

人工雪崩実験データを用いた雪崩シミュレーションモデルの検証

長岡技術科学大学大学院 学員 ○加地 智彦
長岡技術科学大学環境建設系 フェロー 早川 典生
長岡技術科学大学環境建設系 正会員 上石 勲
町田建設株式会社 非会員 町田 誠

1 はじめに

雪崩災害対策は雪国の生活を守る上で不可欠な技術である。これには、雪崩の発生を抑止するものと、発生した雪崩から集落・道路などを守るものがある。後者の場合、雪崩が積雪斜面をどのような速度・形態で流下するかを予測しなければならない。そのため、数値シミュレーションモデルの研究が進められてきた。しかし、雪崩挙動の実測データが少ないため、モデルの検証はあまり行われてこなかった。そこで本研究では、大規模な人工雪崩実験により得られた実測データを用いて、筆者らの提案する「流れ型雪崩モデル」の検証を行うものである。

2 大規模人工雪崩誘発実験

本研究で対象とする人工雪崩実験は昭和 40 年前後に新潟県南魚沼郡で建設省、国鉄などにより実施されたものである[1]。人工雪崩実験における装薬と爆破の模式図を図 1 に示す。当時は道路・鉄道交通の雪崩対策が本格的に検討され始めた頃で、雪崩の構造を知るためにこのような実験が積極的に行われた。これらの実験では、大災害となる自然発生雪崩と類似する、流下長が長く、発生量の多い雪崩が発生している。また、このような大規模実験を行うことは近年では難しい。そのため、これらの実験は雪崩研究において貴重な資料である。資料によると実験は約 10 年にわたり 29 回行なわれているが、その中で大規模な流れ型雪崩が発生した 3 回の実験（表 1）について数値シミュレーションを適用する。

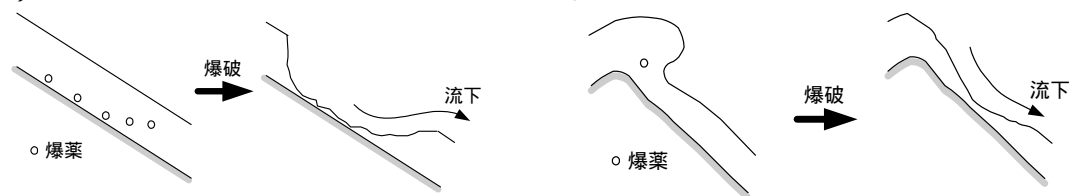


図 1 人工雪崩実験の装薬と爆破
(左：斜面への装薬、右：雪庇への装薬)

表 1 検証データとして用いる実験

	実施年月日 斜面所在地	気象条件	総薬量	装薬箇所	発生量	流下距離
実験 1	昭和 36 年 3 月 6 日 湯沢町土樽	晴れ	16.1kg 60 孔	斜面	320m ³	500m
実験 2	昭和 38 年 3 月 15 日 湯沢町土樽	晴れ 気温 5	44.5kg 163 孔	斜面 雪庇	1200m ³	500m
実験 3	昭和 42 年 3 月 17 日 湯沢町三俣	晴れ 気温 6	112.5kg 460 孔	斜面	2700m ³	400m

キーワード 雪崩災害 人工雪崩 雪崩シミュレーション

連絡先 〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1 長岡技術科学大学環境建設系 大気水圏ダイナミクス研究室

Tel : 0258-47-1611(6619) E-mail : kachi@hydro.nagaokaut.ac.jp

3 流れ型雪崩モデル

福嶋(1986)による 2 次元サーマル理論モデルのいくつかの構成式に変更を加えることで流れ型雪崩をモデル化する。主な変更点は、

雪崩の形状関数、雪粒子の巻き上げ、雪粒子の沈殿、摩擦抵抗力である(詳細は文献[3]による)。本モデルの特徴は図 1 のように雪崩先端部を半楕円形で近似し、その重心の運動に注目する点と、雪崩先端部が積雪面から雪粒子を取り込み、後方に沈殿していく点である。その基礎方程式を以下に示す。



図 1 雪崩先端部のモデル

雪崩の質量保存式

$$\frac{d}{dt} \rho A = \rho_a E_w U P_i + \rho_s \alpha D U - \rho v_s P_b$$

雪崩中の雪粒子の保存式

$$\frac{d}{dt} C A = \alpha D U - C v_s P_b$$

雪崩の位置に関する方程式

$$\frac{d}{dt} s = U$$

運動量保存式

$$\frac{d}{dt} \rho U A = (\rho - \rho_a) g A \sin \theta - f \rho g A \cos \theta - \left(\frac{1}{2} \rho_a C_D h + \frac{1}{2} f_i \rho_a P_i + \frac{1}{2} f_b \rho P_b \right) U^2$$

ρ : 雪崩の平均密度 kg/m^3 、 ρ_a : 空気の密度 kg/m^3 、 ρ_s : 積雪層の密度 kg/m^3 、 E_w : 空気の連行係数

U : 雪崩の速度 m/sec 、 α : 雪粒子の連行係数、 D : 積雪深 m 、 v_s : 沈殿速度 m/sec 、 A : 雪崩の面積 m^2

P_b : 雪崩の底面長 m 、 θ : 斜面の傾斜角、 g : 重力加速度、 f : クーロン摩擦係数、 P_i : 空気との境界面長 m

f_i と f_b : せん断応力を表す摩擦係数、 C_D : 抵抗係数、 s : 雪崩の位置 m (斜距離)

4 計算結果

平均密度 ρ 、摩擦係数 f 、積雪深 D を実験時の積雪状態に応じて設定し計算する。表 1 の実験 1 の結果を図 2 に示す。雪質はざらめ雪で密度は 450kg/m^3 とする。摩擦係数は森末(1997)により測定されたざらめ雪の平均値 0.59 に標準偏差の幅をもたせた 0.31, 0.59, 0.87 の 3 ケース、積雪深は 0.5, 1.0, 1.5m の 3 ケースについて計算する。 $f = 0.31$ では、水平距離 150m 付近までの速度がよく再現されている。しかし、その後も雪崩は停止することなく実測の停止位置を越えて流下する。それに対して、 $f = 0.59$ では減速過程がよく再現されている。 $f = 0.87$ では、雪崩は発生からまもなく停止に至っている。摩擦係数は温度に比例することから[5]、流下により標高が低下していくと、温度が上昇し、摩擦係数は増大することが考えられる。これより、摩擦係数が斜面上部から下部にかけて 0.31 から 0.59 へ増大していったとすると、以上の結果が説明できるだろう。

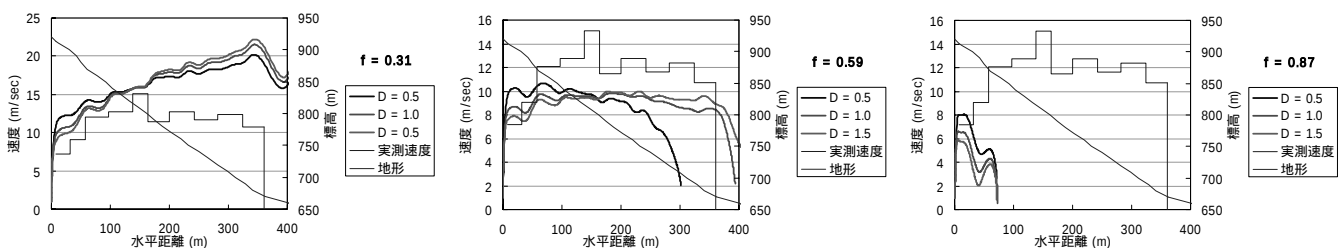


図 2 実験 1 の計算結果

5 まとめ

本研究では、昭和 40 年前後に行われた大規模雪崩実験の資料より速度および流下地形を読み取り、それを流れ型雪崩モデルに適用した。その結果、資料の有用性を示すことができた。また、モデルのパラメータの設定に関して、摩擦係数の標高による変化を考慮する必要性が示唆された。

[1] 建設省北陸地方建設局上越国道工事事務所(1971), 雪と道路の調査報告書(国道 17 号線において), pp.17-124

[2] 福嶋佑介(1986), 粉雪雪崩の流動機構の解析, 雪氷 48 巻 4 号, pp.1-8

[3] 加地智彦(2003), 人工雪崩による雪崩災害予防法に関する研究, 長岡技術科学大学大学院修士論文

[4] 森末晴男(1997), 雪崩対策のための雪中爆破と雪崩危険度の推定法に関する研究, pp.107-113

[5] 前野紀一, 遠藤八十一, 秋田谷英次, 小林俊一, 竹内政夫(2000), 基礎雪氷学講座 雪崩と吹雪, pp.92-93