# 高密度の積雪の安定度評価に用いる密度と圧縮粘性係数の関係

Relationship between Density and Compressive Viscosity for Evaluating Stability Index of High-Density Snow

北海道大学工学部　○学生員　大野愛佳（Aika Ohno）
北海道大学大学院工学研究院　正員　岡地寛季（Hiroki Okachi）
北海道大学大学院工学研究院　正員　山田朋人（Tomohito Yamada）

## 1. 背景と目的

北海道には国内でも有数のスキーリゾートが多数あり、国内外から良質な雪を求めて多くの人々が訪れる。一方で、雪崩の被害も多数発生している。

積雪の強度は、積雪の密度や雪温、含水率、積雪内の粒子の大きさや形や結合形式に依存する。さらに、雪質は気象外力、圧密、焼結の影響を受けて、時間とともに変化し続けている。冬期に積雪の強度を実際に現地で測る行為はそれ自体が雪崩を引き起こす可能性があり危険であるため、代わりに気象外力等の観測値から積雪の内部の様子を予測し、積雪の強度を計算する手法の確立が不可欠である。

北海道のような積雪寒冷地域で厳冬期に頻繁に発生する乾雪表層雪崩は、斜面に平行な積雪の剪断破壊によるものである。そのため、ある積雪層に作用する剪断力 $SF_i$(Shear Frame Index)とその層の剪断強度 $\tau$ を計算することができれば、表層雪崩の発生が予知できることになる。

雪崩の発生評価には、シアーフレームを用いて規格化された手法で測定した剪断強度 $SF_i$ と剪断応力 $\tau$ の比から算出される斜面積雪の安定度 $SI$(Stability Index)が広く用いられており、次式のように定義される。

$$SI = SFI\ /\tau \tag{1}$$

Perla(1977)、Sommerferd(1984)はシアーフレーム試験から測定される剪断強度と、実際の雪崩が発生した破断面における剪断強度の差を解析し、$SI$<1.5 を雪崩発生基準として与えた。カナダのロジャース峠では、雪崩予報や人工雪崩実験において、実際にこの値を使用している。

しかし、2章で示す安定度 $SI$ の算出手順の特性上、低密度の積雪($\rho \leqq 200$ kg/m³)の安定度 $SI$ は算出することができるが、高密度の積雪($\rho > 200$ kg/m³)の $SI$ の算出が困難である。Perla(1977)によって面発生間接表層雪崩の剪断滑り面の平均密度が 231 kg/m³ が得られており、$\rho > 200$ kg/m³ での $SI$ の算出は不可欠であると言える。

本研究では、200 kg/m³ 以上の高密度の積雪においても適用可能な $SI$ の算出方法を確立するために必要である、圧縮粘性係数 $\eta$ と積雪密度 $\rho$ の関係式の作成を目指す。

## 2. 安定度 SI の算出方法

以下は、図-1 の $i$ 層における積雪の安定度 $SI_i$ の算出方法である。単位面積あたりの剪断応力 $\tau$，垂直応力 $\sigma$，

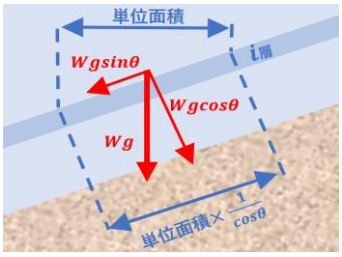


図-１　斜面内部の雪層($i$ 層)に作用する応力

ひずみ速度 $\epsilon$ は、

$$\tau = Wgsin\theta cos\theta \tag{2}$$

$$\sigma = Wgcos^2\theta \tag{3}$$

$$\epsilon = -\frac{d\hbar \times cos\theta}{\hbar \times cos\theta} \times \frac{1}{dt} = -\frac{d\hbar}{\hbar \times dt} = \frac{d\rho}{\rho \times dt} \tag{4}$$

積雪は圧縮粘性体と見なせるので、垂直応力 $\sigma$ とひずみ速度 $\epsilon$ の比例関係から次式が成り立つ。

$$Wgcos^2\theta = \eta \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dt} \tag{5}$$

ここで、$\eta$ は圧縮粘性係数（圧縮に対する粘性抵抗の大きさを示す指標）である。Endo(1990)の測定結果より、$\rho \leqq 200$[kg/m³]のとき、log $\eta$ が log $\rho$ に比例することが分かっており、

$$\eta = C_1 \cdot \rho^n \quad (n, C_1 \text{は定数}) \tag{6}$$

である。一方で、$\rho > 200$ kg/m³ のとき、Shinojima(1967)より、

$$\eta = C_2 \exp(k\rho) \quad (n, C_2 \text{は定数}) \tag{7}$$

である。(5)式に(6)式を代入して $t$ と $\rho$ について積分すると、

$$\rho = \left\{\frac{ng}{C_1}\cos^2\theta \cdot Q(t, t_o) + \rho_0^n\right\}^{\frac{1}{n}} \tag{8}$$

Watanabe(1977)の円管型ねじり試験機による積雪の剪断強度測定と Endo(1992)の SFI 測定方法に従った剪断強度測定から得られた剪断強度と積雪密度の関係が一致したことから、乾いた新雪としまり雪の剪断強度 SFI は 40 kg/m³ $\leqq \rho \leqq$ 500 kg/m³ の範囲で、

$$SFI = B \cdot \rho^m \tag{9}$$

と表せることが分かっている。ここで、$B_{ave}$ は 3.10×104[N·m²·kg⁻ᵐ·m⁻³ᵐ]、$m$ は 3.08 とする。

(8)，(9)式 より、

$$SFI = B \cdot \left\{\frac{ng}{C_1}\cos^2\theta \cdot Q(t, t_o) + \rho_0^n\right\}^{\frac{m}{n}} \tag{10}$$

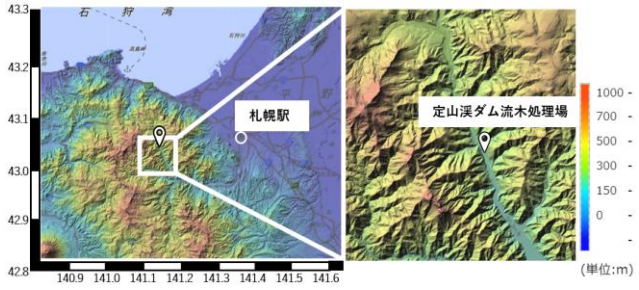


図-２　観測地点を示す地図

(1)，(10)式 より、図-１の i 層における積雪安定度 $SI_i$ は、

$$SI_i = \frac{B\left\{\left(\frac{n}{C_1}\right)\cos^2\theta \cdot Q(t_0,t) + \rho_0^n\right\}^{\frac{m}{n}}}{W\sin\theta\cos\theta} \qquad (11)$$

と算出できる。ただし、(6)，(8)，(10)，(11)式は (6) 式の制約条件より $\rho$ ≦200 kg/m$^3$ の場合のみ適用できる。

## 3. 現地観測について

現地観測は 2021 年 2 月 15 日と 3 月 24 日に札幌市南区にある寒地土木研究所の定山渓流木処理場（北緯 43° 1′ 53″ 、東経 141° 7′ 43″ ）で行った（図-２）。積雪深ごとに雪温、積雪密度、剪断強度を測定した。

積雪密度は、角型スノーサンプラー(100cm$^3$)で採取した積雪の質量を電子天秤で計測し、密度を計算した。剪断強度は、シアーフレーム(試験面積 248cm$^2$，厚さ 4cm)を用いて測定した。

## 4. 結果

測定した積雪密度$\rho$と、式(7)から得た圧縮粘性係数 $\eta$ を、両軸対数グラフに示した(図-３)。ここでは、(7)式での $C_2 = \eta_0$とし、$\eta_0$と $k$ は Shinojima (1967)によって得られた以下の(12)，(13)式を用いた。(12)式では、乾いた新雪としまり雪を仮定している。ここで、$T_s$ は雪温[℃]である

$$\eta_0 = 3.44\times10^6\exp(0.0958\,Ts) \qquad (12)$$

$$k = 2.53\times10^{-2} \qquad [m^3/kg] \qquad (13)$$

同様に Watanabe(1977)， Endo(1992)による積雪密度と剪断力の測定の結果から、(7)，(9)，(12)，(13)式を用いて推定した積雪密度$\rho$と圧縮粘性係数$\eta$ もプロットした。ただし、雪温のデータは得られていないためすべて 0℃と仮定して計算を行った。

同時に、遠藤ら(1990)による測定の結果も示した。遠藤ら(1990)では、log$\eta$—log$\rho$図上では圧縮粘性係数と密度の関係は密度 50～180 kg/m$^3$ のとき直線で表せるとしている。(6)式はこの結果から導かれたものである。

一方で、密度の高い積雪に関しては密度の低い積雪と同一回帰線上にないことが図-３からわかる。$\rho$ = 200 kg/m$^3$ を境に得た回帰直線を図-３に示した。式は以下のとおりである。

$\rho$ ≦ 200 kg/m$^3$ のとき

$$\eta = 13.67\,\rho^{3.2603} \qquad (14)$$

$\rho$ ＞ 200 kg/m$^3$ のとき

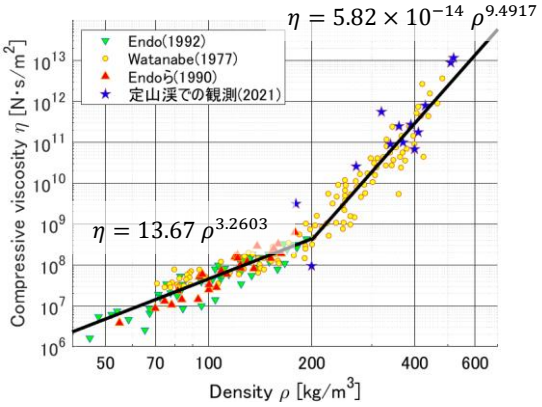


図-３　積雪密度と圧縮粘性係数の関係

$$\eta = 5.82\times10^{-14}\,\rho^{9.4917} \qquad (15)$$

式(14)，(15)は式(6)と同様に積分計算を行うことで $SF$ 値を算出するのに利用できる式形である。

## 5. まとめ

札幌市の定山渓で行った積雪の剪断強度、密度、雪温の観測より、密度$\rho$と圧縮粘性係数$\eta$を算出した。さらに、既往の剪断強度と密度に関する研究から$\rho$と$\eta$を推定した。これらの結果をもとに、圧縮粘性係数を積雪密度から算出する回帰式が得られた。得られた回帰式は積雪の安定度 $SI$ の算出に用いることができる式形である。

現時点で安定度 $SI$ の算出をできるのは、観測情報のある１点のみにおいてである。今後は得られている観測情報から観測情報のない点に関しても予測値を補完することで、面的に拡張して斜面全体の安定度 $SI$ を算出することができれば、実用化に一歩近づくことが期待される。

謝辞：本研究は文部科学省統合的気候モデル高度化研究プログラム領域テーマ C「統合的気候変動予測」JPMXD0717935561、科研費基盤研究(B) 19H02241、ArCS の支援を受けた。記して謝意を表します。

**参考文献**

1) 遠藤八十一，大関義男，and 庭野昭二. ″低密度の雪の圧縮粘性係数と密度の関係.″ 雪氷 52.4 (1990): 267-274.
2) 前野紀一・遠藤八十一・秋田谷英次・小林俊一・竹内政夫(2000)『雪崩と吹雪』pp. 24-78. 古今書院
3) Endo, Y. (1992). Time variation of stability index in new snow on slopes. Proceedings of the Japan-US. Workshop on snow avalanche, land-slide, debris flow prediction and control, 1991, Tsukuba, sponsored by Science and Technology Agency of Japanese Government, 85-94.
4) Watanabe, Z. (1977). The influence of snow quality on the breaking strength. Fukushima University Sci.Rep. 27, 27-35.
5) Shinojima, K. (1967). Study on the visco-elastic deformation of deposited snow. Physics of Snow and Ice: proceedings, 1(2), 875-907.