

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：82105

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22510199

研究課題名（和文） 大規模表層雪崩に対する森林の減勢効果の研究

研究課題名（英文） Study on the energy dissipating effect of forests on large-scale snow-avalanches

研究代表者

竹内 由香里 (TAKEUCHI YUKARI)

独立行政法人森林総合研究所・気象環境研究領域・チーム長

研究者番号：90353755

研究成果の概要（和文）：雪崩に対する森林の減勢効果を検証するために、2008年2月に妙高山域の幕ノ沢で発生し、スギ林に流入して停止した大規模な乾雪表層雪崩の流下を運動モデル TITAN2D で再現した。底面摩擦角を変えてスギ林の有無による雪崩の速度や流下距離を比較した結果、もしスギ林がなければ、雪崩の流下距離がスギ林内を流下した実際の流下距離より 200 m 程長くなると推定され、雪崩に対する森林の減勢効果が明らかになった。

研究成果の概要（英文）：The large-scale snow-avalanche flow was simulated over the terrain of the Makunosawa valley in Myoko using the numerical model TITAN2D, in order to verify the effect of forests on reducing velocity and stopping the avalanche of the Makunosawa valley in 2008. In the simulations, forest was distinguished from open area without forest by giving the larger bed friction angle. In result of the simulation, if the forest had not existed, the avalanche might have reach 200 m farther than the actual reach in the forest. The distinct effect of forest was shown.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：雪氷学

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学、自然災害科学

キーワード：雪崩、森林、減災効果

## 1. 研究開始当初の背景

妙高山域の幕ノ沢（新潟県妙高市）において2008年2月17日に大規模な面発生乾雪表層雪崩が発生し、地震計、ビデオカメラ、雪崩発生検知システムの記録により詳細な発生日時を知ることができた。また雪崩の発生に至るまでの気象データ（気温、降水量、積雪深）を得ることができた。

幕ノ沢では、過去10冬期のうちに流下距

離が2000mを超える大規模な雪崩を5回観測することに成功している。その観測結果を活用して、これまでは主として雪の粘性圧縮理論に基づいた積雪安定度の推定を行ない、表層雪崩の発生予測に有効な手法を確立することができた（小南ら、1998；竹内ら、2004、2007）。

幕ノ沢で観測したこれらの大規模雪崩は、国内はもとより海外の事例と比較しても非

常に規模が大きく、中でも2008年の雪崩は流下距離が3000 mに達する大規模なものであった。そこで雪崩発生後から融雪期にかけて詳細な現地調査を行ない、雪崩発生に至る冬期の気象条件、雪崩の流下経路、到達範囲、堆積量など雪崩の規模や特性を明らかにした(竹内ら, 2009)。さらに融雪が進むにつれて、雪崩に埋まった倒壊樹木の状況が明らかになり、雪崩の一部がスギ林に流入したものの、林を抜けて下流までは達していないこともわかった。そこで、被害を受けたスギ林を対象に調査を実施し、林相や樹木の倒壊状況など森林の表層雪崩に対する減勢効果の検証につながる詳細なデータを得ることができた。

厳冬期の降雪中に発生することの多い乾雪表層雪崩の場合、春先に発生する全層雪崩と異なり、まず発生日時を知ることが容易ではなく、流下経路や到達範囲を見極めることはさらに難しい。そのため表層雪崩の発生地点や流下経路、到達範囲、堆積量のデータセットを得られる機会は極めて少なく、雪崩の運動モデルを検証するためのデータが乏しいのが現状である。欧米の諸外国に比べて、爆薬を使用する人工雪崩実験の実施が法律上難しい日本においてはより一層、実際の表層雪崩を調査したデータセットは貴重であるといえる。また、表層雪崩が森林内に流入し、かつ林内で停止した事例の調査結果は大変希少であり、森林の表層雪崩に対する減勢効果を検証するデータとして有益である。このように大規模な乾雪表層雪崩の流動に関するデータと、その雪崩による森林の倒壊状況のデータを併せて得られた研究成果をさらに発展させるために、本研究を着想するに至った。

雪崩の運動を再現したり予測したりするために、これまでに国内外で数多くの数値モデルが提案されてきた。幕ノ沢においては、同一経路を流下した乾雪雪崩と湿雪雪崩のデータによって、1次元の運動モデルによるシミュレーション結果を検証し、雪質の違いを考慮する必要性を示した(Takeuchi *et al.*, 2003)。最近では特に防災上の必要性から、雪崩の最大到達距離や速度のみを推定する従来の1次元モデルではなく、雪崩の高さや3次元の地形上での広がりをも再現できるモデルが求められるようになった。このような要請に応じて、土石流や地すべりを対象に開発され、実際の地形上でのシミュレーションに実績のあったTITAN2D (Pitman *et al.*, 2003)を雪崩の運動に適用されるようになり(西村ら, 2007)、実際の雪崩のデータによるモデルの検証が課題であった。

## 2. 研究の目的

2008年大規模雪崩の調査結果と比較しな

がら、運動モデルによって幕ノ沢における大規模雪崩の流動を再現する。さらにこのモデルを用いたシミュレーションにより、流下する雪崩に対する森林の減勢効果を検証することを目的とする。

## 3. 研究の方法

2008年に妙高山域の幕ノ沢で発生した乾雪表層雪崩が流入したスギ林の調査結果を解析し、樹木の位置と倒壊状況の関係を調べる。スギの樹幹が折れる応力から逆算して、雪崩の速度の推定も試みる。これと並行して、雪崩の運動を3次元で表わす運動モデルによって幕ノ沢の地形上で雪崩の流下を再現し、調査結果と比較してモデルの検証を行なう。さらに雪崩の運動に対する森林の抵抗を組み込む方法を考案し、森林の有無が雪崩の流動に及ぼす効果を明らかにする。また、冬期間の幕ノ沢における雪崩の発生検知や気象および積雪観測を充実させて、モデルの結果を検証するため、また雪崩の発生予測につなげるためのデータの蓄積を図る。

## 4. 研究成果

### (1) 表層雪崩によるスギ林の倒壊状況と雪崩速度の推定

妙高・幕ノ沢で2008年2月17日に大規模な面発生乾雪表層雪崩が発生し、多数の樹木が倒壊した。森林の表層雪崩に対する減勢効果を検証するために、スギ人工林を対象として林相や樹木の折損状況を調査した。スギの折損は雪崩が流入した林縁付近で最も甚大で、林内へ入るにつれて軽微となり、雪崩の

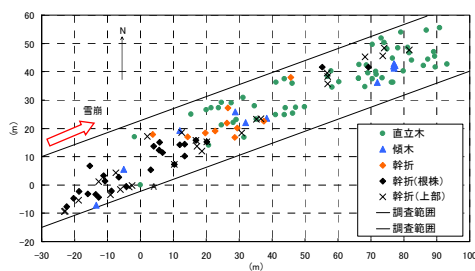


図1 調査したスギの位置と折損形態.

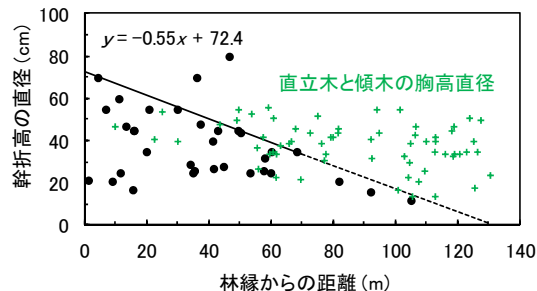


図2 林縁からの距離と幹折高の直径の関係。+は折れなかった幹の胸高直径。

痕跡は林縁から 130 m ほどの林内で途絶えたことがわかった (図 1、2)。樹幹の折損は曲げ応力による曲げ破壊であることもわかった。観測した枝折れ高や折れた幹の直径にもとづいてスギの幹が折れる応力から雪崩の速度変化を推定した。スギ林へ流入した雪崩の運動形態を低密度の雪煙層とした場合と、雪煙層 (密度  $3 \text{ kg m}^{-3}$ ) と流れ層 (密度  $300 \text{ kg m}^{-3}$ ) の 2 層構造とした場合の 2 通りについて速度を計算し、考察を行なった。その結果、この雪崩は高さが 17 m に達する雪煙層と厚さ 2 m 以下の流れ層の 2 層構造で  $26 \sim 31 \text{ m s}^{-1}$  以上の速度でスギ林に流入したと推定された (図 3)。雪崩は林内を進みながら減速し、推定速度が  $0 \text{ m s}^{-1}$  となったのは林縁から約 130 m の位置であり、調査の結果と一致した。

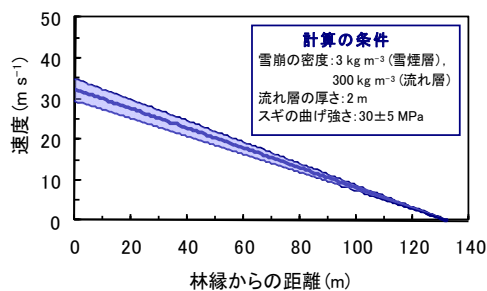


図 3 スギの幹の曲げ応力から推定した雪崩の速度変化。

#### (2) 雪崩に対する森林の減勢効果の検証

妙高・幕ノ沢の 2008 年の雪崩が林内で減速、停止したことに對するスギ林の効果を明らかにするために、幕ノ沢を対象とした運動モデルを用いて雪崩の流下を再現し、底面摩擦角を変えてスギ林の有無による雪崩の速度や到達距離の比較を行なった。計算には、運動モデル TITAN2D を用いた。このモデルは、土石流や火砕流を想定した乾燥粒状体の運動を実際の地形 (GIS) 上でシミュレーションする目的で開発されたモデルで、空気抵抗の無視できるスケールで、非圧縮性、非付着性を仮定している。雪崩の厚さ  $h$  と流れ方向の速度  $v$  (厚さ方向の平均値) を変数とし、雪崩本体の広がりや速度分布の変化を計算する。基礎方程式は質量保存と運動量保存式で与えられる。このモデルで 2008 年の雪崩の流下を再現し、調査結果と比較しながら底面摩擦角の最適値を林外、林内各々について試行錯誤で求めた。運動モデルの内部摩擦角を  $20^\circ$ 、底面摩擦角  $\mu$  を  $12 \sim 20^\circ$  と変えて計算した結果、 $\mu = 13 \sim 14^\circ$  のときに幕ノ沢源頭部の発生区からスタートした雪崩の流下経路や到達点およびスギ林に流入する速度が、調査結果とよく一致することがわかった。また、堆積区において雪崩が流入したスギ林の上端 (林縁) の位置から、調査結果に基づいて  $30 \text{ m s}^{-1}$  の初速度で雪崩をスタート

させる数値実験を行なった結果、雪崩の到達点は  $\mu = 25^\circ$  のときに林縁から約 130 m となり、調査結果や幹が折れる曲げ応力から推定した到達距離をよく再現できた (図 4)。すなわち、2008 年幕ノ沢雪崩の底面摩擦角は  $13 \sim 14^\circ$ 、雪崩が流入したスギ林の抵抗は底面摩擦角  $25^\circ$  に相当すると考えられる。仮にスギ林が無い場合を想定して、実際にはスギ林のあるところを底面摩擦角  $13 \sim 14^\circ$  で流下させたところ、雪崩はスギ林内を流下した実際の到達点より 200 m 程遠くまで達すると推定された (図 4)。雪崩に対する森林の顕著な減勢効果が明らかになった。

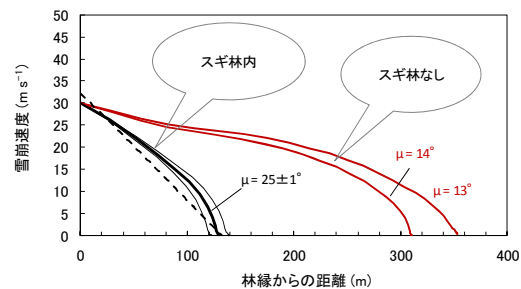


図 4 スギ林上端からスタートした雪崩の流下距離と速度の変化。初速度 (林に流入した速度) を  $30 \text{ m s}^{-1}$  とし計算。  $\mu$  は底面摩擦角。破線は図 3 で示した幹の曲げ応力から推定した速度変化。

#### (3) 妙高・幕ノ沢における大規模雪崩発生区の積雪の推定

雪崩の発生要因を明らかにして雪崩災害の軽減につなげるためには、雪崩の発生した場所 (発生区) での積雪を把握することが重要である。幕ノ沢では、流下距離が 2000 m を越える大規模雪崩をこれまでに 6 件観測したが、発生区での観測は困難なため実測データが得られていない。そこで、幕ノ沢で雪崩が発生するときの積雪や気象の特徴を明らかにするために、発生区の積雪の変化を積雪変質モデル (SNOWPACK) で推定し、各雪崩の滑り面の雪質や形成過程を調べた。1 月末～2 月に発生した 4 件の乾雪表層雪崩は、昼間の温度上昇と夜間の温度低下により、雪粒子の結合が弱く雪崩の滑り面になりやすい「こしもざらめ雪」が積雪内に形成されたことが原因とモデルから推定された。こしもざらめ雪の層の上に大量の雪が積もって荷重が増えたため、強度の小さなこしもざらめ雪の層が崩れて雪崩が発生したと考えられる。一方、1 月初めに発生した乾雪表層雪崩は、短時間に大量の降雪があって、積もったばかりの弱い新雪の層が自重に耐えられずに崩れて雪崩が発生したと推定された。3 月に発生した湿雪雪崩は、急激な気温上昇によって積雪が融けて、融雪水が積雪

内に浸透して積雪の強度が低下したことが要因と推定された。このような事例を積み重ねることが、将来的には、気象データから広範囲の雪崩発生危険度を予測する技術の開発につながると考えている。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

① Yukari TAKEUCHI、Hiroyuki HIRASHIMA、Snowpack estimations in the starting zone of large-scale snow avalanches in the Makunosawa valley, Myoko, Japan. Annals of Glaciology、査読有、54(62)、2013、19-24 DOI: 10.3189/2013AoG62A155

② Yukari TAKEUCHI、Hiroyuki TORITA、Koichi NISHIMURA、Hiroyuki HIRASHIMA、Study of a large-scale dry slab avalanche and the extent of damage to a cedar forest in the Makunosawa valley in Myoko, Japan. Annals of Glaciology、査読有、52(58)、2011、119-128

<http://dx.doi.org/10.3189/172756411797252059>

③ 竹内由香里、平島寛行、妙高・幕ノ沢における大規模雪崩発生区の積雪の推定、寒地技術論文・報告集、査読無、27、2011、50-54

④ 納口恭明、竹内由香里、雪崩に襲われた樹木の力学に関する研究 寒地技術論文・報告集、査読無、27、2011、226-229

⑤ 池田慎二、竹内由香里、野呂智之、スラブ(雪崩層)の強度を考慮した積雪安定度の検討 寒地技術論文・報告集、査読無、27、2011、46-49

⑥ 竹内由香里、シリーズ「近年の土砂災害」—妙高山域の幕ノ沢における大規模雪崩—、水利科学、査読無、315、2010、39-57

[学会発表] (計15件)

① 竹内由香里、流下する雪崩に対する森林の減勢効果、雪氷研究大会 (2012・福山)、2012年9月27日、福山市立大学(福山市)

② 竹内由香里、岩手山西斜面の雪崩で倒壊した亜高山帯林の調査、雪氷研究大会 (2012・福山)、2012年9月26日、福山市立大学(福山市)

③ Yukari TAKEUCHI、Snowpack estimations in the starting zone of large-scale snow avalanches in the Makunosawa valley, Myoko, Japan、International Symposium on Seasonal Snow and Ice by International Glaciological Society、2012年5月29日、Sibeliustalo Hall (Lahti、フィンランド)

④ 竹内由香里、妙高山域における積雪水量と冬期降水量の標高依存性、日本雪氷学会北

信越支部大会、2012年4月15日、セミナーハウスあいりす(加賀市)

⑤ 竹内由香里、雪崩に対する森林の減勢効果—妙高・幕ノ沢を対象とした運動モデルによる実験—、2012年4月15日、セミナーハウスあいりす(加賀市)

⑥ 竹内由香里、妙高・幕ノ沢における大規模雪崩発生区の積雪の推定、雪氷研究大会 (2011・長岡)、2011年9月21日、ハイブ長岡(長岡市)

⑦ 竹内由香里、妙高・幕ノ沢における大規模雪崩の流動、雪氷研究大会 (2010・仙台)、2010年9月27日、東京エレクトロンホール宮城(仙台市)

⑧ Yukari TAKEUCHI、Study of the large-scale dry-slab avalanche and extent of damage to cedar forest at Makunosawa Valley, Myoko, Japan、International Symposium on Snow, Ice and Humanity in a Changing Climate by International Glaciological Society、2010年6月21日、北海道大学(札幌市)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

竹内 由香里 (TAKEUCHI YUKARI)

独立行政法人森林総合研究所・気象環境研究領域・チーム長

研究者番号：90353755

##### (2) 研究分担者

西村 浩一 (NISHIMURA KOICHI)

名古屋大学・大学院環境学研究科・教授

研究者番号：101810639

鳥田 宏行 (TORITA HIROYUKI)

地方独立行政法人北海道立総合研究機構・森林環境部・研究主幹

研究者番号：50414264

平島 寛行 (HIRASHIMA HIROYUKI)

独立行政法人防災科学技術研究所・雪氷防災研究センター・主任研究員

研究者番号：00425513

##### (3) 連携研究者

坂本 知己 (SAKAMOTO TOMOKI)

独立行政法人森林総合研究所・気象害・防災林研究室・室長

研究者番号：60353702

村上 茂樹 (MURAKAMI SHIGEKI)

独立行政法人森林総合研究所・十日町試験地・試験地長

研究者番号：80353879