

人工雪崩誘発のための雪中爆破による積雪層の破壊・変形状態について

環境システム工学専攻

大気水圏ダイナミクス研究室 林 徹

指導教官 早川 典生

1. 背景及び目的

雪崩は昼夜の区別なく条件が整えば発生し、道路や車輛に被害を与え、最悪の場合尊い命までも奪ってしまう。雪崩の原因となる不安定な斜面積雪を事前に除去し冬期道路交通の安全を図る事を目的として、人工雪崩は実施された。人工雪崩の誘発方法の中で、危険斜面全体の雪を崩落させるという目的で、危険箇所には爆薬を仕掛けて爆破する方法（以下これを雪中爆破と呼ぶ）は有効な方法である。しかし、手法としては経験な面が多いため、近年爆破による人工雪崩の発生プロセスについての基礎的実験が行われている。その中で爆破による積雪層の破壊・変形の状況は、実験観測と解析が困難であり十分な解明を果たすに至っていない状況にある。そこで本研究は現地実験から、爆破による積雪層の破壊・変形状況、及び装薬条件による雪崩流下状況について解析し、人工雪崩誘発機構の解明を図った。

雪中爆破による雪崩誘発

雪中爆破により雪崩を誘発するには、危険斜面上の積雪層を流下しやすい状態にした箇所（以下これを流下箇所と呼ぶ）と、その前方にあり流下箇所を流しやすくする箇所（以下これを雪崩始動面と呼ぶ、図 1a）参照）の 2 点を爆破により形成することが必要であるとされている。流下箇所の流下しやすい状態とは、爆破により積雪層全体が破壊されている状態、及び積雪層内の抵抗力が駆動力より小さくなった、又は駆動力が抵抗力より大きくなった状態である。雪崩始動面とは流下箇所の前方積雪層内に形成される滑り台状の部分のことである。

2. 研究内容

本研究は以下の 3 点において解析を行った。

装薬配置・装薬量を変化させたときの雪崩始動面の形成状態

爆破による積雪層への影響について

装薬条件による雪崩誘発成否を決める条件を求める

3. 実験概要

実験は、2003 年 2 月 8 日、4 月 4 日、2004 年 2 月 2 日において新潟県南魚沼郡塩沢町柘窪の山腹斜面で行った。2003 年実験は、破壊孔及び周辺の圧縮現象を解明することを目的として、破壊孔周辺の密度測定、破壊孔周辺の硬度測定、破壊孔半径の測定、破壊孔内の残雪の重量及びその密度測定を行った。2004 年実験は、雪崩始動面の形成状況と雪崩流下状況を把握することを目的として、装薬条件を変え実際に小規模な雪崩を発生させ、雪崩の流下状況の調査と雪崩後の断面における雪崩始動面の硬度測定を行った。

4. 雪崩始動面の形成状態

2004 年 2 月 2 日に雪崩始動面の形成状況を把握するため、雪崩誘発後の断面観測及び硬度測定を行った。その結果、図 1a) に示すように、黒い爆破跡を境に右側で積雪層が乱れておらず、左側で乱れているのが見られた。よって黒い爆破跡付近が雪崩始動面と推測され、硬度測定を行ったところ図 1 の b)、c) より雪崩始動面と推測される箇所及び下部付近がこの断面内において相対的に硬度が大きく、圧縮されていることが確認された。



a) 雪崩流下後の断面状況



b) 爆破跡付近の硬度 (単位: kPa)

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q
N													9	68	29	53	32
M											13	38	92	43	35	10	7
L				5	15	21	13	44	8	7	16	102	98	33	15	13	6
K	6	11	6	16	16	51	14	22	43	62	84	109	96	20	18	16	17
J	15	10	11	30	89	56	45	81	83	76	156	154	69	50	33	20	13
I	42	23	29	59	68	110	111	125	124	153	151	130	63	56	27	21	9
H	15	13	21	77	96	144	61	55	80	155	75	114	88	86	39	33	
G	8	31	34	110	118	83	21	43	74	68	65	77	119	76	27	78	
F	21	122	39	182	156	78	16	48	60	42	22	46	49	79		33	
E	67	146	99	148	136	79	143	127	117	62	78	86	74				
D	100	61	106	116	75	60	104	137	85	71	75	81	102				
C	54	100	89	92	85	88	19	71	76	53	55	57	69				
B	60	58	89	59	69	62	77	44	63	63	80	68					
A	57	33	57	68	54	47											

c) 硬度を相対的に色分けした図

(単位: kPa、平均値=63kPa、平均値より大きい値を濃く塗っている。また 100kPa を超えた値は更に濃く塗っている)

図1 雪崩流下後の断面状況及び硬度測定 (2004年2月2日実験)

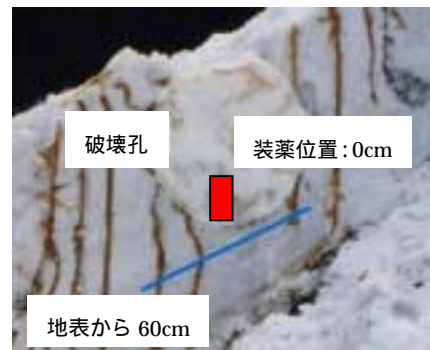
5. 爆破による破壊孔周辺の積雪層への影響

雪崩始動面は、爆破跡付近に形成され、その積雪層内において相対的に圧縮されていることが研究において確認された。そこで、基礎

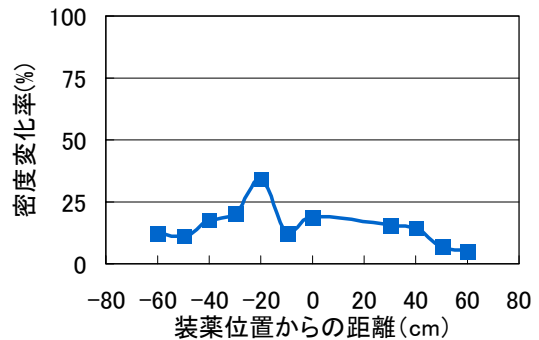
的実験として、積雪層を崩さないように積雪層内で爆破させ、破壊孔として爆破の影響を残し、それを詳しく調査することで破壊孔周辺の積雪層の圧縮現象を解析することを行った 2003年実験について述べる。

5-1 爆破前後の密度の比較による破壊孔周辺の圧縮幅の調査

同一層において爆破前の密度と爆破後の破壊孔周辺の密度を比較し、爆破後に増加ならば破壊孔周辺が圧縮されたとして調査した。その結果、破壊孔縁から 10cm 程度において密度の増加が顕著であった。また、測定位置に関しては破壊孔下部付近において顕著に密度増加が見られ、更に装薬位置から谷側の増加割合が多かった(図2、表1参照)。よって、破壊孔周辺の圧縮現象と、雪崩始動面が爆破跡付近に形成されていたことを考慮して、雪崩始動面を形成する装薬配置において、圧縮部を形成できる破壊孔下部谷側付近を意識して装薬配置をしたほうが良いことを示唆していると考えられる。



(a) 測定箇所 (破壊孔下部、地表から 60cm、しまり・ざらめ層)



(b) 密度変化率 (爆破前後の密度変化の割合) 図2 破壊孔下部の密度変化

(2003年4月4日実験、装薬量 300g)

表1 破壊孔下部の密度変化について
(2003年4月4日実験)

装薬方向	爆破前密度 (g/cm ³)	装薬量(g)					
		300			200		
		測定値範囲 (g/cm ³)	変化率範囲 (%)	平均(%)	測定値範囲 (g/cm ³)	変化率範囲 (%)	平均(%)
山側	0.554	0.562~0.636	5.0~18.9	12.1	-	-	-
谷側		0.594~0.718	11.0~34.2	18.2	0.601~0.644	12.4~20.3	15.4

5-2 破壊孔の形成とその周辺の圧縮現象の再現

5-2-1 破壊孔算定式の検証

爆破による積雪層の破壊孔半径を推定するための式として以下に示している森末(1997)が考案した実験式¹⁾が挙げられる。この式の検証は過去にも行われているが幾分足りないと思われる。よって、この観測場所において適用できるかということも含め検証した。

$$L = d \cdot f_H(H) \cdot f_{VF}(V, F) \cdot f_R(R) \cdot R^3$$

$$\left\{ \begin{array}{l} f_H(H) = \sqrt[4]{H} \\ f_{VF}(V, F) = \frac{V}{F} \\ f_R(R) = \left(\sqrt{1 + \frac{1}{R}} - 0.41 \right)^3 \end{array} \right.$$

ここに、d はてんそく係数 (d=1.2)、H は雪面からの装薬位置(m)、V は爆速 (m/sec)、F は火薬力(1・atm)、R は破壊孔半径(m)である。

上記式群をまとめると式(1)のようになる。

$$R \left(\sqrt{1 + \frac{1}{R}} - 0.41 \right) = \left(\frac{L \cdot F}{d \cdot \sqrt[4]{H} \cdot V} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

よって、式(1)を近似することにより破壊孔半径 R を求めた。破壊孔半径の測定値は 2003年2月8日、4月4日の共に装薬量 300g、200g において測定したものをを用いる。図3に示すように測定値と計算値を比較した結果、装薬量、積雪条件に関らず測定値と程よく合うとことを確認した。

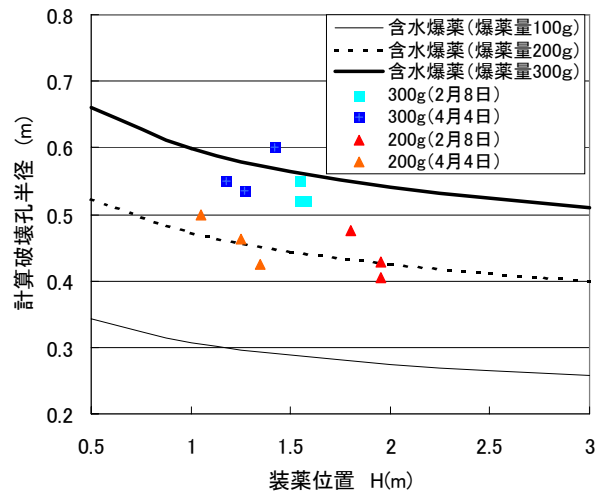


図3 装薬位置 H と計算破壊孔半径 R の関係
(線：計算値、点：測定値)

5-2-2 破壊孔周辺の圧縮幅の推定

次に爆破による破壊孔周辺の圧縮現象を、

「積雪層内で爆破が起きると、始めに破壊・融解・蒸発が起き、次に圧縮され、破壊孔と圧縮部ができるという流れが瞬時に起きるとする。ここで、破壊孔周辺の圧縮現象は球状に広がるとし、この過程で破壊孔周辺の積雪層を圧縮幅 (R) で圧縮して破壊孔を押し広げるものとする。」と仮定(図4参照)し再現することを試みた。推定手順は、爆破による熱量がどのように使われているかを推定し、その熱量を用い、仮定に沿って計算を進める、というようになる。

爆破による熱量 E を下式のように消費されたものと仮定する。

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 \quad (2)$$

ここに、E₁ : 積雪層を破壊する熱量(図4)、E₂ : 積雪層を融解・蒸発する熱量(図4)、E₃ : 積雪層を圧縮する熱量(図4)、E₄ : 使用されなかった熱量

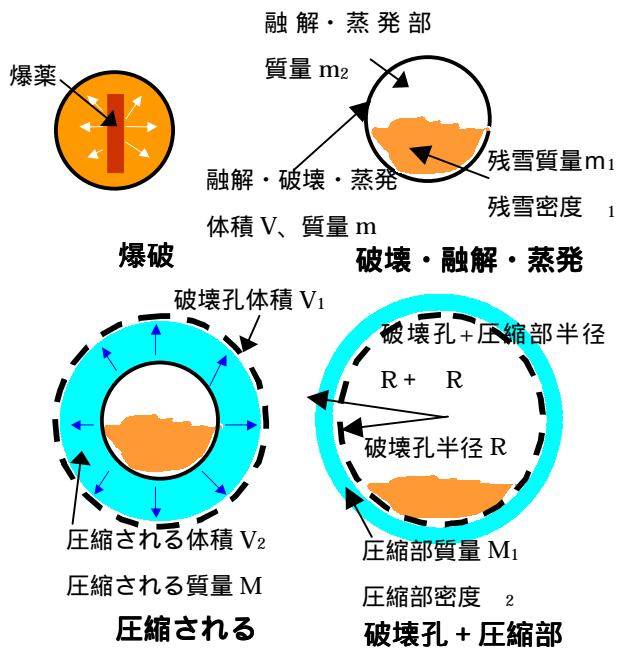


図 4 本研究で考えた積雪層の爆破のメカニズム(実際の爆破は、 ~ が一瞬でおきる)

積雪層を破壊するエネルギー E_1 の推定は、Mellor の図⁽²⁾より爆破前密度 ρ の時の雪の圧縮破壊強度 P (kPa) を求め、その破壊される体積 V (m^3) を乗じることにより推定する。積雪層を圧縮するエネルギー E_3 の推定は圧縮強度 p (kPa) を爆風圧より推定し、圧縮される体積 V_2 (m^3) を乗じることにより推定する。積雪層を融解・蒸発するエネルギー E_2 の推定は、破壊と圧縮に使用したエネルギーは発生するエネルギー E の数%と推定されたため、殆どのエネルギーが融解・蒸発に使用されるとし、発生したエネルギー E から E_1 、 E_2 、 E_4 を引いた値とする (使用されないエネルギー E_4 を 0 とする)。

破壊孔縁からの圧縮幅 R は、式(3)の用に考える。この式は、圧縮部の質量 M_1 が圧縮される箇所の質量 M と等しいとした式

であり、破壊孔及び圧縮部が球に広がると仮定した簡素な式である。圧縮部の密度 ρ_2 は破壊孔周辺の密度測定で得た装薬位置から 60cm (すなわち、破壊孔の縁沿い) の密度の平均値とした。

$$M = M_1 = \left(\frac{4}{3} (R + R)^3 - \frac{4}{3} R^3 \right) \times \rho_2 \quad (3)$$

ここに、 M : 圧縮される箇所の質量 (g)

M_1 : 圧縮部の質量 (g)、 ρ_2 : 破壊孔縁沿いの平均密度 (g/cm^3)、 R : 破壊孔半径 (cm)、 R : 破壊孔縁からの圧縮幅 (cm)

式(3)より R は以下ようになる。

$$R = \left(\frac{3}{4} \frac{M}{\rho_2} + R^3 \right)^{\frac{1}{3}} - R \quad (4)$$

式(4)を用い、図 4 の仮定した爆破メカニズムに沿い、表 2 の実験データを用いて圧縮幅 R を推定したところ、表 3 に示すように爆破による密度増加が見られた破壊孔縁からの距離 10cm に近い値を示した。数 cm の誤差があるのは密度測定器が 10cm の幅を持ったものであることにより、数 cm 単位で測定できないことにあると考える。

表 3 推定された破壊孔縁からの圧縮幅 R

測定年月日	装薬量(g)	破壊孔縁からの圧縮幅 ΔR (cm)
2003年2月8日	300	8.4
	200	6.5
2003年4月4日	300	7.4
	200	8.3

そして、表 2 から爆破前密度 ρ と諸条件の実験式を求め、爆薬量と爆破前密度 ρ 、そして破壊孔半径算定式から圧縮幅 R を推定する方法を示した。

表 2 破壊孔縁からの圧縮幅 R の計算のための実験データ

測定日	装薬量 (g)	爆破前密度 ρ (g/cm^3)	残雪の密度 ρ_1 (g/cm^3)	残雪の重量 m_1 (g)	破壊孔縁密度 ρ_2 (g/cm^3)	破壊孔半径 R (cm)
2003年2月8日	200	0.401	0.513	36690	0.425	75
2003年4月4日		0.510	0.554	35440	0.533	119
2003年2月8日	300	0.401	0.475	192285	0.434	83
2003年4月4日		0.510	0.537	116790	0.542	99

6. 装薬条件による雪崩誘発成否を決める条件

斜面上の安定した積雪層は、駆動力であるすべり面上積雪の重力の斜面方向成分と抵抗力であるすべり層のせん断抵抗力のバランスが保たれた状態になっている。よって、雪崩はこの状態が崩ずれた場合に発生する。すなわち、雪中爆破を行うことにより雪崩を誘発することは、このバランス状態を崩すことであるといえる。よって、ここでは人工雪崩のメカニズムとして雪崩始動面が十分であるとしたときの、流下箇所での応力状態において、爆破の影響が抵抗力の減少に寄与するとし、雪崩発生成否を決める条件値 F を示唆する。

6-1 人工雪崩誘発成否を決める条件について

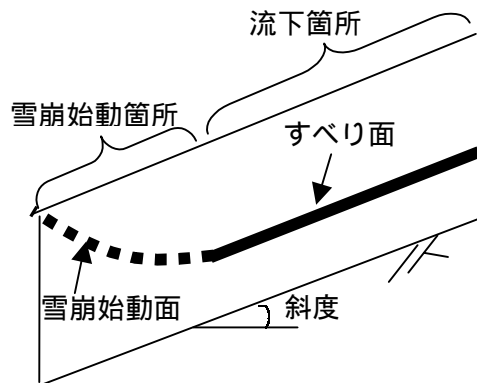


図 5.6 爆破による雪崩誘発の際の積雪断面状態

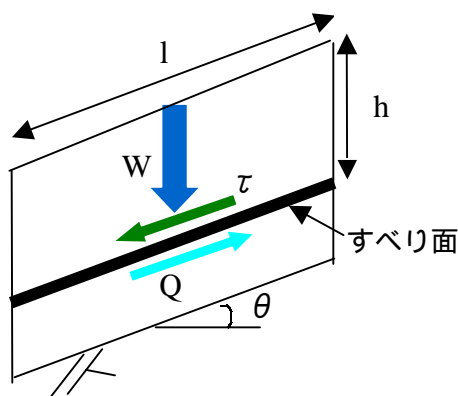


図 5.7 流下箇所の応力状態

：駆動力、 Q ：抵抗力、 W ：積雪の荷重、 θ ：斜面角度、 l ：流下箇所長、 h ：弱層から雪面までの高さ

図 5.6 に示すように爆破により雪崩を誘発する際に、雪崩始動面及びすべり面を形成すると考える。そして、図 5.7 のように流下箇所を考える（幅 b を有する）。いま $A=lb$ なる底面（すべり面）を考え、この面の応力状態は荷重 W 、駆動力 F 、抵抗力 Q からなる。ここで、抵抗力は底面抵抗力のみと考える。

駆動力 F は、

$$\frac{W}{A} \sin \theta = F \quad (5)$$

であり、 $F=Q$ で釣り合っているとすると、

$$\frac{W}{A} \sin \theta = Q \quad (6)$$

となる。この式を

$$F = \frac{QA}{W \sin \theta} \quad , \quad 0 \leq F \leq 1 \quad (7)$$

と置き、 F が $0 \sim 1$ の範囲内のどこかにおいて雪崩発生可否の境界値があるとした。

次に爆破による影響を式 (5.3) に考慮する。爆破がこの面に影響、すなわち、抵抗力項の A の減少に寄与すると考える。

$$A = A_0 lb \quad (8)$$

ここに、 A_0 は A の残留面積の割合である。

$$A_0 = \frac{A - \sum_{i=1}^n R_i^2}{A} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n R_i^2}{A} \quad (9)$$

また R は破壊孔半径であり、森末による実験式 (5.6) を用いる。

$$R \left(\sqrt{1 + \frac{l}{R}} - 0.41 \right) = \left(\frac{L \cdot F}{d \cdot \sqrt[4]{H \cdot V}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

ここに、 L ：装薬量 (kg)、 F ：火薬力 ($l \cdot \text{atm}$)、 d ：てんそく係数 (=1.2)、 H ：装薬深 (m)、 V ：爆速 (m/sec)

6-2 雪崩実験によるFの推定

雪崩始動面の装薬配置が雪崩誘発に十分と思われる2004年の、の3ケース、また2001年1ケース、2002年2ケースを用い、人工雪崩誘発可否の流下箇所の応力バランスFの境界値を推定することを行った。

表5.3に応力バランスFの計算に用いるケース毎の諸条件、表5.4にケース毎の計算結果(計算破壊孔半径、F、測定流下量)を示す。

表5.4より、F値が0.65より大きいと流下箇所の雪崩誘発がなく(2004年 実験)、0.62より小さいと誘発されている(2002年 実験)ことがわかる。よってこの間に雪崩誘発可否の境界値があると推定される。

今後、このFの範囲内で雪崩誘発実験を行うことで、更に雪崩誘発可否の境界値が推定されると考える。

7.まとめ

雪中爆破雪崩誘発の経験的手法からの却として始めに考える必要があるのはその象

の把握であり、それは雪崩誘発状況の全体的な把握と爆破の積雪層への影響の把握であると考える。よって、雪崩始動面が爆破跡付近に形成され、その積雪層内において相対的に圧縮されていることを把握し、爆破の積雪層に対する影響範囲が破壊孔縁より10cm程度であること、そして破壊孔下部谷側において圧縮が顕著であることを把握したことは1つの成果である。そして、爆破による積雪層の破壊現象の再現を試みたこと、及び装薬条件による雪崩誘発成否の条件を求めることは経験的手法の脱却への第一歩であるといえる。

[参考文献]

- (1) 森末晴男、竹内則雄、早川典生(1997): 雪中爆破による積雪層への影響、日本雪氷学会誌「雪氷」59巻4号、p235~p246
- (2) 前野紀一・福田正巳(1986): 基礎雪氷工学講座第 巻「雪氷の構造と物性」、古今書院、p163

表 5.3 計算に用いるケース毎の条件

実験番号	孔数	傾斜 θ ($^{\circ}$)	装薬条件			
			幅B(m)	長さL(m)	装薬深h(m)	体積V(m ³)
2001	8	43	7.0	2.0	2.2	30.8
2002①	16	43	7.0	6.0	1.5	63.0
2002②	32	43	6.8	10.5	1.5	106.3
2004①	12	34	5.0	6.0	2.4	72.0
2004④	10	38	5.0	6.0	2.4	72.0
2004⑤	6	35	5.0	6.0	2.4	72.0

表 5.4 ケース毎の計算破壊孔半径、F、及び測定流下量

実験番号	1孔あたりの 計算破壊孔 半径(cm)	F	測定流下 量Q(m ³)	Q/V
2001	0.534	0.49	7	0.23
2002①	0.564	0.62	18	0.29
2002②	0.564	0.55	35	0.33
2004①	0.527	0.65	0	0.00
2004④	0.527	0.71	0	0.00
2004⑤	0.527	0.83	0	0.00