

人工雪崩による雪崩災害予防法に関する研究

大気水圏ダイナミクス研究室 加地 智彦
指導教官 早川 典生

1 はじめに

「人工雪崩による雪崩災害予防法」とは、自然雪崩が発生する前に、安全を確保したうえで人工雪崩を起こし、斜面積雪の安定を確保する手法である。

近年、防護柵やスノーシェッドなど人工構造物による雪崩災害対策の整備により、雪崩災害の発生件数は減少する傾向にある。しかし、全区間に対策を施すことは難しい山間部の道路や鉄道では、表 1 のように多数の雪崩災害が発生している。そこで、雪崩パトロール体制に加え、緊急的に施工可能な人工雪崩が必要とされる。また、雪崩発生時に甚大な被害が予測されるスキー場においても、人工雪崩が注目されている。

表 1 2000～2002 年 雪崩災害発生事例

	道路 鉄道	スキー場	登山 山スキー	民家 集落	その他
件数	40	2	5	2	11
死者	1	0	5	0	7

(日本雪崩ネットワーク)

2 目的および検討項目

本研究では「人工雪崩誘発技術の正確性・安全性の向上」を目的とし、以下の3通りのアプローチで検討した。

雪崩を確実に誘発するには、誘発するタイミングを見極める必要がある。そこで、スキー場に設置された雪崩誘発装置について、誘発結果を気象条件から予測する手法を検討した。

爆薬を積雪内で爆破させる雪崩誘発法は、現在、経験的な手法で施工されているため、その手法を解り易く解説する作業指針が望まれる。そこで、経験的な手法の雪崩誘発機構を解明するため、現地実験を行い検討した。

人工雪崩を誘発する場合、誘発された雪崩の流下経路を予測し、その安全を確保する必要がある。そこで、雪崩の流下速度、到達距離を推定する雪崩シミュレーションについて検討した。

3 判別分析による誘発結果予測手法の検討

雪崩誘発装置ガゼックス(Gaz.ex)は、ガス爆発の爆風圧により雪崩を誘発する装置である。こ

の装置は、遠隔操作が可能でスキー場の雪崩制御に期待されている。対象とする新潟県新井市のスキー場「ARAI Mountain & Snowpark」には6基のガゼックスおよび気象観測点が設置されている(図 1)。

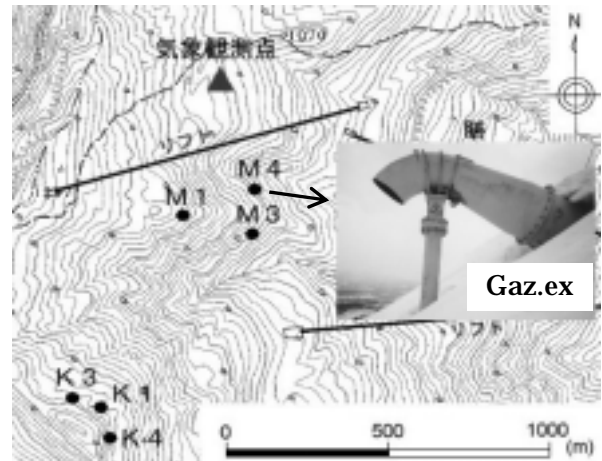


図 1 ガゼックス設置位置

3.1 使用データ

気象データ

気象観測点における1時間毎の積雪深、気温、風速、風向、瞬間最大風速、時間降雪量を用いる。それらの測定期間と欠測率を表 2 に示す。ここで、風速、風向、瞬間最大風速は同じ欠測率である。

表 2 気象データの測定期間と欠測率

シーズン	期間	欠測率(%)			
		積雪深	降雪量	気温	風速
1993-94	2/5~3/11	12.6	17.6	12.6	12.6
1994-95	12/18~3/31	0	0	0	0
1995-96	12/7~3/13	2.8	3.6	2.8	2.8
1996-97	12/1~3/26	1.2	1.2	1.2	1.2
1997-98	12/1~3/31	1.0	1.4	1.2	1.2
1999-00	12/2~3/31	0	0	0.03	0.03
2001-02	12/1~3/13	1.5	1.6	1.6	1.6

ガゼックス稼働結果

ガゼックスの稼働結果はスキー場スタッフにより記録されている。ここでは稼働時刻とその結果(雪崩の発生、不発生、確認不可)のデータを使用する。データ数を表 3 にまとめる。記録期間は1993～1999年である。

表 3 ガゼックス稼働記録のデータ数

砲名	成功	不成功	未確認	合計
M1	32	19	42	93
M3	28	2	41	71
M4	27	3	37	67
K1	3	7	24	34
K3	12	3	28	43
K4	15	3	37	55

3.2 判別関数の算出方法

多変量解析手法の「判別分析」を用いて、誘発成功と不成功を判別する線形判別関数を求める。求められた判別関数により、新たにガゼックスを稼働する場合、その結果を予測することができる。

判別関数は図 2 の流れで求める。それぞれの過程を順次述べる。

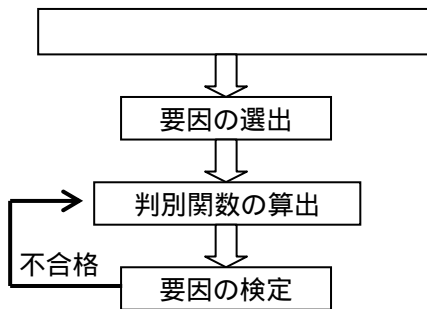


図 2 判別関数の算出フロー

要因候補の作成

雪崩の発生、不発生が確認されている稼働結果について、それに影響を与えたと考えられる要因を気象データから求める。要因はガゼックス稼働時刻の気象要素と、稼働までの 3,6,12,24,48 時間における統計値とする(表 4)。ここで「風向別」とは、その方位を中心とする 90° 内とする。これは、気象観測点とガゼックス設置位置で、風向の相違を考慮するためである。

要因の選出

先に求めた要因の中には相関の高いものが多数含まれるため、その中から最適な要因を選び出す。まず、それぞれの要因について、標準化を行い、雪崩発生・不発生のグループに分け、グループごとに平均値を求める。その平均値の差が大きいほど、グループが明瞭に分かれており、その要因が誘発結果に強く影響しているといえる。そこ

で、グループ毎の平均値の差を影響度の比較指標とし、要因候補に順位を付け、上位に相関係数 0.6 以上の要因があれば、その要因候補を不採用とする。また、欠測率が 10% を超える要因候補も不採用とする。

表 4 要因候補一覧

	ガゼックス稼働時点	対象時間				
		3h	6h	12h	24h	48h
要因候補	気温	平均気温、最高気温、最低気温 気温較差				
	積雪深	積雪深の増加量				
	時間降雪量	最大時間降雪量、最小時間降雪量				
候補	風速、風向	平均風速、最大風速、最小風速、瞬間最大風速の最大値、瞬間最大風速の最小値、風向別風速の積算値、風向別風速 2 乗の積算値				
	瞬間最大風速					
合計	6	28	28	28	28	28
146 要因						

判別関数の算出、要因の検定

選び出された要因を説明変量とする判別関数を判別分析により算出する。そして、要因の寄与度について検定統計量を求め、有意水準 5% の F 検定を行い、不合格の要因がある場合、最も寄与度の低い要因を破棄し、すべての要因が合格するまで判別関数の算出を繰り返す。

3.3 結果および考察

設置期間が長く稼働記録の多い M1 砲について判別関数を求めた。また、同じ尾根に設置される M1, M3, M4 砲および K1, K3, K4 砲についてもそれぞれ判別関数を求めた(図 1 に設置位置)。判別関数の要因、判別関数、正答率を示す。矢印は要因に含まれる風向を示す。

M1 砲 (気象観測点から 420m)



x : 12 時間平均風速の積算値(東)

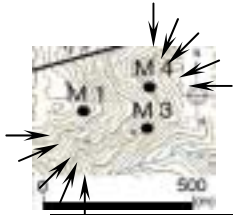
y : 12 時間平均風速 2 乗の積算値(南)

z : 24 時間平均気温

$$f = 0.365x + 0.0345y - 0.45z - 2.796$$

	誘発成功	誘発不成功	全体
サンプル数	29	8	37
正答率	79.3	87.5	81.1

M1,M3,M4 砲 (気象観測点から平均 410m)



x : 24 時間平均風速(南西)
 y : 24 時間平均風速(北東)
 $f = 0.0684x + 0.146y - 2.652$

	誘発成功	誘発不成功	全体
サンプル数	44	9	53
正答率	75.0	77.8	75.5

K1,K3,K4 砲 (気象観測点から平均 1100m)



x : 48 時間最大風速
 y : 24 時間最小風速
 $f = 0.840x - 1.102y - 3.911$

	誘発成功	誘発不成功	全体
サンプル数	15	7	22
正答率	80.0	71.4	77.3

どのケースでも風速に関する要因が選ばれた。よって、気温や積雪深の要因よりも、風速要因が雪崩発生に寄与していると考えられる。M1 砲および M1,M3,M4 砲では尾根に対して直交する風向を含む要因が選ばれている。そのような風向は、吹き溜まりを形成し、雪崩が発生し易い積雪状態を作るとされるため、妥当な結果といえる。しかし、K1,K3,K4 砲では風向要因が選ばれていない。これは、ガゼックス設置点と気象観測点の距離が離れていることで、両地点で風向の相関が低くなり、風向要因ではなく絶対値としての最大および最小風速が選ばれたものと考えられる。

4 雪中爆破による誘発機構の解明

パイル状装薬法による人工雪崩誘発手法について、爆破により積雪が破壊され、流下する機構を検討する。そこで、2001 年 3 月 22 日および 2002 年 3 月 20 日に現地実験を新潟県南魚沼郡塩沢町柘窪の山腹斜面で行った(図 3)。

4.1 実験概要

経験的に図 4 のように装薬すると雪崩が誘発され易いことが知られている。そこで、本実験においても同様の装薬法を用いた。爆薬はエマルジョン系含水爆薬(チタマイト)を 1 孔につき 300g 使用した。観測・実験項目をそれぞれ示す。

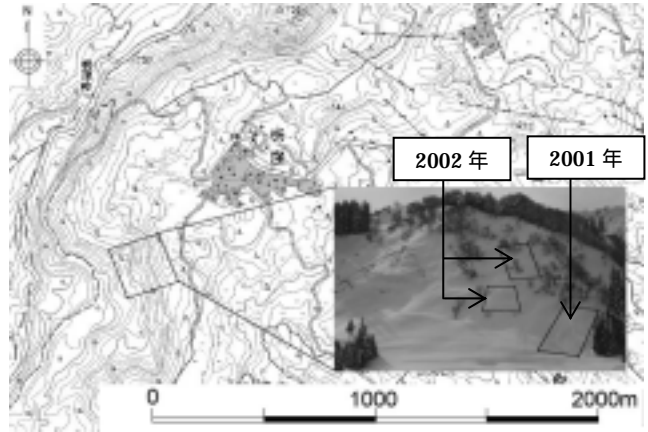


図 3 柘窪実験斜面

2001 年

- ・断面観測
- ・雪崩誘発実験：装薬量 6.0kg、孔数 20 (千鳥配置)
 流下量 6.5m³ (推定)

2002 年

- ・断面観測
- ・雪崩誘発実験 1：装薬量 8.1kg、孔数 27 (千鳥配置)
 流下距離 23m、流下量 18m³ (推定)
- ・雪崩誘発実験 2：装薬量 8.1kg、孔数 27 (千鳥配置)
 流下距離 60m
- ・積雪層破壊実験：装薬量 0.6kg、孔数 2 (縦 1 列)

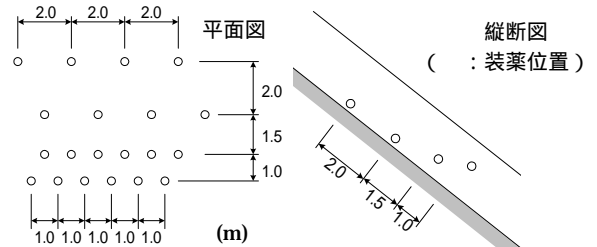


図 4 経験的手法の装薬例 (2001 年実験より)

特徴：斜面下部で装薬深を浅く、間隔を密にする。

4.2 結果と考察

爆破による破壊機構について

2001 年雪崩誘発実験の爆破後、図 5 のように断面を観察した。(a)(b)は斜面上部と下部に見られた爆破跡である。(a)では楕円状の爆破跡が見られる。これは、爆風圧により球状に積雪が破壊され、その後上載荷重により圧縮されたことにより楕円状になったものと推測される。(b)には水平方向に 2 本の線が見られる。これは、図 6 のように球状にできた爆破跡が雪圧により押しつぶされ、形成されたものと推測される。

雪は外圧を加えると圧縮凝固する性質をもつ

ため、(b)の爆破跡が雪圧により押しつぶされたものだとすると、この部分では圧縮凝固により硬度が増していると考えられる。それにより、この圧縮凝固部分が斜面上方からなだれてくる雪塊の踏み台となり、雪塊が雪面に持ち上がるものと推測される。今後、この斜面下部の役割を実験的に解明する必要がある。

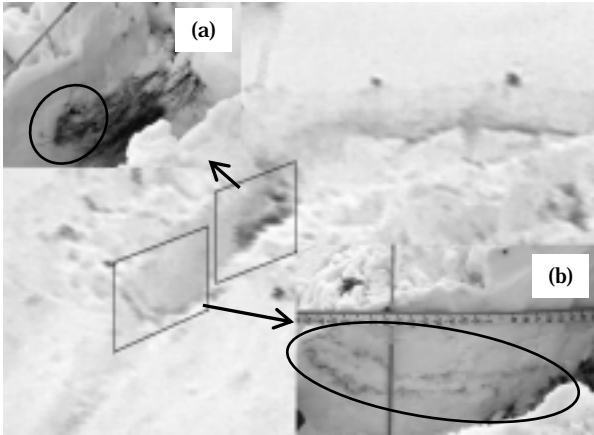


図 5 爆破後の断面

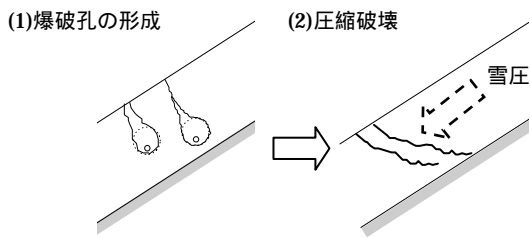


図 6 斜面下部の爆破跡形成過程の模式図

雪崩の流下機構について

2002年の雪崩誘発実験では、図7のように滑り面に沿って雪塊が流下している。滑り面の深さは断面観測において弱層の確認された深さ付近であったことから、人工雪崩においても弱層が滑り面になるものと考えられる。



図 7 雪崩流下後の斜面

5 雪崩シミュレーション

人工雪崩を誘発する際、誘発された雪崩がどのような速度で、どこまで流下するかを予測する必要がある。そこで数値計算を用いて検討する。雪崩の運動形態は、煙り型と流れ型の2種類に分けられるが、ここでは湿雪の雪崩形態である流れ型雪崩を対象とする。

5.1 数値モデル

福嶋(1998)は、サーマル理論を発展させることにより、運動量方程式、雪粒子の保存式、雪崩体積の保存式の3式を基礎方程式とする煙り型雪崩の数値モデルを提案している。これに、流れ型雪崩の運動特性を考慮した変更を加え、流れ型雪崩モデルとして用いる。その変更点を順次述べる。

雪崩先端部の形状

雪崩を横から見た断面形状を半楕円形と仮定する(図8)。このような形状を仮定することで、雪崩の質量変化、形状抵抗を考慮することが可能となる。この形状は底面長 P_b と高さ h の比 (P_b/h) で決まり、斜面勾配により変化する。煙り型雪崩モデルでは、 P_b/h と傾斜角 θ の関係式を塩水あるいはバリウムと水の混合水を用いた密度流の実験を整理することで次式のように求めている。

$$P_b/h = 8.47\theta^{-1/3} \quad (1)$$

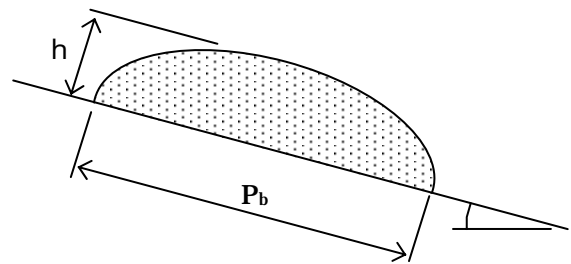


図 8 雪崩形状の模式図

しかし、煙り型と流れ型は形状が異なるため、流れ型に適した関係式を求める必要がある。そこで、Nouguchi et al.(1997)による2次元模擬雪崩実験の結果を整理することで、図9のような関係式を得た。この近似曲線を傾斜角と形状の関係式とする。

$$P_b/h = -7.79 \ln \theta + 33.88 \quad (2)$$

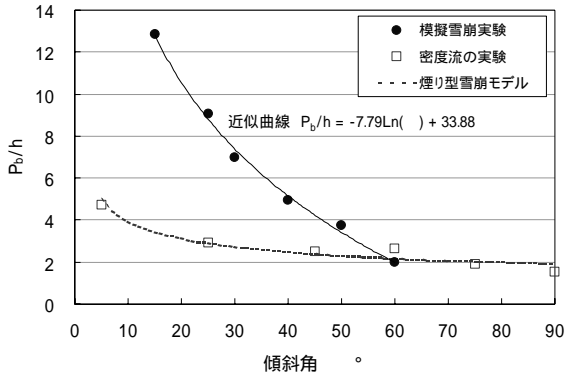


図 9 傾斜角と形状の関係

雪粒子の連行

前野と西村(1987)は雪粒子の連行に関して、雪崩の質量が滑走距離に比例して増えると仮定し、雪崩の質量変化率 k を次のように定義している。

$$k = \frac{dm}{dr} = \frac{1}{V} \frac{dm}{dt} = \alpha \rho DW \quad (3)$$

ここで、 r は滑走距離、 ρ は積雪密度、 D は積雪深、 W は雪崩の幅である。 DW は単位距離滑走中に雪崩に新しく加わる積雪層の質量を表す。 α は雪取り込み率 ($0 \leq \alpha \leq 1$) で、速度の増加と共に増え、高速時の一定値 α_m に漸近する次のような関数で表される。

$$\alpha = \alpha_m (1 - e^{-U/U_m}) \quad (4)$$

ここで、 U は雪崩の速度である。速度の次元を持つ定数 U_m は、図 10 に示すように雪取り込み率が高速時の値の約 63% になる速度を示す。本モデルではこの関係式を用いる。

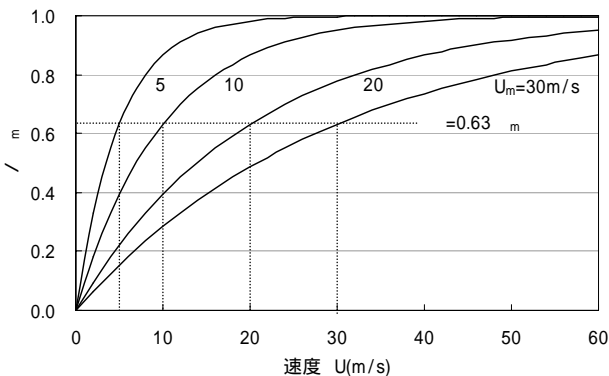


図 10 雪取り込み率の速度依存性

雪粒子の沈殿

高橋と辻本(1998)は直線流路での模型実験により、速度が一定の基準値以下になると全層が非常

に短い時間で停止することを示している。そこで、雪取り込み率と同様に、雪粒子の沈殿速度 v_s にも速度依存性をもたせ、次のような関数を仮定する。

$$v_s = v_{s0} e^{-U/U_s} \quad (5)$$

ここで、 v_{s0} は停止状態での沈殿速度、 U は雪崩の速度である。速度の次元を持つ定数 U_s は、沈殿速度が雪崩停止時の値の約 37% になる速度を示す。

摩擦抵抗力

雪崩の運動に対する抵抗力 R は一般に次式で表される。

$$R = \mu N + BU + CU^2 \quad (6)$$

ここで、 μ は摩擦係数、 N は垂直応力、 U は雪崩の速度、 B と C は定数である。第 1 項は雪崩底面と積雪面との間のクーロン摩擦抵抗であり、第 2 項は雪崩下層部の粘性抵抗、第 3 項は速度の 2 乗に比例する乱流摩擦抵抗 (CU^2) である。第 3 項はおよそ 15m/sec を超えると重要になるとされるため、煙り型モデルでは乱流摩擦抵抗のみを考慮している。しかし、流れ型雪崩の速度は 10m/s 前後であるため、クーロン摩擦抵抗を考慮する必要がある。

5.2 基礎方程式

雪崩の質量保存式

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

ρ : 雪崩の平均密度、 ρ_a : 空気の密度、 ρ_s : 雪粒子密度、 E_w : 空気の連行係数、 U : 雪崩の速度、 P_i : 雪の取り込み率 D : 積雪深、 v_s : 沈殿速度、 A : 雪崩の面積、 P_b : 雪崩の底面長

雪崩中の雪粒子の保存式

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

運動量保存式

$$\frac{d}{dt} \rho U A = (\rho - \rho_a) g A \sin \theta - f \rho g A \cos \theta$$

$$- \left(\frac{1}{2} \rho_a C_D h + \frac{1}{2} f_i \rho_a P_i + \frac{1}{2} f_b \rho P_b \right) U^2$$

θ : 斜面の傾斜角、 g : 重力加速度、 f : クーロン摩擦係数、 f_i と f_b : せん断応力を表す摩擦係数、 C_D : 抵抗係数、 P_i : 空気との境界面長、

雪崩の位置に関する方程式

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

s : 雪崩の位置 (斜距離)

5.3 結果と考察

流下地形、計算条件、初期条件を与え基礎方程式を4次ルンゲクッタ法により数値的に解く。主な計算条件は空気の密度 ρ_a を 1.29 kg/m^3 、乱流摩擦係数 f_1 と f_b を 0.02 、抵抗係数 C_D を 1.2 とし、雪粒子の平均密度 ρ_s 、クーロン摩擦係数 f 、雪崩に取り込まれる最大積雪深 D を観測結果より与える。初期条件は初期速度 1m/s 、初期濃度を 90% とし、初期面積は発生区による。

勾配が緩やかに変化する地形に適用した結果、摩擦係数が雪崩の運動に強く影響していることがわかった (図 11)。

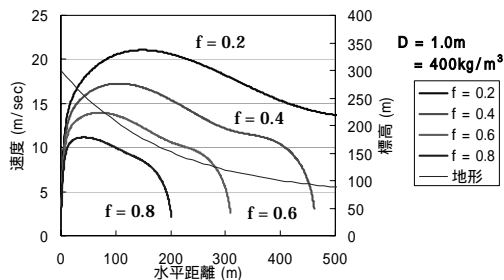


図 11 仮想地形への適用結果

積雪深 $D=1.0\text{m}$ 、雪粒子の密度 $\rho_s=400\text{kg/m}^3$ とし、摩擦係数をざらめ雪の平均値から標準偏差の幅で変化させた。

昭和 36 年 3 月に行なわれ大規模な人工雪崩実験の再現計算では ρ_s をざらめ雪の密度 450kg/m^3 とし、 f をざらめ雪の平均値 0.59 と標準偏差を引いた 0.31 、 D を 0.5 、 1.0 、 1.5 、 2.0m とした。図 12(a) は摩擦係数を 0.31 としたときの結果である。雪崩流下開始直後の加速を良好に再現している。しかし、斜面中腹で実測値は終速度に達するが、計算値は加速を続けている。(b) は摩擦係数を 0.59 としたときの結果である。計算値は流下直後に終速度に達し、斜面下端で停止に至っており、実測値を概ね再現できているといえる。

6 まとめ

判別分析による誘発結果予測手法の検討

雪崩誘発装置ガゼックスの誘発結果を、隣接する気象観測点で得られるデータから予測する手

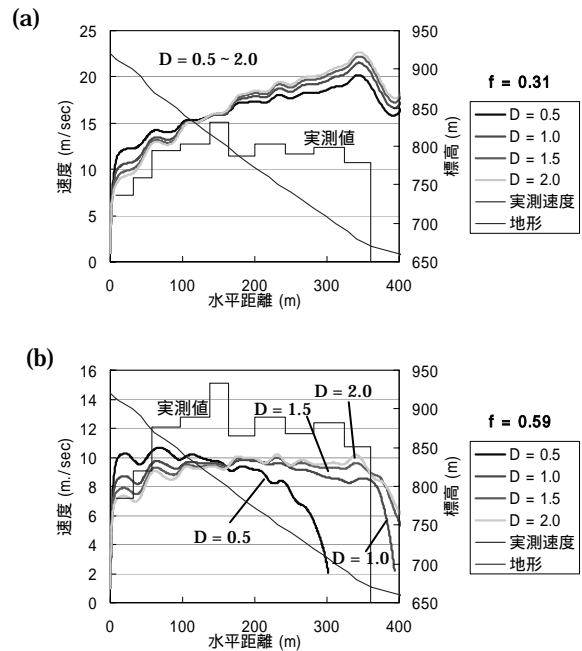


図 12 人工雪崩実験の再現計算

法の検討を行った。得られた判別関数は正答率 $75 \sim 81\%$ の良好な結果を示した。実用的にも同程度の予測精度が期待される。また、気温と積雪に関する要因よりも風速に関する要因が、雪崩発生に寄与することがわかった。

雪中爆破による誘発機構の解明

パイル状装薬法による人工雪崩誘発手法では経験的に、斜面下部で装薬深を浅く、間隔を密にしている。その手法について現地実験を行い検証した。実験結果より爆破孔が押しつぶされることで、斜面下部に圧縮凝固された硬い領域が形成されることが推測された。今後はこの部分について詳細な観測が必要とされる。

雪崩シミュレーション

流れ型雪崩の数値モデルを提案し、実測雪崩に適用した。その結果、概ね実測値を再現できることを示した。今後は摩擦係数および雪粒子の取り込み・沈殿過程について、実験的に検討する必要がある。

(参考文献)

1) 福嶋祐介(1998): 煙り型雪崩の数値モデル, 気象研究ノート第 190 号, 日本気象学会, 59-72