

○ 建設省 土木研究所 寺本 和子
 建設省 土木研究所 吉松 弘行
 アジア航測株式会社 北原 一平

はじめに

昭和62年度は柵口雪崩災害（昭和61年1月26日発生）を例として、Voellmy式を抵抗則にRWM（RANDOM WALK MODEL）と不定流モデルを用いた雪崩の到達区域シミュレーションを発表した。¹⁾その結果、不定流モデルによるシミュレーションは実績とほとんど一致せず、RWMによるシミュレーションは実績とある程度の一致をみた。本年度はPerla式を抵抗則に使い、RWMの改良と、さらにより決定論的モデル（8方向ウォークモデルと呼ぶ）の構築を試みた。

1. Perla式による雪崩速度の検討

Voellmy式は抵抗則に流動深 h を含み、 h の値の影響が大きく、その決め方が非常に難しい。¹⁾そこで乾雪表層雪崩の抵抗則として近年評価を得ているPerla式を抵抗則に用いることとし、柵口雪崩を例にパラメータ H/D の検討を行った。

1.1 基礎式

$$dv(t)/dt = g(\sin\theta - \mu\cos\theta) - (1/(H/D))v(t)^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 t ：雪崩の運動開始後の時間(s)、 $v(t)$ ：時間 t での雪崩の流下速度(m/s)、 θ ：斜面の勾配(度)、 μ ：雪崩底面と斜面と摩擦係数、 H/D ：雪崩の質量と抗力の比

1.2 パラメータ H/D の検討

Perlaによれば、²⁾経験的に H/D の範囲は、 $10^2 < H/D < 10^3$ であり、また、Perlaが求めた μ 、 H/D の最適値の範囲は、 $0.12 < \mu < 0.46$ 、 $2.0 < \log_{10}(H/D) < 3.4$ である。これから、柵口雪崩を対象に H/D は平均値である537を用い、 μ の値としては、昭和62年度の検討結果から、0.15を用いて縦断方向の雪崩の速度分布を計算した(図1)。図1には比較のためにVoellmy式と離散ボールモデルの計算結果も示す。この結果から、柵口雪崩については、上記のパラメータの値の場合、計算による到達距離が実績と一致することが分かった。

2. RWMの改良

昭和62年度に発表したRWMは、4方向のモデルであり、各方向への遷移確率は、単純に斜面勾配に比例し、慣性力についても経験的に決めていた。そこで、次のようなモデルに改良した。

(1) 進行方向が4方向では、谷がメッシュに対して斜交する場合、進み方が不自然であるため、8方向とする。

(2) 図2において今雪崩の先端がM1を通りM0に到達したとき次にM0のまわりのメッシュ1～8のどの方向に進むかを以下のように決定する。

- ① H1, H2, H8は進行方向とは逆方向なのでP1, P2, P8は0とする。
- ② V0を初速度としてV3, V4, V5, V6, V7をPerla式で計算する。
- ③ 曲がりによる速度変化を考慮し、V4, V6は $\cos 45^\circ$ を、V3, V7は $\cos 90^\circ$ を乗じる。
- ④ H5の標高が高く、V5が0になる場合は、土塁等に対して雪崩が衝突して方向を変えることによる速度変化の係数 $(1 - \mu \sin \theta)$ をV3, V4, V6, V7に乘じる³⁾。V3, V7は $\theta = 90^\circ$ 、V4, V6は $\theta = 45^\circ$ とする。
- ⑤ H3～H7の遷移確率は、運動エネルギー $-1/2mv^2$ に比例するものとして、H3～H7の $1/2mv^2$ を求め、 $P_i = 1/2mv^2 / \sum_{i=1}^8 1/2mv^2$ をそれぞれの方向の遷移確率とする。
- ⑥ 上記の方法によって決定した確率分布に乱数を発生させて進行方向を決定する。

(3) 次のように停止条件を改良する。

- ① V3～V7のすべての速度が0になった場合、停止する。
 - ② あるブロックは、速度が0になったメッシュで2mの厚さで堆積するものとする。
- (4) 以上のプロセスを100回くりかえし、各メッシュの雪崩の通過回数を100で割って危険度とした。

図3に柵口雪崩を対象にしたRWMによるシミュレーション結果を示す。これを昭和62年度の結果と比較すると、計算による危険範囲がかなり実績に近くなっていることが判断される。また、図4に昭和59年2月6日新潟県糸魚川市上早川寒谷で発生した乾雪表層雪崩のシミュレーション結果を示す。詳細な条件が不明なため柵口と同様の条件を用いた。これによると、計算による到達範囲はほぼ実績と一致している。

3. 8方向ウォークモデル

RWMは、改良した結果、一応雪崩の危険度予測に使えるものと考えられるが、進路の決定に乱数を使う点、質量の概念が無い点、一度に1メッシュずつしか雪崩が発生しない点等の問題を考慮し、これらの点を満足するより決定論的な方法の構築を試みた。

3.1 方法

- (1) 雪崩の移動はメッシュ単位とし、進行方向は8方向とする。
- (2) 雪崩は同時にいくつものメッシュから発生させることができ、それぞれにメッシュに初速度と方向、質量を与えることができる。
- (3) 各時間ステップ毎にすべてのメッシュに存在する雪崩が同時に移動する。
- (4) 改良RWMと同様に、雪崩は現在の進行方向に対して前方3方向に分流するものとし、各方向への速度は、そのメッシュにある雪崩の速度を初速度として、そのメッシュの雪崩の質量をもとに、Perla式により求める。各方向へ分流する雪崩の質量は、そのメッシュにある雪崩の質量を各方向への速度により比例配分する。
- (5) 各メッシュから同時に前方3方向に向かって雪崩が進行するため、各メッシュから次のメッシュへ移動するとき、以下のような相互干渉が起こるものとする。
 - ① 図5に示すように、メッシュの辺を通る雪崩は進行方向のメッシュから同じ辺を通して進んで来る雪崩とぶつかったとき、運動量の大きい方向へ進み、衝突後の運動量は両者の差とし、質量は両者の合計とする。したがって、衝突後の雪崩の速度は、運動量を質量で割った値とする。
 - ② メッシュの角を通る雪崩はその角を通る他の3メッシュの雪崩と干渉する。衝突後は各雪崩の運動

量を x 、 y 成分に分離し、それぞれ差し引きした後、再び合成し一つの雪崩とする。進行方向は、合成後のベクトルの方向とする。

(6) 雪崩が各メッシュから移動した後、一つのメッシュに周りの幾つかのメッシュから雪崩が流入する場合、各雪崩の運動量を x 、 y 成分に分離し、それぞれ差し引きした後、再び合成し、一つの雪崩とする。合成後の雪崩の質量は、そのメッシュに流入した雪崩の質量の合計とする。したがって、合成後の雪崩の速度は、運動量を質量で割った値とする。また、進行方向は合成した運動量のベクトルの方向とする。

(7) 雪崩は次のメッシュに進む場合、前方3方向の速度がすべて0になる時、及び運動量合成後、速度が0になる時停止し、そのメッシュに平均的に堆積するものとする。

3. 2 結果

図6に柵口雪崩を対象にした8方向ウォークモデルによるシミュレーション結果を示す。これを図3の改良RWMと比較すると次のようなことがいえる。

(1) 8方向ウォークモデルの結果は、改良RWMの結果とはほぼ同様の傾向を示している。

(2) 8方向ウォークモデルの結果は、雪崩の走路全体をほぼ包括しており、改良RWMよりも実績の到達範囲により近い分布を示している。とくに主走路の雪崩が明確に現れており、それが被害家屋付近まで伸びている。図4の左下の部分が実績と一致していないのは、雪崩発生後の現地調査において、雪崩の2次発生危険等から、この部分の実績の雪崩経路が必ずしも正確に把握されていないことも一因かと思われる。

(3) 8方向ウォークモデルの計算結果は全体の到達範囲をかなりよく再現するものの、雪崩による被害家屋付近の分布は、完全には再現されていない。これは、次のような理由があげられる。

① 斜面上には、樹林があるため、雪崩は抵抗を受け、それが到達範囲に影響すると思われるが、現段階のシミュレーションでは、樹林の影響を組みこんでいない。

② 乾雪表層雪崩の運動は、まだ不明な部分が多く、Perla式にしても縦断面における雪崩の先端の速度の検討しかされていない。そのため、平面での雪崩の質量変化に対応したパラメータの検討をしなければならない。

(4) 今後の課題としては、計算刻み時間の導入、抵抗則の検討等があげられるが、雪崩の到達区域シミュレーションモデルとしては、ほぼ完成したものと思われる。また、このモデルは、雪崩だけでなく、抵抗則を変えることにより、土石流、泥流、大規模崩壊等の到達(氾濫)シミュレーションにも応用できる。

参考文献

- 1) 北原一平 寺本和子 工藤賢二 小林一三 雪崩氾濫シミュレーション(柵口災害を例として) 昭和62年度砂防学会研究発表会概要集 1987年 5月
- 2) R.Perla T.T.Cheng D.H.McClung A TWO-PARAMETER MODEL OF SNOW-AVALANCHE MOTION JOURNAL OF Glaciology, Vol.26, No.94, 1980
- 3) 新防雪工学ハンドブック

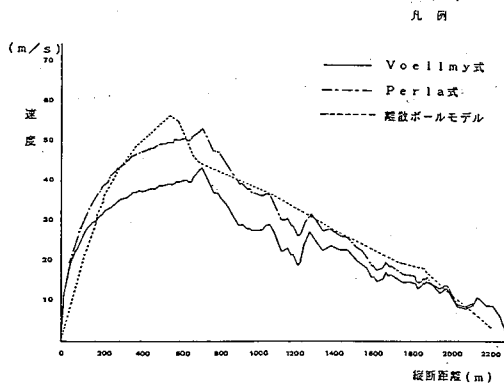


図1 Perla式による雪崩速度分布 (楢口雪崩)

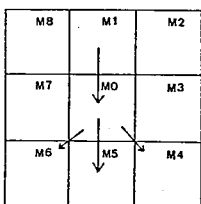


図2 RWMの進路

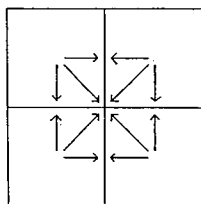


図5 確率モデルの模式図

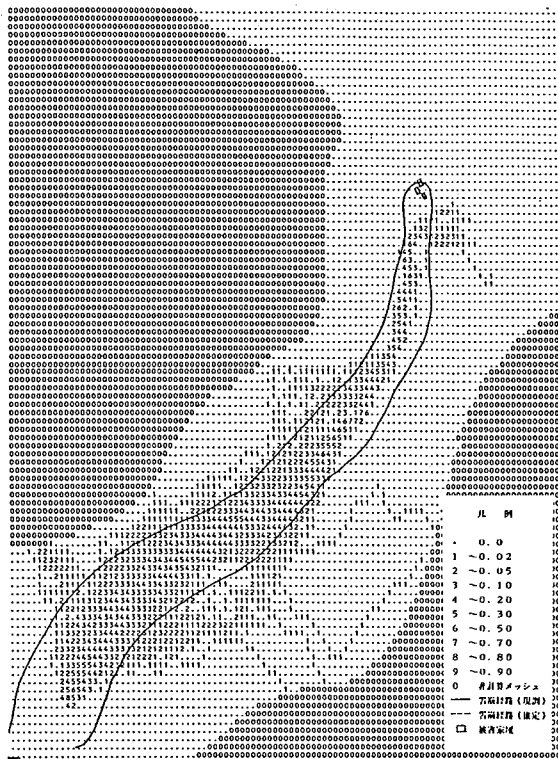


図4 改良RWMによるシミュレーション (寒谷)

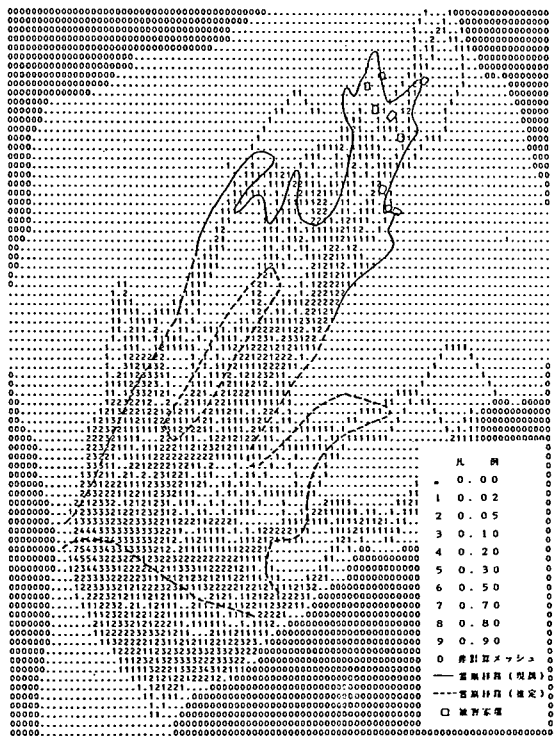


図3 改良RWMによるシミュレーション (楢口)

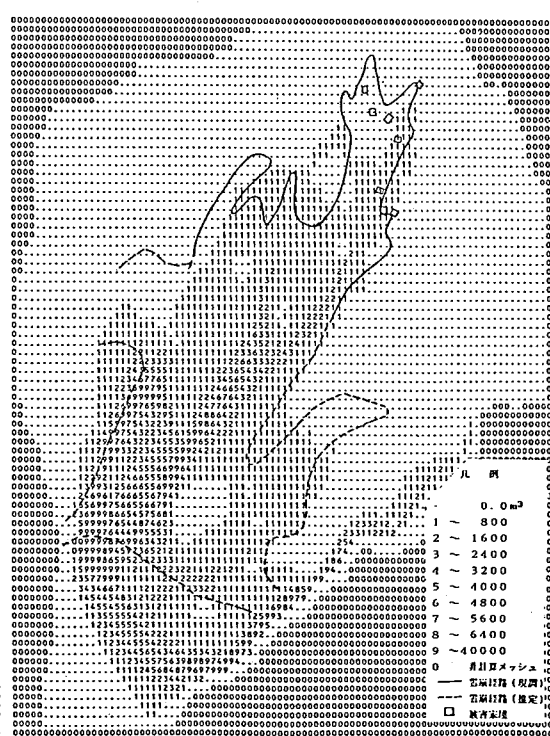


図6 8方向ウォークモデルによるシミュレーション (楢口)