

66 雪崩の流動と到達について

勘砂防・地すべり技術センター

○菊井 稔宏

建設省土木研究所

吉松 弘行, 藤澤 和範, 大浦 二朗

1. はじめに

近年、人家集落を対象とした雪崩対策事業が始まって、これまで道路や鉄道で行われて来た対策とは異なった対応も考えられるようになった。特に、ソフトな対策については安全な場所に家屋等を誘導する地区計画などの対応も考えられ、基礎的な資料として雪崩の到達範囲を予測することが重要となる。

雪崩の到達範囲を予測する運動モデルとして、Voellmy¹⁾によるものが代表的であり、係数の決定機構に問題は残るものの、これまで数多くの解析に用いられている。また、近年では雪崩の流れを詳細に扱い雪崩の運動を議論した研究²⁾も多く行われているがいずれのモデルにせよ、係数の決定が到達範囲を予測する上で大きな差となって現れるため、これら係数に関しての取り扱いが重要となる。

そこで、本研究ではVoellmy式を取り上げ既往の研究を整理した後、係数の取り扱いについて流体モデルを通して考察を加え、その決定要因について提案を行った。

2. 運動モデルとパラメータ

Voellmy やPerla³⁾による基礎式は、簡単に次のように書ける。

$$m \frac{dU}{dt} = mg(\sin\theta - \mu \cos\theta) - kU^2 \quad \text{---(1)}$$

ここに、 U ：雪崩の速度、 m ：雪崩の見かけの質量、 μ ：動摩擦係数、 g ：重力加速度、 k ：流体抵抗係数、 θ ：斜面傾斜角である。この式から明らかなように、雪崩の運動は μ と k により規定

され、これらのパラメーターをいかに推定するかが、重要な課題となる。実際には、Voellmyは質量 m の代わりに $\tau_r h$ 、流体抵抗係数 k の代わりに $g \tau_r / \xi$ として表し、Perlaは、 $k = D$ として D を効力と呼んだ。ここで、 τ_r ：雪崩の見かけの密度、 h ：雪崩層厚、 ξ ：乱流減衰係数である。

μ についてVoellmyは $\mu = \tau_r / 2000$ の関数を示し(ここでの τ_r の単位は kg/m^2) Schaerer⁴⁾は速度に依存するとして、 $\mu = 5/U$ の関係を提案している。その他の研究も含めて μ 、 k について使用された値を整理すると表-1のようになる。結局、乾雪雪崩の場合に $\mu \rightarrow$ 小、 $\xi \rightarrow$ 大($k \rightarrow$ 小)の値を、湿雪の場合にはその逆の $\mu \rightarrow$ 大、 $\xi \rightarrow$ 小($k \rightarrow$ 大)として、経験的にこれらの係数を設定して雪崩の現象を説明するケースが多い。しかしながら、雪崩の履歴がない場合や経験に乏しい場合に雪崩の到達範囲を予測することは困難であり、物理的な意味づけが必要となる。

ここで、雪崩の挙動を支配している要因について、これまで整理されている雪崩の実態の特徴と関連づけて整理すると次のようになると考えられる。

①幾何条件→雪崩量、走路の地形(斜面傾斜, 斜面形状)

②雪質条件→雪粒子密度, 粘着力

表-1 パラメータの範囲

研究者名	μ	k
Voellmy	0.1 ~ 0.2	0.0016 ~ 0.0024 ($\tau_r = 0.1$)
	$\mu = \tau_r / 2000$ ($\tau_r: 200 \sim 400 \text{ kg/m}^2$)	$g \tau_r / \xi$ ($\xi: 400 \sim 600$)
Perla	0.12 ~ 0.46	0.0002 ~ 0.005
		$k = D$ ($2.0 \leq \log(m/D) \leq 3.4$)
Schaerer	0.1 ~ 0.25	0.0005 ~ 0.001
	$\mu = 5/U$ ($U: 20 \sim 50 \text{ m/s}$)	($\xi: 1000 \sim 1800$)
Sammerholder	走路: 0.15 ~ 堆積区: 0.20	0.002
		($\xi = 500$)
Salm	0.15 ~ 0.50	($\xi: 400 \sim 600$)

③境界条件→斜面（あるいは積雪）と雪の摩擦、植生（障害物）

(1)式の係数の意味を考えると、 μ は底面の境界条件、 k は流れの構造により規定され、上記の要因と結びつけて考えると幾何条件を一義的に表していると思われ、これらの条件を合理的に決定する必要がある。

2.1 動摩擦係数

動摩擦係数に関する文献をみると、雪質により大きく物性が変化するため測定値にばらつきが大きいことが報告されている。

既往の研究について整理すると図-1⁵⁾のように、雪の動摩擦係数は密度により決定される。一方、流動中の動摩擦係数については不明な点が多い。固液混相流等からの知見では、運動中に固体の濃度が低下すると、粒子のみかけの ϕ が小さくなることが知られている。Schaererによる速度依存の関係は、経験的にこの関係を示したものと考えられる。しかしながら、物理的にとらえると、直接的には濃度に依存すると考える方が妥当である。現状ではこれを合理的に評価することは困難である。今後実験等により雪崩の動摩擦係数を一般化する必要がある。

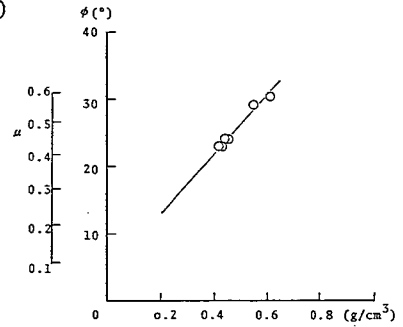


図-1 密度と μ の関係

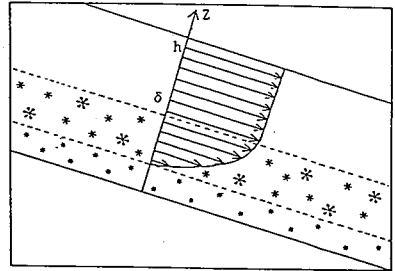


図-2 雪崩の流動の概念図

2.2 流体抵抗係数

現在、雪崩の流動中の粒子の運動機構については、明確に分かっておらず、衝撃力や周囲の振動などから内部の動きを推定している段階である。ここで、雪崩の運動を流体として扱うと流れによる応力としてレイノルズ応力を評価することが可能で、芦田ら⁶⁾の崩土のモデルと同じ取り扱いが可能となる。そこで、流体抵抗係数を検討するため、2次元等流状態で移動する厚さ h の雪崩層を考え、移動層のうち厚さ δ の部分が流動化している場合の流れの構造を考える（図-2）。高さ z における力のつり合いの式は、次式ようになる。

$$0 \leq z \leq \delta :$$

$$\tau_r(h-z)g\sin\theta = \mu(\tau_s - \tau_a)(1-\lambda)(h-z)g\cos\theta + \bar{\tau}\epsilon_s \frac{du}{dz} \quad \cdots(2)$$

ここに、 τ_r :雪崩の平均密度、 τ_s :雪粒子密度、 τ_a :空気の密度、 λ :空隙率、 $\bar{\tau}$:流動層全体的見かけの密度、 ϵ_s :みかけの渦動粘性係数である。さらに、 τ_r に関して、空気の質量を無視すると以下のように表される。ただし、全層が流動している場合は、 $\tau_r = \bar{\tau}$ となる。

$$\tau_r \approx [(h-\delta)\{(1-\lambda)\tau_s\} + (\delta-z)\bar{\tau}] / (h-z) \quad \cdots(3)$$

雪崩を雪粒子と空気の混合物として、流れ全体の乱れによるレイノルズ応力と粘性応力を考えると、(2)式の右辺第2項は、混合距離 ℓ を用いて次式のように表現できる。

$$\bar{\tau}\epsilon_s \frac{du}{dz} = \bar{\tau}\ell^2 \left| \frac{du}{dz} \right| \frac{du}{dz} + \eta \frac{du}{dz} \quad \cdots(4)$$

雪崩の流動中の雪粒子一つの体積を $V_p = k_p d^3$ 、粒子一つが占める空間の体積を $V_v = k_v L^3$ で表わす。 k_p, k_v は雪粒子および雪粒子が占める空間を表す形状係数であり、 d は雪粒子の代表粒径、 L は空

間の代表長さである。流動層の体積濃度を C として、

$$L = \left(\frac{k_p}{k_v} \right)^{1/3} \left(\frac{1-C}{C} \right)^{1/3} d \quad \text{..... (5)}$$

の関係をj得る。実際には表層雪崩のような速い流れを考慮した場合、分子粘性は流れの壁面付近以外の大部分において無視されるので、(5)式中の粘性項を省略し、混合距離に関して高橋⁷⁾らの研究を参考j雪崩に対しては係数を α として、 $l = \alpha L$ (6)として、(3)式に(5)、(7)式を代入して $(d u / d z)$ について整理し、 $z = 0$ において $u = 0$ の条件のもとに積分すると、流速分布に関する次式を得る。

$$\frac{u}{\sqrt{g h}} = \frac{2}{3 \alpha} \left(\frac{k_v}{k_p} \right)^{1/3} \left[(\sin \theta - \mu \cos \theta) \left(\frac{1-\lambda}{C} \right) \right]^{1/2} \frac{h}{d} \left(\frac{C}{1-C} \right)^{1/3} \times \{1 - (1-z/h)^{3/2}\} \quad \text{.....(7)}$$

平均流速は、深さ方向に0から δ まで積分し、全層にわたって流動がある場合は、 $\delta = h$ 、 $\lambda = 1 - C$ を代入して次式を得る。

$$\frac{U}{\sqrt{g h}} = \frac{2}{5 \alpha} \left(\frac{k_v}{k_p} \right)^{1/3} \left[(\sin \theta - \mu \cos \theta) \right]^{1/2} \frac{h}{d} \left(\frac{C}{1-C} \right)^{1/3} \quad \text{.....(8)}$$

ここで、定常状態では(1)式で $d U / d t = 0$ として k に関して、 $k = C \tau_s k'$ として無次元化して、 U に関して(8)式を代入して整理すれば、 k' に関する次式を得る。

$$k' = \frac{25}{4} \alpha^2 \left(\frac{k_p}{k_v} \right)^{2/3} \left(\frac{1-C}{C} \right)^{2/3} \left(\frac{h}{d} \right)^{-2} \quad \text{.....(9)}$$

結局、 k' は濃度 C 及び h/d に依存することになる。 C をパラメータとして h/d と k' の関係を示すと図-3のようになる。ただし、 α に関して、これを形状係数を含めたものとして扱うことにすれば、 $k_p/k_v \sim 1$ として考えることができ、 α を既往の研究のオーダーに一致するように決定すると $\alpha = 50$ となる。

3. 到達範囲

ここで得られた式をもとに到達距離を予測するためのパラメータについてシミュレーションを行って考察を加える。(8)式の定常状態の平均流速を U_r と表現し、(1)式を置換して、 $S = 0$ で $U = U_r$ の条件で積分すれば、

$$U = [U_r^2 - (U_r^2 - U_0^2) e^{-2K' S/h}]^{1/2} \quad \text{.....(10)}$$

ただし、 S は滑走距離、 U_r は初速度である。シミュレーションは(8)、(10)式により雪崩経路座標にそって U_r 、 U を計算して $U = 0$ となる位置を求めるもので濃度 C 、流動層厚 h 等を与える必要がある。図-4は C をパラメータとして h/d と k の関係を示したものである。 k の値は濃度 C にあまり敏感ではなく、 h/d により大きく変化することがわかる。 d について雪粒子の標準的な値を与えるとすると、結局 h の決定が重要となる。 h は走路の幅や勾配により変化し、また流動中にも変動すると考えられるが、ここでは平均的に取扱うこととして $U = 0$ となる h を求める。シミュレーションでは h/k' を与えればよいので、 h/k' として評価する。また、 μ について問題があるものの、ここではSchaeferに

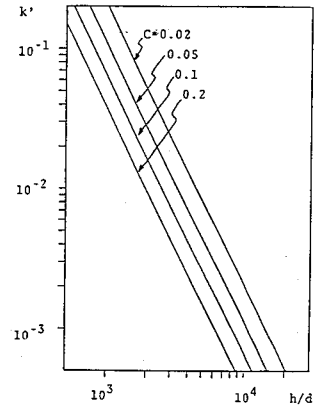


図-3 h/d と k' の関係

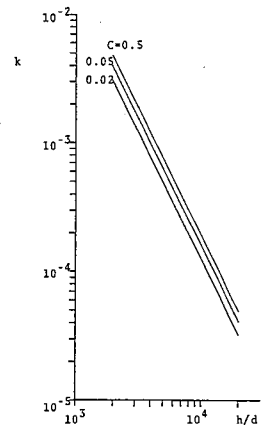


図-4 h/d と k の関係

雪崩の発生量を V 、現象の継続時間を T として、発生区下端での走路断面を矩形、その幅を b とすると、 $V = b h \bar{U} T$ ……(1)の関係がある。ここでの $\bar{U}$ は継続時間中での平均的な速度である。また、 V と T の間に、 $T = f(b) V^{0.5}$ ……(2)なる関係を仮定する。ここに、 $f(b)$ は走路幅 b によって決まる関数である。 $\bar{U}$ に関して $\bar{U} = U$ として、(9)、(1)、(2)式から

$$h/k' = \left\{ \frac{\left(\frac{25}{4} a^2 \left(\frac{1-C}{C} \right)^{2/3} \frac{1}{d^2} \right)^{1.2}}{g(\sin\theta - \mu \cos\theta) \text{ hf}(h)} \right\}^{1.2} V^{0.6} \quad \dots (13)$$

これによれば、場所を限定すれば V に比例して h/k' を決定することが可能と思われる。この関係を簡単に表せば、

$$h/k' = \beta V^{0.6} \dots (14)$$

この結果から、これまで経験的に決定してきた係数を雪崩発生量に応じてを設定できることになり到達距離をシミュレーションにより合理的に推定できることになる。

以上、本研究で明確となった事項について以下に列挙する。

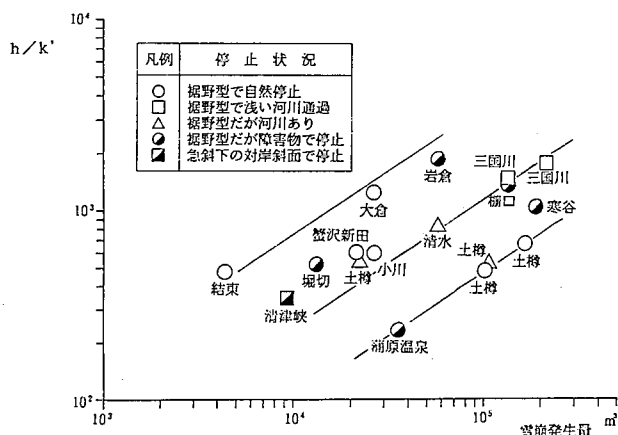


図-5 雪崩発生量 V と h/k' の関係

を考慮することにより、流体抵抗係数の評価を行った。これにより、経験的に決定していた係数を定量的に評価することが可能となった。ただし、 k' を既往の研究のオーダーに一致させるためには混合距離に関する係数 $\alpha = 50$ とする必要がある。

今後は、流動中の動摩擦係数の評価を行うとともに、雪粒子の運動に関するデータを蓄積して、濃度や流動層厚に対する考察を加えて行く必要がある。また、雪崩量と継続時間の地形的な関係についてのデータを蓄積して、定数 β の決定要因についてさらに一般化する必要がある。

- 1) A.Voellmy : Über die Zerstörungskraft von Lawinen, Schweizerische Bauzeitung, Jahrg.73, Ht
- 2) 例えば、福島祐介：粉雪雪崩の流動解析，雪氷，第48巻第4号，1986.12 など
- 3) R.Perla, T.T.Cheng, D.M.McClung : A two parameter model of snow-avalanche motion, Journal of Glaciology, vol22, No.94, 1980
- 4) Schaerer, P.A : Friction coefficients and speed of flowing avalanches, IAHS-AISH Publication No.114
- 5) 日本雪氷学会：雪氷十年，東海書房，1949
- 6) 芦田和夫，江頭進治，神矢弘，佐々木浩：斜面における土塊の抵抗則と移動速度，京大防災研年報，第28号B-2, 1985.4
- 7) 高橋保：土石流の停止堆積機構に関する研究(3)，京大防災研年報，第25号B-2, 1982.4