

# 雪崩予知の研究

中俣三郎\*

## Forecasting of Avalanche

by

Saburō NAKAMATA

(Abstract)

1. We must consider how to protect the area which does not have avalanche defences from avalanche hazard. In such area, it is important to get avalanche forecasting. Forecasting are classified by the following three methods.

- 1 Meteorological conditions
- 2 Investigation of snow profile on the slope
- 3 Measurement of glide velocity

Nowadays, the forecasting is not sufficiently advanced to predict the exact time of occurrence. Method 3 will be the most reliable one on account of its measurements which can detect snow moving directly.

Accordingly, we should examine gliding in detail. This has already been mentioned by R. HAEFELI, who has given a lot of literature. But utilizing it, we found that the glide distribution on the slope did not apply satisfactorily to our experiments. We detected glide velocity on the slope where there should essentially be no sliding on account to  $\mu > \tan \varphi$ . So, we adopted the following treatment for friction on the slope: coef. of friction increases continuously from the upper end of the slope to the lower. Under this conception, we obtained Formulae 10, 11. In this case, condition  $\tan \varphi > (2\mu_1 + \mu_2)/3$  is indispensable.

2. To forecast avalanche hazard, we chose the artificial slope with the inclination of 15°, the length of 20 m, the width of 5 m. We set six emitters of glidemeter in the sloping snow cover. From the values of gliding, we estimated whether the sloping snow cover was stable or not. Table 6 shows the value of each gliding represented by daily counts. It shows that in this slope the stability of sloping snow is clearly distinguishable according as the glide is active or not. From these effects we examined the time of occurrence of the avalanches which happened in the neighbourhood while the gliding was active. Fig.7 shows the relations between the glide velocity (represented by an hour count) measured on this artificial slope and the time of avalanche occurrence. As shown in Fig.7, we had the possibility of avalanche forecasting even with a few instances given here. We are to continue our experiments on a lot more examples.

---

\* 新潟大学積雪地域災害研究センター

## 1 雪崩対策の経過

雪国、特に山間部の住民にとって冬季間の雪崩は大きな脅威であり生活面でも多大の支障を与えている。

雪崩はひとたび発生すると、その破壊力、災害の規模の大きさの点から雪氷災害中特異な存在であり、その防止は雪害対策の中でも極めて重要な項目の一つとしてあげられている。

雪崩対策はこれまで雪崩防止施設、雪崩防止林など、構造物や植生を主とした対策が実施されてきた。このため防止施設の種類の選定、防止用構造物の強度や配置条件の究明、林木の適正な植生密度などが種々論議されてきた。

これらの対策は、雪崩発生のおそれのある斜面に対してあらかじめ施設を設けることによって防止する工法で、例えば雪崩発生源に柵や群杭を設けてその発生を未然に防止する予防施設、雪崩走路中に擁壁や柵を設け直接雪崩の衝撃を受けることで阻止する防護施設、又走路の方向をそらす誘導施設、雪崩運動の勢力を弱める減勢施設、などがありこれら各工法を分類すると表-1に示す内容となる。

表-1 施設を用いた雪崩防止工法

Table 1 Avalanche defences

分類	施設の名称	施設の役割
雪崩予防施設 (発生の予防)	柵, 林	山頂の雪庇防止
	“ ”	斜面の吹溜り防止
	柵, 群杭, 階段工, 林, 吊柵	斜面積雪のグライドの防止
雪崩防護施設 (発生後の対策施設)	雪堤, 林, 柵, 杭, アースマウンド, } スノーシェッド, 洞門	雪崩勢力の減衰
	誘導堤, 誘導柵, なだれ割り, 溝	雪崩進路の誘導
	擁壁	雪崩の阻止(大勢力)
	柵, 杭, 林	“ (小勢力)

従って表-1に示すように防止目的に相応した工法を選択し施設をあらかじめ設ければ雪崩のおそれはなくなる。しかし、これらの施設に要する経費は決して安いものではない。

山間地を走る鉄道、道路、山間部の集らく、山奥の発電所、峠越えの送電線路、すべてが雪崩対策を完全に実施しているわけではない。

殊に近年、山村の間を結ぶ道路の無雪化、高海拔地帯へのスキー場の進出、登山人口の増加、ハイウェイの開発、スーパー林道、山間部における建設業者の越冬作業など人と雪崩とのかかわりあいは益々増加をたどっている。

従って雪崩対策は、雪崩の発生頻度の大きい個所から、又雪崩から守る対象物の重要度から、逐次進めてきた。このため防止対策のまだ進まぬ地域や、夫々の事情で対策から取残された場所は、いつ起こるか分からない雪崩の脅威にさらされるため自衛上、雪崩発生を事前に予知すること、及び発生の予防のための現地措置が重要となってくる。これらの予知、現地措置などの対策を表-2, 3に示した。

表-2に示すように雪崩を予知するため、気象条件の測定、積雪層構造の調査、グライド測定など、各種の試みが行われているが何れも予知の手がかりを得るため検討中又は開発中のもので、完全な予知法は現段階ではまだ得られていない。このうちグライドによる方法は、気象条件、積雪層構造などを総合した

表 - 2 雪崩の予知方法

Table 2 Method of avalanche forecasting

	予知の方法	予知に必要な項目
予知	気象条件から	天気, 気温, 日射, 風向, 風速, 降雪, 降雨, 積雪深などの観測
	斜面積雪の鉛直断面の調査から	積雪中の各層の構造, 組織の調査 (雪質, 密度, 硬度, 雪温, 含水率, 粒径など)
	斜面積雪のグライド検知から	なだれ発生源のグライド速度の変化測定 なだれ発生源のグライド速度の分布測定 (なだれ発生源にグライドメーターを設置)
		斜面に発生するクラック (雪割れ) の成長速度の監視 (ヘリコプターによる空中よりのパトロール, 又は現地巡回)
	斜面に発生する雪しわの監視 (同上)	

表 - 3 現地措置対策

Table 3 Field management for occurrence of avalanche

	工法の種類	内容
現地措置	人工雪崩	火薬により雪崩発生源の斜面積雪又は山頂の雪庇を爆破し, 人工的に雪崩を発生し事前に処理する。
		雪崩砲を用いて発生源を砲撃し, その衝撃により人工雪崩を惹起し処理。 (国内ではまだ実施されていない)
	雪庇処理	人力により除雪又はワイヤロープを用いて雪庇切落し作業を行い, 雪庇の自然崩落による雪崩発生を予防する。
	雪堤, 溝の構築	雪壁を作り雪崩のデブリを阻止する或いは溝, 堀などによりデブリを収容する。
	斜面積雪のふみ固め	斜面積雪の不安定の箇所をふみ固める或いはクラックを埋める等による安定化をはかる。
	その他	

結果から発生するグライドを直接測定する点, 又斜面積雪の直接の動態を検知する点から, 雪崩発生機構を究明する重要な鍵と考えられる。但しグライド検知による予知は全層なだれの場合に限定されることに注意しなければならない。

表層なだれの予知に対しては気象条件と積雪構造の調査を組合わせた方法によることが最も近道である。

なお, 表 - 3 に示す現地措置は緊急時やむなく採る手段でその多くは危険な作業を伴う。例えば人工雪崩は発生確率を高めるため雪崩の自然発生時期に近い頃を選ぶ。また, 火薬装填のため最も危険な発生源に立入作業するなど, 雪庇処理事業をも含めて危険性が多く, 極めて熟練した人達によってのみ施行される点を考慮すると, 出来うれば現地措置に頼る方法は望ましくない。

また, ふみ固め, 雪堤作りなども逆効果を来す場合もあり, その運用には極めて慎重でありたい。

このようにあらかじめ雪崩予防施設が設けられていない斜面に対しては、予知によりなだれ発生の恐れある時期、時間帯を避ける。又やむなく現地措置をとるにしても斜面の安定性をよく検討しなければならない。予知法として最も確度の高いグライド検知方式でも、雪崩の恐れがでてから現地で測定することは不可能である。あらかじめ人工斜面なり適当な斜面で常時グライドを観測監視し、山地の斜面の安定性を判断しなければならない。

本文はグライドの検知にもとづく雪崩予知方式を主体とした。従って先ずグライド自体を明確に把握することに意を注いだ。次いで人工斜面で検知したグライド量と雪崩発生の相関についてとりまとめた。

## II 斜面積雪のグライド

### 1 グライドの意義

積雪底面の滑りをグライド (Glide) という。積雪の底面が地面に凍着している場合グライド零とみなす。しかし地面に凍着しても表土を剪断して滑っている場合、広義のグライドに含む。積雪内部の歪はクリープと呼びグライドとは区別する。クリープは斜面積雪が自重のため沈降する際、斜面と平行方向にずり変形すると共に、直角方向に圧縮変形し、結果として斜面平行方向と  $\beta$  の伏角をもつ方向に変位する。積雪密度、傾斜が一定の場合、積雪中の各点の変位方向  $\beta$  は一定である。

### 2 グライドのある積雪底面の応力条件

斜面の傾斜角度  $\varphi$ 、積雪の厚さ  $d$ 、平均密度  $r$  とする。

$$\text{斜面積雪による傾斜方向のずり応力} \quad \tau_x = r \cdot d \cdot \sin \varphi$$

$$\text{積雪底面の摩擦抵抗} \quad R_x = \mu \cdot r \cdot d \cdot \cos \varphi + C$$

但し地表との摩擦係数を  $\mu$ 、粘着力を  $C$  で示す。

図-1で直交する二軸  $OA$ 、 $OB$  は夫々斜面と直角方向の圧縮応力、斜面と平行方向のずり応力を夫々示すものとする。今  $OB$  上に粘着力  $OC = C$  をとり、 $\angle ECD = \phi$  となるような直線  $CE$  を引く。  $CE$  上の一点  $P$  から  $OA$  に垂線  $PH$  を下すと、 $PH = OH \tan \phi + OC$  但し、 $CD \parallel OA$

$$OH = r \cdot d \cdot \cos \varphi \text{ とすれば} \quad PH = \mu \cdot r \cdot d \cdot \cos \varphi + C$$

即ち、 $PH$  は傾斜  $\varphi$  の斜面に於ける厚さ  $d$  の積雪の底面に働く摩擦抵抗を示す。

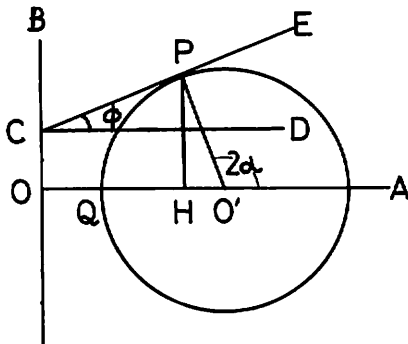


図-1 斜面積雪の境界面における応力条件図  
Fig.1 Strees Condition diagram of a sloping snow layer

次に  $\angle HPO' = \phi$  となるように  $PO'$  を引き、 $O'$  を中心とする半径  $O'P$  の円を画く。この円が  $OA$  軸を切る点を  $Q$ 、 $Q'$  とする。 $O'$  円は  $CE$  直線に  $P$  点で接する円となり、 $O'$  円は地表、積雪底面の境界層における応力状態を示すモール円に相当する。従って  $OQ$ 、 $OQ'$  は境界面に働く第1主応力、第2主応力の大きさを夫々示す。又、第2主応力となす角度  $\alpha$  は、

$$2\alpha = \frac{\pi}{2} + \phi \quad \text{から} \quad \alpha = 45^\circ + \frac{\phi}{2} \text{ が求められる。}$$

### 3 斜面積雪のグライド速度

斜面の積雪が前項でのべたように、局部的に滑りを起こしても必ずしも雪崩に発展しない。地表に凹凸や緩急の差があったり、植生条件の違いがあると、この

部分でグライドは阻止される。

阻止する点(面)が滑りを起こした個所の上方にあるか、下方にあるかにより図-2に示すように張力圏、圧縮圏が成りたつ。一般に斜面では阻止面Aは山頂の尾根、Bは山麓の平地に相当する。

図-2で斜面にそって傾斜線方向をx軸、積雪の厚さ方向をy軸とし、積雪の厚さd、積雪平均密度r、積雪圧縮粘性係数 $\eta_c$ 、斜面地表の摩擦係数 $\mu$ 、とするとき $\mu$ の適用如何によりグライド速度は次のように求められる。

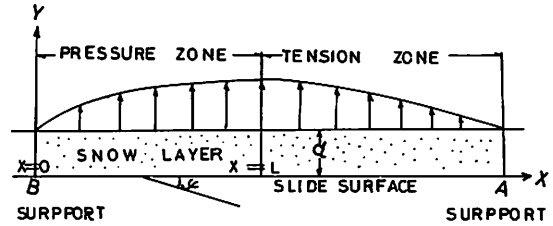


図-2 斜面積雪の平衡条件

Fig.2 Condition of equilibrium on the slope

### 3-1 地表が滑らかで摩擦係数を無視できる場合

斜面積雪は傾斜した雪柱と見なされる。斜面長を $l$ 、斜面下端( $x=0$ )で積雪を支持するものとすれば、 $x=x_1$ における積雪中の斜面傾斜線方向の応力 $\sigma_x$ は

$$\sigma_x = \int_x^l r \cdot \sin \varphi \cdot dx = r(l-x) \sin \varphi$$

上式は単一な薄い雪層について斜面方向の応力を求めたが、積雪は $d$ の厚さをもちその密度が均一としても既述のように斜面と平行方向の変位と、斜面と直角方向の変位が合成した変位を示す。従って斜面と平行、直角方向の夫々の速度を $U$ 、 $V$ で示せば応力 $\sigma_x$ は

$$\sigma_x = 2\eta_s \frac{\partial U}{\partial x} + \eta_o \left( \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) \dots\dots\dots(1)$$

ここで示す $\eta_s$ (ずり粘性係数)及び $\eta_o$ は弾性体におけるラメ常数 $\mu$ 、 $\lambda$ に相当する。

従って  $\eta_s = \eta_o / 2(1 + \nu_c)$  で示される。

$$\eta_o = \eta_v - \frac{2}{3}\eta_s = \frac{\eta_c \nu_c}{(1 + \nu_c)(1 - 2\nu_c)} = \frac{2\eta_s \nu_c}{1 - 2\nu_c} \dots\dots\dots(2)$$

ここで $\nu_c$ は圧縮ポアソン比を示す。

今、 $0^\circ\text{C}$ の積雪では $\nu_c$ は殆んど零に近い実験結果を得ているので、 $\nu_c \div 0$ とみなすと、

$$\sigma_x \div 2\eta_s \frac{\partial U}{\partial x} = \eta_c \frac{\partial U}{\partial x} \text{ が成り立つ。}$$

従って、 $U = \int \frac{\sigma_x}{\eta_c} dx$ 、今、全層均一の密度 $r$ をもつとすれば $\eta_c$ は一定の値をもつ。

$$\begin{aligned} \therefore U &= \frac{1}{\eta_c} \int \sigma_x dx \\ &= \frac{1}{\eta_c} \int (l-x)r \sin \varphi dx \\ &= \frac{r \cdot l^2 \cdot \sin \varphi}{2\eta_c} \left( \frac{2x}{l} - \frac{x^2}{l^2} \right) \dots\dots\dots(3) \end{aligned}$$

$$x = l \text{ で } U \text{ は最大値を示し } U_{max} = \frac{r l^2 \sin \varphi}{2\eta_c} \dots\dots\dots(4)$$

$x = 0$  で $U$ は零を示す。

今、 $\eta_c$  と  $r$  の関係については次の二つの実験式が求められている。

$$\eta_c = 1440 \times e^{0.089(|\theta|-5)} \times e^{21 \times r} \dots\dots\dots \text{小島賢治}$$

$$\eta_c = 900 \times e^{0.089(|\theta|-5)} \times e^{21 \times r} \dots\dots\dots \text{篠島健二}$$

共に乾燥したしまり雪における適用式で北陸の湿雪はこの値を下廻るが、現段階では  $0^\circ\text{C}$  の積雪について含水率と粘性係数を関係づける式がないので上式を適用する。なお、 $\theta$  は雪の温度で  $0^\circ\text{C}$  の場合上式は夫々次のように簡単になる。

$$e^{0.089(\theta-5)} \approx 0.641$$

$$\therefore \eta_c = 921.6 \times e^{21 \times r} \dots\dots\dots \text{小島}$$

$$\eta_c = 576 \times e^{25.3 \times r} \dots\dots\dots \text{篠島}$$

但し、上式で  $r$  : ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )、 $\eta_c$  : ( $\text{g} \cdot \text{min}/\text{cm}^2$ ) とする。グライドの測定値は日又は時間単位が多いので夫々に適用する  $\eta_c$  を求める場合は次式を用いる。但し雪温は  $0^\circ\text{C}$  とする。

$$\eta_c = 0.64 \times e^{21 \times r} : (\text{g} \cdot \text{day}/\text{cm}^2) \quad \text{或いは} \quad 15.36 \times e^{21 \times r} : (\text{g} \cdot \text{H}/\text{cm}^2) \dots\dots\dots \text{小島}$$

$$\eta_c = 0.40 \times e^{25.3 \times r} : (\quad) \quad \text{或いは} \quad 9.6 \times e^{25.3 \times r} : (\quad) \dots\dots\dots \text{篠島}$$

上式に基づいた計算結果を表-4に示す。

表-4  $r$  と  $\eta_c$  の関係 ( $0^\circ\text{C}$  の乾雪の場合)

Table 4 The dependence of snow viscosity on density

$r$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) $\eta_c$ ( $\text{g} \cdot \text{day}/\text{cm}^2$ )	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
小島の場合	5.23	42.7	$3.48 \times 10^2$	$2.85 \times 10^3$	$2.32 \times 10^4$
篠島の場合	5.02	63.0	$7.91 \times 10^2$	$9.93 \times 10^3$	$1.25 \times 10^5$

表-4の数値を使用して  $r$  と  $r/\eta_c$  の関係を求め図-3に示した。斜面の地形条件が同一でも積雪の密度が増加すると滑り速度の絶対値は小さくなる。また斜面積雪の密度を一定にした場合は、斜面長の2乗に比例して滑り速度は増加する。

これまで取扱った速度は真のグライド速度を示していない。積雪の表面から底面に至る厚さ方向の断面について、その平均速度を示している。

従って、今斜面積雪の厚さ方向の断面について、表面の速度を  $U_0$ 、底面のグライド速度を  $U_g$ 、平均速度を  $U_{m.a.n}$  とするとき次の関係式が得られる。

但し積雪の密度は均一で  $r$  とする。積雪の厚さ  $d$ 、グライド比  $n = U_g / (U_0 - U_g)$  から

$$U_{m.a.n} = \frac{1}{d} \int_0^d U_x dy = U_g \left(1 + \frac{2}{3n}\right) \dots\dots\dots (5)$$

上式を誘導する際、厚さ方向の速度分布は拋物線状の分布と仮定した。

### 3-2 地表の摩擦抵抗を考慮したときのグライド

斜面の摩擦抵抗に打ちかって滑るためには既述のように、積雪底面に働くずり応力 ( $\tau_x$ ) と地表摩擦抵抗 ( $R_x$ ) との間に  $\tau_x \cdot d \cdot \sin \varphi - \mu \cdot r \cdot d \cdot \cos \varphi - C \geq 0$

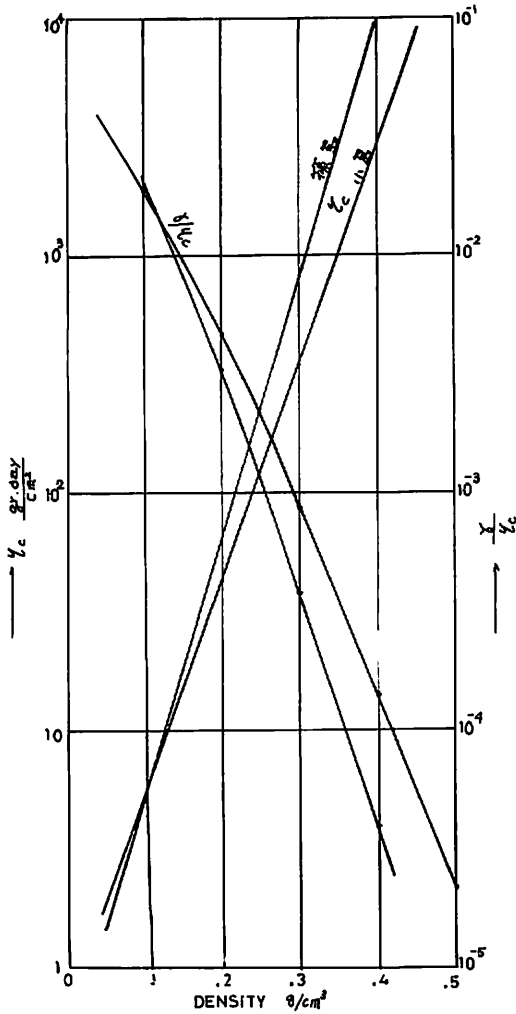


図-3 密度別の  $\eta_c$  ,  $\tau/\eta_c$  の値

Fig.3 Dependence of snow viscosity on density

が成立しなければならない。また外力が働かない限り摩擦力も発生しないので、 $R_x \leq r \cdot d \cdot \sin \varphi$  が成り立ち、 $R_x$  の最大値は  $r \cdot d \cdot \sin \varphi$  で示される。

今、図-4 に示すように斜面積雪が滑りうる条件にあり、下端  $x = 0$  で積雪が阻止されているとき、積雪層内の任意の点(P)の圧縮応力(斜面と平行方向)  $\sigma_x$  は次式で示される。

$$\sigma_x = \sigma_1 - \sigma_2 = \int_x^l r \cdot \sin \varphi \cdot dx - \int_x^l (R_x/d) dx \quad \dots\dots\dots(6)$$

但し  $R_x/d$  は底面に働く摩擦抵抗  $R_x$  による厚さ  $d$  の積雪中の応力とする。従って  $U_x = \int \frac{\sigma_x}{\eta_c} \cdot dx$  に上式を適用すれば、下端から  $x$  の距離にある積雪の速度  $U_x$  を求めることができる。(  $U_x$  は積雪の厚さ方向の平均速度を示す ) その際、地表面の摩擦係数  $\mu$  が斜面上に均一分布している場合  $R_x = \mu \cdot r \cdot d \cdot \cos \varphi$  であるから

$$U_x = \frac{r}{\eta_c} (\sin \varphi - \mu \cdot \cos \varphi) \int (l-x) dx$$

$$= \frac{r \cdot l^2}{2 \eta_c} (2x/l - x^2/l^2) (\sin \varphi - \mu \cdot \cos \varphi) \quad \dots\dots\dots(7)$$

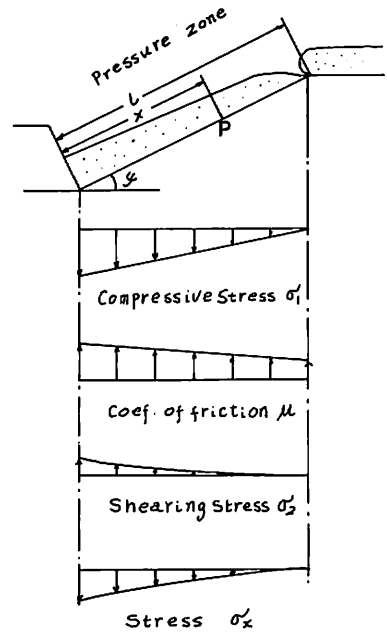


図-4 斜面積雪中の応力分布図

Fig.4 Stress diagram in sloping snow layer

$$x = l \text{ 即ち斜面上端で最大値 } U_{max} = \frac{r \cdot l^2}{2 \eta_c} (\sin \varphi - \mu \cdot \cos \varphi) \text{ を示す。}$$

この場合摩擦抵抗  $R_x$  は既述のように  $R_x = \mu \cdot r \cdot d \cdot \cos \varphi + C$  で示したが  $C$  は始動時のみ作用し、グライドを続けている場合は 0 と解釈した。但し、 $\mu \leq \tan \varphi$  の条件下にあるものとする。

このようにして求めたグライド速度の理論式に対して筆者はこれまで斜面で実測した結果との対応を検討した。式で求めた斜面のグライド速度分布は  $x^2$  に比例して減衰する。実測ではこのような分布形は極めて少なく、ほぼ直線的に減少する例が多かった。傾斜  $40^\circ$  の均一の斜面で斜面各所の積雪ブロックを切り出して、その摩擦抵抗を実測した。頂部のクラック発生線付近では小さく、斜面中央部、下端付近の積雪底面は凍結状態に近く摩擦抵抗は大きな値を得た。即ちクラック線近くで  $\mu \leq \tan \varphi$  の条件を得ただけで、中央付近から下側は殆んど  $\mu > \tan \varphi$  の結果を得た。しかしグライド速度は斜面のほぼ下端近くまで検出できた。

この事実に基づいて、斜面の摩擦係数は頂部クラック発生線から斜面下端に向かって 1 次元的に増加する、と定義した。斜面上下端の地表摩擦係数を夫々  $\mu_1, \mu_2$  とするとき  $\mu_1 \leq \tan \varphi, \mu_2 > \tan \varphi$  が成り立つ条件でもグライド量を検出した理由は、上方斜面の滑りによる圧縮応力をうけて強制的な滑りを生じたものと解釈した。

このように摩擦係数が 1 次元的に変化する場合のグライド速度を求める。

今、斜面下端 ( $x=0$ )、頂部 ( $x=l$ ) の摩擦係数、摩擦抵抗を夫々、 $\mu_1, \mu_2, R_1, R_2$  とする。但し  $\mu_1 < \mu_2$

$$\text{斜面上の任意の点}(x)\text{の摩擦抵抗 } R_x = R_2 - \frac{x}{l} (R_2 - R_1)$$

$R_1 < R_2$  の場合この斜面は圧縮圏、 $R_1 > R_2$  の場合は張力圏の取扱いになる。

$$\text{積雪内部のずり応力 } \sigma_1 = r (l - x) \sin \varphi$$

$$\text{積雪内部の摩擦抵抗による応力 } \sigma_2 = \frac{1}{d} \int_x^l R_x dx = \frac{l}{2d} (R_1 + R_2) - \frac{R_2}{d} x + \frac{(R_2 - R_1)}{2dl} x^2$$

$$\text{摩擦抵抗 } R_1 = \mu_1 \cdot r \cdot d \cdot \cos \varphi, \quad R_2 = \mu_2 \cdot r \cdot d \cdot \cos \varphi \text{ から}$$

$$\sigma_2 = \frac{r \cdot l \cdot \cos \varphi}{2} (\mu_1 + \mu_2) - r \cdot \mu_2 \cdot x \cdot \cos \varphi + \frac{r \cdot x^2 \cdot \cos \varphi}{2l} (\mu_2 - \mu_1) \dots\dots\dots(8)$$

$$\therefore \sigma_x = \sigma_1 - \sigma_2 = r (l - x) \sin \varphi - \frac{r \cdot l}{2} \cos \varphi (\mu_1 + \mu_2) + r \cdot x \cdot \mu_2 \cdot \cos \varphi - \frac{r \cdot x^2 \cdot \cos \varphi}{2l} (\mu_2 - \mu_1) \dots\dots\dots(9)$$

$$U_x = \frac{1}{\eta_c} \int \sigma_x dx$$

$$\begin{aligned} \therefore U_x &= \frac{r}{\eta_c} \left\{ \left( lx - \frac{x^2}{2} \right) \sin \varphi - \frac{lx}{2} (\mu_1 + \mu_2) \cos \varphi + \frac{x^2 \cdot \mu_2}{2} \cos \varphi - \frac{x^3}{6l} (\mu_2 - \mu_1) \cos \varphi \right\} \\ &= \frac{r \cdot l^2 \cdot \cos \varphi}{2 \eta_c} \left\{ \left( 2 \frac{x}{l} - \frac{x^2}{l^2} \right) \tan \varphi - \frac{x}{l} (\mu_1 + \mu_2) + \frac{x^2}{l^2} \cdot \mu_2 - \frac{x^3}{3l^3} (\mu_2 - \mu_1) \right\} \dots\dots\dots(10) \end{aligned}$$

今、 $x/l = m$  とすれば、



$$U_x = \frac{r \cdot l^2 \cos \varphi}{2 \eta_c} \left\{ (2m - m^2) \tan \varphi - m(\mu_1 + \mu_2) + m^2 \cdot \mu_2 - \frac{m^3}{3} (\mu_2 - \mu_1) \right\} \dots\dots\dots(1)$$

上式で  $x = 0$  のとき  $U_x = 0$

$$x = l \ (m = 1) \text{ のとき } U_x = \frac{r \cdot l^2 \cos \varphi}{2 \eta_c} \left( \tan \varphi - \frac{2\mu_1 + \mu_2}{3} \right) \dots\dots\dots \text{最大値} \dots\dots\dots(2)$$

今、斜面中のどこかでグライドが存在するためには、 $U_{max} > 0$  の条件が必要であるから  $\tan \varphi > \frac{2\mu_1 + \mu_2}{3}$  の条件が成り立たなければならない。

一方、斜面の下端までグライドを検出するためには  $m \rightarrow 0$  のとき(1)式が正でなければならない。

従って  $\tan \varphi > \frac{\mu_1 + \mu_2}{2}$  の条件が必要になる。

$$\text{今、} \frac{2\mu_1 + \mu_2}{3} < \frac{\mu_1 + \mu_2}{2}$$

従って斜面中に ( $x = 0$  地点を除いて) グライドを検知するためには  $\tan \varphi > \frac{2\mu_1 + \mu_2}{3}$  が必要条件となる。

傾斜  $40^\circ$  の斜面で積雪条件が一定のとき摩擦係数条件を次の3例のように変えて適用すると、斜面上のグライド速度の分布は次表のように変化する(図-5参照)。但しAは  $r l^2 \cos \varphi / 2 \eta_c$  の大きさを示す。

表-5 摩擦係数を変えた場合の斜面上のグライド速度分布

Table 5 Glide distribution on the slope under various coef of friction

$\mu$	$m = x/l$	$m = 1$	$m = 0.75$	$m = 0.5$	$m = 0.25$	$m = 0$
$\mu_1 = 0.6, \mu_2 = 1.0$		0.1A	0.084A	0.056A	0.0235A	0
$\mu_1 = 0.5, \mu_2 = 1.2$		0.1A	0.080A	0.0435A	0.0095A	0
$\mu_1 = 0.7, \mu_2 = 1.0$		0.03A	0.0233A	0.01A	0.00095A	0

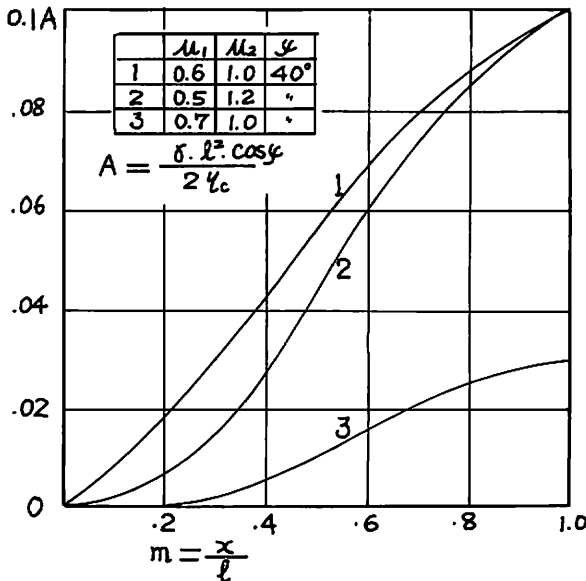


図-5 種々の摩擦係数を適用したときの、斜面上のグライド速度の分布  
Fig.5 Glide distribution on the slope, applied various coef of friction

### 3-3 R. HAEFELI によるグライド速度

R. HAEFELI は既述の地表摩擦係数は一様に分布しているという考え方と共に次のような取扱い方も示している。

即ち  $R_x$  は斜面上に地表摩擦を考えない場合の速度に比例して発生する。この場合、斜面下端 ( $x=0$ ) の支持点から斜距離  $l$  (上端) の点に最大速度  $U_{max}$ 、及び最大摩擦力  $R_{max}$  が示される。従って、

$$R_x / R_{max} = U_x / U_{max}$$

$$U_x / U_{max} = \frac{2x}{l} - \left(\frac{x}{l}\right)^2 \dots\dots\dots(13)$$

$$\therefore R_x = R_{max} \left\{ \frac{2x}{l} - \left(\frac{x}{l}\right)^2 \right\} \dots\dots\dots(14)$$

$$\sigma_x = \sigma_1 - \sigma_2 = \int_x^l r \cdot \sin \varphi \cdot dx - \int_x^l \frac{R_x}{d} \cdot dx \dots\dots\dots(15)$$

$$\text{今 } \sigma_2 = \int_x^l \frac{R_x}{d} \cdot dx = \frac{R_{max}}{d} \left( \frac{2}{3} l x - \frac{x^2}{l} + \frac{x^3}{3l^2} \right) \dots\dots\dots(16)$$

$$\therefore U_x = \int \frac{\sigma_x}{\eta_c} dx \text{ から}$$

$$= \frac{r \cdot \sin \varphi}{\eta_c} \left( l x - \frac{x^2}{2} \right) - \frac{R_{max}}{d \cdot \eta_c} \left( \frac{2}{3} l x - \frac{x^2}{l} + \frac{x^3}{3l^2} \right) \dots\dots\dots(17)$$

今、 $x=l$  で滑りうる条件  $\mu \leq \tan \varphi$  が成り立つとすれば、

$$R_x = \mu \cdot r \cdot d \cdot \cos \varphi \leq r \cdot d \cdot \sin \varphi$$

$$\therefore R_{max} = r \cdot d \cdot \sin \varphi$$

$$\therefore U_x = \frac{r \sin \varphi}{\eta_c} \left( \frac{l x}{3} - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3l} - \frac{x^4}{12l^2} \right) \dots\dots\dots(18)$$

$$\text{或いは } = \frac{r \cdot l^2 \cdot \sin \varphi}{12 \eta_c} \left( \frac{4x}{l} - \frac{6x^2}{l^2} + \frac{4x^3}{l^3} - \frac{x^4}{l^4} \right) \dots\dots\dots(19)$$

$$x/l = m \text{ とすると } U_x = \frac{r \cdot l^2 \cdot \sin \varphi}{12 \eta_c} (4m - 6m^2 + 4m^3 - m^4) \dots\dots\dots(20)$$

### 3-4 H. R. nder GAND によるグライド速度

図-6に示すように積雪底面と地表との境界に厚さ  $\delta$  の粘性境界層を想定してグライド速度を求めた。

積雪の厚さ  $d$  (m)、密度  $r$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、斜面傾斜  $\varphi$  とするとき、

積雪ブロックによる斜面傾斜方向の応力  $\tau = r \cdot d \sin \varphi$  : ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )

” 直角 ”  $\sigma = r \cdot d \cos \varphi$  : ( ” )

粘性境界層の厚さ  $\delta$  : (m)

” の粘性係数:  $\eta$  ( $\text{kg} \cdot \text{sec}/\text{m}^2$ )

グライド速度:  $V$  ( $\text{m}/\text{sec}$ )

摩擦係数:  $\mu$

今、摩擦抵抗は乾性  $R_1$ 、湿性  $R_2$  の両摩擦抵抗の和とした。

$$\text{即ち, } R_1 = \mu \cdot r \cdot d \cdot \cos \varphi, \quad R_2 = \eta \frac{dV}{dz} = \eta \frac{V}{\delta}$$

$$\text{従って } r \cdot d \cdot \sin \varphi = \mu \cdot r \cdot d \cdot \cos \varphi + \eta \frac{V}{\delta}$$

$$\therefore V = \frac{\delta}{\eta} \cdot r \cdot d (\sin \varphi - \mu \cos \varphi)$$

実験では  $r \cdot d = 200 \text{ kg/m}^2$ ,  $\delta = 0.8 \times 10^{-2} \text{ m}$ ,

$\eta = 10^4 \sim 10^7 \text{ kg} \cdot \text{sec/m}^2$ ,

$\mu = 0.27 \sim 0.6$  程度の値で実測結果を検討し

ている。

### 3-5 斜面の摩擦係数の変化

これまで得た夫々のグライド誘導式に示すように、摩擦係数によってグライドの大きさが大きく変わることが分る。実際の山地では地表の凹凸や植生の種類、その起伏度、或いは表土の粗滑などが摩擦係数を決める要素になるが、冬季間の摩擦係数は必ずしも一定の値を保持しない。これまでの実験結果から斜面積雪と地表間の摩擦がどんな原因で減少するか、即ち雪崩が発生し易くなるか検討した。

#### i) 積雪深が増加した場合

積雪荷重が増加するにつれ、地表の凹凸が平滑化し、また灌木、笹、カヤ、ヨシ、雑草など植生が倒伏して摩擦係数は減少する。反面、積雪層が厚くなるので積雪表面の融水が底面まで浸透することを妨げる。従って積雪の増加は、摩擦の増加、減少の両面を考慮しなければならない。

#### ii) 積雪の全層が湿雪化した場合

一般に積雪全層がザラメ雪化した場合、積雪の透水性が良くなり表面の融解水は地表に到達し易くなる。また地表の草、笹、灌木などと積雪との結び付きをゆるめることなど考えると湿雪化は摩擦係数を減少する主因とみられる。

湿雪化を促進する条件は、気温の上昇、南風の卓越、日射、降雨など融雪に必要な気象条件があげられる。

なお、摩擦係数の変化とは無関係に、湿雪化は積雪自身の破壊強度を減少することで、雪崩が発生し易くなる点も留意しなければならない。

#### iii) クラックの発生にもとづく場合

グライドの増加につれ斜面中にクラックが発生した場合、或いは吹き払いのため地表露出面がある場合、この部分から融雪水、雨水が浸透し地表摩擦を低下させ雪崩発生を促進する。

#### iv) 地熱の伝達による積雪底面の融解が促進される場合

積雪期の初期はまだ大地の表面温度が高く、積雪底面の融解がさかんで摩擦係数は小さいと見なければならぬ。グライド速度の実測値も初期ほど大きかった。やがて積雪により大地が冷却すると融解は殆んど停止し、摩擦は増大する。地熱の供給は表土の熱伝導率に左右され、含水性の土質は、水分を介して地中からの熱伝達がさかんである。このため湿潤を保つ地面では、積雪底面の融解が大きく摩擦も小さい。一方透水性の良い砂質土は融解水の介在がなく摩擦は一般に大きい。

滑らかな岩肌の斜面が大きなグライド量を示す例は、岩自体が摩擦係数の小さい点を別として、融解水

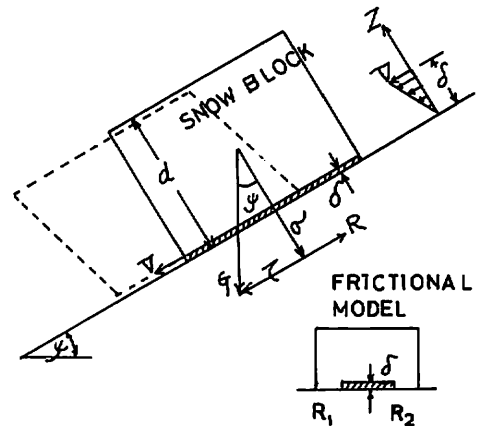


図-6 グライドと摩擦の模型  
Fig.6 Snow gliding and friction model

が岩の表面のみに沿って流れるため摩擦が小さい。この場合は地熱の供給による融雪水はさほど期待できない。

以上述べたように斜面の摩擦係数は、融雪水の浸透が主原因で減衰する。全層なだれが発生するためには周囲の積雪の支持が失われることよりも、先ず  $\mu \leq \tan \varphi + C$  の条件が先行しなければならない。

雪崩発生源の摩擦係数の減少によりグライドが発生し、グライドを阻止する地点に斜面雪圧が作用する。

斜面雪圧が阻止点の積雪破壊強度を超えたとき、雪層が剪断し雪崩に発展する。或いは阻止点の地表摩擦抵抗に打ちかって全層なだれを惹き起こす。

その際、雪崩発生に寄与するグライド速度の大きさは、その絶対値だけでは判断できない。既にのべたように積雪の構造条件を合わせて検討しなければならない。

### Ⅲ グライド測定による雪崩の予知

#### 1 人工斜面によるグライド速度の測定

全層なだれについては、斜面のグライド測定から雪崩を予知する方法が現段階では最も信頼性が高いと推定されるため、人工斜面を設け、このグライド量を検知し、周辺山間部で発生した雪崩との相関を調べた。既に記したように斜面中の局部的なグライドを測定しても、斜面の一部にクラックの発生をみただけで必ずしも雪崩に進展するとは限らない。

この試験では斜面に6点のグライドメーターを設け、斜面全体の積雪の動きを観測することにより、雪崩が発生し易いかどうかを判定するめやすとした。

人工斜面は自然地形と異なり均一な摩擦係数をもつため、グライドの増減はかなり正確に測定することができた。

#### 2 人工斜面設備

傾斜  $15^\circ$ 、斜面長  $20\text{ m}$ 、幅  $5\text{ m}$ 、表面は長尺鉄板ばりで裏側に厚さ  $5\text{ cm}$  の断熱板をはり、裏面から外気による影響を防止した。

斜面の下端は擁壁の役目を果たすコンクリート製スノーシェッドを設け、斜面の積雪の滑りを阻止した。斜面両側は高さ  $1\text{ m}$  余の側壁を設け、積雪の増加に伴う側面へのはり出しを防止した（写真-1 参照）。

山地は  $35^\circ \sim 45^\circ$  の傾斜をもつ場合もっとも雪崩発生頻度が大きい。人工斜面の場合、山地の斜面に比べ著しく小さな摩擦係数が想定され、人工斜面の傾斜を山地なみの急傾斜にすると早期に雪崩を起こし易く、測定設備を破壊してその後の測定に支障する恐れがある。このため  $15^\circ$  の緩傾斜を選んだ。

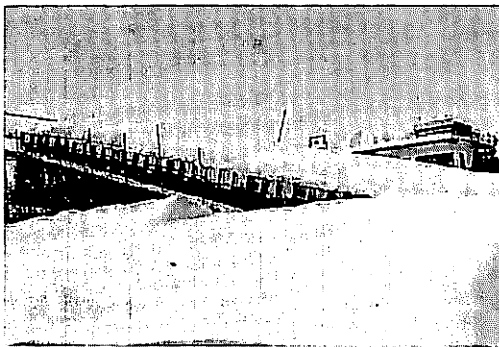


写真-1 人工斜面  
Photo 1 artificial slope

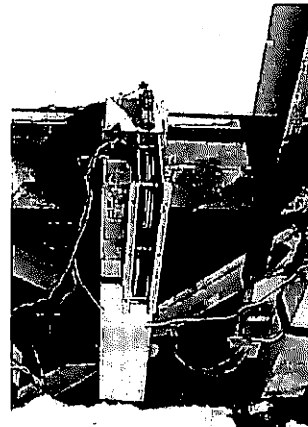


写真-2  
グライドメーター  
発信部  
Photo 2  
glidometer  
emitter

### 3 グライド測定設備

人工斜面の上端に写真-2に示すように6点のグライドメーター用発信器を取り付け、発信器のドラムに巻きこんだビニロン製釣糸を斜面上に繰出し、先端にフロート（測定片の仮称）を結びつけた。

フロートは試作した木製円盤で長径20cm、短径15cm、厚さ5cm、直接斜面上におき積雪底面の滑動と共に移動する。フロートは防湿の目的で表面からパラフィンを含浸させ、上面は積雪との間のスリップを防ぐため2枚の弓形の刃をとりつけた。

フロートは斜面の上端から傾斜線にそって3m間隔で配置した。

発信器は繰出し糸を巻きこんだドラムと、これに連なる歯車機構、ドラム一回転毎に4回断続するリードスイッチ機構などから成り立つ。フロート0.5cm移動毎に1回のパルスを発信、3ビットのD-Aコンバーター使用により、6点のグライド量を2ペンレコーダーに記録させた。

記録紙の速度は常時6cm/Hとし、特にグライドの変化がはげしい場合は夫々に対応した速度を採った。

### 4 斜面のグライド測定結果

人工斜面の6点のグライド測定結果を表-6に示した。表中の数値は各点のグライド日量をカウント数で示したもので、1カウントはフロート0.5cmの移動距離に相当する。なおグライドメーターの記録紙から、数日間かかって1カウントを完了する状況が見られる。即ち0.5cmの移動に数日間を要した場合、最初発信をうけた時刻に1/2カウント、発信が完了した時刻に1/2カウント夫々測定したものととして取扱った。例えば1カウント3日間を要した場合、日量を1/3カウントとして取扱った方が妥当であるが、本文では1/2カウントの微小な移動量を対象としないため上記の取扱いを採った。

斜面における各測点は斜面にそって3m間隔に配置したので、最下端No.1は擁壁から上方3mの位置、最上端No.6は上端から2m下方に位置する。

表-6に示すように測定を開始してから2月中旬頃まで各点のグライドは下端のNo.1を除き、ほぼ同程度の変位量を示している。この頃まで斜面積雪の大部分は一様な滑りを示し、擁壁による圧縮応力の影響をうけなかったと見られる。但し下端のNo.1は既に圧縮圏内にあるため小さなグライドを示したものと考えられる。2月下旬頃から斜面の上方向グライド速度が大きくなり、斜面全体が一つの圧縮圏を形成したことが窺われた。

今回の測定で注目された点は、各点のグライドがそろって検知された時期と、殆んど検知されない時期とが、かなり明確に見分けられたことである。グライドが各点ともに大きい期間は、斜面全体の積雪が極めて不安定であることを示す。従ってこの期間内は雪崩の発生頻度が当然、大きいことが推定できる。

また、3月に入ってから各点のグライドが連日検知され、グライド零の日が見られなくなったことから、所謂底なだれのシーズンの到来を裏づけたものと言えよう。

なお、斜面積雪の日平均グライド速度（各測点の算術平均）を表中の右端に示した。

表-6 人工斜面のグライド日量（カウント） $0^h \sim 24^h$   
Table 6 Daily counts of glide on the artificial slope

年 月 日	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	平均グライド 速度 cm/day
52. 1. 10	49.5	49.5	48.5	49.5	53.5	49.5	25.0
11							不明(約36.0)
12	18.5	19.5 + $\alpha$	16 + $\alpha$	15 + $\alpha$	19 + $\alpha$	14.5 + $\alpha$	9.5 + $\alpha$
13	0	0	0	0.5	0	0	0

年 月 日	No 1	No 2	No 3	No 4	No 5	No 6	平均グライド 速度 cm/day
52. 1. 14	0	0	0.5	0	0.5	0	0.1
15	0.5	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0
17	0.5	1	0	0.5	0.5	0.5	0.3
18	0.5	0	0.5	0	0	0	0.1
19	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0
23	0.5	0	0	0.5	0	0	0.1
24	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0
26	1.5	12.0	11.0	10.5	7.0	9.0	4.3
27	17.0	27.0	27.5	26.5	26.5	21.0	12.1
28	14.0	12.5	13.0	12.5	13.0	9.0	6.2
29	0.5	0.5	0	0.5	0.5	0	0.2
30	0.5	0	0	0	0.5	0.5	0.1
31	0	0	0	0	0	0	0
52. 2. 1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0.5	0	0	0.5	0.1
3	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0.2
4	0	0	0	0	0	0	0
5	0.5	0	0	0	0.5	0	0.1
6	0.5	0.5	0	0	0.5	0.5	0.2
7	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0.5	0
10	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0
12	0	1.0	1.5	2.0	2.0	0	0.5
13	1.0	5.0	3.0	1.0	1.5	4.5	1.3
14	0	13.0	9.0	4.0	6.0	24.5	4.7
15	13.5	14.5	14.0	16.0	14.0	12.0	7.0
16	0.5	0	0	0	0.5	0.5	0.1
17	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0.5	0	0.5	0	0	0.1
20	0.5	0.5	1.8	0.5	0.5	0.5	0.3
21	2.0	4.0	5.0	5.0	4.5	4.5	2.1
22	0.5	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5	0.3
23	1.0	0.5	0	0.5	0.5	1.0	0.3
24	3.0	4.0	4.0	4.0	4.5	7.0	2.2

年 月 日	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	平均グライド 速度 cm/day
52. 2. 25	3.0	3.5	3.0	3.5	4.5	4.5	1.8
26	故障	0	0	0	15.0	14.5	2.5 + $\alpha$
27	0.5	1.0	3.0	5.0	14.0	13.5	3.1
28	0.5	3.0	3.0	11.5	11.5	9.5	3.3
52. 3. 1	1.0	3.0	3.0	7.0	12.0	6.0	2.7
2	0	0	0	11.0	11.0	7.5	2.5
3	0	0	6.0	10.5	12.5	11.0	3.3
4	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	不 明	不 明	不 明	不 明
7	3.5	0	1.0	1.0	1.5	1.0	0.7
8	0.5	1.0	1.0	4.5	5.5	3.0	1.3
9	1.0	1.0	0	6.0	6.5	4.0	1.5
10	0	3.5	0	6.0	8.5	8.5	2.2
11	0	2.0	2.0	7.0	13.0	3.5	2.3
12	0	0	0	5.0	8.5	5.0	1.5
13	0	2.0	1.0	6.0	11.0	2.0	1.8
以 下 略							

このようにグライドの日量の変動から雪崩発生との関連が推定できるので、更に詳細な時間量を用いれば、24 時間中の斜面の動態を早期に把握でき、雪崩の予知に好都合である。使用したグライドメーターは 6ヶ所の測定中のグライドを常時記録しているので、グライドの時間量からこの冬発生した雪崩事故例との関連を検討した。

表-7 に特にグライド量の顕著だった期間の時間量を示した。表中の値は 6 点のグライド量(カウント表示)の合計値を示す。空欄はグライド零を示す。

表-7 グライド時間量(6点の合計カウント)  
Table 7 An hour counts of glide velocity

時刻 月日	0~	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1. 25																									
26													1.5	0.5	0.5	1.0	4.5	3.5	6.0	7.0	6.5	5.5	5.5	5.0	3.5
27	4.0	3.5	3.5	2.5	3.5	3.0	2.0	1.0	6.0	11.0	13.0	11.0	9.0	11.0	9.5	10.0	9.0	5.5	5.5	5.0	3.0	4.0	5.5	3.5	
28	4.0	3.0	1.0	2.0	3.0	3.5	2.0	1.5	2.5	3.0	3.0	4.0	6.5	8.0	5.5	5.5	2.0	6.0	3.0	1.5	1.5	0.5	1.0	1.5	
29		1.0									0.5											0.5			
2. 12																1.5		1.0	0.5	0.5	1.0	1.0	0.5	0.5	
13	0.5	1.0													1.0	1.5	1.5	1.0	2.5	1.0	1.5	1.5	1.5	2.5	
14	1.0	2.5	3.0	2.0	2.0	3.0	2.0	2.0	1.5	2.5	1.5	1.0	1.5	2.5	1.5	0.5	1.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.0	4.5	4.0	
15	5.0	6.0	3.0	4.5	2.0	4.0	1.0	2.5	4.0	5.5	4.5	5.0	3.5	4.5	5.0	4.5	5.0	1.5	4.5	1.0	4.5	0.5	1.0	3.0	
16		1.0																0.5							

時刻 月日	0~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
2. 19																							1.0	
20								0.5		1.0					1.0		1.0							
21	0.5	0.5	1.0	0.5	1.0			0.5		0.5	0.5	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0	2.0	2.0	2.0	3.0	1.0	0.5	3.0	0.5
22	1.5		0.5			0.5								1.0				0.5						
23											0.5									1.0	0.5	0.5	0.5	0.5

表に用いた斜面中の6点の合計値が、斜面の平均的グライドを示すかどうかの判別は、各測定片のグライド実測結果はば一樣な値かまたは上方から下方へ減衰するものが多く、特に局地的に滑りが集中する例は見られなかったことから判断した。従ってこの合計値は斜面の平均的のグライド即ち斜面積雪の動態、或いは不安定さを表わす指標とみることができる。

### 5 グライド時間量と雪崩発生例

実験期間中にたまたま発生した雪崩による事故例3ヶ所との関連を図-7に示した。

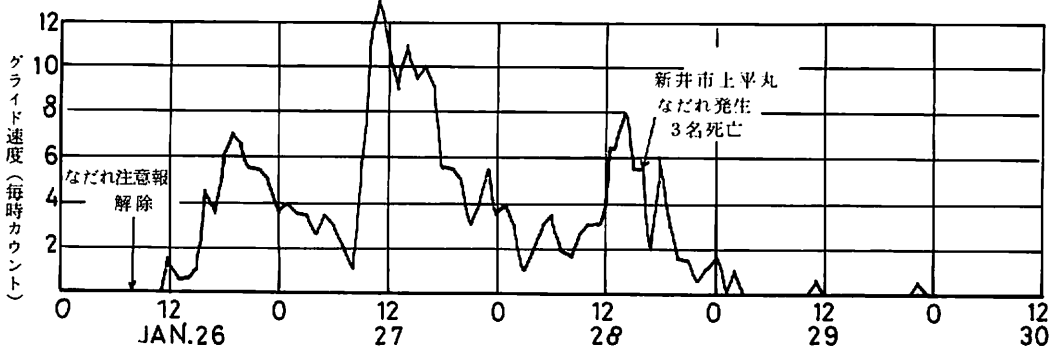


図-7-1 例1 グライド速度、時間量の変化と雪崩発生の相関

Fig.7-1 Example 1. Correlations between the glide velocity(an hour) and the occurrence of avalanche

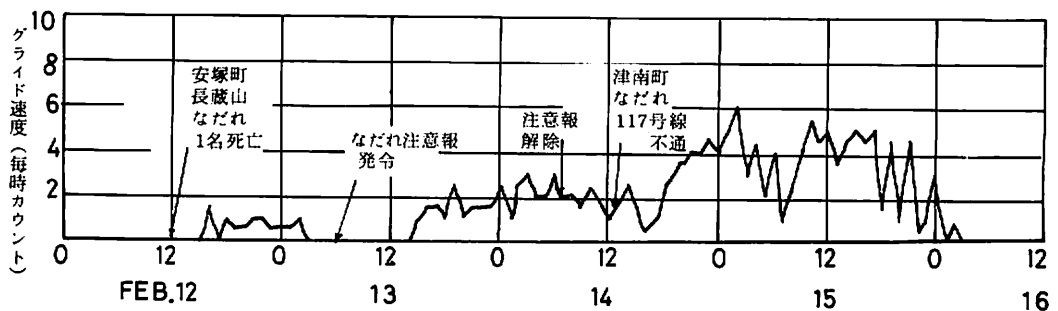


図-7-2 例2 Fig.7-2 Example 2.

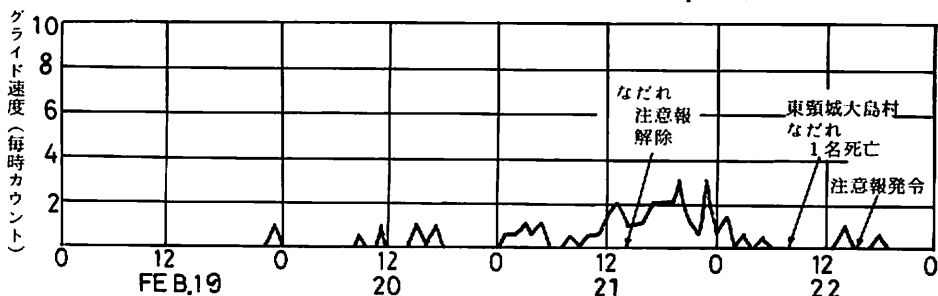


図-7-3 例3 Fig.7-3 Example 3.



### 例 1

1月26日11時頃から、それまで十数日間全くグラライドを検知しなかった人工斜面が、はげしいグラライドを示し始めた。雪崩注意報は26日7時45分既に解除されていた。夜間から翌朝8時頃までグラライドは一旦減衰し、更に27日、28日両日ともに午後大きな値を示した。グラライド検知のカウンタ数は27日11時の13をピークに28日も同様な変動を示し29日3時以降殆んど検知されていない。

新井市上平丸の雪崩事故（28日15時30分全層なだれにより作業中の人夫3名死亡）は、人工斜面が3日間極めてはげしいグラライド量を示したその最終日に発生した。従って26日16時頃はこの異常なグラライド量から斜面が極めて危険であるという兆候を検知でき、この場合は雪崩予知が可能であったと言えよう。事故発生場所は実験地から数十キロはなれ、積雪条件も多少異なる地域であったが、たまたまグラライドによる予知が適中した事例である。

### 例 2

図-7-2に示す。全くグラライドの検知が示されない時点で安塚町長蔵山で1名雪崩事故死が発生した。山中で狩猟中の雪崩遭遇であり、この場合はグラライド検知とは無関係で全く予知できない例となる。この事故から3時間ほど経てグラライドが検知され始め約10時間余り続いている。人工斜面の緩傾斜による影響が急斜面の場合に適應できるか検討しなければならない。

14日12時50分頃津南町で全層なだれが発生し国道117号線が完全に閉鎖された。人身事故はなかったがこの場合は図から分かるようにグラライドの検知期間中のできごとで、予知の可能性はあると見なければならぬ。

### 例 3

2月22日 東頸城郡大島村で発生した雪崩事故（8時15分 県道大平地区を通行中遭遇、埋没し1名死亡）の例では、22日朝までグラライドが減衰し全く検知しなくなった時点で発生した。この場合も雪崩注意報は解除中のできごとである。グラライドの面から見れば前日まで激しい変動を示したが当日は既に検知されず雪崩発生は予知できないことになる。ここで地域差による気象変動のずれを考えれば、例えばグラライドが激しかった時間帯から一日程度の猶予を採ることにすれば、予知の可能性がでてこよう。

このように実験期間中にたまたま発生した雪崩事故は2例ともグラライド量の検知期間に含まれている。

これらの例にあげた雪崩は、各地域の山地で発生した数多くの雪崩の中のごく僅かな例にすぎない。

このためグラライド量が検知できた時間帯と、各地で発生した雪崩件数との相関を検討してみる必要がある。

今実験地の気象条件とグラライドの平均値及び雪崩発生件数をあわせて表-8に示した。表中の雪崩発生件数は新潟県内各土木事務所できとまとめたもので（資料提供先は防災センター長岡雪害研）、雪崩の種類が表層か全層かは判別できない。又、県内広域にまたがり、気象、積雪条件も同一でない。対象は主として道路沿いの斜面に限定されるので、実験地の人工斜面のグラライドとは必ずしも対応しないと考えられた。しかし表中に示すようにグラライド量の多い日に雪崩発生件数が多いという傾向は得られた。今後は地域を限定し、また全層、表層を区別して雪崩発生件数を調査し、その対応を検討する必要がある。

## 6 全層雪崩予知についての可能性

本実験は人工斜面の平均グラライド量が大きくなった場合、雪崩の発生頻度が大きくなるという想定にもとづいて行った。またグラライドを検知し始めてから数時間以内に雪崩発生を予知しようと試みた。

実験結果、県内で発生した雪崩事故と人工斜面のグライト量との間に密接な関連性があることが確かめ

表-8 測定結果

Table 8 Correlations between the glide velocity and the occurrence of avalanche

月日	気温		降雪深	積雪深	平均グライド	雪崩発生件数	なだれによる災害	雪崩注意報
	最高	最低						
1. 24	-1.9	4.1	17.5	173	0	3		
25	3.9	-11.4	17.5	179	0	7		18h40m 発令
26	2.1	-1.0	0	162	4.25	1		7h45m 解除
27	4.4	-2.2	9	162	12.1	15		
28	-1.1	-4.2	27.5	183	6.2	6	15h 新井市平丸, 作業中3名死亡	
29	-0.6	-4.3	59.0	217	0.2	5	8h 国道17号, 交通止(表層なだれ)	
30	-2.2	-8.3	33.0	219	0.1	0		
2. 11	-1.1	-5.6	(15.0)		0	1		
12	3.0	-7.7	20.0	256	0.54	2	12h 安塚町, 狩猟中死亡1名	
13	7.0	-1.0	(0)		1.33	1		6h30m 発令
14	2.6	-1.0	0	225	4.71	10	12h50m 国道117号(津南町) 交通止	7h 解除
15	2.0	-4.2	9.0	228	7.0	23		
16	2.0	-10.9	4.0	221	0.1	5		
2. 20	5.9	-9.8	(6.0)		0.3	8		発令中
21	3.2	-2.2	6.5	240	2.1	6		14h10m 解除
22	-0.5	-8.0	39.5	275	0.3	9	8h 15m 東頸城郡大島村県道通行人1人死亡	16h30m 発令
23	3.7	-	19.5	273	0.3	17		"
24	6.4	-	13.0	269	2.2	10	14°30' 県道(中魚沼) 不通	"
25	8.0	-	0	243	1.8	25		

られた。また1例を除き、雪崩発生前に人工斜面のグライドが検知されており、今後予知の可能性を示した。しかし、時間的予知例はまだ少ない。今回の雪崩事故は比較的緩斜面でおきたため、人工斜面のグライドが先行して予知できたとも考えられる。急斜面ではグライド検知以前に雪崩を発生し終っているかも知れない。従って早期に予知するためには人工斜面の傾斜を急にするか検討を要する問題である。

また、グライド速度の絶対値は第1章で述べたように積雪密度の増加と共に小さくなる。このためグライド量検知の精度を高める必要がある。

広い区域を対象に予知しようとする、気象、積雪条件がかなり異なってくるので、人工斜面1ヶ所での地域までを対象にするか検討しなければならない。

本研究は昭和52年度、文部省科学研究「雪崩防止施設の設計強度と雪崩予知の研究」によって行われ、その際得られた資料に基づいて本文を作成した。なお、気象条件とグライドについては本文から削除した。

文 献

HAFELI, R., BADER, E. and others (1954): Snow and its metamorphism, SIPRE translation 14 156-175.  
 in der GAND, H.R., ZUPANCIC, M. (1965): Snow gliding and avalanches. International symposium on scientific aspects of snow and ice avalanches. 230-242.  
 中俣三郎(1977): グライドによる雪崩の予知, 第14回自然災害科学総合シンポジウム論文集, 58, 173-174.  
 ——(1962): 斜面積雪・鉄道技術研究所報告, 322, 12-55.  
 中川鶴太郎・神戸博太郎(1970): レオロジー・みすず書房, 121-200.  
 小島賢治(1955-1958): 積雪の粘弾性・低温科学, A 15-17.  
 篠島健二(1962): 雪の粘弾性的取扱ひ・鉄道技術研究所報告, 328, 1-15.