

雪崩の危険度について (その2) —速度・流出距離—

中 俣 三 郎*

Order of the avalanche danger (Part 2) —Velocity, Runout distance—

by

Saburō NAKAMATA

(Abstract)

The characteristics of avalanche at the starting zone were mentioned in Part 1 (Nakamata, 1983).

In this report relates to mechanism of dynamic avalanche mainly to velocity and runout distance.

For fundamental idea we adopted the theory of momentum of avalanche motion, due to Perla (1980).

As a result, we obtained similar velocity $V^2 = (M \cdot \alpha / K) (1 - e^{-2kx/M})$ and runout distance $x = (M / 2K) \ln(1 + KV^2 / M\alpha_2)$.

But, it is important to decide these factors M , K , α which are contained in the equation.

On account of determination α and K , it is necessary to estimate the value of Coef. of Kinetic friction μ_k and to research the drag resistance KV^2 .

For full depth avalanche we set $\mu_k \geq 0.5$, for powder avalanche $\mu_k = 0.1 \sim 0.3$.

For the drag resistance we applied the measured values of impact pressure $f = (3 \sim 6.9) \rho V^2$.

Using these results, we adopted to the case study of avalanche that is occurred at Sumon in 1981.

We obtained reasonable results for the most parts

I は じ め に

雪崩の危険度について、研究年報4号に主として雪崩発生源の条件について述べたが、実際に発生した雪崩がどの程度の規模をもち、どこまで到達するか、またどのような破壊力をもつか等知る必要がある。

これまで雪崩の到達度については、見透し角(雪崩停止点から発生点を見透す仰角)の実測例から、表層雪崩は18°程度、全層雪崩は20°~23°程度が限界と説明してきた。

この値は鉄道や道路関係を対象として得た統計値であり、対象が斜面中腹を横切る道や、山麓を切り取った道などに見られるように、必ずしも自然地形そのものから得られた値でない。従って到達度は少なめに表現されている恐れもある。殊に雪崩末端の地形が緩傾斜、平坦地、あるいは逆傾斜であるかの差により、かなり到達度が異なることが想定される。

雪崩地形で防災対象がその到達範囲内にあるかどうか、判定することはかなり難しい問題であり、地形条件はもとより、発生雪崩の種類、規模、速度など知る必要がある。そのため雪崩について運動機構を究明することで、危険度の判定資料にしたい。

* 新潟大学積雪地域災害研究センター

Ⅱ 雪崩の規模

雪崩の規模は発生源における位置のエネルギーと崩落する雪量によって決まる。高い位置から大量の積雪がなだれるほど規模が増大する。一般に10を底とする対数で示し、雪崩のマグネチュードとする。

$$\log E = \log (g \cdot M \cdot H) \doteq 1 + \log M + \log H + \dots \dots \dots (1) \text{式}$$

E : 雪崩規模を示すマグネチュード

g : 重力定数 (9.8 m/s²)

M : 雪崩運動に参加する積雪の全質量 (ton)

H : 雪崩発生源と堆積地との高度差 (m)

M は点発生表層なだれのように発生源の雪量は僅かでも走行中に次第に増加する例もあり、発生源の雪崩量と走路に加わる雪崩量の和で示す。

我が国の場合、雪崩災害地が比較的高度の低い山間部に多く、マグネチュードの値で2～7程度であるが、今後、高海拔のスキー場造成、本州横断道の開発などに伴って規模の大きい雪崩との遭遇も考えなくてはならない。

表-1 雪崩の規模例
Table.1 Example of the avalanche magnetude.

発生日	場 所	高低差 (m)	雪崩量 (m ³)	マグネチュード
1981. 1. 7	新潟県北魚沼郡 守門村大倉	3 × 10 ²	約 10 ⁵ , (2 × 10 ⁴ ton)	7
1981. 1. 18	同 上 湯之谷村下折立	1.2 × 10 ²	約 10 ⁴ , (3 × 10 ³ ton)	6
1962. 1.	チリー サンタバレー氷河雪崩			11

Ⅲ 雪崩の運動

1. 雪崩の速度

斜面上の積雪は地面の摩擦や周囲の安定した積雪に支持されているが、この支持力が低下すると滑落を初め雪崩となる。

運動中の雪崩流は、先端で表層の積雪を破碎しながら進み、底面の境界では摩擦抵抗、表面大気との接触境界では空気抵抗に、夫々打ちかかって逐次加速していく。

やがてこれらの抵抗と釣合う速度に到達する。その際の運動の式は一般に(2)式で示される。

$$d(M \cdot V) / dt = F - R \dots \dots \dots (2) \text{式}$$

ここで M : 雪崩質量 (kg), F : 雪崩の推進力 (N), R : 阻止抵抗 (N), V : 雪崩の速度 (m/s), t : 時間 (s)。

いま、雪崩流底面の動摩擦係数を μ_k , 斜面傾斜角度を θ とすると推進力は(3)式で示される。

$$F = M \cdot \alpha = M \cdot g (\sin \theta - \mu_k \cos \theta) \dots \dots \dots (N) \dots \dots \dots (3) \text{式}$$

阻止抵抗 R を空気抵抗 R_a と雪崩先端にはたらく衝撃抵抗 R_p の和で表わす。

R_a, R_p は夫々雪崩の速度の自乗に比例する係数 k_a, k_p を用いれば (詳細は次項),

$$R = R_a + R_p = (K_a + K_p) V^2 = KV^2$$

$$(2) \text{式は } d(M \cdot V) / dt = M \cdot \alpha - KV^2$$

いま斜面に沿う距離を x とすると

$$(M \cdot V) dV / dx = M \cdot \alpha - KV^2 \quad \therefore \frac{-2KV}{M\alpha - KV^2}, \quad \frac{dV}{dx} = \frac{-2K}{M} \dots \dots \dots (4) \text{式}$$

(4) 式を積分し, $x = 0$ で $V = 0$ の条件から,

$$\ln (M\alpha - KV^2) = \frac{-2K \cdot x}{M} + \ln M \cdot \alpha$$

$$\therefore \ln (1 - KV^2 / M \cdot \alpha) = -2K \cdot x / M$$

$$\therefore KV^2 / M \cdot \alpha = (1 - e^{-2Kx/M})$$

$$\therefore V = [M \cdot \alpha / K (1 - e^{-2Kx/M})]^{1/2} \dots \dots \dots (5) \text{式}$$

$$\text{従って } V_{\max} = (M\alpha / K)^{1/2} \dots \dots \dots (6) \text{式}$$

$$\text{また } V = V_{\max} (1 - e^{-2Kx/M})^{1/2} \dots \dots \dots (5)' \text{式}$$

$$x = M / 2K \ln (M\alpha / M\alpha - KV^2) \dots \dots \dots (7) \text{式}$$

2. 阻止抵抗

雪崩運動を阻止する抵抗は, 底面の摩擦抵抗, 空気抵抗, 衝撃抵抗でこれらについて検討する。

(1) 摩擦抵抗

(3) 式の推進力 F の中に含んで取扱った。雪崩の動摩擦係数 μ_k は Voellmy や Shaerer によって夫々次式が提言されている。

また米国林野局でも粉雪崩や湿雪雪崩は $\mu_k = 0.1$ 程度が適当で, 一般的な雪崩では上部で 0.15 ~ 0.2, 末端部で 0.5 程度の値を推している。(ρ は雪崩流の密度 kg/m^3)

我が国の全層雪崩 (融雪期発生) に対しては, 諸測定例から 0.4 ~ 0.8 の広い範囲が見られるが, 平均的な値は 0.5 ~ 0.6 程度が適当と思われる。空中写真の判読結果では 0.6 ~ 0.7 程度が提案されている。

表層なだれに対しては実測例が少ないため $\rho / 1,000 \sim \rho / 2,000$ を参考にしたい。

一般に災害を伴う雪崩は, 融雪期に例年の如く常習的に発生する底なだれと異なり, 1 ~ 2 月の雪の最も多い時期に稀に発生する雪崩である。この頃発生する雪崩は全層雪崩の場合, 融雪期のものと比較してしまり雪の構成が主体となり μ_k の値は小さいことが想定される。従って安全のため 0.3 前後の値の適用が望ましい。

今 $\mu_k = 0$ から 0.5 までの α と傾斜角度の関係を図 - 1 に示した。この範囲内では次式が近似的に成立つ。

$$\alpha = g (\sin \theta - \mu_k \cos \theta) \doteq (\theta - 55 \mu_k) \times 0.17 \dots \dots \dots (8) \text{式}$$

雪崩の推進力がなくなる傾斜は

$$\alpha = g \cos \theta (\tan \theta - \mu_k) = 0 \text{ から } \tan \theta < \mu_k$$

によって求める。

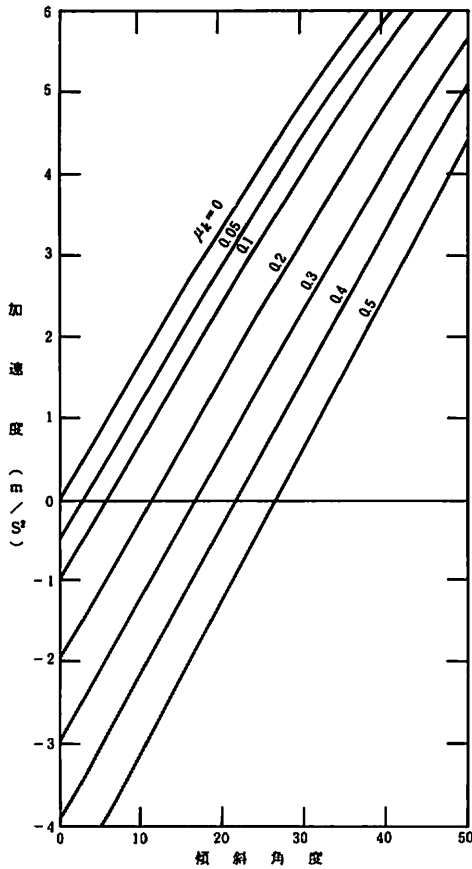


図-1 傾斜別加速度

Fig.1 Variation of acceleration as a function of slope angle.

$\mu_k = 0.8$	$\theta \leq 38.7^\circ$
0.5	$\theta \leq 26.6$
0.3	$\theta \leq 16.7$
0.1	$\theta \leq 5.7$

μ_k の値は後記の雪崩到達距離に大きな影響を与える点からその取り扱いには慎重でありたい。

(2) 空気抵抗 R_a

$$R_a = K_a V^2 = \frac{1}{2} C_D \cdot S_1 \rho_a V^2 \dots (N) \dots (9) \text{式}$$

ここで S_1 : 流れに垂直な面への投影面積 (あるいは空気抵抗の作用面積) ... (㎡)

ρ_a : 空気の密度 $\approx 1 \text{ kg/m}^3$

C_D : レイノルズ数 (Re) の関数

$$Re = (\text{慣性力}) / (\text{粘性抵抗}) = \rho_a \cdot V \cdot L / \delta$$

で示され、空気の動粘度 (δ) は 0°C で $1.322 \times 10^{-5} \text{ (m}^2/\text{s)}$ か $Re = 7.56 V \cdot L \times 10^4$ となり、雪崩先端の形状や速度から $Re = 10^5 \sim 10^7$ 程度の大きな値が考えられることから、 $0.3 < C_D < 1$ が適用される。

$$\begin{aligned} \text{従って } R_a &= K_a V^2 = \frac{1}{2} C_D \cdot S_1 \cdot \rho_a V^2 \\ &= \frac{1}{2} (0.3 \sim 1) \times S_1 \times 1 \times V^2 \\ &= (0.15 \sim 0.5) S_1 V^2 \dots (N) \dots (10) \text{式} \end{aligned}$$

$$K_a = (0.15 \sim 0.5) S_1 \dots (kg/m) \dots (11) \text{式}$$

ここで実用上 $R_a = 0.5 S_1 V^2 \dots (10) \text{式}$ を採る。

(3) 衝撃抵抗

雪崩流の先端は早い速度で表層積雪を破砕しながら進む。雪崩運動の形態が流れ型か、煙り型により先端部分は大小の雪塊の集合体か、あるいは一様に圧縮された粉末状の雪で構成される。先端は衝突の繰返しにより、かなり高密度 (0.6前後) であることが推定される。

流れの先端が受ける抵抗は、走路となる表層積雪の強度に左右される。密度の小さい新雪を砕いて進む際の抵抗は小さく、密度の大きい旧雪を走行する際の抵抗は大きい。

雪崩流本体の密度増加は、流れが定常状態である限り考えられず、走路となる表層積雪のみが破壊圧縮を継続する。このことから、種々の密度をもった長い雪塊が、一定の速度で固定板に衝突した時に示される衝撃力を測定すれば、雪崩流先端の衝撃抵抗を示すめやすとなろう。

1956年~57年2冬にわたって104回の実験例から雪塊の衝撃力オシログラムを得た。雪塊の断面積 (45×45cm)、衝突方向の長さ45~225cmを固定した受圧板に衝突させた。速度、6~16m/sの範囲内で実験したオシログラムの代表例を図-2に示す。衝撃力は衝突直後20~30msの短時間 f_{max} で示す鋭い大きな波形を示し、その後衝突が完了するまでの時間、ほぼ一定の波 f_{mean} を示した。

雪崩先端がうける抵抗 R_p はこの f_{mean} に相当するものとした。今 f_{mean} の実測値と流体抵抗

$f_0 = \rho V^2 / g$ の関係を求めるため図-3を示す。X軸は試料の雪密度 ρ を採り Y軸に $P = f_{\text{mean}} / f_0$ の値を採った。

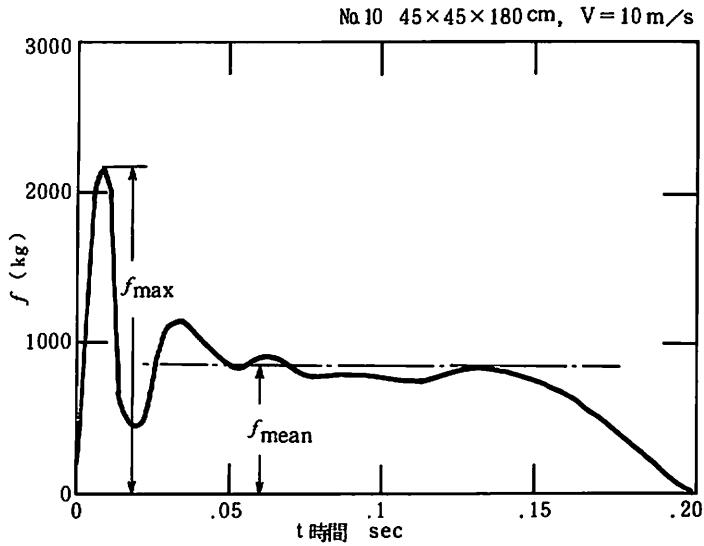


図-2 雪塊の衝撃力
Fig.2 Impact force of snowblock.

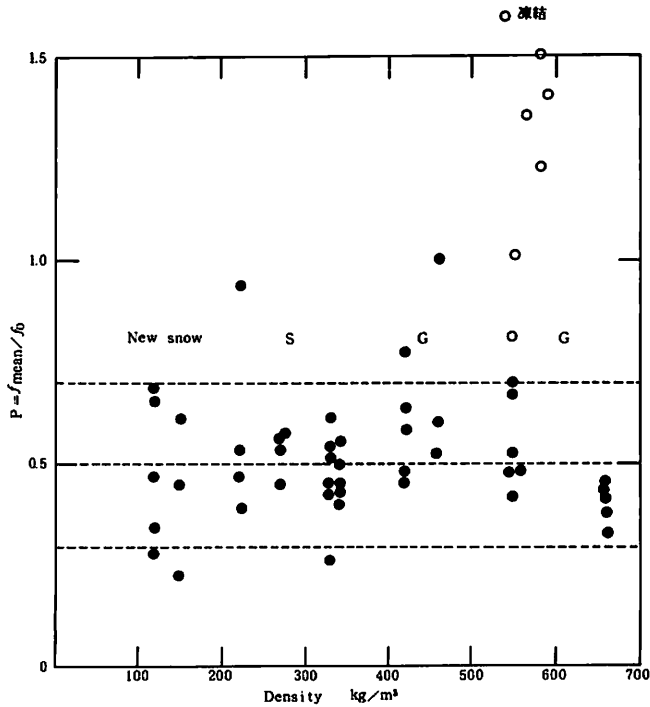


図-3 試料密度と衝撃係数
Fig.3 Dependence of impact ratio on the snow density.

結果、 P (衝撃係数：仮称) は試料密度にかかわらず0.3~0.7の範囲を示した。一部凍結した固い雪塊の場合のみこの範囲を超えるが、新雪、しまり雪、ざらめ雪など雪質による異同は認められない。

$$\text{従って、 } f_{\text{mean}} = P \cdot f_0 = (0.3 \sim 0.7) \rho V^2 / g = (3 \sim 6.9) \rho V^2 \dots \dots (N) \dots \dots (12\text{式})$$

従って雪崩先端の衝突面積を S_2 とすれば、

衝撃抵抗 $R_p = f_{\text{mean}} \times S_2$ で示される。

$$\therefore R_p = (3 \sim 6.9) \rho S_2 V^2 = K_p V^2 \dots \dots (N) \dots \dots (13\text{式})$$

ここで $K_p = (3 \sim 6.9) \rho S_2$ 、 ρ は雪崩によって乱されない自然積雪の密度 (kg/m^3) をとる。

3. 速度誘導式のとまとめ

2項で夫々の阻止抵抗を検討した結果、(2)式の右辺は次のように書きかえられる。

$$\begin{aligned} F - R &= Mg (\sin \theta - \mu_k \cos \theta) - (K_a + K_p) V^2 \\ &= Mg \cos \theta (\tan \theta - \mu_k) - \{ (0.15 \sim 0.5) S_1 + (3 \sim 6.9) S_2 \rho \} V^2 \\ &\doteq Mg \cos \theta (\tan \theta - \mu_k) - (0.5 S_1 + 5 \rho S_2) V^2 \dots \dots (N) \dots \dots (14\text{式}) \end{aligned}$$

ここで M : 雪崩の全質量 (kg)

g : 重力定数 ($9.8 \text{m}/\text{s}^2$)

θ : 斜面の傾斜角度 ($^\circ$)

μ_k : 雪崩流底部境界層の動摩擦係数

S_1 : 空気抵抗が作用する面積 (流れに垂直投影) \dots (m^2)

S_2 : 雪崩先端の衝突面積 (m^2)

ρ : 走路の積雪密度 (kg/m^3)

(雪崩により乱される前の自然積雪の表層部分)

V : 雪崩の速度 (m/s)

また、 α は(8)式で、 K は(11)、(13)式から夫々次に示される。

$$\alpha = g \cos \theta (\tan \theta - \mu_k)$$

$$K = K_a + K_p = (0.15 \sim 0.5) S_1 + (3 \sim 6.9) S_2 \rho \doteq 0.5 S_1 + 5 \rho S_2 \dots \dots (15\text{式})$$

雪崩の最大速度 V_{max} は次式で示される。

$$V_{\text{max}} = (M\alpha/K)^{1/2} = [Mg \cos \theta (\tan \theta - \mu_k) / (0.5 S_1 + 5 \rho S_2)]^{1/2} \dots \dots (16\text{式})$$

IV 雪崩の到達距離 (流出距離)

雪崩は発生後次第に加速して最大速度に達する。この間の速度、距離の関係は(5)式で示され、 $2K/M$ の値によって加速条件が異なる。最大速度に達した後も斜面の傾斜に対応した異なる値をもつ。

山麓に近づき斜面の傾斜がゆるくなり加速度が負の値をとる位置から制動力のみが働くことになりやがて停止する。今加速度が負になる条件は $\tan \theta \leq \mu_k$ で示され、 $\theta = \tan^{-1} \mu_k$ の点を原点として停止するまでの距離を x_1 とすると(4)式の数値誘導と同様な手順で到達距離 (流出距離) x_1 を求めることができる。

(4)式を積分し、 $x = x_1$ で $V = 0$ の条件を入れることから $C = \ln M\alpha_2 + 2Kx_1/M$

$$\therefore \ln (1 - KV^2/M\alpha_2) = 2K(x_1 - x)/M$$

$x = 0$ における速度を V_0 とすると

$$\ln (1 - KV_0^2/M\alpha_2) = 2Kx_1/M$$

今 α_2 は負の値であるからその絶対値で示すと

$$x_1 = (M/2K) \ln (1 + KV_0^2 / M|\alpha_2|) \dots\dots\dots(17)式$$

もし加速度の消失する位置における速度 V_1 を、そこまでの斜面の平均傾斜 θ に基づく最大速度 V_0 に等しいとすれば、

$$V_1 = (M\alpha_1/K)^{1/2} = [Mg(\sin\theta_1 - \mu_k \cos\theta_1)/K]^{1/2} \dots\dots\dots(18)式$$

但し $\alpha_1 = g \cos\theta_1 (\tan\theta_1 - \mu_k) > 0$

$$\alpha_2 = g \cos\theta_2 (\tan\theta_2 - \mu_k) < 0$$

θ_2 は図-4 に示すように流出区間 ($x=0 \sim x_1$) の平均傾斜度を示す。

この場合、 x_1 は(17)式に(18)式を代入

して得た(19)式で示される。

$$x_1 = (M/2K) \ln (1 + \alpha_1/|\alpha_2|)$$

$$= (M/2K) \ln [1 + \{ \cos\theta_1(\tan\theta_1 - \mu_k) / \cos\theta_2(\tan\theta_2 - \mu_k) \}] \dots\dots(19)式$$

また流出区間が平坦地であるとき

は $\theta_2 = 0$ 、従って

$$x_1 = (M/2K) \ln (1 - \cos\theta_1 + \sin\theta_1/\mu_k) \dots\dots(20)式$$

動摩擦係数 μ_k が0.5より小さい場合、平坦地の流出距離 x_1 は次の近似式で求められる。

$$x_1 \approx M/2K \ln (\theta_1/55 \cdot \mu_k) \dots\dots\dots(20)'式$$

図-5 に $M/K = 10^2$ を採った場合の流出距離 (但し平坦地) を(20)'式に基づき算出した結果を示す。

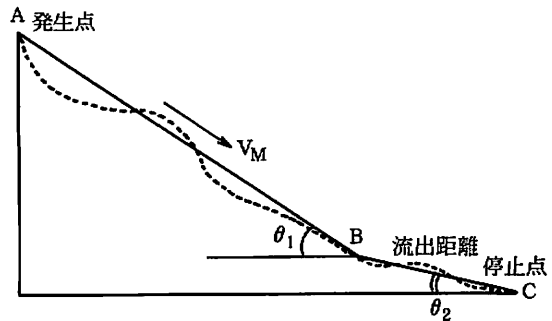


図-4 雪崩走路の縦断面

Fig.4 Vertical section of the Avalanche track.

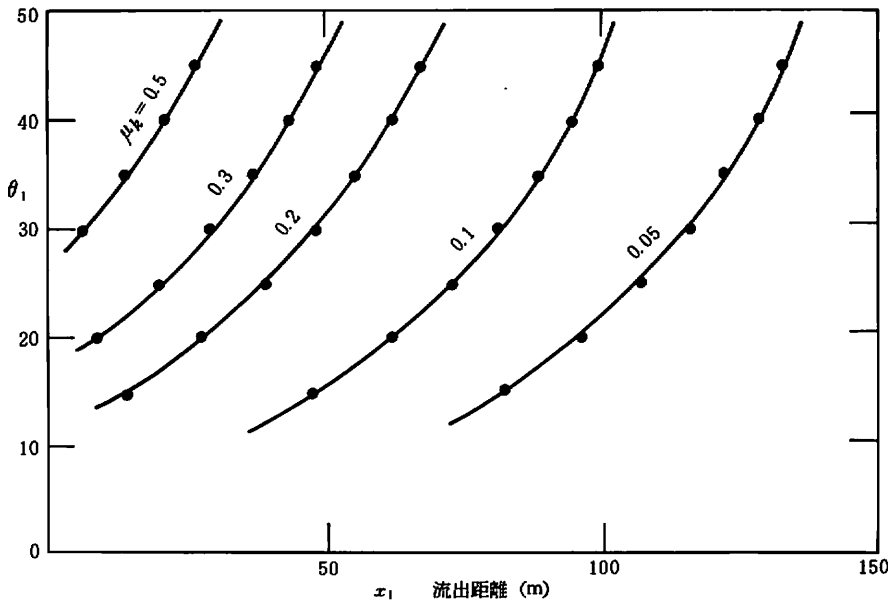


図-5 平坦地の流出距離 $M/K = 10^2$ の場合

Fig.5 Runout distance on the flat.

次に雪崩の流出区間が平坦地か、緩傾斜か、あるいは逆傾斜か、地形条件により流出距離がどの位変わるか検討しよう。流出距離 x_1 は(19)式で示され、雪崩の発生条件が同一で流出区間の傾斜 θ_2 のみが変わった場合を比較すれば良い。

今、守門村大倉で発生した表層なだれの条件を適用すると $\theta_1 = 35^\circ$, $x = 400\text{m}$, $M/K = 329$ (6章参照), $\mu_k = 0.1 \sim 0.3$ として流出区間の傾斜 θ_2 を変えた場合の距離 x は、

- 平坦地 $\theta_2 = 0 \dots\dots x_1 = 292\text{m}$
- 緩傾斜 $\theta_2 = 3^\circ \dots\dots x_2 = 400\text{m}$
- " $\theta_2 = 5^\circ \dots\dots x_3 = 609\text{m}$
- 逆傾斜 $\theta_2 = -3^\circ \dots\dots x_4 = 237\text{m}$
- 同地形で $\mu_k = 0.3$ を適用した場合
- 平坦地 $\theta_2 = 0 \dots\dots x_1 = 121\text{m}$
- 緩傾斜 $\theta_2 = 5^\circ \dots\dots x = 154\text{m}$
- 逆傾斜 $\theta_2 = -5^\circ \dots\dots x = 101\text{m}$

これらの計算結果にみられるように、表層なだれのように動摩擦係数が小さい場合、山麓の緩傾斜の度合が流出距離に大きく影響するが、全層雪崩のように大きな摩擦係数をもつものに対しては差程影響しないことがわかる。

V 見 透 し 角 度

流出距離の算出結果をもとに、これまで一般に用いられている見透し角(雪崩終点から発生点を見透す仰角)を究明する。

図-6に雪崩発生斜面の縦断面 ABC を示す。

A は雪崩発生点、 B は緩傾斜となり加速度が零になる地点、 C は雪崩停止点を示す。 θ_1 は AB 区間の平均傾斜角度、 θ_2 は流出区間(BC)の平均傾斜角度、 \overline{BC} は流出距離 x_1 (m)、 $AD = h$ (発生点と B 点の高度差)、見透し角を α_θ とすると、

$$\begin{aligned} \tan \alpha_\theta &= \frac{AE}{CE} = \frac{AD+DE}{BD+CF} \\ &= \frac{(h+x_1 \sin \theta_2)}{\left(\frac{h}{\tan \theta_1} + x_1 \cos \theta_2\right)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \alpha_\theta &= \tan^{-1} (h+x_1 \sin \theta_2) \\ &\quad / (h/\tan \theta_1 + x_1 \cos \theta_2) \dots\dots(21)式 \end{aligned}$$

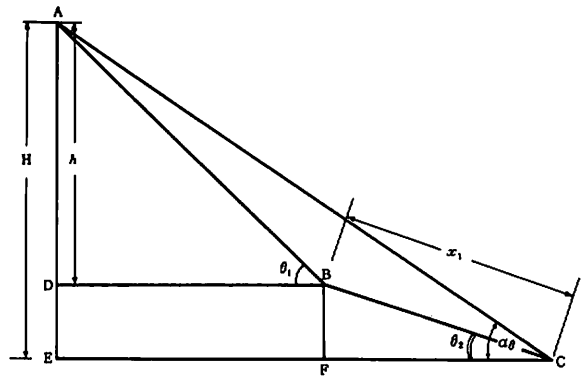


図-6 雪崩の見とおし角
Fig.6 Angle of elevation from the end to the starting point.

前に述べたように加速度が負になる条件は $\theta < \tan^{-1} \mu_k$, 流出区間の傾斜 θ_2 は θ より小さいから、雪崩の動摩擦係数が小さい場合、次の近似から(21)式は更に簡単化され(22)式となる。

$$\begin{aligned} \mu_k < 0.3 \text{ の場合, } \theta_2 < 18.5^\circ \text{ から } \cos \theta_2 > 0.95, \sin \theta_2 < 0.29, h \gg x_1 \sin \theta_2 \\ \therefore h + x_1 \sin \theta_2 &\doteq h, \quad x_1 \cos \theta_2 \doteq x_1 \\ \therefore \tan \alpha_\theta &= 1 / (\cot \theta_1 + x_1/h) \\ \alpha_\theta &= \tan^{-1} 1 / (\cot \theta_1 + x_1/h) \dots\dots(22)式 \end{aligned}$$

また、急斜面から直ぐ平坦地に移る場合は、 μ_k の値に関係なく $\theta_2 = 0$ から、見透し角 α_θ は(2)式と同一結果を得る。

このように雪崩の到達範囲、危険度など判定するための見透し角は、発生点の高度、加速区間の平均傾斜流出距離などから成立していることが分る。そこで見透し角を得るため次の手順が必要となる。

- (1) 雪崩発生点(A)の高度 H を求める。
- (2) 発生する雪崩の種類が表層、全層の何れか、その運動形態が煙り型流れ型の何れをとるか、その発生時期など考慮して動摩擦係数 μ_k を決める。阻止抵抗中の摩擦抵抗の項を参考にする。
- (3) 雪崩走路の縦断図形から $\theta = \tan^{-1} \mu_k$ に相当する位置 B の高度を求める。 A B 間の高度差 h を求める。
- (4) A B 間の平均傾斜 θ_1 を縦断図から求める。
- (5) 雪崩発生源の面積及び雪崩種類、積雪条件などから M/K を推定する。
- (6) B 点から下方、流出区間の平均傾斜 θ_2 を求める。この場合、流失距離により傾斜に差があるとき、 B 点から50m毎の各点 C_1, C_2, C_3, \dots をとり BC_1, BC_2, BC_3, \dots 夫々の傾斜 $\theta_2, \theta_3, \theta_4, \dots$ を求めておく。
 (19)式に θ_2 を適用して得た x_1 が C_1 点を超える場合 θ_3 を適用して x_1 を算出する。このようにあらかじめ θ_2 の大きい条件を入れて x_1 を算出し、以下補正する。
- (7) これらの資料から流出距離 x_1 (19)式による)、最大速度 V_{\max} (6)式)、見透し角 α_θ (2)式)などをうる。

VI 雪崩の M/K の値について

(M/K)は(5)式の数値を求める場合、あるいは(20)式の流出距離を求める場合、共に結果に大きく影響する重要な値である。

M は雪崩の全質量、 K は(15)式に示したように雪崩運動を阻止する空気抵抗及び先端に働く衝撃抵抗にもとづく係数を示す。従って雪崩の発生源面積、雪崩層の厚さ、その平均密度、走路の積雪状況、運動形態などを考慮したものでなければならない。

今簡単な例として図-7に示すように、広い一様な斜面を発生源の雪崩量のみが走行した場合について考えてみよう。但し走路中に加わる雪量は考えないこととする。

走行中の雪崩の形状を仮に図示の $a \times b \times d$ で示し、その平均密度を ρ とすると雪崩質量 M は $a \times b \times d \times \rho$ で示される。 C は積雪表面から露出した雪崩の高さを示す。先に(15)式で $K = (0.15 \sim 0.5) S_1 + (3 \sim 6.9) S_2 \rho_0$ を得ているから、空気抵抗の作用面積 S_1 先端衝撃抵抗の作用面積 S_2 を夫々知れば良い。

$$S_1 = b \times C + a \times b, \quad S_2 = (d - c) b$$

厳密には bc 面と ab 面の抵抗係数は異なることを

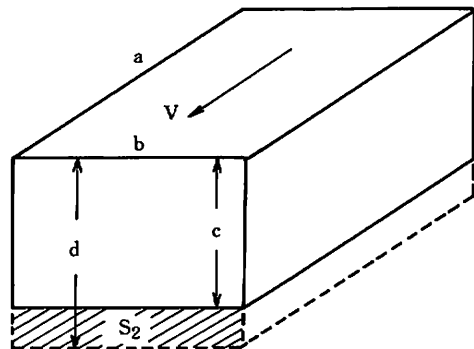


図-7 簡易化した雪崩運動形態
Fig.7 Simplified model of avalanche motion.

考慮しなければならない。

(d-c) は積雪表面下の雪崩部分で、狭い沢に沿って大量の雪崩流が走行するような場合を除き、1 m以下と考えられる。

このように雪崩形状を単純化してみても現実の雪崩に近似できるか、かなり疑問も多い。そこで確実に得られた資料から M/K の値を推定する方法をとってみる。

(4)章に掲げた守門村大倉の表層雪崩で得た信頼性のある資料は、 $\theta_1 = 35^\circ$ 、 $\theta_2 = 3^\circ$ 、 $x_1 = 400\text{m}$ 、 $\mu_k = 0.05 \sim 0.2$ 、これらを(19)、(6)式に夫々代入して次の結果をうる。

$\mu_k = 0.05$ の場合	$M/K = 147$	$\alpha = 5.2 \text{ m/s}^2$	$V_{\max} = 27.6 \text{ m/s}$
= 0.1	= 329	= 4.8	39.7
= 0.15	= 463	= 4.4	45.1
= 0.2	= 602	= 4.0	49.1

この雪崩で崩落した表層部分は平均密度0.17、厚さ1.5~2 mが調査結果判明していることから、 $\mu_k = 0.1 \sim 0.15$ を適用して $M/K \approx 3 \sim 4 \times 10^2$ 程度が求められる。

ここで更に守門の雪崩状況を詳しく調べると、ほぼ図-8に示す型にあてはめることができる。発生源の面積は $8.8 \times 10^4 \text{ m}^2$ 、表層雪崩の厚さは1.5~2.0m、平均密度 170 kg/m^3 、発生量 $V = 8.8 \times 10^4 \times (1.5 \sim 2) = (1.3 \sim 1.8) \times 10^5 \approx 1.5 \times 10^5 \text{ m}^3$ 、発生質量 $M = 1.5 \times 170 \times 10^5 = 2.6 \times 10^7 \text{ kg}$

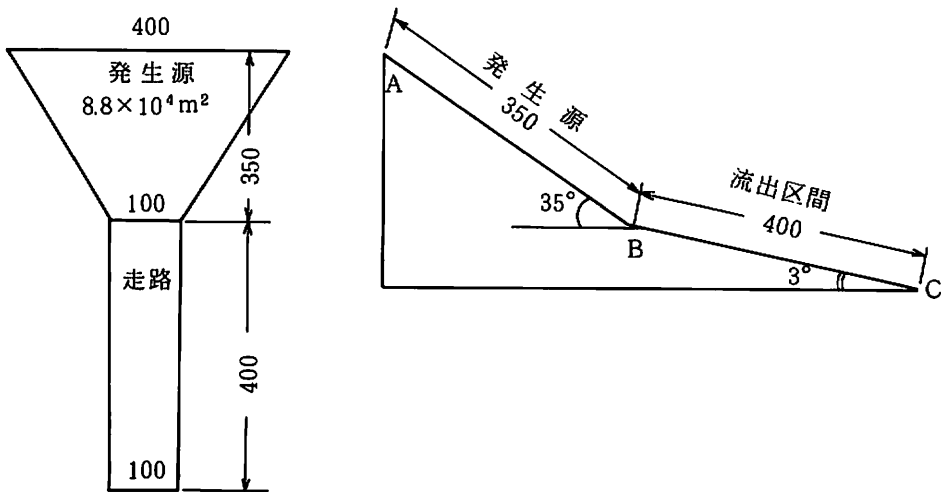


図-8 守門表層なだれの発生形態

Fig.8 The shape of avalanche motion occurred at Sumon.

雪崩の走路幅は約100m、雪崩流の主体は走路の樹木の損傷や附着雪の状況から、積雪表面から約3 mの高さで、流れの底部は表面下約1 m程度と推定された。

従って $c = 3$ 、 $d = 4$ 、 $b = 100$ 、 $S_2 = 1 \times 100 = 100 \text{ m}^2$ 、走路中の雪崩流の長さ a は、流出区間 (BC) に入ってから雪崩量に増減ないものと仮定すると $a = V/b \cdot d \approx 3.8 \times 10^2 \text{ m}$

$$\begin{aligned} \therefore S_1 &= 3.8 \times 10^4 \text{m}^2, \text{従って } k_a = 3.8 \times 10^4 \times (0.15 \sim 0.5) = (0.57 \sim 1.9) \times 10^4 \\ \text{雪崩流の先端が破碎する深さは表層 } 1 \text{ m とした。この部分の平均密度は } \rho &= 120 \text{kg/m}^3, \\ \therefore K_p &= S_2 \times \rho \times (3 \sim 6.9) = 100 \times 120 \times (3 \sim 6.9) = (3.6 \sim 8.4) \times 10^4 \\ K &= K_a + K_p = (4.2 \sim 10.3) \times 10^4 \\ M/K &= 2.6 \times 10^7 / (4.2 \sim 10.3) \times 10^4 = (6.2 \sim 2.5) \times 10^2 \end{aligned}$$

このようにあらかじめ動摩擦係数を決めて算出した M/K の値と雪崩の走行形態を決めて阻止抵抗を適用して得た M/K の値はほぼ同じ階級値を得た。しかし現実には後者はかなり現地の詳しい資料を必要とすることから難しい方法といえる。

Ⅶ お わ り に

雪崩運動を把握するため、これまで Voellmy の誘導式、その他を検討したが、R.I.Perla の運動方程式が今後の解析に便の点があったので、この考え方に沿って展開した。従って雪崩の速度や流出距離の原型は Perla の誘導式と同一とみて良い。但し運動中の抵抗その他は流体工学関係の資料や、それまでの実験結果に基づいて補足した。なお本文後半の流出距離の解析は簡便のため、平均傾斜を滑落した雪崩の最大速度を適用して求めた。この値が実際の地形勾配で得る速度とどの程度の差があるか、今後更に実測例を増して究明していきたい。

参 考 文 献

- F. Leaf Charles and Martinell. M (1977) : Avalanche Dynamics Engineering Applications for land Use Planning, 3-17, USDA Forest Service Research Paper RM-183.
- 上越国道事務所 (1971) : 雪と道路の調査報告, 2章人工雪崩実験, 17-120.
- 中俣三郎 (1957) : 雪塊衝撃の研究, 鉄道技術研究所中間報告, 57-115, 0-39.
- (1980) : 雪崩の危険度について (その1), 新潟大災害研年報, 4, 107-114.
- (1981) : 56豪雪の記録, 雪崩, 73-83, 土木学会新潟会.
- PERLA, R.I (1980) : Dynamics of Snow and Ice masses, 434-456, Samuel c colbeck, Academic Press.