

陸別町におけるしもざらめ雪の密度と剪断強度の関係について

Relationships between Density of Depth Hoar and Shear Frame Index in Rikubetsu-town

横山博之((独)土木研究所寒地土木研究所・北見工業大学大学院), 日下稜, 高橋修平,
柴田啓貴, ヌアスムグリ・アリマス, 佐々木孝(北見工業大学大学院),
若林剛(清水建設(株)・元北見工業大学大学院)

Hiroyuki Yokoyama, Ryou Kusaka, Shuhei Takahashi, Hirotaka Shibata,
Alimasi Nuerasimuguli, Takashi Sasaki, Tuyoshi Wakabayashi

1. はじめに

道路雪崩の予防や雪崩発生後の交通止め解除時期の目安には、積雪の安定度(SI)の把握が有効である。ここで、SI算出に必要な積雪の剪断強度(SFI)測定は時間が掛かるため道路の維持現場ではあまり行われていないが、雪密度から積雪の剪断強度を推定できれば、短時間で積雪の安定度把握が可能になる。ここで、雪密度の測定では一般に密度サンプラーで雪を採取し、上皿電子秤でその重量を測定する方法が用いられるが、弱層雪崩の原因であることが多いしもざらめ雪では、蓋を外した時にサンプラー内の雪がこぼれてしまうことがあり測定が難しい。一方、(独)土木研究所寒地土木研究所が開発した簡易雪密度測定器(特許第4803561号)は、サンプラー内に雪を入れた状態で容器毎雪密度を計測するように設計されているため、しもざらめ雪のような粒子間結合力の小さい雪質の密度測定に適している。本研究では北海道で最も気温の低い町の1つとして知られる陸別町で、簡易雪密度測定器の厳寒地での適用性試験を兼ね、平成24年1月下旬に観測を行い、弱層雪崩の弱層面に多い、しもざらめ雪・こしもざらめ雪の密度と剪断強度の関係式を求めたので報告する。

2. しもざらめ雪について

2-1 しもざらめ雪の定義

日本雪氷学会(1998)の積雪分類案¹⁾では、「しもざらめ雪とは、骸晶(コップ状)の粒からなる。大きな温度勾配の作用により、元の雪粒が霜に置き換わったもの」とされている。

2-2 しもざらめ雪のできかた

しもざらめ雪のできかたには2つのケースがある。一つ目は日中に温度が上がって溶けかかった雪が夜間の放射冷却で凍結して生じるケースで、積雪内の弱層と呼ばれる、厚さ2~3mmから1cm前後のしもざらめ層がこれに該当する。

二つ目は寒冷地・高地の積雪内部で起こるケースで、そのできかたは、秋田谷(1965)の研究²⁾によれば、「積雪の中の上下に向いあった雪粒の間に温度差ができ、下方にある温度の高い雪粒の上面の氷が昇華蒸発し、上にある温度の低い雪粒の下面に凝結して霜の結晶を作る。高い平均雪温と大きな温度勾配のもとでは、このような昇華蒸発・凝結が盛んに行われ積雪内に新たな霜の結晶が発生する。」とされる。陸別町で観測したしもざらめ雪は二つめのケースで、層厚が5~10cm以上と厚いことが特徴である。

3. 簡易雪密度測定器

3-1 簡易雪密度測定器の概要

積雪観測において雪密度の計測は最も基本的かつ重要な計測事項である。雪密度の計測ではふつう容積 100cc の角形密度サンプラー(図-1A:総重量約 300g)で雪を採取し、上皿電子秤でサンプラー内の雪の重量を計測する方法が採られる。ところがこの方法では、重く(約 1,000g)、かさばる台秤を現場へ持ち運ぶ必要があり、特に斜面上では、台秤の設置に手間がかかる。一方、簡易雪密度測定器(図-1C)は、秤とサンプラーが一体構造で、手に持ったまま測定でき、総重量が約 200g と軽いため、持ち運びに便利である。その秤部は市販のデジタル計量スプーン(図-1B)を使用し、秤に出る読み値をそのまま重量とするため、秤からの重心位置をオリジナルのスプーンに合わせてある。さらに、傾斜のある斜面上においても容易に水平を取れるよう、秤本体に簡易水準器を装着している(図-1C)。

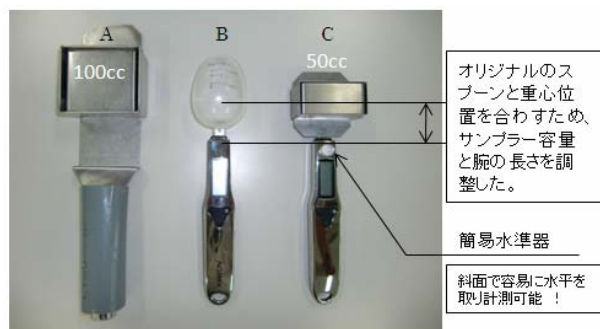


図-1 密度測定器. A:角形密度サンプラー(100cc), B:デジタル計量スプーン, C:簡易雪密度測定器(50cc)

3-2 比較試験結果

図-2 に、2011 年 3 月 23 日に外気温-6.1℃の中山峠で行った 100cc 密度サンプラーを用いた従来型測定方式と、50cc 型簡易雪密度測定器の測定精度の比較図を示す。新雪～しまり雪、ざらめ雪の各雪質において、簡易雪密度測定器で計測した密度は、従来方式とほぼ同じ直線上に位置し、測定値のばらつき量は従来方式と同程度を示している。

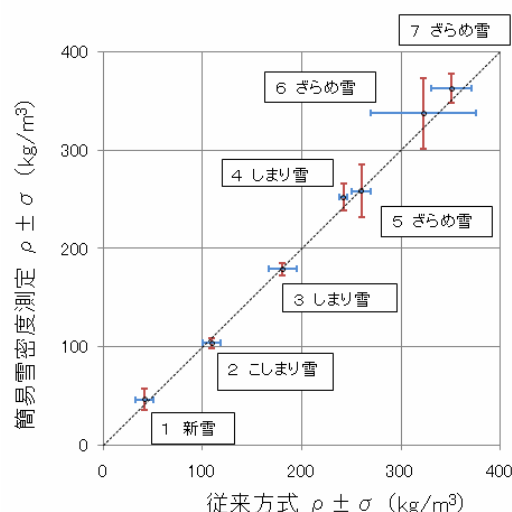


図-2 中山峠における密度測定比較図(平均密度(ρ)±標準偏差(σ))

4. 陸別町における積雪の断面観測

4-1 測定日時・場所・測定項目

積雪断面観測は、平成 24 年 1 月 20 日～23 日にかけて、陸別町内の 8 箇所で行った。観測項目は、積雪の断面観測、雪密度・積雪の剪断力(SFI)測定である。なお、こしもざらめ雪はしもざらめ雪に含まれると考えて、密度と剪断強度の関係は求めた。

4-2 雪密度の測定

本研究では、これまで検証していない、こしもざらめ雪・しもざらめ雪の各雪質で、従来方式と簡易雪密度測定器との比較試験を行う予定であった。ところが図-3 のように、標準型雪密度サンプラーで、しもざらめ雪を採取し蓋を外すと、サンプラー内の

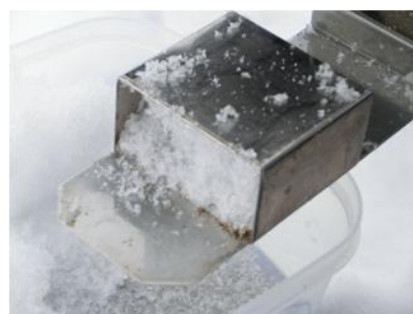


図-3 標準型雪密度サンプラーの外枠をはずした直後の状況

雪がこぼれ正確な測定ができなかった。さらにアタッチメントを装着した状態で全体を計測し、補正を試みたが、サンプラーとアタッチメント間の段差部分の雪の量が一定ではなく、補正が困難であった。そこで本研究では、簡易雪密度測定器で測定した雪密度を使用する。なお、雪密度は3～5回測定し、その平均値を計測値とした。

4-3 積雪の剪断強度（SFI）の測定

積雪の剪断強度の測定には、断面積 248cm²、重量 262g のステンレス製シアーフレーム試験器と断面積 248 cm²、重量 83g のチタン製シアーフレームを使用した。計測には IMADA 社製デジタルフォースゲージ Z 2-500N を用い、3～5 回計測の平均値を測定値とした。松下等(2008)の研究³⁾では、シアーフレーム試験値は試験器の材質・重量により差が出るので、各雪質に適した材質の杵を使うことが望ましいとされる。

本研究ではチタン杵で統一したかったが、表-2 の番号 4 の計測途中でステンレス杵を使用していることに気づいたため、番号 1～4 がステンレス杵、番号 4 の途中～番号 8 がチタン杵での計測である。松下等(2008)の研究では、ステンレス製シアーフレーム試験値をステン SFI、チタン製シアーフレーム試験値をチタン SFI としたとき、ステン SFI×0.9≒チタン SFI の関係があるとされ、番号 4 の計測では、表-1 のように差が出た。そこで本研究ではステン SFI×0.9=チタン SFI とし、チタン SFI を計測値とした。

表-1 ステンレス製シアーフレーム試験値とチタン製シアーフレーム試験値の比較例(表-2 の番号 4 計測)

観測場所	観測日	雪質と粒径(mm)	密度(kg/m ³)	ステンSFI(kN/m ²)	チタンSFI(kN/m ²)
トマム中腹	H24.1.21	しもざらめ雪 1～2	230.0	1.012	0.900
トマム中腹	H24.1.21	しもざらめ雪 1～4	199.2	0.840	0.800

4-4 積雪の断面観測結果と考察

陸別町で観測された積雪の断面観測結果を表-2 に示す。図-4 に観測番号 2 の積雪断面観測結果を示す。各測定においては、新雪、こしまり雪等の雪質もあるが、表-2 では、こしもざらめ雪・しもざらめ雪に限定した。表中の雪面からの深さは、シアーフレーム試験器の下面および簡易雪密度測定器の中心位置を示す。

表-2 陸別町で観測された積雪の断面観測結果

番号	測定場所	測定年月日	天気	測定前 外気温 (℃)	積雪深 (cm)	雪面からの 深さ (cm)	雪質と粒径(mm)	記号	雪温 (℃)	密度 (kg/m ³)	積雪の剪断強度 (チタンSFI) (kN/m ²)
1	高田牧場	H24.1.20	晴	-4.5	34.5	13	しもざらめ1～2	▲	-7.4	184.0	0.724
						23	しもざらめ1～3	▲	-8.2	216.0	1.004
						27	しもざらめ2～4	▲	-6.9	184.4	0.616
2	一番上の丘	H24.1.21	晴	-11.5	39	5	こしもざらめ1～2	□	-11.6	201.2	0.461
						13	こしもざらめ1～2	□	-9.7	221.2	1.156
						20	しもざらめ1～3	▲	-6.2	251.6	1.904
3	トマム山頂	H24.1.21	晴	-8.1	33	31.5	しもざらめ2～5	▲	-3.0	197.2	1.220
						3.5	こしもざらめ1～2	□	-4.8	132.4	0.187
						8	しもざらめ1～3	▲	-6.6	267.6	1.055
4	トマム中腹	H24.1.21	晴	-8.5	40	15	しもざらめ1～3	▲	-6.4	248.8	0.781
						5	こしもざらめ0.5～1.5	□	-10.0	163.2	0.096
						16.5	しもざらめ1～2	▲	-6.9	230.0	0.900
5	トマム山麓	H24.1.22	雪	-1.6	27	33	しもざらめ1～4	▲	-3.1	199.2	0.800
						11.5	しもざらめ2～6	▲	-5.0	210.8	1.132
						20.5	しもざらめ3～12	▲	-2.6	177.6	1.076
6	陸別峠山頂	H24.1.23	雪	-1.1	50	20	こしもざらめ1～2	□	-4.1	231.2	0.556
						30	こしもざらめ1～2	□	-4.0	259.6	1.184
						40	しもざらめ1～3	▲	-1.5	203.3	1.208
7	東向き斜面	H24.1.23	雪	-2.1	50	26	こしもざらめ1～2	□	-3.9	228.0	0.752
						37	しもざらめ1～3	▲	-4.4	216.7	0.588
						48	しもざらめ2～4	▲	-3.9	202.0	0.472

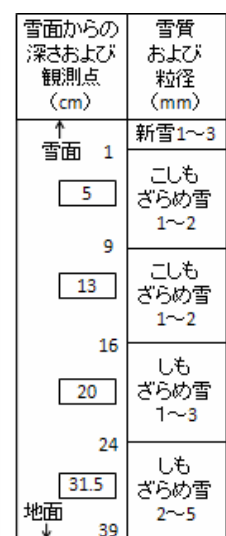


図-4 積雪断面観測例(番号 2)

本研究で得られたしもざらめ雪・こしもざらめ雪の密度 ρ kg/m^3 と積雪の剪断強度 σ kPa の関係式は式 (1) で表され、その時の相関係数(r)は $r=0.67$ である.

$$\sigma = 3.00 \times 10^{-7} \times \rho^{2.73} \quad \dots (1)$$

図-5 は、表-2 をグラフ化したものに、山野井等(2002)⁴⁾ のざらめ雪の密度と剪断強度の関係式： $\sigma = 4.97 \times 10^{-7} \times \rho^{2.91}$ (破線)と、カナダの Jamieson 等(2001)⁵⁾ のこしもざらめ～しもざらめ雪の関係式： $\sigma = 18.5 \times (\rho / 917)^{2.11}$ (2 点破線)および本研究で得られた相関式(実線)を示したものであり、図-6, 7 は本研究における各雪質の代表例の積雪粒子写真である. 図-5 より、5～10cm 以上の比較的厚い層厚をもつ陸別町におけるしもざらめ雪・こしもざらめ雪の密度と剪断強度の関係式は、カナダの積雪層中の薄い弱層を対象とした研究成果とほぼ一致している. このことから、しもざらめ雪は、地域や層厚が違っていても同一の性質を持つと考えられる.

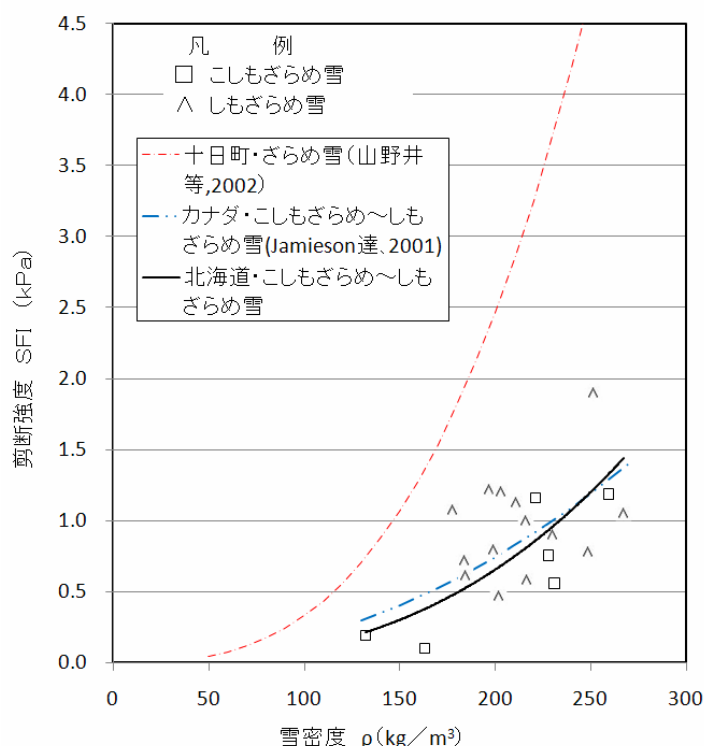


図-5 陸別町におけるしもざらめ雪の密度と剪断強度の関係

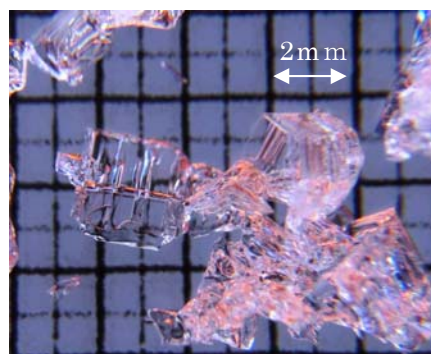


図-6 しもざらめ雪

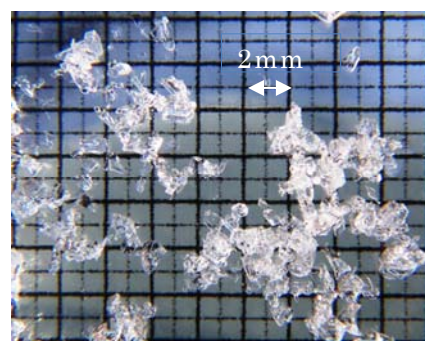


図-7 こしもざらめ雪

5. おわりに

弱層雪崩の多くはしもざらめ層で発生し、本研究で雪密度から積雪の剪断強度を推定できることが確認できたので、簡易雪密度測定器により短時間で積雪の安定度把握が可能になる. 50cc 型簡易雪密度測定器のサンプラー厚は 3cm なので、今後は弱層用に厚さ 1cm 程度の簡易雪密度測定器を開発し、積雪安定度の早期把握に努めたい.

【参考・引用文献】

- 1) (社)日本雪氷学会(2010):積雪観測ガイドブック, 101.
- 2) 秋田谷英次(1965):しもざらめ雪の研究 I, 低温科学. 物理編, **23**, 67-74.
- 3) 松下拓樹, 他(2008):SFI 測定におけるシアーフレーム重量の影響, , 雪氷研究大会, 137.
- 4) 山野井克己, 遠藤八十一(2002):積雪における剪断強度の密度および含水率依存性, 雪氷 **64**, 443-451.
- 5) Bruce Jamieson and Colin. D. Johnston (2001): Evaluation of the shear frame test for weak snowpack layers, Annals of Glaciology, **32**, 59-69.