

気象観測データを用いた 多量降雪時の雪崩発生評価について

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 雪氷チーム ○松下 拓樹
高橋 渉
高橋 丞二

雪崩対策を計画し実施するためには、その箇所で発生する雪崩の規模や頻度などの評価を行う必要がある。しかし、一般的には雪崩発生に関する長期間の観測データが存在することは稀であり、雪崩の発生頻度を直接評価することは難しい。本論文では、過去数十年間の気象観測データから、雪崩発生条件に合致する降雪事例を抽出して、多量降雪に伴う雪崩の発生頻度を評価する手法を提案する。

キーワード：雪崩対策、多量降雪、発生頻度

1. はじめに

災害に関わる現象の規模や発生頻度を把握することは、防災や減災の対策を計画するにあたり重要である。雪崩の発生頻度を求める方法には、同じ箇所または地域における長期間の観測記録から直接求める方法¹⁾、樹木の年輪などに残された雪崩による被害の痕跡から間接的に調べる方法²⁾、気象観測データから雪崩発生条件に合致する事例を調べて求める方法³⁾や降雪深の再現期待値と関連づけて検討する方法⁴⁾⁵⁾などがある。しかし、雪崩の長期的な発生記録を有する地域は非常に限られ、特に日本国内では雪崩の履歴データから発生頻度を解析することは難しい。また、樹木の年輪の変化や被害の痕跡から雪崩発生年を特定する方法は、樹木の生育期間内における雪崩の発生履歴を調べる有効な手段であるが、樹木に被害を及ぼす雪崩が同じ年に複数発生した場合や積雪に埋まる若木では雪崩の発生を特定できないなどの課題がある他、対象箇所の数多くの樹木を調査する必要がある。一方、気象観測データから雪崩発生条件に合致する事例を調べる方法は簡便であるが、雪崩の発生を直接記録したものではないため、雪崩発生の可能性を示すものであり、雪崩発生条件を明確に定義する必要がある。本論文では、雪崩の長期的な発生記録が無い地域において簡便に雪崩発生頻度を評価することを目的として、気象観測データを活用する方法に着目する。

さて、災害に関わる現象の発生頻度は、一般的には確率分布を用いた統計手法により推定される場合が多く、例えば年最大値を用いた極値統計解析により、その再現期待値が求められる。しかし、極値統計解析を行うためには、データのプロット方法の検討や各種パラメータの設定、確率分布への適合性評価等が必要となる⁶⁾⁷⁾。ま

た、極値データのみを選んで解析することは、極値以外のデータが持つ情報の損失を意味する。一方、主に水文学の分野では、極値データではなく、ある閾値を超過するすべてのデータを活用する手法(POT解析: Peaks over threshold analysis)により、現象の頻度解析を行うことがある⁸⁾。また、ある閾値以上の自然現象の規模と発生数は、指数分布やべき乗の関係で近似できることが古くから知られており、例えば地震の規模と発生数の関係⁹⁾がその代表例である。その他、降雨事例の頻度と降雨量の関係¹⁰⁾¹¹⁾や、地すべり¹²⁾、雪崩¹³⁾¹⁴⁾に対して同様の検討が行われている。ある閾値以上の現象の規模と発生数が、指数やべき乗の関係で近似できるのであれば、これを活用することで現象の発生頻度を簡便に評価できる可能性がある。

本論文では、雪崩の発生頻度評価に関する上記の背景を受けて、過去数十年間の気象観測データから、雪崩発生条件に合致する降雪事例を抽出して、指数関係を利用して多量降雪に伴う雪崩の発生頻度を評価する手法を検討した結果を報告する。

2. 方法

(1) 本論文で対象とする雪崩発生条件について

気象観測データを用いた雪崩の発生頻度評価の試みとして、本論文では、多量降雪に伴う雪崩を対象とする。特に、短時間に多量の降雪がある場合、通常では雪崩が発生しにくい樹林内でも雪崩が発生することが報告されている¹⁵⁾¹⁶⁾。その典型例が、2014年2月14日から16日の関東甲信地方を中心とした地域の大雪に伴い数多くの雪崩

が発生した事例である^{24,26}。図-1は、2014年2月の大雪に伴い発生した雪崩の分布である。雪崩(図-1の×)は関東甲信の広い範囲で数多く発生し²⁶、このうち樹林内でも雪崩(図-1の●)²⁴が発生した。樹林内における雪崩発生箇所近傍の気象観測所は、みなかみ、桜枝岐、河口湖である。また、秩父とみなかみの周辺では、落石防止用ネット等を積雪がすり抜けた事例(図-1の■)が発生した²⁵。図-2は、樹林内で発生した雪崩とその他の雪崩の発生条件を、近傍の気象観測データを用いて示したものであり、各気象観測地所の降雪期間の中で12時間の降雪深が最も大きくなったときの気温と降雪深の関係である^{24,25,27}。図中の斜面積雪の安定度 SI の推定値(実線)が小さいほど、斜面積雪が不安定で雪崩が発生しやすい状況と考えられる。

図-2より、雪崩(●と×)は斜面積雪の安定度 SI が2.0以下となる条件で発生しており、特に樹林内における雪崩(●)はさらに安定度 SI がさらに小さい条件で発生したと推定される^{24,25}。この条件となったのは、群馬県のみなかみ、福島県の桜枝岐、山梨県の河口湖、埼玉県の秩父で、降雪時の平均気温が -4°C 以下で、降雪深が12時間で45cm以上となる短時間多量降雪に伴い雪崩が発生したと考えられる。さらに、植生や斜面勾配などの条件も考慮した樹林内における雪崩発生条件を検討した結果によると、12時間の降雪深の条件は斜面勾配に応じて45~50cmとなる²⁷。これに加え、降雪前のある程度の積雪が存在することも樹林内における雪崩発生に必要な条件である^{27,28}。以上、多量降雪に伴う樹林内の雪崩発生条件^{24,25,27,28}をまとめると、次のとおりとなる。

- ・降雪深： 12時間で45cm以上(斜面勾配 45°)または50cm以上(斜面勾配 30°)
- ・気温： -4°C 以下(上記の12時間の平均気温)
- ・積雪深： 50cm以上(上記の12時間の1時間前)

本論文では、気象観測データを用いた雪崩の発生頻度評価の試みとして、上記の短時間多量降雪に伴う樹林内における雪崩発生条件に着目することとする。

(2) 雪崩発生条件となる降雪事例の抽出と頻度解析方法

大雪や豪雪などの降雪の発生頻度に関するこれまでの調査では、日降雪深や日降水量など日単位の観測値^{29,30}が用いられることが多い。しかし、より短い時間で降る大雪の発生頻度を評価するためには、時間単位の観測値³⁰を用いることが望ましい。本論文では、気象庁アメダスにおける積雪深の1時間間隔の観測データを用いて、“ひと降り”の降雪深に着目した事例の抽出を行い、上記(1)の雪崩発生条件に合致する降雪事例の発生頻度を簡易に評価する手法を検討する。

本論文で頻度解析を行う気象庁アメダスは、群馬県のみなかみ(北緯 $36^{\circ}48.0'$ 分、東経 $138^{\circ}59.5'$ 分、標高531m)と福島県の桜枝岐(北緯 $37^{\circ}00.6'$ 分、東経 $139^{\circ}22.5'$ 分、標高973m)である。みなかみと桜枝岐は、図-2に示す樹林

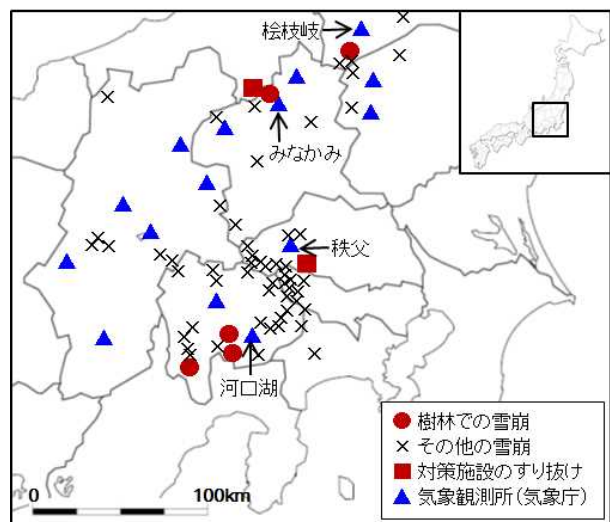


図-1 2014年2月の大雪に伴う雪崩発生箇所分布。●：樹林内で発生した雪崩²⁴、×：その他の雪崩²⁶、■：落石ネット等の対策施設を積雪がすり抜けた箇所²⁵、▲：気象庁のアメダス気象観測所。

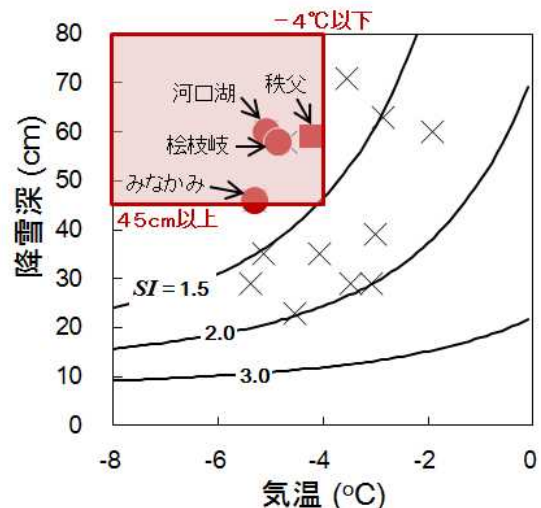


図-2 2014年2月の大雪に伴う雪崩発生条件。雪崩発生箇所近傍の各気象観測所における降雪期間のうち、降雪深が最大となった連続する12時間の平均気温と降雪深の関係(既往論文^{24,25,27}の図を修正)。斜面積雪の安定度 SI (実線)は、気温と降雪深を用いた計算値。●：樹林内で発生した雪崩、×：その他の雪崩、■：落石ネット等の対策施設を積雪がすり抜けた事例。

内における雪崩発生条件となった箇所である。解析期間は、みなかみは1989年11月1日から2017年4月30日までの28冬季(年)、桜枝岐は1982年11月1日から2017年4月30日まで35冬季(年)である。

降雪事例を抽出するため、まず1時間間隔の積雪深差の正値を累積して、これを降雪深 $S(\text{cm})$ とした。ここで、降雪の中断(積雪深差 $\leq 0\text{cm}$)が5時間未満であれば一つの“ひと降り”降雪事例とした。本論文では、降雪深 S

が30cm以上となる降雪事例を対象とした。このように抽出した降雪事例について、降雪深 S の5cmごとの事例数 n を求め、降雪深 S の大きい階級から事例数 n を累積して、それを観測年数で除した値、つまり降雪深が S 以上となる発生率 $N(S\leq)$ (数/年)を算出した。以上のように求めた降雪深 S とその発生率 $N(S\leq)$ の対数について、両者が指数関係に従うと仮定して回帰分析を行った。

次に、抽出した降雪事例を対象に、降雪期間内の連続する12時間ごとの降雪深を調べ、12時間の降雪深の最大値 S_{12} とその期間の平均気温 T_{12} を求めた。さらに、上記(1)で示した雪崩発生条件に合致する事例の発生頻度を調べるため、平均気温 T_{12} が -4°C 以下で、この12時間の1時間前の積雪深が50cm以上である事例を抽出し、12時間の降雪深 S_{12} とその発生率 $N(S_{12}\leq)$ の関係が指数関係に従うと仮定して回帰分析を行った。

3. 結果

(1) 降雪事例の発生頻度

降雪事例を抽出した結果、みなかみで227、桧枝岐で317の事例が得られた。図-3は、降雪深 S の階級幅を5cm(例えば、30cm以上、35cm未満)とした場合の各階級の事例数 n である。また、図には、降雪深が S 以上となる発生率 $N(S\leq)$ も示す。みなかみと桧枝岐ともに、降雪深 S が大きいほど事例数 n は少なくなり、降雪深が S 以上となる発生率 $N(S\leq)$ は低下する。降雪深が50cm以上となる事例の発生率は、みなかみで2.96(1年に3回程度)、桧枝岐で4.31(1年に4回程度)である。また、降雪深が100cm以上

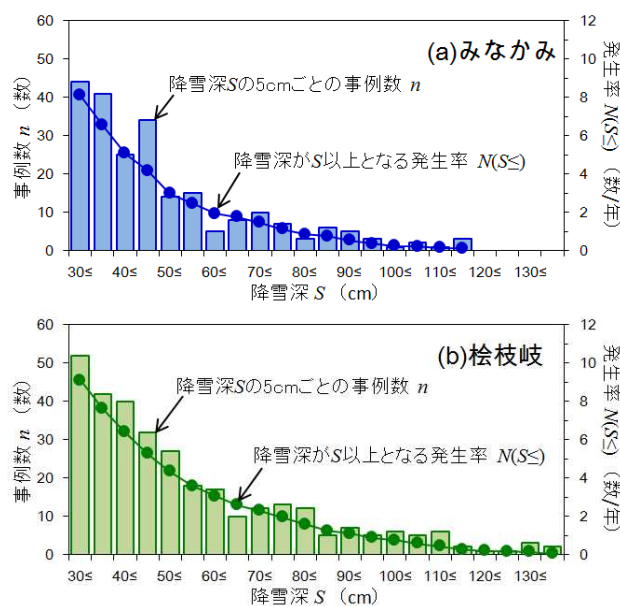


図-3 降雪事例の降雪深 S の5cmごとの事例数 n と降雪深が S 以上となる発生率 $N(S\leq)$

となる事例の発生率は、みなかみで0.25(4年に1回程度)、桧枝岐で0.74(1.4年に1回程度)である。

図-4は、降雪深 S と降雪深が S 以上となる事例の発生率 $N(S\leq)$ の対数の関係をみたものである。縦軸の対数は自然対数であり、本論文では \ln と記載する。図中の実線は回帰直線、 r^2 は決定係数(相関係数 r の二乗)である。各箇所とも両者の間に統計的に有意な直線関係がみられることから、指数関係にあるといえる。回帰直線から推定される降雪深50cm以上の事例の発生率は、みなかみで3.22、桧枝岐で4.83、また降雪深100cm以上の事例の発生率は、みなかみで0.28、桧枝岐で0.56であり、観測値と同程度の発生率が回帰直線から推定された。よって、図-4のように、指数関係を活用して単純な回帰分析を行うことにより、降雪深がある値を超過する事例の発生率の評価を簡便に行うことができると考えられる。

(2) 雪崩発生条件となる降雪事例の発生頻度

上記(1)の降雪事例の降雪期間のうち、連続する12時間の降雪深が最大となるときの平均気温 T_{12} が -4°C 以下で、この12時間の1時間前の積雪深が50cm以上である事例を抽出した結果、みなかみで56、桧枝岐で205の事例が得

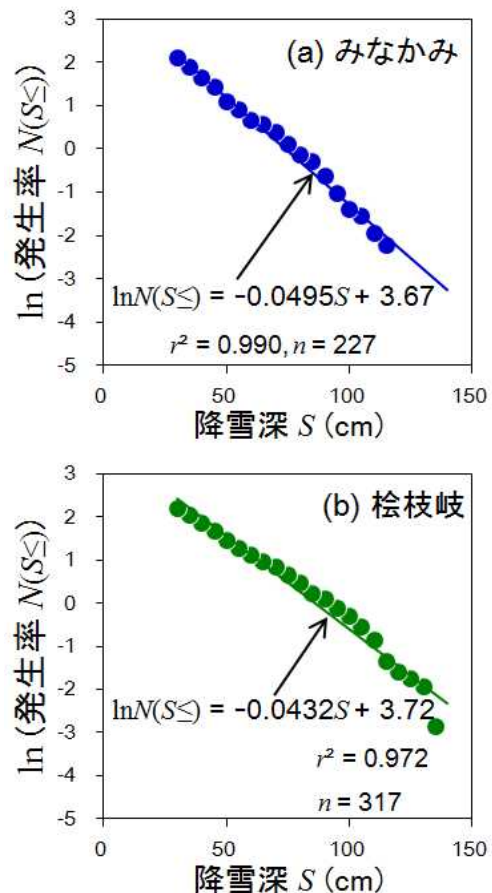


図-4 降雪深 S と降雪深が S 以上となる事例の発生率 $N(S\leq)$ の自然対数の関係。図中の実線は回帰直線、 r^2 は決定係数、 n は全事例数。

られた。図-5は、12時間の降雪深の最大値 S_{12} の階級幅を5cmとした場合の各階級の事例数 n と、降雪深が S_{12} 以上となる発生率 $N(S_{12} \leq)$ である。図-3の降雪事例と同様に、みなかみと桧枝岐ともに降雪深 S_{12} が大きいほど事例数 n は少なくなり、降雪深が S_{12} 以上となる発生率 $N(S_{12} \leq)$ は低下する。ただし、みなかみと桧枝岐の事例数は、降雪深 S_{12} が30cm以上かつ35cm未満の場合に最も多い結果となった。降雪深 S_{12} が45cm以上となる事例、つまり2章(1)で示した短時間多量降雪に伴い樹林内で雪崩が発生する条件に合致する事例の発生率は、みなかみで0.18(5.5年に1回程度)、桧枝岐で0.51(2年に1回程度)であった。また、降雪深 S_{12} が50cm以上となる事例の発生率は、みなかみで0.04(25年に1回程度)、桧枝岐で0.31(3年に1回程度)であった。

次に、12時間の降雪深の最大値 S_{12} と、降雪深が S_{12} 以上となる発生率の間に指数関係が成り立つかを調べた。図-6は、降雪深 S_{12} と降雪深が S_{12} 以上となる事例の発生率 $N(S_{12} \leq)$ の対数の関係をみたものである。縦軸の対数は自然対数である。図中の実線は回帰直線、 r^2 は決定係数である。ただし、みなかみと桧枝岐の回帰直線は、降雪深 S_{12} が30cm未満となる事例(図中の白抜き○)を除いて求めた。その結果、回帰分析に用いた事例数は、みなかみで36、桧枝岐で118となった。各箇所とも、図-4に示す降雪事例に比べて事例数が少ないが、降雪深 S_{12} とその発生率 $N(S_{12} \leq)$ の間に統計的に有意な直線関係がみられる。回帰直線から推定される降雪深 S_{12} が45cm以上となる事例の発生率は、みなかみで0.13、桧枝岐で0.48、また降

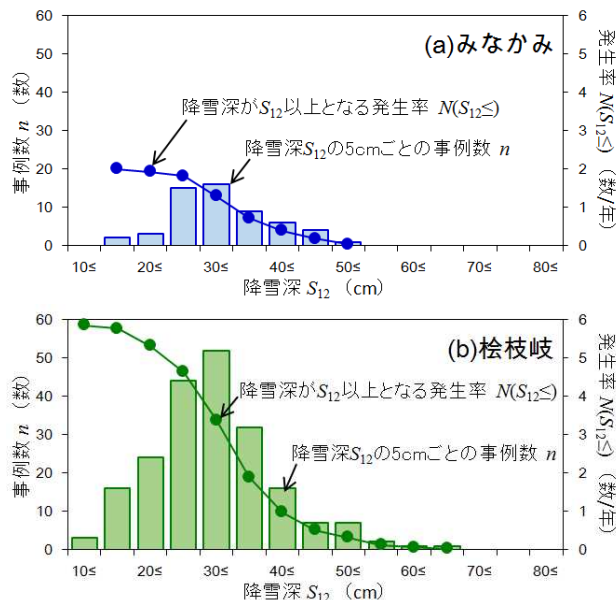


図-5 降雪事例の降雪期間のうち連続する12時間の降雪深の最大値 S_{12} の5cmごとの事例数 n と降雪深が S_{12} 以上となる発生率 $N(S_{12} \leq)$ 。ただし、12時間の平均気温が -4°C 以下で、この12時間の1時間前の積雪深が50cm以上の事例を抽出した結果。

雪深 S_{12} が50cm以上となる事例の発生率は、みなかみで0.05、桧枝岐で0.24であり、前述した観測値と同程度の発生率が回帰直線から推定された。よって、図-6のように、指数関係を活用して単純な回帰分析を行うことにより、気温 T_{12} が -4°C 以下で12時間の降雪深 S_{12} がある値(45cmまたは50cm)を超過する事例の発生率、つまり短時間多量降雪に伴い樹林内で雪崩が発生する可能性のある事例の発生頻度の評価を簡便に行うことができると考えられる。

図-6において、みなかみと桧枝岐の降雪深 S_{12} が30cm未満となる事例が回帰直線から外れることについて、降雨や地すべりなどの他の事象の解析でも、規模(値)の小さい現象の発生頻度は、直線関係から外れることが示されている¹⁹⁾²¹⁾³³⁾。よって、図-6のような直線関係は、ある値(規模)以上の事象に対して成り立ち、その閾値を対象とする現象に応じて、箇所ごとに確認することが必要となる。

以上、降雪事例の“ひと降り”の降雪深の発生率に加

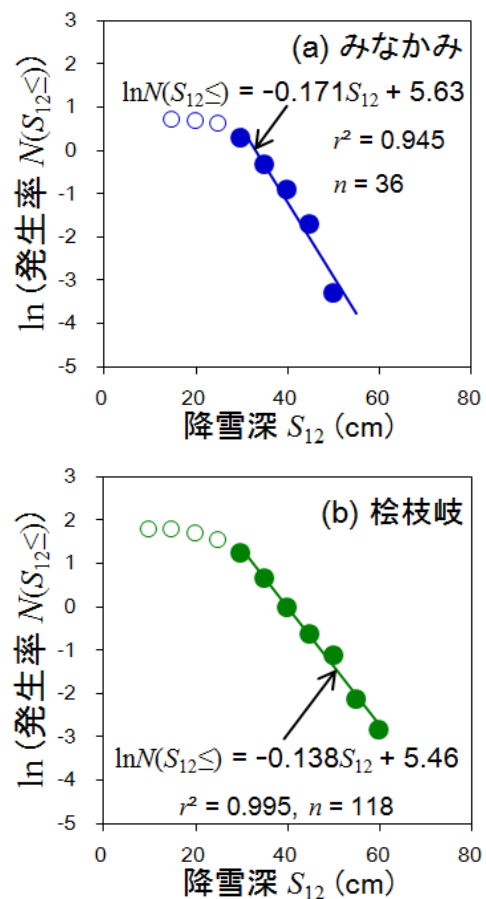


図-6 降雪事例の12時間降雪深の最大値 S_{12} と降雪深が S_{12} 以上となる発生率 $N(S_{12} \leq)$ の自然対数の関係。ただし、気温 -4°C 以下で、この12時間の1時間前の積雪深が50cm以上の事例(図-5)。図中の実線は回帰直線、 r^2 は決定係数、 n は回帰分析に用いた事例数。回帰直線は、降雪深 S_{12} が30cm未満の事例(○)を除いて求めた。

えて、気象観測データを用いた雪崩発生条件に合致する事例の発生率も指数関係にあることから、図-4や図-6のような単純な回帰分析によって、簡便にその発生率を評価できると考えられる。ただし、この手法により雪崩の発生頻度評価を行う場合は、気象観測データを用いた雪崩発生条件を明確に定義する必要がある。

4. おわりに

降雪事例の発生頻度の解析手法として、指数関係を活用して単純な回帰分析によって評価する方法³³⁾は簡便である。本論文では、この手法によって気象観測データを用いて、雪崩発生条件に合致する降雪事例を抽出して、その発生頻度を解析できることを示した。国内では、同一箇所における雪崩の長期間に渡る発生記録は皆無であり、雪崩発生に関する直接的な頻度解析を行うことは難しい。しかし、本論文で提案した、気象観測データを活用して雪崩の発生頻度を評価する手法は簡便で有用であると考えられる。

ただし、この方法による現象の発生頻度解析の留意点として、本論文における結果と降雪事例の発生頻度を検討した結果³³⁾から、次の3点があげられる。(1)突出データの存在や事例数に応じた適切な階級幅を設定すること、(2)この関係が成り立つのはある値(規模)以上の場合であり、その閾値の設定が重要であること、(3)雪崩発生条件など降雪事例をある条件で分けてその発生率の解析を行う場合は、事例数の確保が重要であることから、特に値(規模)の大きい事例を含む長期間の観測データが必要であること。

今後は、本論文で提案した手法が、日本国内の積雪地帯全体に適用可能か検討する予定である。

参考文献

- 1) Latenser, M., and M. Schneebeli, 2002: Temporal trend and spatial distribution of avalanche activity during the last 50 years in Switzerland. *Natural Hazards*, **27**, 201-230.
- 2) McClung, D. M., 2003: Magnitude and frequency of avalanches in relation to terrain and forest cover. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, **35**, 82-90.
- 3) Eckert, N., C. J. Keylock, H. Castebrunet, A. Lavigne, and M. Naaim, 2013: Temporal trends in avalanche activity in the French Alps and subregions: from occurrences and runout altitudes to unsteady return periods. *Journal of Glaciology*, **59**, 93-114.
- 4) Sinickas, A., B. Jamieson, and M. A. Maes, 2016: Snow avalanches in western Canada: investigating change in occurrence rates and implications for risk assessment and mitigation. *Structure and Infrastructure Engineering*, **12**, 490-498.
- 5) 飯田有貴夫, 梨本 真, 高橋啓二, 2000: 富士山北面の亜高山帯針葉樹林における雪崩指標とその有効性. *雪氷*, **62**, 473-483.
- 6) Decaulne, A., Ó. Eggertsson, and Þ. Samundsson, 2012: A first dendrogeomorphic approach of snow avalanche magnitude-frequency

- in Northern Iceland. *Geomorphology*, **167-168**, 35-44.
- 7) Corona, C., J. L. Saez, M. Stoffel, M. Bonnefoy, D. Richard, L. Astrade, and F. Berger, 2012: How much of the real avalanche activity can be captured with tree rings? An evaluation of classic dendrogeomorphic approaches and comparison with historical archives. *Cold Regions Science and Technology*, **74-75**, 31-42.
- 8) 梨本 真, 飯田有貴夫, 信田隆之, 2018: 富士山北面における雪崩による攪乱と植生の動態 - 植生の雪崩指標と年輪解析による推定 -. *雪氷*, **80**, 3-18.
- 9) Meseşan, F., I. G. Gavrilă, and O. T. Pop, 2018: Calculating snow-avalanche return period from tree-ring data. *Natural Hazards*, **94**, 1081-1098.
- 10) Jóhannesson, T., and T. Jónsson, 1996: Weather in Vestfirðir before and during several avalanche cycles in the period 1949 to 1995. *Veðurstofa Íslands Internal Report, VÍ-G96015-ÚR15*, Icelandic Meteorological Office, <https://rafladlan.is/handle/10802/3938>.
- 11) Bakkehoi, S., 1986: Snow avalanche prediction using a probabilistic method. *International Association of Hydrological Sciences (IAHS) Publications*, **162**, 549-555.
- 12) Bocchiola, D., M. Medagliani, and R. Rosso, 2006: Regional snow depth frequency curves for avalanche hazard mapping in central Italian Alps. *Cold Regions Science and Technology*, **46**, 204-221.
- 13) 和泉正哲, 三橋博三, 高橋 徹, 1988: 年最大積雪深の確率統計的性質と再現期間値推定法. *日本建築学会構造系論文報告集*, **390**, 49-58.
- 14) 藤部文昭, 2011: 極値分布関数の適合度評価に関する検討. *天気*, **58**, 765-775.
- 15) 藤部文昭, 2014: 日本における降水量の極値パラメーターの広域分布特性. *天気*, **61**, 81-90.
- 16) 大西雄基, 水野 量, 2008: L-momentsを用いた地域頻度解析による全国アメダス地点における年最深積雪の再現期待値. *気象庁研究時報*, **60**, 35-74.
- 17) 近森秀高, 永井明博, 2012: Peak over threshold 理論による確率日雨量の推定. *農業農村工学会論文集*, **278**, 89-97.
- 18) Gutenberg, B., and C. F. Richter, 1944: Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **34**, 185-188.
- 19) Andrade, R. F. S., H. J. Schellnhuber, and M. Claussen, 1998: Analysis of rainfall records: possible relation to self-organized criticality. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, **254**, 557-568.
- 20) Peters, O., A. Deluca, A. Corral, J. D. Neelin, and C. E. Holloway, 2010: Universality of rain event size distributions. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, **11**, DOI: 10.1088/1742-5468/2010/11/P11030.
- 21) Hergarten, S., 2003: Landslide, sandpiles, and self-organized criticality. *Natural Hazards and Earth System Science*, **3**, 505-514.
- 22) Birkeland, K. W., and C. C. Landry, 2002: Power-laws and snow avalanches. *Geophysical Research Letters*, **29**, 49-1-49-3.
- 23) 秋山一弥, 2014: 映像観測で得られた雪崩の規模と発生数の関係. *雪氷*, **76**, 431-440.
- 24) 松下拓樹, 池田慎二, 秋山一弥, 2015: 樹林内における雪崩発生条件に関する一考察 - 2014年2月関東甲信の大雪時の事例 -. *雪氷*, **77**, 433-445.
- 25) Matsushita, H., and K. Ishida, 2016: Characteristics of snow avalanche release in forests during a heavy snowfall event. *Proceedings of International Snow Science Workshop (ISSW)*, 556-560.
- 26) 和泉薫, 河島克久, 伊豫部 勉, 松元高峰, 2014: 2014年2月中旬の大雪による雪崩災害の発生状況と特徴. *科学研究費助成事業(課題番号 2590003)研究成果報告書*, 111-118.
- 27) 松下拓樹, 高橋 渉, 松澤 勝, 高橋丞二, 2018: 広葉樹林における乾雪表層雪崩の発生条件について. *日本雪工学会論文集*, **34**, 55-67.

- 28) 松下拓樹, 高橋 渉, 松澤 勝, 2018: 短時間多量降雪時の雪崩発生リスクを簡便に把握する手法. 寒地土木研究所月報, **780**, 19-24.
- 29) 鈴木博人, 2012: 日本における大雪の経年変化とその環境場との関係 - 気象庁と鉄道の日降雪深データを用いた解析 -. 天気, **59**, 333-350.
- 30) 松岡直基, 中林宏典, 谷口 恭, 小松麻美, 2015: 北海道における近年の降雪特性. 北海道の雪氷, **34**, 35-38.
- 31) Danco, J. F., A. M. DeAngelis, B. K. Raney, and A. J. Broccoli, 2016: Effects of a warming climate on daily snowfall events in the Northern Hemisphere. *Journal of Climate*, **29**, 6295-6318.
- 32) 原田裕介, 上田真代, 松下拓樹, 松澤 勝, 2013: 冬期の気圧配置と北海道における大雪・暴風雪の地域別発生状況. 寒地土木研究所月報, **719**, 33-41.
- 33) 松下拓樹, 高橋 渉, 高橋丞二, 2018: 降雪の発生頻度に関する簡易評価手法. 寒地技術論文・報告集, **34**, 147-152.