

中国天山山脈における人工雪崩の動力学的研究

阿部 修*・佐藤篤司*・納口恭明**・中村 勉***
仇 家琪****・徐 俊榮****・姜 逢清****・汪 新軍****

Study on the Dynamics of an Artificial Avalanche in the Tianshan Mountains, China

By

Osamu ABE*, Atsushi SATO*, Yasuaki NOHGUCHI**, Tsutomu NAKAMURA***
QIU Jiaqi****, XU Junrong****, JIANG Fengqing****and WANG Xinjun****

* Shinjo Branch of Snow and Ice Studies,

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention(NIED)

**Nagaoka Institute of Snow and Ice Studies, NIED

Current Affiliation : Atmospheric and Hydrospheric Science Division, NIED

***Nagaoka Institute of Snow and Ice Studies, NIED

Current Affiliation : Faculty of Agriculture, Iwate University

****Xinjiang Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences

Abstract

To investigate avalanche dynamics a joint Japan-China research project was carried out in the Tianshan Mountains, China. The study area was located in the upper reaches of the Gongnaisi River behind the Tianshan Station for Snowcover and Avalanche Research (43° 16'N, 84°24'E, elevation 1,776m), Xinjiang Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences. A pylon was installed in the center of the No. 3 avalanche path. The angles of the slope along the path were variable, their maximum, average and minimum being 51°, 41° and 29°, respectively. Three pairs of pressure sensors and two loadcells with a 0.12 m diameter pressure plate, were mounted vertically to the impact face of the pylon at different heights.

On 18 January 1996, impact pressures of an artificially released dry snow avalanche were recorded. Snow profiles and avalanche debris were also measured. Snowcover was found to be thick depth hoar layers, characterized by its low temperature, large temperature gradient, low density and low strength. The avalanche observed in the Tianshan Mountains was small, but almost reached its a terminal velocity. It was a mixed type of powder and flow types. The impact pressure waves of the avalanche were obtained as a function of height above the ground. Maximum impact pressure of 89 kPa appeared at the height of 1.45 m. According to the successive video images of the avalanche passing the pylon, the velocity was determined to be approximately 8.7 m/s. On the other hand, on the basis of the time lag of the avalanche passing by the first pair of signals of the impact pressure waves, the velocity was calculated to be 7.1 m/s. After the avalanche had passed, the snowcover on the path was completely mixed into the debris. Consequently, densities and temperatures in the debris were almost the same irrespective of location. The maximum height of the snow clouds of the avalanche reached approximately 5.0 m. The shape of the dense flow was estimated by the impact waves and sensor heights. The dense flow in the avalanche declined towards downstream.

Key words: Avalanche dynamics, Internal structure of avalanche, Tianshan mountains

*防災科学技術研究所 新庄雪氷防災研究支所

**防災科学技術研究所 長岡雪氷防災実験研究所 (現所属: 気圏・水圏地球科学技術研究部)

***防災科学技術研究所 長岡雪氷防災実験研究所 (現所属: 岩手大学農学部)

****中国科学院 新疆地理研究所

1. はじめに

近年、雪崩の動力的研究が世界各地で進められ、内部構造を含めて新たな知見が得られてきている。わが国では1986年に起こった新潟県能生町での雪崩災害をきっかけに、大規模表層雪崩の特に運動機構の解明が叫ばれた(小林, 1986; 山田, 1987)。そこで、黒部峡谷でのホウ雪崩の研究体制が強化され、運動中の雪崩の映像記録に成功したり、雪崩の内部構造や雪崩風などの実態が明らかにされた(Kawada, 1988; 黒部峡谷雪崩実験観測研究グループ, 1989)。また、最適な実験地を海外に求めて、日・ノルウェーや日・米の国際共同研究が実施され、雪崩の運動を捉えるための新測定法の開発とともに、雪崩内部の速度分布や雪崩による造粒効果などが明らかにされた(Nishimura *et al.*, 1993; Abe *et al.*, 1995)。ところが中国では、過去に天山山脈などで大きな雪崩災害があったものの、これまで運動中の雪崩の内部構造に関する研究はなされていなかった(Qiu and Hu, 1980; 胡・姜, 1989; 王, 1993; 謝・Севрский, 1996)。雪崩の運動形態は、その場所の気象や積雪によってかなり異なることが知られている(小林, 1993)。そこで、科学技術庁防災科学技術研究所と中国科学院新疆地理研究所では、天山山脈における雪崩の動的内部構造を解明するために人工雪崩実験を主とする日中共同研究を実施した

(Qiu *et al.*, 1997)。現地では、人工雪崩実験の他に雪崩を構成する積雪の物理的性質を知るために積雪断面観測を行った。本研究により、当地域での積雪や雪崩の特性が明らかになったのでここに報告する。

2. 人工雪崩実験

2.1 実験日時

人工雪崩実験は、北京時間で1996年1月18日16時28分に行った。この日の天気は快晴であった。北京時間は日本標準時より1時間遅れている。また、現地と北京の経度差は約2時間の時差に相当する。なお、積雪断面観測はこの前日と翌日に行った。

2.2 実施場所

人工雪崩実験と積雪断面観測は、天山山脈のほぼ中央にある中国科学院新疆地理研究所の天山積雪雪崩観測所で行った。本観測所の地理的位置は、北緯43°16′, 東経84°24′, 標高1,776 mである(図1)。本観測所での1967年～1996年の年平均降水量は837 mm, 最大積雪深の平均値は81 cmである(仇ほか, 1997)。

2.3 実験斜面

実験斜面には、第3雪崩斜面を選定した(図2)。新疆地理研究所では、主な雪崩斜面に番号を付して雪崩の発生を記録している。この斜面では、1968年から1985年まで

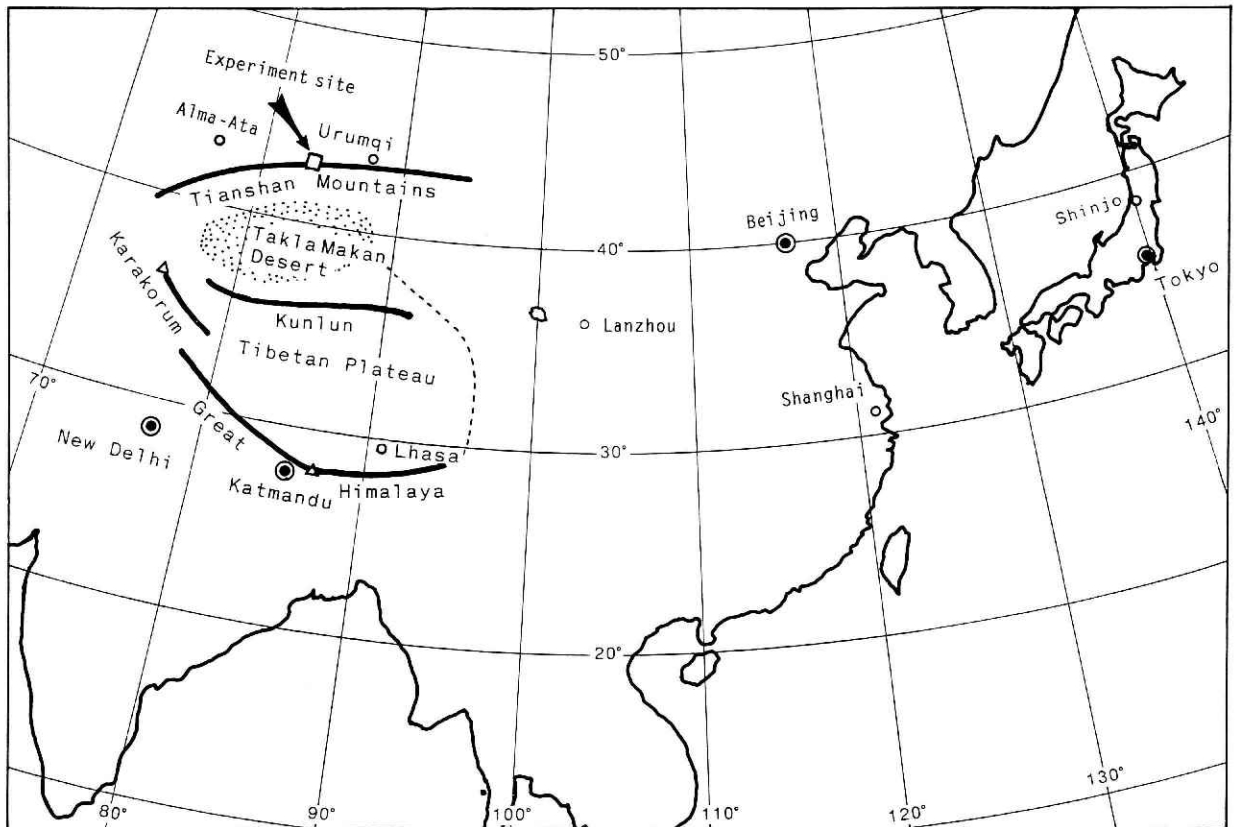


図1 天山積雪雪崩観測所位置図

Fig. 1 Location of experiment site in China.

の18年間に35回の自然雪崩が発生した。人工雪崩の発生地点は標高約2,010 mで、雪崩衝撃圧測定装置(通称パイロン)は標高1,820 mに斜面に垂直になるように設置した。今回の雪崩発生地点からパイロンまでの斜面長は320 mで、その最大、平均および最小斜度は51度、41度および29度で、傾斜方位は南東である(図3)。

2.4 人工雪崩の発生

人工雪崩の発生には約2.5 kgの爆薬(ダイナマイト)を用いた。発生区には深さ約1.5 mの積雪があった。爆薬は雪面に直接置かれ、導火線で点火した。そのため、爆破時刻を正確に予測することは困難であった。

2.5 測定項目

(1)雪崩衝撃圧

パイロンは, Clayton *et al.* (1992) の設置例を参考にし、雪崩の衝撃圧に十分耐えうる強度に設計した。高さ5 mの主柱に支柱を設け、さらに雪崩が多少斜めに衝突することも想定して側柱を設けた(図4)。主柱には、雪崩の流下方向にむけて、6つの圧力センサーと2つの受圧板付ロードセルを取り付けた(図5~8)。圧力センサーは2個一組からなり、衝撃波形の時間差から雪崩速度を求めるために、相互の位置をわずかにずらせて設置してある。また、ロードセルには衝撃圧を正確に測定するために、直径120 mmの受圧板を固定してある。それぞれのセンサーの斜面に対する高さ、主柱前面から斜面に沿って突き出たセンサー受圧面までの距離、同じく最も前面にあるセンサー受圧面を基準にしたときの相互間隔および記録計のチャンネル番号を表1に示した。センサーからの信号は、地表に這わせて設置した長さ30 mのキャブタイヤケーブルにより下方の小屋まで導かれ、そこ

で乾電池式のアンプを介して記録計に入力した(図9)。記録計には8チャンネルの内部トリガー付デジタルメモリを用いた。この装置は、短時間なら自動車用の12 V鉛蓄電池で作動する。衝撃波形のサンプリング周波数は1 kHzとし、この場合約30 sec間の記録がとれる。いったん記録したデータはメモリーカードに移され、コンピュータで解析した。なお、記録計を格納する小屋は、

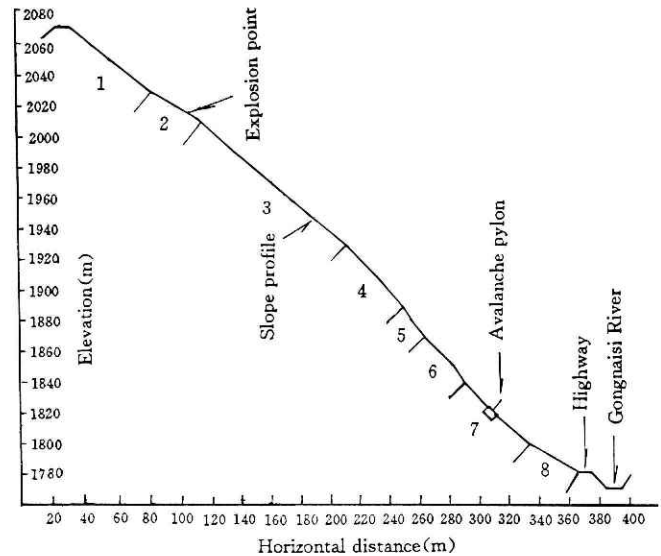


図3 人工雪崩実験斜面プロファイル
Fig. 3 Slope profile of the avalanche path.

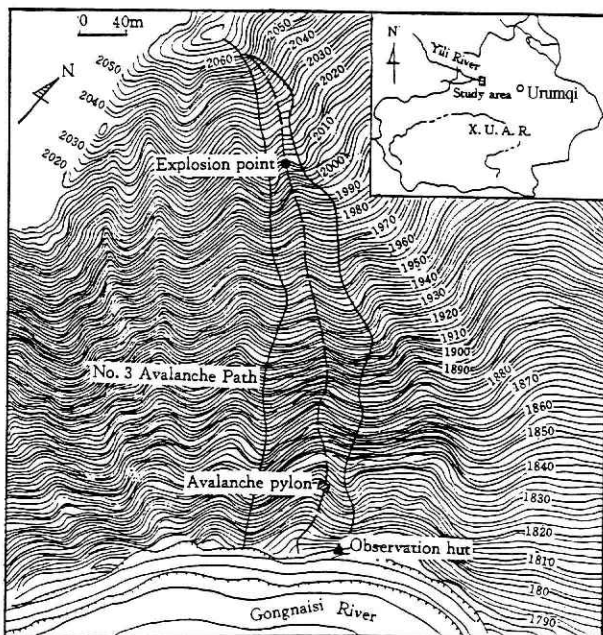


図2 人工雪崩実験斜面地形図
Fig. 2 The number 3 avalanche path of the Tianshan Station.

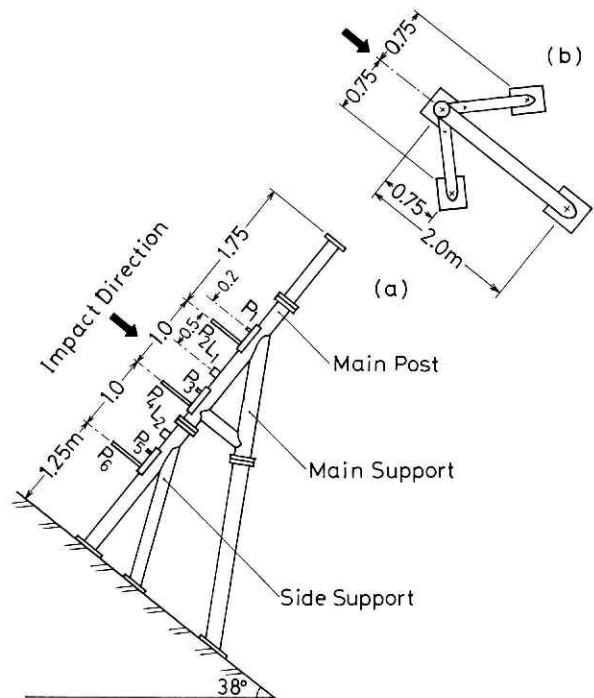


図4 雪崩衝撃圧測定装置(パイロン)
a: 側面図, b: 平面図
Fig. 4 Avalanche impact pylon facility.
a: side view and b: plane view.

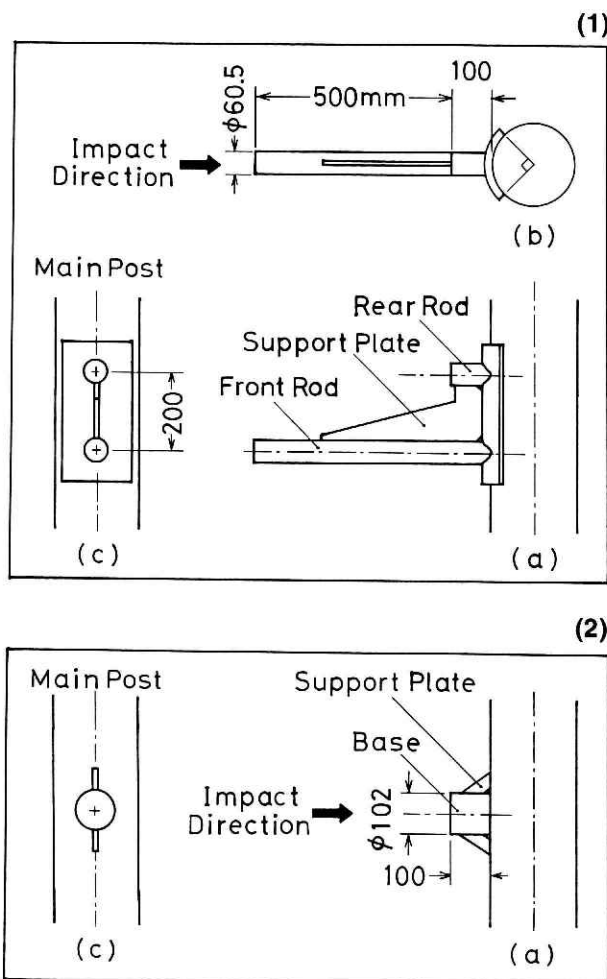


図 5 圧力センサー用ロッド(1)とロードセル用ベース(2)

a: 側面図, b: 平面図, c: 正面図

Fig. 5 Rods for a pair of pressure sensors (1) and base for a loadcell (2).

a: side view, b: plane view and c: front view.

大きな岩陰の安全な場所を選んで設置した。

(2)雪崩の運動形態

本観測所の前庭からビデオカメラにより人工雪崩の映像記録を行った。撮影速度は 30 コマ/s である。上で述べたように爆破時刻を予測できなかったため、爆破音を聞いてからビデオカメラを作動させたので、雪崩発生時の映像は記録できなかった。

(3)積雪断面およびデブリ

実験日の前後に、本観測所にある気象観測露場の隣の平地で積雪断面観測を行い、雪質、雪温、密度及び硬度を測定した。また、ほぐした雪粒子の安息角を測定した。さらに、雪崩停止後には、直ちにデブリ調査を実施し、形状、雪温、密度などを測定した。

なお、積雪断面観測を実施した場所の標高は、雪崩発生地点より約 240 m 低い地点であった。

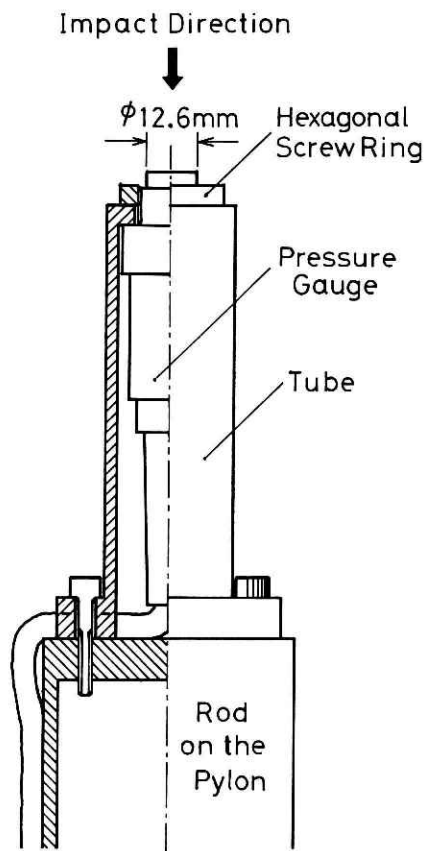


図 6 圧力センサー用取付治具

Fig. 6 Tube for a pressure sensor.

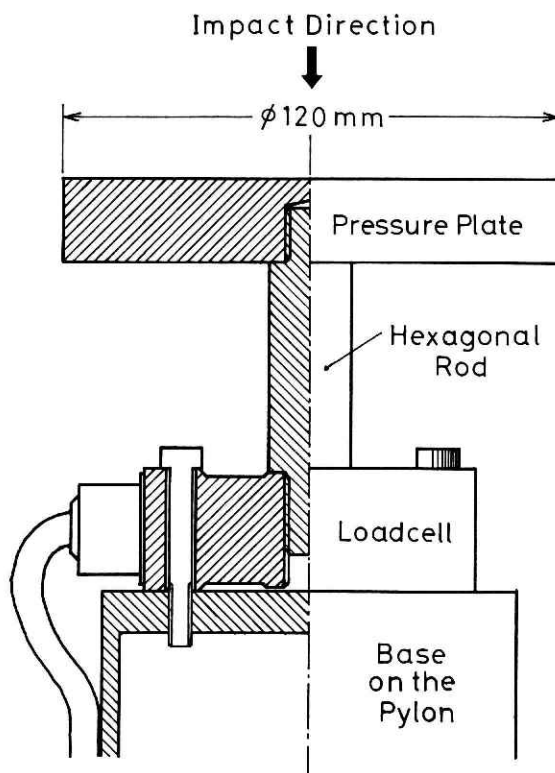


図 7 ロードセル用受圧板および取付治具

Fig. 7 Loadcell with a pressure plate.

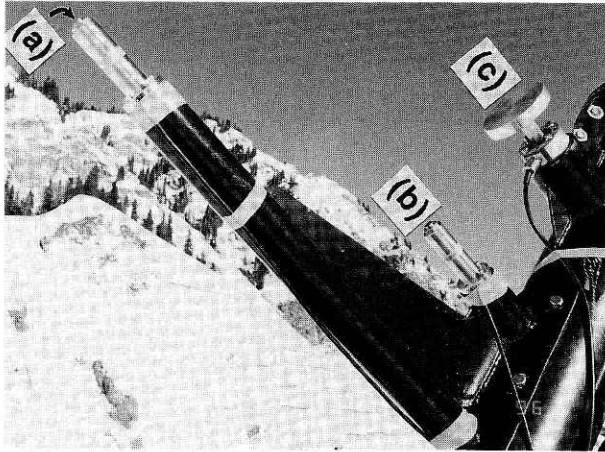


図8 圧力センサーとロードセルの取付状況
a: 前部圧力センサー, b: 後部圧力センサー,
c: 受圧板付きロードセル

Fig. 8 A pair of pressure sensors and a loadcell installed on the pylon.
a: front pressure sensor, b: rear pressure sensor, c: loadcell with a pressure plate.

表1 センサー取付位置およびチャンネル番号
PS: 圧力センサー, LC: ロードセル

Table 1 Arrangement of pressure sensors(PS) and loadcells(LC) on a pylon.

PS & LC	Height (m)	Length(m)		CH No.	
			ΔL		
PS-1	A	3.45	0.213	0.500	1
	B	3.25	0.713	0.000	2
LC-1	2.75	0.200	0.513		3
PS-2	C	2.45	0.213	0.500	4
	D	2.25	0.713	0.000	5
LC-2	1.75	0.200	0.513		6
PS-3	E	1.45	0.213	0.500	7
	F	1.25	0.713	0.000	8

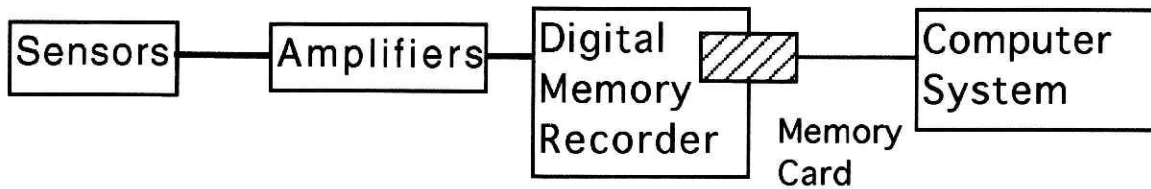


図9 衝撃圧測定・解析ブロックダイヤグラム

Fig. 9 Block diagram of measuring system.

3. 実験結果

3.1 雪崩の規模・分類

発生した雪崩は、小規模に属するものであった。雪崩発生後は、発生区の積雪はもちろん道路上にあった積雪もすっかり流されて無くなっていた。雪崩の運動形態としては、煙型と流れ型の混合型であった。雪崩は、パイロンを通過した後、下の道路のほぼ中央で停止した。したがって、パイロンの支柱からデブリ末端までの斜面長は38 mなので、発生点からパイロンまでの323 mに加えて、到達距離は361 mであった。この見通し角は42度である(図3参照)。

3.2 積雪特性

実験日をはさんで前後日の積雪断面観測の結果を図10-(1), (2)に示す。雪面の温度はいずれも -15°C 以下となっており、地面との間に大きな温度勾配が生じている。特に、1月17日の高さ20 cmと25 cmの間には $68^{\circ}\text{C}/\text{m}$ という極大の温度勾配が存在した。雪質は、ほとんどがこしもぎらめ雪とこしもぎらめ雪で占められている。また、積雪全層密度は約 $160\text{ kg}/\text{m}^3$ と小さく、かなり脆い積雪であった。プッシュプルゲージで測定した硬度は、ほとんどが10 kPa以下と小さなものであった。そのため人

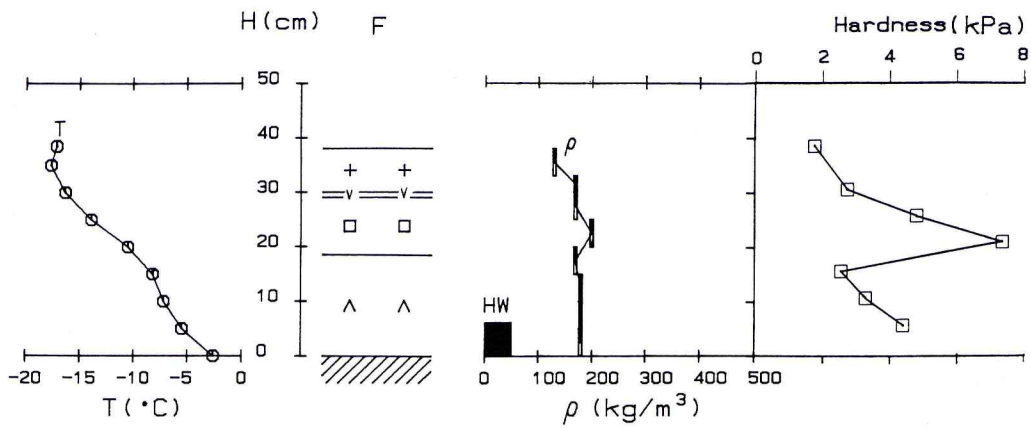
が歩行すると、足が積雪を容易に踏み抜いて地面まで到達した(納口ほか, 1996)。1月17日の高さ25 cmの典型的なしもぎらめ雪をほぐした雪粒子の写真を図11に示す。直径5 mm以上のよく発達した骸晶が見られる。この雪粒子をほぐして測定した安息角は39度であった。

3.3 先端速度

ビデオ映像から1 sおきに得られた雪崩先端部の移動状況を図12に示す。雪崩本体部分は雪煙の中に隠れて見えないが、斜面上の目印に基づいて、雪崩先端の斜面距離と時間の関係を求めた(図13)。あいにく、雪崩の発生時刻がはっきりしないので、最初の画像が得られた時刻を $\Delta T=0\text{ s}$ として描いた。爆破音を聞いてからビデオカメラが作動するまでは5 s程度経過しているはずである。図中の線の傾きが速度を表わす。これによれば、速度にさほど大きな変化がないことから、雪崩はほぼ終端速度に達していたとみられる。パイロンへの衝突速度は $8.7\text{ m}/\text{s}$ であった。なお雪煙は、高さ5 mのパイロンを通過する際にパイロンの頂部とほぼ同じ高さまで舞い上がっていることから(図12-5参照), その最大高さは約5 mと推定された。

(1)

Jan. 17, 1996



(2)

Jan. 19, 1996

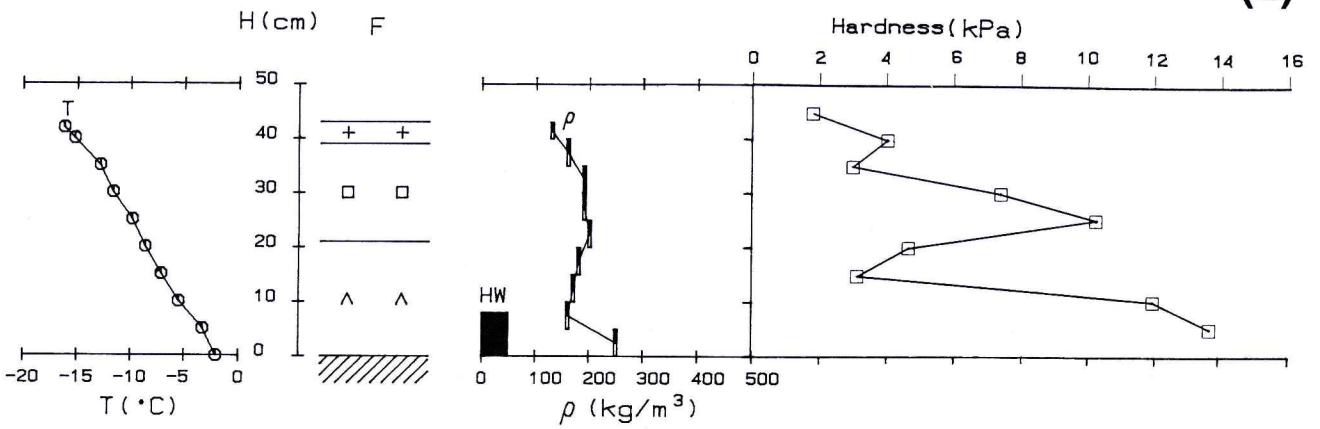


図10 雪崩実験前日(1)および(2)翌日の積雪断面観測結果

Fig. 10 Physical properties of snowcover in the Tianshan Station.



図11 しもぎらめ雪の積雪粒子

Fig. 11 Snow particles of a depth hoar layer.

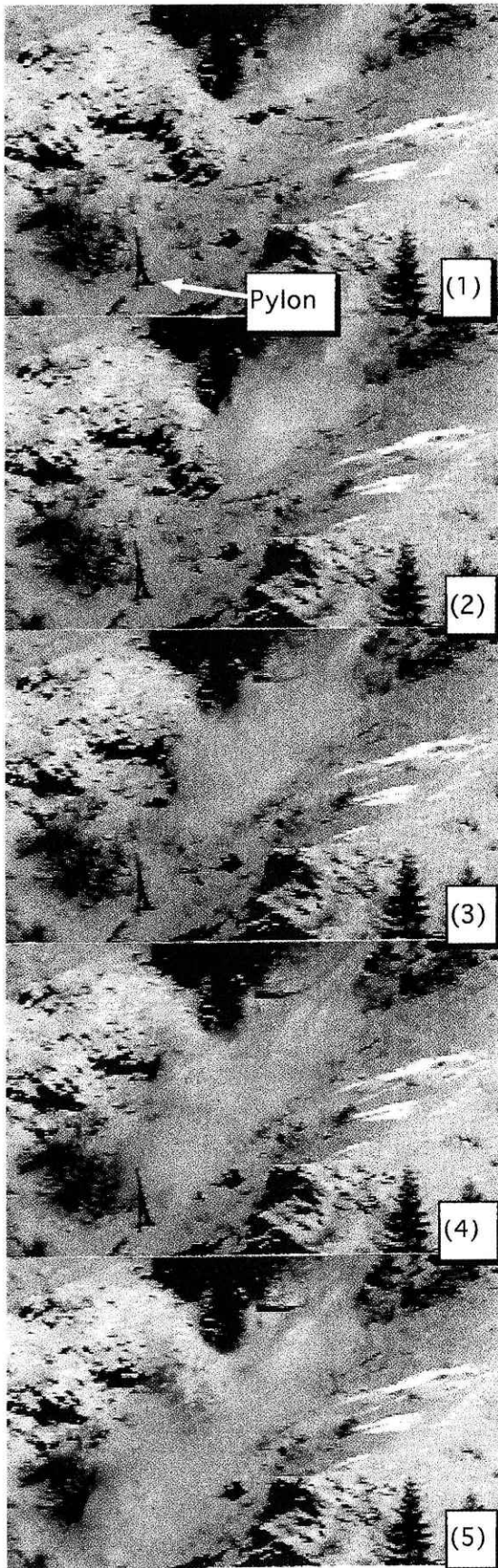


図12 雪崩先端部の流下状況(撮影間隔:1秒)
 Fig. 12 Successive stage of a moving artificial avalanche obtained per second.

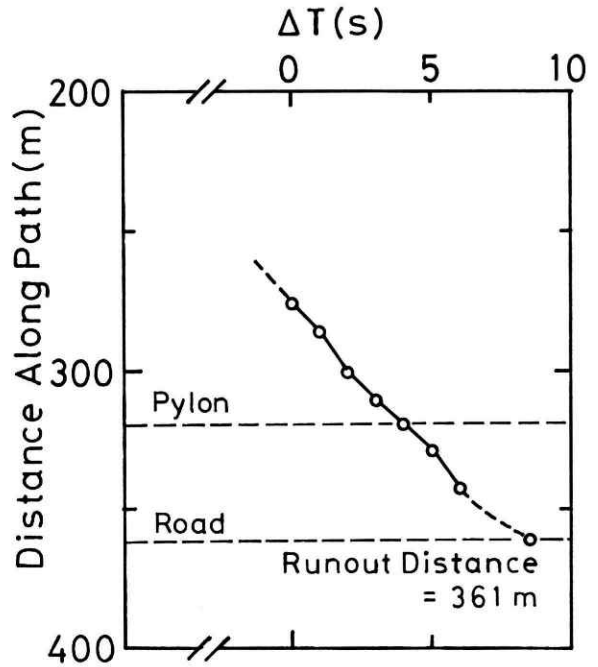


図13 雪崩先端部の斜面-時間曲線
 Fig. 13 Position-time plot of the avalanche.

3.4 衝撃波形

雪崩の衝撃波形は、パイロンの一番下に取り付けた圧力センサーの立ち上がりをトリガーとしてその前後の約30s間記録された。しかし、有効な波形は、取り付けられた8つのセンサーのうち、下側の3つのセンサーの最初の5s間のみであった。そのうち特に頻繁に衝突した最初の1sから3sまでの2s間の記録を図14に示す。これらの衝撃圧は雪煙の中の雪崩本体の衝突によってもたらされたものである。CH6はロードセルによるもの、CH7とCH8は圧力センサーによる記録である。ロードセルにより測定された衝撃波形には、圧力センサーで測定された波形に見られるようなスパイク状の波形が見られない。これは、センサーの取付高の違いというよりは、受圧面の大きさの違いによるものである。すなわち、ロードセルでは直径120mmのアルミ板で衝撃圧を受けているが(図7参照)、圧力センサーの受圧面の直径はわずかに12.6mmと小さい(図6参照)。したがって、圧力センサーの方が衝突物体の不均一性を敏感に測定したことになる。それぞれの最大衝撃圧は、上から28 kPa, 89 kPa, 84 kPaであった(表2)。

一方、一対の腕の長さの異なる2つの圧力センサーで測定されたCH7とCH8の衝撃波形を見比べると、それほど大きな相似性は見られない。これは、両者のセンサーの高低差の0.2mの間に、雪崩本体の形状が大きく変わっていることを意味する。そこで衝突速度 V は、両者の衝撃波形の一番はじめの衝突のみの立ち上がりの時間差 Δt から求めた。すなわち、

$$V = \Delta L / \Delta t \quad (1)$$

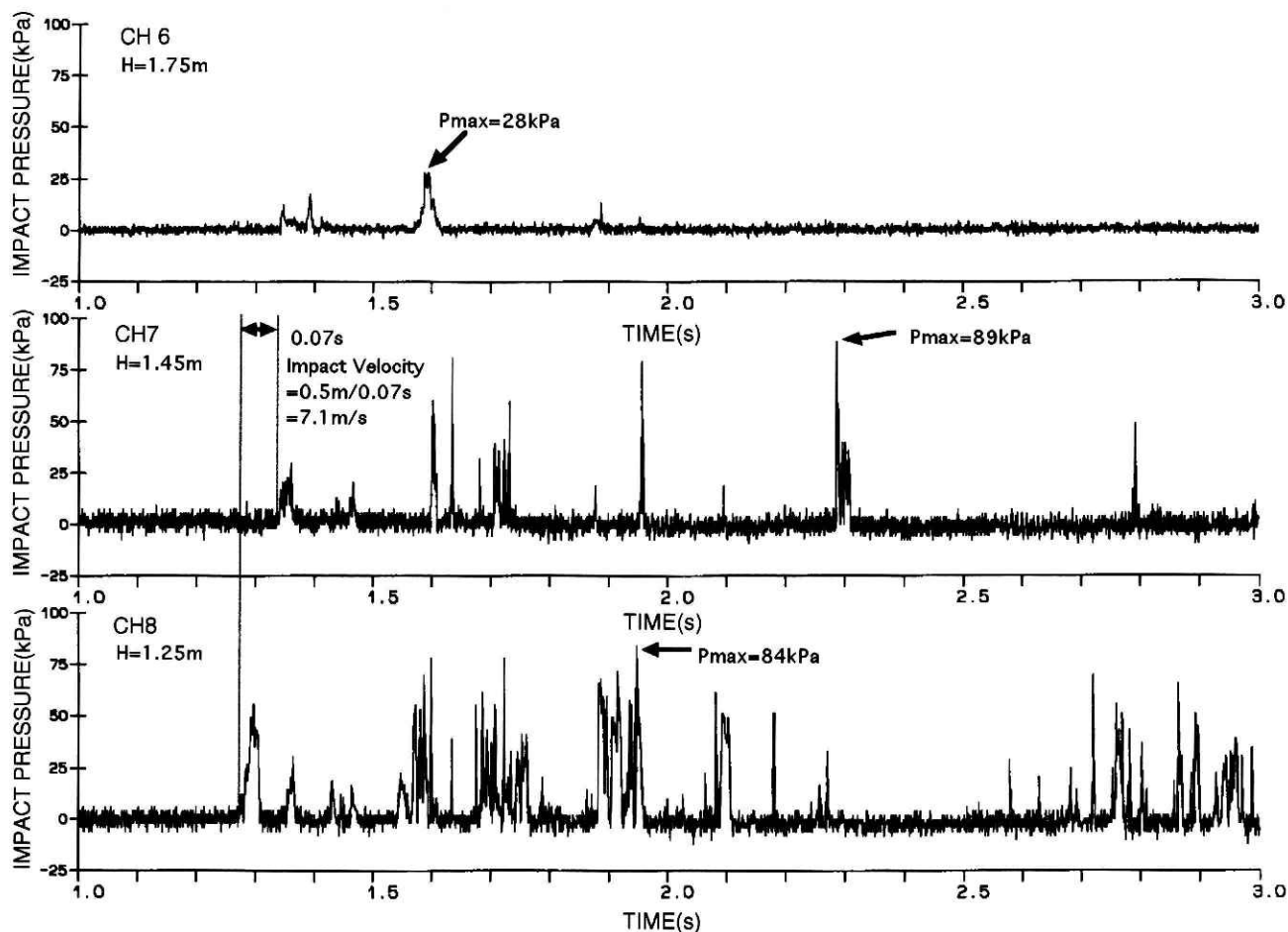


図14 衝撃波形記録
Fig. 14 Impact pressure waves of the avalanche.

表2 最大衝撃圧測定結果一覧
Table 2 Maximum impact pressures (P_{max}) and times.

CH No.	Height (m)	P_{max} (kPa)	Time (s)
6	1.75	28	1.596
7	1.45	89	2.287
8	1.25	84	1.948

ここで、 ΔL はセンサーの間隔で、この場合 0.5 m である (表1 参照)。一方 Δt は、図 14 から明らかなように 0.07 s であったので、 V は 7.1 m/s と求められた。これは、上のビデオ映像から求められた 8.7 m/s よりわずかに小さい。

3.5 デブリ

雪崩停止後、直ちにデブリの外形、雪温、密度を測定した。雪温は -11.2°C で場所にかかわらずほぼ一様であった。また、密度も 390 kg/m³ とほとんど変わらなかった。総体積は約 50 m³ と見積もられた。

4. 考察

4.1 雪崩の内部構造

衝撃波形の立ち上がりが雪崩本体のセンサーへの衝突を物語ることは先に述べた。そこで、取付高の異なる受圧センサーの衝撃波形が発生した時刻から、雪崩本体部の空間分布を求めた。ただし、このとき雪崩の速度は、時間的にも空間的にも一様だと仮定した。斜面からのセンサーの取付高が最低でも 1.25 m であり、雪崩底面から十分離れた場所での剪断速度は小さいと考えられるので、上の仮定にそれほど大きな誤差は無いはずである。雪崩本体の衝突を判別する際のしきい値は、それぞれの衝撃波形のノイズレベルよりわずかに大きな値とした。すなわち、CH 6 : 4 kPa, CH 7 : 8 kPa および CH 8 : 7 kPa である。

図 15 の雪崩斜面に平行に描いた線は、このようにして得られた雪崩本体部の空間分布を示している。すなわち、図 14 の時間軸を空間軸に変換したことになる。ただし、パイロン支柱からセンサー受圧面までの距離がそれぞれ異なるので、衝撃波形には空間的なずれが存在する。そのため、最先端のセンサーの衝撃波形を基準にして、後ろにあるセンサーの波形は ΔL 分だけ進めた。本図によれば、雪崩本体は大小の雪の塊から構成されているが、

それらの外形は、斜面下方に傾いた波状になって押し寄せていることが分かる。いくつもの波があるのは、雪崩走路の凹凸によって形成されたものと考えられる。なお、雪煙の外形はビデオ映像から推定して描いたものである。ただし、雪煙の先端と本体部の先端は一致させて描いた。なぜなら、爆風で発生する雪煙や雪崩停止時の雪煙を除いて、密度の低い雪煙の流れは、それより密度の高い本体部の流れに先んじることはないと考えられるからである。

ところで、最近、各種の模擬物質を用いた雪崩実験が行われており、雪崩の本質的な運動特性が解明されている(Kosugi *et al.*, 1994). Nohguchi and Nishimura (1996)は、球形の軽い模擬物質(スタイロフォーム)を用いて行った雪崩実験から、急傾斜の場合には上で示された雪崩先端の形状と同様の形状となることを明らかにした。すなわち、急傾斜では雪崩の流下速度が増大して終端速度に近づくにつれて、雪崩の頭部が発達して前方に迫り出した形をとるようになるのである(図16)。今回の人工雪崩は、斜面の平均傾度が41度と急であり、しかもほぼ終端速度に達していることから、模擬雪崩と同様の先端形状になったものと推定される。

4.2 雪崩運動による積雪の物性変化

今回の雪崩実験では、雪崩停止後直ちにデブリの調査が行われた。あいにく雪崩発生点での積雪観測は、危険を避けるためなされなかったが、これは実験日の前日の平地の積雪と同等だと仮定して、雪崩によって積雪の温度や密度がどのように変化したかを調べた。表3は、雪崩発生の前後と運動中の積雪の温度と平均密度の変化を示したものである。ただし、運動中の雪崩密度は次式によった。すなわち、衝撃圧を求める際に用いられる式で、

$$P = k\rho V^2 \quad (2)$$

である。ここで、 P : 衝撃圧、 k : 抵抗係数、 ρ : 密度および V : 速度である。ただし、ここでは、衝突速度 7.1 m/s およびロードセルで測定された最大衝撃圧 28 kPa とから密度を逆算して求めた。すなわち、

$$\rho = P / (kV^2) \quad (3)$$

なお、 k には雪塊が衝突する場合に生じる最大衝撃圧に適合する 3.0 を用いた(阿部ほか, 1997)。これによれば運動中の雪崩本体部の密度は、雪崩発生前よりわずかに高い 184 kg/m³ と推定された。ただし、 $k=3.0$ は雪塊の場合の値であり、砕けた雪の値としては大きすぎるの

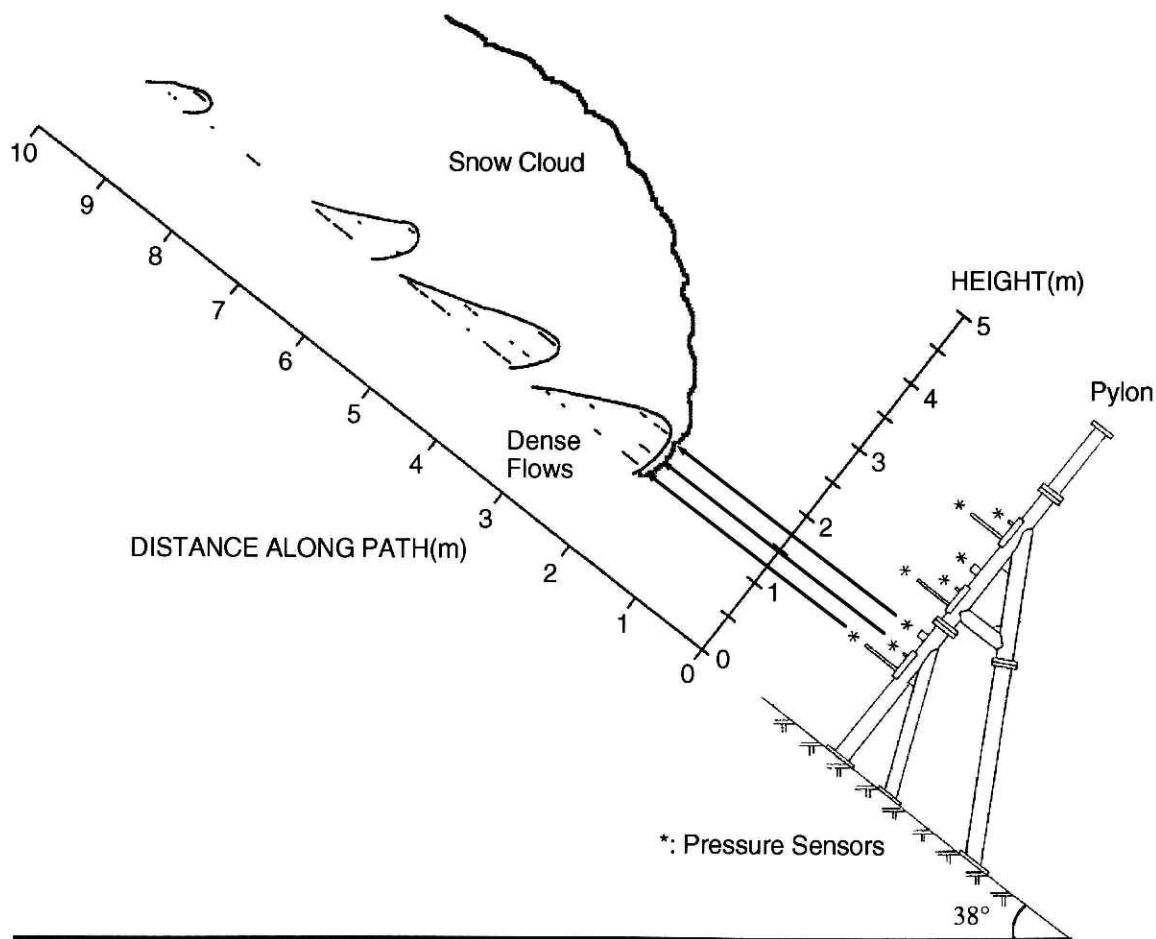


図15 雪崩の内部構造

Fig. 15 Internal structure of the avalanche.

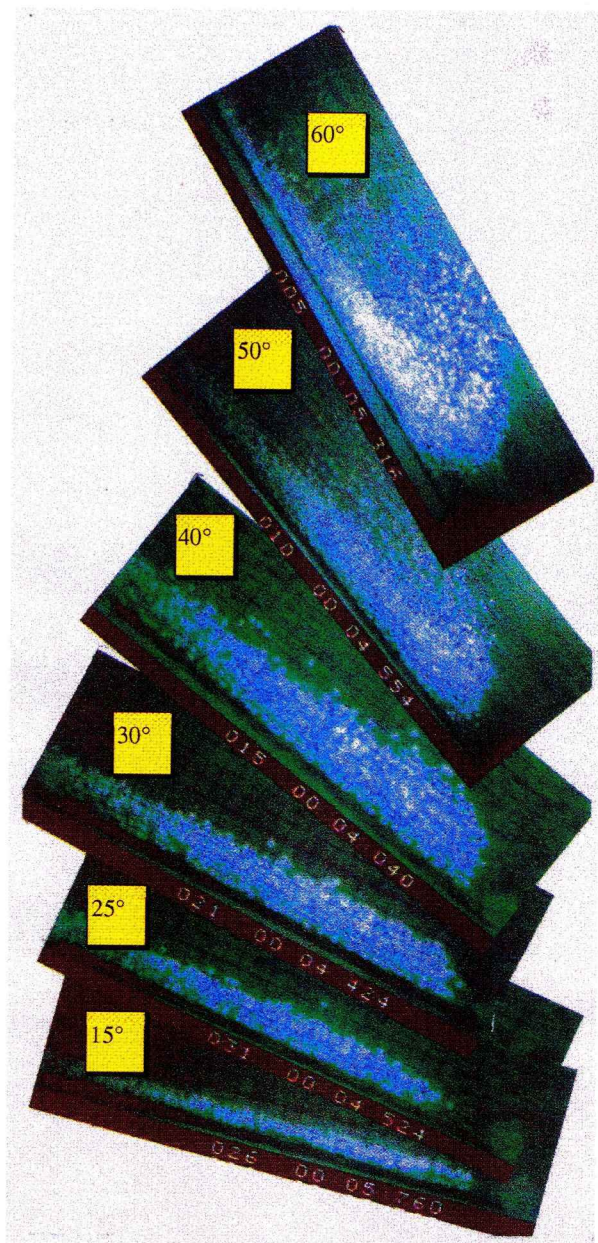


図16 軽い模擬物質を用いた場合の模擬雪崩先端部の形状の傾斜角依存性

Fig. 16 Front shapes of model avalanches using light particles on the different slope angles.

で、実際の雪崩本体部の密度はこれより大きいものと思われる。

前述したように、雪崩停止後の積雪、すなわちデブリの密度と雪温は、場所にかかわらず均一であった。これは、発生区にあった積雪はもとより、斜面上にあった積雪も、完璧に混合されたことを意味する。また、デブリにはスノーボールらしきものはまったく見られなかった。すなわち、雪崩による造粒作用はなかったといえる。これらの事実は、当地方の積雪が非常に脆いため、雪崩によって粉々に砕けたことを示唆している。デブリ密度の 390 kg/m^3 という値は、過去に測定された柵口の 295

表3 雪崩発生前後の積雪変化

Table 3 Change of snow properties depend on the avalanche.

Stage	Mean Density (kg/m ³)	Temperature (°C)
Snowcover(17 Jan.,1996) before the avalanche release	160	-2.6 to -17.1
Dense Flow(18 Jan.,1996) in the avalanche	184	Unknown
Debris(18 Jan.,1996) immediately after the avalanche	390	-11.2

kg/m^3 (佐藤ほか, 1986) や黒部の $260\text{--}390 \text{ kg/m}^3$ (成田ほか, 1989) と同じかやや大きい。ちなみに前野(1986)によれば、雪粒子を氷球とみなした場合の細密充填密度は 550 kg/m^3 であるから、当地でのデブリの密度はこれより小さい。この原因は、図11に示したように粉々に砕けた積雪粒子の形状が不定形で、充填しにくいためである。

5. まとめ

今回の人工雪崩実験により、天山山脈で初めて雪崩内部の詳細な運動形態が記録された。以下に得られた解析結果の要点を示す。

- (1) 当地の厳冬期の積雪は、典型的な大陸性気候を反映して、低温で、しかも急な温度勾配をもっている。そのため、しもざらめ雪の発達が著しく、低密度で脆い積雪層から形成されている。
- (2) 人工雪崩実験により得られたビデオ映像や衝撃波形によれば、今回の雪崩は小規模で流れ型と煙型の混合であり、ほぼ終端速度に達していたと見られる。
- (3) 衝撃波形から雪煙の中に隠されている雪崩本体の形状を推定したところ、前に迫り出した波状になっていることが明らかになった。これは、軽い模擬物質を用いた急傾斜の斜面を流下するときに見られる形状と一致するものであった。
- (4) 雪崩発生直後のデブリ観測によれば、雪崩による造粒作用はまったく認められず、雪温と密度は場所にかかわらずほぼ一様であった。また、その密度はわが国で過去に測定されたものより大きかった。これらは、斜面積雪が流下する過程で積雪粒子の単位まで破壊され、かつ完璧に混合されたためである。

反省点としては、次の二つがある。

- (1) マイクロフォンにより爆破音を記録しておけば、爆破時刻を特定することができた。
- (2) 受圧センサーの取り付け位置をもっと低くしておけば、底面付近の運動を捕らえることができた。

謝辞

本研究は、平成6,7年度科学技術庁科学技術振興調整費「山岳雪崩の動的内部構造の解明に関する研究」によつ

た。関係各位のご理解とご協力に感謝する。人工雪崩実験では、新疆(シンジャン)道路管理局、伊犁(イリ)道路総管理部、鞏乃斯(ゴンゴース)および那拉提(ナラト)道路管理事務所のご協力を得た。本論文は1997年8月に研究代表者(阿部 修)が中国科学院からの招聘で新疆地理研究所に滞在中に作成されたものである。ここに記して感謝の意を表する。

引用文献

- 1) Abe O., Nakamura T., Nohguchi Y., Decker R., Femenias T. and Howlett D.(1995): Observations of snow avalanches on dynamic internal structures at Alta, Utah. Proceedings of the International Snow Science Workshop '94, 385-392.
- 2) 阿部 修・中村秀臣・佐藤篤司・中村 勉(1997): 大型野外シュートを用いた雪崩実験, その2-雪塊の衝撃特性-, 雪氷, **59**, 189-199.
- 3) Clayton A., Decker R., Richardson C. and Abe O. (1992): Installation design of the avalanche impact pylon facility, Alta, Utah. Proceedings of the International Snow Science Workshop '92, 182-190.
- 4) 胡 汝驥・姜 逢清(1989): 中国天山積雪与雪崩. 167 pp, 人民交通出版社, 北京.
- 5) Kawada K.(1988): Studies on the dynamic characteristics of large-scale avalanche observed at Kurobe Canyon, Japan. Tateyama Laboratory of Mountain Sciences, Toyama Univ., 1, 31pp.
- 6) 小林俊一(1986): 新潟県能生町表層雪崩災害に関する総合的研究(代表者: 小林俊一), 文部省科学研究費自然災害特別研究突発災害研究成果, B-60-8, 90pp.
- 7) 小林俊一(1993): なだれ研究の問題点. 地球, No. 170, 459-465.
- 8) Kosugi K., Sato A., Nohguchi Y., Yamada Y., Nishimura K. and Izumi K.(1994): Table tennis ball avalanche experiments. Proceedings of the International Snow Science Workshop '94, 636-642.
- 9) 黒部峡谷雪崩実験観測研究グループ(1989): 黒部ホウ雪崩-黒部峡谷乾雪表層雪崩の研究-. 富山大学立山研究室報告, No.2, 91pp.
- 10) 前野紀一(1986): 雪の構造と圧密機構. 雪氷の構造と物性, 前野・福田編, 131-155, 古今書院, 東京.
- 11) 成田英器・和泉 薫・西村浩一(1989): 雪崩堆積物デブリの構造. 黒部ホウ雪崩-黒部峡谷乾雪表層雪崩の研究, 富山大学立山研究室報告-, No. 2, 45-49.
- 12) Nishimura K., Maeno N., Sandersen F., Kristensen K., Norem H. and Lied K.(1993): Observations of the dynamic structure of snow avalanches. Annals of Glaciology, **18**, 313-316.
- 13) 納口恭明・阿部 修・佐藤篤司(1996): 中国天山の雪にかんじきは要らない. 雪氷北信越, No. 16, p. 106.
- 14) Nohguchi Y. and Nishimura K.(1996): Head formation in light granular avalanches. Proceedings of the International Snow Science Workshop '96, 252-256.
- 15) Qiu J. and Hu R.(1980): The avalanches of December 1996 in western T'ien-shan, China. Journal of Glaciology, **26**, 512-514.
- 16) Qiu J., Xu J., Jiang F., Abe O., Sato A., Nohguchi Y. and Nakamura T.(1997): Study of avalanches in the Tianshan Mountains, Xinjiang, China. Snow Engineering: Recent Advances, edited by M. Izumi, T. Nakamura and R.L. Sack, 85-90, Balkema, Rotterdam.
- 17) 仇 家琪・徐 俊榮・姜 逢清・黄 立度・阿部 修・佐藤篤司・納口恭明(1997): 天山雪崩動力学研究新進展. 干旱区地理, 新疆地理研究所, **20**, 1-8.
- 18) 佐藤和秀・川田邦夫・矢野勝俊・西村浩一・和泉 薫・小林俊一(1986): 柵口表層雪崩の構造と規模. 新潟県能生町表層雪崩災害に関する総合的研究(代表者: 小林俊一), 文部省科学研究費自然災害特別研究突発災害研究成果, B-60-8, 23-28.
- 19) 謝 自楚・Севрский Н.В.(1996): 天山積雪与雪崩, 173 pp, 湖南師範大学出版社, 長沙.
- 20) 王 彦龍(1993): 川藏公路沿線雪害与防治. 221 pp, 海洋出版社, 北京.
- 21) 山田 穰(1987): 能生町雪崩災害の被害・発生状況の概要. 防災科学技術研究資料, No. 117, 1-12.

(原稿受理: 1998年9月3日)

要 旨

日中共同で天山山脈において初めての人工雪崩実験を行い、雪崩内部の詳細な運動形態を明らかにした。以下に得られた成果の要点を示す。

- (1) 当地の厳冬期の積雪は、典型的な大陸性気候を反映して、低温で、しかも急な温度勾配をもっている。そのため、しもぢらめ雪の発達著しく、低密度で脆い積雪層から形成されている。
- (2) 人工雪崩実験により得られたビデオ映像や衝撃波形によれば、今回の雪崩は小規模で流れ型と煙型の混合であり、ほぼ終端速度に達していたと見られる。
- (3) 衝撃波形から雪煙の中に隠されている雪崩本体の形状を推定したところ、前に迫り出した波状になっていることが明らかになった。これは、軽い模擬物質を用いた急傾斜の斜面を流下するときに見られる形状と一致するものであった。
- (4) 雪崩発生直後のデブリ観測によれば、雪崩による造粒作用はまったく認められず、雪温と密度は場所にかかわらずほぼ一様であった。また、その密度はわが国で過去に測定されたものより大きかった。これらは、斜面積雪が流下する過程で積雪粒子の単位まで破壊され、かつ完璧に混合されたためである。

キーワード：雪崩の動力学，雪崩の内部構造，天山山脈