

妙高土石流発生源に対する積雪面からの考察

中 俣 三 郎*

Some considerations on the causes of 1978 landslide hazard in Myōkō
from the viewpoint of snow cover

by

Saburō NAKAMATA

(Abstract)

On May 18, 1978, we had a severe hazard caused by flow-down of earth flow along Shirota-giri River in Myōkō-Kōgen Town, Niigata Prefecture.

We investigated the causes of the landslide as starting phenomenon of the hazard with the following results.

- (1) The weather condition, especially a large quantity of melting snow caused by a spell of fine weather and the breakdown of the road by the snow pressure effecting on the slope were closely related to the occurrence of the landslide.
- (2) From the weather data obtained at the nearest spot, we computed the amount of daily snow melt as 20 to 85mm/day, on the average 43mm/day. So maximum 1.5 ton/day of water is estimated to have run into the underground of the slided area.
- (3) Concludingly, we assumed that firstly some cracks were formed on the road crossing the slope by the covering snow pressure, and then the much meltwater ran into the cracks to help the breaking of the road.

I は じ め に

1978年5月18日, 妙高々原町白田切川上流の南地獄谷で発生した斜面崩壊に起因する土石流災害について, 発生源の積雪関係を調査した結果, 連日の晴天による大量の融雪や雪圧による道路の破損など斜面崩壊を促した有力な因子とみられ, これらの関係を中心として究明した。

斜面の崩壊については自然崩壊は別として, 地形地覆の変更という人為的な誘因か, 或は地震, 豪雨, 雪崩など自然条件の異常が誘因としてあげられよう。今度の崩壊はこれらの風雨, 地震などの因子はなく, 残雪期而も晴天続きの中で発生した。

従って残雪期の融雪が集中豪雨に匹敵するような異常性を示したか, 又急斜面を横切る道路が融雪期の積雪グライドの増加に伴って大きな雪圧をうけどのような破壊を起したか, 当然避けることのできない問題点であろう。

この災害発生直前の崩壊斜面に対する観察資料がなく, 崩壊時どんな特殊事態が発生したか知ることが

* 新潟大学積雪地域災害研究センター

できない以上、できるだけ発生前後の確実な資料に基づいて崩壊原因を究明するほかない。

積雪のみが崩壊の直接原因と考えられる例として雪崩の発生に伴う斜面崩壊、或はそのデブリによる河川の閉塞などあげられるが、当時の状況が全く不明の現段階ではこれらを探りあげることができない。

又融雪水、雪圧などをとりあげるためにはこの斜面が地質的に軟弱な地盤であることが前提条件であり、これらはむしろ斜面の崩壊を助長した因子として考えるのが適当と思われる。

Ⅱ 1977～1978年冬の積雪状況

Ⅱ-1 崩壊地位置

土石流の発生源となった南地獄谷、通称要と称される崩壊地は東経 $138^{\circ}07'$ 、北緯 $36^{\circ}54'$ 付近に位置する。主峰妙高山(2,446 m)と外輪山の赤倉山(2,141 m)との間をぬって白田切川が東へ向って流出する。この川にかかる白滝より上流の右岸斜面が崩壊した。崩壊上縁は標高1,600 m附近で斜面を横切る林道をはば境界とし、下縁は斜面が白田切川におちこむ標高1,500 m附近で崩壊斜面はほぼ東方に對面する。

Ⅱ-2 平野部(田切地区)の積雪状況

発生源(崩壊斜面)の積雪は不明のため、できるだけ近い観測点として田切地区にある頸南消防署を選んだ*¹ここは崩壊地から6.7Km東方に位置し標高535m、発生源との標高差約1,000 m、国道18号線と新赤倉に通ずる道路との交叉点に設けられている。

1977～1978年冬の積雪経過を図-1に示した。

最大積雪深 290 cm, 2月26日
根雪期間 12月19日～4月20日, 123日間
積雪累計 1,479 cm

この積雪経過を最近5ヶ年間の資料と比較するため表-1に月別の値を示した。

表-1から最大積雪深の起日は2月26日で最近5ヶ年間では最も遅く出現した。

2月中の降雪累計が650 cmで例年の2倍以上の大きな値を示した。

消雪は4月20日で最近では最も遅い。

などの特徴があげられるが最大積雪深の起日も昭和49年と一日の遅れにすぎない。

この地方としては例年より積雪が多かったが豪雪の表現はとれない。只2月中の降雪、3月後半2回出現した降雪などが原因で一冬の最大積雪重畳の起日は例年より大巾に遅れた事が推定できる。

このように平地積雪の資料からみれば今冬の積雪の異常性は認められない。ただ山間部ではどのような積雪経過をたどったか検討しなければならない。

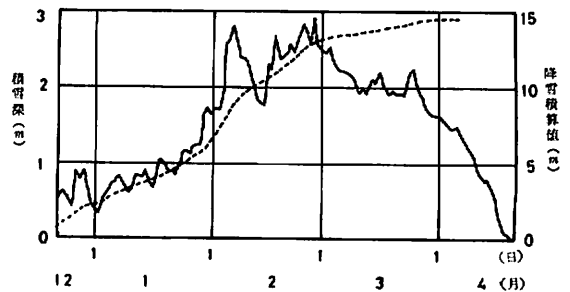


図-1 1977～78年冬積雪経過(妙高々原町)

*1 妙高高原町の災害対策本部と打合せた結果、町の正式の気象観測点として頸南消防署を照会して戴いた。同署は昭和48年観測を開始、署員が常駐し昼夜観測を続けている。48年以前の資料はここでは得られないので高田測候所の委託観測所による外ないが、発生源からかなり距離が遠く相関性に欠ける点や観測項目の不足などを考慮して、同署の5ヶ年間の資料を参考とした。

表-1 最近5ヶ年の降積雪 (頸南消防署資料)

年次	月別積算降雪量(cm)							積雪深(cm)		積雪期間
	11	12	1	2	3	4	計	最大	起日	
1973~1974	157	388	464	220	132	0	1361	320	11.12	153日 11.18~4.19
1974~1975	93	442	528	367	106	0	1536	276	11.24	132日 12.6~4.16
1975~1976	30	286	618	258	131	1	1324	285	11.12	126日 12.9~4.13
1976~1977	80	169	934	277	109	0	1569	310	11.22	105日 12.27~4.10
1977~1978	0	250	455	650	119	5	1479	290	11.26	123日 12.19~4.20

II-3 崩壊斜面付近の積雪

発生源の斜面は白田切川に沿ってNE~Eに面する。冬期間の主風向はNNWと推定されるが川筋に沿って吹き上げる風や、1,600mという高度にある条件を考慮すると平野部(田切地区)より多い4m程度の積雪を適用しなければならない。新潟県積雪分布図からは田切地区の平年値280mに対応して山岳部ではこれより50~60cm多い積雪深が示されているが、現地の地形から吹き溜り的な要素を加え4m程度を適用した。

災害発生の5月18日現地の積雪は1m程度と報導されている。

災害後一週間5月24日現地斜面の積雪を調査した。その結果を表-2に示した。

表-2 残雪の密度

資料No	積雪深	積雪重量	平均密度	雪質
1	60cm	26.9g/cm ²	0.45g/cm ³	ざらめ雪
2	48	24.0	0.50	粒径 %
3	60	24.2	0.40	
4	64	25.7	0.40	
5	63	32.1	0.51	
6	63	31.1	0.49	
7	55	28.9	0.53	
8	71.5	32.3	0.45	
9	59	26.1	0.44	
10	38	21.0	0.55	
11	46	22.8	0.50	

調査場所：赤倉山中腹，標高1,590m

崩壊地から約100m地点

東南に面する斜面

採雪器：内径51mm，長さ1mスノーサンプラー

表-3 氣象觀測值

月 日	3 時					9 時					15 時				
	天候	溫度	濕度	風向	風速	天候	溫度	濕度	風向	風速	天候	溫度	濕度	風向	風速
		℃	%		m/s		℃	%		m/s		℃	%		m/s
4. 18	⊙	3.0	81			☉	10.5	67	SW	2	☉	13.0	60	S	2
19	●	5.1	86			⊙	5.0	84.5	S	2	☉	16.6	55	NW	3
20	⊙	14.0	65	SW	3	☉	10.2	82	NW	1	☉	7.7	88.5	N	4
21	⊙	3.3	88.5			☉	5.0	75	S	2	⊙	13.8	33.5	N	3
22	⊙	2.2	68	S	2	⊙	7.8	59	SE	2	⊙	17.0	31.5	N	1
23	⊙	4.0	57	SW	3	⊙	13.0	46	N	5	☉	19.0	37	NNW	3
24	☉	12.5	67	SSW	5	☉	13.3	65	S	3	☉	20.5	53	SSE	3
25	⊙	11.0	73	NW	1	☉	10.5	80	N	2	☉	12.0	63	N	5
26	⊙	3.0	81			⊙	12.0	46	SE	2	⊙	19.0	30	S	2
27	☉	12.0	44	S	4	⊙	14.0	40	S	4	☉	23.5	29	NNE	5
28	⊙	9.0	63	NW	2	⊙	16.0	60	N	1	⊙	21.0	45		
29	☉	17.5	52	SSW	5	●	15.5	53	SSW	7	●	16.0	73	S	10
30	☉	16.0	73.5	S	10	⊙	16.5	74	SW	7	⊙	24.5	55	S	4
5. 1	⊙	20.0	69	S	5	⊙	26.0	57.5	SSW	9	●	28.0	50	NNE	5
2	●	12.5	88	N	3	☉	12.5	83	N	1	⊙	18.5	30.5	SW	10
3	☉	5.5	60.5	S	3	⊙	16.5	38	S	4	⊙	29	29	N	2
4	☉	12.0	54.5	S	2	⊙	18.0	48.5	SSE	4	☉	33	33	N	6
5	⊙	11.0	58	SW	4	⊙	20.0	58	NW	4	⊙	50	50	N	3
6	☉	8.7	79	W	1	⊙	10.5	45	NE	1	☉	36.5	36.5	N	3
7	☉	11.8	64	SW	3	☉	12.0	81.7	SW	1	☉	63	63	SW	4
8	☉	13.0	86.5	SW	5	⊙	19.5	65	S	4	⊙	62	62	SE	5
9	⊙	16.5	72	S	5	⊙	23.5	54.5	S	5	☉	51.5	51.5	NNE	4
10	☉	15.5	94	SSW	3	●	15.3	91	N	2	●	91	91	NNW	0
11	☉	10.5	90.5	N	2	☉	12.5	85	N	1	☉	74.5	74.5	NW	2
12	☉	8.0	82	S	2	⊙	19.5	64	NW	3	⊙	60	60	NNE	6
13	⊙	11.5	80	S	2	⊙	22.0	57	SW	3	⊙	48	48	SW	3
14	⊙	17.0	77	S	3	⊙	22.0	60	E	3	⊙	42.5	42.5	NNE	3
15	⊙	13.5	72	SW	7	⊙	19.5	65	S	1	⊙	39.5	39.5	N	6
16	⊙	13.5	64	S	3	⊙	22.0	60	E	0	☉	45	45	N	5
17	⊙	17.5	61	SSW	3	⊙	21.0	60	SW	4	⊙	47.5	47.5	S	3
18		20.0	52	SW	4		19.0	62							

(1978年妙高高原町頸南消防署)

天候	21 時				湿度				温度			降雨量 mm	降雪量 cm	積雪深 cm
	温度	湿度	風向	風速	実効	平均	最高	最低	平均	最高	最低			
	℃	%		m/s	%	%	%	%	℃	℃	℃			
●	6.5	86.5			65.1	73.6	87	50	8.3	14.5	1.8	17	0	8
①	8.0	87	SSW	7	69.0	78.1	90	52	8.7	17.1	4.6	3	0	5
◎	4.8	86.5	NNW	3	72.4	80.5	89.5	63.5	9.2	15.5	4.0	0	0	0
①	5.5	61	NNW	1	69.9	64.5	89.5	32.5	6.9	15.2	1.8	0	0	0
①	4.5	63	S	1	65.5	55.4	69.5	27	7.9	17.7	1.0	0	0	0
①	11.0	58	SW	7	60.7	49.5	63	34	11.8	20.7	2.8	0	0	0
①	10.0	74	SW	3	61.9	64.8	75	52	14.1	20.8	9.0	0	0	0
①	7.0	68			64.6	71	81	43	10.1	14.0	3.5	1	0	0
◎	7.5	54	S	3	61	52.8	81	29	10.4	19.5	2.5	0	0	0
◎	12.0	55			55.1	42	56	28	15.4	24.0	10.0	0	0	0
◎	13.0	68	S	5	56.3	59	78.5	39	14.8	31.0	5.0	0	0	0
◎	15.5	75	S	10	58.4	63.3	85	50	16.1	17.5	10.5	1	0	0
①	20.5	66.5	S	10	61.1	67.3	74	54	19.4	27.0	15.5	0	0	0
◎	16.5	87	NW	0	62.5	65.9	87	46	22.6	31.8	15.5	2.5	0	0
①	10.5	45	SWW	2	62.2	61.6	87	30.5	13.5	20.0	8.3	1.5	0	0
◎	12.5	52	S	2	57	44.9	63	28.5	13.6	29.0	4.6	0	0	0
◎	13.5	56	S	3	54.3	48	58.5	31	16.9	26.0	11.8	0	0	0
①	11.0	75	N	3	56.1	60.3	78.5	40.5	16.0	26.0	10.0	0	0	0
◎	10.0	63.5	N	3	56.1	56	79	31	10.4	12.5	6.7	0	0	0
◎	15.3	80	S	3	60.9	72.2	91	61.8	14.5	19.3	11.0	0	0	0
①	17.0	74	S	4	64.2	71.9			17.9	23.3	12.8	0	0	0
◎	18.5	73	S	2	63.9	62.8			21.0	27.5	11.1	0.5	0	0
●	12.5	91	N	3	72.3	91.8			14.4	15.3	11.7	13.0	0	0
◎	11.0	79	S	2	75.3	82.3			12.4	15.5	8.7	1.5	0	0
①	10.0	90	SW	4	74.9	74			14.4	21.5	7.7	0	0	0
◎	17.2	61	S	2	70.9	61.5			18.8	25.0	9.7	0	0	0
①	14.0	73	SW	3	68.6	63.1			19.9	27.5	13.5	0	0	0
①	13.5	60	S	2	65.8	59.1			18.0	27.3	12.0	0	0	0
①	16.5	65	S	3	63.6	58.5			19.8	27.5	12.5	0	0	0
①	22.5	57	S	3	61.4	56.4			22.5	29.5	15.5	0	0	0

調査場所は崩壊地の上方がまだ危険のため立入りできず約100mはなれた東南に面する斜面で測定した。ここは崩壊斜面と方位が異なり日照条件が良く地表の露出も各所にみられた。而し崩壊地上方の斜面は24日現在、大半が70cm程度の積雪でおおわれていた。残雪の平均密度は表-2のように採雪場所により異同があるが0.4~0.55 g/cm³、平均0.48を示した。従って斜面はまだ300mmの雨量に相当する残雪を貯えている事を示す。

崩壊地の上方斜面は、1,800m高度付近の尾根筋に近い急斜面と斜面中を走る小さな沢沿いなどが一部消雪し、又南側の斜面には数ヶ所雪崩の痕跡がみられた。

崩壊上縁の破断面は積雪の厚さ1mほどの切断面が残っていて、崩壊と同時に地表面の積雪が張力により切断した状態がうかがわれた。

崩壊時斜面はかなりの積雪をのせたまま切断した。その際の積雪量は24日の調査結果から1~1.5m(0.5~0.7 ton/m²)程度が考えられ、雪崩発生地付近の斜面は雪崩のデブリを更に貯えていた事になるので、積雪の静荷重だけでも大きな負担をかけていたものと考えられる。崩壊した斜面は急勾配のため融雪の前に雪崩を発生することが普通考えられるが、災害の10日前現地を通り下山した一行(高田高校・光国俊夫氏など)の写真から、この斜面はまだ一面の積雪におおわれていて崩壊の前兆は何等みることができない。只注目したい点は崩壊境界となった道路は上方からの雪崩のデブリで埋められている点、又沢を横切る道路も完全に積雪下に埋没している点などである。この事実は後述の積雪のグライドによる雪圧と道路の欠壊との間に大きな結びつきを生ずる。

Ⅲ 災害発生と気象の関係

連日の晴天続きの中で災害は発生した。斜面に積雪がなければ当然起らなかったに違いない。また積雪が少なすぎた場合は融雪水量の補給が長続きしないし、多すぎた場合は果して融雪の最適の条件に雪質がこの時点までに変わっていたか分らない。

既にのべたように例年に比べ積雪は特に多い結果は得られなかった。従ってこの年の融雪のありかたに異常があったのであろうか。

これを確めるためには、融雪を決定する因子である天候、気温、風向風速、日射、方射冷却、蒸発凝縮などをまず検討する必要がある。

表-3に4月18日以降災害発生に至るまでの気象観測値を示した。また図2に冬季(6カ月)の最近5ヶ年間の月別平均気温を示した。

太線は今冬を示し5カ年間を比較すると12、1月が高温であり、2月3月が低温、4月はほぼ平年値、5月高温の傾向がみられる。

このように2月から4月中旬まで低温が続いた結果が融雪の遅れを招き、山岳地に多量の残雪を保つ原因となった。4月末から5月にかけての気温上昇は、既に消雪した平野部(4月20日消雪)は対象とならず山岳部の融雪にのみ大きな影響を与えた。今図-3に4月下旬から5月18日(災害発生)に至るまでの日平均気温を太線で示した。最近5カ年の気温と比べ著しく高い事実が分かる。日最高気温も4月28日、5月1日、真夏日に相当する31℃以上の異常の高温を示し、更に災害発生前4日間は最高気温が27℃以上連続して出現している。日平均気温が例年以上に上昇し始めたのは4月27日からであり5月18日まで21日間の平均は16.8℃となり、これまで5カ年間の同一期間中の平均値を約4℃上廻っている。

このような高い気温がこの地域、この季節に極めて異常な値であるかどうかは過去の観測結果の集積に

またなければならぬ。

而し融雪の条件は気温だけで決定せず、風速、風向、天候、日射、湿度等各種の気象条件によってきまる。現地附近の観測資料は、この融雪量を算出するために必要な詳細な内容を整えていない。従って融雪の異常性を検討するために、融雪量をほぼ推定できるだけの観測値を整えた頸南署の5ヶ年間のデータによることにした。

尚災害発生前日の気温は表-3に示すように15時29℃、21時22.5℃、18日3時20℃、南西の風3~4 m/sが卓越、夜半から早期にかけての気温降下は殆んどなく夜間の湿度も50%程度高温、乾燥強風と極めて融雪には好条件であったことが分る。

風速は観測時の瞬時値のみ記録しているため平均風速は不明である。従って融雪の計算に用いた値は観測地の1/1.5程度を平均風速として採用した。

これらすべて観測値は標高535mにおける値であるため崩壊地の気象との相関を検討した。

気温は高度差による補正0.65℃/100mを適用し観測表中の気温から7℃差引いたものを現地気温とした。風速、湿度について現地と

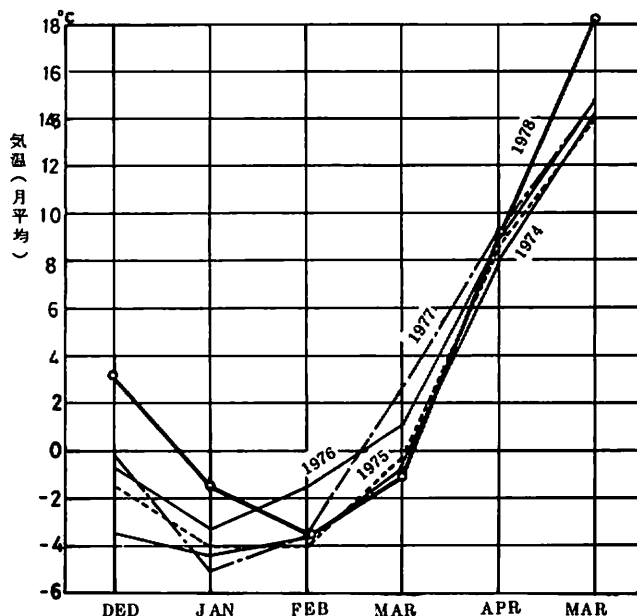


図-2 月別平均気温(1974年~1978年)(妙高々原町)

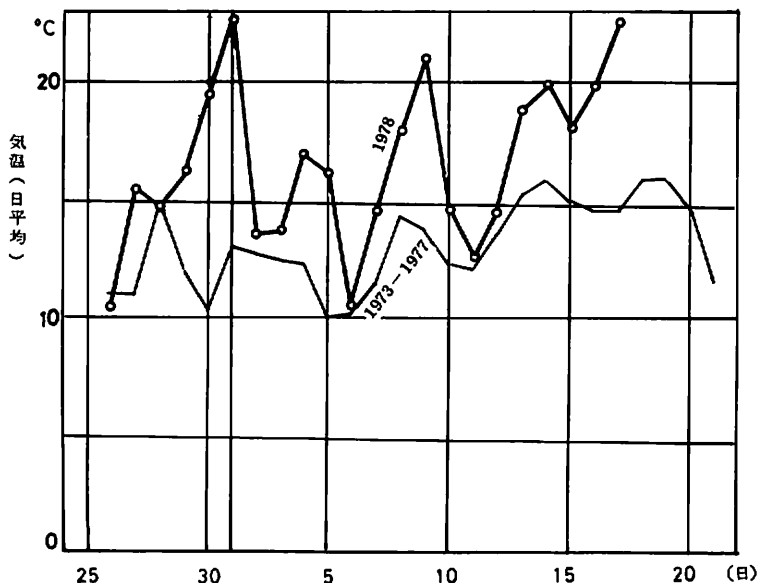


図-3 災害発生前の日平均気温(妙高々原町)

観測点(頸南署)との相関を決める資料は得られない。崩壊斜面は観測点から直視でき7 Km弱の近距離にあることからそのまま採用した。崩壊地は高海拔にあるので風速は増加し湿度は減少すると考えられる。日射雲量は観測値がないので1日4回の天候観測をもとに推定した。

Ⅳ 崩壊斜面における融雪量の算出

Ⅳ-1 融雪経過

1章でのべたように本災害と融雪との関連は誰も否定できない事実である。この融雪の経過を究明しようとすると各種データの不足を痛感するが、幸いに頸南消防署の観測値により日融雪量をほぼ算出することができた。現地気象との対応は勿論正確は期し難いが崩壊に至るまでの融雪水量の定量的解析により、斜面にどのような融雪水が供給されたか、そのめやすを得られることで今後の崩壊の機構究明に役立つものと思う。

まず斜面地表に融雪水が供給されるためには積雪層全体が透水性をもっていなければならない。積雪層中にしまり雪を内蔵している場合積雪表面で融けても底面まで到達しない。専ら積雪粒子の変態に消費される。地熱の供給は積雪初期で殆んど消費され地表は冷却し、地熱による融解は殆んど無視される。従って融雪初期、地表に到達する水量は極めて僅かであり、積雪深が大きく減少しても沈降現象による場合が多く、融解水量の判定にはつながらない。

一般に除雪し積雪断面を観測し雪質から、或は含水の程度から融雪期を判定するのが最も確実である。妙高崩壊斜面の融雪水が何時頃から顕著に地表に供給され初めたか、推定による外ない。先に述べたように現地の最大積雪4 m余、3月後半には平野部に相当量の降雪があった。山岳部ではかなり大量の降雪をみこさなければならない。従って3月末の現地は積雪重量が最大に達した時期とみられる。4月に入ってから気温も平年なみの気温が続いた事から現地は2~3℃程度の気温が推定され、積雪全層がざらめ雪化する段階に達していなかったものとみられる。4月27日から気温が急上昇しこの頃から融雪水の地表への供給が顕著にあらわれ初めた。従って融雪水量の算出は、この融雪が活発になった4月26日以降を対象とした。

融雪水量の算出は既述の地熱による融解を無視し積雪表面の熱収支のみを対象とした。従って融雪量は次の3項目に大別できる。

- 日射による融雪量
- 雪面、天空間の放射による融雪量
- 風、蒸発、凝縮による融雪量

Ⅳ-2 日射による融雪

太陽常数は普通 $1.94\sim 1.95\text{ cal/cm}^2\text{ min}$ と称されているが大気を通して地上に到達する輻射量は大気中に吸収されるので大気の汚染度により異なり、 $1.1\sim 1.5\text{ cal/cm}^2\text{ min}$ 程度とみられる。晴れた雲のない日の日射量(短波長)は上越高田市で3月300, 4月380 $\text{ cal/cm}^2\text{ day}$ を実測している(大沼ほか, 1973)。又融雪期の日射量として70~640 $\text{ cal/cm}^2\text{ day}$ も示されている(中村, 1964)。従って崩壊斜面の水平面のうける全日射量は5月のよく晴れた日で550 $\text{ cal/cm}^2\text{ day}$ 程度を採った。

積雪表面の反射率 α (アルベド)(石井, 1955)を次に示す。

- 新 雪…………… 80~90%
- ざらめ雪 乾燥雪 55~65%

湿雪 45～55%

汚染雪 18～45%

現地積雪は湿雪ざらめ雪で汚染されない状態と想定して $\alpha = 0.5$ を採った。

今日射による一日間積雪表面の融雪量を水柱(mm)で表わすと

$$\begin{aligned}
 M_s &= 0.125 \times 550 (1 - \alpha) (1 - 0.2N_t - 0.47N_1) \dots (1) \text{式} \\
 &= 34.4 (1 - 0.2N_t - 0.47N_1) \\
 &= 34.4 \times N \dots \dots \dots (1)' \text{式}
 \end{aligned}$$

ここで $N = (1 - 0.2N_t - 0.47N_1) \dots \dots (2)$ 式はKuzmin (1972)による融雪の式中に示された係数で N_t , N_1 は夫々昼間に於て高雲, 低雲の雲量を分数で示した値をさす。

ここで, 快晴のとき $\dots N = 1$

高曇のとき = 0.8

雨天のとき = 0.33

崩壊地上方の斜面は, 赤倉山頂の尾根近くで 50° 弱の急勾配をもつが大半は $25^\circ \sim 33^\circ$ の勾配をもって崩壊斜面に連なる。崩壊面は 40° 前後の急勾配で白田川に向かって落ちこむ。この斜面の融雪量を算出するとき, 斜面の方位, 傾斜, 周囲山塊の高度などにより日射条件が異なる点を考慮する必要がある。斜面の主体は方位ESE及びENE, 傾斜 30° 程度とみなして高田市における水平面の日射量の約80% 440 cal/cm day を採用した。従って快晴の場合融雪量に換算して約7ミリ少い値を得る。

N-3 雪面・天空間の放射による融雪量

雪面から天空へ放射する長波の輻射と, 雲などから雪面へ到達する輻射との差が雪面の融解量となる。その値を水柱(mm)で示す。

$$\begin{aligned}
 M_r &= 0.125 \times 1440 \times \epsilon \times \sigma \left\{ (1 + 0.12N'_t + 0.12N'_i) (0.62 + 0.05\sqrt{E_a}) T_a^4 - T_s^4 \right\} \dots (3) \text{式} \\
 &= 1.472 \times 10^8 \times \left\{ N' (0.62 + 0.05\sqrt{E_a}) T_a^4 - T_s^4 \right\} \dots (3)' \text{式}
 \end{aligned}$$

M_r : 放射による融解量 mm/ day

σ : Stefan-Boltzmann の定数 $4.88 \times 10^{-8} \text{ Kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}$ 又は $8.26 \times 10^{-11} \text{ cal} \cdot \text{cm} \cdot \text{min} \cdot \text{deg}^{-4}$

T_s : θ_s °Cの雪温を絶対温度で示した値 \dots K

T_a : θ_a °Cの気温を " " "

ϵ : 長波の吸収率(雪に対し $\epsilon = 0.99$)

E_a : θ_a °Cの気温における水蒸気張力 \dots mb

N'_t : N'_i は夫々高層雲, 低層雲の雲量比

崩壊斜面における湿度は不明のため観測表の値をそのまま採用した。従って観測表に基づく日平均湿度H%のとき斜面の水蒸気張力 E_a は, 斜面の気温 θ_a °Cに対応する飽和蒸気圧Eと湿度Hとの積によって求めた。

$$E_a = \frac{E \cdot H}{100} \dots \dots \text{mb} \quad (4) \text{式}$$

田切地区の観測値と崩壊斜面の推定値は, 風速の場合現地の方が優り, 湿度の場合は逆に考えられ観測値をそのまま, 適用したとき互に相殺され融雪量の値に大きな影響はあらわれないものと推定した。

N-4 風・蒸発・凝縮による融解

大気対流による熱交換及び蒸発、凝縮による潜熱等考慮した融雪水量 M_k (mm) は次式で求められる。

$$M_k = 0.878(1 + 0.547u) \{ \theta_a - \theta_s + 1.75(E_a - E_s) \} \dots\dots(5) \text{式}$$

u : 風速…… m/s

θ_s : 雪温…… °C (0°Cとみなす)

E_s : θ_s °C の雪面における水蒸気張力……

$$\theta_s = 0^\circ\text{C} \text{ のとき } E_s = 6.1 \text{ mb}$$

$$\text{従って } M_k = (0.878 + 0.48u) \{ \theta_a + 1.75(E_a - 6.1) \} \dots\dots(5)' \text{ 式}$$

M_k を求める際 u の影響が大きい。 u は既述のとおり瞬時値の $1/1.5$ の値をとり現地斜面の平均風速とした。

N-5 日融雪量の算出結果

積雪の融雪水量は以上の3項目を合計したもので示される。

$$M_o = M_s + M_r + M_k \dots\dots \text{mm} \cdot \text{day} \dots\dots(6) \text{式}$$

各項の算出根拠は P, P, Kuz'min (1972) : Melting of snow cover に基づいた。(6)式による融雪水量の算出結果を表-4, 図-4 に示した。

表-4 日融雪量の算出値(崩壊斜面)

月 日	気 温 θ_a (°C)	水 蒸 気 力 張 E_a (mb)	平均風速 u (m/s)	N	N'	M_s (mm)	M_r (mm)	M_k (mm)	融雪量 M_o (mm)
4. 26	3.4	4.1	1.3	1.0	1.04	27.5	-18.0	-0.2	9.3
27	8.4	4.6	2.7	0.9	1.08	24.8	-9.5	5.0	20.3
28	7.8	6.3	2.0	1.0	1.04	27.5	-11.1	6.2	22.6
29	9.1	7.3	5.3	0.33	1.24	9.1	5.3	19.2	33.6
30	12.4	9.8	5.3	1.0	1.02	27.5	-4.7	38.6	61.4
5. 1	15.6	11.7	3.2	0.67	1.10	18.4	6.7	59.7	84.8
2	6.5	6.0	2.7	0.9	1.08	24.8	-10.2	13.8	28.4
3	6.6	4.4	1.8	0.96	1.06	26.4	-12.9	6.1	19.6
4	9.9	5.9	2.5	0.90	1.06	24.8	-8.1	19.9	36.6
5	9.0	6.9	2.3	0.96	1.02	26.4	-10.8	20.8	36.4
6	3.4	4.4	1.3	0.90	1.08	24.8	-14.8	0.7	10.7
7	7.5	7.4	1.8	0.66	1.18	18.2	-0.7	17.0	34.5
8	10.9	9.3	3.0	0.94	1.04	25.8	-5.4	38.3	58.7
9	14.0	10.0	2.7	0.90	1.10	24.8	15.2	45.4	85.4
10	7.4	9.5	1.3	0.33	1.24	9.1	10.4	20.1	39.6
11	5.4	7.4	1.2	0.45	1.22	12.4	-0.46	10.8	22.7
12	7.4	7.6	2.5	0.96	1.04	26.4	-10.3	20.8	36.9
13	11.8	8.5	1.7	1.0	1.0	27.5	-7.9	26.9	46.5
14	12.9	9.5	2.0	1.0	1.0	27.5	-5.8	34.7	56.4
15	11.0	7.7	2.7	1.0	1.0	27.5	-9.3	30.0	48.2
16	12.8	8.7	1.8	1.0	1.0	27.5	-6.7	30.2	51.0
17	15.5	9.9	2.2	1.0	1.0	27.5	-2.8	41.9	66.6

尚、式中に適用した観測値はすべて1日4回6時間毎の読取値の算術平均を1日平均値とした。斜面（発生源）に適用した各値の引用根拠及び単位を総合すると

θ_a : 気温(℃)…観測表(頸南消防署)の値から高度補正值7℃を差引いた値

θ_s : 雪温(℃)…融雪期の雪温を0℃とみなす

T_a : 気温(K)

T_s : 雪温(″)

E_a : θ_a ℃における水蒸気張力(mb) = $\frac{E \cdot H}{100}$

E : θ_a ℃における飽和蒸気圧(mb)

H : 湿度(%)…観測表を採用

E_s : θ_s ℃における雪面の水蒸気張力(=6.1mb)

u : 風速(m/s)…観測表の値の $1/1.5$

ϵ : 雪面の吸収率0.99

σ : ステファンボルツマン常数 $8.26 \times 10^{-8} \text{ cal/cm}^2, \text{ min}, \text{ K}^4$

α : 雪の反射率 0.5を採用

I : 日射量 $440 \text{ cal/cm}^2, \text{ day}$ を採用(但し5月快晴時)

表-4に示したように4月26日までは 10 mm 前後の日融雪量を保持してきたが、27日以降 20 mm 以上の融雪が続き5月1日、9日は 80 mm を超す大量の融解が起っている。4月27日から5月17日まで21日間の積算融雪水量は 901 mm に達し平均一日 43 mm に相当する。積雪表面の密度を仮に 0.45 g/cm^3 とすれば減少する積雪の厚さは夫々次に示される。

融雪水量 10 mm ……………	2.2 cm	積雪の厚さ
” 20 mm	4.4 cm	”
” 30 mm	6.7 cm	”
” 43 mm	9.6 cm	”
” 85 mm	19.0 cm	”

従って 43 mm 即ち平均 10 cm 程度の融雪が続き、この期間内だけでも約 2 m の積雪(密度 0.45)が融けた事になる。

一日 10 cm 程度の融雪は平地の融雪期にも時々見られることでさほど異常でないが、21日間の平均値として示された事は、異常とみななければならない。平地の融雪期は3月中旬から4月中旬頃まで、まだ平均気温が高くない時点で進行しているのに対し、今回の融雪は平地の融雪条件を大きく上廻る状態で、しかも長い期間さらされたため融雪が異常に促進した。又 80 mm 以上の融雪量が2回も出現したことについては

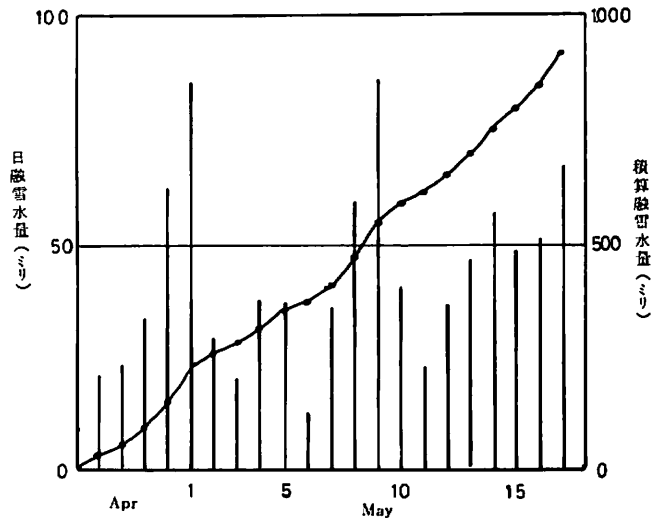


図-4 災害発生までの日融雪水量(崩壊斜面)

日平均気温14～15℃，日中の最高気温24℃前後で風も強い気象条件の場合当然起りうることで，ただ平地ではこのような気象条件に遭遇する機会が非常に少ない。融雪の遅れる山岳部ほどこのような異常の気温上昇に出合う機会が多いことを注意しなければならない。また快晴の場合夜間の放射冷却により融雪日量がおさえられるのに対し，夜間雲量が増し強風が吹いた場合却って一日の融雪量を増すことも注意したい。

V 崩壊地に流入する融雪水量

これまで現地積雪の融雪経過について検討してきたが，この融雪水が崩壊した斜面にどのような働きを示したか検討しなければならない。これまで融雪水量の対象とした4月26日以降は融雪水の殆んどが地表に到達しているものと考えられる。地表からどの程度地下に浸透したかは，現地の土質，植生状態などから今後解明しなければならないが，少なくとも20ミリ以上の融雪水が十数日間供給された後は表土は飽和状態となり，日中の融雪のはげしい時は大量の流水となって地表を流れた事が推定される。5月24日現地調査の際も近くの斜面を大量の融雪水が道路にそって流れていた。この融雪による表流水が崩壊面に直接注ぐとみられる流域面積は1/25,000の地図から約14.2haとなる。（崩壊面積は除く），この面積は水平投影の値であるから，傾斜など地形要素を考慮すると17～20haと考えられる（5月23日現地撮影の航空写真から解析した水平投影面積は約24haを得たが引伸写真の縮尺に疑問があり採用は見合せた）。

災害発生当時この斜面は尾根に近い急斜面を除き，大半積雪におおわれていたものと見られるので積雪斜面の面積は（17～20）×0.9即ち（15～18）ha程度が想定される。

日融雪量を W で示すと流域面積の融雪水量は次に示される。

日融雪量	斜面の融雪水量	
10	1,500～1,800m ³ /day	1～1.25m ³ /min
20	3,000～3,600	2.1～2.5
30	4,500～5,400	3.1～3.75
43	6,450～7,740	4.5～5.4
85	12,750～15,300	8.85～10.6

このように上方斜面の融雪水だけでも日によっては15万立方mにも達する大量が崩壊地に流入した。流入のルートは上方斜面の沢状をなす部分が主とみられ，この沢は11月現地を再調査した際1～2m径の巨石が連なる小川であることを確認した。斜面の融雪水の大部分をこの沢に集め流れる際，斜面を横切る林道上にあふれ出たか或いは林道沿いに勾配の低い方に流れたか，又は道路に生じた亀裂に流れこんだか確認できない。

斜面中にある沢は流水のため消雪し大部分露出している状態が5月23日の写真撮影により認められる。而し災害10日前の写真では沢附近の消雪はみられず林道も積雪に全くおおいかくされている。当時の融雪水は積雪下に空洞を作り流れていたものと推定される。

崩壊地の南側はこの沢筋からへだたっており林道沿いに流れこむ水を除いては，上方の狭い斜面の融雪水だけが流入する（林道は南へ向って緩い勾配で下る）。従って融雪水の大量の供給は考えられない。この部分は雪崩のデブリにおおわれている場所で，むしろ雪圧による林道の破損が強く推定される個所である。

VI 雪圧による林道の破損

発生源付近の今冬の最大積雪深は先に4m程度とした。従って積雪重量の最大値は1.3 ton/m²前後が普通適用できる。斜面上の積雪による静荷重は斜面の単位面積あたりは



写真-1 崩壊前の現地
(光国俊夫撮影)



写真-2 崩壊後の現地

$$\begin{aligned} \text{斜面と直角方向} \quad WQ &= 1.3 \operatorname{Co} \delta^2 \varphi \cdots \cdots (\text{ton}/\text{m}^2) \\ \text{斜面と平行方向} \quad W_n &= 1.3 \sin \varphi \cdot \operatorname{Cos} \varphi \cdots \cdots (\text{ton}/\text{m}^2) \\ &= 0.65 \sin 2\varphi \end{aligned}$$

φ は斜面の傾斜度を示し $\varphi = 20^\circ \sim 50^\circ$ の場合、 $WQ = 0.08 \sim 0.65$ の値をとる。

このように斜面積雪自体の静荷重はそれほど問題にならない。しかし融雪期に近づき積雪底面にすべりを生じた場合それを阻止する地物がない限り雪崩に発展する。阻止するのは地表の摩擦、立木、地形の凹凸などで、斜面を横切る道路もこれに相当する。これらの阻止物には斜面雪圧が作用する。その大きさは次式から夫々求められる。

$$\begin{aligned} \text{斜面の傾斜方向に} \quad S_n &= \gamma \frac{H^2}{2}, K, N \cdots \cdots (\text{t}/\text{m}) \\ \text{斜面と直角方向に} \quad S_Q &= \frac{a}{N \cdot \tan \varphi} \cdot S_n \cdots \cdots (\text{t}/\text{m}) \\ \text{但し } \gamma &: \text{積雪の平均密度} \cdots \cdots (\text{t}/\text{m}^3) \end{aligned}$$

H: 積雪深 (m)

K: クリープ係数

N: グライド係数

a: 雪質に関する比 $= \frac{1-2V_c}{2(1-V_c)}$

V_c : 積雪のポアソン比

先にのべたように災害発生前に撮影した現地写真から、斜面を横切る道路はとところどころ積雪中に埋没し、表面は連続した斜面を形成し道路位置は確認できない。埋没部分は道路が沢を横切る地点及び雪崩のデブリで埋められた地点を中心としている。その他は道路山側の切取法面が積雪中から露出しており、道路により斜面の積雪は上下に分断される。

道路山側の斜面は大部分 $20 \sim 30^\circ$ の緩傾斜であり道路に直接大きな斜面雪圧は作用しない。

谷側は 40° 前後の急傾斜であり融雪期は当然雪崩を想定される斜面である。而し写真からは谷側斜面の雪崩発生は示されていない。

従って融雪期グライドが増した時点この谷側の斜面積雪が何処で支持されたか。

先ず一般的には谷側斜面の下部であるが、ここは上方からの浸出水が湧き出る湿地帯であり、大きな斜

面雪圧を阻止するような支持力はない。従って崩壊前の斜面積雪は下端で支持できず道路によって支持されたものとみられる。道路上の積雪が谷側斜面の積雪を支えた場合張力の最大値は路肩部分の積雪中に作用する。自然積雪の層構造であれば張力に抗しきれず、ここにクラックを生じやがて雪崩を発生する。而し道路上の積雪が雪崩のデブリによる厚い層でおおわれていて、また破壊強度の大きな雪質に変っていることが考えられるから道路上の積雪ではクラックを発生しない。従って道路地盤に大きな雪圧が直接作用する。一般に取扱われる圧縮に伴う斜面雪圧と異なり、張力に基く斜面雪圧が作用したことになる。

作用した雪圧は地表上の積雪条件によって変るが積雪深 3 m, 平均密度 0.4 ton/m³, 傾斜 40° とみた場合約 5 ton/m が求められる。

このような雪圧により道路に亀裂を作る可能性は充分ありこのような雪圧による道路の損傷は毎冬繰返されてきたものとみなければならない。このような道路破損はそれ自体今回のような大崩壊につながらない。亀裂のあり方, 融雪水の流入時期, 量などの関連を確かめる要もあろう。而し崩壊の誘因として道路欠陥, 大量の融雪水は避けることができない。尚雪圧の増加した時期は 4 月 27 日以降融雪水量の増加した時期とほぼ同じ頃とみられる。斜面の大崩壊は, この道路欠陥から大分遅れて発生したものと推定される。

Ⅶ お わ り に

積雪という面から崩壊原因の究明を試みたが融雪, 雪圧ともに崩壊に対して何等かのつながりをもつ事が分っていても, その定量的解析や直接の結びつきはかなり煩わしい。

殊に融雪については種々の資料不足から困難を極めた。災害現地と観測点との対応はかなり多くの推定値に頼らざるを得なかった。このため日単位で融雪量を算出する Kuzmin の手法を導入し解析した結果当時の融雪状況のある程度把握できたものと考えている。今後各地の観測箇所と現地気象との相関を詳細に検討する予定でいる。

雪圧はかなり一般的な究明は進んでいるので現地の崩壊前の地形解析をより正確に把握することで, 地形破壊箇所を究明できるものと思われる。

文 献

- Kuzmin . P . P (1972) : Melting of snow cover, (E . Vilim 訳)
中村千里 (1964) : 北陸農業試験場研究報告, 7
日本雪氷学会 (1955) : 雪氷の研究, 2
大沼匡之 (1973) : 北陸農業試験場研究報告, 15