m^2 、シアーフレーム測定(SFIH)で 7.9 kN/m^2 となった。シアーフレームはプッシュゲージに比べて測定値が大きい傾向にある。これは、有効せん断面積の大きいシアーフレームほど積雪層内に狭在する強度の高い硬層を捉えたことが背景にある。本研究では、硬層の強度をより正確に反映したと考えられるシアーフレームによる測定値(SFIH= 7.9 kN/m^2)を解析時のパラメータとして取り扱った。

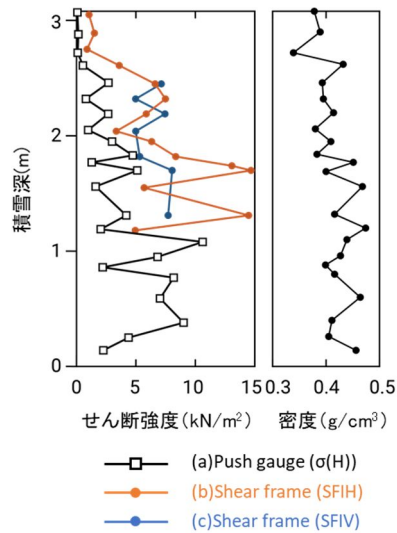


図3 積雪層のせん断強度及び密度の分布。シアーフレーム計測は1.18m以深で欠測。

(2) 三次元斜面安定解析

積雪層のせん断強度の変化にともなう斜面安全率(F_s)の変化を図4に示す。斜面安全率は、

積雪層の荷重とせん断強度の両方が加味されることで変化する。図4には積雪荷重を考慮したケース(積雪荷重あり)のほかに参考として積雪荷重を考慮しない(積雪荷重なし)ケースの解析結果も併記した。解析の結果、斜面安全率はせん断強度の増加にともなって大きく上昇し、現地で直接測定された積雪層の平均せん断強度(7.9kN/m²)のもとでFsは1.000から1.135まで13.5%の上昇が見積もられた。一般に、滑動した地すべりに対しては、目標安全率1.1-1.2を目処に集水井工などの対策事業が実施されることが多い。今回使用した斜面モデルは単純形状のため定量的な議論は難しいが、すべり層厚が薄く(5m)、緩勾配(7°)条件の地すべりに対しては、層厚3.1mの積雪層は、従来の対策工に匹敵する地すべり抑制効果を間接的にもたらす可能性が示唆された。今後は実際の地すべり形状を反映したモデルでの解析を実施し、詳細な検証を進める予定である。

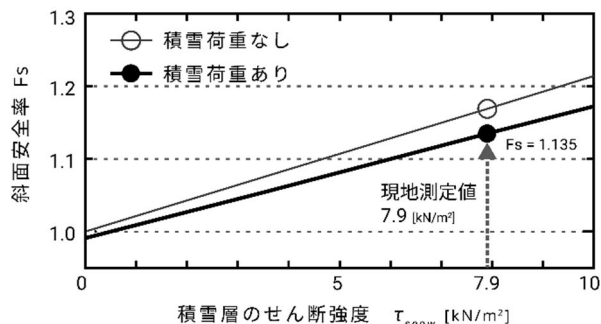


図4 三次元斜面安定解析結果

<引用文献>

古谷元、村尾英彦、松浦純生(2017)南砺市上百瀬で発生した土砂災害、砂防学会誌、70(2)、26-29。
 岡本隆、松浦純生、浅野志穂(2008):積雪地域における浅層地すべりの変形機構、日本地すべり学会誌、44(6)、358-368。
 松山康治、松浦純生、浅野志穂、岡本隆、竹内美次(2004)新潟県の丘陵山間地域における積雪環境特性、日本雪工学会誌、20(1)、48-60。
 Shibasaki, T., Shinoda, K., Yamasaki, T. (2008) Possible mechanism to explain various landslide behaviors during snow season, International Conference on Management of Landslide Hazard in the Asia-Pacific Region, 809-817。
 Takeuchi Y., Nohguchi Y., Kawashima K., Izumi K. (1998) Measurement of snow-hardness distribution, Annals of Glaciology, 26, 27-30。
 鵜飼恵三、細堀健司(1988)簡易 Bishop 法、簡易 Janbu 法および Spencer 法の三次元への拡張、土木学会論文集、394、III-9、21-26。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1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 0件）

1. 著者名 岡本隆、大澤光、平島寛行、竹内由香里、松浦純生、柴崎達也	4. 巻 71-1
2. 論文標題 積雪層のせん断抵抗力が斜面安定に及ぼす影響の数値的検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 関東森林研究	6. 最初と最後の頁 187-189
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18件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 松浦純生、岡本隆、大澤光
2. 発表標題 日本海側の中山間地帯における積雪環境の 変動
3. 学会等名 雪氷研究大会（千葉オンライン）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松浦純生、岡本 隆、大澤 光
2. 発表標題 来海沢地すべりの誘因についての検討
3. 学会等名 日本地すべり学会第60回研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡本隆
2. 発表標題 令和3年3月に発生した糸魚川市来海沢地区の融雪地すべり災害
3. 学会等名 今年の雪速報会2020-21（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡本隆、柴崎達也、松浦純生、浅野志穂、大澤光、平島寛行
2. 発表標題 長期動態観測が捉えた地温低下に起因する地すべり運動の活発化
3. 学会等名 第59回日本地すべり学会研究発表会
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 第59回日本地すべり学会研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 平島寛行、岡本隆、大澤光、松浦純生
2. 発表標題 積雪変質モデルを応用した地すべり活動に対する積雪の影響の解析
3. 学会等名 第59回日本地すべり学会研究発表会
4. 発表年 2020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(2020・オンライン)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡本隆、柴崎達也、松浦純生
2. 発表標題 地温低下にともなって斜面変動が活発化する事例
3. 学会等名 第10回関東森林学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡本隆、馬場俊明
2. 発表標題 斜面規模の異なる地すべりの安定性に及ぼす積雪層の影響評価
3. 学会等名 第132回日本森林学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡本隆、大澤光、平島寛行、竹内由香里、松浦純生、柴崎達也、阿部修
2. 発表標題 地すべり地に堆積する積雪層のせん断強度測定
3. 学会等名 第58回日本地すべり学会研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大澤光、松四雄騎、松浦純生、平島寛行、岡本隆
2. 発表標題 融雪土砂災害防止へ向けた積雪層における融雪水の移動経路の推定
3. 学会等名 第58回日本地すべり学会研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平島寛行、松浦純生、岡本隆、大澤光、柴崎達也、阿部修
2. 発表標題 地すべり発生における積雪の影響のモデル化にむけて
3. 学会等名 第58回日本地すべり学会研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大澤光、松四雄騎、松浦純生、平島寛行、阿部修、勝島隆史、竹内由香里、岡本隆
2. 発表標題 傾斜した積雪層内における融雪水の移動経路に関する野外実験 - 融雪土砂災害の予測へ向けて -
3. 学会等名 雪氷研究大会 (2019・山形)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平島寛行、松浦純生、岡本隆、大澤光、柴崎達也、阿部修
2. 発表標題 積雪モデルを用いた積雪期の地すべり発生機構の解明にむけて
3. 学会等名 雪氷研究大会 (2019・山形)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡本隆
2. 発表標題 積雪層の力学特性が地すべりの安定性に及ぼす影響の数値実験
3. 学会等名 第9回関東森林学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大澤光、松四雄騎、平島寛行、松浦純生、岡本隆
2. 発表標題 空間時間变化する斜面積雪内の水分移動プロセス
3. 学会等名 日本地形学連合2019秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡本隆、松浦純生、大澤光、平島寛行、竹内由香里、柴崎達也
2. 発表標題 地すべりの安定性に及ぼす積雪層の力学的影響評価
3. 学会等名 令和元(2019)年度京都大学防災研究所研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡本隆、大澤光、平島寛行、竹内由香里、松浦純生、柴崎達也
2. 発表標題 地表面に堆積する積雪のせん断抵抗力を考慮した斜面安定解析
3. 学会等名 第131回日本森林学会大会
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	松浦 純生 (Matsuura Sumio) (10353856)	京都大学・防災研究所・名誉教授 (14301)	

6. 研究組織（つづき）

	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	竹内 由香里 (Takeuchi Yukari) (90353755)	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等 (82105)	
研究分担者	平島 寛行 (Hirashima Hiroyuki) (00425513)	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 (82102)	
研究分担者	村上 亘 (Murakami Wataru) (10353880)	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等 (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	大澤 光 (Osawa Hikaru)	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等 (82105)	

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