

大規模雪崩の流動性

和泉 薫*

Mobility of large-scale avalanche

by

Kaoru IZUMI

(Abstract)

Relations among the total volume (V) of avalanche snow in a rupture zone, the vertical height (H), the total horizontal distance (L) and the altitude (h) of the highest point of rupture (Fig.1) were investigated, using the records of recent 17 avalanches which brought disaster including several large-scale avalanches (Table 1). The following results were obtained:

1) The equivalent coefficient of friction ($\mu=H/L$) decreases with an increase in avalanche volume (V) (Fig.2). An avalanche larger in scale can travel a longer horizontal distance for the same vertical height at which it occurs. (The arrow in the figure was put on the avalanche which went down naturally without encountering structures such as the house, the bridge and the steel tower.)

2) Large-scale avalanches greater than $1 \times 10^5 \text{m}^3$ in volume are surface avalanches of dry snow and have smaller equivalent coefficients of friction than any other avalanche (Fig.2).

3) The excessive travel distance (L_e) can be defined as the horizontal distance of the front of the avalanche beyond the distance one expects from a frictional slide down with a coefficient of kinetic friction of $\tan 32^\circ$, namely,

$$L_e = L - H / \tan 32^\circ .$$

The excessive travel distance (L_e) of the dry snow avalanche which indicates the mobility of the avalanche increases with an increase in avalanche volume (V) (Fig.4) and increases linearly with an increase in altitude (h) of the highest point of rupture (Fig.6).

4) The minimum value of the angle (θ) of elevation of the avalanche from the outer end of debris to the highest point of rupture (Fig.1) is considered to be 18° empirically in Japan. Figure 3 shows that almost all avalanches meet this criterion.

* 新潟大学積雪地域災害研究センター

I ま え が き

雪崩と同様、斜面上の物体が崩れ落ちる現象に斜面崩壊がある。大規模な崩壊は、岩屑の早い流れ(岩屑流)を発生させることがよくあり、その流れは平らな道筋を思いがけない遠方にまで到達する。Hsi (1975) は崩壊の出発点から岩屑流の堆積の最低点までの高度差と最大到達距離との比及び、この最大到達距離と普通の摩擦係数ですべり下った場合の到達距離との差は、ともに崩壊量に関係し、大規模なものほど遠方まで到達することを見出した。

雪崩の場合も、降雪量が非常に多い豪雪時には、大規模な雪崩が平年の雪崩範囲を超えて到達し、大きな災害が発生しており、大規模崩壊との類似性が考えられる。雪崩についての、高度差、最大到達距離と発生量(発生源から崩落した雪の体積、走路途中の取り込み量を含んでいない)との関係は、雪崩防災対策上、重要な基礎資料となるが、個々の雪崩についての詳細な調査例、特に大規模雪崩についての調査例がほとんどないため、これまでは定性的な記述しかなかった。

しかし、近年、日本海側は56豪雪、59豪雪と相次いで豪雪に見舞われ、大規模な乾雪表層雪崩が新潟県内を中心として発生し、その結果、一般集落までが被災するという事態も起きた。このため、関係各機関の詳細な調査が行われ、大規模雪崩についての資料が蓄積される結果となった。

そこで、これらの資料とそれ以前の雪崩調査の文献を使って、雪崩の高度差、最大到達距離と発生量の関係などについて調べた結果を報告する。

II 雪崩の地形諸量

雪崩の発生から堆積までの地形の模式図を図-1に示した。雪崩は発生源最上部aから出発し、経路cを経てデブリ(雪崩堆積物)末端bまで到達する。経路cを水平面に投影した長さを最大到達距離(水平距離) L とし、 L を直線にのぼした時のデブリ末端b'から見たaの仰角を α とすると、高度差 H との間に、

$$H/L = \tan \alpha \quad (1)$$

の関係がある。また、雪崩の見通し角はbから直線的に見たaの仰角 θ であるから、この直線経路 c_0 を水平面に投影した長さを L_0 とすれば、高度差 H との間に、

$$H/L_0 = \tan \theta \quad (\theta \geq \alpha) \quad (2)$$

の関係がある。

ところで、雪崩はある種の摩擦現象と考えることができるので、ここでは最も単純に、雪崩を摩擦のある斜面をすべり下る質量 M の質点と考えることにする。この質点が斜面に沿って ds の距離を移動した際に、摩擦によって消費されるエネルギー E_f は、 dl を水平距離、 μ を動摩擦係数、 g を重力加速度とすると、

$$E_f = \mu Mg \cos \theta ds = \mu Mg dl \quad (ds = dl \sec \theta) \quad (3)$$

となる。 E_f は位置のエネルギーの解放で補われなければならないから、最終的に雪崩が水平距離 L 、高度差 H だけ移動して止まったとすると、

$$\mu MgL = MgH \quad (4)$$

という関係が成立し、これと(1)式から、

$$\mu = H/L = \tan \alpha \quad (5)$$

となる。(5)式は経路の縦断形状に無関係に成立する。ここではこの μ を、奥西(1984)のように、等価摩擦係数と呼ぶことにする。

この斜面をすべり下る雪崩の典型としては、全層雪崩がある。全層雪崩のように積雪が地表面をすべる際の動摩擦係数の測定値は、ばらつきが大きい。だが、動摩擦角にして 30° 前後の値がよく報告されている(日本建設機械化協会, 1977)。また遠藤・秋田谷(1974)が、笹地と裸地の斜面積雪の滑動実験によって測定した動摩擦角は、平均で約 32° である。そこでここでは、斜面を剛体的にすべり下る全層雪崩の動摩擦角を、仮に 32° と考えることにする。まえがきで述べたHsüの“普通の”摩擦係数とは、ここでの扱いと同様、崩壊物体が剛体的に斜面をすべり下るときの動摩擦係数のことである。

動摩擦角 α が 32° で、斜面を剛体的にある高度差だけすべり下った場合、到達する水平距離は(5)式から求められる。実際の雪崩が、同じ高度差で、この水平距離以上に遠方まで到達した場合、実際の最大到達距離と、この計算上すべり下った水平距離との差(超過距離 L_e)は、この雪崩の流動性を表わす指標と考えられる。この L_e は、実際の雪崩の高度差を H 、最大到達距離を L とすると、次式から求められる。

$$L_e = L - H / \tan 32^\circ \quad (6)$$

III 調査結果

これまでの雪崩調査の文献から、雪崩発生量のわかっているものを選び出し、上述の地形諸量を調べ、表-1に示した。雪崩件数は17で、ほとんどの雪崩がなんらかの被害をもたらした災害雪崩である。発生場所別に分けると、新潟県が9件、北海道が6件、あと長野県と福井県が1件ずつである。雪崩種類別には、湿雪全層が7件、乾雪表層が6件、乾雪全層が4件で、乾雪表層雪崩については全部が新潟県における発生である。

標高、高度差、最大到達距離、見通し角は、文献に数字で出ているもの以外、文献中の図面から読み取り、それによって等価摩擦係数、超過距離を計算した。見通し角で、図面から求められた値と文献中の実測値とが違っている場合もあったが、その場合は実測値を採用した。発生量を文献中の積雪深と図面の面積から計算した場合もあった。また、文献中の数字が1~2のように幅をもっていた場合には中間値1.5を表に示した。

この表-1にあげた17件の雪崩について、地形諸量と雪崩発生量との関係などを調べた結果を次に述べる。

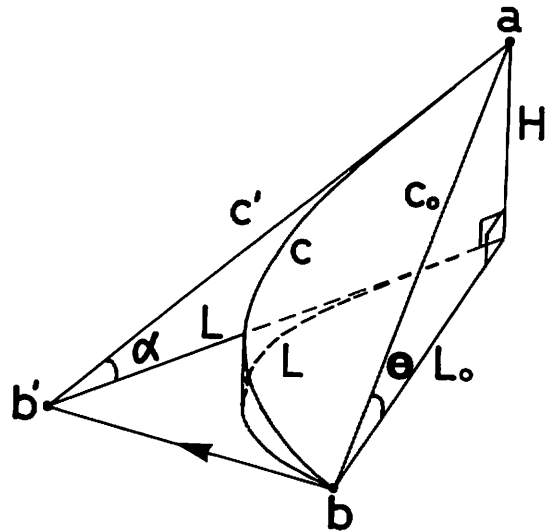


図-1 雪崩の地形模式図
 Fig. 1 Schematic diagram of avalanche geometry.
 a : the highest point of rupture,
 b : outer end of debris,
 c : avalanche path,
 θ : angle of elevation from b to a,
 H : vertical height,
 L : horizontal distance.

表-1 調査雪崩の諸元
Table 1 Dimensions of investigated avalanches.

No	場 所	発生日月日	雪崩種類	標 高 h (m)	高度差 H (m)	最大到達距離 L (m)	等価摩擦係数 $\tan \alpha$	超 過 距離 L_e (m)	見 通 し 角 θ (°)	発 生 量 V (m ³)	文 献
1	北海道宗谷本線下平陸橋	1961. 1. 26	乾雪全崩	150	220	370	0.59	18	31	2×10^4	福山 (1961)
2	北海道日高 (北)	1961. 4. 5	湿雪全崩	810	150	240	0.63	0	34	1.8×10^4	吉田・他 (1963)
3	北海道日高 (南)	1961. 4. 5	湿雪全崩	970	170	240	0.71	-32	36	1.3×10^4	" "
4	北海道古平町	1964. 4. 1	湿雪全崩	325	140	210	0.67	-15	33	3.1×10^4	藤岡・他 (1964)
5	福井県勝原スキー場	1967. 1. 29	湿雪全崩	350	86	148	0.58	10	30	9.6×10^2	妹尾 (1967)
6	北海道稚内市	1974. 4. 4	湿雪全崩	80	70	120	0.58	-1	30	2×10^3	千島 (1976)
7	長野県五竜とおみスキー場	1978. 2. 24	湿雪全崩	1,210	195	266	0.73	-46	28	1.3×10^4	広部・他 (1978)
8	新潟県守門村大倉	1981. 1. 7	乾雪表崩	600	260	770	0.34	350	19	1.5×10^5	中俣 (1983)
9	新潟県湯之谷村下折立	1981. 1. 18	乾雪全崩	350	125	250	0.50	50	30	9.6×10^3	59豪雪の記録 (1981)
10	北海道ニセコスキー場	1981. 4. 25	湿雪全崩	1,200	510	1,300	0.39	480	22.5	4.2×10^4	秋田谷・他 (1981)
11	新潟県清里村赤池	1984. 1. 30	乾雪全崩	480	42	113	0.37	46	20	8×10^3	59豪雪の記録 (1984)
12	新潟県中里村清津峡温泉	1984. 2. 9	乾雪全崩分	700	330	690	0.48	160	28	4.5×10^4	" "
13	新潟県六日町黒又沢	1984. 2. 10	乾雪表崩	1,000	580	1,420	0.41	490	24.5	3×10^5	" "
14	新潟県塩沢町西谷後沢	1984. 2	乾雪表崩	900	280	1,300	0.22	850	18	1.3×10^5	大関・他 (1985)
15	新潟県妙高村幕ノ沢	1984. 2. 15	乾雪表崩	1,720	970	3,350	0.29	1,800	17	2.5×10^5	下村 (1984)
16	新潟県湯沢町堀切	1984. 2. 29	乾雪表崩	800	480	1,100	0.44	330	24	5.5×10^4	59豪雪の記録 (1984), 大関・他 (1985)
17	新潟県湯沢町湯沢	1984. 2. 29	乾雪表崩	570	230	500	0.46	130	25	7×10^3	59豪雪の記録 (1984), 山田・他 (1984)

1. 等価摩擦係数と雪崩発生量

等価摩擦係数 μ (= 高度差 H / 最大到達距離 L) と雪崩発生量 V の関係を、図-2 に示した。黒丸印が湿雪全層、白丸印が乾雪全層、白三角印が乾雪表層の雪崩を示している (以下同じ)。

これによれば、全体的には発生量の増大につれ等価摩擦係数は小さくなっている。このため同じ高度差での発生でも発生量が大きければ、遠方まで到達することになる。また、その値が0.5以下はほとんどが乾雪雪崩であるが、これは、湿雪雪崩の運動型が主にながれ型なのに対し、乾雪雪崩はながれ型とけむり型の混合型が普通で到達距離も大きい (アメリカ林野局, 1974) ことと対応している。さらに、発生量が 10^5m^3 を超える大規模な雪崩は、乾雪表層雪崩に限られ、しかもその等価摩擦係数は他の雪崩よりも小さい。大規模な乾雪表層雪崩が発生した場合には、高度差に比して到達距離が大きいため、思いがけない程遠くの地点まで被害が及ぶ危険性がある。

図-2 に示した17件の雪崩のうちには、家屋、橋、鉄塔などの建造物を破壊したものが多く含まれている。道路上にこうした建造物がなく、自然状態で流れ下った雪崩を、図中では矢印を付けて区別した (以下同じ)。同じ規模、種類の雪崩でも、矢印付きの雪崩は等価摩擦係数が小さく、高度差に比して遠方まで到達していることがわかる。

2. 見通し角と雪崩発生量

雪崩危険区域の判定には、見通し角がよく使われている。そこで、図-3 に見通し角 θ と雪崩発生量 V の関係を示した。雪崩経路が図-1 のように曲っている場合には、見通し角 θ よりも等価摩擦角 α の方が小さくなるが、全体としての傾向は図-2 と大きく違ってはいない。

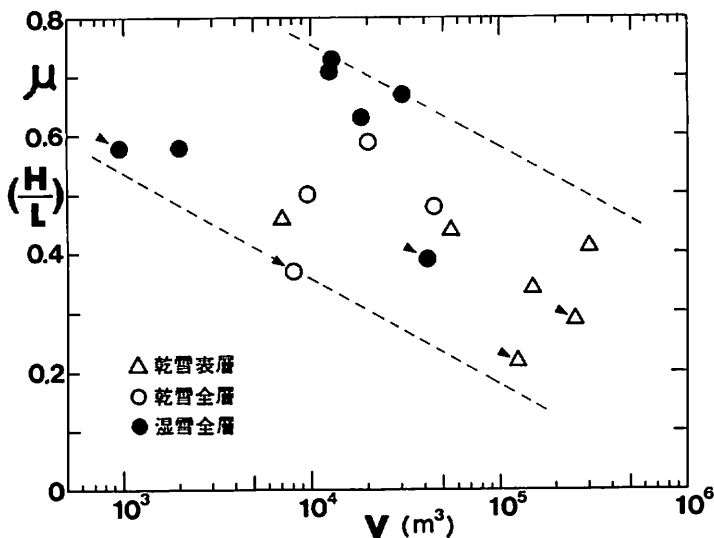


図-2 等価摩擦係数 μ と雪崩発生量 V の関係
 Fig. 2 Variation in equivalent coefficient of friction (μ) with avalanche volume (V).
 (Δ) surface avalanche of dry snow; (\circ) full-depth avalanche of dry snow; (\bullet) full-depth avalanche of wet snow; the arrow in the figure was put on the avalanche which went down naturally without encountering structures; the same notations used in the following figures.

図-3には、統計的に得られた表層雪崩 18° 、全層雪崩 24° という最大到達の見通し角（日本建設機械化協会，1977）も一点鎖線で示した。この基準は、この値を下回る見通し角の地点には雪崩が到達しないことを意味している。図によると、矢印付きの全層雪崩2件と表層雪崩1件は、この基準を下回って遠方まで到達している。しかし、雪崩全体として最大到達の見通し角を 18° と考えると、この基準はほぼ満足されていることがわかる。

上述の2件の全層雪崩のうち、湿雪全層にもかかわらず見通し角が 22.5° と極めて小さな値となった雪崩は、表-1のNo 7の雪崩である。この雪崩では、硬度の比較的大きな雪が、途中で地表の一部を削り、側方に高さ数mの雪提を作りながらも、約1.5 kmも流下している（秋田谷・他，1981）。この特異な流動現象は興味深いものであるが、詳しいことはわかっていない。

3. 超過距離と雪崩発生量

(6)式から求められる超過距離 L_e と雪崩発生量 V の関係を図-4に示した。超過距離 $L_e = 0$ の場合は、雪崩が動摩擦角 32° で剛体的にすべり下ったのと、同様な運動形態であったことを示している。全層雪崩については、2件の例外を除けば、発生量によらずほぼこれと似た状況にあったことがわかる。これに対して、乾雪表層雪崩では、発生量が増えるにつれ超過距離は増大している。すなわち、剛体的にすべり下る場合より流動性が増し遠方まで到達すること

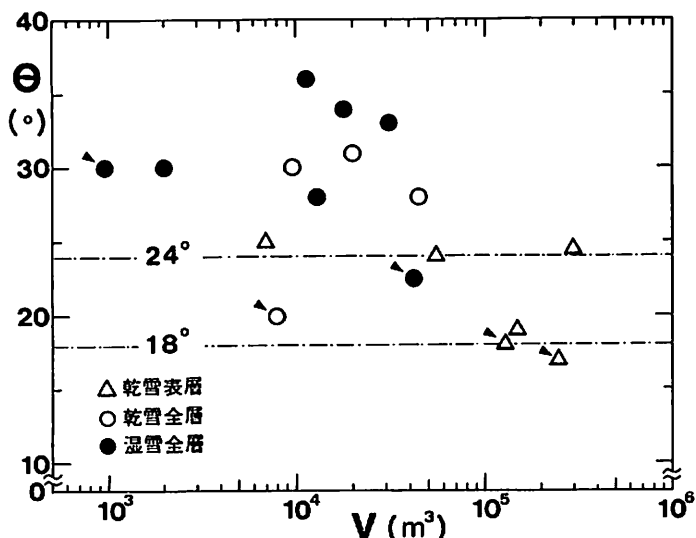


図-3 見通し角 θ と雪崩発生量 V の関係
 Fig. 3 Variation in angle of elevation (θ) with avalanche volume (V).

を示している。これは乾雪表層雪崩が、発生量の増大につれ、ながれ型よりもけむり型主体の運動をするためと考えられる。

特に矢印付きの雪崩では、発生量が 10^5m^3 以上になると、超過距離が1 kmを超える場合がでてきている。大規模乾雪表層雪崩の発生が予想される豪雪の際には、雪崩の最大到達地点をより遠方に考えなければならない。

4. 標高と雪崩発生量

図-5に、発生源最上部の標高 h と雪崩発生量 V との関係を示した。全体としては標高が高くなるにつれて発生量も増えていることがわかる。これは一般に、標高が高くなるにつれて、積雪量が增大することによって考えられる。よって、雪崩発生源が高標高にある場合には、大規模な雪崩発生の可能性が大きくなる。

5. 標高と超過距離

発生源最上部の標高 h と超過距離 L_e の関係を、図-6に示した。全層雪崩については、2件を除いて超過距離はほぼ0で、標高による違いは見られない。これに対して乾雪表層雪崩は標高が高くなるにつれて、超過距離は直線的に増大している。この乾雪表層雪崩は、すべて新潟県内において豪雪時に発生した雪崩で、地域と時期が限られたためこのような標高と超過距離の直線関係が見られたものと思われる。特に、標高1,700mからの発生では、超過距離が1.8kmにも達しており、高標高から発生した乾雪表層雪崩の到達距離が極めて大きいことがわかる。

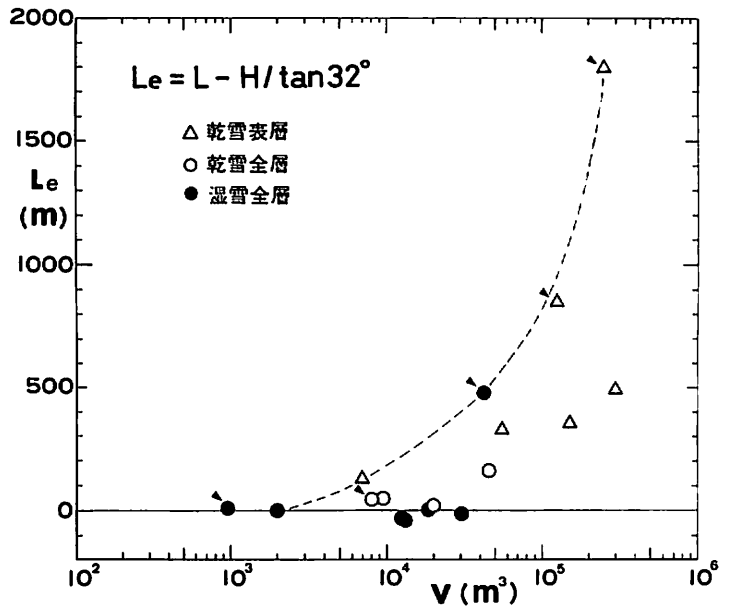


図-4 超過距離 L_e と雪崩発生量 V の関係
Fig. 4 Variation in excessive horizontal distance (L_e) with avalanche volume (V).

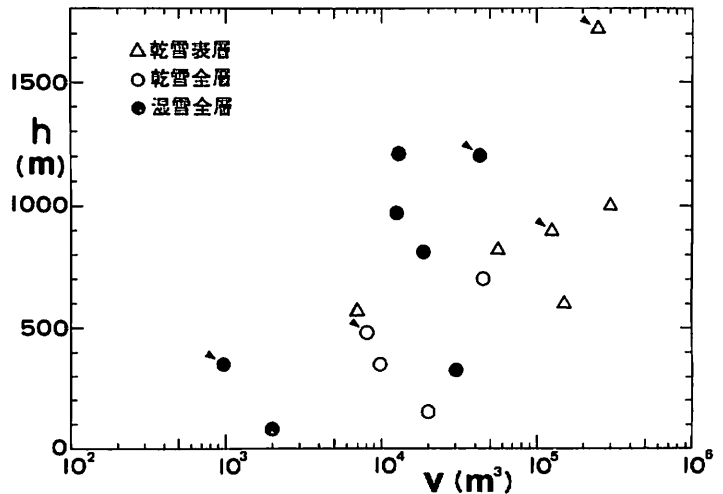


図-5 発生源最上部の標高 h と雪崩発生量 V の関係
Fig. 5 Relation between altitude of the highest point of rupture (h) and avalanche volume (V).

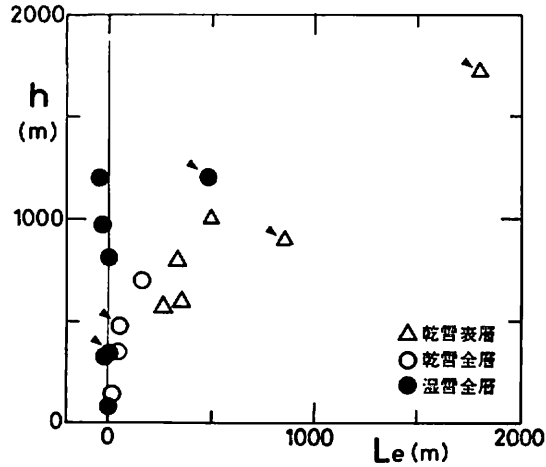


図-6 発生源最上部の標高 h と超過距離 L_e の関係

Fig. 6 Relation between altitude of the highest point of rupture (h) and excessive horizontal distance (L_e).

IV ま と め

過去における雪崩調査の文献によって、雪崩の発生量、高度差、最大到達距離、見通し角、発生点標高の間の関係を調べた。その結果次のことがわかった。

- 1) 雪崩発生量の増大につれ、等価摩擦係数 (= 高度差 / 最大到達距離) は小さくなり、同じ高度差でも遠くまで到達する。
- 2) 発生量が 10^5m^3 を超える大規模雪崩はすべて乾雪表層雪崩で、最も小さい等価摩擦係数はこの種の雪崩から得られた。
- 3) 乾雪表層雪崩では、発生量とともに超過距離 (動摩擦角 32° ですべり下った場合の水平距離を超えて到達した距離) は増大し、流動性が増してくる。また、この超過距離は、発生点の標高が高くなるにつれて、直線的に増加する傾向にあった。
- 4) 見通し角が、最大到達の基準 (全層 24° 、表層 18°) を下回る雪崩もあったが、全体としてはほぼ 18° 以上を満足していた。

終りに、この論文を昭和60年3月に新潟大学を定年退官された中俣三郎教授に捧げます。また、この報告を書くにあたり、北大低温科学研究所、秋田谷英次助教授からは多くの助言をいただいた。ここに心から感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 秋田谷英次・遠藤八十一・小野寺弘道・酒谷幸彦 (1981) : 北海道・ニセコスキー場のなだれ、低温科学, 物理篇, 40, 165-169.
- アメリカ林野局 (1974) : 雪崩 (橋本誠二・清水弘訳), 北大図書刊行会, 1-338.
- 千島昭二 (1976) : 1974年4月4日、稚内市内で発生したなだれについて、雪氷, 38, 62-65.

- 遠藤八十一・秋田谷英次(1974)：斜面積雪の滑動実験(序報)．低温科学，物理篇，32，267-272．
- 福山幹基(1961)：下平陸橋の雪崩事故について．雪氷，23，70-71．
- 藤岡敏夫・清水 弘・秋田谷英次・成田英器・鈴木義男・遠藤八十一(1964)：積丹半島古平の雪崩調査報告．低温科学，物理篇，23，129-136．
- 「59豪雪の記録」編集委員会(1984)59豪雪の記録．土木学会・新潟会，1-358．
- 「56豪雪の記録」編集委員会(1981)56豪雪の記録．土木学会・新潟会，1-276．
- 広部良輔・山田 稔・五十嵐高志(1978)：積雪に伴う災害の調査研究(1977~78年冬季)．国立防災科学技術センター研究速報，32，1-60．
- Hsü, K. J. (1975)：Catastrophic Debris Streams (Sturzstorms) Generated by Rockfalls. Bull. Geol. Soc. America, 86, 129-140.
- 妹尾博文(1967)：なだれの観測と発生機構の研究．福井大学教育学部紀要，第Ⅱ部，自然科学，17，37-41．
- 中俣三郎(1983)：雪崩の危険度について(その2)．新潟大学災害研年報，5，77-87．
- 日本建設機械化協会(1977)：新防雪工学ハンドブック．森北出版，1-511．
- 奥西一夫(1984)：大規模崩壊のメカニズム．地形，5，179-193．
- 大関義男・渡辺成雄・庭野昭二(1985)：新潟県南部の大規模雪崩災害．治山，29，331-337．
- 下村忠一(1984)：妙高高原幕ノ沢の大雪崩．昭和59年度日本雪氷学会雪崩懇談会．
- 山田 稔・五十嵐高志・納口恭明(1984)：59豪雪時の災害なだれの現地調査について．昭和59年度日本雪氷学会秋季大会講演予稿集，142．
- 吉田順五・藤岡敏夫・木下誠一・若浜五郎(1963)：北海道日高の雪崩調査報告．低温科学，物理篇，21，75-94．