

振動実験に基づく斜面積雪の地震応答と地震による雪崩発生危険度の推定

Seismic responses of snowpack on a slope in a vibration experiment and the estimation of avalanche induced by earthquakes

土木研究所寒地土木研究所	○正 員	原田裕介 (Yusuke Harada)
土木研究所寒地土木研究所	非会員	高橋 渉 (Wataru Takahashi)
土木研究所	非会員	松下拓樹 (Hiroki Matsushita)
北海道科学大学	非会員	千葉隆弘 (Takahiro Chiba)
土木研究所寒地土木研究所	正 員	松澤 勝 (Masaru Matsuzawa)

1. はじめに

我が国およびアメリカ合衆国、ロシア連邦、ヒマラヤ西部などでは、冬期の地震に伴う雪崩被害について報告されている¹⁾³⁾。防災・減災の観点から、地震時の雪崩発生危険度を評価することは重要であり、雪崩発生誘因となる地震動を考慮した斜面積雪の安定度に関する評価手法が提案されている²⁾⁵⁾。これらの評価手法では、地震動による地表面の加速度がそのままの大きさに斜面積雪に作用すると仮定されている。しかし、地震動によっては、斜面積雪の加速度が地表面の加速度より大きくなる可能性が考慮される。そこで、本研究では振動実験により斜面積雪の地震応答を調べ、その特徴をとりまとめた。また、振動実験の結果を用いて、地震による雪崩発生危険度について推定した。なお、ここでは横揺れの地震動のみを対象とし、せん断破壊による雪崩を想定する。

2. 振動実験の方法

斜面積雪の応答実験は、日本の北海道に位置する寒地土木研究所石狩吹雪実験場(N43°12'55", E141°23'23")で、2014~2015年の1~3月に行った。観測項目は、積雪試料(以下、試料という)および振動台の加速度と、試料の積雪物性(高さ・層構造・粒度・密度・硬度・雪温)である。はじめに、実験に用いる試料を作成するための雪塊を、屋外の自然積雪から切り出した。この雪塊を幅40cm×長さ55cm×高さ40~70cm程度の平行四辺形(対角60°、120°)の試料に整形した。建屋内に設置した振動台(2m×2m)上にL型鋼材により強固に固定した勾配30°の斜面模型上(幅50cm×長さ55cm)に、積雪層構造が斜面にほぼ平行になるように試料を設置し

た(図-1)。また、積雪底面の滑りを防ぐため、斜面には長さ5cmの釘を縦横6cm間隔で打ち付けた。加えて、加速度(正)側のL型鋼材を透明アクリル板と万力で固定のうえ、試料前面との空間に試料と同質の雪を充填してふさいだ。つぎに、試料内に3~6個の加速度計(18×18×24mm³、40g:ASW-5A)を鉛直高さ方向に約10~20cm間隔で挿入した。なお、実験条件によっては、試料の重量を増加させることを目的に、質量15kgの格子状のウェイト(幅30cm×長さ45cm×高さ5.3cm)を、質量0.075kg/本のコの字型の固定ピン(幅8cm×長さ15cm)32本を用いて、試料の上部に固定した。試料および加速度計の設置後、図-1に示す水平方向に、振動台の加速度を一定とした周波数1~10Hzのスweep加振を3分間実施し、試料を加振した。振動台に入力する加速度の範囲は、0.1G~0.9G(1G=9.81m/s²)とした。試料および振動台の加速度は、0.04秒間隔で測定した。

3. 実験結果および考察

振動実験は、様々な試料の条件および加速度により計194回行った。その結果、振動実験で得られた斜面積雪の固有振動数をみると、いずれの斜面積雪においても測定した範囲では10Hz(固有周期0.10s)となっており、試料と振動台との加速度比(以下、応答倍率という)は入力加速度または重量が大きい場合、また試料の上層ほど大きい値を示した。振動数と応答倍率との関係の一例を図-2に示す。つぎに、試料ごとに雪質、積雪平均密度(kg/m³)と平均硬度(kN/m²)、積雪深(m)、試料全体の重量(kg)、ウェイトを考慮した換算積雪深(m)(ウェイトと試料の重量をもとに算定)、入力加速度(G)、ならびに加速度計の応答倍率の最大値(10Hzの応答倍率)を

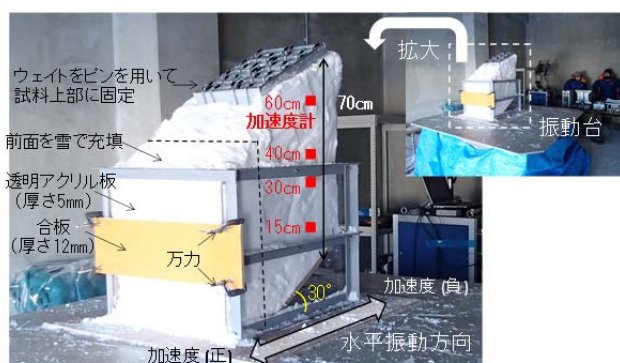


図-1 振動実験の様子

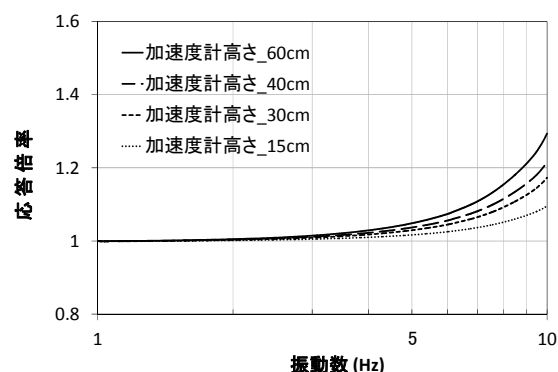


図-2 応答倍率と振動数との関係(例)

記載した、測定結果のプロファイルを 800 通り作成した。本研究では、実験時の試料の雪質と乾湿をもとに、しまり雪（乾雪）、しまり雪（湿雪）、ざらめ雪（乾雪）、ざらめ雪（湿雪）に分類した。雪質および加速度計高さごとに入力加速度に対する応答倍率の最大値を目的変数、積雪平均密度・平均硬度・積雪深・試料全体の重量・換算積雪深・入力加速度を説明変数とした項目別の単相関係数を求めたところ、いずれの雪質とも入力加速度(G)と重量(kg)との単相関係数が高かった。そこで、表-1 に示す重回帰式を雪質および加速度計の高さごとに作成した。ここで、Y は応答倍率の最大値、 x_1 は入力加速度(G)、 x_2 は重量(kg)である。

つぎに、任意の加速度(G)を x_1 に、雪質ごとの平均的な積雪重量を x_2 に代入して、応答倍率の最大値を算出した。積雪重量は体積と密度を乗じて求められる。体積は、実験時の試料の断面積の平均値(0.176m²)と、換算積雪深の平均値(しまり雪(乾雪) 0.689m、ざらめ雪(乾雪) 0.658m、ざらめ雪(湿雪) 0.624m)を乗じて求めた。密度は、雪氷辞典⁶⁾を参照し、しまり雪(乾雪)は 325 kg/m³、ざらめ雪(乾雪)は 400 kg/m³、ざらめ雪(湿雪)は 500 kg/m³を採用した。これらを用いて、しまり雪(乾雪)は 39.4kg、ざらめ雪(乾雪)は 46.3kg、ざらめ雪(湿雪)は 54.9kg を平均的な積雪重量とした。表-1 の重回帰式と加速度、上記で求めた平均的な積雪重量を用いて、加速度計の高さごとに応答倍率を求め、プロットした(図-3)。あわせて、入力加速度ごとに、

表-1 応答倍率の最大値Yと、入力加速度 x_1 および重量 x_2 との関係。

雪質	加速度計高さ	平均高さ	N	重回帰式	R ²
しまり雪	10~20cm	15.7cm	140	$Y=0.116x_1+0.003x_2+0.944$	0.452
	30~39cm	30.3cm	97	$Y=0.190x_1+0.005x_2+0.919$	0.449
	40~49cm	40.7cm	91	$Y=0.257x_1+0.007x_2+0.868$	0.487
	50~60cm	54.4cm	77	$Y=0.399x_1+0.007x_2+0.844$	0.407
ざらめ雪	10~20cm	15.0cm	51	$Y=0.261x_1+0.005x_2+0.808$	0.513
	30~39cm	30.0cm	44	$Y=0.513x_1+0.008x_2+0.676$	0.778
	40~49cm	40.8cm	49	$Y=0.546x_1+0.009x_2+0.639$	0.523
	50~60cm	50.4cm	39	$Y=0.677x_1+0.011x_2+0.524$	0.539
ざらめ雪	10~20cm	15.0cm	55	$Y=0.357x_1+0.006x_2+0.761$	0.582
	30~39cm	30.0cm	48	$Y=0.577x_1+0.009x_2+0.630$	0.554
	40~49cm	40.0cm	48	$Y=0.725x_1+0.011x_2+0.543$	0.607
	50~60cm	50.0cm	41	$Y=1.043x_1+0.012x_2+0.442$	0.629

※しまり雪(湿雪)は事例数が少ないため、本解析から除外した。

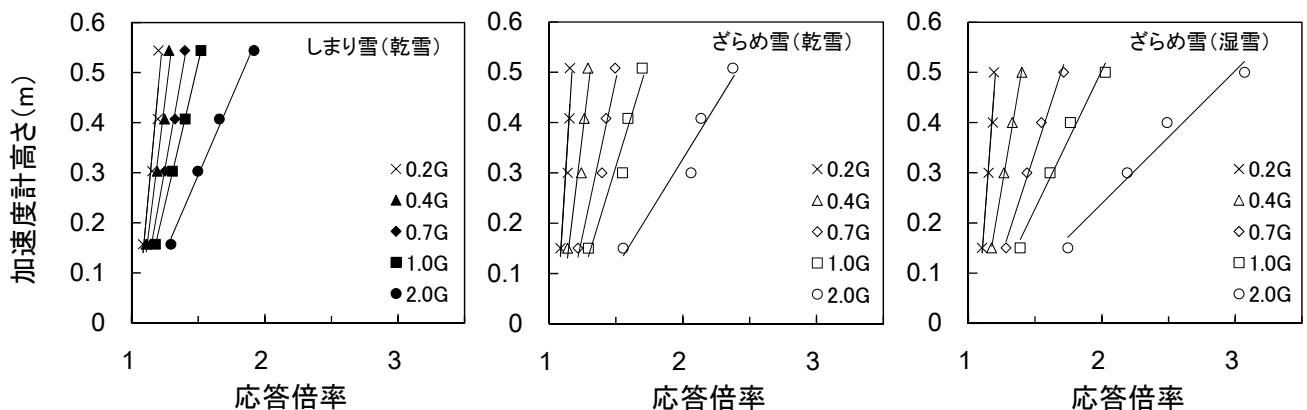


図-3 実験結果に基づく斜面積雪の高さと応答倍率との関係(10Hz)

プロットされた応答倍率を線形で近似した。その結果、加速度計の各高さと応答倍率との間に比例関係が見られ、上層ほど加速度が増加していた。このことから、雪質によらず斜面積雪を想定した試料の固有モードは1次モードであることがわかる。また、加速度 0.2G では、加速度計高さに対する応答倍率の分布形状はしまり雪、ざらめ雪ともほぼ同様である。一方、0.4G 以上では、ざらめ雪の応答倍率がしまり雪よりも大きくなり、湿雪の応答倍率が乾雪より大きい結果となった。

図-3 で得られた結果について、雪質と乾湿により応答倍率に差異が出た原因を以下に推察する。積雪は、積雪に作用する力が小さく、かつ作用時間が短い場合は、弾性体である。本振動実験では水平方向に加振してせん断力を与えているので、それに対する弾性(剛性)は次のように考えられる。しまり雪(乾雪)の場合、密度の増加により硬度やせん断強度が増加する⁷⁾。一方、ざらめ雪は、乾き雪の場合しまり雪よりもせん断強度が小さいため⁷⁾、水平力に対するせん断ひずみがしまり雪よりも大きくなる。加えて、重量も影響を与えるため、入力加速度が大きくなるにしたがい、しまり雪よりも応答倍率が大きくなったと考えられる。また、濡れ雪(湿雪)になると、この傾向がより顕著になった。

また、各雪質における加速度計高さ 30-39cm のデータを用いて、10Hz における応答倍率-1 を 100%とした場合の応答倍率の増加割合の平均値を 0.5Hz ごとに算出し、これらの関係を求めたところ表-2 に示す結果を得た。

4. 地震による雪崩発生危険度の推定

ここでは、3 章の振動実験の結果、過去の地震による雪崩発生時の積雪観測データを用いて、地震動を考慮した斜面積雪の安定度 SI (Stability Index) を評価のうえ、雪崩発生危険度を推定した。

表-2 10Hzを100%とした場合の応答倍率の増加割合 Y(%)と、周波数xとの関係

雪質	N	関係式	R ²
しまり雪(乾雪)	97	$Y=0.41x^{2.41}$	0.989
ざらめ雪(乾雪)	44	$Y=0.45x^{2.34}$	0.992
ざらめ雪(湿雪)	48	$Y=0.41x^{2.37}$	0.994

※加速度計高さ30-39cm、1.0-10Hzのデータによる。

4. 1. 斜面積雪の安定度

自然状態の斜面積雪の安定度 SI は、式(1)に示すように、対象とする積雪層のせん断強度 Σ_s とそれに働くせん断応力 $\sigma_n \sin \psi$ の比 (図-4(a)) によって表され、安定度 SI が小さいほど斜面積雪が不安定であり、斜面における積雪安定性評価および雪崩発生の目安として用いられている⁷⁾。

$$SI = \frac{\Sigma_s}{\sigma_n \sin \psi} = \frac{C + \sigma_n \cos \psi \tan \phi}{\sigma_n \sin \psi} \quad (1)$$

ここで、 Σ_s は弱層など対象とする積雪層のせん断強度 (N/m^2)、 σ_n は単位面積あたりの弱層上の積雪荷重 (N/m^2) で、弱層上の積雪層の厚さ $D(\text{m})$ と密度 $\rho(\text{kg/m}^3)$ および重力加速度 $g(\text{m/s}^2)$ から求められる ($\sigma_n = g\rho D$)。 ψ は斜面勾配 ($^\circ$) である。式(1)の右辺は、せん断強度 Σ_s をモール・クーロンの破壊条件で表したものである。 C は積雪粒子の凝集力 (N/m^2) である。また、 $\tan \phi$ は雪粒子の内部摩擦角である。内部摩擦角 $\tan \phi$ は、新雪、こしまり雪、こしもざらめ雪の場合において $\tan \phi = 0.21$ と考慮され、それ以外の雪質では無視できる⁸⁾。

雪崩の発生と式(1)の斜面積雪の安定度 SI との関係について、実際の斜面では、積雪の側面等の繋がりによる影響などがあるため、式(1)の斜面積雪の安定度 SI における雪崩発生の臨界値は必ずしも 1 とはならない⁹⁾。そのため、実際の雪崩発生事例を用いた安定度 SI の臨界値の検討が行われている。例えば、カナダでは、安定度 SI の雪崩発生の目安として、1.5 程度の値が示されている¹⁰⁾。よって、ここでは、斜面積雪の安定度が 1.5 以下となる場合を雪崩発生の目安と考える。

4. 2. 地震動を考慮した斜面積雪の安定度

地震時の斜面積雪の安定度 SI_E は、式(1)に地震動の水平震度 a (図-4(b)) を外力として加えた式(2)により表される^{2)~6)}。

$$SI_E = \frac{C + \sigma_n (\cos \psi - a \sin \psi) \tan \phi}{\sigma_n (\sin \psi + a \cos \psi)} \quad (2)$$

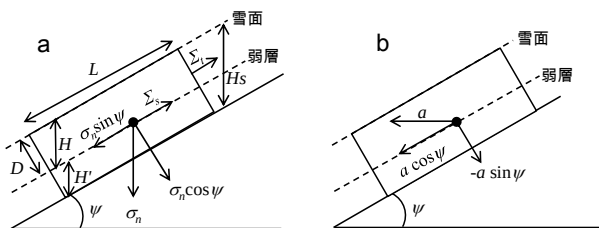


図-4 斜面積雪に作用する力
(a)斜面積雪の荷重と強度、(b)地震動の水平震度

式(2)の水平震度 a は、重力加速度 $g(\text{gal})$ に対する地震動の水平加速度 (gal) の比、すなわち水平加速度 (G) である。水平震度 a は、地震時の盛土の安定性評価¹¹⁾ や道路施設の耐震性に関する検討¹²⁾ で用いられており、本稿でも地震動の水平震度 a を用いて地震時の雪崩発生条件を検討する。

3 章で得た斜面積雪の固有モードが、振動実験条件よりも大きい積雪深でも成り立つと仮定すると、任意の積雪深さおよび周波数の水平震度 a' は式(3)により表される。

$$a' = a \{ (SR_{10\text{Hz}} - 1) IR + 1 \} \quad (3)$$

ここで、 $SR_{10\text{Hz}}$ は 10Hz における斜面積雪高さの応答倍率 (表-1、図-3 参照)、 IR は 10Hz を 100% とした場合の応答倍率の増加割合 (表-2 参照) を示す。

式(2)に加えて、松澤ら⁵⁾ は、地震時の盛土法面の安全率評価方法を参考として、地震動と斜面積雪上部に作用した雪粒子の結合による張力 (引張破壊強度) を考慮した斜面積雪の安定度 SI_E' を提案した。本研究では、松澤らの式に、上記の水平震度 a' を考慮した式(4)を提案する。

$$SI_E' = \frac{CL + \sigma_n L (\cos \psi - a' \sin \psi) \tan \phi + \Sigma_t D}{\sigma_n L (\sin \psi + a' \cos \psi)} \quad (4)$$

ここで、 L は弱層から上部の積雪層の長さ (m)、 Σ_t は雪の引張破壊強度 (N/m^2)、 D は弱層より上部の積雪の厚さ (m) である。

4. 3. 地震発生時の斜面積雪の安定度の試算

松下らは、地震による雪崩発生条件を検討するために、地震によって発生した雪崩事例のうち、雪崩の種類や積雪密度等の積雪観測データが示されている事例を整理した¹⁴⁾。本研究では、そのうち、表層雪崩かつ防災科学研究所強震観測網 (K-NET, KiK-net) より最大加速度 (gal) と周波数 (Hz) が得られた 2011 年 3 月の長野県北部地震²⁾、2013 年 2 月の栃木県北部地震³⁾ によって発生した雪崩事例を抽出のうえ、斜面積雪の安定度を試算した (表-3)。なお、雪崩すべり面より上部の積雪は、長野県北部地震はざらめ雪²⁾、栃木県北部地震はしまり雪が主体のため、ここでは Watanabe¹⁶⁾ の各雪質における引張破壊強度の関係式を用いた (式(5))。

$$\begin{aligned} \Sigma_t &= 7.78 \times 10^{-3} \rho^{2.60} (\text{ざらめ雪}) \\ \Sigma_t &= 3.40 \times 10^{-4} \rho^{3.24} (\text{しまり雪}) \end{aligned} \quad (5)$$

上記をもとに、各地震誘発雪崩事例の斜面積雪の安定

表-3 本研究で扱う地震によって発生した雪崩事例の条件整理¹⁴⁾に加筆

事例	地震				強震度観測所と雪崩発生箇所の距離 (km)	雪崩すべり面の積雪			雪崩すべり面より上部の積雪					雪崩すべり面より下部の積雪			積雪観測場所 (備考)		
	発生年月日と震源地	規模	水平震度 a ※1	周波数 T ※1 (Hz)		雪崩種類	斜面勾配 ψ (°)	長さ L (m)	雪質	せん断強度 C (N/m ²)	荷重 σ _n (N/m ²)	厚さ D (m)	深さ H (m)	密度 ρ (kg/m ³)	主体となる雪質	深さ H' (m)		密度 ρ' (kg/m ³)	主体となる雪質
2011長野県北部①	2011/3/12 長野県北部	6.7	0.72	11.2	15	湿雪表層	35	10 ^{※2}	ざらめ雪	1580	1178	0.61	0.75	197 ^{※3}	ざらめ雪	1.62	197 ^{※3}	ざらめ雪 (湿雪)	新潟県十日町市孟地
2011長野県北部②					6	湿雪表層	25	10 ^{※2}	ざらめ雪	780	1813	0.56	0.62	330 ^{※3}	ざらめ雪	2.04	330 ^{※3}	ざらめ雪 (湿雪)	新潟県十日町市野中
2013栃木県北部①	2013/2/25 栃木県北部	6.3	1.25	4.3	4	乾雪表層	42	9.5	こしまざらめ雪	1510	744	0.41	0.55	185	しまり雪	0.99	316	ざらめ雪 (乾雪)	栃木県日光市奥鬼怒
2013栃木県北部②					4	乾雪表層	42	9.5	こしまざらめ雪	2890	1626	0.74	1.00	224	しまり雪	0.66	224	ざらめ雪 (乾雪)	栃木県日光市奥鬼怒

※1 水平震度 a は最大値、周波数は水平震度最大値での値を示す

※2 文献²⁾の図からの読み取り値。

※3 データがないため、上部の積雪の密度を代用した²⁾。

度を計算した。図-5 左は、任意の積雪深さおよび周波数における水平震度 a' を考慮した安定度 SI_E' (式(4)) と、考慮しない安定度 SI (式(2)) を比較したものである。これらの事例のうち、地震動の水平震度 a' を考慮しない場合の斜面積雪の安定度 SI (図の横軸) が 1.5 以下の事例があり、これらは、地震発生前にすでに斜面積雪が不安定な状態にあったと考えられる²⁾。一方、斜面積雪の安定度 SI が 1.5 以上の事例では、地震動の水平震度 a' を考慮した安定度 SI_E' は 1.5 以下になった。よって、これらの事例は、地震発生前は比較的安定していた斜面積雪が、外力として地震動が加わることで不安定となり、雪崩が発生したと考えられる。また、図-5 右は、式(4)による SI_E' と、式(4)に地震動の水平震度 a を代入した斜面積雪の安定度 SI_E' (松澤ら⁵⁾の式) を比較したものである。式(4)と松澤ら⁵⁾の式との出力値の差を水平震度の違いによる安定度の低下量と考えると、長野県北部地震では 0.73~0.79 低下し、栃木県北部地震では 0.14~0.26 低下した。以上の結果から、地震動の水平震度によって斜面積雪の安定度が小さくなって雪崩発生時には 1.5 以下になる、短周期の場合の安定度は長周期と比較して小さくなる、雪崩すべり層下部の積雪深が大きいほど安定度が小さくなることが示された。

5. 今後の取り組み

雪崩発生条件を示す場合、斜面積雪の安定度を指標にすると、積雪観測データに基づいて斜面積雪の安定度をその都度見積もる必要があり実用的ではない。今後、斜面積雪の安定度 SI_E' が 1.5 以下になった場合に雪崩発生の可能性が高くなると考え、式(4)をもとによりわかりやすい指標、例えば斜面積雪深 H_s (図-4(a)参照) を指標に、雪質を考慮した地震時の雪崩発生条件を示すことを検討する予定である。

謝辞：本研究では、防災科学研究所強震観測網(K-NET, KiK-net)のデータを利用した。ここに記して御礼申し上げる。

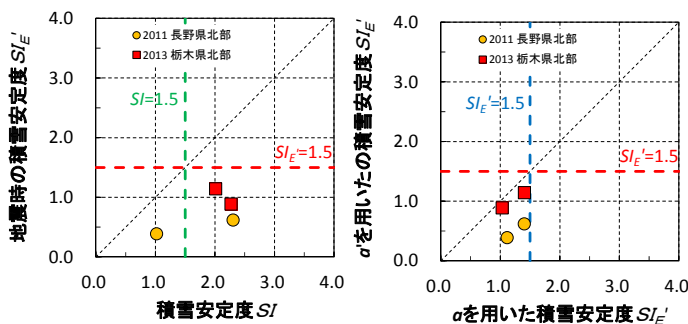


図-5 斜面積雪の安定度の計算結果 左：任意の積雪深さおよび周波数の水平震度 a' を考慮した安定度 SI_E' (式(4)) と考慮しない場合の安定度 SI (式(2)) との比較 右：式(4)と地震動の水平震度 a の安定度 SI_E' (松澤ら⁵⁾の式) との比較

参考文献

- 1) Podolskiy, E.A., K. Nishimura, O. Abe and P. A. Chernous: Earthquake-induced snow avalanches: I. Historical case studies, *Journal of Glaciology*, Vol.56, No.197, pp.431-446, 2010.
- 2) 上石勲、本吉弘岐、石坂雅昭、佐藤威：2011年3月12日に発生した長野県北部地震による雪崩発生状況と地震の影響、雪氷、74巻、2号、pp.159-169、2012.
- 3) 松下拓樹、松澤勝、中村浩：地震時の雪崩発生条件に関する検討—2013年2月の栃木県北部地震の事例—、第57回(平成25年度)北海道開発技術研究発表会、安14(道)、2014.
- 4) Podolskiy, E.A., K. Nishimura, O. Abe and P. A. Chernous: Earthquake-induced snow avalanches: II. Experimental study, *Journal of Glaciology*, Vol.56, No.197, pp.447-458, 2010.
- 5) 松澤勝、加治屋安彦、伊東靖彦：地震発生時の斜面積雪の安全率評価に関する一考察、北海道の雪氷、No.26、pp.95-98、2007.
- 6) (公社) 日本雪氷学会編：新版雪氷辞典、古今書院、pp.246、2014.
- 7) 山野井克己、遠藤八十一：積雪におけるせん断強度の密度および含水率依存性、雪氷、64巻、4号、pp.443-451、2002.
- 8) Zeidler, A. and B. Jamieson: Refinements of empirical models to forecast the shear strength of persistent weak snow layers: Part A: Layers of faceted crystals. *Cold Regions Science and Technology*, 44, pp.194-205, 2006.
- 9) (社) 日本雪氷学会編：積雪観測ガイドブック、朝倉書店、pp.79-96、2010.
- 10) Perla, R.: Slab avalanche measurements, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.14, No.2, pp.206-213, 1977.
- 11) (社) 日本道路協会：地震動の作用に対する盛土の安定性の照査、道路土工 盛土工指針(平成22年版)、pp.119-127、2010.
- 12) (社) 日本道路協会：静的照査法による耐震性能の照査方法、道路橋示方書・同解説 V耐震設計編、pp.57-108、2012.
- 13) 日本建設機械化協会、雪センター：雪崩対策、2005除雪・防雪ハンドブック(防雪編)、pp.143-246、2005.
- 14) 松下拓樹、中村浩、松澤勝：地震による雪崩発生条件に関する検討、寒地土木研究所月報、733、pp.39-44、2014.
- 15) Watanabe, Z.: The influence of snow quality on the breaking strength. *Sci. Rep. Fukushima Univ.*, 27, 27-35, 1977.